

**L'univers
est une
éponge**

J. Richard Gott

L'univers est une éponge

Traduit de l'anglais (États-Unis)
par Marc Lachièze-Rey

Préface de François Bouchet

Directeur de recherche CNRS
Institut d'astrophysique de Paris

DUNOD

The original edition of this work has been published in English in 2016 by the Princeton University Press, under the title *The cosmic web: Mysterious Architecture of the Universe*.

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en anglais en 2016 par Princeton University Press, sous le titre *The cosmic web: Mysterious Architecture of the Universe*.

Copyright © 2016, J. Richard Gott

Licensed by Princeton University Press, Princeton New Jersey, U.S.A., in conjunction with their duly appointed agent, L'Autre agence. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publishers.

Conception de la couverture et de la maquette intérieure:
Grégory Bricout

© Dunod, 2017, pour la traduction française

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-075772-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Les cent dernières années ont bouleversé notre vision du monde ; un changement de perspective vertigineux où progrès théoriques et techniques ont établi le fait que notre soleil constitue, avec trois cents milliards d'autres, une galaxie en forme de disque : la Voie lactée. Une parmi des milliards qui, pour la plupart, s'éloignent de plus en vite les unes des autres. Certaines cependant s'agrègent en amas de galaxies très peuplés, tandis que d'autres révèlent des alignements filamentaires moins denses reliant les amas de galaxies. D'immenses régions interconnectées sont quasiment vides de toute galaxie. Ces structures remarquables ont émergé sous l'influence de la gravité à partir de minuscules fluctuations primordiales dont nous mesurons indirectement les propriétés.

C'est la relativité générale publiée par Einstein en 1915 qui nous a donné les outils intellectuels pour accomplir ce bouleversement, et ce sont les simulations numériques sur des ordinateurs de puissance croissant exponentiellement qui ont permis d'explorer en détail la dynamique complexe de la distribution de matière dans l'Univers, tandis que l'accroissement de la taille des télescopes et de la sensibilité des capteurs de lumière ont permis, eux, de cartographier le cosmos à des échelles toujours plus grandes.

Ce développement de la cosmologie physique nous est raconté avec brio par l'un de ses acteurs, qui a peu ou prou participé à la plupart des aventures intellectuelles de ce domaine pendant près d'un demi-siècle, à partir d'un point de vue privilégié : le département d'astronomie de l'université de Princeton où il a passé la plus grande partie de sa carrière. J. Richard Gott nous fait revivre des moments qui ont marqué tous les protagonistes de cette histoire : grands congrès, débats, parutions d'articles clés, ou le fameux déjeuner du mardi qu'animait John Bahcall

à l'*Institute for Advanced Study* et où tout cosmologue, hors URSS, est venu présenter ses avancées.

Richard Gott offre ainsi au lecteur la possibilité de voir de près comment se déroule la recherche scientifique dans un domaine en ébullition avec ses avancées technologiques, ses méandres, fausses pistes, et moments de basculement intellectuel de la communauté. Ce témoignage presque sociologique se lit facilement, mais il faudra en revanche une dose certaine de persévérance à l'honnête homme qui voudra suivre en détail tous les développements de l'auteur, qui ne recule pas devant l'introduction des concepts et outils dont il se sert. Ceci a le mérite de permettre de comprendre véritablement bon nombre des questions que se sont posées les cosmologues du dernier siècle, et celles qui ont émergé en cours de route. Cet ouvrage n'est néanmoins ni un manuel, ni un livre historique sur le sujet. Si mes souvenirs de cette époque convoquent quelques acteurs et expériences importants qui ne sont pas abordés, l'ambiance et maints questionnements de la communauté des cosmologues y sont décrits fidèlement.

Dès notre première rencontre, en 1982, j'ai été frappé par le caractère profondément original de Richard, grand scientifique non conformiste et plein d'humour. À cette époque, deux conceptions antagonistes s'affrontaient. Pour l'une, dont le héraut fut Jim Peebles, son collègue de Princeton, l'évolution gravitationnelle des fluctuations primordiales devait procéder hiérarchiquement par la formation première de petits rassemblements de la matière plus ou moins sphériques s'agrégeant ensuite pour produire des structures à des échelles de plus en plus vastes : cela conduisait à une répartition des galaxies évoquant la formation de boulettes, les amas de galaxies très denses se détachant sur un fond sous-dense. Mais l'autre école de pensée, emmenée en URSS par Yakov Zeldovich, suggérait l'idée que des fluctuations initiales d'un type différent conduisent à une première phase de formation sous forme de structures planaires à grande échelle – des crêpes pour poursuivre l'analogie alimentaire – se fragmentant ensuite pour former les galaxies, d'où l'idée d'un scénario « à l'envers » de formation des grandes échelles avant celle des galaxies. Ce scénario conduisait à imaginer une structure à grande échelle en nid d'abeilles évoquant le gruyère. Les données de l'époque ne permettaient pas de trancher entre les propositions de l'Est

et de l'Ouest. Mais les lignes de front étaient bien établies en ce début des années 1980... qui est aussi le moment où sont apparues les idées clés d'inflation et de matière sombre froide.

