

**VOYAGE
DANS
L'ESPACE**

Épisode

40

L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE



Avec un grand scientifique québécois

Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur, Mathieu Rancourt et Richard Massicotte 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 chaque balado, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Ils publient ces exposés sous forme de fascicules pdf, comme celui-ci. Il s'agit donc d'une conversation entre l'animateur de *Voyage dans l'espace*, Richard, et le passionné d'espace, Claude.

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. **Richard Massicotte** a été journaliste à la radio de Radio-Canada, notamment aux *Années lumière*.

L'équipe des fascicules:
Rédaction: Richard Massicotte
Edition: Claude Lafleur
Couverture: Mathieu Rancourt
Illustrations: J.-R. Roy, *Trente images...*

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

Courriel: claudio-lafleur1@videotron.ca

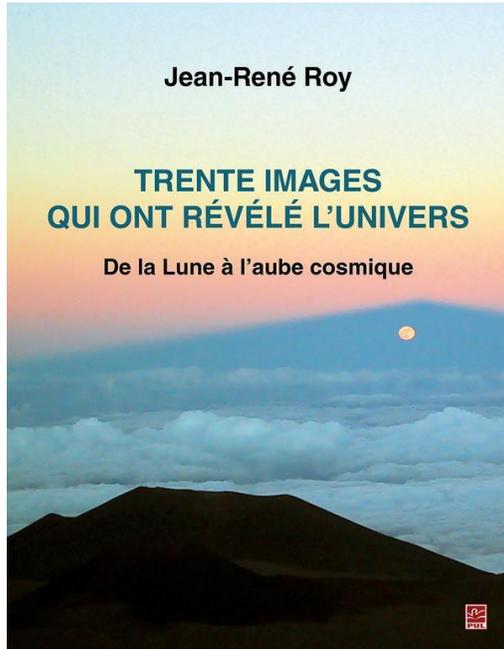
© Copyright, Claude Lafleur, 2019

ISBN 978-2-923275-88-8 (pdf)

ISBN 978-2-923275-89-5 (kindle)

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 2020

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Canada, 2020



En savoir [plus...](#)

Trente images qui ont révélé l'univers

De la Lune à l'aube cosmique

Par [Jean-René Roy](#)

«Plusieurs images charnières ont bouleversé notre vision de l'univers, causant une rupture; chaque fois, elles ont ouvert de nouveaux espaces jusque-là insoupçonnés. J'ai choisi trente images tirées de l'histoire ancienne et actuelle de l'astronomie. Je les accompagne de plusieurs autres images pour en décrire la fécondité épistémologique et illustrer leur contexte historique.»

312 pages

Format papier: 59.95 \$

Format PDF: 59.95 \$

L'astronomie par l'image avec un grand scientifique québécois

[Écoutez](#) le balado *L'astronomie par l'image* diffusé le 1^{er} décembre 2019.

Jean-René Roy est astrophysicien. Après son doctorat en astronomie de l'Université de Western Ontario en 1973, il a travaillé dans des instituts de recherche aux États-Unis, aux Pays-Bas et au Canada, et fut professeur au Département de physique de l'Université Laval de 1977 à 2000. Il a ensuite travaillé à l'Observatoire Gemini à Hawaii et au Chili, à la National Science Foundation et enfin au Space Telescope Science Institute. Il est auteur de plusieurs ouvrages en français et en anglais, dont *Trente images qui ont révélé l'univers*, tout juste sorti des Presses de l'Université

Laval (PUL). Richard Massicotte l'a rencontré le 22 novembre 2019.



Jean-René Roy, astrophysicien rattaché à l'Université Laval.

Bonjour Jean-René. Aujourd'hui, nous allons parler de votre livre. Peut-on dire qu'il s'agit du plus récent?

C'est le plus récent en effet puisqu'il est sorti au début de novembre [2019].

Il est presque tout chaud, si on veut, et ce serait un beau cadeau de Noël sous le sapin: *Trente images qui ont révélé l'univers, de la Lune à l'aube cosmique*, publié aux PUL.

C'est un livre assez volumineux, 312 pages, un beau livre. Comme le titre l'indique, il y a beaucoup d'images; cela vous a demandé beaucoup de recherche ou vous les aviez déjà?

En fait, c'est beaucoup de travail, mais j'ai pondu ce livre assez rapidement, puisque ça faisait cinquante ans que j'y travaillais inconsciemment! En fait, je me suis rendu compte, quand je regarde mes livres – il y en a [une dizaine](#) maintenant – que j'ai toujours des images dans mes livres. Pour moi, faire un livre sans images, c'est impossible!

Et puisque vous parlez de ces cinquante ans, on sent et on lit un peu de votre parcours dans cet ouvrage.

Je le pense, en bonne partie parce que je me suis toujours intéressé à l'histoire des sciences et à celle de l'astronomie en général, et surtout aux gens qui sont derrière ces découvertes incroyables, mais des découvertes qui, sur le coup, ne sont pas perçues comme quelque chose qui va nous ouvrir une nouvelle fenêtre sur le monde.

J'ai choisi trente images, mais j'aurais pu en prendre un peu plus ou un

peu moins. J'ai toutefois trouvé que le nombre trente était bon. Cependant, je n'appelle pas ça «les trente images qui ont révélé l'Univers», mais j'en ai simplement choisi trente.

Ce sont vos trente images...

Exactement.

Mais il n'y en pas uniquement trente dans les pages de votre livre!

Oh non! Il y en a à peu près 250.

Dans le fond, il s'agit des images qui sont le fruit de rencontres professionnelles, notamment lors de vos études de maîtrise et de doctorat, comme cela revient d'ailleurs à certains moments dans l'ouvrage?

Oui, d'autant plus que j'ai couvert dans ma carrière un certain nombre de sujets d'astronomie. J'ai ainsi consacré ma maîtrise et mon doctorat au Soleil. J'ai aussi fait des travaux sur la physique des gaz entre les étoiles, donc sur le milieu interstellaire. J'ai travaillé sur les galaxies. Peut-être que le seul domaine sur lequel je n'ai pas vraiment travaillé, c'est l'Univers à grande échelle, la cosmologie. Mais j'ai enseigné tous ces sujets.

Images de rupture et images transformatrices

Entrons maintenant dans le vif du sujet. Vous parlez dans votre ouvrage d'«images de rupture» et d'«images transformatrices». C'est d'ailleurs de cette façon que vous organisez vos *Trente images*.

Qu'est-ce que vous entendez par «image de rupture» ou «images transformatrices»?

J'appelle ces images «transformatives» dans le sens qu'elles ont transformé notre façon de voir les objets cosmiques: l'après fut différent de l'avant.

Vous lisez des livres d'astronomie, vous entendez ou regardez des émissions de radio ou de télé, vous voyez les nouvelles..., où on vous montre beaucoup d'images. Souvent, on vous

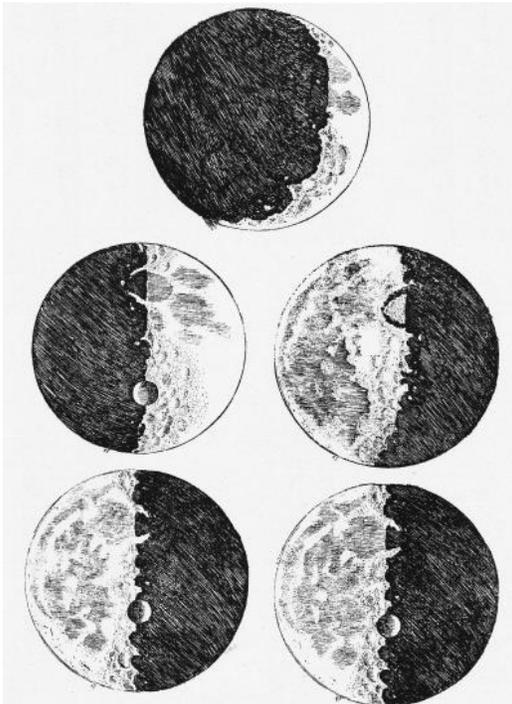
présente *parce que* ce sont des images assez spectaculaires.

Mais ce que je désire présenter ici, c'est un livre d'astronomie où je mets en vedette l'image, mais pas n'importe quelle image! Je me suis dit que j'allais choisir les images avec une fin en tête que j'appelle «épistémologique». Autrement dit: qu'est-ce que cette image nous a apporté de particulier?

Et j'ai choisi ce que j'appelle des «images de rupture» ou des «images transformatrices», c'est-à-dire des images qui ont *transformé* notre vision de l'Univers.

I – Voyage illustré dans le Système solaire

Parlons maintenant de la première image que vous avez choisie: la Lune telle que se la représentait Galilée. Pourquoi cette image en particulier?



La Lune, telle que dessinée par Galilée, après l'avoir observée à l'aide d'une lunette astronomique rudimentaire. Une vision pourtant révolutionnaire. (Source: *Sidereus Nuncius*, 1610.)

Parce que cette image marque l'arrivée du télescope, qui existait depuis une ou deux années mais que Galilée va récupérer, améliorer et transformer. Et au lieu de regarder les navires qui arrivaient dans les ports, il a pointé sa lunette vers le ciel et, en particulier, vers la Lune.

Galilée a alors vu une géographie et une topographie qui lui a rappelé la Terre. C'est donc avec son image de la Lune – qu'il décrit si bien dans son ouvrage [Le Messager des étoiles](#) – qu'il a réfuté la vision aristotélicienne du monde terrestre (qu'on disait corrompu et en déchéance) ainsi que la prétendue existence des astres parfaits au Ciel.

Galilée a plutôt observé que la Lune possède des montagnes, des «mers» et des cratères. Elle est donc comme la Terre, et non pas un monde parfait, appartenant aux sphères parfaites et

incorruptibles, dont on supposait l'existence à son époque.

Galilée fait donc le parallèle entre la Terre et la Lune – tout à fait correctement – et perçoit un relief topographique très accidenté. Il calcule même la hauteur des montagnes lunaires par la projection des ombres et en appliquant simplement la trigonométrie élémentaire.



