Big Bang et au-delà

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 1 07/01/2019 13:51:29

Aurélien Barrau

Big Bang et au-delà

Les nouveaux horizons de l'Univers

EKHO

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 3 07/01/2019 13:51:29

Couverture : Delphine Dupuy

Illustrations : Rachid Maraï

Mise en pages : Nord Compo

© Dunod, 2013, 2015, 2019 pour la présente édition
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-079115-6

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.

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 4 07/01/2019 13:51:29

Préambule

« Le style peut donc aussi, de son éperon, protéger contre la menace terrifiante, aveuglante et mortelle, qui se présente, se donne à voir avec entêtement : la présence, donc, le contenu, la chose même, le sens, la vérité – à moins que ce ne soit déjà l'abyme défloré de tout ce dévoilement de la différence. »

Jacques Derrida, *Éperons, les styles de Nietzsche*

Ce petit livre n'est pas un traité de cosmologie. Il n'est heureusement pas non plus une autobiographie ! Il est une simple balade en cosmologie, légère et sans visée systématique, destinée à tout esprit curieux, sans aucun prérequis scientifique. J'y mêle l'exposé de résultats bien connus et très fiables avec la présentation des avancées récentes et spéculations en cours. Parce que la science est avant tout une aventure humaine, j'ai esquissé, ici et là, en contrepoint des explications physiques fournies dans la langue la plus simple et accessible possible, mon expérience propre et mes ressentis.

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 5 07/01/2019 13:51:29

J'ai parfois même fait part de quelques convictions et révoltes personnelles. J'ai abordé, en filigrane, mon propre cheminement. Non que cela soit important ou exemplaire, naturellement, mais parce que j'aimerais contribuer à souligner la fragilité, tout autant que la fiabilité, de nos constructions scientifiques. La science n'est pas indépendante des femmes et hommes qui la pratiquent. La science n'est pas une froide découverte du réel « en lui-même ». Elle est, avant tout, une « manière de faire un monde ». Une manière élégante et cohérente mais évidemment non unique et non hégémonique.

Nous avons la chance de vivre un moment privilégié dans l'histoire de la cosmologie. Des résultats observationnels fascinants, en particulier ceux de l'expérience Planck, ont été rendus publics il y a peu. Cette nouvelle édition met l'accent sur ces mesures inédites. Bien que l'étude du cosmos soit sans doute aussi ancienne que la pensée, notre image du réel est en ce moment même en train de se redessiner. Il est maintenant possible de connaître certains aspects des processus qui eurent lieu moins d'un milliardième de milliardième de milliardième de seconde après le Big Bang. J'ai tenté d'insister sur cette actualité brûlante.

Notre compréhension de l'Univers connaît des progrès fulgurants. Aussi bien dans la découverte de l'infiniment petit que de l'infiniment grand. Et, dans le même temps, l'immensité de ce qui nous

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 6 07/01/2019 13:51:29

échappe se manifeste avec toujours plus d'évidence. C'est dans cet interstice que je propose ce petit cheminement en cosmologie physique. Entre théorie et expérience, entre science et philosophie.

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 7 07/01/2019 13:51:29

1

Peut-on comprendre l'Univers ?

« *Puisque, sous un regard mélancolique, même les pierres semblent rêver, on chercherait en vain ailleurs la noblesse dans l'Univers.* »

Emil Cioran, *Le Crépuscule des pensées*

Le récit

L'Univers a 13,81 milliards d'années.

Au commencement, il n'y avait ni temps, ni espace, ni aucune des particules aujourd'hui identifiées. N'existait qu'une sorte de mousse constituée de cordes ou de boucles. Cette mousse enfle et se complexifie. L'espace, le temps, la gravitation émergent. Une force unifiée régit alors l'Univers dont la taille commence à croître démesurément. Cette brève, mais immensément intense, phase d'inflation cesse brutalement. S'y dessinent les fluctuations microscopiques à l'origine des galaxies et des étoiles… Apparaissent les forces et corpuscules connus. La température chute. L'Univers

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 9 07/01/2019 13:51:29

poursuit son expansion mais le rythme s'est calmé. Matière et antimatière se sont en grande partie annihilées, seul un infime reliquat demeure, auquel nous devons pourtant tout de ce qui nous compose aujourd'hui. Les premiers noyaux se forment. L'Univers est encore si chaud qu'il est opaque à sa propre lumière, immédiatement absorbée dès qu'elle commence à se propager. Le monde n'est qu'un étrange bain sombre de constituants élémentaires en interaction. Enfin, la température devient assez faible pour que les électrons puissent se joindre aux noyaux et former des atomes ! Le cosmos devient transparent.

