



HAL
open science

Sur la notion de Structure à grande échelle de l'Univers

Baptiste Jego

► **To cite this version:**

| Baptiste Jego. Sur la notion de Structure à grande échelle de l'Univers. 2024. hal-04819746

HAL Id: hal-04819746

<https://hal.science/hal-04819746v1>

Submitted on 4 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



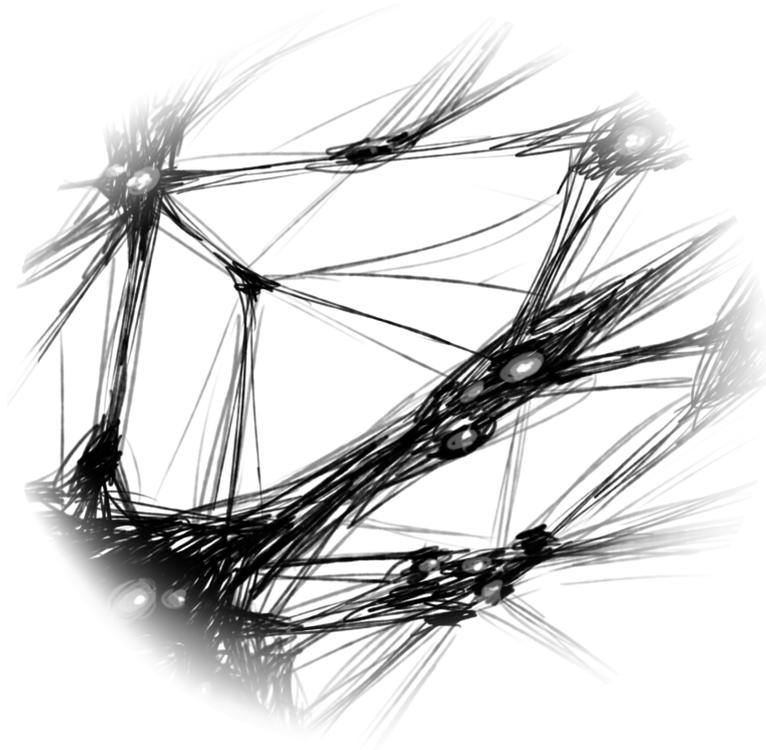
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

*Sur la notion de structure à grande
échelle de l'Univers*

Baptiste Jego

Université de Strasbourg - Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay

Sous la direction de Matthias Dörries



Contact de l'auteur :

baptiste.jego@etu.unistra.fr

Illustration de page de garde :

Toile cosmique, 2024

Allioux Suzanne, CC-BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Abstract - Français

La cosmologie est une science jeune, et les travaux en épistémologie de la cosmologie sont peu nombreux. L'un des quatre piliers de cette science est la structure à grande échelle de l'Univers. L'histoire des découvertes qui y sont liées commence à la fin des années 1960 et s'étend jusqu'à aujourd'hui car ce domaine de recherche est de plus en plus actif. Cette histoire est intrinsèquement liée aux histoires des notions de temps, d'espace, d'espace-temps, et de l'astrophysique en général. Nous présentons un résumé de ces histoires, à partir duquel il est possible de faire une histoire des représentations de la structure à grande échelle de l'Univers. Un rapide résumé des utilisations du terme structure dans différents domaines finit de constituer le contexte à une étude épistémologique. Pour cette étude, nous choisissons une approche sociologique en réalisant dix entretiens avec divers acteurs de la recherche en astrophysique et en cosmologie, et ces entretiens montrent comment la pensée sur la notion de structure à grande échelle et ses représentations est exprimée aujourd'hui, et est représentative de l'histoire qui précède. En particulier, nous étudions le lien entre la structure et ses sous-structures, les images qui sont utilisées pour en parler et les penser, ainsi que le statut de cette structure dans le discours des scientifiques ainsi que dans l'histoire de la cosmologie. Cette étude montre que la structure est comprise comme une entité holistique, et que les discours témoignent de points de vue structuralistes épistémologiques.

Abstract - English

Cosmology is a young science, and there are only a few works on the epistemology of cosmology. One of the four pillars of this science is the large-scale structure of the Universe. The story of related discoveries begins in the late 1960s and continues to the present day, as this field of research becomes increasingly active. This history is intrinsically linked to the histories of the notions of time, space, space-time, and astrophysics in general. We present a summary of these histories, from which it is possible to make a history of representations of the large-scale structure of the Universe. A quick summary of the uses of the term structure in different fields finishes to provide the context for an epistemological study. For this study, we choose a sociological approach by conducting ten interviews with various researchers in astrophysics and cosmology, and these interviews show how thinking about the notion of large-scale structure and its representations is expressed today, and is representative of the history that preceded it. In particular, we study the link between the structure and its substructures, the images that are used to talk and think about them, and the status of this structure in the discourse of scientists as well as in the history of cosmology. This study shows that structure is understood as a holistic entity, and that the discourses reflect epistemological structuralist viewpoints.

Remerciements

J'écris ces remerciements au début de l'été 2024.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de mémoire Matthias Dörries, qui a cru en mon projet dès le début et qui m'a laissé travaillé à mon rythme, en m'apportant des éléments de méthode et d'épistémologie historique que je n'avais pas, et sans lesquels je n'aurais pas pu fournir un travail aussi structuré et organisé. J'avais sûrement envie de parler de trop de choses, et vous avez su m'indiquer comment préciser mon propos sans me frustrer.

Merci également à Catherine Allamel-Raffin et Jonathan Freundlich qui ont accepté de faire partie de mon jury avec M. Dörries à la fois très rapidement et avec beaucoup d'enthousiasme. Ce travail vous intéresse tous les trois pour des raisons différentes, j'espère que vous en êtes satisfaits. La première réunion de discussion autour de mon sujet de mémoire s'est faite avec vous trois, et je suis content de terminer ce travail entouré des même personnes.

Naturellement, je dois aussi beaucoup à toutes les autres personnes qui m'ont relu, corrigé, et proposé des améliorations : mes parents Anne-Françoise et Eric Jego (désolé pour l'accent), ma soeur Emmanuelle Jego, Jonathan Freundlich, Marie Leroy, Simon Landrieux, et Coralie Thomas. Il y a un peu de votre travail et de votre temps dans ce mémoire. Merci aussi à toutes les personnes avec qui j'ai pu discuter de mon sujet ou de parties de mon mémoire et qui, au hasard de quelques phrases que j'ai particulièrement retenues, ont influencé mon écriture et les sujets abordés : Matthieu Béthermin, Katarina Kraljic, Pedro Ferreira, Félix Vivant, Jonas Mézière, Selyo Boutruche et Tessa Blot. J'ajoute une dédicace au SHIELD pour cela, je sais que vous me lirez.

Merci énormément aux chercheurs et chercheuses qui ont participé aux entretiens : Katarina Kraljic, Françoise Combes, David Alonso, John Peacock, Rebecca Smethurst, Aniruddh Herle, Simon White, Roland Lehoucq, Jim Peebles et Benjamin L'Huillier. Peu importe le statut et l'emploi du temps certainement très chargé de chacun, j'ai perçu une grande bienveillance et spontanéité dans l'ensemble des discussions que j'ai eu avec ces personnes. Je dois admettre que pouvoir discuter de philosophie et d'histoire aussi simplement avec un lauréat du prix Nobel qui n'avait jamais entendu parler de moi auparavant me rassure sur la volonté de la communauté scientifique de s'intéresser à des questions d'épistémologie. Merci à tous de m'avoir accordé du temps et de vous être prêtés au jeu, ce fut un plaisir et j'espère que le rendu final de ce travail vous intéresse. Je n'aurais pas pu le faire sans vos interventions.

Je rajoute une couche de remerciements pour Matthieu et Katarina, qui vont maintenant m'accompagner durant ma thèse. En parallèle de ce mémoire, j'ai dû créer un projet de thèse avec vous, candidater aux bourses de financement de l'ENS, et surtout attendre (parfois avec un peu de stress) le résultat. Finalement, nous avons le financement, et je suis plus qu'heureux de pouvoir commencer ce doctorat après avoir terminé ce mémoire. Merci encore à David (que je devrai certainement mettre dans tous les remerciements que j'écrirais dans ma vie) car sans toi et mon stage de recherche sous ta direction à Oxford en 2022, je n'en serai pas là. Et honnêtement, toutes les réalités parallèles me paraissent moins sympa que celle-ci, où tu es responsable de mes débuts en cosmologie.

Comme ce mémoire conclut mes quatre années d'études à l'ENS, je remercie les professeurs qui ont influencé mon parcours de la prépa PTSI/PT du lycée Chevrollier à ce M2 d'épistémologie à Strasbourg, en particulier Simon Moulin, Christine Magee Banchereau, Guillaume Nibaudeau, Jean-Paul Fortin-Ripoche, Jean-Marie Reynaud, Jean-Sébastien Lauret, Jérémy Neveu et Dominique Aubert. Détailler ce que chacun a apporté à mes études serait trop long, alors je me contente d'un merci général.

