

COSMOLOGIE
MODERNE

COSMOLOGIE MODERNE

Origine, nature et évolution de l'Univers :
épopée de l'infiniment grand

P. J. E. PEEBLES

Traduit par :

Pierre Fleury

Docteur en physique théorique, chargé de recherche au CNRS, travaille à l'Institut de physique théorique de Saclay

Julien Larena

Docteur en physique théorique et maître de conférences à l'Université de Montpellier

Cyril Pitrou

Docteur en physique théorique, chargé de recherche au CNRS, travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris

DUNOD

Licensed by Princeton University Press, Princeton New Jersey, U.S.A. in conjunction with their duly appointed agent, Marotte et Compagnie, agence littéraire. 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.

Graphisme de couverture : Nicolas Wiel

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

Copyright © 2020 Princeton University Press

© Dunod, 2022, pour la traduction française

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082994-1

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.

À Alison, ma meilleure amie pendant six décennies

TABLE DES MATIÈRES

	Préface et remerciements	xi
CHAPITRE 1	Introduction	1
	1.1 <i>Aspects scientifiques et philosophiques de la cosmologie</i>	1
	1.2 <i>Organisation du livre</i>	6
CHAPITRE 2	L'Univers homogène	13
	2.1 <i>Le principe cosmologique d'Einstein</i>	13
	2.2 <i>Mises en évidence précoces de l'inhomogénéité</i>	17
	2.3 <i>Mises en évidence précoces de l'homogénéité : l'isotropie</i>	19
	2.4 <i>Mise en évidence précoce de l'homogénéité : comptages et décalages spectraux</i>	22
	2.5 <i>L'Univers décrit comme un processus aléatoire stationnaire</i>	25
	2.6 <i>Un Univers fractal</i>	30
	2.7 <i>Remarques finales</i>	33
CHAPITRE 3	Modèles cosmologiques	35
	3.1 <i>Découverte de l'Univers relativiste en expansion</i>	35
	3.2 <i>Le modèle du Big Bang relativiste</i>	43
	3.3 <i>Le modèle de l'état stationnaire</i>	48
	3.4 <i>Évaluation empirique du modèle de l'état stationnaire</i>	48
	3.5 <i>Évaluations non empiriques du modèle de Big Bang</i>	53
	3.5.1 Premières idées	53
	3.5.2 Inflation cosmologique	59
	3.5.3 Modèle de biais	62
	3.6 <i>Évaluations empiriques du modèle de Big Bang</i>	65
	3.6.1 Échelles de temps	67
	3.6.2 Tests cosmologiques des années 1970	69
	3.6.3 Une introduction aux mesures de la densité de matière	73

	3.6.4	Mesures de la densité de matière : de Hubble à la révolution observationnelle	77
	3.6.5	Mesures de la densité de matière : une évaluation	99
	3.7	<i>Remarques finales</i>	104
CHAPITRE 4		Fossiles cosmologiques : rayonnement micro-onde et éléments légers	107
	4.1	<i>Le rayonnement thermique dans un univers en expansion</i>	108
	4.2	<i>Le scénario de Gamow</i>	115
	4.2.1	Les articles de 1948 de Gamow	116
	4.2.2	Les prédictions de la température actuelle du CMB	122
	4.2.3	L'article d'Alpher, Bethe et Gamow	125
	4.3	<i>L'hélium et le deutérium dans le Big Bang chaud</i>	130
	4.3.1	La reconnaissance de l'importance de l'hélium fossile	131
	4.3.2	L'hélium dans un univers froid	135
	4.3.3	Les avancées de 1964 et 1965	137
	4.4	<i>Les sources de rayonnement micro-onde</i>	142
	4.4.1	Le cyanogène interstellaire	144
	4.4.2	La détection aux laboratoires Bell	147
	4.4.3	Le groupe de Zel'dovich	149
	4.4.4	Le groupe de Dicke	150
	4.4.5	La consécration du CMB	152
	4.5	<i>Les mesures du spectre en intensité du CMB</i>	155
	4.5.1	La situation dans les années 1970	155
	4.5.2	Autres interprétations du CMB	157
	4.5.3	Les anomalies submillimétriques	160
	4.5.4	Le spectre thermique du CMB	162
	4.6	<i>Nucléosynthèse et densité de masse baryonique</i>	165
	4.7	<i>Pourquoi le modèle du Big Bang chaud a-t-il été réinventé ?</i>	172
CHAPITRE 5		La formation des structures	175
	5.1	<i>L'instabilité gravitationnelle</i>	177
	5.1.1	La solution de Lemaître	183
	5.1.2	L'analyse perturbative de Lifshitz	188

	5.1.3 L'interaction non gravitationnelle des baryons avec le CMB	191
	5.1.4 La masse de Jeans	196
	5.2 <i>Scénarios</i>	198
	5.2.1 L'ordre et le chaos	199
	5.2.2 Turbulence primordiale	201
	5.2.3 L'origine gravitationnelle de la rotation des galaxies	204
	5.2.4 Explosions	208
	5.2.5 Brisure spontanée de l'homogénéité	210
	5.2.6 Conditions initiales	216
	5.2.7 Assemblage ou fragmentation ?	219
	5.3 <i>Conclusions</i>	222
CHAPITRE 6	Matière invisible	225
	6.1 <i>Amas de galaxies</i>	226
	6.2 <i>Groupes de galaxies</i>	230
	6.3 <i>Courbes de rotation des galaxies</i>	232
	6.3.1 La nébuleuse d'Andromède	233
	6.3.2 NGC 3115	239
	6.3.3 NGC 300	241
	6.3.4 NGC 2403	242
	6.3.5 Le programme des Burbidge	244
	6.3.6 Controverses	245
	6.4 <i>Stabilité des galaxies spirales</i>	249
	6.5 <i>Acceptation de la matière invisible</i>	256
	6.6 <i>Nature de la matière invisible</i>	259
CHAPITRE 7	La matière noire non baryonique	263
	7.1 <i>La matière noire chaude</i>	264
	7.1.1 La détection apparente de la masse des neutrinos	269
	7.2 <i>La matière noire froide</i>	273
	7.2.1 Les articles de 1977	274
	7.2.2 La situation au début des années 1980	278

	7.2.3 La traque de la matière noire	281
CHAPITRE 8	L'âge d'abondance des modèles cosmologiques	285
	8.1 <i>Pourquoi le CMB est-il si isotrope ?</i>	286
	8.2 <i>Un contre-exemple : CDM</i>	287
	8.3 <i>CDM et formation des structures</i>	291
	8.4 <i>Variations sur le thème</i>	295
	8.4.1 TCDM	296
	8.4.2 DDM et MDM	297
	8.4.3 Λ CDM et τ CDM	298
	8.4.4 Autres idées	299
	8.5 <i>Comment faire tenir tout cela ensemble ?</i>	300
CHAPITRE 9	La révolution observationnelle de 1998–2003	307
	9.1 <i>Test de la relation décalage spectral-magnitude</i>	307
	9.2 <i>Les anisotropies de température du CMB</i>	316
	9.3 <i>La convergence vers le modèle cosmologique ΛCDM</i>	320
	9.4 <i>L'avenir de la cosmologie physique</i>	324
CHAPITRE 10	Ainsi va la recherche	327
	10.1 <i>Rôle de la technologie</i>	327
	10.2 <i>Le facteur humain</i>	328
	10.3 <i>Les chemins abandonnés</i>	329
	10.4 <i>La construction sociale de la science</i>	332
	Références	339
	Index	381

PRÉFACE ET REMERCIEMENTS

IL EST REMARQUABLE que l'on puisse décrire avec quelque assurance comment était l'Univers si loin à travers l'espace et à travers le temps. Notre modèle cosmologique, issu d'idées datant d'environ un siècle et aujourd'hui bien testé, possède une histoire assez simple par rapport à d'autres branches des sciences naturelles. Ce fut l'œuvre d'un nombre modeste de chercheurs qui s'appliquèrent à assembler les pièces du puzzle. J'ai personnellement contribué à cet effort pendant plus d'un demi-siècle, après qu'Einstein nous eût plus ou moins indiqué la voie à suivre ; cet ouvrage est pour moi l'occasion de présenter ma vision de ce qui s'est alors passé, et d'expliquer pourquoi les choses se sont déroulées ainsi. Il est communément admis que les chercheurs en sciences naturelles se soucient peu de l'histoire de leur domaine. Je me suis efforcé d'en écrire une version sans complaisance : on y trouve, pêle-mêle, éclairs de génie et heureuses intuitions, impasses, bourdes ou erreurs de jugement ; mais aussi et surtout l'accumulation progressive des preuves observationnelles qui finirent par dessiner un scénario cohérent. Cette histoire étant relativement simple, elle constitue une bonne illustration de la manière concrète dont la science se fait.

J'ai conçu cet ouvrage comme un mélange d'histoire objective et de souvenirs personnels, lesquels sont caractérisés par l'emploi de la première personne. Je ne crois pas que ces deux approches soient incompatibles. Puisque nous ne disposons pas d'une théorie ultime de l'Univers (pour autant qu'une telle chose existe), toute évaluation de l'état d'avancement de cette science repose inévitablement sur des critères subjectifs. Ainsi, nous sommes contraints de juger subjectivement de l'objectivité d'une preuve, tout en gardant à l'esprit que certaines d'entre elles sont beaucoup plus utiles que d'autres.