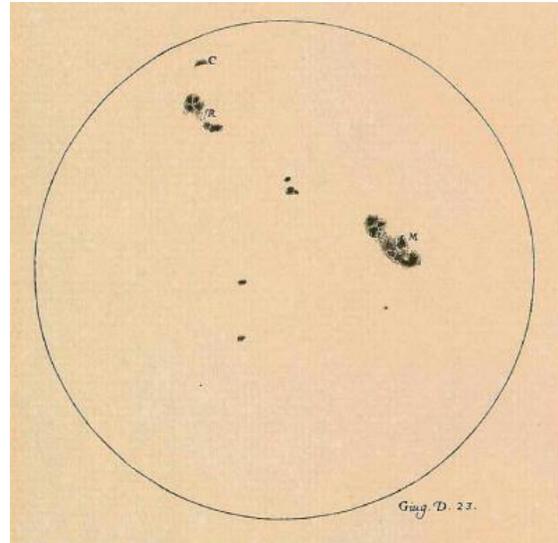
Galilée (1564-1642) avait 45 ans lorsqu'il a fait des observations astronomiques qui ont changé à tout jamais notre perception de l'Univers et de la place qu'on croit y occuper. Sur ce tableau d'Ottavio Leoni (1624), il a 50 ans. (Source: *Biblioteca Marucelliana*.)

Des «excréments» ou des volcans solaires?

L'image suivante en est aussi une de Galilée. Même si celui-ci ne sait pas ce qu'il observe, il dessine néanmoins des taches solaires. Il dessine, notons-le, puisque la photographie n'existait pas encore.

Galilée voit en effet les fameuses taches solaires et celles-ci paraissent se déplacer. Il interprète correctement le phénomène comme étant dû à

la rotation du Soleil sur lui-même. Il n'a cependant aucune idée de ce que sont ces taches.



Dessin du Soleil réalisé par Galilée en 1612.

Alors qu'il avait correctement interprété les montagnes et les cratères de la Lune, il voit ces taches sombres et sait qu'elles ne sont pas véritablement noires – c'est plutôt par contraste qu'elles apparaissent de la sorte.

Curieusement, dans des documents qui n'ont pas été publiés et qu'on ne voit pas souvent, Galilée parle de ces taches comme étant «la digestion du Soleil», sorte d'excréments solaires! Plus tard, certains verront ces tâches comme étant possiblement des volcans.

Soulignons que Galilée dessine parfaitement les taches solaires, avec les moyens qu'il a; ses dessins sont de fait excellents. Il les interprète incorrectement en partie, mais il interprète au moins correctement le fait qu'elles apparaissent à la surface du Soleil, tandis que d'autres, dont son «opposant» le jésuite Christoph Scheiner, prétendront que «ce sont des Lunes, des sa-

tellites ou des planètes en orbite autour du Soleil, très proches et qui passent devant».

Et pour la petite histoire, soulignons que Galilée et ses confrères observaient le Soleil directement à l'œil!

Eh oui, mais ça n'a pas duré longtemps puisqu'ils auraient abîmé leurs rétines! En fait, les astronomes de son temps ont trouvé une façon de regarder extrêmement rapidement le Soleil en alternant tantôt de l'œil gauche et tantôt de l'œil droit. (Mais il ne faut *vraiment pas* faire cela, surtout à travers un télescope, même si celui-ci est peu puissant.) Heureusement, ils ont rapidement mis au point une technique de projection de l'image du Soleil sur un petit écran qui leur permettait en même temps de dessiner.

Il y a dans votre livre *Trente images* la photo de la lunette de Galilée. Est-ce une reproduction ou un objet authentique?



L'une des lunettes fabriquées par Galilée, avec objectif et oculaire démontés. Elle est faite de lanières de bois jointes et recouvertes de cuir. (Source: Musée Galileo.)

C'est un objet authentique. Il faut savoir que Galilée a fabriqué plusieurs lunettes qu'il donnait en cadeau pour mousser son prestige ou pour être mieux accueilli auprès des grands. Il en a d'ailleurs envoyé une à Kepler...

Il s'agissait d'instruments très rudimentaires, comme vous pouvez le constater. Je me suis même demandé comment on faisait pour voir au travers

d'une telle lunette, puisque le champ visuel est très réduit. Dans sa lunette, Galilée ne voyait seulement qu'une petite fraction de la Lune.

On dit que ces télescopes étaient moins puissants que nos jumelles actuelles. Est-ce exact?

Absolument! Parce qu'il polissait rapidement la lentille de ses lunettes, Galilée devait les diaphragmer, c'est-à-dire ne garder que la partie centrale. Donc, même s'il avait une lentille de 30 mm de diamètre (ce qui est déjà petit), il ne laissait un diaphragme que de 15 ou le 20 mm au centre. C'était donc très peu. Mais il s'est amélioré rapidement, tandis que ses collègues lui ont emboîté le pas, transformant ainsi leurs télescopes en des instruments assez puissants.

L'espace courbé par la présence du Soleil?

Transportons-nous maintenant dans le temps: l'image n° 3 vaut la peine d'être mentionnée puisqu'il s'agit de celle de la fameuse éclipse solaire de 1919.



Le 29 mai 1919, la Lune éclipsa le Soleil, ce qui donnera l'occasion de mener d'importants travaux astronomiques.

L'observation de cette éclipse aura été l'occasion de confirmer plu-

sieurs théories, dont celle qui nous permet de comprendre comment fonctionne le Soleil.

Bien sûr, l'éclipse est un phénomène connu depuis l'Antiquité, mais on s'est longtemps demandé ce qui se passait à ce moment-là.

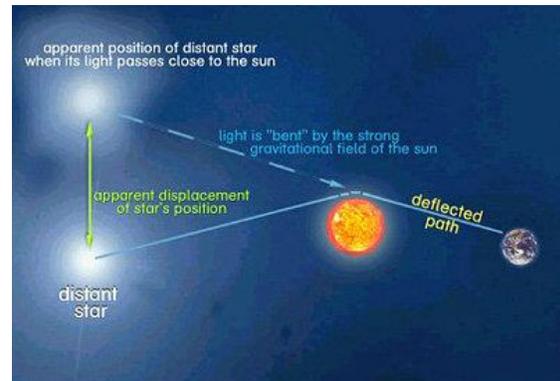
L'un des phénomènes qu'on observe durant une éclipse totale, c'est la couronne solaire, l'enveloppe de gaz très ténus et très chauds que Kepler appelait «la barbiche du Soleil» et qu'il avait démontré comme appartenant au Soleil. Or, jusqu'à ce moment-là, on se demandait si la couronne qu'on observe autour du Soleil provenait de celui-ci ou de la Lune? Cette question a été résolue par Kepler.

Et l'image de l'éclipse totale du Soleil du 29 mai 1919 est extrêmement importante.

Rappelons-nous qu'en 1915, Albert Einstein avait proposé une nouvelle théorie à propos de la gravitation. Il proposait par le fait même une nouvelle conception de l'espace-temps: quelque chose de relatif par rapport au référentiel dans lequel on observe et on est observé.

À parti de ses théories, Einstein prédit trois choses, mais celle qui nous importe ici, c'est le concept de l'espace courbé par la présence d'un objet massif. Il avait notamment prédit que, lors d'une éclipse de Soleil, on devrait pouvoir

mesurer la position des étoiles pour les comparer à ce qu'elles sont durant la nuit.



Selon Einstein, la lumière d'une étoile passant près d'un objet aussi massif que le Soleil sera déviée. C'est ainsi que si l'étoile se trouve derrière le Soleil (en bas à gauche), elle apparaîtra «déplacée» vers le haut. Mais le phénomène ne peut être observé que durant une éclipse.

Einstein soutient donc que la position de certaines étoiles va être déplacée par la courbure de l'espace imposée par la présence d'une importante masse, comme le Soleil (tel qu'illustré ci-haut).

Il avait même prédit la quantité de déviation qu'on observerait durant une éclipse. On a donc mené des expéditions afin de photographier l'éclipse solaire de 1919.

Or, celle menée par l'astronome britannique de renom, Arthur Eddington, a pris des photos qui ont permis de déduire que le déplacement *apparent* de certaines étoiles durant l'éclipse correspondait exactement à ce que prédisait la théorie

C'est ainsi que les étoiles fixes qui sont placées près du Soleil et que nous pouvons observer quand celui-ci subit une éclipse totale devront paraître éloignées de lui de la distance indiquée plus haut par rapport à la position qu'elles occupent dans le ciel quand le Soleil se trouve dans un autre endroit de l'espace cosmique.» L'examen de l'exactitude ou de la non-exactitude de cette conséquence est une tâche de la plus haute importance, dont il est à espérer que les astronomes nous fourniront prochainement la solution. — Albert Einstein

d'Einstein, démontrant par le fait même l'effet de courbure de l'espace due à la présence d'une importante masse.

Mais sans les explications dans votre livre, on ne comprendrait pas l'importance de cette image.

En effet. On dit souvent qu'une image vaut mille mots, mais cette image-là, sans mot, on n'a aucune idée de ce qu'elle représente.

Autre aspect intéressant: il y a eu des versions des plaques photographiques originales de 1919 qui ont été retraitées récemment pour en faire ressortir plus de détails. Mais moi, j'ai tenu à ce que, dans mon livre, on reproduise l'image originale tel quel.

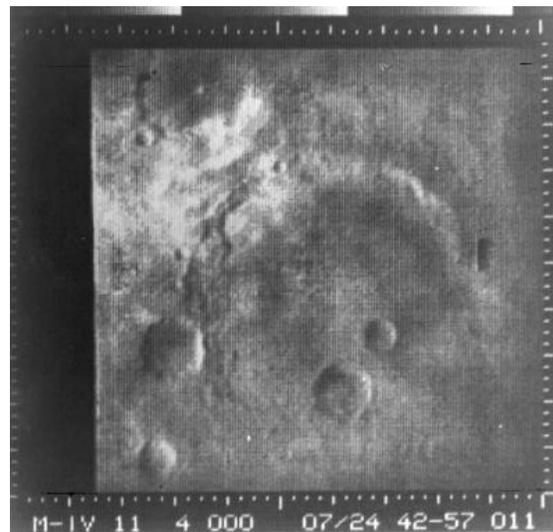
Enfin, un premier regard rapproché de Mars

Poursuivons notre épopée avec la première image très rapprochée de Mars prise en 1965 par la sonde Mariner 4. Or, cette image a été une révélation puisque tout ce qu'on s'imaginait jusqu'alors à propos de Mars s'est avéré faux!

Pour moi, cet épisode est extraordinaire. Mars a toujours été l'objet de rêve des utopistes de science-fiction. Mais là, avec Mariner 4, tout s'écroule puisque cette image nous montre qu'il n'y a pas de Martiens sur la planète, qu'il n'y a pas de végétation non plus ni de canaux... On réalise alors qu'on a été victime d'une sorte d'erreur cognitive, d'une erreur de perception – phénomène fascinant que certains ont analysé en détails. Voilà qui démontre que, lorsqu'on veut voir quelque chose, on arrive parfois à le voir!