Finalement, je remercie ma famille qui a suivi l'écriture de ce mémoire, mais aussi mes études jusqu'à ma thèse à venir. Vous avez toujours tout facilité pour moi, que ce soit mes parents en me laissant assez libre de mes choix mais en me conseillant quand même et en s'intéressant à ce que je fais et à ce que je veux faire, mes soeurs en m'ayant toujours montré l'exemple et pour vous être battues les quelques fois où c'était compliqué, ou mes grands parents qui ont toujours été fiers de moi et qui me l'ont toujours dit, ce qui est une belle source de motivation.

Coralie, j'espère que tu n'en as pas marre d'entendre parler de structure à grande échelle de l'Univers tous les jours, parce que ça ne va pas s'arrêter là.

À Dada.

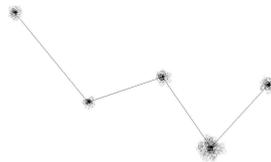


Table des Matières

Abstract - Français.....	3
Abstract - English.....	4
Remerciements.....	5
Introduction.....	8
0.1 Pourquoi une épistémologie de la structure à grande échelle de l'Univers ?.....	10
0.2 Formation personnelle.....	16
0.3 Méthode et littérature.....	18
0.3.1 Méthode d'épistémologie historique.....	18
0.3.2 Littérature et entretiens.....	22
0.4 Plan de travail.....	26
Chapitre 1 : Histoire de la notion de structure à grande échelle de l'Univers.....	28
1.1 L'espace, le temps et l'astrophysique.....	29
1.1.1 L'espace, le temps et l'espace-temps.....	29
1.1.2 L'astrophysique moderne et la naissance de la cosmologie.....	48
1.2 L'Univers et sa structure.....	53
1.2.1 La notion de structure.....	54
1.2.2 Application à l'Univers.....	60
Chapitre 2 : Entretiens de chercheurs et chercheuses.....	80
2.1 Questions et entretiens.....	81
2.2 Analyse.....	87
Chapitre 3 : Éléments de philosophie sur l'Univers.....	90
3.1 Représentations de la structure à grande échelle de l'Univers.....	91
3.2 Ce que regroupe la notion de structure à grande échelle de l'Univers.....	98
3.3 Holisme structuraliste : structuralismes épistémologique et ontique.....	103
3.4 La place de la structure à grande échelle de l'Univers en cosmologie.....	111
Conclusion.....	118
Bibliographie.....	121
Annexes.....	127
I - Retranscription des entretiens.....	127
II - Parties anonymisées.....	127
III - Questionnaire en anglais.....	128

Introduction

« À la fin du XIX^e siècle, l'extension de l'univers, du moins de l'univers matériel, se réduisait à celle de notre galaxie. Ayant répertorié et compté les étoiles, les astronomes ont découvert qu'elles se répartissent dans une vaste concentration qui en rassemble une centaine de milliards : notre galaxie aussi nommée la Voie lactée. Durant le XIX^e siècle, ils se sont employés à en mesurer la forme et les dimensions, à déterminer la position (centrale ou non) qu'y occupe notre système solaire. Les observations étaient difficiles, et d'après discussions se sont déroulées à propos de ces questions. »¹

Dans ce texte issu de son article « Cosmologie scientifique » dans la *Revue de Métaphysique et de Morale* n°3 de 2004, l'astrophysicien Marc Lachièze-Rey décrit une époque à laquelle la structure de l'Univers ne pouvait faire l'objet que de discussions métaphysiques car encore non observée, et à laquelle les astronomes comprennent peu à peu la place du système solaire dans une galaxie encore récemment découverte en tant que telle. Il y est mention d'un « univers matériel » qui est l'objet des observations des astronomes, l'ensemble de ce qu'on voit aussi loin que la technologie utilisée permet de voir. On distingue ici déjà une subtilité dans l'utilisation du terme « matériel ». Il existerait au moins un Univers et un Univers matériel, et certainement donc un Univers immatériel ou plus-que-matériel. Cette pluralité des aspects du mot « Univers » se retrouve d'ailleurs aussi dans les définitions modernes du cosmos. Le cosmos, du grec *kosmos* (bon ordre, ordre de l'Univers, monde²), est, selon les dictionnaires usuels de la langue française, « L'Univers considéré comme un système bien ordonné. »³ par opposition au chaos, ou « L'Univers et ses lois, ou, plus généralement, tout Univers, réel ou issu d'une conception scientifique ou fantastique. »⁴, ainsi que l'espace extraterrestre et - ou - intersidéral. Ces définitions sont données *a posteriori* d'une histoire complexe de découvertes et d'interprétations à la fois visuelles, sémantiques et scientifiques du monde qui nous entoure, et sont encore susceptibles d'évoluer.

¹ Lachièze-Rey, M., *Cosmologie scientifique*, *Revue de Métaphysique et de Morale*, n° 3, 2004, pp. 399-411.

² Dictionnaire de l'Académie Française, I. Cosmos, nom masculin

³ Dictionnaire Le Robert, cosmos, nom masculin

⁴ Dictionnaire Larousse, cosmos, nom masculin

Si, *a priori*, ces notions d'Univers, de cosmos, de monde sont connues et intégrées au vocabulaire commun, il est remarquable que de telles définitions classiques soulèvent immédiatement des questions majeures, à la fois de philosophie et de sciences physiques. Par exemple, la notion d'existence de ce que l'Univers contient suscite des débats physiques et métaphysiques autour de la matière noire et l'énergie noire, dont les observations astronomiques ne donnent que des preuves indirectes. En particulier, à partir des travaux indépendants de l'école américaine représentée par Jim Peebles à Princeton, de l'école russe représentée par Yakov Zel'Dovich à Moscou et de celle émergente à Cambridge avec Martin Rees à la fin des années 1970, la structure à grande échelle de l'Univers est devenue l'un des sujets d'étude principal de l'astrophysique et de la cosmologie moderne (la référence académique à ce sujet étant encore aujourd'hui le manuel de Jim Peebles⁵). Une rapide recherche sur la base de données ADS de la NASA⁶ indique que la suite de termes « *large-scale structure of the Universe* » apparaît dans plus de douze mille articles scientifiques depuis les années 1980. Cette notion de structure, et donc d'organisation, d'agencement des parties constitutives de l'Univers, est entendue à partir de l'échelle des amas (*clusters*) de galaxies, soit au-delà du mégaparsec (Mpc). 1Mpc vaut environ trois millions d'années lumières, *i.e.* une distance que la lumière met environ trois millions d'années à parcourir.

Bien entendu, ce travail n'a pas pour ambition d'étudier de manière exhaustive l'histoire de la cosmologie, ni de répondre définitivement et dans un nombre limité de pages à l'ensemble des questions qui se posent lorsqu'il est mention de structure à grande échelle de l'Univers. Dans cette introduction, et à partir de ces brèves définitions principales, les termes concernés par la structure à grande échelle de l'Univers seront énoncés et définis, notamment la cosmologie, d'abord, et parce que son histoire l'exige, comme métaphysique puis comme science physique. Certaines questions épistémologiques liées à cette structure, que l'on détaillera, feront l'objet de l'étude menée dans ce mémoire, dont l'organisation est détaillée en Section 0.4, faisant suite à une problématisation (Section 0.1), le détail de ma formation personnelle (Section 0.2) ainsi qu'une revue de la littérature sur le sujet et la présentation de la méthode utilisée (Section 0.3).

⁵ Peebles, P. J. E., *The Large-Scale Structure of the Universe*. Princeton University Press, 1980, 423p.

⁶ <https://ui.adsabs.harvard.edu/search/>

0.1 Pourquoi une épistémologie de la structure à grande échelle de l'Univers ?

L'étymologie du mot cosmologie évoque un discours sur le monde. En tant que conception humaine du cosmos, celle-ci existe nécessairement depuis que l'être humain conçoit un monde autour de lui. Toutefois, les premières traces écrites de considérations cosmologiques et astronomiques, notamment des représentations de constellations, remontent à la civilisation mésopotamienne, il y a environ 6000 ans⁷. Par ailleurs, en tant que science des lois physiques régissant l'Univers, sa formation et son évolution, la cosmologie est une branche de l'astrophysique, elle-même jeune et reposant premièrement sur l'observation des astres, *i.e.* l'astronomie. Ainsi, la cosmologie en tant que science physique de l'Univers est encore plus jeune que l'astrophysique. Il est d'ailleurs possible d'estimer son apparition dans les sciences modernes vers la fin des années 1920, avec la découverte du paramètre de Hubble-Lemaître⁸⁹ H par Edwin Hubble à l'observatoire du Mont Wilson, près de Pasadena en Californie et à la suite des travaux du prêtre et astronome belge George Lemaître qui avaient eu une visibilité faible auprès de la communauté scientifique. Ce paramètre caractérise la proportionnalité, observée aujourd'hui, entre la vitesse d'éloignement apparente de galaxies observables et la distance entre ces mêmes galaxies et l'observateur.