Je situe entre 1998 et 2003 la convergence des preuves qui menèrent à une théorie crédible de l'évolution de l'Univers et de la formation de ses structures. Mon récit s'achève à l'issue de ces cinq années qui constituent une véritable révolution observationnelle en cosmologie. Alors que je termine cet ouvrage en 2019, je me permets d'y glisser quelques commentaires sur ce qui s'est produit depuis. Comme il serait fastidieux de répéter systématiquement « au moment d'écrire ces lignes », j'omettrai cette précision dès que le contexte le permettra.

Notre histoire commence avec une autre révolution : la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui permit d'analyser de manière quantitative l'essence d'un Univers sans bord. Les constructions antérieures à Einstein ne sont pas dénuées d'intérêt – elles guidèrent les développements ultérieurs – mais je me contenterai d'y commenter les problèmes conceptuels d'un Univers infini en physique newtonienne. Je me suis permis de simplifier l'histoire postérieure à Einstein en omettant les directions dont je ne pense pas qu'elles furent utiles (même comme faire-valoir des pensées plus fécondes) et ne devraient ainsi pas manquer à la trame générale. Je m'excuse si j'ai, par mégarde, oublié de mentionner des travaux ayant eu un rôle sensible, et je prie le lecteur de bien vouloir m'en informer le cas échéant.

Ce qui s'est produit après la révolution de 1998–2003 est très important, de même que les questionnements quant à l'avenir lointain de notre Univers, ou quant à son lointain passé, avant les premières étapes de l'évolution cosmique pour lesquelles nous disposons de traces observationnelles ; ces aspects de la cosmologie ne sont, cependant, pas le sujet de cet ouvrage.

Ceux qui contribuent aujourd’hui à la recherche en cosmologie devraient connaître l’histoire de leur domaine. Je propose, dans ce livre, une vue d’ensemble des développements qui ont finalement débouché sur une sorte de consensus au sein de la communauté. Il faut reconnaître que c’était une entreprise délicate. Les cosmologistes sont déjà bien au fait des aspects techniques de cette histoire, qui ne sont d’ailleurs pas toujours si compliqués. Je me suis donc efforcé de rendre le contenu de ce livre accessible aux étudiants de premier et de deuxième cycle universitaire, spécialisés en sciences physiques, mais aussi aux amateurs, non-spécialistes, fascinés par nos découvertes sur les étoiles, les galaxies et l’Univers en expansion, et qui seraient prêts à survoler les passages techniques pour se concentrer sur la description des idées. Les détails utiles à ceux qui souhaitent s’y pencher sans être essentiels à la trame générale ont été placés en notes de bas de page. J’utilise aussi les notes pour rappeler le sens des conventions, parfois curieuses, employées par les astronomes ; on retrouvera facilement ces définitions à l’aide de l’index. Certaines équation-clefs sont présentées dans le corps du texte ; lorsqu’elles sont particulièrement denses, les explications qui les accompagnent doivent permettre de garder le fil. Il est tout à fait possible de sauter les équations en première lecture, quitte à y revenir plus tard pour affiner sa compréhension. Enfin, chaque chapitre comprend des sections d’introduction et de conclusion résumant les idées principales sans équation.

Je prétends que cet ouvrage est un livre d’histoire, mais il reste écrit dans le style de la physique, celui que je maîtrise et qui m’est cher, à ceci près que je me suis efforcé d’éviter les récits superficiels que l’on trouve dans les articles de recherche. Des historiens de métier m’ont fait remarquer qu’une telle approche pourrait être enrichie d’éléments d’un style plus proprement historique ou sociologique. Par exemple, je ne me suis pas beaucoup intéressé aux personnages, ni aux évolutions de l’organisation et du financement de la recherche, ni aux moyens de communication mis en jeu – des lettres échangées, dans les premiers temps, au sein d’un petit club fermé d’anciens camarades, jusqu’aux blogs d’aujourd’hui qui les remplacent peut-être, à ma grande surprise¹. Les échanges pendant les conférences demeurent importants, mais celles-ci sont devenues de plus en plus spécialisées à mesure que le champ de la cosmologie s’élargissait – un développement très troublant aux yeux de ma génération. Je préfère toutefois laisser aux véritables historiens et aux sociologues des sciences le soin de traiter ces aspects-là ; j’espère qu’ils pardonneront au physicien que je suis d’avoir transgressé les règles de leur discipline.

Je propose, dans la section 1.1 et au chapitre 10, quelques réflexions personnelles quant à la nature et la philosophie de la recherche en sciences naturelles, inspirées de mon vécu en cosmologie. À la lumière de cette histoire, je conclus que les scientifiques sont comme tout le monde, en plus compulsif. Chaque avancée de la science est un indice supplémentaire du fait qu’il existe une réalité physique objective, et que nous progressons sans cesse vers sa nature. Il n’y a là rien de nouveau, mais je crois que les exemples issus de l’histoire de la cosmologie moderne sont particulièrement parlants, parce que le sujet est relativement simple.

J’ai déjà couvert certaines parties de cette histoire dans d’autres ouvrages. Ce qui s’est passé dans le groupe de George Gamow en 1948 est traité en détails dans Peebles (2014). Les travaux du groupe de Bob Dicke, qui furent si essentiels au développement de la physique

1. NDT : Et encore faudrait-il ajouter les réseaux sociaux, qui jouent depuis quelques années un rôle croissant dans la communication entre chercheurs.

gravitationnelle expérimentale – ils permirent notamment l'identification du bain de rayonnement thermique issu de l'Univers primordial – sont résumés dans Peebles (2017). Enfin, les souvenirs des acteurs principaux de l'identification et de l'interprétation de ce rayonnement fossile dans les années 1960 sont réunis dans le livre *Finding the Big Bang* de Peebles, Page et Partridge (2009).

Les références aux articles que j'estime importants dans cette histoire sont indiquées par les noms des auteurs, suivis de l'année de publication, et sont répertoriés dans la section de Références à la fin du livre. Cette liste est interminable, mais c'était inévitable : bien que la cosmologie ait été un domaine de recherche très spécialisé, il fallut beaucoup de travail pour arriver là où nous en sommes aujourd'hui. J'ai dû faire un choix subjectif parmi les travaux pionniers du domaine, et je prie mes collègues de bien vouloir m'excuser au cas où leur propre sélection eût été différente. Les numéros de page suivant chaque référence indiquent les pages du livre où celle-ci est citée.

Certaines citations dans ce livre sont directement extraites de la littérature, auquel cas la source est indiquée. Lorsque la citation originale était en français ou en allemand, j'ai fourni ma propre traduction, parfois sous une forme condensée et avec l'aide de Google². La rédaction de ce livre fut une excellente occasion de m'enquérir des souvenirs de collègues qui furent, eux aussi, témoins de l'évolution de la cosmologie pendant la seconde moitié du XX^e siècle. Les citations correspondantes sont indiquées par le nom de leur auteur suivi de la mention « communication privée ». J'ai également bénéficié des conseils de collègues plus jeunes, et des merveilles d'Internet. Je suis particulièrement reconnaissant envers les archives du *Astrophysics Data System Bibliographic Services* de la NASA, un outil irremplaçable pour retrouver d'anciens articles de recherche.

Les figures illustrant les données peuvent être influentes, et l'évolution de ces figures fait partie intégrante de notre histoire. Je suis redevable envers les collègues m'ayant donné accès aux figures qu'ils ont produites et qui leur appartiennent ; leurs noms sont alors indiqués dans les légendes correspondantes. Les figures que j'ai réalisées moi-même, soit pour ce livre, soit par le passé sans les avoir publiées, sont données sans référence. Pour les figures issues de la littérature, la légende indique la référence dont elles sont tirées, information dont on peut déduire les détenteurs de la propriété intellectuelle. Ces détenteurs légaux présentent une large gamme de prescriptions quant aux conditions de reproduction des figures, allant de la simple mention du fait que la réutilisation est permise, jusqu'à l'annonce du tarif à régler pour l'utilisation de deux figures issues d'un article publié par une société scientifique par ailleurs tout à fait respectable. J'imagine que cette vaste confusion de droits d'auteur provient de la volonté des éditeurs de conserver un certain contrôle sur leurs publications, alors même qu'il est de plus en plus facile d'en extraire des figures pour les réutiliser, par exemple, dans des cours. Je m'excuse pour toute permission de reproduction que j'aurais omis de demander, ou mal interprétée. Si j'en suis informé, j'apporterai des corrections dans les éditions futures.

On trouvera, sur les planches couleurs situées au milieu du livre, des photographies de quelques protagonistes de l'histoire ; celles-ci visent à mettre des visages sur les équations et les mesures. Toutes mes excuses envers mes estimés collègues dont les photographies n'ont pu être incluses faute d'espace, ou de l'énergie nécessaire à les réunir. Le texte accompagnant

2. NDT : Dans le cas de citations originales en allemand, nous avons parfois fait appel à des collègues germanophones afin de nous assurer que le sens original était préservé par ces traductions de traductions.

les photographies fut l'occasion de glisser quelques petites histoires qui se cachent derrière les images ; un analogue écrit des digressions qu'on ferait dans un cours.