La gravitation reprend peu à peu ses droits. Des nuages de gaz s'effondrent. Apparaissent les étoiles qui se structurent en galaxies. Les plus massives de ces étoiles vivent très peu de temps, explosent et forment des trous noirs, des « astres occlus ». Les éléments lourds, essentiels pour l'apparition de la vie, commencent à être synthétisés. Autour des étoiles, se forment des planètes au sein desquelles peut prendre naissance une chimie subtile. La température moyenne de l'Univers n'est plus que de quelques degrés au-dessus du zéro absolu (– 273 °C). Étonnamment, l'expansion de l'Univers accélère à nouveau ! La distance entre les corps célestes augmente exponentiellement et une évolution imprévue semble se dessiner. Voilà où nous en sommes.

Cette histoire est notre histoire. Elle est ce qu'on croit être le moins mauvais récit de nos origines.

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 10 07/01/2019 13:51:29

Elle est le cadre dans lequel se déploie ou se déplie notre physique. Elle constitue un mélange, parfois savant, souvent baroque, de quasi-certitudes et de spéculations effrénées. Elle ne s'achève pas ici. Elle se prolonge dans de multiples directions. Les interrogations et incompréhensions sont plus nombreuses que les réponses et les évidences. Les questions qui m'attirent aujourd'hui tout particulièrement sont celles de l'« avant Big Bang » et des univers multiples qui deviennent enfin signifiantes et entrent de plain-pied dans le champ des sciences dures. Elles conduisent à une nouvelle représentation du monde. Une représentation extrêmement incertaine, extrêmement hypothétique mais aussi extraordinairement fascinante ! Peut-être même révolutionnaire. Il faut recourir à de nouvelles théories, non encore soutenues par des résultats expérimentaux, ou pousser les théories connues à leurs limites. C'est un jeu dangereux. Mais l'exploration de nouveaux mondes n'est jamais tout à fait exempte de dangers…

Étonnement

Chaque détail de l'Univers est un abîme de complexité. Souvent une source intarissable d'émerveillement. Le frottement d'un plectre sur une corde de clavecin durant l'interprétation d'une suite de Bach, la saccade des ailes d'une mouche dans le soleil du petit matin demeurent absolument

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 11 07/01/2019 13:51:29

sidérants. Tant, au moins, que nous n'avons pas tout perdu de l'ingénuité de notre regard d'enfant. L'Univers est immensément étrange.

J'aime profondément la démarche de la physique. Tout à la fois humble et démiurgique. Il est question d'aborder – de comprendre, dit-on, mais aussi de réinventer, je crois – ce « grand autre », cette altérité radicale, ce qu'on nomme « le monde ». Il n'est finalement question que de cela. Il n'a toujours été question que de cela.

Mais il ne va pas de soi que le monde puisse être pensé. Il ne va pas de soi qu'une physique, une science de la nature donc, soit possible. Il ne va pas de soi qu'elle nous apprenne quelque chose du monde qui dépasse ce que notre esprit y a lui-même instillé. Qu'est-ce exactement qu'une science ? Qu'est-ce que la nature ? Et cette science, à supposer qu'elle soit possible, nous parlerait-elle d'ailleurs réellement du monde en tant que tel ou plutôt de nous-mêmes et du fonctionnement de notre cerveau ? Aborder ces questions abruptement est certainement absurde. Tenter d'y apporter une réponse claire, systématique et doctrinale est illusoire. Mais il faut, je crois, à chaque instant les garder présentes à l'esprit. Cheminer en cosmologie en ne négligeant jamais l'étonnement primitif de ce semblant d'intelligibilité. Il est impossible – il m'est, en tout cas, impossible – de ne pas faire face à l'interrogation de Heidegger[1] revisitant Leibniz[2] : « Pourquoi y a-t-il l'Étant et