Depuis cette théorisation et modélisation de l'expansion apparente de l'Univers observable local, cette science, bien que jeune, a connu des développements importants et spectaculaires durant ses cent années d'existence. En particulier, comme elle apparaît après les développements de la chimie et de la photographie, et dans une tradition de géométrisation algébrique des lois physiques, la spectroscopie et la géométrie de l'espace-temps sont au centre de la cosmologie. Concernant le premier point, la spectroscopie, elle a d'abord permis de déterminer la composition des étoiles et galaxies les plus proches de la Terre par identification des raies d'absorption à la suite de progrès

⁷ Swerdlow, N. M., (dir.), *Ancient Astronomy and Celestial Divination*, Cambridge, 1999, 388p.

⁸ Le paramètre de Hubble-Lemaître fut longtemps seulement attribué à Edwin Hubble. Un vote rend la dénomination utilisée ici officielle en 2018 : « IAU members vote to recommend renaming the Hubble law as the Hubble–Lemaître law », IAU, 29 Octobre 2018.

⁹ Hubble, E., A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1929, 15, pp. 168–173.

technologiques permettant d'observer, enregistrer et analyser la lumière provenant de celles-ci. Puis l'intervalle du spectre électromagnétique observé et étudié s'est élargi, et la construction de radio-télescopes a permis, dans les années 1960, l'observation par Arno Penzias et Robert Wilson¹⁰, travaillant au Bell Labs Holmdel Complex dans le New Jersey et à l'aide d'une antenne cornet (Figure 1), d'un rayonnement présent partout dans

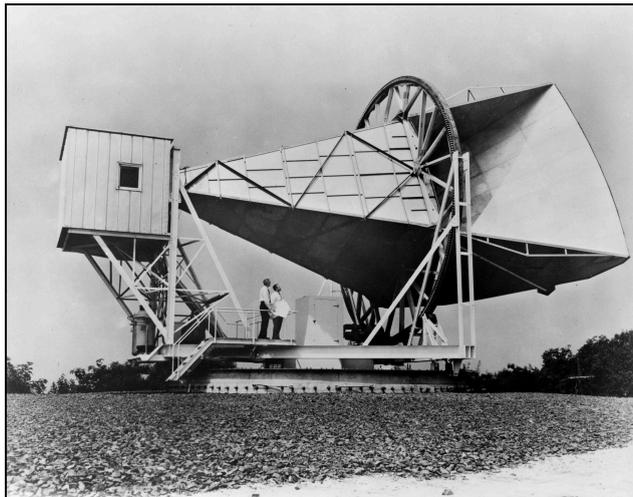


Figure 1 : Penzias et Wilson sous l'antenne cornet qui a permis la découverte du fond diffus cosmologique. Le signal est concentré par le cornet et dirigé vers la cabine à gauche où il est enregistré par des instruments. Image issue du domaine public.

l'Univers et prédit par Ralph Alpher (université Johns-Hopkins, Baltimore), Robert Herman (université du Texas, Austin) et George Gamow (université George Washington, Washington D.C.) d'abord dans les années 1940, puis indépendamment dans les années 1960 par Yakov Zel'Dovich à Moscou et le groupe constitué par Dicke, Peebles, Roll et Wilkinson¹¹, à Princeton dans le New Jersey : le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement micro-onde est aussi appelé rayonnement fossile car il est constitué de photons parmi les premiers à se déplacer librement dans l'Univers, émis au moment où la lumière et la matière se sont découplées. Les très faibles inhomogénéités du rayonnement fossile sont un indicateur de fluctuations dans la distribution de matière dans l'Univers primordial, qui, selon l'interprétation dominante, sont la cause de la distribution inhomogène des galaxies dans l'Univers au cours de son évolution et aujourd'hui. C'est cette distribution de galaxies et plus généralement de la matière à l'échelle de milliards d'années lumières que l'on nomme structure à grande échelle de l'Univers.

Jusque dans les années 1970, il était communément admis, à la fois à cause de l'héritage philosophique laissé par Hubble et faute de preuves du contraire, que la répartition des galaxies était homogène. Les premières observations permettant de

¹⁰ Penzias, A. A., Wilson, R. W., A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, *The Astrophysical Journal*, 1965.

¹¹ Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., Wilkinson, D. T., *Cosmic Black-Body Radiation*. in *The Astrophysical Journal*, 1965

discerner une organisation non homogène et d'estimer les caractéristiques de cette structure sont celles des américains Laird Thompson et Stephen Gregory en 1978¹². Suite à cela, divers travaux sont parus, dont ceux de Margaret Geller et John Huchra, qui travaillaient au Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics de Cambridge, en 1989¹³ : dans leur article « Mapping the Universe », un filament de galaxies de plus de 500 millions d'années-lumières de long et 300 millions d'années-lumières de large nommé « Grand Mur » est représenté. A partir de cette découverte, des relevés astronomiques à des échelles de plus en plus grandes ont été réalisés, permettant d'observer d'autres structures toujours plus lointaines comme le Grand Mur de Sloan, et avec toujours plus de précision. Aujourd'hui, et notamment à partir de « l'approximation de Zel'Dovich »¹⁴ sur la formation des structures, celles-ci sont généralement classées en quatre catégories : les nœuds, les filaments, les murs (ou pancakes), et les vides. Un nœud a une taille typique d'environ un mégaparsec, les filaments et les murs de dix mégaparsecs, et les vides de cent mégaparsecs. A titre de comparaison, notre galaxie fait environ trente kiloparsec de long, soit trente fois moins qu'un mégaparsec. L'ensemble de ces structures forme ce qui est communément appelé la toile cosmique, qui est une composante de la structure à grande échelle de l'Univers. Ce qui est appelé par la communauté des cosmologistes structure à grande échelle de l'Univers englobe aussi les particularités des motifs et des arrangements de galaxies, ainsi que du gaz et de la matière noire.

En ce qui concerne la matière noire, il s'agit d'une matière n'interagissant que par gravitation (l'absence d'interactions électromagnétiques la rendant inapte à l'absorption et l'émission de rayonnement électromagnétique, il serait donc plus adapté de parler de matière invisible plutôt que noire) permettant d'expliquer divers phénomènes aux échelles galactiques et supérieures :

(1) les courbes de rotation des galaxies. Les étoiles et le gaz à l'intérieur des galaxies orbitent autour du centre galactique. Cependant, les observations montrent que la vitesse de rotation des étoiles reste élevée même aux confins des galaxies, là où la matière visible est très rare. La présence de matière noire est invoquée pour expliquer cette distribution de vitesse.

¹² Gregory, S. A., Thompson, L. A., The Coma/A1367 supercluster and its environs, *Astrophysical Journal*, Vol. 222, 1978, pp. 784-799. DOI : 10.1086/156198

¹³ Geller, M. J., Huchra, J. P., Mapping the Universe, *Science*, 1989.

¹⁴ Zel'dovich, Y., An approximate theory for large density perturbations, *A&A*, 5, 84, 1970.

(2) Les collisions d'amas de galaxies. Lorsque deux amas de galaxies entrent en collision, on observe des effets de lentille gravitationnelle, où la lumière provenant des galaxies derrière les amas est déviée. Les observations montrent que la quantité de matière visible dans les amas ne suffit pas à expliquer l'ampleur de la déviation de la lumière, suggérant la présence de matière noire.

(3) Les fluctuations du rayonnement cosmique et leurs liens avec la structure à grande échelle. Elles peuvent être expliquées en supposant que la matière noire a fourni le potentiel gravitationnel nécessaire pour former les structures que nous observons aujourd'hui.

(4) La formation et l'évolution des galaxies. Les simulations numériques de la formation et de l'évolution des galaxies montrent que la matière noire joue un rôle crucial dans l'attraction gravitationnelle nécessaire pour former des galaxies et des amas de galaxies à grande échelle.

(5) Les lentilles gravitationnelles. Les effets de lentille gravitationnelle, où la lumière provenant d'objets distants est déviée par la gravité d'objets massifs situés entre eux et l'observateur, peuvent également être utilisés pour inférer la présence de matière noire et ne s'expliquent pas en prenant seulement en compte la matière classique.

De manière générale, d'après les modèles actuels, c'est la distribution de matière noire qui crée le potentiel gravitationnel nécessaire à la structuration de la matière classique, dite baryonique et principalement composée de protons de neutrons et d'électrons, dans l'Univers sous forme de galaxies. Beaucoup de travaux ont déjà été publiés au sujet de cet élément intrigant, que ce soit en astrophysique, en philosophie des sciences ou en histoire des sciences. Cette matière noire reste insaisissable et beaucoup de travaux se concentrent sur sa nature. Les astrophysiciens, malgré l'absence de preuves directes de l'existence de particules de matière noire, cherchent à découvrir sa nature avec des expériences par exemple au grands accélérateurs de particules comme le Grand collisionneur de Hadrons (LHC) au CERN.