Mes choix d'unités suivent les conventions de la recherche, y compris dans leurs variations en fonction du domaine. Pour une partie de la cosmologie, on pose généralement la vitesse de la lumière égale à 1, et les équations correspondantes me paraissent étranges dès lors qu'on y rétablit le symbole c . Ce n'est évidemment qu'une question d'habitude, mais j'ai quand même décidé de suivre l'usage courant, ce qui est somme toute assez justifié dans un cadre historique. À d'autres endroits, la constante de Planck, \hbar , ou de Newton, G , sont posées égales à l'unité. Les anciennes unités (centimètre, gramme et seconde) sont progressivement supplantées par celles du Système International (mètre, kilogramme et seconde) ; j'imagine que c'est le sens de l'histoire, mais la mutation est lente et j'ai par conséquent choisi de conserver les conventions historiques.

L'index ne répertorie que quelques-uns des pionniers de la cosmologie ; un choix subjectif, comme tout ce que l'on place en index. Il serait insensé d'y lister chaque occurrence de l'expression « décalage spectral », c'est pourquoi je ne mentionne que la première apparition de sa définition. Le mot « inflation » revient, lui aussi, assez souvent et je ne mentionne donc que la première véritable discussion du concept d'inflation cosmologique, ainsi que les pages ultérieures dont l'inflation est un élément central. L'intérêt pratique de cette règle reste toutefois limité face à tant de décisions à prendre au cas-par-cas.

Mon récit pourrait sembler excessivement centré sur la petite ville de Princeton, dans ce petit état qu'est le New Jersey. C'était inévitable, d'abord parce que je suis membre de l'université de Princeton depuis le début de mon doctorat, en 1958 ; mais aussi parce que c'est bien là qu'une part essentielle de l'histoire de la cosmologie moderne a eu lieu. Mon rôle dans cette histoire a été facilité par des congés sabbatiques à l'Institut de Technologie de Californie, à l'université de Californie de Berkeley, à l'Observatoire Astrophysique des Dominions en Colombie Britannique, à l'université de Cambridge, et à deux reprises à l'*Institute for Advanced Studies* de Princeton. J'ai beaucoup appris au cours de ces visites.

J'ai bénéficié des conseils et de souvenirs de nombreux collègues : Neta Bahcall, John Barrow, Dick Bond, Steve Boughn, Michele Cappellari, Claude Carignan, Ray Carlberg, Rick Carlson, Robin Ciardullo, Don Clayton, Shaun Cole, Ramanath Cowsik, Marc Davis, Richard Dawid, Jaco de Swart, Jo Dunkley, John Ellis, Wyn Evans, Sandra Faber, Kent Ford, Ken Freeman, Carlos Frenk, Masataka Fukugita, Jim Gunn, David Hogg, Piet Hut, David Kaiser, Steve Kent, Bob Kirshner, Al Kogut, Rocky Kolb, Andrey Kravtsov, Rich Kron, Malcolm Longair, Gary Mamon, John Mather, Adrian Melott, Liliane Moens, Richard Mushotzky, Keith Olive, Jerry Ostriker, Lyman Page, Bruce Partridge, Will Percival, Saul Perlmutter, Mark Phillips, Joel Primack, Martin Rees, Adam Riess, Brian Schmidt, Jerry Sellwood, Joe Silk, David Spergel, Ed Spiegel, Paul Steinhardt, Matthais Steinmetz, Michael Strauss, Alex Szalay, Alar Toomre, Rien van de Weygaert, Hugo van Woerden, Steve Weinberg, Rainer Weiss, Cyd Westmoreland, Simon White, Ned Wright, Jessica Yao et Matias Zaldarriaga. J'en oublie sûrement et je m'en excuse.

Introduction

LA CONSTRUCTION du modèle cosmologique actuel présente une histoire assez simple par rapport à d'autres domaines scientifiques ; cela ne signifie par pour autant que l'on puisse se contenter d'un récit superficiel à son égard. En cosmologie comme ailleurs, les articles de recherche commencent généralement par un bref compte-rendu de l'état de l'art. Les idées abandonnées comme les pistes inexplorées y sont rarement mentionnées, et l'attribution des progrès antérieurs se fonde la plupart du temps sur ce qu'on peut lire dans d'autres articles récents. Le récit fondateur qui en résulte permet de planter rapidement le décor avant de passer au cœur du sujet, à savoir la science elle-même ; il en va de même pour les cours universitaires. Cependant, ce genre de résumé historique ne correspond, au mieux, que très superficiellement à la réalité. Ce n'est généralement pas un problème pour le développement de la science, sauf bien sûr lorsque de bonnes idées n'ont pas été examinées avec suffisamment d'attention avant d'être abandonnées, voire oubliées. En revanche, un tel récit superficiel constitue une description très incomplète et inexacte de la manière dont la science avance.

Pour éviter cet écueil, il faut remonter plus loin dans le passé et examiner les idées qui semblaient intéressantes au premier abord, mais qui furent soit réfutées par l'expérience, soit abandonnées à l'aune d'une analyse plus approfondie révélant qu'elles n'avaient que peu d'intérêt. Un exposé détaillé des avancées en cosmologie qui respecterait l'ordre chronologique serait un peu maladroit, car les différentes parties de la théorie n'ont ni avancé au même rythme, ni suivi les mêmes méthodes, avant d'être assemblées dans ce qui est devenu le modèle cosmologique standard. Dans ce livre, je détaille l'histoire de six domaines de recherche, qui ont avancé plus ou moins séparément, dans les chapitres numérotés de 2 à 7. La présentation au sein de chaque chapitre est ainsi beaucoup plus cohérente, mais elle implique des allers-retours dans le temps lorsque les progrès des autres domaines sont évoqués. L'organisation que j'ai retenue est expliquée dans la section 1.2 de ce chapitre. Mais avant cela, examinons la manière dont la recherche est conduite dans le domaine des sciences naturelles, et plus particulièrement le fonctionnement de la recherche en cosmologie.

1.1 Aspects scientifiques et philosophiques de la cosmologie

L'hypothèse de départ en cosmologie, comme dans tous les domaines des sciences naturelles, est que la nature opère en suivant des règles logiques que l'on peut découvrir en étudiant attentivement les observations, à la lumière de l'expérience déjà acquise. Les résultats de cette

démarche sont impressionnants, et j'invite tous ceux qui seraient en désaccord à examiner l'étendue des lois fondamentales de la physique utilisées dans la construction et le fonctionnement de leur téléphone portable. Cependant, malgré l'étendue de ses succès, la physique, comme tous les autres domaines des sciences naturelles, est incomplète. Les découvertes à venir permettront peut-être d'obtenir une formulation complète de la physique, révélant les lois les plus fondamentales avec lesquelles la nature fonctionne. Ou bien sommes-nous condamnés à améliorer indéfiniment notre compréhension approximative de la réalité.

Bien évidemment, les méthodes scientifiques employées doivent être adaptées à ce qu'il est possible de réaliser. En cosmologie physique et en astronomie extragalactique, on peut observer, mais on ne peut jamais toucher. La cosmologie se distingue également par le fait qu'on ne peut pas répéter l'expérience, si bien qu'il est nécessaire de se baser sur ce que l'on peut déduire des fossiles du passé. Certains de ces fossiles sont relativement proches, comme c'est le cas pour les roches terrestres ou les étoiles de notre galaxie ou d'autres, et les récits associés à la découverte et à la compréhension de ces fossiles sont propres à chacun. Nous observons le passé le long de notre cône de lumière, car le rayonnement détecté ici et aujourd'hui a voyagé jusqu'à nous à la vitesse de la lumière. Pour comprendre comment était l'Univers lorsqu'il était très jeune, il faut donc observer des objets très éloignés. L'observation de notre cône de lumière tout au long de l'histoire de l'humanité ne nous permet d'accéder qu'à une tranche extrêmement mince de ce qui s'est produit, mais cela révèle sur une très grande étendue temporelle la nature de la réalité physique de notre Univers immense, dont les phénomènes nombreux et variés doivent être interprétés.

Les progrès scientifiques ayant conduit à l'état actuel du modèle cosmologique ont été marqués par des débats sur les problèmes non résolus, comme c'est souvent le cas dans le domaine des sciences naturelles. Cependant, les discussions autour des problèmes de cosmologie ont été animées avec bien plus de passion que ce que la qualité des preuves expérimentales de cette époque laissait présager. Cela s'explique en partie par le fait que les observations susceptibles de trancher ces questions semblaient souvent hors de portée, ou alors tout juste possibles. Et je pense que c'était également lié au fait que la nature du monde ne peut nous laisser indifférent. Est-ce que l'Univers évolue, ou bien est-il dans un état stationnaire ? S'il évolue, comment va-t-il finir ? Dans un Big Crunch ou un Big Freeze¹ ? Quelle est son origine ? Ces débats sont beaucoup plus apaisés aujourd'hui, car nous disposons désormais d'un modèle cosmologique qui passe une multitude de tests expérimentaux, mais ils ont toujours lieu.

Au cours du XX^e siècle, la recherche en cosmologie était conduite au sein de petits groupes, souvent par un chercheur travaillant seul ou éventuellement avec un collègue, ou avec un étudiant ou deux. Au XXI^e siècle, la recherche en cosmologie est devenue plus complexe et de grandes collaborations sont devenues nécessaires pour développer les dispositifs expérimentaux, et l'analyse des données ainsi que leur interprétation sont également réalisées au sein de collaborations tout aussi grandes. Ce domaine de recherche avance désormais grâce aux progrès des grands instruments d'observation : il faut acquérir d'énormes quantités de données, les analyser, et recourir à des simulations numériques très lourdes pour faire le lien entre la théorie et les observations. Cette manière de faire de la recherche est particulièrement adaptée pour répondre à des questions bien définies. Ce dont je traite dans ce livre est différent, puisque je raconte comment les résultats de petits groupes, travaillant dans

1. NDT : Voir chapitre 3.

des domaines d'apparence très éloignés, ont finalement donné corps au modèle cosmologique standard dont la cohérence a justifié que de grandes collaborations se consacrent à le tester avec précision. Ce changement d'échelle de la recherche en cosmologie a eu lieu entre 1998 et 2003, période pendant laquelle une révolution observationnelle a conduit à une théorie cosmologique crédible.