Finalement, aucune de ces deux conceptions n'a complètement prévalu : pas de gruyère ni de boulettes, mais une éponge ! En effet, il s'est avéré que les amas de galaxies sont en réalité des surdensités de matière reliées par des filaments moins denses, entourées d'un fond sous-dense de grandes régions vides de galaxies reliées par des « tunnels », sortes de filaments vides. En bref, deux types de structures entrelacées – les régions surdenses et sous-denses –, miroirs l'une de l'autre, précisément comme dans une éponge. Cet arrangement remarquable résulte naturellement de petites fluctuations primordiales se répartissant symétriquement autour de la densité moyenne, comme celle qu'une phase d'inflation de l'Univers primordial sait produire. L'évolution gravitationnelle ultérieure augmente alors le contraste de la structure initiale, contractant le diamètre des amas et des filaments tout en préservant la topologie générale. Ceci a aujourd'hui été confirmé de façon détaillée grâce à des simulations numériques de l'évolution gravitationnelle de grandes régions de l'Univers à partir de fluctuations initiales déduites des idées d'inflation et de matière sombre froide. Notons au passage qu'après une période indécise, la concordance entre les observations et les simulations n'a cessé de croître au fur et à mesure que les simulations et les relevés observationnels croissaient tous deux en termes de volume analysé.

Un des éléments clés de cette synthèse fut la mise en œuvre d'outils appropriés d'analyse mathématique des données, aussi bien observées que simulées. Il s'agit en particulier d'outils d'analyse topologique, comme le *genus*, dont Richard Gott fut le pionnier en cosmologie. Il y était sans doute prédestiné par son intérêt précoce, attesté par la découverte, dès l'âge de 18 ans, de polyèdres réguliers ayant une topologie de type éponge et capables de paver continument l'espace. Une preuve de plus que les progrès individuels sont une combinaison de chance et de talent. C'est donc du point de vue de cette approche que Richard Gott nous raconte comment s'est développée la synthèse entre les points contradictoires de l'Est et de l'Ouest au début des années 1980. Une réussite due également au progrès collectif d'une communauté

scientifique qui s'est fortement développée grâce aux avancées technologiques des télescopes et des ordinateurs. Les nombreuses illustrations du livre, tirées des articles scientifiques originaux, offrent une visualisation graphique directe et très parlante des progrès observationnels et numériques.

Richard Gott conclut son livre en présentant les multiples défis posés par la découverte observationnelle des effets de ce qu'il est convenu d'appeler l'énergie noire, terme évoquant à la fois les difficultés à la mettre en évidence, et plus encore notre ignorance quasi-totale quant à sa nature véritable. Il décrit ensuite les spéculations actuelles sur le futur très lointain de l'Univers en fonction des propriétés encore mal mesurées de cette énergie noire, qui pourrait d'ailleurs n'être que la signature d'une modification plus ou moins profonde de la théorie de la relativité générale d'Einstein. L'auteur nous invite alors à imaginer le destin ultime de l'Univers, un peu comme une expérience de pensée permettant de discuter l'interprétation d'éventualités rarissimes comme les cerveaux de Boltzmann. Un témoignage de plus de la curiosité inextinguible et de l'ouverture d'esprit de Richard Gott, guide très expérimenté de chemins de traverse qu'il s'est plu à parcourir.

François Bouchet
Directeur de recherche CNRS
Institut d'astrophysique de Paris

Remerciements

Je remercie avant tout ma femme Lucy, pour son amour et son soutien, ainsi que pour son expertise professionnelle dans l'édition du manuscrit. Je remercie ma fille Elizabeth et mon gendre Michael pour leur amour et leur soutien. Je remercie mon collègue Michael Vogeley qui a bien voulu lire la totalité du manuscrit et suggéré d'excellents commentaires et ajouts ; Bob Vanderbei et Li-Xin Li pour leur assistance à propos des diagrammes ; Zachary Slepian, Matias Zaldarriaga, Nima Arkani-Hamed et Andrew Hamilton pour leurs utiles commentaires. Je remercie mon agent Jeff Kleinman, avec qui c'est toujours un plaisir de travailler, et ma merveilleuse éditrice chez Princeton University Press, Ingrid Gnerlich, ainsi que son assistant Eric Henney. Je remercie pour leur aide experte mon éditrice Brigitte Pelner, ma relectrice Linda Thompson, et mon illustrateur Dimitri Karetnikov.