La matière noire fait partie intégrante du modèle dominant en cosmologie, ce que certains appellent le modèle standard de la cosmologie, le modèle Λ CDM. CDM signifie Cold Dark Matter, et il s'agit du modèle dominant de matière noire qui suppose une matière noire froide, à savoir que celle-ci n'a qu'une vitesse basse, au moins non relativiste (faible comparée à la vitesse de la lumière dans le vide) et donc pas

d'agitation thermique notable. Le lambda signifie que le modèle lambda CDM admet une constante cosmologique ou, de manière assez équivalente, bien que physiquement différente, une énergie noire (ici aussi le terme « noire » est maladroit, celui d'énergie également d'ailleurs) qui serait à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Sous bien des aspects, le modèle Λ CDM peut-être considéré comme le paradigme actuel ou du moins la théorie dominante depuis la fin du XX^e siècle, en astrophysique et en cosmologie. C'est un ensemble d'équations, reposant sur la relativité générale développée par Albert Einstein, et de lois physiques, donc de modèles, qui permet d'expliquer la majorité des phénomènes observés à l'échelle cosmologique et, avec plus de difficultés, galactique. Au sujet de la notion de paradigme, on pourra bien évidemment se référer au travail de Thomas Kuhn et à son ouvrage *La Structure des révolutions scientifiques*¹⁵, cependant l'étude d'un paradigme n'est pas le sujet précis de ce mémoire. Ce modèle Λ CDM (dont on fera mention seulement en notant « Λ CDM » et en omettant le terme « modèle » dans la suite de ce travail, *i.e.* on dira « dans Λ CDM » pour « dans le modèle Λ CDM ») est le modèle dominant aujourd'hui, et ceci s'explique par sa capacité à reproduire fidèlement, à travers des simulations, la structure à grande échelle de l'Univers ainsi que ses propriétés statistiques, et d'expliquer la majorité des phénomènes observés avec un nombre très limité de paramètres qui ont un sens physique et qui sont par ailleurs physiquement motivés. Ce modèle est incomplet et contient des éléments qui restent encore aujourd'hui des sujets d'études actifs. C'est le cas notamment les deux composantes principales de Λ CDM à savoir Λ et CDM. L'énergie noire est encore aujourd'hui tout à fait indétectable et, si elle est une énergie du vide, ce à quoi elle est souvent associée, les calculs faisables pour une telle quantité en mécanique quantique donnent une valeur tout à fait différente de ce qu'on attendrait en se fiant aux observations cosmologiques. Par ailleurs la matière noire reste très mystérieuse et l'absence de détection de particules malgré les différentes expériences en cours sur Terre, citons par exemple la collision de particules au LHC¹⁶ ou l'ionisation dans XENON1T¹⁷, pousse la communauté d'astrophysiciens et de physiciens des

¹⁵ Kuhn, T., (1962, éd. augm. 1970), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press ; trad. fr. par Laure Meyer : *La Structure des révolutions scientifiques*, préface de Jean-Pierre Luminet, Paris, Flammarion (Champs), 2018.

¹⁶ Giudice, G. F., *A Zeptospace Odyssey: A Journey into the Physics of the LHC*. Oxford et New York : Oxford University Press, 2010.

¹⁷ XENON Collaboration. Dark matter search results from a one ton-year exposure of xenon1t, *Phys. Rev. Lett.*, 2018. DOI : 10.1103/PhysRevLett.121:111302

particules à chercher des modèles alternatifs de matière noire. D'autres domaines de recherche inclus dans Λ CDM sont très actifs en cosmologie en ce qui concerne la structure à grande échelle de l'Univers. Des questions se posent autour de la constante de Hubble-Lemaître dont la valeur exacte fait débat, ainsi que, par exemple, sur σ_8 qui représente l'amplitude des fluctuations de densité de la matière à l'échelle de 8 Mégaparsecs, et donc est une mesure d'à quel point les régions de l'Univers sont densément ou faiblement peuplées à cette échelle de distance.

On le voit ici, la cosmologie est une science jeune qui soulève diverses questions épistémologiques. De plus, c'est principalement une science d'observation où, pour faire des expériences, il est nécessaire de faire des simulations. En effet les théories de Big Bang, d'inflation, ou plus généralement les objets physiques à grande échelle ne sont pas des théories et des objets étudiables en laboratoire sur Terre. De plus, comme toute science, des idées concurrentes au paradigme principal existent, se développent et parfois prospèrent, et tentent de trouver des explications aux phénomènes que les modèles du paradigme n'expliquent pas, ou expliquent de manière encore incomplète ou *ad hoc* comme par la matière noire ou l'énergie noire. C'est le cas de la principale théorie concurrente à la matière noire, MOND (pour *MOdified Newtonian Dynamics*), qui sans proposer de remplacer complètement le paradigme en modifie certaines lois, ou de théories de gravitation modifiées qui cherchent à rendre compte des effets de grandes quantités de masses sur l'espace temps sans recourir à la relativité générale, ou en la modifiant.

Peu de personnes se sont déjà intéressées à des questions épistémologiques au sujet de la cosmologie en dehors des termes très attractifs que sont la matière noire et les trous noirs par exemple. Un ouvrage récent, *Philosophy of Astrophysics : Stars, Simulations, and the Struggle to Determine What is Out There*¹⁸, compile et complète les travaux majeurs qui ont été réalisés en philosophie de l'astrophysique, et la bibliographie commentée de cet ouvrage révèle que moins d'une centaine d'articles ont été retenus par les auteurs¹⁹. Ainsi, au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers,

¹⁸ Boyd, N. M., De Baerdemaeker, S., Heng, K., Matarese, V. (ed.), *Philosophy of Astrophysics : Stars, Simulations, and the Struggle to Determine What is Out There*, Springer, Synthese Library, vol. 472, 2023, 332 p.

¹⁹ On peut lire en présentation de la bibliographie commentée : « Especially given the relatively small size and recent vintage of this field (there are only 87 entries in this bibliography, 66 of which are from 2010 onwards, and 32 since 2020) the articles in this volume constitute a significant and timely addition ».

un travail d'épistémologie qui regrouperait une histoire des notions majeures ainsi qu'une discussion avec des cosmologistes au sujet de ces notions et un positionnement philosophique de la communauté n'a pas encore été fait. Bien qu'étant limité en nombre de pages, c'est une telle étude que ce mémoire de Master propose. En particulier, on cherchera à analyser ce que font et ce que pensent les cosmologistes lorsqu'ils traitent de la structure à grande échelle de l'Univers. Cette notion ayant émergé à la fin du XX^e siècle avec les premiers grands relevés de galaxies, l'histoire qui nous intéresse est celle de cette notion depuis 1980, bien qu'il soit essentiel d'étudier le terme structure dans d'autres contextes scientifiques et historiques afin de bien en saisir le sens. A partir d'une histoire de la notion de structure à grande échelle de l'Univers, plusieurs questions peuvent être posées. Quelle est la part du visuel lorsqu'il s'agit d'observations de l'Univers à grande échelle ? Et puisqu'il s'agit de visuel, quelles images de la structure à grande échelle de l'Univers existent et ont existées, par quels moyens sont-elles créées, et qu'y voit-on ? Existe-t-il une philosophie de l'Univers en dehors de ses représentations, à la fois chez les cosmologistes et chez un public moins spécialisé ? Ces questions seront à la base de la réflexion présentée ici et porteront l'argumentation analytique sur ce que disent les cosmologistes de leur discipline et de leur objet d'étude. En conservant comme fil rouge les représentations visuelles, sémantiques et mentales de la structure à grande échelle de l'Univers, nous ferons une épistémologie historique de cette notion, et examinerons la philosophie des cosmologistes au sujet de leur objet d'étude.

0.2 Formation personnelle

Avant d'exposer la méthode qui sera utilisée dans la suite de ce mémoire ainsi que la forme que prend celui-ci, il est coutume, en STS²⁰, de faire un point sur sa propre formation et son propre point de vue sur le sujet étudié. S'il serait illusoire de prétendre qu'un tel point de vue peut être purement objectif, il s'agit ici de le rendre neutre autant que faire se peut en clarifiant son origine, et d'informer plus complètement les lecteurs et lectrices de ce texte : savoir qui écrit, c'est pouvoir savoir avec quels biais potentiels on écrit. Ceci est particulièrement important dans mon cas.

²⁰ *Science and technology Studies* (Études des Sciences et Technologies).

J'ai réalisé des études supérieures scientifiques, d'abord dans une classe préparatoire aux grandes écoles qui m'a mené à l'École Normale Supérieure (ENS) Paris Saclay, où j'ai affirmé et développé mon goût pour l'astrophysique au sein du Département d'Enseignement et de Recherche de physique. En parallèle de mes années de Licence 3 et de Master 1, j'ai suivi des cours optionnels de STS proposés par l'ENS, notamment en philosophie et sociologie des sciences. De plus, j'ai réalisé une année de Licence 3 en mathématiques en parallèle du Master 1, ce qui m'a permis d'également obtenir un diplôme en mathématiques fondamentales. Ces études témoignent d'un goût à la fois pour l'abstraction et la réflexivité vis-à-vis des sciences fondamentales que j'étudie. On enseigne, dans les études scientifiques que j'ai suivies à l'ENS, la physique moderne du XX^e siècle composée de mécanique quantique, relativité, astrophysique moderne, ainsi que les domaines de la physique classique ayant passé l'épreuve du temps telles que la physique statistique ou la mécanique lagrangienne. Les aspects historiques de ces sciences sont mentionnés mais n'occupent qu'une place mineure dans la formation des étudiants et étudiantes, et la philosophie ou la sociologie de la physique ne sont à peu près jamais enseignées ou étudiées si l'on ne suit pas de cours optionnels. Cette absence m'a certainement guidé vers des cours traitant explicitement de ces sujets.