Les chercheurs ont continué à explorer de nouvelles idées après cette révolution, mais la différence résidait dans le fait que la communauté scientifique était tombée d'accord sur un paradigme, au sens de Kuhn (1962). Du moins c'était l'avis de la majorité, puisque certains restaient en désaccord avec ce modèle standard. Un exemple du basculement de la cosmologie dans la science conventionnelle est l'étude de la formation et de l'évolution des galaxies, puisque les théories de formation des galaxies s'inscrivent dans le cadre standard de la théorie de l'évolution de l'Univers. Il se peut que cette recherche scientifique révèle des anomalies qui conduiront ensuite à formuler une meilleure théorie cosmologique. C'est d'ailleurs une caractéristique intéressante de la cosmologie, puisque la théorie est à la fois extrêmement bien testée, tout en étant notoirement incomplète.

Les avancées en cosmologie ont conduit à déduire de manière convaincante que l'Univers doit contenir de la matière noire qui interagit faiblement avec la matière ordinaire. Les propriétés de cette matière noire sont fortement contraintes, mais cette substance n'a jamais été détectée directement, car seuls ses effets gravitationnels ont permis de déduire son existence. Certains pensent que la matière noire restera une simple hypothèse tant que nous n'aurons pas de meilleure preuve. Cela passera peut-être par une détection directe en laboratoire, ou alors par des indications de l'effet que cette matière noire a sur les galaxies, en plus d'assurer leur cohésion. Pour d'autres, les preuves en faveur de la matière noire sont si convaincantes qu'il ne fait pas de doute qu'elle existe. Le même genre de débat a lieu à propos de la constante cosmologique d'Einstein, Λ . Au passage, on lui a donné le nom d'énergie sombre. Mais personne n'est dupe du fait qu'il s'agit simplement d'un paramètre ad hoc que l'on accepte car il permet de réconcilier la théorie avec les observations. Ce n'est d'ailleurs pas le seul, puisque d'autres hypothèses sont par ailleurs nécessaires pour concilier la théorie avec les phénomènes observés, que ce soit dans le modèle cosmologique actuel ou dans d'autres domaines des sciences naturelles. La recherche scientifique améliore sans cesse les tests auxquels est soumise la théorie, et cela conduira peut-être, volontairement ou non, à construire une théorie encore meilleure qui motivera de nouveaux tests. Au passage, on sera peut-être amené à remplacer certains paramètres ad hoc par des théories unifiées formant de nouveaux paradigmes au sein desquels les différents ingrédients seront associés de manière beaucoup plus cohérente.

La cosmologie physique, dont je raconte l'histoire dans cet ouvrage, est une science empirique. Cela signifie qu'elle est construite et testée à partir d'observations ou de mesures, comme celles effectuées par des microscopes et des télescopes. Mais on ne doit pas sous-estimer le rôle que jouent la théorie et l'intuition, et de ce que Richard Dawid (2013 et 2017) appelle « l'évaluation non empirique d'une théorie. » Un exemple emblématique dans cette histoire est le fait qu'au cours du siècle passé, la majorité des cosmologistes tenaient implicitement pour juste la théorie d'Einstein de la relativité générale. Très peu de chercheurs soulignaient qu'il s'agissait d'une immense extrapolation de cette théorie qui, jusque dans les années 1960, n'avait été que très peu testée. Dans les années 1990, alors que la recherche en cosmologie commençait à converger vers une théorie bien établie, des tests très précis

de la relativité générale avaient été réalisés. Ceux-ci s'étendaient sur des échelles allant du laboratoire jusqu'au système solaire, c'est-à-dire jusqu'à des échelles de l'ordre de 10^{13} cm. Mais l'utilisation de la relativité générale jusqu'à la distance de Hubble, environ 10^{28} cm, constituait une extrapolation de ces tests de précision sur des échelles de longueur quinze ordres de grandeur plus importantes. D'après mon expérience, cela était rarement souligné, et lorsque c'était le cas, les scientifiques avaient tendance à trouver la situation dérangeante, du moins temporairement. Au cours des premières décennies du XXI^e siècle, les propriétés de la relativité générale qui sont cruciales pour la construction du modèle cosmologique standard ont subi une batterie de tests très précis. Pour faire simple, la théorie qu'Einstein avait construite à partir d'expériences en laboratoire, n'avait été sérieusement testée auparavant que jusqu'à l'orbite de la planète Mercure. Au passage, je souligne que la mesure de la déflexion de la lumière par le Soleil, une prédiction de la relativité générale, et conduite par les personnes représentées sur la planche III, avait été considérée comme un succès en son temps, mais avec le recul on s'est rendu compte que cette mesure était loin d'être convaincante. On a désormais montré que la relativité générale peut être extrapolée jusqu'aux échelles immenses de l'Univers observable. Il s'agit là d'un résultat remarquable.

La relativité générale est une extension élégante de l'électromagnétisme en espace-temps plat. On a souvent dit qu'il s'agissait d'une théorie qui attendait simplement qu'on la découvre, bien qu'il soit plus facile de faire ce genre d'affirmation a posteriori. Le haut degré de confiance avec lequel cette théorie a été extrapolée illustre l'influence et les succès de l'évaluation non empirique. Bien sûr, l'influence de l'évaluation non empirique peut conduire à se tromper : j'en veux pour preuve que, des années 1930 aux années 1990, très peu de personnes critiquaient l'opinion d'experts renommés selon laquelle la constante cosmologique d'Einstein, Λ , devait être écartée. Aujourd'hui, les observations ont montré de manière convaincante que Λ , dont le nom a été remplacé par *énergie sombre*, est un élément central du modèle cosmologique.

L'utilisation de l'évaluation non empirique est parfois appelée « post-empirisme, » mais je n'ai jamais rencontré ce terme dans les écrits de Dawid. Voici ce qu'il m'expliquait en 2018 :

L'évaluation non empirique, telle que je la conçois, dépend de manière cruciale des données expérimentales collectées ailleurs dans le domaine, et de la quête continuelle de confirmation expérimentale pour la théorie étudiée. Dans une phase « post-empirique » avec très peu de nouvelles données, l'évaluation non empirique cesserait d'être pertinente et ne permettrait plus de progresser.

Selon moi, cette vision est cohérente avec ce qui se fait habituellement dans le domaine des sciences naturelles, c'est-à-dire avec le genre d'évaluation non empirique que l'on a toujours pratiqué sans vraiment s'en rendre compte.

Il me semble qu'il existe trois autres types d'évaluations : le jugement personnel, l'opinion de la communauté – même si certains ne seraient pas d'accord avec ce point de vue – et enfin l'évaluation pragmatique. Ce que l'on entend par les deux premiers est assez clair et ne nécessite pas d'être détaillé. Quant à l'évaluation pragmatique, on en trouve des exemples en cosmologie. En effet, la pratique habituelle a consisté à analyser les données et les observations dans le cadre de la relativité générale. Cela est très certainement dû à la beauté de cette théorie, mais on peut également y voir une forme de respect pour l'intuition magnifique d'Einstein. Mais le fait de se baser sur la même théorie a également permis de comparer les

résultats d'analyses indépendantes portant sur les mêmes données, ou sur des données différentes, dans le même cadre fondamental. Je ne crois pas que cela résulte d'un choix délibéré et conscient, mais plutôt qu'il s'agit simplement du résultat d'une approche pragmatique implicite en cosmologie – et j'imagine que cela a dû se produire dans d'autres domaines des sciences naturelles – qui a permis de s'affranchir du chaos qui aurait résulté de l'utilisation de nombreuses théories différentes.

L'approche pragmatique de la science ne doit pas être poussée trop loin, car elle fait courir le risque de gâcher du temps ou des ressources dans des voies de recherche alors qu'il apparaîtrait de plus en plus clairement qu'elles sont des impasses. Et quand bien même la voie de recherche pragmatique à la mode nous conduirait dans la bonne direction, il est fondamental de disposer d'idées alternatives bien développées qui nous poussent à tester minutieusement les concepts et les observations les plus conventionnels. Cela peut éventuellement permettre de découvrir des corrections, petites ou grandes, qui nous informeraient sur une meilleure direction à suivre. Par exemple, une des propositions les plus stimulantes du milieu du xx^e siècle a consisté à suggérer que la physique bien établie devait être modifiée pour permettre la création spontanée et continue de matière. Ceux qui ont défendu avec courage cette possibilité d'une cosmologie de l'état stationnaire ont souvent été mal perçus, mais, selon moi, ils ont alimenté de manière très pertinente le débat scientifique autour des avantages respectifs de la relativité générale et du modèle d'état stationnaire. D'ailleurs, lors des discussions sur ce sujet les opinions de chaque camp étaient souvent bien plus tranchées que ce que les observations permettaient de prouver. L'idée d'une création perpétuelle de matière n'est plus envisagée sérieusement de nos jours, mais elle a eu un effet très bénéfique sur le développement de la cosmologie. De nouvelles idées permettent d'ouvrir des polémiques qui stimulent la recherche, tandis que la défense pragmatique des idées conventionnelles permet d'éviter que la confusion ne paralyse la recherche.