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 12 07/01/2019 13:51:29

non pas plutôt rien ? ». Ce qui n'est d'ailleurs pas sans faire écho à l'inquiétude de Wittgenstein[3], représentant pourtant une tradition philosophique réputée divergente : « ce qui est mystique, ce n'est pas comment est le monde, mais le fait qu'il est ». Une immense étrangeté vertèbre l'existence même de l'Univers et le fait qu'il nous soit, au moins un peu, accessible.

Les étonnements qui jalonnent mon cheminement ne sont pas ceux de mes collègues qui ne sont pas ceux de mes étudiants. Et moins encore ceux d'un artiste ou d'un poète découvrant la cosmologie physique. Peu importe. Comme tous les grands champs de pensée, la philosophie est proprement indéfinissable. Mais si, suivant Platon[4], nous la considérons comme une certaine manière de ne jamais tout à fait cesser d'être étonné, je crois qu'il serait insensé de pratiquer la physique – ou toute autre activité cognitive – sans entretenir un rapport étroit, ou peut-être même intime, avec la philosophie.

J'ai longtemps hésité dans mon choix d'études entre physique et philosophie. La décision fut difficile : Lettres-sup ou Maths-sup ? Aujourd'hui, j'aimerais qu'il soit possible de ne pas avoir à choisir. Je crois même qu'il devrait être indispensable de ne pas choisir. Composer ses lignes de fuite, pour emprunter le beau concept de Gilles Deleuze[5], comme autant de voix de fugue enchevêtrées les unes avec les autres.

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 13 07/01/2019 13:51:29

Difficultés

Au-delà de cette curieuse capacité de la physique à appréhender le réel – à l'affronter ou à le créer peut-être –, il est remarquable que l'Univers lui-même soit un objet d'étude scientifique. L'Univers n'est pas un système comme les autres. Les processus locaux pourraient tout à fait être aisément compréhensibles sans que le cosmos lui-même entre dans le champ des sciences dures. Que le mouvement de la Lune autour de la Terre puisse être compris dans les mêmes termes que la chute d'un fruit dans un verger était l'immense découverte de Newton. Mais rien n'assurait *a priori* que cette démarche puisse être poussée jusqu'à décrire l'Univers lui-même. Au contraire, un certain nombre de spécificités de la cosmologie pouvaient laisser craindre qu'il soit impossible d'appréhender le « tout » en tant que système physique. La question ici posée n'est pas celle de ce qui se trouve *dans* l'Univers mais celle de la nature et de l'évolution de l'Univers *en lui-même*. Peut-on comprendre scientifiquement l'Univers en tant que tel ? Cette question a-t-elle seulement un sens ? Les particularités de cette interrogation sont nombreuses.

D'abord, nous faisons partie du système décrit. Nous sommes un élément de l'Univers, une parcelle de l'objet considéré. Nous avons même, en principe, une capacité d'influer sur son devenir. Étant donné notre comportement plus que désinvolte et irresponsable envers notre planète, il est plutôt rassurant que cette capacité soit, en

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 14 07/01/2019 13:51:29

pratique, insignifiante à l'échelle du cosmos ! Il n'en demeure pas moins que cela est tout à fait orthogonal à la démarche scientifique habituelle qui tente de mettre l'observateur à distance de l'objet étudié. Il est en général essentiel que celui qui observe n'interfère pas avec ce qui est observé. C'est une précaution élémentaire qu'il est inenvisageable de mettre en œuvre quand on s'intéresse à l'Univers.