Lors de deux stages de recherche, le premier au département de cosmologie de l'Université d'Oxford et le second à l'Institut Max Planck d'astrophysique à Garching bei München, j'ai été confronté à une communauté dont je fais désormais partie, ainsi qu'à une utilisation effective de modèles cosmologiques et de matière noire. J'ai donc accès non seulement à un aperçu concret des activités des cosmologistes au laboratoire, mais aussi à un certain nombre de savoirs tacites qu'il sera nécessaire d'énoncer, ainsi qu'à une connaissance non négligeable du paradigme que représente le modèle Λ CDM et de sa place dans la communauté de chercheurs et chercheuses qui composent la cosmologie. J'ai confirmé vouloir poursuivre dans cette voie en effectuant un Master 2 spécialisé en astrophysique à l'Université de Strasbourg, au sein de l'observatoire astronomique, et en préparant une thèse au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers.

Avant d'entamer cette thèse et profitant de ma dernière année d'études à l'ENS, j'ai eu l'opportunité de m'inscrire en Master 2 en épistémologie et histoire des sciences et techniques à la faculté des sciences historiques de Strasbourg. C'est dans le cadre de

cette formation que le présent mémoire est rédigé. J'avais pour projet, en faisant cela, de m'intéresser à la manière dont la science se fait, s'alimente, et forme un système de connaissances, notamment dans le domaine qui d'origine est le mien : la cosmologie. C'est ce que je réalise dans ces pages. Ce master me permet d'avoir une base de connaissances exploitable en histoire, philosophie et sociologie des sciences, qui complète les premiers éléments que l'on m'avait enseignés les années précédentes. Ceci me permet de compléter l'approche intuitive et concrète que j'ai de la cosmologie grâce à mes études scientifiques et mes expériences en stages de recherche par une approche historique, mais également abstraite grâce à la philosophie, et anthropologique avec la sociologie. Bien que je ne partage pas nécessairement entièrement les propos d'Auguste Comte disant qu' « *on ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire* »²¹ (je pense simplement qu'on ne connaît jamais entièrement une science), je reconnais volontiers qu'une étude épistémologique de la cosmologie est tout à fait pertinente pour tenter d'en avoir une vision complète et d'étoffer notre conception de son objet : l'Univers. C'est donc dans le but de réaliser une telle étude que je sollicite les savoirs acquis dans ce master en complément de ce que je savais déjà de la cosmologie.

A posteriori de l'écriture de ce mémoire, j'admet avoir appris beaucoup, surtout sur les controverses et détails qui jalonnent l'histoire de la structure à grande échelle de l'Univers. Mes préjugés étant que cette histoire était plutôt lisse et que j'en connaissais déjà les acteurs principaux ont dû être oubliés pour laisser la place à un récit qui me paraissait, au départ, moins intuitif, mais qui s'avère finalement plus juste et plus complet.

0.3 Méthode et littérature

0.3.1 Méthode d'épistémologie historique

S'agissant d'un travail épistémologique, ce mémoire vise à présenter des éléments d'histoire, de sociologie ainsi que de philosophie des sciences. Ces différentes

²¹ Comte, A., *Cours de philosophie positive, Tome premier contenant les préliminaires généraux et la philosophie mathématique*, Paris : Rouen Frères, 1830, p.80.

disciplines, si elles sont correctement coordonnées, permettent d'étudier une science et son objet, et d'en proposer une analyse en rendant clair et compréhensible les règles d'un système de production de connaissances. La notion de structure à grande échelle de l'Univers n'est et n'a pas été fixe dans le temps. Au contraire, l'imaginaire des cosmologistes, ainsi que les représentations et le vocabulaire utilisés pour décrire cette structure ont évolué depuis les premières observations d'une organisation et les premiers modèles théoriques visant à l'expliquer, et ils ne sont d'ailleurs pas les mêmes chez tous les cosmologistes encore aujourd'hui. Dans ce contexte, l'approche historique, ou d'épistémologie historique semble appropriée et propose de montrer comment on arrive à une théorie dominante discutée de manières diverses.

L'épistémologie historique est une branche de la philosophie et de l'histoire des sciences qui examine le développement des connaissances et la manière dont elles ont été construites, validées et justifiées au fil du temps. Essentiellement, elle étudie les contextes historiques, les influences culturelles et les cadres conceptuels qui ont façonné la production de connaissances à différentes périodes et civilisations à travers l'évolution des systèmes de connaissances, la manière dont différentes cultures et sociétés ont abordé les questions de connaissance et comment diverses formes d'enquête ont façonné notre compréhension du monde. Il n'en existe pas une version unique, et pour notre étude nous nous pencherons vers les travaux de Ian Hacking et plus précisément les publications *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*²² pour les éléments fondamentaux de sa philosophie et pour la question de la représentation visuelle, sémantique et mentale de la structure à grande échelle de l'Univers, ainsi que *The Emergence of Probability*²³ pour avoir un exemple d'apparition et d'évolution d'une notion complexe en sciences fondamentales. L'approche de Hacking est une référence en épistémologie. Il met l'accent sur l'évolution historique des concepts et sur le rôle central des pratiques expérimentales. Cette approche nous invite à comprendre la science non pas comme une quête intemporelle de vérité, mais comme un processus dynamique et contextuel de construction de connaissances. C'est ainsi que nous chercherons à procéder pour développer les histoires des notions physiques majeures que nous discuterons.

²² Hacking, I., *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press, 1983, 304 p. ISBN : 978-0521282468

²³ Hacking, I., *The Emergence of Probability*, Cambridge University Press, 2^e éd., 2006, 246 p. ISBN : 978-0521685573

Afin de réaliser cette étude d'épistémologie historique, il faudra d'abord établir une histoire des techniques, des idées, des institutions, des lieux, et des scientifiques, mais aussi une histoire des tentatives fructueuses ou non d'établir ou expliquer un fait scientifique. *A priori*, c'est une tâche très complexe que de proposer l'ensemble de ces éléments, peu importe l'objet scientifique dont on fait l'histoire, justement car l'histoire de chaque objet est elle-même complexe et contient une grande diversité d'acteurs, humains ou non. Concernant la structure à grande échelle de l'Univers, cette histoire est relativement courte. Cependant, elle s'inscrit dans l'histoire de la cosmologie, de l'Univers et de l'espace-temps en tant qu'objets de science, et il n'est bien évidemment pas possible de rendre compte de l'ensemble des éléments qui ont influencé son état actuel en un seul travail. Nous nous concentrerons ici sur les points essentiels de l'histoire de la pensée humaine au sujet de l'Univers et de l'espace-temps, qui impliquent de remonter à certains penseurs de l'Antiquité et de mentionner les penseurs et savants principaux de cette histoire jusqu'à aujourd'hui, puis l'histoire de la cosmologie moderne et des idées qui ont fait ce que l'on pense aujourd'hui de la structure à grande échelle de l'Univers. Une manière de se renseigner sur l'histoire d'une notion scientifique est de discuter avec des chercheurs et chercheuses directement impliqués dans la recherche ou la communication autour de cet objet. Organiser des entretiens avec des membres de la communauté scientifique pour les questionner sur ce qu'ils font et pensent, et analyser ce qu'ils disent, relève de l'anthropologie de laboratoire. Cette approche a été popularisée principalement par Bruno Latour et Steve Woolgar dans *La vie de laboratoire: la production des faits scientifiques*²⁴, et est complétée par une connaissance du terrain de travail des scientifiques par une observation de ceux-ci et celles-ci au laboratoire. Les habitudes et préjugés de l'observateur doivent être mis à l'écart pour éviter les biais personnels autant que possible. Ceci relève d'un effort mental difficile à faire en totalité, surtout lorsqu'on possède d'ors et déjà une connaissance et une habitude des observatoires et des bureaux des cosmologistes, mais qu'il est important de garder à l'esprit pendant les entretiens. Ceci nécessite des enregistrements, des prises de notes, et une analyse des transcriptions en texte des enregistrements. Il est important, lorsqu'on souhaite étudier ce que dit un cosmologiste, de fournir une transcription la plus fidèle possible de ce qui a été dit

²⁴ Latour, B., Woolgar, S., *La vie de laboratoire: la production des faits scientifiques*, Paris : La Découverte, 2013.

durant l'entretien. Ceci n'est d'ailleurs pas seulement une question de bonne pratique sociologique, mais aussi d'éthique et de respect des personnes ayant accepté un entretien. La prise de notes est sujette à des erreurs, des incompréhensions, des biais personnels forts, des omissions et des transformations qui les rendent peu fiables bien qu'elles restent utiles afin d'organiser des pensées et de marquer des points importants. Dix entretiens ont été réalisés entre février et mars 2024. Nous analyserons comment les représentations de la structure à grande échelle de l'Univers interviennent dans ces discussions, quels termes dominent et nous comparerons ces termes avec ceux qui ont été utilisés par le passé.