Rappelons-nous cependant que l'observation des fameux canaux martiens – des traits réguliers sur la surface de la planète rouge – était remise en question par nombre d'astronomes, surtout ceux qui pouvaient l'observer dans les meilleures conditions atmosphériques. Et voilà qu'en 1965, Mariner 4 est la première sonde à frôler Mars pour prendre vingt-deux clichés.

Et vous avez retenu celui-ci?



L'image n° 11 de la série de 22 photos prises par Mariner 4 en juillet 1965. (Voir les [22 photos](#) de Mariner 4.)

Oui, j'ai retenu le numéro 11, que j'avais reçue par la poste de la NASA, peu après la mission.

Mais je me souviens encore d'un magazine qui présentait Mariner 4 alors que celle-ci voguait vers Mars. On y voyait l'esquisse en couleur de la sonde approchant la planète... sur laquelle figuraient des canaux! Imaginez, on était en 1965 et on s'attendait encore à voir des canaux!

Or cette photo, comme les 21 autres, ont causé tout un choc, une commotion même, puisqu'à l'époque on s'attendait à ce que Mars revêt des

allures terrestres. Mais là, d'un coup, on a découvert des cratères et des paysages qui font penser à la Lune. Mars serait donc comme la Lune, plutôt que comme la Terre!

On comprend donc la rupture puisque notre vision de la fameuse planète rouge change du tout au tout.

Complètement! Et ce qui change aussi, c'est que désormais, lorsqu'on rend visite à un monde planétaire – même proche de nous – les images qu'on obtient nous révèlent généralement des informations qui transforment notre vision. Ainsi, à la suite du passage de Mariner 4 et de plusieurs autres sondes martiennes, plus personne ne parle de canaux. L'affaire est réglée.

Des «oreilles» pour Saturne?

Passons maintenant à Saturne, tel que vue par Christiaan Huygens. Peut-on dire que c'était un «patenteux» (un bricoleur) avant qu'on invente le terme?

Christian Huygens et son frère Constantin sont l'exemple type des grands chercheurs hollandais du XVII^e siècle. Physicien et astronome, le premier est un génie qui mettra au point la première horloge à pendule de très grande précision et contribuera de nombreuses inventions et systèmes physiques. C'est en plus un astronome qui mettra au point de meilleures lunettes; c'était un excellent polisseur de lentilles et un calculateur d'optique hors pairs, ce qui lui a permis de fabriquer des appareils de grande qualité.



Le mathématicien, astronome et physicien Christiaan Huygens (1629-1695), peint par Caspar Netscher en 1671. (Source: Haages Histories Museum.)

En outre, Huygens était intrigué par Saturne. Parce que les télescopes de son temps n'étaient pas de bonne qualité, les astronomes voyaient cette planète comme un objet possédant deux lunes – et non pas entourée d'un anneau. Galilée en parlait même comme d'une planète «avec des oreilles»!



Saturne, une planète avec deux lunes... ou avec des «oreilles»? Voici comment on se représentait la planète à anneaux dans les années 1600. (Source: *Systema Saturnium*, 1659)

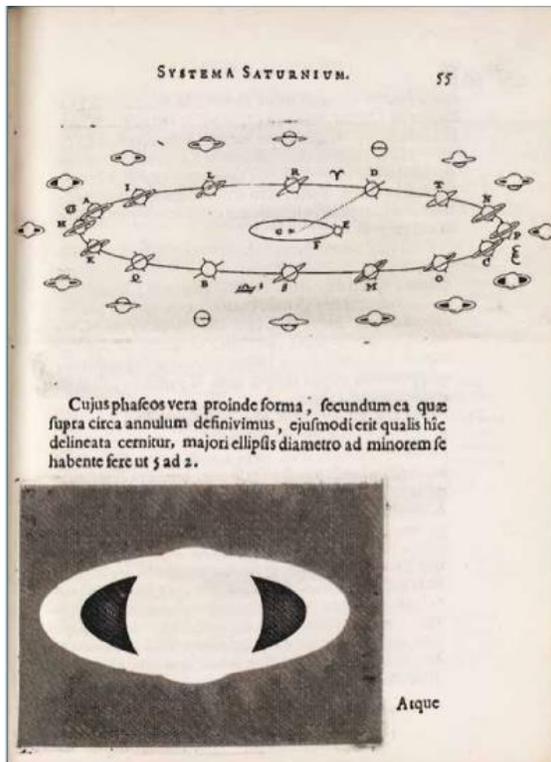
En observant Saturne, Huygens découvre une lune très importante: Titan. Il observe en outre Saturne durant des années et finit par percevoir

qu'elle est en fait encerclée par un anneau. Mais il ne sait pas si cet anneau est solide ou non.

Il constate aussi que l'apparence de la planète change selon sa position par rapport à la Terre tout au long de leur orbite autour du Soleil (en un an pour la Terre et en trente ans pour Saturne). Il observe enfin que, sur une période de quelques années, l'apparence des anneaux change, il en déduit qu'il s'agit donc d'un anneau plat.

**Le ciel n'est pas rempli
que d'objets sphériques!**

Pourquoi estimez-vous que l'illustration suivante est une «image de rupture»?



Variations d'apparence de Saturne et de ses anneaux. (Source: *Systema Saturnium*, 1659)

Nous nous imaginons que les objets cosmiques sont des sphères, puisque

c'est là la forme parfaite. Même Copernic le disait en donnant l'exemple d'une goutte d'eau, qui se met naturellement en boule. Ainsi, les physiiciens cherchaient toujours à mettre les choses en boule! Mais Huygens disait non à cette conception en faisant valoir qu'il y a d'autres formes dynamiquement intéressantes dont, justement celle des anneaux de Saturne.

Et beaucoup plus tard, on découvrirait qu'il ne s'agit pas d'un seul anneau mais d'un système d'anneaux multiples.



Une idée de la structure fort complexe et étonnante des anneaux de Saturne. (Source: NASA)

Éventuellement, le physicien Maxwell montrera que ces anneaux sont en réalité constitués d'une quantité innumérable de petits corps, de l'ordre du millimètre jusqu'à quelques mètres, qui gravitent tous en orbite autour de Saturne.

Des geysers de méthane sur Titan

Puisque vous avez mentionné Titan, vous-même l'avez observée, comme vous le relatez dans votre ouvrage?

Titan est le seul satellite naturel qui possède une importante atmosphère, en bonne partie faite de méthane et de gaz carbonique (CO₂). Cette atmos-

phère est très froide. Il y a aussi du volcanisme sur ce satellite naturel.

La sonde Huygens, de l'Agence spatiale européenne (ESA), est descendue dans cette atmosphère en parachute et cette descente a duré plusieurs heures, justement parce que cette atmosphère est très dense.

Titan est un monde très actif. Son intérieur est même «tordu», voire «plissé», probablement à cause des forces de marée engendrées par l'importante présence de Saturne, dont le puissant champ de gravité «chauffe» en quelque sorte l'intérieur de Titan et génère du cryo-volcanisme. Il y en a effet sur Titan des geysers de méthane! Ces geysers sont froids, mais on peut facilement les observer dans l'infrarouge.



Titan est entourée d'une épaisse atmosphère qui empêche de voir sa surface. D'un diamètre de 5150 km, cette lune est une fois et demie plus grosse que la nôtre. (NASA)

Quand j'étais à l'observatoire de Gemini, on a mené un programme d'études s'étendant sur plusieurs mois afin d'observer le volcanisme cryogénique de Titan. À chaque début de nuit, on prenait une demi-heure pour observer la météorologie de ce satellite naturel.

Vous mentionnez Gemini, il faudrait peut-être préciser ce dont on parle ici?

Gemini est un grand observatoire international qui dispose de deux télescopes; un situé dans l'hémisphère nord, à Hawaii, et un second dans l'hémisphère sud, au Chili. Ces télescopes sont équipés pour observer dans le domaine de l'infrarouge [détection de la chaleur] en utilisant la technique dite de l'«optique adaptative».

Il s'agit d'une technique qui corrige en temps réel la turbulence atmosphérique, puisque notre atmosphère est loin d'être parfaitement transparente à cause de la présence de l'humidité, de la pollution, des nuages, etc. Cette technique nous permet d'obtenir des images équivalentes à ce que nous procurent les télescopes basés dans l'espace. Il s'agit de télescopes extraordinaires...

J'ai passé neuf ans aux Gemini, dont six à Hawaii et trois au Chili.

On ne pouvait pas observer en détails Titan, comme le fait une sonde qui s'en approche, mais on pouvait mener des observations qui complétaient les images obtenues plus tard de Titan, de Pluton et de Charon (la principale lune de Pluton) grâce aux sondes spatiales.

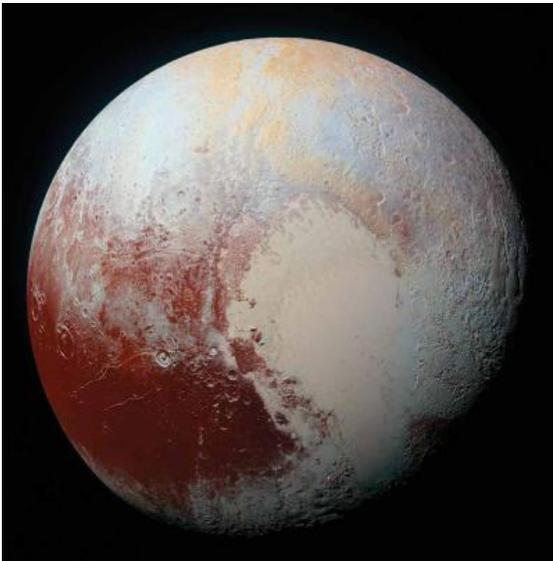
Une petite planète qu'on n'imaginait pas

Justement, passons maintenant à l'image n° 8, une photo de Pluton prise par la sonde New Horizons. Même si Pluton a été déclarée «planète naine» en 2006, on aurait *presque* envie de lui redonner son

statut de planète à part entière, tellement cette photo a été révélatrice!

Pluton est un monde plein de surprises. On n'avait que peu d'idée concernant les planètes naines; on les savait faites de glace, mais on n'avait aucune idée de ce à quoi elles pouvaient ressembler, quel type de géographie et de topographie elles pouvaient recevoir... On les imaginait comme des boules de glace assez lisses.

Eh non, ce n'est pas cela du tout!



Pluton photographiée par la sonde New Horizon en juillet 2015. (Photo: NASA)

On savait déjà – notamment grâce à des travaux menés par mes collègues de Gemini –, qu'il y avait une activité qui régénèrait la surface de Pluton sur une période de quelques millions d'années. On savait donc que l'eau peut exister sur cette planète, même si on y trouve surtout du méthane et des oxydes d'azote sous forme solide. Mais de toute évidence, il y a aussi des phases liquides qui s'y produisent ainsi que des épanchements liquides.