C'est encore un plaisir de remercier les nombreux collègues avec lesquels j'ai travaillé sur la structure de l'univers à grande échelle : les premiers, Jim Gunn, Martin Rees, Ed Turner, Sverre Aarseth et Suketu Bhavsar ; puis Adrian Melott et Mark Dickinson, avec qui j'ai développé l'idée de la topologie spongieuse ; Andrew Hamilton qui a dérivé une formule critique ; David Weinberg avec qui j'ai abondamment collaboré ; Trinh X. Thuan et Michael Vogeley avec qui j'ai analysé des échantillons d'observations ; Changbom Park dont les simulations informatiques ont prouvé que la matière noire froide pouvait engendrer des « Grands Murs » ; Barbara Ryden qui a travaillé sur la topologie ; Wes Colley et Changbom Park, avec qui j'ai travaillé sur le fond diffus cosmologique ; Mario Jurić qui a aidé à mesurer le « Grand Mur de Sloan » ; Lorne Hofstetter qui a aidé à en fabriquer une photo ; Juhan Kim qui, avec Changbom Park, a créé les simulations « Horizon Run » ; Clay

Hambrick, Yun-Young Choi, Robert Speare et Prachi Parihar qui ont participé à l'application de notre technique de topologie pour comparer les grandes simulations informatiques avec les observations du relevé Sloan. Je remercie Zack Slepian pour sa collaboration à propos d'une formule permettant de caractériser l'énergie sombre. Beaucoup de ces personnes ont suivi ce projet depuis des décennies et sont devenues des amis pour la vie. Je chéris toutes ces collaborations.

Avant-propos

Galilée a écrit : « La philosophie [nature] est écrite dans ce grand livre qui est devant nos yeux, je veux dire l'univers... Ce livre est écrit en langage mathématique, et les symboles sont les triangles, les cercles et les autres figures géométriques. »

Il s'est avéré qu'il en était bien ainsi pour l'arrangement des galaxies dans l'univers : sa compréhension requiert un langage géométrique.

À l'âge de 18 ans, j'ai découvert des structures intriquées spongieuses, composées de triangles, carrés, pentagones ou hexagones entremêlés. Certaines d'entre elles divisaient nettement l'espace en deux parties égales et complètement entrelacées. Il s'agissait de polyèdres réguliers semblables à des éponges, des figures composées de polygones réguliers disposés de manière identique autour de chaque sommet.

À l'adolescence, je fus confronté à l'ancienne sagesse grecque. Elle déclarait qu'il existait cinq, et seulement cinq, polyèdres réguliers : le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre, et l'icosaèdre. Cela avait été prouvé depuis très longtemps. Je me suis pourtant dit : « Peut-être n'en est-il pas ainsi. » Cela devint mon projet scientifique de lycée, et je le présentai à la foire scientifique locale de Louisville, Kentucky. C'est sans doute étonnant, mais cela allait plus tard jouer un rôle important dans mon propre cheminement pour comprendre l'agencement des galaxies dans l'univers.

J'étais inspiré par Johannes Kepler, lui-même inspiré par l'ancienne sagesse et les cinq polyèdres réguliers. Kepler s'était aussi intéressé aux trois pavages polygonaux réguliers du plan (euclidien) : le damier, le grillage à mailles hexagonales, et le remplissage par des triangles, six autour de chaque sommet. Il estimait qu'ils devaient être considérés comme des polyèdres également. En effet, le damier comme le cube étaient des

arrangements réguliers de polygones, même s'il se trouvait que l'un était plat et l'autre en trois dimensions. Kepler considérait ainsi un damier comme un nouveau polyèdre régulier, avec un nombre infini de faces. Mais son inventivité ne s'est pas arrêtée là. Il a également découvert deux nouveaux polyèdres étoilés réguliers. Les faces du premier sont des étoiles à cinq branches, comme sur le drapeau américain. Une étoile n'est-elle pas tout aussi régulière qu'un pentagone? Comme lui, elle a cinq sommets; comme lui, elle se construit en tirant cinq segments de longueurs égales qui les relient. La seule différence est que les lignes sont autorisées à se croiser! Il suffit de laisser vagabonder un peu son esprit pour voir les étoiles à cinq branches comme des polygones réguliers. Kepler les a prises comme les faces de son nouveau polyèdre régulier, en les autorisant à se traverser les unes les autres de manière à former une étoile tridimensionnelle. Il avait compris que l'on peut trouver des choses nouvelles en transgressant juste un peu les règles établies (voir planche couleur 1).

Kepler avait également imaginé une utilisation fascinante des polyèdres en astronomie. On connaissait six planètes à son époque. Il leur associa un ensemble de six sphères imbriquées, centrées sur le Soleil, dont les rayons étaient égaux aux distances de ces planètes au Soleil. Il a ensuite tenté d'insérer les cinq polyèdres réguliers connus entre ces sphères, afin d'expliquer la géométrie du système solaire. L'idée n'a pas vraiment fonctionné. Et elle s'est écroulée complètement lorsque d'autres planètes ont été découvertes. En revanche, Kepler fut le premier à comprendre, et cette fois-ci avec raison, que les orbites de ces planètes sont elliptiques, et non pas circulaires, ce qui fit sa célébrité.

La géométrie de mes polyèdres spongieux ressemblait à celle d'une éponge marine, traversée de nombreux trous de percolation. Allaient-ils rester un pur fantôme mathématique? Ou bien pouvaient-ils trouver une application pratique dans l'astronomie du monde réel? Il s'avérera plus tard qu'ils allaient servir à comprendre la manière dont les galaxies se regroupent.