La manière dont l'idée d'Einstein, selon laquelle l'Univers est en moyenne homogène et les irrégularités sont locales, a été acceptée est un bon exemple d'évaluation implicite pragmatique. Avant les années 1960, les preuves en ce sens étaient très limitées. Au contraire, les cartes de distribution des galaxies dans le ciel semblaient indiquer que les galaxies s'éloignaient les unes des autres dans un espace asymptotiquement vide, ou proche de l'être, comme ce serait le cas pour une distribution fractale des galaxies. Cette idée pourtant intéressante fut écartée, et je ne saurais d'ailleurs pas dire si cela fut intentionnel ou le fruit du hasard. Le débat principal s'était concentré sur le concept d'évolution de l'Univers, ou son alternative, à savoir un état stationnaire quasiment homogène. Il fallut attendre les années 1960, soit une cinquantaine d'années après Einstein, pour disposer de la première preuve observationnelle crédible de l'homogénéité de l'Univers, et ce grâce aux résultats de recherches poursuivant un tout autre but, comme détaillé dans le chapitre 2. Que ce soit le résultat du hasard, ou simplement une affaire d'esthétique, la communauté ne s'est jamais trop égarée dans la voie, certes élégante mais erronée, d'un univers fractale.

Il n'est jamais simple de comprendre pourquoi certaines questions reçoivent beaucoup plus d'attention que d'autres. J'imagine que de telles choses sont possibles. La démarche conduisant à rejeter expérimentalement une idée apparemment intéressante est assez claire. Par exemple, le modèle d'état stationnaire introduit en 1948 est certes élégant, mais ses prédictions se sont heurtées à l'accumulation ultérieure de données expérimentales. En revanche,

je ne crois pas qu'il y ait de méthode communément admise pour aller dans l'autre sens, c'est-à-dire pour attribuer le statut de théorie standard à un modèle qui donne satisfaction. On peut probablement considérer que ce genre de décision reflète « l'avis de la communauté ».

En 1990, on considérait généralement que la relativité générale était le bon cadre théorique pour étudier les propriétés à grande échelle de l'Univers. Cependant, comme évoqué ci-dessus, cela reposait sur l'évaluation implicitement pragmatique que cette théorie était une base de travail bien pratique pour la recherche. En 2003, après la révolution observationnelle, les tests du modèle cosmologique ont donné du poids à l'idée communément admise selon laquelle l'Univers est effectivement bien décrit par la relativité générale et un ensemble d'hypothèses, ce qui a ensuite pris le nom de modèle cosmologique Λ CDM. L'introduction de ces hypothèses, notamment la constante cosmologique d'Einstein Λ et l'hypothétique matière noire, est abordée dans la section 8.2. Il est clair que certains restaient en désaccord, mais pour la plupart des cosmologistes, l'accumulation de preuves observationnelles (voir chapitre 9) était si importante qu'il était désormais possible de parler de ce qui s'est « vraiment passé » dans l'Univers primordial, en se basant sur la théorie Λ CDM. Le concept de réalité est complexe, et il serait moins risqué d'affirmer simplement que ce qui s'est passé – et on suppose que quelque chose s'est passé – a laissé des vestiges très semblables à ce que prédit la théorie Λ CDM. Et ces traces du passé sont suffisamment abondantes et vérifiées pour que la communauté scientifique, et je m'inclus dedans, estime avec une grande certitude que cette théorie est une approximation utile, bien qu'incomplète, de ce qui s'est vraiment passé.

1.2 Organisation du livre

J'ai choisi de raconter l'histoire de la cosmologie en traitant séparément des domaines de recherche qui ont évolué plus moins indépendamment les uns des autres au cours du XX^e siècle. Au sein de chaque domaine, je traite les avancées dans l'ordre chronologique, mais il est inévitable de devoir faire des allers-retours dans le temps lorsque ceux-ci ont commencé à interagir. J'explique dans cette section comment j'ai choisi d'organiser la présentation des progrès en cosmologie, de manière à ce que leur agencement soit relativement cohérent, exception faite des voies de recherche qui se sont avérées être des impasses.

Le chapitre 2 s'ouvre sur mes réflexions à propos de l'idée purement théorique d'Albert Einstein (1917) selon laquelle un univers philosophiquement attrayant doit nécessairement être homogène et isotrope. Il ne doit posséder ni point central, ni directions privilégiées et être sans bord. Bien évidemment il est entendu que de petites irrégularités de matière sont tout de même autorisées, comme c'est le cas pour les planètes ou les étoiles qui sont des concentrations de matière. L'idée d'homogénéité d'Einstein est fondamentale pour pouvoir envisager de construire une théorie de l'Univers dans son ensemble, plutôt que d'une partie ou d'une autre. Peut-être s'agissait-il d'une intuition géniale, ou bien simplement d'un coup de chance, car il est clair qu'Einstein ne disposait d'aucune indication expérimentale permettant de justifier cette hypothèse. L'histoire de la manière dont cette idée d'Einstein fut perçue et testée illustre la relation de dépendance entre la théorie et la pratique. Parfois ces deux composantes de la recherche se renforcent mutuellement, et il arrive que des tensions naissent entre théorie et expérience, et parfois, comme dans le cas présent, suite à des événements inattendus. N'ayant pas trouvé d'ouvrage traitant de ces aspects historiques, j'ai choisi de

détailler abondamment l'histoire de l'accumulation des preuves allant dans le sens de ce qui est désormais connu sous le nom de principe cosmologique d'Einstein.

La théorie de la relativité générale d'Einstein prédit qu'un univers presque parfaitement homogène doit être en expansion ou en contraction. Le phénomène d'expansion a été mis en évidence grâce aux observations astronomiques qui montraient que la lumière des galaxies était décalée vers le rouge, d'une manière semblable à l'effet Doppler, car les galaxies s'éloignent de nous. Le chapitre 3 passe en revue l'importance de la découverte du fait que le décalage spectral vers le rouge, est d'autant plus important que les galaxies sont éloignées. C'est exactement ce qui est attendu si l'expansion de l'Univers est quasiment homogène. La cosmologie du Big Bang présentée dans les sections 3.1 et 3.2 se base sur la théorie de la relativité générale pour décrire l'évolution d'un univers quasiment homogène en expansion.

Au passage, il est important de souligner que le nom « Big Bang » est mal choisi, car l'idée même d'une explosion est associée à un événement localisé dans l'espace-temps. À la différence d'une explosion au sens habituel, ce concept de Big Bang en cosmologie n'a rien à voir avec un événement ayant lieu à un endroit et un moment particuliers. La théorie consiste en revanche à décrire l'évolution cosmologique d'un univers qui est en moyenne homogène, et son objectif est de retracer cette évolution depuis l'époque présente jusque très loin dans le passé, ce grâce aux fossiles que l'on peut observer et interpréter. Cela inclut notamment l'époque de formation des éléments légers, lorsque la température de l'Univers était environ neuf ordres de grandeur plus élevée qu'aujourd'hui. Il s'agit d'une remarquable extrapolation dans le passé, mais pas jusqu'à une explosion, et non plus jusqu'à une singularité originelle. Nous devons plutôt supposer que quelque chose de différent s'est produit avant cette singularité. Simon Mitton (2005) explique que Fred Hoyle prononça le terme « Big Bang » lors d'une conférence à la radio de la BBC en mars 1949. Il s'agissait à l'époque d'une formulation péjorative car Hoyle était en faveur du modèle cosmologique de l'état stationnaire. Bien que le terme « Big Bang » soit inadéquat, il est aujourd'hui largement utilisé. Comme je n'ai jamais trouvé de meilleure formulation, il m'a paru plus simple de l'utiliser tout au long de ce livre.

Il était crucial de disposer d'alternatives au modèle du Big Bang pouvant être falsifiées, car celles-ci motivèrent la réalisation d'expériences. L'idée alternative qui avait le vent en poupe était le modèle de l'état stationnaire qui est détaillé dans la section 3.3. J'ai choisi de l'appeler le « modèle de l'état stationnaire de 1948 », afin de le distinguer des variantes proposées plus tard. Ce modèle de l'état stationnaire a été abondamment étudié et discuté jusqu'au milieu des années 1960 en tant qu'alternative possible au modèle du Big Bang. Ce fut bien moins le cas pour l'alternative à l'idée d'homogénéité d'Einstein, à savoir le modèle d'une distribution de matière fractale, qui n'a été véritablement étudié que lorsque l'on disposait déjà de très bonnes preuves de l'homogénéité (voir section 2.6).

Le livre de Hermann Bondi (1952, 1960) intitulé *Cosmology* dans deux éditions, permet de bien saisir l'état de la pensée scientifique à cette époque. Lequel des modèles, celui de l'état stationnaire ou celui du Big Bang, voire même un autre modèle, est le plus judicieux ? Et sur quelle base, empirique ou non empirique, peut-on trancher ? Helge Kragh (1996) présente également un point de vue historique de la recherche en cosmologie jusque dans les années 1960. Les sections 3.4–3.7 sont consacrées à compléter ces sources par mes réflexions sur les différences et similarités d'évaluation de ces deux modèles cosmologiques. Selon moi, dans les années 1950 et jusqu'au début des années 1960, les problèmes non empiriques expliquent

le manque de popularité du modèle stationnaire dans de nombreux milieux, malgré sa capacité à fournir des prédictions observationnelles. Le modèle du Big Bang est en revanche moins prédictif que son alternative, ce qui explique probablement pourquoi l'évaluation non empirique a pris une place si importante, comme discuté dans la section 3.5.