Et voilà qu'on découvre, grâce aux photos recueillies par New Horizons,

qu'il y a sur Pluton des montagnes de glace et des plaines, notamment la grande plaine baptisée Sputnik. Il y a donc sur cette planète naine une géographie vraiment extraordinaire! Et puisque la sonde n'a fait que survoler brièvement la planète, nous n'avons obtenu que des images prises en l'espace de quelques heures seulement. Mais ces images ont suffi à nous révéler à quoi peuvent ressembler ces *bêtes-là*, qui se trouvent à la périphérie du Système solaire.

Cela dit, Pluton demeure toujours une planète naine, qui n'appartient pas à la catégorie des planètes dites «régulières».

Des comètes légendaires à la réalité moderne

On a presque fini notre voyage à travers le Système solaire. Parlons maintenant de l'image n° 9, celle de 67P, mieux connue comme la comète Tchourioumov-Guérassimenco – ou «Tchouri» pour les intimes. Il s'agit d'une image prise par la sonde européenne Rosetta.



La comète «Tchouri» est un astre de quelques kilomètres seulement mais aux formes très étranges. (Photo: ESA)

En plus de nous montrer cette image spectaculaire, vous nous parlez de la fascination légendaire pour les comètes observées dans de nombreuses cultures – comme quoi la science n’enlève rien à la poésie de ces descriptions très imagées.

Plus loin dans l’ouvrage, vous parlez même de la vision des anciens concernant divers phénomènes astronomiques et vous dites que ce ne sont pas là de «pures fantaisies».

Absolument! D’ailleurs, je rapporte en guise d’exemples quelques belles citations.

Les comètes sont connues depuis les débuts de l’humanité parce qu’une belle comète, très visible, apparaît environ tous les dix ans. Par contre, il faut être dans le bon hémisphère pour la voir. Dans ce cas, ça peut donner lieu à un spectacle époustouflant dans le firmament. La dernière comète que j’ai vue, j’étais au Chili au début de 2007; il s’agit de la comète MacNaught, un spectacle assez impressionnant.

Les comètes sont importantes parce qu’on a souvent associé leur passage à des tragédies, à des catastrophes et à des guerres – probablement parce qu’il y en a suffisamment pour correspondre au grand nombre de fléaux qui ont pu survenir depuis l’Antiquité! Évidemment, il est très dommage qu’on ait associé comètes et fléaux (qui n’ont de fait aucun lien).

C’est d’ailleurs l’une des choses que l’arrivée de l’astronomie moderne va défaire, à partir des années 1500, avec Tycho Brahe puis durant l’âge d’or de l’astronomie au XVII^e siècle. C’est ainsi qu’on s’est rendu compte que les comètes sont en réalité des objets de pe-

tite taille, bien qu’on ne savait pas à l’époque quelle était leur dimension réelle.

Dans les faits, les comètes ont de petits noyaux de glace, de dix à vingt kilomètres de diamètre. Elles portent en outre une traînée faisant jusqu’à 500 millions de kilomètres de longueur. Ce panache résulte de l’évaporation de la glace et des poussières qui s’en détache, d’où leur aspect qui peut être très impressionnant dans le ciel. Mais les comètes ne sont que passagères.

Dans le cas de la comète «Tchouri», - vous avez retenu l’une des nombreuses photographies prises par Rosetta, image qui démystifie complètement la nature des comètes.

Tout à fait. En plus, il y a eu ce petit robot, Philae, qui s’est posé sur la comète. Mais bien qu’il n’ait fonctionné que durant une heure et demie, Philae nous a fourni de précieuses indications quant à la composition de la comète.

Et puis, durant une année, la sonde Rosetta a orbité 67P, faisant des observations qui ont transformé notre vision des comètes.

D’abord, on s’est rendu compte qu’alors qu’on les considérait comme de simples boules de neige sale, on a réalisé que les comètes ont en réalité un contenu beaucoup plus rocheux que glacé. Notre vision venait de changer!

Ensuite, on a mené des études pour déterminer avec précision la composition chimique de la comète. En particulier, on a évalué le rapport d’eau lourde à eau légère. [Voir encadré]. Et on a ainsi établi de façon irréfutable que ce rapport est trois fois celui qu’on observe sur Terre.

Eau lourde et eau légère

On sait que l'eau se compose de deux atomes d'hydrogène reliés à un atome d'oxygène pour former des molécules H₂O. Mais il existe aussi une forme d'eau dite «lourde», car composée de deux atomes de *deutérium* associés à un atome d'oxygène pour donner des molécules D₂O.

Le deutérium est une variante naturelle de l'hydrogène dont le noyau possède un proton *et un neutron*, tandis que l'hydrogène ne contient aucun neutron.

Dans une portion d'eau terrestre, on retrouve toujours un peu d'eau lourde mélangée à de l'eau légère. Or, sur la comète «Tchouri», on a retrouvé trois fois plus de molécules d'eau lourde par rapport à l'eau légère terrestre. Notre eau diffère donc fondamentalement de celle des comètes, ce qui est une découverte majeure.

C'est là une découverte très importante puisqu'elle nous fait mettre de côté l'hypothèse voulant que l'eau que nous retrouvons sur Terre ait été apportée par les comètes. On estime à présent que notre eau proviendrait plutôt des astéroïdes.

Plus d'eau sur Cérès que sur Terre!

Parlant d'astéroïde, la dixième «image transformatrice» de votre livre, c'est celle de Cérès prise par la sonde Dawn. Une image obtenue à la même époque que celles de Pluton et de 67P, incidemment.

Ce qui est intéressant dans notre histoire, c'est qu'après avoir envoyé des sondes spatiales explorer Mars, Vénus et Mercure, ainsi que les planètes géantes, on s'est concentré ces dernières années sur les petits corps du Système solaire. Car, outre les comètes, il y a les astéroïdes, ces petits astres dont on ignorait l'existence dans l'Antiquité. Ce sont donc, à notre connaissance, de nouveaux venus, même si, en réalité, ils existent depuis la formation du Système solaire

... et au sujet desquels il n'existait aucune légende, contrairement aux comètes.

Effectivement, il n'y a pas de mythe au sujet des astéroïdes puisque ce n'est qu'au XIX^e siècle qu'on a découvert leur existence. L'astronome Giuseppe Piazzi a cru découvrir une nouvelle planète — ce dont il était «tout fier». Mais il a en fait découvert ce qui est connu à présent comme le plus gros des astéroïdes: Cérès. Celui-ci fait partie d'une ceinture de millions d'astéroïdes qui orbitent entre Mars et Jupiter et qu'on appelle justement la *Grande Ceinture d'astéroïdes*. Au point de départ, on estimait que Cérès était constitué principalement de matière rocheuse — de la roche et des minéraux.

Or, encore une fois, on a eu droit à une révélation lorsqu'on s'est rendu compte qu'il contient énormément d'eau — à l'inverse de ce qu'on a observé sur les comètes!

C'est ainsi qu'on réalise à présent que les comètes sont plus rocheuses que prévu, tandis qu'avec Cérès, on observe le contraire.



Cérès vu sous toutes ses coutures. (NASA)

Étonnamment, Cérès, qui ne mesure que 900 kilomètres de diamètre (comparativement à 12 000 kilomètres pour la Terre) contient plus d'eau que notre planète!

Par ailleurs, Cérès a une structure géologique étonnante, avec des cratères et des coulées de saumure dont on a mesuré la composition chimique. Somme toute, il s'agit d'un monde très

actif, surtout par rapport à ce qu'on s'attendait de voir.

On a donc maintenant une vision transformée des petits corps du Système solaire grâce aux images qui ont été prises par les sondes. J'en reproduis d'ailleurs plusieurs dans mon livre, vous présentant une sorte d'album-photos.

C'est dire que, tant pour Pluton que pour les astéroïdes, on les a longtemps perçu uniquement comme de points lumineux, mais que grâce aux sondes spatiales, on les voit à présent clairement et, surtout, on découvre qu'il s'agit de mondes dotés d'une richesse géologique remarquable.

Voilà qui transforme notre vision des choses, et c'est pourquoi je parle d'*images transformatrices*.

II - Images de la Voie lactée

On fait maintenant notre entrée en images dans la Voie lactée, notre galaxie. On est toujours «chez nous», mais on sort du Système solaire.

En effet. On était dans le Système solaire où, quel que soit l'astre sur lequel on se trouverait, la lumière du Soleil nous parviendrait au maximum en quelques heures seulement. Mais lorsqu'on sort du Système solaire pour s'aventurer dans la Voie lactée, on fait alors un grand bond, de sorte que la lumière en provenance d'une étoile nous parviendrait après des années, voire des centaines ou des milliers d'années. C'est le domaine des étoiles.

Et les images changent du tout au tout, puisque c'est là qu'on découvre le rôle fondamental de l'astrophoto-

graphie et des plaques photographiques en verre. Vous, vous avez connu ces deux mondes, la vieille et la nouvelle astronomie, n'est-ce pas?

Tout à fait. C'est ainsi que l'astronomie dite «stellaire» — celle à plus grande échelle — va véritablement connaître son envol avec l'arrivée de la photographie. Pourquoi? Parce que celle-ci permet d'enregistrer des niveaux de lumière beaucoup trop faible pour être perçus par l'œil — soit dix fois, voire cent fois plus que ce peut capter notre œil. On expose ainsi une plaque photographique longuement,

ce qui permet de faire ressortir des objets et des détails invisibles à l'œil.

À partir de 1883, la photographie s'est développée, suite aux premières techniques comme les daguerréotypes. Au début, les astronomes ne faisaient pas confiance à la photographie, car ils croyaient qu'il s'agissait d'un *gadget*. En conséquence, ils ne s'y fiaient pas, se demandant par exemple: est-ce que ce qu'on voit sur une plaque photographique est réel ou pas? Remarquons ici que c'est toujours le même débat lorsque surgît une nouvelle technologie!

Il y a en effet souvent beaucoup de résistance à l'endroit de toute nouvelle technologie.