Notre Galaxie, la Voie lactée, contient 300 milliards d'étoiles. Edwin Hubble a découvert qu'elle n'était pas la seule dans l'espace. Il y a d'innombrables autres galaxies, tout aussi étendues que la nôtre. En outre, cet ensemble de galaxies est en expansion, comme je le décris dans le chapitre 1. Mais comment ces galaxies sont-elles disposées dans l'espace?

La question s'est révélée être un casse-tête pour les astronomes. Elles se rassemblent en amas, et le chapitre 2 explique comment Fritz Zwicky a étudié ces derniers à Caltech. À la suite de son travail, pendant la guerre froide, les cosmologistes américains ont adopté un modèle « boulettes de viande » dans lequel les amas de galaxies, de densité élevée, flottent dans une mer de faible densité, comme décrit dans le chapitre 3. Pendant ce temps, l'école russe de cosmologie favorisait un modèle dans lequel les galaxies formaient plutôt un gigantesque nid d'abeilles dans l'espace, avec de grands vides isolés ; ce que je qualifie d'« univers-gruyère » (chapitre 4). J'ai établi plus tard que ces deux visions étaient incompatibles avec l'idée nouvelle d'inflation¹ (chapitre 5), et que cette dernière impliquait une structure spongieuse dans laquelle de grands amas de galaxies étaient reliés par des filaments de galaxies, tandis que de grands vides étaient reliés les uns aux autres par des tunnels de faible densité (chapitre 6).

En me souvenant des polyèdres de ma jeunesse, j'ai écrit avec Adrian Melott (université du Kansas) et Mark Dickinson (université de Princeton) un article prédisant que les galaxies devaient être disposées comme sur une éponge cosmique géante, en relation avec la théorie de l'inflation. Les efforts que nous fîmes pour vérifier cette prédiction ont constitué un chapitre de la grande histoire des efforts héroïques des équipes d'astronomes qui entamèrent la cartographie de l'univers, comme décrit dans les chapitres 7, 8 et 9. Ces études nous ont donné quelques renseignements sur le début de l'univers. Tout comme les cartographes du passé ont arpenté la Terre, ces cartographes cosmiques ont commencé la cartographie de notre univers en y analysant la distribution des galaxies. Les premiers relevés cataloguaient quelque mille galaxies ; ils en englobent maintenant plus d'un million. Des cartes de leur répartition tridimensionnelle ont été dressées ; et elles révèlent en effet une structure qui s'apparente à celle d'une éponge : les grands amas de galaxies sont reliés par des filaments, des chaînes de galaxies, ce qui constitue une géométrie spongieuse, tandis que les régions vides sont reliées par des tunnels de faible densité. On appelle tout cela la « toile cosmique ». De fantastiques chaînes filamenteuses de galaxies, qui relient de grands amas sur plus d'un milliard d'années-lumière de longueur, constituent les plus grandes structures

de l'univers. L'une d'elles, appelée « le grand Mur de Sloan », a permis à Mario Jurić et moi-même de figurer dans le *Livre Guinness des Records*, sans que nous ayons eu besoin de fabriquer le plus grand ballon du monde avec de la ficelle !

Ces grandes structures cosmiques, nous les voyons comme les restes fossiles, immensément agrandis, de microscopiques fluctuations quantiques aléatoires présentes dans l'univers primitif. Ces fluctuations avaient elles-mêmes été engendrées auparavant, peut-être par une inflation cosmique qui se serait déroulée durant la première 10^{-35} seconde de l'univers. L'idée semble s'accorder avec les observations des fluctuations dans le fond diffus cosmologique en micro-ondes, reliquat des premiers instants de l'univers (chapitre 10).

Toutes ces structures nous éclairent sur l'univers primitif. Mais elles peuvent également être utilisées pour prévoir notre avenir, comme décrit dans le chapitre final. Les dimensions de l'Univers continueront-elles à augmenter éternellement de façon exponentielle, comme le suggèrent certains modèles ? Ou bien le feront-elles d'une façon plus lente ? À moins que tout ne finisse catastrophiquement dans une singularité (le Big Rip) dans les prochaines 150 milliards d'années ? Une étude attentive de la toile cosmique peut aider à répondre à ces questions. Distinguer ces futurs alternatifs possibles constitue aujourd'hui l'un des domaines prioritaires de la recherche en astrophysique.