Vers 1990, le plus gros effort expérimental en cosmologie avait porté sur la détermination de la densité de masse moyenne. Les sections 3.6.3 et 3.6.4 traitent de la grande diversité de mesures de cette quantité, et la section 3.6.5 présente un aperçu de ce qui a été appris. Cette mesure était notamment motivée par le fait de savoir si la densité de masse était suffisamment grande pour que son effet gravitationnel tende à arrêter l'expansion, entraînant alors l'Univers dans une phase de contraction. Ces efforts étaient donc très importants pour établir le modèle cosmologique sur une base empirique. Mais je crois que ceux qui ont réalisé ces mesures étaient également guidés par la perspective de trancher une question fascinante, qui semblait certes très difficile mais réalisable.

Le chapitre 4 traite des fossiles datant d'une époque où l'Univers était très différent de ce qu'il est aujourd'hui, c'est-à-dire suffisamment dense et chaud pour produire les éléments légers et le bain de rayonnement qui remplit presque uniformément l'espace. Étant donné qu'il était extrêmement difficile – c'est d'ailleurs toujours le cas de nos jours – de concevoir comment les éléments légers et le rayonnement avec son spectre thermique auraient pu provenir de l'Univers tel qu'il est aujourd'hui, ces fossiles constituent une preuve essentielle du fait que notre Univers évolue et ne peut donc pas se trouver dans un état stationnaire. Le livre *Finding the Big Bang* (Peebles, Page et Partridge 2009) rappelle comment ces fossiles ont été découverts et interprétés au milieu des années 1960. Cet ouvrage réunit également les souvenirs de ceux qui ont été impliqués dans leur découverte et leur compréhension, et détaille comment cela a permis d'obtenir la première preuve solide que le taux d'expansion de notre Univers est de l'ordre de ce que la relativité générale prédit. L'histoire tortueuse ayant conduit Gamow et ses collaborateurs à anticiper l'existence de ces fossiles une dizaine d'années avant leur découverte est racontée dans l'article *Discovery of the Hot Big Bang : What Happened in 1948* (Peebles 2014). La section 4.2 présente un résumé des points essentiels de cet article. Le bain de rayonnement thermique est désormais appelé fond diffus cosmologique, ou CMB². Cette observable occupa un rôle central lors de la révolution qui conduisit à établir le modèle Λ CDM, comme détaillé dans le chapitre 9. Cette théorie d'un univers en expansion est construite à partir de la théorie de la relativité générale appliquée à un univers presque parfaitement homogène (chapitre 2), en postulant de plus l'existence de la constante cosmologique d'Einstein, notée Λ (section 3.5), la présence de matière noire (chapitre 7), et enfin en adjoignant un choix particulier de conditions initiales (section 5.2.6).

Il était naturel de chercher à comprendre comment les déviations manifestes à l'homogénéité d'Einstein, à savoir les étoiles au sein des galaxies et les amas de galaxies, ont pu se former dans un univers en expansion. Dans le modèle cosmologique standard, on explique la présence de structures par l'instabilité gravitationnelle dans un univers en expansion. La confusion initiale à propos de la signification physique de cette instabilité fait partie de l'histoire de la cosmologie. Le chapitre 5 offre un résumé de ce débat scientifique et détaille les différents scénarios qui avaient été proposés pour expliquer la formation des structures. Ces considérations ont joué un rôle important dans la convergence des modèles

2. NDT : CMB est l'acronyme de *Cosmic Microwave Background*, et son usage est si commun que nous choisissons de ne pas le traduire.

vers un modèle cosmologique standard, et je les évoque à de nombreuses reprises tout au long du livre.

Le chapitre 6 traite de la découverte par les astronomes de ce qui semblait être des anomalies dans les mesures de masse des galaxies et des amas de galaxies. Les articles de Courteau *et al.* (2014) et de Swart, Bertone et van Dongen (2017) offrent également un résumé de l'exploration de ce phénomène. Fritz Zwicky fut le premier à le mettre en évidence, à travers l'observation du fait que les galaxies du grand amas de Coma³ se déplacent beaucoup trop vite pour que l'attraction gravitationnelle due à la matière visible au sein de l'amas puisse les retenir. Une autre manière de formuler ce problème consiste à dire qu'une partie de la masse requise pour assurer la cohésion de l'amas semblait manquer, à supposer que les forces de gravitation suivent la limite newtonienne de la relativité générale et varient selon l'inverse de la distance au carré. On s'aperçut plus tard que de la masse semblait également manquer dans les zones externes des galaxies spirales, si l'on se fiait au mouvement circulaire des étoiles et du gaz dans leur disque. Ces mesures sont détaillées dans la section 6.3. Les études décrites dans la section 6.4, et portant sur la manière dont les galaxies ayant un disque bien formé ont pu acquérir leurs élégantes structures spirales, parvinrent à des conclusions similaires. Au milieu des années 1970, il était devenu clair que ces phénomènes pouvaient être expliqués si la masse visible était maintenue en orbites quasi circulaires à cause de l'attraction gravitationnelle de matière beaucoup moins lumineuse, dont la stabilité est par ailleurs assurée grâce à la distribution beaucoup plus aléatoire des orbites.

Toutes ces observations indiquaient que le modèle cosmologique devait inclure la présence de « matière noire ». Ce nom générique a fini par être adopté pour remplacer les concepts de masse « manquante », « cachée » ou « invisible ». Le concept de matière noire est entièrement lié à des observations astronomiques, et pas cosmologiques. D'ailleurs, cette matière n'est pas nécessairement très exotique : des étoiles de faible masse pourraient très bien faire l'affaire, même si elles devraient alors être largement plus nombreuses que les étoiles lumineuses observées. Cependant, à partir des années 1970, l'idée fondamentale en cosmologie de matière non baryonique prenait de plus en plus d'importance suite aux travaux des physiciens des particules. Le gaz, le plasma, les planètes et les étoiles normales sont autant d'objets physiques constitués de ce qu'on appelle la « matière baryonique ». L'essentiel de la masse de la matière baryonique est située au sein des noyaux atomiques. Les électrons qui accompagnent ces noyaux sont des « leptons », mais il est habituel de compter leur masse avec celle des baryons. Les neutrinos sont également des leptons, et l'on sait désormais que leur masse au repos est non nulle. Par conséquent, les neutrinos se comportent comme de la matière noire non baryonique et contribuent à la masse des galaxies. Cependant, dans le modèle cosmologique standard, cette contribution est bien inférieure à la contribution totale déduite des observations astronomiques. La matière noire non baryonique doit donc nécessairement être d'une autre nature.

L'idée que la masse invisible des astronomes se confond avec la matière non baryonique des physiciens des particules, et également avec la matière noire des cosmologistes, était et demeure une conjecture à l'heure où ces lignes ont été écrites. La seule preuve expérimentale

3. NDT : En français, cet amas de galaxies est également connu sous le doux nom d'« amas de la Chevelure de Bérénice », à cause de sa position dans la constellation du même nom. Nous avons fait le choix de nous en tenir, dans cette traduction, à sa dénomination la plus courante, bien que moins poétique.

de l'existence de cette nouvelle matière dont on dispose est son influence gravitationnelle. Il s'agit tout de même d'une idée qui fonctionne très bien et qui a passé un certain nombre de tests exigeants. Le chapitre 7 détaille comment les physiciens des particules ont suggéré la possible existence d'une matière non baryonique. Ils ont notamment été guidés par la condition suivante : si cette matière a été produite dans la phase primordiale et chaude de l'Univers, alors sa densité relique ne peut excéder ce qui est permis par le modèle cosmologique du Big Bang, toujours en supposant que la théorie relativiste est correcte. Mais il est remarquable que les cosmologistes se sont saisis du concept de matière noire non baryonique avant que la communauté des physiciens des particules se soit réellement intéressée aux observations astronomiques favorisant l'existence de matière invisible.

Dans les années 1980, il y avait essentiellement deux types de matière noire qui étaient étudiés : la matière noire froide et la matière noire chaude. Cette dernière aurait pu être une famille de neutrinos dont la masse au repos aurait été de quelques dizaines d'électronvolts (voir sections 5.2.7 et 7.1). Ces neutrinos initialement chauds dans l'Univers primordial, c'est-à-dire se déplaçant très rapidement, auraient eu pour effet de gommer les inhomogénéités de la distribution de masse, si bien que les premières structures formées auraient dû être très massives et se fragmenter ultérieurement afin de former des galaxies. En 1980, une collaboration expérimentale annonça avoir montré en laboratoire, à tort, que les neutrinos possèdent une masse non nulle, ce qui aurait rendu possible ce modèle de matière noire chaude. À l'époque, cette détection erronée a contribué à renforcer l'intérêt pour ce modèle de formation des structures par fragmentation. Cependant, le modèle a ensuite dû être écarté car les observations montraient que la croissance des structures est hiérarchique, et débute par les structures de faible masse avant de se poursuivre par les plus grandes.