Finalement, à partir d'une étude historique et d'un ensemble de relevés sociologiques et anthropologiques, la philosophie de Ian Hacking propose à la fois un cadre préexistant dans lequel il est possible de positionner et d'étudier les manières de penser et de faire des scientifiques au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers, et parfois de la cosmologie en général. De ses différents aspects, on retiendra ici de la philosophie des sciences qu'elle offre une méthode critique de raisonnement principalement sur la sémantique, les méthodes et les implications de la cosmologie. On s'appuiera également sur ce qu'elle apporte aux réflexions métaphysiques, essentielles lorsqu'on étudie l'Univers en entier ou à grande échelle, notamment car elle permet de déterminer ce qui concerne la cosmologie et ce qui est hors de portée de raisonnements purement scientifiques. Finalement, afin de développer des éléments de philosophie des sciences de la structure à grande échelle de l'Univers, il conviendra de se tenir à l'écart des discours religieux à ce sujet, ou tout du moins de clairement énoncer ce qui est désignable comme scientifique, ce qui, nous le verrons, est particulièrement subtil aux premiers abords en cosmologie, mais qui est tout à fait clair lorsqu'on s'adresse à des cosmologistes.

Il est important de retenir, concernant la philosophie, la sociologie ou l'histoire des sciences, qu'il n'est jamais possible de dresser un panorama détaillé et absolument complet de l'ensemble des éléments nécessaires à l'épistémologie de la structure à grande échelle de l'Univers. Cependant, un effort est fait dans ce travail afin d'en traiter les points les plus importants et pour se permettre de rentrer dans le détail des points étudiés.

0.3.2 Littérature et entretiens

La littérature concernant la structure à grande échelle de l'Univers est principalement constituée d'articles scientifiques, majoritairement disponibles gratuitement, en version non finale, et avant publication dans un journal à comité de lecture sur le site internet et archive en ligne arXiv²⁵. Ceux-ci sont incompréhensibles, que ce soit en termes mathématiques ou de jargon physique, pour quiconque souhaite les lire sans être bien renseigné ou même sans avoir suivi des cours de cosmologie et avoir passé un temps en travail de recherche. En cosmologie, il est courant que des experts d'un domaine particulier, par exemple le lentillage gravitationnel fort, ne soient pas parfaitement à l'aise pour lire un article portant sur une autre spécialisation, comme par exemple une simulation de l'époque cosmique de la réionisation. La même difficulté se présente au lecteur ou à la lectrice d'un manuel académique de cosmologie, aussi bien écrit soit-il. Certains articles scientifiques importants ou pertinents afin de discuter l'histoire ou la philosophie de la cosmologie seront cités dans ce travail, mais il n'est évidemment pas nécessaire d'être en capacité de les lire pour comprendre le développement de ce mémoire. C'est d'ailleurs aussi la règle utilisée lorsqu'il s'agit d'équations ou d'explications physiques : il serait dommage et peu sensé de s'en passer alors qu'elles sont centrales aux modèles, mais un effort est fait de les proposer et de les intégrer au développement sans qu'une compréhension profonde des termes et symboles utilisés soit nécessaire pour suivre le dit développement. Ce travail, bien qu'il soit principalement destiné à un public universitaire, se veut lisible par toute personne qui le souhaite, sans pré-requis de sciences physiques et de philosophie. Historiquement, des articles de cosmologistes, astrophysiciens et astrophysiciennes, et astronomes ou des grandes collaborations comme Planck sont fondateurs de ce qu'a été et de ce qu'est l'imaginaire autour de la structure à grande échelle de l'Univers. C'est sur certains de ces articles que l'histoire de cette notion, de ses représentations et descriptions sera fondée. Dans le milieu académique, on utilisera également le très informatif et complet cours de Françoise Combes au Collège de France en 2018 - 2019 nommé *Amas de galaxies et grandes structures de l'Univers* et disponible en ligne²⁶, comme l'ensemble

²⁵ Pour les articles récents de cosmologie sur arXiv : <https://arxiv.org/list/astro-ph.CO/recent>

²⁶ Combes, F., *Amas de galaxies et grandes structures de l'Univers*, Cours du Collège de France, 2018 - 2019. <https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/amas-de-galaxies-et-grandes-structures-de-univers>

des cours et séminaires du Collège de France. On trouve aussi sur *arXiv* des essais intéressants produits par Jim Peebles²⁷ et Simon White²⁸, qui pourront servir notre argumentation sur la philosophie propre aux cosmologistes.

Par ailleurs, bien que certains objets de l'astrophysique comme la matière noire, les étoiles, les objets compacts comme les trous noirs, ou bien les exoplanètes soient particulièrement attirants pour le grand public et donc sources de nombreux ouvrages de vulgarisation, il est rare de pouvoir trouver des livres proposant des discussions au sujet de la toile cosmique. Si elles existent, ces discussions font en général l'objet d'un ou quelques chapitres portant sur les théories de Big Bang et d'expansion de l'Univers et se trouvent dans des ouvrages assez généraux, parfois peu sérieux, sur l'Univers, qui traitent aussi bien (ou mal) de questions très diverses comme les théories d'Einstein et la place de la vie sur Terre. On évitera volontairement, et par précaution, les interventions très grand public et parfois discutables de Neil deGrasse Tyson, Étienne Klein ou Lawrence Krauss par exemple. Au contraire, on utilisera comme références de communication auprès du grand public des vulgarisateurs et vulgarisatrices ou médiateurs et médiatrices qui font l'effort de traiter des sujets en détails compréhensibles et en citant leurs sources comme David Louapre et notamment sa vidéo *Les plus GRANDES structures de l'Univers* disponible sur YouTube²⁹, Rebecca Smethurst - Dr. Becky sur YouTube - qui est astrophysicienne³⁰, ou bien la chaîne YouTube History of the Universe³¹. Les vidéos et chaînes YouTube apportent des éléments d'histoire et présentent, avec des visuels artistiques ou provenant de publications scientifiques, des résultats intéressants de la cosmologie au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers. Bien qu'il ne soit pas directement fait mention de ces travaux, ils inspirent la manière dont est ici racontée l'histoire de l'astrophysique et de la cosmologie. Des ouvrages à la frontière entre vulgarisation et la philosophie et la sémantique comme *Les idées noires de la physique* de Vincent Bontems, Roland Lehoucq et Scott Penror's sont également intéressants et proposent des pistes de

²⁷ Peebles, P. J. E., The physicists philosophy of physics, *arXiv*, 2024. DOI : 2401.16506

²⁸ White, S., Reconstructing the Universe in a computer: physical understanding in the digital age, *arXiv*, 2018. DOI : 1806.06348

²⁹ Louapre, D., *Les plus GRANDES structures de l'Univers*, ScienceEtonnante, YouTube, 2023. https://www.youtube.com/watch?v=l_mYUOhIOMg&t=1s&ab_channel=ScienceEtonnante

³⁰ Smethurst, R., *How do cosmic supervoids prove that dark energy exists? | Space is Weird - Boötes Void*, DR. Becky, YouTube, 2019. https://www.youtube.com/watch?v=_ZopKQC4-gY&ab_channel=Dr.Becky

³¹ Farrow, J., Kelly, D., *Why Does The Universe Look Like This?*, History of the Universe, YouTube, 2022. https://www.youtube.com/watch?v=iDqQ9qgTWMg&t=1188s&ab_channel=HistoryoftheUniverse

réflexion, non pas sur le sujet à proprement dit de ce travail mais sur des questions sémantiques liées à des objets de l'astrophysique et de la cosmologie comme les corps noirs, les trous noirs, la matière noire, ou l'énergie noire. Cependant ce genre de travail original reste encore assez rare.