Démarrant avec un humble projet scientifique pour le lycée, jusqu'à des collaborations de cartographie impliquant des centaines d'astronomes, ce livre vous donnera un éclairage sur la façon dont se conduit la recherche scientifique. Il raconte notamment comment des connexions inattendues peuvent faire surgir de nouvelles idées, et comment la conjonction de simulations informatiques et de relevés télescopiques géants a transformé notre compréhension de l'univers. Ce compte-rendu semi-autobiographique est centré autour de mes propres aventures, mais il met aussi en jeu de nombreux protagonistes dont les idées séminales ont fait progresser la discipline. J'ai eu la chance de travailler avec quelques-uns des plus grands astronomes de notre génération, qui enquêtaient d'une manière ou d'une autre sur tel ou tel aspect de cette histoire : regroupement des galaxies, lentilles gravitationnelles, simulations informatiques, cartographie des

structures à grande échelle, inflation et énergie sombre... Ce livre, écrit de mon point de vue personnel, raconte mon parcours sinueux à travers le réseau compliqué des personnages talentueux qui ont bataillé pour comprendre l'organisation de l'univers aux plus grandes échelles, pour dévoiler la toile cosmique.

J. Richard Gott
Princeton, New Jersey

1

Hubble découvre l'Univers

On peut qualifier Edwin Hubble de découvreur de l'Univers. Leeuwenhoek a découvert le monde microscopique en regardant dans son microscope; Hubble a découvert l'univers macroscopique à l'aide du grand télescope du Mont Wilson (Californie), de 2,5 m de diamètre.

Avant Hubble, nous savions que nous vivions dans un ensemble d'étoiles, notre Galaxie, la Voie lactée: un disque en rotation constitué de 300 milliards d'étoiles, dont toutes celles que vous pouvez voir la nuit. La plus proche, Proxima Centauri, se situe environ à 4 années-lumière de distance, ce qui veut dire que sa lumière met 4 ans à nous parvenir, en voyageant à 300 000 km/s. Sirius, l'étoile la plus brillante dans le ciel, est à environ 9 années-lumière de distance. Les étoiles sont séparées par des distances énormes, environ 30 millions de fois leur diamètre. Entre elles, l'espace interstellaire est très vide, mieux qu'un vide de laboratoire sur Terre.

La Voie lactée a la forme d'une assiette: un mince disque de 100 000 années-lumière de diamètre, à l'intérieur duquel nous sommes situés. Quand nous regardons dans la direction perpendiculaire à ce disque, nous voyons seulement les étoiles les plus proches situées dans sa faible épaisseur, la plupart à moins de quelques centaines d'années-lumière de distance. Les 8 000 étoiles (environ) que nous pouvons apercevoir à l'œil nu dans le ciel, nos voisins les plus proches, occupent une minuscule sphère nichée à l'intérieur de la mince épaisseur du disque. Mais quand nous regardons dans la direction du (plan du) disque

lui-même, nous voyons la lueur accumulée de toutes les étoiles de ce disque, beaucoup plus éloignées. Elles forment dans le ciel une bande de lumière dont les 360° dessinent un grand cercle, ce que nous appelons la Voie lactée. Ce cercle matérialise dans le ciel la circonférence de notre assiette géante.

En l'observant avec sa lunette, Galilée avait découvert, en 1610, que la faible lueur de cette bande lumineuse était due à l'accumulation des luminosités d'une myriade d'étoiles, luminosités faibles parce qu'elles proviennent d'étoiles très éloignées. L'œil nu ne permet pas de résoudre les lueurs individuelles de ces étoiles, mais seulement leur accumulation diffuse. Seul un télescope le permet. Pendant longtemps, notre Galaxie constituait la totalité de l'univers connu : les astronomes pensaient qu'elle résidait seule dans l'espace tel un « univers-île ».

Les idées à propos de notre situation dans l'univers ont commencé à changer en 1918. Harlow Shapley a découvert que le Soleil ne se situait pas au centre de la Voie lactée, mais plutôt à mi-chemin vers le bord : nous sommes décentrés. Shapley se voyait comme un nouveau Copernic. Ce dernier avait déménagé la Terre du centre du Système solaire, où il avait correctement placé le Soleil. Lui, Shapley, avait déplacé le Système solaire depuis le centre de la Voie lactée vers sa banlieue. Notre situation dans l'univers apparaissait de moins en moins spéciale. L'œuvre monumentale de Shapley a révolutionné la conception de notre situation dans l'univers, et il pouvait penser que son travail allait constituer la plus importante découverte en astronomie du xx^e siècle. Le magazine *Time* du 29 juillet 1935 le mit en couverture, alors qu'il était le doyen des astronomes américains. Mais sa grande découverte de 1918 allait pourtant être rapidement éclipsée – deux fois – par Hubble.