Le prototype de la matière non baryonique, qui est un élément essentiel du modèle cosmologique, a été introduit par les physiciens des particules en 1977. L'idée a été proposée par cinq groupes de recherche indépendants, qui publièrent en l'espace de deux mois seulement. Les articles ne s'intéressaient pas vraiment au phénomène de la masse invisible étudié par les astronomes, mais les idées qu'ils avançaient étaient tout à fait pertinentes pour ce type de matière. Était-ce une simple coïncidence ou s'agissait-il d'une idée « dans l'air du temps » ? Je détaille ces événements dans les sections 7.2.1 et 10.4.

Les sections 8.1 et 8.2 expliquent pourquoi, au début des années 1980, les cosmologistes se saisirent du concept de masse invisible initialement proposé par les astronomes, ainsi que du concept de matière non baryonique mis en avant par les physiciens des particules, pour suggérer l'existence de ce qui est désormais appelé matière noire froide standard, ou Λ CDM⁴. On pourrait penser que l'ajout de la lettre « s » signifiait que le modèle était simple (et il l'était), mais cette lettre était en fait là pour rappeler qu'il s'agissait de la version « standard », non pas que le modèle fût solidement établi, mais tout simplement parce qu'il avait été le premier proposé. Il s'agissait simplement de le distinguer des nombreuses variantes qui sont passées en revue dans la section 8.4. Une bonne partie des cosmologistes s'est mise à utiliser des variantes du modèle Λ CDM afin de chercher à comprendre comment la formation des galaxies aurait pu conduire à ce que leur distribution de positions et de vitesses soit celle observée (section 8.3). Ils utilisèrent également ces modèles pour analyser l'effet de la formation des galaxies sur la distribution angulaire du bain de rayonnement thermique. L'opinion de la communauté à propos de ces différents modèles était probablement trop optimiste,

4. NDT : CDM est l'acronyme de *Cold Dark Matter*.

car il était très simple de fabriquer d'autres modèles, certes plus sophistiqués, permettant d'expliquer les observations de l'époque. De plus, l'opinion générale à cette époque, qui ne reposait sur aucune base empirique, était que les sections spatiales devaient être plates, et cela compliquait les analyses. En relativité générale, cela peut être le cas si la densité de masse est suffisamment importante, mais cela peut également être dû à la présence de la constante cosmologique d'Einstein, Λ . Les raisons non empiriques qui poussaient la communauté à préférer un modèle avec des sections spatiales plates, de préférence sans constante cosmologique, sont abordées dans la section 3.5. Leur influence durable eut pour conséquence de générer de la confusion entre les différentes alternatives au modèle Λ CDM qui étaient étudiées dans les années 1990.

Au cours des années 1998–2003, les progrès expérimentaux permirent de réduire considérablement cette confusion, si bien qu'il est justifié de considérer cette période charnière comme une véritable révolution. Les deux grandes avancées expérimentales responsables de cette révolution sont détaillées dans le chapitre 9. La première a consisté à mesurer la relation entre le décalage du spectre d'un objet et sa densité de flux énergétique dans le ciel, étant donné sa luminosité intrinsèque. Cette relation est appelée relation décalage spectral–magnitude. L'idée de mesurer cette relation datait des années 1930, mais cela ne fut accompli qu'à la toute fin du siècle précédent, et qui plus est par deux groupes de recherche indépendants (section 9.1). La deuxième grande avancée a consisté à mesurer de manière très précise la dépendance angulaire du CMB. Les travaux poursuivant cet objectif avaient été initiés dès le milieu des années 1960. Par pur hasard, ils aboutirent et permirent de contraindre très fortement les modèles cosmologiques à peu près au même moment. Les résultats de ces deux grandes avancées, combinés à ce que l'on connaissait déjà de l'Univers, permirent de montrer que le modèle cosmologique du Big Bang chaud devait nécessairement inclure la constante cosmologique d'Einstein ainsi que la présence de matière non baryonique de type CDM. Cette consécration de la théorie Λ CDM fut un tournant majeur dans l'histoire de la cosmologie.

Il était pertinent de s'interroger si l'ajout des éléments hypothétiques très importants que sont la matière noire froide et la constante cosmologique, en plus des autres hypothèses permettant de spécifier un modèle cosmologique, ne revenait pas à ajuster la théorie aux mesures. Le débat à ce sujet n'a jamais été très animé, car le modèle cosmologique Λ CDM, qui permettait d'expliquer les résultats de ces expériences majeures, permettait également de rendre parfaitement cohérentes entre elles toutes les autres indications expérimentales à sa faveur. Cette convergence des preuves observationnelles est abordée dans la section 9.3.

En 2003, lorsque la révolution observationnelle s'est achevée, la communauté scientifique avait enfin convergé vers une théorie bien établie des propriétés à grande échelle de l'Univers. Bien sûr, tout le monde n'était pas convaincu, et c'est d'ailleurs mieux ainsi, car cette théorie constitue une extrapolation immense des connaissances en physique. La théorie de 2003 a depuis été modifiée pour s'accorder avec les données expérimentales accumulées ultérieurement, mais il ne s'agissait que de simples ajustements de ses paramètres, et non de modification de son cadre fondamental. Les progrès de la science se font toujours par approximations successives, et il ne serait pas surprenant que l'on soit amené à formuler une théorie qui supprime le modèle Λ CDM. Mais nous avons de très bonnes raisons de penser que cette nouvelle théorie décrira un univers qui ressemble beaucoup au modèle Λ CDM, car celui-ci satisfait un grand nombre de tests empiriques qui sondent l'Univers de multiples manières.

Je ne vois pas quelle leçon pourrait être tirée de la manière dont la cosmologie a repoussé les limites de la science qui ne pourrait être également tirée d'autres branches des sciences naturelles. Cela n'a rien de surprenant puisque la cosmologie progresse en suivant la méthodologie des sciences naturelles. Mais je crois que lorsque l'on examine l'histoire relativement simple de la cosmologie, certains de ces enseignements deviennent beaucoup plus clairs. J'expose mon point de vue sur ce sujet dans le chapitre 10.

L'Univers homogène

LA COSMOLOGIE MODERNE est née avec les efforts d'Albert Einstein pour déterminer comment sa théorie de la relativité générale pouvait être appliquée à l'étude des propriétés de l'Univers aux grandes échelles. De son point de vue (1917), très philosophique, un Univers raisonnable se devait d'être le même partout et dans toutes les directions, à l'exception de petites irrégularités telles que celles nécessaires pour décrire les planètes et les étoiles. Un tel principe contrastait fortement avec les pratiques acceptées jusque-là en sciences naturelles, dans lesquelles on avait plutôt l'habitude d'étudier un niveau particulier au sein d'une hiérarchie claire des structures. Il peut s'agir de l'étude des molécules, des atomes au sein des molécules, du noyau dans les atomes, des nucléons dans les noyaux ou bien encore des quarks et des gluons dans les nucléons. Aux plus grandes échelles, on peut aussi citer : les interactions complexes entre atomes et molécules qui sont au cœur de la physique de la matière condensée, de la chimie, et au plus haut niveau, de la biophysique ; ou bien encore, la composition et la structure des planètes tournant autour des étoiles, des étoiles dans les galaxies, ou des galaxies au sein des groupes, amas et superamas. Pour Einstein, cette hiérarchie devait se terminer dans un état nouveau pour la science moderne : un Univers homogène aux grandes échelles. Bien que cela soit resté implicite au début, cette idée inclut également l'isotropie aux grandes échelles, c'est-à-dire l'idée que l'Univers aux grandes échelles doit être invariant par rotation en plus de l'être par translation.

Cette hypothèse d'homogénéité nous permet de formuler et de tester un modèle de l'Univers entier en tant qu'objet, au-delà de l'ensemble parcellaire des modèles construits pour décrire les différents niveaux dans la hiérarchie des structures. Dans un Univers homogène aux grandes échelles, les observations conduites à partir de notre position particulière peuvent nous renseigner sur l'Univers tel qu'il serait vu par n'importe quel autre observateur, situé à n'importe quel autre endroit. Cependant, il nous faut réunir des preuves que cette hypothèse permet une bonne approximation de la réalité.

2.1 *Le principe cosmologique d'Einstein*

L'argument initial d'Einstein (1917) en faveur de l'homogénéité aux grandes échelles est difficile à évaluer. Il critique l'idée que la matière puisse être confinée dans une région finie, un Univers-île isolé dans un espace vide. Si c'était le cas, et si les vitesses de libération restaient finies, alors les étoiles s'évapoureraient, échappant à l'Univers-île. Cela entrerait en

contradiction avec son hypothèse implicite selon laquelle l'Univers est stationnaire. D'un autre côté, si les vitesses d'évasion pouvaient être arbitrairement grandes, alors statistiquement on devrait occasionnellement observer une étoile se déplaçant à une vitesse très élevée. Ceci est en contradiction avec l'observation des étoiles proches, dont les vitesses sont beaucoup plus petites que la vitesse de la lumière. Ces deux objections seraient valides dans un Univers qui n'évolue pas et pour des étoiles ayant eu le temps d'atteindre l'équilibre statistique. Einstein ne semble pas non plus avoir considéré que, si l'énergie est conservée, alors, à un moment donné, les étoiles doivent arrêter de briller. Au contraire, si les étoiles brillaient éternellement, un Univers homogène serait extrêmement brillant, empli de lumière stellaire. Il s'agit du paradoxe d'Olbers, un problème inacceptable pour un modèle cosmologique.