Ensuite, l'expérience est non reproductible. La « naissance » de l'Univers n'a eu lieu qu'une fois ! Il est impossible de refaire l'expérience. C'est un problème considérable, bien plus important que le précédent. Le protocole opératoire de la physique consiste à tenter d'inférer des lois à partir de l'observation de régularités lors de la réitération d'expériences similaires. Constatant qu'une bille lancée à la surface de la Terre décrit toujours une parabole, on peut en déduire la loi du mouvement qui régit sa trajectoire. L'expérience « création de l'Univers » n'étant, tout au contraire, pas reproductible, comment savoir, dans les observations, ce qui relève d'aléas sans importance et ce qui relève de lois inévitables ? Si l'on tire cent fois à « pile ou face » et qu'on obtient cent fois « face », on peut en déduire que, probablement, la pièce est truquée ou qu'un phénomène spécifique l'oriente d'une certaine façon. Mais si l'on ne tire qu'une seule fois, que peut-on en déduire ? Le jeu devient extrêmement complexe. Ce n'est pas qu'un problème conceptuel, c'est une difficulté concrète : les

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 15 07/01/2019 13:51:30

cosmologistes qui mesurent des propriétés du ciel doivent, dans leurs résultats, tenir compte de ce qu'il n'y a qu'un seul ciel à disposition. C'est une limitation drastique pour la cosmologie.

De plus, les « conditions initiales » jouent ici un rôle très particulier. La physique ne peut prédire la position de chute d'une pierre que si l'on spécifie la manière dont elle est jetée : sa vitesse et sa position primitives. C'est ce que les scientifiques nomment les conditions initiales. Elles sont toujours *extérieures* et *antérieures* à l'expérience considérée. Elles ne dépendent pas des lois de la science mais simplement des circonstances. Bien évidemment, elles sont essentielles : sans leur connaissance, il est impossible de prédire quoi que ce soit. Personne ne peut deviner où un projectile atterrira sans savoir où et comment il fut lâché. Or, précisément, le système Univers ne comporte ni extériorité ni antériorité. Pas d'avant, pas d'ailleurs. Qui peut donc fixer les conditions initiales essentielles aux prédictions ? Comment ? La cosmologie fait face à cette terrible spécificité : les conditions initiales doivent être, en quelque sorte, « auto-générées » si le modèle entend être prédictif ! C'est un défi considérable.

Enfin, dans l'étude de l'Univers, c'est l'état actuel qui est connu et l'état primitif qui est recherché. Ce n'est pas un détail. Pour un système complexe, il n'est pas anodin de devoir remonter le cours du temps. Le film passé « à l'envers » ne ressemble

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 16 07/01/2019 13:51:30

pas au film passé « à l'endroit » : on n'a jamais vu une goutte de lait se reformer dans la tasse de café où elle fut versée, bien que ce soit, en principe, possible. Le sens du temps importe, les processus ne sont pas réversibles. Le désordre, dit-on, augmente inéluctablement – non pas parce qu'une force mystérieuse le pousse, mais simplement parce qu'il est hautement plus probable d'être en désordre qu'en ordre. Extrapoler l'origine à partir de la destination est toujours un jeu à risque. Un jeu, pourtant, qu'il est impossible de ne pas jouer quand il s'agit d'explorer le commencement.

Sans même mentionner que les énergies en jeu dans les premiers instants du cosmos sont sans aucun doute beaucoup plus importantes que ce qui a jamais été – et que ce qui sera sans doute jamais – testé sur Terre. Il est extrêmement délicat d'extrapoler ainsi à un domaine d'énergie inconnu. Imaginons, par exemple, que nous connaissions bien les lois de la nature pertinentes pour décrire un feu de bois. À cette énergie particulière, c'est la chimie qui régit les processus. Il s'agit essentiellement des réagencements de liaisons électroniques entre les atomes. Que pourrait-on en déduire quant au fonctionnement d'une centrale nucléaire ou du cœur du Soleil ? Rien du tout ! Les lois de la physique subatomique, celles qui régissent les interactions entre les constituants internes des noyaux, ne se déduisent pas de celles de la chimie. Il y a donc quelque chose d'un pari un peu fou à supposer

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 17 07/01/2019 13:51:30

que notre connaissance actuelle de la physique (disons jusqu'aux énergies atteintes dans les accélérateurs de particules), permette de s'approcher du Big Bang aussi près que nous aimons à le croire !

Pour toutes ces raisons, la possibilité même d'une cosmologie pourrait sembler compromise *a priori*.