Hubble a étudié la nébuleuse d'Andromède. Beaucoup d'astronomes, y compris Shapley, pensaient qu'il s'agissait d'un nuage de gaz interne à notre Voie lactée. Le mot « nébuleuse » provient des *nubes* latins, ou « nuages », à cause de l'apparence floue de ces objets. Par des observations minutieuses avec le nouveau télescope de 2,5 m, Hubble a découvert qu'Andromède était en fait une autre galaxie, à peu près de la taille de la Voie lactée, et très éloignée d'elle. Et les nombreuses autres nébuleuses semblables, en forme de spirale, que les astronomes pouvaient observer dans le ciel, se révélèrent également être d'autres galaxies, comme notre

Voie lactée! Hubble a classé les galaxies selon leur forme – elliptique, spirale et irrégulière – de la même manière qu'un botaniste classe les microbes. Il a effectué des observations dans les différentes directions du ciel et répertorié les galaxies qu'il trouvait: il semblait y en avoir autant dans chaque direction, de sorte que l'univers apparaissait homogène aux plus grandes échelles. En observant toujours plus loin, on découvrait toujours des galaxies, de moins en moins brillantes. Notre Voie lactée n'était qu'une galaxie parmi d'autres, dans un vaste univers de galaxies. C'était une découverte fondamentale, mais Hubble n'en est pas resté là. Il a mesuré les éloignements de ces galaxies. Et aussi, à partir de leurs spectres, leurs vitesses. Il a alors constaté que plus une galaxie était éloignée, plus elle s'éloignait de nous rapidement. L'univers entier était en expansion! Très surprenant! L'univers d'Isaac Newton était statique. Même Einstein, le génie de l'espace-temps courbe, avait pensé que l'univers était statique. La découverte que l'univers était en expansion était tout simplement incroyable. Einstein a dû revoir ses équations de la relativité générale, revenir sur les changements qu'il y avait apportés pour s'accorder à une cosmologie statique.

L'expansion de l'univers a des implications profondes. Si l'univers était statique, comme Newton et Einstein l'avaient supposé, il devait être infiniment vieux. Il aurait toujours été là. Cela avait au moins un mérite: celui d'éviter la question d'Aristote à propos de la cause première. En revanche, si l'univers a un âge fini, il peut sembler naturel de penser que quelque chose doit en être la cause. Mais quelle peut être cette cause? À moins que l'on soit prêt à accepter une régression infinie de causes, il semble qu'une cause première soit nécessaire. Mais alors, quelle est la cause de cette « cause première »? L'expansion de l'Univers ressuscite la question. En effet, si vous jouez le film de l'histoire en arrière, vous verrez toutes les galaxies s'écraser en même temps dans le passé. Mais si l'on regarde les choses dans le sens normal du temps, il semble que quelque chose a dû initier cette expansion au début de l'univers. Nous appelons maintenant cela le Big Bang, et nous le situons 13,8 milliards d'années dans le passé. Mais quelle fut la cause de ce Big Bang? Question ouverte!

Hubble fut l'un des astronomes les plus importants du xx^e siècle. Le magazine *Time* l'a consacré en couverture le 9 février 1948, avec une

photo de l'Observatoire Palomar en arrière-plan, dont Hubble fut le premier à utiliser le nouveau télescope de 5 m de diamètre, ce qui lui permit d'étendre ses observations. Plus tard, le *Time* sélectionnerait Hubble comme l'une des 100 personnalités les plus influentes du xx^e siècle (le seul astronome ainsi honoré). Malgré l'importance reconnue de ses découvertes, il n'a cependant pas obtenu la plus haute distinction de l'*American Astronomical Society*, le « Russell Lectureship », décernée chaque année à un astronome américain pour l'ensemble de ses réalisations. Cela rappelle un manque du comité du prix Nobel, qui n'a pas attribué le prix Nobel de littérature à Léon Tolstoï, malgré plusieurs occasions avant sa mort. Les plus grands sont souvent controversés. Mais en fait, comme pour la plupart des découvertes révolutionnaires, l'histoire est plus compliquée et plus intéressante que le simple récit que je viens d'en donner. Regardons plus en détail.

Shapley ouvre la voie

Harlow Shapley avait mesuré la position du Soleil dans la Voie lactée en utilisant des amas globulaires. Il avait mesuré leurs éloignements à l'aide d'étoiles variables appelées RR Lyrae, qu'il utilisait comme *chandelles standards*, des objets à la luminosité calibrée et (supposée) connue. Une étoile RR Lyrae est 40 à 50 fois plus lumineuse que le Soleil et peut donc être observée à assez grande distance. Elles ont toutes environ la même luminosité intrinsèque, comme des ampoules de puissances identiques si vous voulez. Le Soleil, par exemple, a une luminosité de 4×10^{26} W (watts) équivalente à celle de 4 trillions de trillions d'ampoules de 100 W. Vous pouvez établir la distance d'une étoile RR Lyrae à partir de sa luminosité apparente sur le ciel. Imaginez une rangée de lampadaires standards le long d'une rue. Ils ont tous la même luminosité intrinsèque, mais les plus éloignés semblent moins lumineux que les plus proches.