Un autre argument, peut-être plus proche de ce qu'Einstein pensait en 1917, se trouve dans *The meaning of relativity*, le livre réunissant les cours qu'il a donnés à l'université de Princeton en 1921 (Einstein 1923). Dans cet ouvrage, il indique que sa théorie de la relativité générale admet des solutions dans lesquelles une concentration de masse se trouve isolée dans un espace-temps vide et asymptotiquement plat ou, comme le dit Einstein, quasi euclidien. À l'intérieur de cette concentration de masse, les mouvements accélérés de la matière entraîneraient certains effets usuels tels que l'aplatissement de la courbe de rotation d'une galaxie liée gravitationnellement. Cependant, dans une concentration de masses non relativiste, cette rotation se produirait par rapport à un espace-temps plat. Cela conduit Einstein à écrire (1923, 109) : « Si l'Univers était quasi euclidien, alors Mach se serait totalement trompé lorsqu'il a théorisé que l'inertie, ainsi que la gravitation, dépendaient d'une sorte d'action réciproque entre les corps. »

Une intuition similaire se retrouve dans Einstein (1917) : « Dans le cadre d'une théorie cohérente de la relativité, il ne peut y avoir d'inertie par rapport à l'« espace », mais seulement une inertie des masses *les unes par rapport aux autres*. » Il poursuit en soulignant que dans sa théorie de la relativité générale, une unique particule massive dans un espace-temps vide aurait une inertie, ce qui contredit ses vues sur la relativité du mouvement.

Il considère également (Einstein 1923, 110) que « Mach était probablement sur la bonne voie » concernant la relativité de l'inertie, et il cite trois exemples à l'appui de cela :

1. L'inertie d'un corps doit être augmentée par l'addition de masses pondérables dans son voisinage.
2. Un corps doit être soumis à une force d'inertie lorsque des masses proches sont accélérées ; de fait, cette force doit être dans la même direction que l'accélération.
3. Un objet creux en rotation doit produire un « champ de Coriolis » en son sein, et ce champ doit dévier les corps dans le sens de la rotation. Un tel objet doit également produire un champ d'accélération radiale et centrifuge.

Avec tout le respect dû au génie d'Einstein, il faut noter que son premier exemple, s'il est une conséquence du principe de Mach, est en revanche faux en relativité générale. En effet, cette dernière théorie prédit qu'un observateur confiné dans une région de l'espace suffisamment petite pour que les effets de marée soient négligeables doit percevoir les mêmes lois de la physique locale, quel que soit son environnement, y compris en ce qui concerne les propriétés habituelles de l'inertie. Une façon pratique de concevoir son deuxième exemple se ramène au troisième. Cela s'appelle l'effet de Lense–Thirring : un référentiel inertiel au voisinage d'un corps massif en rotation est lui-même en rotation par rapport à la distribution

de matière située loin du corps ; d'une certaine manière, on peut dire que le référentiel inertiel est entraîné par la rotation du corps massif. Cet effet a depuis lors été observé.

Les prédictions de la relativité générale s'accordent avec l'idée que l'accélération, tout comme le mouvement en général, est une notion relative qui ne prend son sens qu'en lien avec ce qui se passe dans l'ensemble de l'Univers. C'est sûrement ce que Mach pensait (voir son livre *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt*; trad. française Mach 1960). Il est clair que la lecture de Mach par Einstein et ce qu'il a appelé le « principe de Mach » l'ont amené à formuler cette idée qui est maintenant clairement établie : l'Univers observable présente un haut degré d'homogénéité. Le débat reste ouvert quant à savoir si Einstein est arrivé à cette conclusion correcte pour de bonnes raisons.

Pour faire en sorte que l'accélération soit une notion relative en relativité générale, Einstein a dû écarter la possibilité d'un Univers quasi euclidien. Pour cela, il a introduit une sorte de condition aux bords en imposant que l'Univers soit homogène : l'Univers n'a ni centre, ni bord. On doit alors se représenter l'espace comme presque uniformément rempli de matière et de rayonnement.

Un article écrit par Willem de Sitter (1917a,3) donne quelques précisions sur le raisonnement d'Einstein :

Il est clair que la valeur la plus souhaitable et la plus simple pour le tenseur $g_{\mu\nu}$ à l'infini est zéro. N'ayant pas réussi à imposer cette condition aux bords¹, Einstein a supposé que l'Univers n'était tout simplement pas infini mais sphérique : sans bord, il n'est plus nécessaire d'introduire de condition aux bords et le problème disparaît. . . L'idée de rendre l'espace-temps quadridimensionnel lui-même sphérique afin d'éviter l'introduction de conditions aux bords a été suggérée il y a plusieurs mois, lors d'une conversation avec l'auteur, par le professeur Ehrenfest. Cette idée n'avait en revanche pas été approfondie à ce moment-là.

(Je ne comprends pas les commentaires de de Sitter dans la note de bas de page). Un espace sphérique, fermé comme la surface d'une sphère, n'a pas de bord sur lequel il faudrait imposer des conditions ; il peut donc être supposé presque homogène. Comme on le voit, l'hypothèse audacieuse de l'homogénéité, qui s'est finalement trouvée être correcte, est née d'un mélange de philosophie et d'intuition, pendant des discussions entre collègues et probablement grâce à une certaine dose d'optimisme. Elle ne s'est certainement pas construite sur des bases empiriques.

Edward Arthur Milne comprit l'importance de l'hypothèse d'homogénéité pour la formulation d'un modèle cosmologique, et il appela cette hypothèse le « principe cosmologique d'Einstein ». Dans Milne (1933), il montra qu'indépendamment de la relativité générale, ce principe, allié à la physique locale standard, expliquait un fait central de la cosmologie : la relation entre la vitesse de récession d'une galaxie, v , et sa distance r ,

$$v = cz = H_0 r, \quad (2.1)$$

où H_0 est une constante de proportionnalité. En effet, en utilisant des vecteurs, les vitesses des galaxies prennent la forme $\vec{v} = H_0 \vec{r}$, de sorte qu'un observateur dans une galaxie a voit la galaxie b s'éloigner avec la vitesse

$$\vec{v}_b - \vec{v}_a = H_0 (\vec{r}_b - \vec{r}_a). \quad (2.2)$$

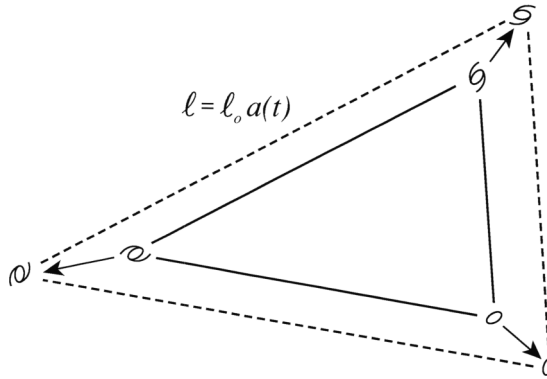


FIGURE 2.1. Expansion homogène et isotrope (Peebles 1980).

Ainsi, on voit que tous les observateurs observent la même récession pour les galaxies éloignées d'eux, en accord avec l'hypothèse d'homogénéité.

Le taux d'expansion, H_0 , s'appelle la constante de Hubble. L'indice 0 indique que H_0 est une mesure du taux actuel d'expansion de l'Univers; dans un modèle cosmologique en évolution, le taux d'expansion est une fonction du temps. L'équation (2.1) est connue sous le nom de relation distance-décalage spectral, où le décalage spectral z est défini par l'équation (2.1) pour les vitesses de récession faibles par rapport à la vitesse de la lumière.

La relation distance-décalage spectral est généralement appelée loi de Hubble. Suite à un vote, les membres de l'Union astronomique internationale souhaiteraient qu'elle soit désormais appelée loi de Hubble-Lemaître, en hommage à la prédiction de Lemaître (voir la section 3.1). D'autres auraient aussi pu être mentionnés pour leur contribution. Les mesures de décalages spectraux de Vesto Melvin Slipher et la relation période-luminosité des céphéides établie par Henrietta Leavitt furent essentielles pour la construction du diagramme distance-décalage spectral de Hubble (1929), et les mesures de décalages spectraux de Milton Humason dans les années 1930 furent cruciales pour mettre clairement en évidence l'effet de la récession des galaxies.

Pour comprendre l'argument de Milne d'une façon différente, on peut considérer trois galaxies aux sommets d'un triangle, comme sur la figure 2.1. Si les galaxies s'éloignent les unes des autres dans un Univers homogène et isotrope, les angles du triangle restent les mêmes et les longueurs des côtés, ℓ_i , augmentent toutes d'un même facteur de proportionnalité, $\ell_i \propto a(t)$. Cela doit être vrai pour chaque triangle. En d'autres termes, $a(t)$ est un facteur universel décrivant l'expansion. Comme $\ell \propto a(t)$, le taux de variation de la distance physique $\ell(t)$ entre deux galaxies quelconques est donné par

$$\frac{d\ell}{dt} = v = \frac{\dot{a}}{a} \ell(t). \quad (2.3)$$

Le point représente une dérivée par rapport au temps. Ainsi, la constante de Hubble dans l'équation (2.1) est donnée par

$$H_0 = \frac{1}{a} \frac{da}{dt}, \quad (2.4)$$

évaluée aujourd'hui, au temps cosmique $t = t_0$.

Tout écart de la vitesse d'une galaxie par rapport à la valeur moyenne donnée par la loi de Hubble locale s'appelle la vitesse propre de cette galaxie. En général, les vitesses propres sont