Et pourtant

Le petit miracle de la cosmologie tient à ce qu'en dépit de ces difficultés – à moins que ce ne soit en partie grâce à elles –, elle s'est effectivement constituée comme une science, et même, comme une science de précision. Tout semblait plaider pour son impossibilité. Elle était vouée à demeurer une sorte de fantasme de physicien, antinomique avec la méthode de la science contemporaine. Aujourd'hui, pourtant, elle fait partie de la physique la plus orthodoxe et se trouve enseignée dans tous les Masters d'astrophysique ou de physique des particules. Elle est une branche de la physique moderne et ses praticiens constituent une très large communauté.

S'il fallait dater cette entrée de la cosmologie dans le champ de la science « consensuelle » et institutionnelle (ce qui n'est pas forcément, en soi, une bonne chose !), je ferais remonter cet événement aux résultats du satellite COBE dans les années 1990. Bien évidemment, en un certain sens,

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 18 07/01/2019 13:51:30

la cosmologie accompagne la science depuis toujours mais ce n'est pas ce à quoi je fais ici allusion. Le « Cosmic Background Explorer » a permis de mettre en évidence la première lumière de l'Univers. Il a apporté des mesures exceptionnellement importantes et précises pour conforter le modèle du Big Bang. Je me souviens parfaitement de l'effet que firent sur moi ces magnifiques cartes bleues et roses où se dévoilait la structure de la première jeunesse de l'Univers. Outre sa qualité scientifique, cette expérience fut d'ailleurs aussi un petit coup de génie médiatique !

Quand ces cartes furent diffusées, j'étais élève au lycée Pasteur de Neuilly sur Seine. On ne peut pas dire que ce fut un sujet de conversation privilégié dans la cour de récréation ! Ni dans celle d'aucun autre lycée je suppose… Je porte aujourd'hui un regard ambivalent sur ces années. Mes parents, qui m'ont par ailleurs tant donné avec une générosité presque sans limite, y voient des circonstances exceptionnellement privilégiées ayant permis la poursuite de bonnes études supérieures.

C'est tout à fait exact : pas de drogue, pas de racket, peu de violence… Et pourtant, je ne peux me départir de l'impression qu'il y manquait un élément fondamental de la pensée – de la vie peut-être : l'invitation à contester l'ordre établi. Ce microcosme était peut-être un cocon parfaitement lisse mais le réel est aussi un espace ouvert et rugueux. Il a ses devenirs contestataires et libertaires, ses strates d'inévidences

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 19 07/01/2019 13:51:30

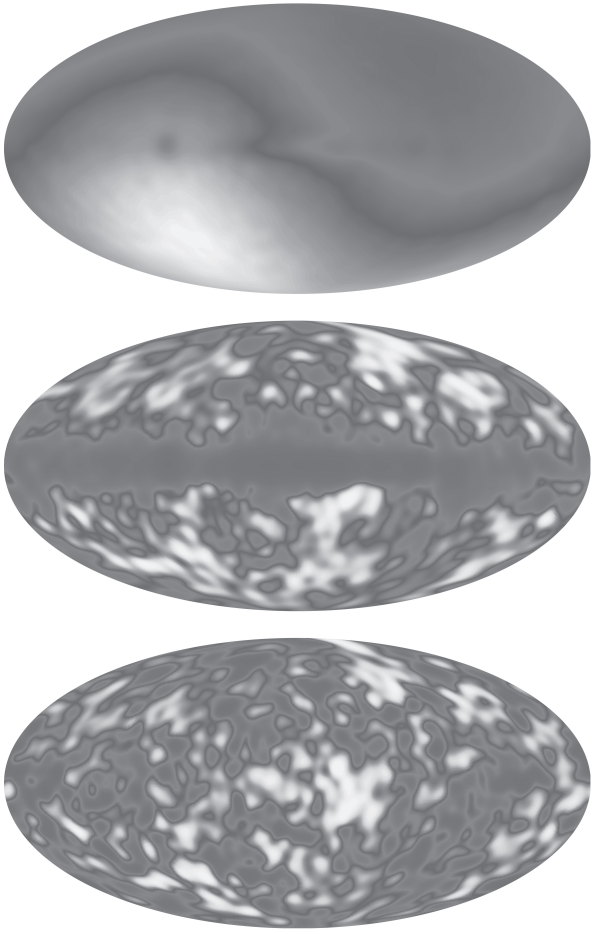

Figure 1. Images obtenues par le satellite COBE ayant fait entrer la cosmologie dans son ère de précision. L'image supérieure représente ce qui est directement mesuré, la seconde représente le rayonnement fossile ainsi que notre galaxie et l'image inférieure, le seul signal cosmologique.