La lumière émise par une étoile se propage dans toutes les directions, ce qui crée une sphère de lumière en expansion. Supposons que vous soyez à 1 000 années-lumière d'une certaine étoile. La lumière qui vous atteint en provenance de cette étoile forme une coquille sphérique de rayon 1 000 années-lumière, dont la surface ($4\pi r^2$) vaut environ 12 millions

d'années-lumière carrées. Si vous étiez à 2 000 années-lumière de distance, la lumière serait diluée sur une surface de $4\pi \times (2\,000 \text{ années-lumière})^2$, soit environ 4×12 millions d'années-lumière carrées. La nouvelle sphère est deux fois plus étendue que la précédente, sa surface est 4 fois plus grande. Ceci implique que votre détecteur – disons votre télescope de 5 m de diamètre – intercepte une portion 4 fois moindre du rayonnement émis par l'étoile (que si vous étiez situé à 1 000 années-lumière seulement) : quand vous êtes deux fois plus loin, l'étoile apparaît quatre fois moins brillante. La luminosité apparente (mesurée en W/m^2) atteignant votre détecteur diminue comme l'inverse du carré de la distance. Cette relation fondamentale est, sans surprise, appelée la loi carrée inverse.

Nuit après nuit, Shapley répétait ses photos d'amas globulaires d'étoiles. Un amas globulaire orbite au sein de la Voie lactée. Il contient lui-même plus de 100 000 étoiles qui orbitent elles-mêmes en son sein, autour de son centre, comme des abeilles autour de la ruche. L'éclat de certaines de ces étoiles varie d'une nuit à l'autre : ce sont des étoiles variables. En enregistrant la variation de leurs luminosités en fonction du temps, Shapley a pu reconnaître certaines d'entre elles comme des variables RR Lyrae, en mesurant leurs périodes d'oscillation (durées temporelles entre les pics de luminosité, typiquement moins d'un jour) et leurs amplitudes d'oscillation (facteurs de variation de la luminosité). Connaissant la luminosité intrinsèque d'une étoile RR Lyrae particulière, Shapley pouvait estimer sa distance en mesurant sa luminosité apparente : moins elle est lumineuse, plus elle est éloignée. Ceci constituait un outil d'exploration inestimable. Finalement, en mesurant les luminosités apparentes des RR Lyrae dans un amas globulaire, Shapley put estimer l'éloignement de l'amas globulaire lui-même. Si l'amas globulaire était trop éloigné, il utilisait la luminosité de son étoile la plus brillante comme indicateur de distance, plutôt que celle d'une RR Lyrae ; et pour ceux encore plus éloignés, c'est la dimension angulaire de l'amas entier qui lui permettait d'estimer l'éloignement : un amas deux fois plus petit est situé deux fois plus loin.

Shapley a ainsi mesuré les distances de nombreux amas globulaires. Ceux-ci orbitent eux-mêmes autour du centre de la Voie lactée avec une distribution presque sphérique : leurs orbites les éloignent

périodiquement au-dessus et au-dessous du plan galactique, l'« assiette » qui contient la plupart des étoiles. En pointant son télescope vers le dessus et vers le dessous de ce plan, il a pu observer des amas globulaires à de grandes distances, sans être gêné par l'effet obscurcissant de la poussière interstellaire qui réside dans le plan lui-même. Il a ainsi trouvé que la distribution 3D des amas globulaires dans l'espace était décentrée par rapport à la Terre. Ce résultat paraissait surprenant : cette distribution devait être centrée sur le centre de la Voie lactée autour duquel ils orbitent. Mais Shapley trouvait davantage d'amas globulaires (et plus éloignés) d'un côté du ciel que de l'autre. La distribution paraissait bien centrée, mais autour d'un point de la Voie lactée situé à 25 000 années-lumière de nous environ, dans la direction de la constellation du Sagittaire : c'est là que se trouvait en fait le centre de notre Galaxie ! Shapley a ainsi montré que notre Système solaire ne réside pas au centre de notre Galaxie, mais à mi-chemin entre lui et le bord externe. La position du Soleil n'a rien de particulier !

En 1920, un fameux débat opposa Shapley à Heber Curtis à propos de la nature des nébuleuses spirales. Dans les années 1771-1781, Charles Messier avait dressé un catalogue de nébuleuses. Vues à l'aide d'un petit télescope, celles-ci ressemblent à des taches lumineuses floues, et peuvent parfois être confondues avec des comètes. Messier, chasseur de comètes, voulait s'assurer de ne pas les confondre avec ces objets ; c'est la raison pour laquelle il a répertorié et catalogué ces objets nébuleux. Ces « objets de Messier » (marqués dans le catalogue par un M suivi par leur numéro) se répartissent en fait en plusieurs catégories différentes. Certains sont des éjectas de gaz de supernova (comme la Nébuleuse du Crabe M1) ; certains, comme la nébuleuse de l'Haltère (M27), sont des réservoirs de gaz dont l'effondrement aboutit à former des étoiles naines blanches. Certains (comme M13) sont des amas globulaires ; certains sont des amas d'étoiles en vrac comme les Pléiades (M45) ; beaucoup sont des nuages de gaz, régions de formation d'étoiles dans la Voie lactée, comme la nébuleuse d'Orion (M42) ; mais beaucoup d'autres sont en réalité d'autres galaxies, externes à la nôtre : Andromède (M31), le Moulinet (M101), le Tourbillon (M57), M81, M87, etc. Les nébuleuses spirales, comme M31, M57, M81, et M101, faisaient l'objet du débat Shapley-Curtis. Leurs formes spiralées rappellent celle d'un

ouragan terrestre vu de l'espace. Elles possèdent des « bras spiraux » qui s'enroulent du centre vers l'extérieur, comme un moulin à vent. Elles sont parfois vues de face, et leur allure est alors circulaire, parfois (presque) de profil, comme une assiette vue de côté. Résidaient-elles au sein de la Voie lactée? Ou bien étaient-ce des galaxies externes semblables à la nôtre, mais vues à grande distance? Shapley soutenait qu'il s'agissait de nuages de gaz au sein de la Voie lactée; Curtis maintenait que c'étaient des galaxies extérieures.