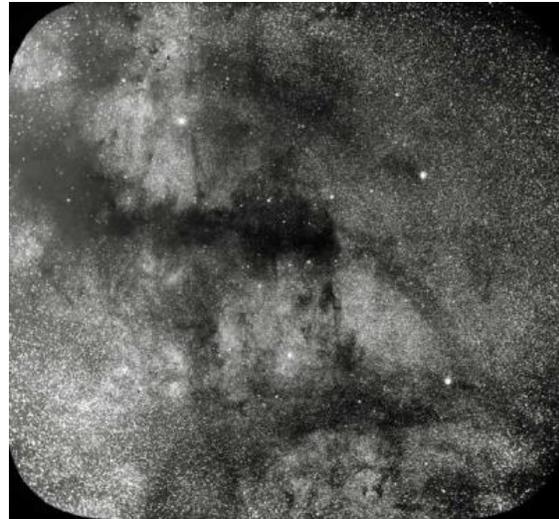
Exact. Ce fut d'ailleurs la même chose du temps de Newton, lorsqu'on s'est mis à décomposer la lumière à l'aide d'un prisme afin d'obtenir le spectre des couleurs. On se disait que: «c'est l'instrument qui fait le truc que tu prétends voir, et non pas la réalité!»



Lorsqu'un rayon de lumière, en provenance d'une étoile (à gauche), passe à travers un prisme de verre (au centre), celui-ci le décompose en un spectre de couleurs (à droite). Cette décomposition permet d'analyser la nature de l'étoile d'où provient le rayon de lumière. Cette technique est révolutionnaire puisqu'elle permet de déterminer la composition des étoiles... qui se trouvent pourtant à des années-lumière de nous.

Des «trous» dans le Voie lactée?

Justement, la photo qui ouvre l'exploration illustrée de la Voie lactée est celle de notre galaxie prise par Edward Barnard en 1905. Pourquoi avez-vous retenu cette image?



Photographie d'une parcelle de la Voie lactée réalisée par Edward Barnard en 1905. (Source: Université de Chicago.)

Au début du XX^e siècle, on croyait que l'espace était parfaitement transparent, qu'il n'y avait rien d'autres à voir que les planètes et les étoiles. Tout le reste était transparent.

Or, si vous observez attentivement la Voie lactée, même à l'œil nu, vous verrez que cette longue trainée laiteuse, qui traverse le firmament de part en part, semble percée de trous. Certains prétendaient qu'il n'y avait aucune étoile dans ces trous, qu'il s'agissait simplement de trous dans l'espace. On parlait même d'«abîmes cosmiques».

Or, Edward Barnard montre, avec son collègue allemand Max Wolf, que ces régions ne sont pas vides, mais bien

au contraire, qu'elles trahissent la présence de zones de poussière très denses. Il s'agit dans les faits de nuages de poussière qui bloquent la lumière provenant d'étoiles situées derrière eux – et non pas de trous dans l'espace.

C'est un peu comme un nuage de poussière qui, au coucher du Soleil, nous empêche de voir celui-ci. Pourtant, le Soleil ne disparaît pas pour autant, il est toujours là! Mais il est caché par la présence d'un nuage de poussière.

En réalisant un atlas détaillé des zones sombres de la Voie lactée, Barnard montre que celles-ci ne sont pas vides d'étoiles mais que ce sont plutôt l'indice de la présence de nuages qui contiennent des particules très fines et qu'on appelle aujourd'hui la poussière interstellaire.

Cette poussière a la taille de minuscules particules, comme celles qui sortent du pot d'échappement d'une automobile; les particules de poussière interstellaire ne font qu'une fraction de la largeur d'un cheveu. Pourtant, agglomérées les unes aux autres au sein de grands nuages interstellaires, elles bloquent efficacement la lumière émise par les étoiles qui se trouvent derrière. Étonnant tout de même.

Avant le XX^e siècle, on ignorait donc l'existence de ces nuages interstellaires?

Tout à fait. On avait bien repéré des zones sombres dans la Voie lactée mais on les décrivait comme étant vides. Même le grand astronome William Herschel, au XVIII^e siècle, parlait de régions du ciel où il y a moins d'étoiles.

[Dans son ouvrage, Jean-René Roy montre de nombreuses photographies de «zones d'ombre» de la Voie lactée qui, aux yeux de nos puissants télescopes modernes, donnent lieu à certaines des plus belles pages de l'astronome.]

La révolution de la photographie

Poursuivons avec l'image n° 12. Il s'agit d'une photographie de la nébuleuse d'Orion datant de 1883 et prise par l'astronome amateur Andrew Common à l'aide d'un télescope Crossley. En quoi cette image est-elle exceptionnelle?

C'est une photographie remarquable! Mais parlons d'abord du personnage, d'Andrew Ainslie Common.

Il fait partie de ce qu'on appelait autrefois les «grands amateurs». Il s'agissait pour la plupart d'hommes d'affaires qui avaient une grande passion – que ce soit pour la géologie, l'astronomie etc. – et qui avaient les moyens de s'y consacrer. C'était son cas.

Comme homme d'affaires, Common a œuvré dans le domaine de la plomberie à l'époque de l'industrialisation de l'Angleterre. Il a par conséquent eu par la suite les moyens d'assouvir sa passion. Il a donc fait installer un observatoire dans son jardin. Et contrairement aux astronomes de son époque, qui boudaient la photographie, Common allait s'en servir. «Et je sais comment m'y prendre», se disait-il. (Rappelons-nous que dans les années 1880, la photographie était un art peu répandue, et encore moins en astronomie.)

De surcroît, il disposait d'un télescope équipé de la nouvelle technologie, celle des miroirs en verre, et non pas en métal.

On parle ici de télescopes Crossley?

Exactement. Common possédait donc l'un des premiers télescopes à miroir en verre, bien polis et d'une belle surface réfléchissante.

Ainsi, en 1883, il prend une magnifique photographie de la nébuleuse d'Orion, un nuage de gaz situé à 1500 années-lumière de nous et derrière lequel se trouvent des étoiles chaudes.



La nébuleuse d'Orion photographiée par Andrew Common en 1883. (Source: Université Cambridge.)

Cette photo est remarquable, même selon nos standards actuels!

Ce que Common a montré dans sa communication faite auprès de la très sérieuse *Royal Astronomical Society* c'était que la photographie capte des étoiles qu'on ne voit pas à l'œil, même à l'aide des plus puissants télescopes.

Et plus important encore, la photo fait ressortir des structures beaucoup plus fines et beaucoup plus détaillées

que tout ce qui avait été perçu jusqu'à maintenant.

C'était là une percée d'importance pour laquelle Common s'est d'ailleurs vu décerner une médaille par la Royal Astronomical Society.

Et en plus de montrer la valeur de la photographie comme instrument pour sonder l'Univers, il porte à l'attention des astronomes l'intérêt d'observer les nébuleuses, un sujet négligé jusqu'à lors, mais dont on se questionnera beaucoup par la suite, notamment à propos de leur nature.

Common fait aussi connaître Orion, une nébuleuse très populaire en astronomie, notamment chez les amateurs, parce que facile à observer.

Populaire chez les amateurs mais également chez les professionnels! Chaque fois qu'on observe Orion au moyen d'une nouvelle technique ou dans un nouveau domaine de longueur d'ondes, on finit par découvrir quelque chose à son sujet.



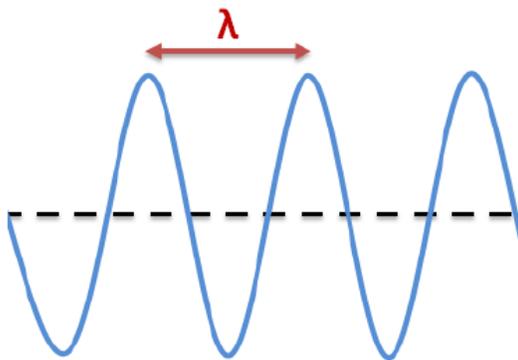
La nébuleuse d'Orion photographiée par le télescope spatial Hubble. (Photo: NASA)

C'est d'ailleurs l'un de ces objets que je qualifie d'«objets de travail», c'est-à-dire qu'on retourne toujours à ce type d'objets, surtout lorsqu'on a une nouvelle technique, puisqu'on découvre toujours quelque chose de nouveau. Une nébuleuse comme Orion est un milieu très riche de gaz et de poussières d'une densité relativement élevée. Il s'agit d'un milieu chauffé par des étoiles très jeunes, qui n'existent que depuis 100 000 ans.

Les percées de la radioastronomie

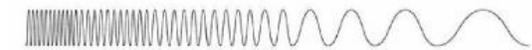
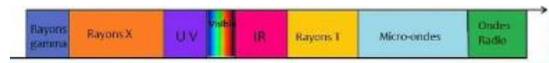
Parlons maintenant de radioastronomie, un domaine que vous affectionnez tout particulièrement.

En fait, la radioastronomie, ce n'est pas sorcier: c'est comme la lumière mais à des longueurs beaucoup plus longues.



Toute onde se déplace selon une courbe semblable à celle-ci, atteignant tantôt des «pics», tantôt des creux selon un rythme très régulier. La distance entre deux «pics» est dite «longueur d'onde». Ce principe s'applique aussi bien à la lumière qu'aux ondes radio, aux rayons X, etc. Ce qui distingue ces différentes ondes, c'est justement la distance entre deux «pics», leur longueur d'onde.

La longueur d'ondes de la lumière est de l'ordre du micromètre – un centième de l'épaisseur d'un cheveu. Les longueurs d'onde les plus grandes, ce sont justement les ondes radio. Dans tous les cas, ce sont des ondes *électromagnétiques*, qu'il s'agisse de la lumière, des rayons X, des rayons gamma, des rayons ultraviolets, etc.



L'étendue des longueurs d'onde, des plus courtes, à gauche, jusqu'aux plus longues, à droite; c'est-à-dire des rayons gamma jusqu'aux ondes radios. Notez vers le centre, la petite portion des ondes lumineuses, la seule que nous captions avec nos sens. Il ne s'agit hélas que d'une petite fraction du spectre des ondes électromagnétiques.

Les ondes radio sont les plus longues du spectre électromagnétique et elles ont été les plus difficiles à détecter, à capter et à enregistrer. Il a fallu disposer des techniques mises au point pour la télégraphie sans fil, la TSF ayant été à plusieurs égards à l'origine de la radioastronomie.

Est-ce à dire que la radioastronomie est arrivée un peu par hasard?

Oui. Elle découle de l'invention du radar durant la Seconde Guerre mondiale. C'est alors qu'on a mis au point des systèmes pour produire des ondes radio et pour les capter.

Parlons maintenant du radiotélescope ALMA, situé au Chili. C'est une formidable installation, n'est-ce pas?

ALMA, l'abrégé d'*Atacama Large Millimeter Array*, est un ensemble de

soixante-quatre radiotélescopes, chacun faisant quinze mètres de diamètre. Ces télescopes peuvent être déplacés, on peut ainsi les répartir soit très près

les uns des autres, soit à cent mètres et jusque sur une distance de trente kilomètres.