En ce qui concerne les publications de philosophie à proprement dit, et comme on cherche à étudier les liens entre philosophie et cosmologie, le choix est fait ici d'inclure, entre autres, des travaux philosophiques proposés par des personnes formées à la physique. C'est aussi le cas au sujet de l'espace-temps, et sur ce point les travaux d'Albert Einstein comme l'ouvrage *La relativité: théorie de la relativité restreinte et générale, la relativité et le problème de l'espace*³², accompagnés d'une histoire des notions d'espace et de temps, proviennent d'une source assurément fiable. Les articles majeurs sont tirés de l'archive numérique de philosophie des sciences PhilSci³³ qui permet de trier les publications par sujets, ainsi que la très dense Stanford Encyclopedia of Philosophy³⁴. Cependant les articles explicitement pertinents pour notre étude se font (très) rares sur ces plateformes, cela ne pourra donc pas constituer un ensemble de références bibliographiques complet. Il est donc essentiel d'également s'intéresser à des ouvrages de philosophie plus généraux, et seront utilisés ici des écrits de Nelson Goodman, Hilary Putnam, Catherine Elgin, Israel Scheffler, Richard Rorty et David Lewis compilés dans l'ouvrage *Starmaking*³⁵ : il existe en effet, selon Goodman³⁶, différentes versions du monde, et donc ici par extension de la structure à grande échelle de l'Univers à travers les années ainsi qu'aujourd'hui entre différents cosmologistes, et ces mêmes cosmologistes nourrissent des opinions sur la réalité de cette structure. Comme nous le verrons en analysant des entretiens, comme cette structure est composée d'éléments plus ou moins tangibles (le gaz intergalactique n'a pas le même statut que la matière noire par exemple), elle est parfois pensée et décrite comme un artefact de l'esprit humain. Remarquons qu'à ce sujet, il faut faire preuve en général de beaucoup de prudence lorsqu'il s'agit de la cosmologie et d'une épistémologie liée à la science de

³² Einstein, A.,. *La relativité: théorie de la relativité restreinte et générale, la relativité et le problème de l'espace*, Paris : Payot & Rivages, 2016, 224 p. ISBN : 978-2-228-91618-9

³³ <https://philsci-archive.pitt.edu/>

³⁴ <https://plato.stanford.edu/>

³⁵ McCormick, P. J. (ed.), *Starmaking*, Cambridge : The MIT Press, 1996, 240 p. ISBN : 9780262529143

³⁶ Alors que certains auteurs, comme Elgin et Rorty, adoptent une perspective proche de Goodman, d'autres, comme Putnam et Scheffler, apportent des critiques qui soulignent l'importance de maintenir une forme de réalisme modéré.

l'Univers, ce sujet étant source de débats religieux et métaphysiques intenses. En lien avec la philosophie de la physique générale, on empruntera également des réflexions sur la sémantique de Ian Hacking dans *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, et des réflexions sur les modèles, instruments et sens des idées en sciences physiques de Pierre Duhem et, encore une fois, de Ian Hacking comme mentionné précédemment. Ces philosophies sont généralement informatives sur la physique et donc sur ses spécialisations dont fait partie la cosmologie, malgré son statut particulier. Les travaux de Pierre Duhem sont fondateurs en philosophie de la physique, et c'est à son ouvrage *La théorie physique. Son objet, sa structure*³⁷ qu'il sera fait référence lorsque nous analyserons les modèles et théories qui ont participé à créer la notion de structure à grande échelle de l'Univers, et le troisième chapitre de ce même ouvrage au sujet des opinions des physiciens sur les théories physiques sert d'outil pour analyser nos entretiens. Concernant les représentations visuelles, particulièrement pertinentes lorsque la toile cosmique est évoquée, des travaux ont été faits en philosophie et en histoire des techniques. On utilisera les travaux récents de Catherine Allamel-Raffin au sujet de la production d'images spécifiquement en astrophysique, ainsi que le récit socio-politique du développement du télescope spatial Hubble (HST) par Robert Smith *The Space Telescope. A study of NASA, science, technology, and politics*³⁸ pour appuyer le contexte historique dans lequel se situe l'évolution de l'astrophysique moderne. Finalement, comme le sujet de cette étude est une structure, il est naturel de s'intéresser au structuralisme. Ici aussi, les travaux de Duhem sont utiles, et nous ferons mention de figures majeures de cette pensée comme Steven French.

Face à la rareté, hors de la recherche en cosmologie, des sources traitant précisément de la structure à grande échelle de l'Univers, le choix qui semble le plus pertinent est celui de réaliser des entretiens, en accord avec la tradition engendrée par Bruno Latour, afin de recueillir des avis et pensées de cosmologistes. Dix entretiens ont été réalisés, durant environ de trente minutes à une heure, avec des chercheurs et chercheuses en cosmologie, principalement aguerris, soit dans le domaine de la

³⁷ Duhem, P., *La théorie physique. Son objet, sa structure*, Lyon : ENS Éditions, 2014 [paru 1906], 206 p. ISBN : 978-2-84788-834-8 et 2-84788-834-9

³⁸ Smith, R. W., Hanle, P. A., Kargon, R. H., Tatarewicz, J. N., *The Space Telescope. A study of NASA, science, technology, and politics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1993, 496 p. ISBN : 978-0521266345

structure à grande échelle de l'Univers, soit dans la médiation et la vulgarisation, soit les deux. Seul un étudiant en thèse a été sollicité et a accepté de participer. Voici l'ensemble des personnes ayant accepté de participer à un entretien, sans ordre particulier (notons que seule une personne, David Louapre, n'a pas accepté d'entretien, et ce pour de très bonnes raisons de manque de temps. Merci à lui d'avoir tout de même pris du temps pour répondre à la sollicitation avec enthousiasme) : Katarina Kraljic, Françoise Combes, David Alonso, John Peacock, Rebecca Smethurst, Aniruddh Herle, Simon White, Roland Lehoucq, Jim Peebles, Benjamin L'Huillier. Ces entretiens, ainsi que les questions utilisées seront particulièrement détaillés au cours du Chapitre 2. On y présentera également plus en détail les personnes concernées afin de rendre compte de la pertinence de leurs interventions³⁹. Ces entretiens pourront être, à l'avenir, complétés d'interventions enregistrées et disponibles sur le site de l'American Institute of Physics (AIP)⁴⁰ ainsi que sur diverses radios ou plateformes de podcast⁴¹.

0.4 Plan de travail

Ce mémoire est divisé en trois parties, qui vont du plus général au plus particulier. En premier lieu, le Chapitre 1 présente l'histoire de la notion de structure à grande échelle de l'Univers. Cette histoire commence aux environs de 1980, et est intrinsèquement liée à l'histoire de la cosmologie moderne, même si les prémices d'idées cosmologiques précèdent le XX^e siècle seront mentionnées, et à l'histoire des idées d'espace, de temps, d'Univers et de structure en sciences physiques. Le Chapitre 2 concerne les entretiens qui ont été réalisés avec des cosmologistes. On y expose précisément les questions posées durant les entretiens, une présentation des personnes concernées, ainsi qu'une première analyse de leurs activités et pensées à travers leurs propos. Le Chapitre 3 développe une philosophie de la notion de structure à grande échelle de l'Univers, de ses représentations et des idées qui y sont liées, notamment à partir des entretiens du

³⁹ L'ensemble des entretiens est retranscrit en annexe. Ce document annexe est disponible pour le jury du mémoire ainsi que pour les personnes concernées par sa rédaction. Des parties de ce dernier peuvent être disponibles sur demande auprès de l'auteur et après accord avec la personne concernée par l'entretien souhaité.

⁴⁰ <https://ww2.aip.org/>

⁴¹ On trouve beaucoup d'interventions de personnalités comme Jim Peebles, Hubert Reeves ou David Elbaz sur différentes plateformes comme YouTube, des sites universitaires ou RadioFrance.

Chapitre 2 et des publications de Ian Hacking et Pierre Duhem. Finalement, une synthèse du développement effectué au long de ce mémoire est disponible en conclusion. Une bibliographie dans l'ordre alphabétique est disponible en fin de document. Une annexe d'une centaine de pages complète le présent document, et contient les transcriptions à l'écrit des entretiens. Cependant, cette annexe n'est pas publique mais destinée au jury du mémoire. Toute autre personne intéressée par des éléments supplémentaires qui seraient dans cette annexe peut contacter l'auteur du mémoire par e-mail.

Chapitre 1 : Histoire de la notion de structure à grande échelle de l'Univers

En premier lieu, afin de mener à bien une étude sociologique et philosophique des représentations visuelles et mentales de la structure à grande échelle de l'Univers, il est nécessaire d'en établir l'histoire. Comme pour toute notion scientifique, cette histoire est complexe et celle-ci a la particularité d'être encore en cours, contrairement à d'autres objets de physique théorique comme l'éther ou l'hypothétique planète Vulcain dont on peut raisonnablement considérer qu'ils ne sont plus d'actualité. L'histoire de la structure à grande échelle de l'Univers s'inscrit profondément dans l'évolution des notions de temps, d'espace et d'espace-temps, ainsi que de la création et de l'interprétation d'images et de données en cosmologie.

La convergence entre la cosmologie et la philosophie de l'espace-temps remonte aux premières spéculations des penseurs anciens et s'est intensifiée avec les avancées majeures de la physique moderne. Dans l'Antiquité, les conceptions du cosmos étaient enchâssées dans les cadres mythologiques et religieux où le temps, l'espace et l'Univers étaient envisagés de manière anthropocentrique. Cependant, l'avènement de la physique classique et en particulier les travaux de mécanique d'Isaac Newton sur la gravitation universelle ouvra la porte à une tradition de mathématisation des sciences physiques, une formalisation des notions d'espaces et de temps, et un cadre absolu et indépendant de l'espace et du temps servant de base conceptuelle pour la physique dite newtonienne.