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 20 07/01/2019 13:51:31

314254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 21

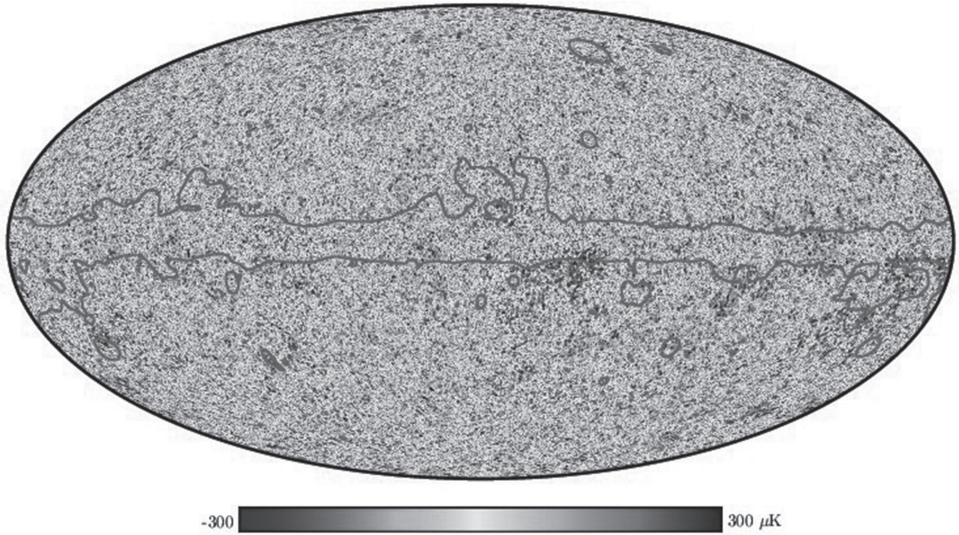

Figure 2. Image similaire, obtenue en 2018 par le satellite Planck. La qualité de cette mesure est telle que l'on peut supposer qu'il s'agit d'une photographie définitive : le flou résiduel provient de l'Univers lui-même.

07/01/2019 13:51:3

et de révolte. Je ne les ai jamais rencontrées là-bas et le risque d'une pensée effondrée sous son confort aveugle me semble finalement aussi réel que celui des prétendues « insécurités » en tous genres dont notre époque est devenue phobique. Bien sûr, on m'y enseigna les bases de la physique. Avec sérieux et compétence. Mais jamais l'étonnement, le doute, la subversion, la déconstruction et l'émerveillement qui, toujours, doivent accompagner les élaborations et découvertes.

Les magnifiques résultats de COBE brillèrent donc avant tout par leur extraordinaire précision. Ils ont montré que la température de l'Univers suivait la loi attendue sans aucune déviation mesurable. Ce fut une avancée remarquable, une sorte d'évolution brutale du qualitatif au quantitatif. Un saut vertigineux. Mais ces avancées ne font sens que parce qu'elles viennent étayer un édifice en construction depuis plus d'un demi-siècle. La cosmologie contemporaine résulte d'une longue évolution. Elle se fonde sur des observations très nombreuses et sur une théorie d'une sidérante élégance. Il est impossible de comprendre le si étrange modèle du Big Bang sans connaître ses piliers. Il nous faut découvrir d'une part les multiples indices expérimentaux qui plaident pour cette étrange représentation du monde et, d'autre part, la grande théorie d'Einstein, la relativité générale, nécessaire pour percevoir la cohérence de l'édifice.

4254AUW_BARRAU_CC2014_PC.indd 22 07/01/2019 13:51:31