Quelques-uns de 64 radiotélescopes qui forment l'impressionnant réseau ALMA et qui peuvent être configurés différemment, comme autant d'observateurs scrutant un même objet.

Et tous ces télescopes se concentrent sur la même cible pour l'étudier simultanément?

Toutes ces antennes regardent le même objet, en même temps et durant une certaine période de temps. C'est comme si vous aviez un télescope ayant un miroir de trente kilomètres! Cependant, puisque nous observons dans des longueurs d'onde très longues (ondes radio), on n'obtient pas des images aussi précises que si on utilisait un télescope en visible doté d'un miroir de trente kilomètres. Et puisque nous utilisons soixante-quatre radiotélescope distincts, il nous faut combiner ce que chacun d'eux capte pour obtenir des images semblables à des photographies (en lumière visible). Il s'agit d'un processus assez complexe et je vous invite à consulter mon livre pour le comprendre.

Toutefois, ce qui importe de retenir ici, c'est qu'ALMA est l'observatoire au sol le plus élaboré et le plus coûteux qui soit: il a coûté 1,5 milliard \$ et il a

nécessité la mise en commun des ressources des États-Unis, de l'Europe, de Taiwan et du Japon.

Notre galaxie, une pizza?

Présentez-nous maintenant la photographie prise depuis l'observatoire La Silla, au Chili. Il s'agit de l'image d'Omega Centauri. Dans ce cas, on parle d'une observation plus classique.

En effet. Dans ce cas, on a eu recours à un télescope conventionnel pour observer dans le domaine visible. On revient aussi à un type d'objets connu depuis l'Antiquité, puisque Omega du Centaure avait été remarquée par Ptolémée. Il ignorait cependant qu'il ne s'agissait pas d'une étoile, mais bien d'un *regroupement* d'étoiles.

C'est un exemple de ce qu'on appelle des amas globulaires?



L'amas globulaire *Omega Centauri*, situé dans la constellation du Centaure, comprend des millions d'étoiles. (Source: ESO)

Ce sont en fait les plus gros rassemblements d'étoiles qu'on retrouve dans notre galaxie. Ces amas globulaires sont en orbite autour du centre de notre galaxie. Il y en a près de 150 et *Omega Centauri* est le plus gros de tous... et le plus curieux aussi.

Il est aussi très spectaculaire!

En effet. On le voit assez bien avec une paire de jumelles et c'est encore plus spectaculaire au télescope, quelle que soit la taille de celui-ci. C'est l'un des plus beaux objets à voir au télescope.

Cet amas est constitué de millions d'étoiles.

Ce qui importe à propos des amas globulaires, c'est qu'ils nous ont permis de mesurer les dimensions de la Voie lactée, ce qu'on est parvenu à faire au début du XX^e siècle.

Comment s'y est-on pris? C'est que, voyez-vous, notre galaxie a la forme d'une pizza! Imaginez-la comme une

pizza d'environ 100 000 années-lumière de diamètre et de quelques milliers d'années-lumière d'épaisseur seulement. Et bien sûr, nous, nous faisons partie de cette pizza.

Comme Barnard nous l'a montré, il y a beaucoup de poussières dans notre galaxie, ce qui fait qu'on ne peut l'observer de part en part. On n'avait donc aucune idée de sa taille ni à quel point elle est vaste.

C'est l'astronome Harlow Shapley (1885-1972) qui, en examinant les amas globulaires, s'est rendu compte qu'ils étaient en orbite autour du centre de notre galaxie. Or, on peut déduire à quelle distance du centre gravitent ces amas globulaires. Et de là, Shapley a ensuite calculé à quelle distance nous nous trouvons du centre de la Voie lactée.

Autrement dit, les amas globulaires ont ceci de remarquable qu'ils nous ont révélé la structure de la Voie lactée.

La fabuleuse Supernova de 1987

On terminera notre voyage à travers la Voie lactée avec l'image n° 17: l'explosion de la supernova SN 1987A, un phénomène plutôt rare. Il s'agit, notons-le, d'une supernova qui a été observée notamment à Sydney, en Australie, donnant lieu à une belle expérience de «participation citoyenne».

En réalité, les supernovae sont très fréquentes à travers l'Univers. Elles surgissent lorsqu'une étoile très massive connaît une crise d'énergie en son centre qui l'amène à imploser, émettant du coup un *flash* lumineux époustouflant. Ainsi, une supernova peut

émettre durant quelques semaines autant de lumière que des *milliards* d'étoiles!

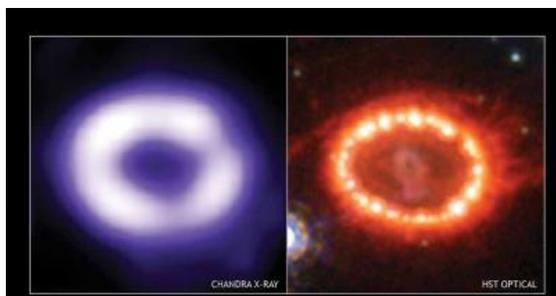
Il s'agit donc de quelque chose de très visible?

Voilà! Cependant, la plus récente supernova qui s'est produite dans notre Voie lactée remonte à 1604 – ce qui fait plus de 400 ans! Mais on estime qu'on devrait normalement en voir une à tous les cent ans environ. On est donc «à court» de supernovas!

Mais heureusement, on en a eu un avant-goût en 1987.

En effet. Une grosse étoile a explosé dans une petite galaxie satellite à la nôtre et qu'on appelle le Grand nuage de Magellan. Ce «nuage» se situe à 150 000 années-lumière de nous et il n'est (hélas) visible que depuis l'hémisphère sud. (Très bel objet à voir si vous vous rendez dans cet hémisphère.)

Or, cette galaxie est suffisamment proche de nous pour que la supernova qui y est apparue en 1987 ait été visible à l'œil nu... dans l'hémisphère sud bien sûr.



La supernova SN1987 photographiée quelques années après son «explosion» par les télescopes spatiaux Chandra et Hubble. (Source: NASA)

C'est alors que la ville de Sydney a éteint toutes ses lumières publiques,

pendant plusieurs semaines, afin de donner la chance à ses citoyens d'observer la supernova.

Cependant, à l'œil nu, elle ne ressemblait qu'à une simple étoile, donc pas des plus brillante dans le ciel. Mais ceux qui connaissaient leur ciel pouvaient la repérer assez facilement. On pouvait donc observer la supernova, surtout avec les lumières publiques éteintes.

Et ce fut l'occasion d'une première concernant les neutrinos...

Ce fut même un moment exceptionnel, puisque ça faisait longtemps qu'on savait qu'à l'occasion de l'implosion d'une supernova, on assisterait également à l'émission d'une colossale quantité de neutrinos.

Les neutrinos sont des particules élémentaires neutres qui, de ce fait, n'interagissent que très difficilement avec la matière. Ils sont par conséquent *extrêmement* difficiles à détecter.

Mais on savait aussi que s'il y en a beaucoup – comme lors d'une supernova – on parviendrait probablement à en capter quelques-uns.

Or, justement, au moment de l'explosion de la supernova SN1987, on a détecté dans un observatoire de neutrinos situé au Japon, un petit groupe de neutrinos – onze seulement. Mais c'était remarquable. Et la correspondance entre l'apparition de la supernova et le flot de neutrinos nous a confirmé que les deux phénomènes sont bel et bien reliés.

De nos jours, on continue d'observer la supernova, puisqu'elle se situe près de nous. On peut donc étudier des phénomènes associés à l'onde de choc des gaz qui se propagent autour de

l'étoile (à la vitesse de 10 000 km/s). On observe entre autres la formation de poussières, comme on l'avait prévu.

C'est dire que l'observation de cette supernova a créé une véritable révolution en nous amenant à comprendre des phénomènes complexes, ce qu'on n'avait jamais pu faire auparavant.

III – Le monde des galaxies

Passons maintenant au monde des galaxies avec l'image n° 20. Il s'agit de votre image préférée, dites-vous à la fin de l'ouvrage: un croquis de la nébuleuse Messier 51 par l'astronome irlandais William Parsons. Pourquoi est-ce votre préférée?

Depuis toujours, on voyait briller au firmament des planètes et des étoiles, sans trop savoir de quoi il s'agissait. On imaginait donc un univers constitué uniquement de planètes et d'étoiles. Les Anciens imaginaient également des étoiles entourées de planètes et avec des civilisations. Mais voilà qu'arrive cet objet inusité – Messier 51 – qui a une forme spirale, tel que le dessine William Parsons.



L'un des premiers croquis de la «nébuleuse» spirale Messier 51, réalisé par William Parsons en 1845. (Source: Wolfgang Steinicke)

On est alors en 1845, époque où on produit toujours des croquis (la photo astronomique n'existant pas encore). Parsons vient de mettre au point un

grand télescope, de 1,80 mètre de diamètre et doté d'un miroir métallique. C'est un *énorme* télescope pour l'époque et, de surcroît, un appareil de bonne qualité.

Parsons, c'est quelqu'un de formidable, qui polissait souvent son miroir afin de contrôler l'oxydation du métal. Il avait aussi mis au point une technique d'observation en équipe, technique qui s'assimile à la façon de faire dans nos grands observatoires modernes. Et il savait diriger un centre de recherche.

Avec son nouveau télescope, Parsons décide de passer en revue certains objets cosmiques, dont une nébuleuse située dans la constellation des Chiens de chasse. On l'appelle Messier 51, d'après le catalogue compilé par l'astronome français du même nom – Charles Messier (1790-1817) – qui s'était donné la peine de toutes les répertorier.

Parsons dessine donc la nébuleuse M51 et je reproduis son croquis dans mon livre. Il fait très bien ressortir la forme très particulière de l'objet: une spirale.



La majestueuse spirale Messier 51, qu'on appelle à présent la galaxie du Tourbillon, avec sa galaxie compagne (qu'avait d'ailleurs esquissé William Parsons), telle que photographiée par le télescope spatial Hubble. (Source: NASA)

C'est ainsi qu'une fois de plus, on défait une autre de nos visions de l'Univers. C'est-à-dire qu'il existe des objets cosmiques qui ont une forme autre que la sphère, une forme qu'on n'avait pourtant pas imaginée puisqu'on ne l'avait jamais vue.

Mais Parsons ignore la nature de ce qu'il dessine et il n'a pas non plus idée de la distance à laquelle se trouve cet objet. Ce sont là des questions très complexes, puisqu'il faudra attendre une cinquantaine d'années pour parvenir à les résoudre.