Le débat ressuscitait des propositions de célèbres astronomes ou philosophes du passé. Le philosophe grec Démocrite avait suggéré que la bande de lumière connue sous le nom de Voie lactée pouvait effectivement se constituer de la lumière d'étoiles lointaines. L'idée (exacte, dès 400 avant J.-C.!) fut confirmée par Galilée après qu'il eût tourné sa lunette vers le ciel. En 1750, Thomas Wright avait émis l'hypothèse que la Voie lactée pouvait être un mince feuillet d'étoiles (exact), mais il l'imaginait comme une partie d'une grande coquille sphérique mince d'étoiles en orbite autour d'un centre obscur (inexact). Vue de très loin, notre propre Galaxie ressemblerait alors à une sphère d'étoiles, une tache ronde et floue. Et Wright proposa l'idée que plusieurs des nébuleuses que nous observons étaient en fait des galaxies comme la nôtre (exact). En 1755, William Herschel (le découvreur d'Uranus) désigna une sous-classe de nébuleuses qu'il appela « nébuleuses spirales ». La même année, le grand philosophe Emmanuel Kant proposait l'idée que ces nébuleuses spirales étaient en fait des galaxies comme la nôtre, mais vues de très loin; il les appelait « univers-îles ». Tout ceci allait dans le sens de Curtis.

Shapley a passé beaucoup de temps à défendre son estimation de très grandes dimensions pour la Voie lactée. Si les dimensions des nébuleuses spirales étaient comparables à celle de la Voie lactée, cela impliquait pour elles des éloignements énormes, qu'il jugeait ridiculement élevés. Or, dans certaines de ces nébuleuses spirales, on pouvait apparemment observer des novae (étoiles dont la luminosité augmente subitement d'un facteur important, sans qu'elles explosent). Comme les luminosités (apparentes) de ces novae étaient comparables à celles d'autres novae de notre Voie lactée, il semblait normal de les situer également dans notre Galaxie. Curtis avait d'ailleurs mentionné ce

point comme une objection à sa propre conviction. Mais en fait, ces soi-disant novae n'en étaient pas du tout : il s'agissait de supernovae, des explosions stellaires beaucoup plus lumineuses. Et elles étaient en réalité beaucoup plus éloignées, ce qui confortait finalement la position de Curtis. L'un des meilleurs arguments de ce dernier découlait par ailleurs du fait que les spectres des nébuleuses spirales ressemblaient à ceux d'amas d'étoiles, et non pas à ceux de nuages de gaz. Mais le débat resta à l'époque sans conclusion. La plupart des auditeurs dans le public ont probablement quitté la salle avec les mêmes opinions qu'en y entrant. En science, de telles questions ne sont pas réglées par des débats ou des scores oratoires. Elles le sont souvent par l'arrivée de données nouvelles et décisives ; ce que Hubble allait bientôt offrir.

Hubble change la donne

Comme la plupart des auteurs de contributions importantes, Hubble a bénéficié à la fois de talent et de chance. Il est né à Marshfield, Missouri, en 1889. Après avoir réalisé le record de saut en hauteur de l'école secondaire de l'État de l'Illinois, il s'inscrivit à l'Université de l'Illinois, et plus tard à Oxford en tant que boursier Rhodes. Les bourses scolaires Rhodes récompensaient les prouesses, aussi bien athlétiques qu'académiques. Revenu d'Angleterre, il passa un certain temps dans ma ville natale de Louisville, Kentucky, où il habitait une zone calme et distinguée appelée « les Highlands », où vécurent aussi ma mère et ma grand-mère.

Il a tout d'abord étudié le droit, comme le souhaitait son père. Mais après la mort de ce dernier, il se consacra à sa véritable passion : la science. Il fut professeur de lycée un certain temps, puis s'inscrivit à l'Université de Chicago où il obtint son doctorat en astronomie. Son travail de thèse le conduisit à photographier des nébuleuses peu lumineuses, et à acquérir ainsi la compétence qui allait lui permettre de régler la controverse Shapley-Curtis. Après avoir brièvement servi durant la Première Guerre mondiale, il obtint un poste à l'Observatoire du Mont Wilson, embauché par George Ellery Hale. Bonne fortune ! Il avait mené son travail de doctorat à l'Observatoire de Yerkes qui possédait la plus grande lunette astronomique du monde, d'un