Mais le plus important, c'est que Parsons nous fait entrer, sans le savoir, dans un monde extraordinaire: celui des galaxies. Car, contrairement au domaine des planètes et des étoiles, *jamais personne* n'avait imaginé quelque chose de semblable.

En fait, on croyait à cette époque que la Voie lactée, c'était *tout* l'Univers!

Absolument. Jusqu'au début du XX^e siècle, on croyait que l'Univers se résumait uniquement à notre galaxie. Ainsi, on ignorait que Messier 51 est une autre galaxie, une galaxie semblable à la nôtre.

À cette époque, on considérait que tout ce qu'on voyait au firmament faisait partie de la Voie lactée, Messier 51 n'étant qu'un objet un peu plus loin de nous, mais faisant toujours partie de notre galaxie.

Pourtant, certains avaient déjà imaginé que des univers-îles, semblables à notre galaxie, pouvait exister. Ce fut entre autres le cas du philosophe allemand Emmanuel Kant (1724-1804). Mais ce n'était alors que spéculation.

Tout compte fait, Parsons inaugure ce qui deviendra l'astronomie extragalactique – la branche de l'astronomie qui s'intéresse à ce qui se passe hors de notre galaxie. Et même s'il ne sait pas ce qu'il observe, Parsons hésite à spéculer, car il se considère avant tout comme ingénieur qui cherche à obtenir les meilleures observations possibles.

Pourtant, à l'époque, les spéculations allaient bon train et on spéculait même de façon effrénée!

Eh oui. La forme de spirale qu'on observe avec Messier 51 correspondait à ce qu'on imaginait alors comme mécanisme de formation des systèmes planétaires et qu'on appelle l'hypothèse nébulaire.

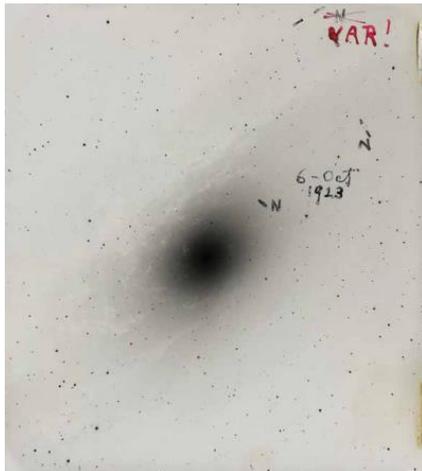
Cette hypothèse a été mise de l'avant par Kant et par l'astronome français Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Il s'agissait d'expliquer comment se sont formés le Soleil et les pla-

nètes à partir d'un nuage qui se serait condensé. Durant sa formation, le système solaire aurait justement pris la forme d'une spirale.

C'est ainsi qu'à peu près tous les astronomes se sont mis à imaginer que Messier 51 pourrait être un système solaire en formation. Or, Parsons résistait à cette idée, préférant attendre qu'on établisse la distance des nébuleuses en forme de spirale avant de se lancer dans des spéculations.

Andromède et les distances dans l'Univers

Passons maintenant à Messier 31. La photo que vous reproduisez dans votre ouvrage est le négatif d'Edwin Hubble qui, avant de devenir le plus célèbre des télescopes spatiaux, était un astronome non moins célèbre. Cette image en est une autre de rupture. Pourquoi?



À gauche, négatif du cliché obtenu par Edwin Hubble en 1924 de la «grande nébuleuse» d'Andromède (Messier 31), et telle que photographiée (à droite) par Isaac Roberts en 1888. (Sources: Carnegie Observatory et Harvard College Observatory.)

Pour faire suite à ce qu'on vient de relater, Parsons considérait qu'«on ne peut rien dire au sujet de la nature de

ces objets tant qu'on n'aura pas une idée de leurs propriétés et de leurs distances.»

Or, Edwin Hubble, en 1924, va établir la distance de l'une de ces nébuleuses – non pas Messier 51, mais plutôt Messier 31, beaucoup plus proche de nous. Il s'agit de la grande nébuleuse dite d'Andromède.

Andromède avait été observée environ mille ans auparavant par un astronome perse du nom d'Abd al-Rahman al-Soufi, dont je parle dans mon livre.

Et comme je l'explique clairement, grâce à un type très particulier d'étoiles variables, Hubble parvient à établir la distance à laquelle se trouve Andromède de nous, soit à deux millions et demi d'années-lumière.

Voilà donc qu'Andromède se trouve bien en dehors de la Voie lactée puisque, comme nous l'avons vu, celle-ci ne mesure que 100 000 années-lumière. Hubble établira par la suite la distance de plusieurs autres objets qu'on appelait des «nébuleuses extragalactiques».

A cette époque, on observe beaucoup d'objets dont on ignorait la nature. C'est aussi le cas ici?

Tout à fait. On dessine quantité d'objets cosmiques dont on ignore de quoi il s'agit. On les dessine par ailleurs très bien. Dans le livre, je montre les croquis qui, mis ensemble, dressent le portrait de Messier 51, comparés à une image de la galaxie prise par le télescope Hubble. Or, l'image est d'une ressemblance phénoménale... même si on n'avait *aucune idée* de la distance à laquelle se trouvent ces objets!

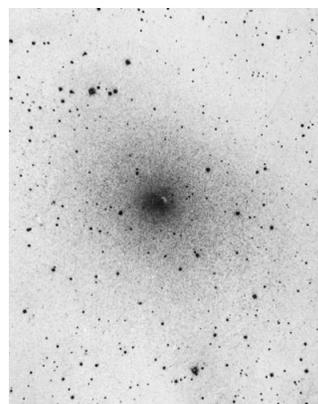
C'était aussi vrai du temps de Galilée, en 1610 comme du temps de Parsons, en 1845?

Absolument. En ces temps-là, on ne savait pas ce qu'on dessinait. Quand par exemple on voit Saturne «avec des oreilles», on n'a aucune idée de quoi il s'agit. Même chose pour les taches solaires dessinées par Galilée... Ce n'est que trois cents ans plus tard qu'on se rend compte qu'il s'agit de zones sombres créées par la présence de champ magnétique à la surface du Soleil.

C'est ainsi que les images qui ont mené à d'importantes découvertes – que j'appelle les «images transformatrices» – sont souvent peu spectaculaires. En effet, la plupart du temps, elles ne le sont pas simplement parce qu'on ignore de quoi il s'agit. Autrement dit, souvent, la découverte spectaculaire qu'on a sous les yeux... ne viendra que beaucoup plus tard.

On achève notre périple illustré dans le monde des galaxies avec l'image n° 23. Il s'agit d'une photo de la galaxie NGC 185 prises par l'astronome allemand Walter Baade.

L'intérêt de cette photo, qui peut sembler encore une fois banale, est qu'elle nous permet de distinguer des étoiles au sein d'une galaxie lointaine.



L'une des photographies de NGC 185 prises par Walter Baade nous permettant de voir, pour la première fois, des étoiles individuelles au sein d'une galaxie. (Source: *Astrophysician Journal*)

Pour parvenir à photographier les étoiles d'une autre galaxie, il faut disposer de conditions de stabilité atmosphérique absolument extraordinaires, de même qu'une noirceur de ciel exceptionnelle.

Walter Baade va réussir ce tour de force en Californie dans des circonstances uniques. On était en effet en pleine Seconde Guerre mondiale et Los Angeles était plongée dans la noirceur totale, par crainte d'une attaque de l'aviation japonaise. Baade étant d'origine allemande, il est laissé à lui-même à l'observatoire du Mont Wilson, pendant que ses collègues américains participent à l'effort de guerre. Il bénéficie alors d'un ciel noir extraordinaire et d'une stabilité atmosphérique inhabituelle, ce qui va lui permettre de prendre des photographies dans les-

quelles on pourra voir les étoiles individuelles – chose qui demeurent aujourd'hui encore assez difficile à faire.

NGC 185 est une petite galaxie *ordinaire* qui ne présente pas vraiment d'intérêt. Sauf qu'elle a été l'une de celles que Baade a réussi à photographier. Il est même parvenu à identifier des différences fondamentales, à savoir que les étoiles situées au centre de la galaxie sont plutôt jaunes tandis que celles se trouvant en périphérie sont davantage bleues. Il met ainsi en évidence l'existence d'une évolution différente entre ces deux régions de la galaxie.

Ces travaux donnent naissance au champ d'études sur l'évolution des galaxies, un domaine fabuleux de l'astrophysique du XX^e siècle.

IV - La cosmologie

On arrive à la fin de notre parcours illustré, en abordant le domaine de la cosmologie. On dirait que c'est un domaine un peu «fourre-tout», non?

Il s'agit en fait du champ le plus spéculatif de l'astronomie. En réalité, la cosmologie existe depuis toujours puisque de tout temps, on essaie d'imaginer l'Univers, ses origines, son évolution, sa finalité... Et un peu tout le monde a ses propres théories là-dessus. Mais ce qui distingue la cosmologie du XX^e siècle, c'est qu'elle repose sur des méthodes quantitatives – la modélisation numérique – grâce auxquelles on tient compte des lois de la physique.

Ce qu'il y a de fascinant dans cette portion de votre ouvrage, c'est qu'on a l'impression que la science-fiction se fait science lorsque, notamment,

vous parlez des trous noirs présumés et des ondes gravitationnelles.

Prenons par exemple l'image n° 26 de la galaxie NGC 4993 prise par le télescope spatial Hubble (page suivante). Il s'agit de la galaxie d'où proviendraient les ondes gravitationnelles détectées en 2015. Mais est-on certain que ces ondes provenaient bien de cette galaxie?

Oui, tout à fait, on l'est à 99,999%.

Mais d'abord, précisions qu'on parle ici d'ondes *gravitationnelles*... qui n'ont *rien à voir* avec des ondes sonores, qui font vibrer nos tympans, ni avec les ondes électromagnétiques, comme la lumière.

Ce sont des ondes difficilement perceptibles, en fin de compte?

Effectivement. D'ailleurs, même Albert Einstein, qui les a pourtant prédites à partir de sa théorie sur la relativité générale de 1916, n'y a jamais trop cru. C'est ainsi que certains jours, il pouvait dire que ces ondes existaient, puis se démentir quelque temps plus tard!

Je crois que la meilleure analogie qu'on puisse appliquer à ce type d'ondes très particulier, ce sont les ondes mécaniques qui se propagent à la surface de l'eau ou d'un trampoline – des ondes qui font bouger les objets. Imaginez donc une onde qui se propage «à la surface» de l'espace.

Imaginez deux enfants qui sautent sur un trampoline, ils vont produire des ondes qui se propagent; c'est un peu ça les ondes gravitationnelles. Dans ce cas, sur leur passage, l'espace se contracte et se dilate, comme l'eau ou le trampoline qui bougent sous l'effet d'une onde mécanique. Mais, dans le cas des ondes gravitationnelles, on parle de mouvements infimes et difficilement détectables.

Mais ces ondes proviennent tout de même de *quelque part* dans l'espace?

Absolument. En fait, ce qui génère des ondes gravitationnelles, ce sont des objets très massifs qui interagissent, par exemple deux étoiles à neutrons qui se fusionnent ou deux trous noirs qui entrent en collision. Au moment où ces objets extrêmement massifs se rencontrent, il se produit une onde gravitationnelle. C'est une ren-

contre *catastrophique* qui a pour résultat de générer un seul objet encore plus massif.

Pour revenir à l'image n° 26, comment peut-on savoir que les ondes gravitationnelles détectées en août 2017 provenaient de la galaxie NGC 4993?

C'est grâce à une convergence exceptionnelle d'observations. D'abord, le 17 août, trois observatoires répartis sur Terre ont détecté en même temps l'arrivée de l'onde gravitationnelle. On a alors pu déterminer approximativement d'où émanait ce faisceau d'ondes par trigonométrie. Ensuite, un télescope spatial conçu pour capter les rayons gamma a pu localiser dans la même région une source possible de rayons gamma coïncidant avec l'émission de l'onde gravitationnelle. Et puis, en quelques heures, des centaines d'astronomes ont ciblé la galaxie NGC 4993, comme l'a fait le lendemain le télescope Hubble.



La galaxie NGC 4993 d'où est provenue l'onde gravitationnelle qu'on a captée le 16 septembre 2015 (et connu de tous que le 11 février 2016). (Source: NASA/ESA)

L'image que je reproduis dans mon livre est fantastique puisque c'est à l'heure actuelle la seule où on voit la source de lumière associée à l'onde gravitationnelle.

On a par la suite pu déduire la masse des deux objets qui, au moment de leur collision, ont généré l'onde gravitationnelle; il s'agit d'objets ayant quelques fois la masse du Soleil. Ce pourrait être une paire d'étoiles à neutrons.

Une parcelle de l'Univers... vide?

Passons maintenant à l'image n° 28, la fameuse image du champ profond prise par le télescope Hubble. Pour l'occasion, le télescope a visé une minuscule portion du firmament où il n'y avait apparemment rien à voir. C'était un projet qui a suscité beaucoup de critiques.

L'idée est venue de Robert Williams, directeur, à l'époque, du Space Telescope Science Institute. Il a proposé qu'on utilise Hubble pour pointer une direction du ciel où on présumait qu'il n'y a rien. Il s'agissait donc d'aller à la pêche!

Ce projet a été contesté pour deux raisons. D'abord parce que les astronomes n'aiment pas trop que les observatoires fassent des choses que seul leur directeur décide.

Et ça vous inclut, ça?

Absolument, ça m'inclut, car le temps dont on dispose pour observer à l'aide de tout télescope est compté. C'est même une denrée rare. Or, tout grand observatoire octroie une certaine flexibilité laissée à la discrétion

du directeur, soit 10% du temps d'observation. On appelle cela le «temps discrétionnaire du directeur».

Ainsi donc, Williams a mis sur pied un programme pour observer durant des centaines d'heures une infime région du ciel – toujours la même – en utilisant plusieurs filtres pour observer en différentes longueurs d'onde.

On pourrait même ajouter que Williams a eu des «menaces» de la part d'astronomes très prestigieux et d'universités éminentes qui l'avertissaient en substance: «Bob, si tu vas de l'avant avec ce projet, on va tout faire pour te faire mettre à la porte!»

Williams a néanmoins persévéré et a mené son projet en collaboration avec un petit groupe de chercheurs postdoctoraux de l'Institut du télescope spatial.



Dans une infime portion du firmament, pas plus grosse qu'une tête d'épingle et où on estimait qu'il n'y avait rien à voir, le télescope Hubble a découvert... des milliers de galaxies!

Résultat: Il a procuré à la communauté une banque d'images extraordinaire, des images qui nous amènent à l'époque où l'Univers n'avait qu'un milliard d'années (par rapport aux 13,8 milliards d'années d'existence).

C'est le «bébé univers».

Tout à fait. A l'époque, l'Univers était dans un état qui n'est pas celui d'aujourd'hui. Ce projet a été un vif succès, de sorte que par la suite, on a fait des suivis. Ainsi, la parcelle de l'Univers observée dans le visible par Hubble l'a été à nouveau dans les rayons X, dans l'infrarouge et avec ALMA.

On a aussi réalisé d'autres photos du genre, dont le *Hubble Ultra Deep Field* et, dernièrement, le *Hubble Extreme Deep Field*. Le projet de Williams a donc fait «des bébés»!

Et le directeur a conservé son poste?

Absolument, il est demeuré en poste.

Une dernière réflexion: retour sur Terre !

On va terminer ce périple avec l'image n° 30, un peu étonnante, puisqu'après tout ce voyage interstellaire et intergalactique, on rentre à la maison, avec l'image d'un «simple» croissant de Lune.

Eh oui, un simple croissant de Lune, mais vu par-dessus l'ultra mince couche de notre atmosphère.

L'idée ici, c'est de lancer le lecteur dans une réflexion à la suite de notre grand voyage dans le temps et dans l'espace. Il

s'agit aussi de montrer qu'on est à la surface d'un monde très fragile et peut-être même très éphémère.

En effet, notre atmosphère est une couche de cent kilomètres d'épaisseur tout au plus et on ne peut habiter que les premiers trois kilomètres. La masse totale de notre atmosphère n'est que de quelques pour-cent de la masse totale de l'eau qu'on a sur Terre –ce qui n'est déjà pas beaucoup!

Nous habitons donc un monde extrêmement fragile puisque nous dépendons de cette toute petite couche d'atmosphère.

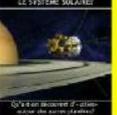
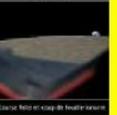
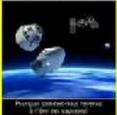
Et là, nous nous rendons compte que nous sommes en train de modifier l'atmosphère et qu'on le fait en l'espace de cent ou de deux cents ans seulement. Et on est en train de faire ça d'une façon dangereuse.

En terminant, je rappelle les paroles de Thomas Brown, cet écrivain britannique qui a dit qu'on n'est peut-être qu'«une parenthèse dans l'éternité». Et moi, j'ajouterai qu'il faut faire attention, car cette parenthèse pourrait se refermer très rapidement!



La Lune photographiée de l'espace par un équipage de la Station spatiale internationale. (Photo: NASA)

Les Fascicules de Voyage dans l'espace

<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 1</p> <p>DESTINATION MARS</p>  <p>« On veut aller sur Mars à tout prix, mais comment ? »</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 2</p> <p>LA LUNE AU TEMPS D'APOLLO</p>  <p>Les astronautes ont marché sur la Lune en 1969. Mais comment ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 3</p> <p>DE LA VIE DANS L'UNIVERS?</p>  <p>Survivra-t-on ailleurs que sur la Terre ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 4</p> <p>À QUOI SERT D'EXPLORER LE SYSTÈME SOLAIRE ?</p>  <p>Qu'est-ce qu'un voyage d'exploration ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 5</p> <p>LES SATELLITES MILITAIRES</p>  <p>La guerre dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 6</p> <p>LA RECHERCHE DE LA VIE EXTRATERRESTRIQUE</p>  <p>À la recherche d'une nouvelle planète habitable ?</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 7</p> <p>PLANÈTES ET EXOPLANÈTES</p>  <p>Il y a des planètes dans tout l'univers.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 8</p> <p>VOYAGE, VOYAGE DANS L'ESPACE</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 9</p> <p>DÉCHETS SPATIAUX</p>  <p>Quelle catastrophe pour nous ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 10</p> <p>HOMME DANS L'ESPACE</p>  <p>du rêve à la réalité.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 11</p> <p>LA VOIE LACTÉE</p>  <p>Notre terrain de jeu.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 12</p> <p>EMPECZ-ONS LA MONTÉE EN POUSSÉE</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 13</p> <p>LE JEU DES DATES</p>  <p>Il y a des planètes dans tout l'univers.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 14</p> <p>PLUTON</p>  <p>La vie sur des planètes lointaines.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 15</p> <p>SE DÉPLACER SUR LA LUNE (Première partie)</p>  <p>La vie sur la Lune ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 16</p> <p>SE DÉPLACER SUR LA LUNE (Deuxième partie)</p>  <p>La vie sur la Lune ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 17</p> <p>VENIR À BORD DE LA STATION SPATIALE</p>  <p>La vie dans l'espace.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 18</p> <p>UN AUTOMNE PLANÉTAIRE</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 19</p> <p>LES EXOPLANÈTES NOUS RESSEMBLENT-ELLES ?</p>  <p>Il y a des planètes dans tout l'univers.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 20</p> <p>VOYAGE DANS L'ESPACE AU CH-24</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 21</p> <p>LES EXOPLANÈTES NOUS RESSEMBLENT-ELLES ?</p>  <p>Il y a des planètes dans tout l'univers.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 22</p> <p>MYSTÈRES PLANÉTAIRES</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 23</p> <p>HOEL 1961</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 24</p> <p>DÉMARER LA LUNE</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 25</p> <p>À QUOI SERT L'ESPACE ?</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 26</p> <p>ALEXEI LEONOV</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 27</p> <p>MYSTÈRES PLANÉTAIRES</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 28</p> <p>MYSTÈRES PLANÉTAIRES</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 29</p> <p>LA GRANDE PÊCHE DE 1950</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 30</p> <p>MYSTÈRES PLANÉTAIRES</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 31</p> <p>LES EXOPLANÈTES NOUS RESSEMBLENT-ELLES ?</p>  <p>Il y a des planètes dans tout l'univers.</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 32</p> <p>TITANES À APOLLO 11</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 33</p> <p>APOLLO 11</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 34</p> <p>MYSTÈRES PLANÉTAIRES</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 35</p> <p>MYSTÈRES PLANÉTAIRES</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 36</p> <p>LES L'ARABES DE L'ÈRE 2019</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 37</p> <p>POURQUOI MARS ?</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 38</p> <p>QU'EN SERONS-NOUS EN 2040 ?</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 39</p> <p>L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 40</p> <p>LA LUNE, CETTE MÉCANIQUE</p>  <p>Comment voyager dans l'espace ?</p>		