Au début du XX^e siècle, la relativité restreinte d'Albert Einstein bouleverse ces vues classiques en proposant un temps et un espace intrinsèquement liés et interdépendants, formant le continuum indivisible appelé espace-temps. S'ensuit la relativité générale qui étend (donc généralise) cette idée en intégrant la gravitation dans la structure même de l'espace-temps et en théorisant une relation directe entre la matière et l'énergie, et la géométrie de l'Univers. C'est cette perspective qui a jeté les bases de la cosmologie moderne et dans laquelle existe la notion de structure à grande échelle de l'Univers. Dans ce Chapitre, nous revenons d'abord et bien plus en détail sur les histoires des notions d'espace, de temps et d'espace-temps, ainsi que sur l'émergence de la cosmologie moderne, puis sur les histoires de l'Univers, à la fois son histoire propre

et les découvertes qui ont mené aux modèles de Big Bang, d'inflation cosmique, d'évolution des galaxies, d'expansion de l'Univers et de matière noire, et l'histoire de la notion d'Univers, puis de sa structure et de ses représentations. Sur ce dernier point, il est crucial de présenter l'histoire des techniques récentes qui ont mené aux observations à grande échelle afin d'expliquer les images créées et interprétées par les cosmologistes. Une analyse philosophique de ces éléments sera proposée au Chapitre 3.

1.1 L'espace, le temps et l'astrophysique

La structure à grande échelle de l'Univers est une structure de l'espace-temps, et ces objets étant des domaines d'étude de la cosmologie et de la physique théorique, nous revenons ici en premier lieu sur les histoires des notions d'abord d'espace, de temps et d'espace-temps, puis sur l'apparition de la cosmologie scientifique.

Ces histoires que l'on souhaite faire ici sont un mélange d'histoire des idées physiques et des idées mathématiques, et aussi parfois d'histoire des techniques métrologiques et instrumentales, bien que cet aspect soit minoritaire dans ce travail. En particulier pour des notions aussi fondamentales que l'espace et le temps, beaucoup de tentatives de définitions physiques plus ou moins fructueuses ont vu le jour avant la relativité générale d'Einstein, qui par ailleurs ne répond pas à l'ensemble des questions qui se posent, notamment à l'échelle de Planck. Si ces notions sont fondamentales, c'est parce que l'humain fait constamment l'expérience subjective du temps et de l'espace, le premier comme expérience psychologique d'un écoulement du passé au futur et le second comme expérience physique, perceptive d'une position du corps par rapport à d'autres objets.

1.1.1 L'espace, le temps et l'espace-temps

L'espace :

La tradition occidentale de géométrisation de l'espace sur laquelle repose la théorie de la relativité générale d'Einstein et le statut de l'espace-temps utilisé aujourd'hui en cosmologie commence concrètement avec Isaac Newton, mais puise ses sources dans

l'Antiquité arabe et, en Occident, les écrits d'Aristote et Platon, sur lesquels nous reviendrons lorsqu'il sera sujet du temps. On reviendra également sur les penseurs de l'Antiquité lorsque nous discuterons de la modélisation du mouvement des astres.

Commençons ici par un état des lieux des idées en occident en 1850, avant la parution des travaux du mathématicien allemand Bernhard Riemann : jusqu'à la moitié du XIX^e siècle, l'espace des physiciens est l'espace absolu d'Isaac Newton tel qu'il le définit dans le célèbre *Philosophiae naturalis principia mathematica*⁴² en 1687. Cet espace est affine, euclidien, et indépendant des objets qu'il contient. Le caractère affine se définit par deux propriétés mathématiques ici d'abord posées puis expliquées :

Définition d'un espace affine :
 Étant donné un espace vectoriel V , un espace affine de direction V est un ensemble non vide E muni d'une application ϕ qui à chaque couple de points (A, B) de E^2 , associe un vecteur de V noté \overrightarrow{AB} vérifiant :

$$1 : \forall (A, B, C) \in E^3, \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC},$$

$$2 : \forall A \in E, \forall \vec{v} \in V, \exists ! B \in E, \overrightarrow{AB} = \vec{v}.$$

Tout d'abord, un vecteur mathématique, noté avec une flèche « \rightarrow », est un segment de droite orienté sur lequel on peut effectuer des opérations, comme la multiplication ou l'addition, et correspond ici assez simplement à des distances dirigées avec un point de départ « A » et un point d'arrivée « B ». Les symboles logiques « \forall » et « \exists » se lisent respectivement « pour tout » et « il existe », le « ! » marque l'unicité, et « \in » se lit « appartient à ». En pratique, un espace affine est donc un espace dans lequel existent des vecteurs qu'on peut additionner et dont le résultat de l'addition ne prend pas en compte les étapes intermédiaires (le résultat est directement le vecteur entre le point de départ et le point d'arrivée), et, étant donné un point de départ, un vecteur admet un seul et unique point d'arrivée tel que le vecteur corresponde au trajet départ - arrivée. Un espace affine permet donc de définir des vecteurs, et un espace affine qui est en plus euclidien admet la mesure de distances et d'angles grâce à l'existence d'un produit scalaire (qu'il est inutile de définir précisément ici), on dit qu'il est muni d'une structure d'espace métrique. Notons qu'un espace euclidien ne l'est que s'il est de dimension finie, ce qui est le cas pour l'espace de la physique classique de Newton, à savoir un espace à trois dimensions. Les notions de repos et de mouvement dans cet espace ont un caractère absolu : un objet physique est au repos si sa position dans l'espace ne change pas au cours du temps, sinon il est en mouvement. Cependant il était déjà clair que seuls

⁴² Newton, I., *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1687, 2^e éd. 1713, 3^e éd. 1726.

des mouvements d'objets physiques par rapport à d'autres ou à des référentiels pouvaient être observés. Un référentiel est un ensemble de points fixes entre eux, par exemple les murs d'une maison, le sol de la planète Terre, ou la cale d'un bateau. En particulier, aucune expérience physique ne permet de distinguer un référentiel fixe, immobile dans l'espace absolu d'un référentiel en translation uniforme, dit inertiel ou galiléen, dans l'espace absolu, c'est ce qui sera appelé le principe de relativité.

En 1863, alors qu'il travaillait à l'université de Graz, le physicien autrichien Ernst Mach conteste cette idée d'espace absolu dans *La mécanique : exposé historique et critique de son développement*⁴³ : selon Mach, l'accélération ou la rotation d'un corps n'a pas de sens par rapport à un espace absolu, mais seulement par rapport à des masses lointaines. Sa conjecture, qu'il a en commun avec Moritz Schlick, connue sous le nom de principe de Mach et qui inspirera Einstein par la suite, dit que l'inertie, *i.e.* la conservation d'une vitesse initiale d'un corps matériel est induite par « l'ensemble des autres masses présentes dans l'Univers », toutefois la raison de cette action des masses de l'Univers n'est pas détaillée par le physicien. En pratique, les mécaniciens classiques choisissent un référentiel approximativement inertiel et étudient les mouvements des objets physiques par rapport à ce référentiel considéré fixe.

L'espace physique est depuis Newton un espace mathématisé, et jusqu'à la découverte des géométries non euclidiennes, peu de distinctions étaient faites entre espace physique et espace mathématique. Plus de deux mille ans se sont écoulés entre les *Éléments* (*Στοιχεῖα*) d'Euclide⁴⁴ pendant l'Antiquité grecque et les conséquences des débats sur le cinquième axiome d'Euclide. Cet axiome stipule que, étant donné une droite D , par un point donné ne peut passer qu'une droite D' étant parallèle à D . Préoccupé par l'intérêt de cet axiome, le mathématicien français Adrien-Marie Legendre publie en 1774 ses *Éléments de géométrie*⁴⁵ dans lesquels il lui substitue l'axiome suivant : la somme des angles d'un triangle est inférieure ou égale à cent quatre-vingt degrés, et si l'égalité est vérifiée, ceci est équivalent au cinquième axiome d'Euclide. Ce sont ici les débuts des espaces non euclidiens, et un espace dans lequel la somme des angles d'un triangle est strictement inférieure à cent quatre-vingt degrés est

⁴³ Mach, E., *La mécanique : exposé historique et critique de son développement*, ouvrage traduit, sur la 4e édition allemande, par Émile Bertrand,; avec une introduction de Émile Picard, 1904, 510 p.

⁴⁴ Heiberg, J. L. (éd.), Menge, H. (éd.), *Euclidis Opera omnia*, Leipzig, Teubner, 1883-1916, huit volumes. Cet ouvrage fait référence pour les traductions des *Éléments* d'Euclide.

⁴⁵ Legendre, A.-M., *Éléments de géométrie*, Paris, Firmin Didot, 1794 (rééd. Blanchet, 1823), 334 p.

en fait hyperbolique (voir Figure 2). Plus tard, vers 1823, les mathématiciens János Bolyai et Nikolaï Ivanovitch Lobatchevski, respectivement hongrois et russe, développent les géométries hyperboliques, ce qui inspirera des travaux de multiples autres scientifiques comme Eugenio Beltrami, Felix Klein et Henri Poincaré jusqu'à la fin du XIX^e siècle, et c'est dans le même mouvement que des études sont réalisées sur la géométrie sphérique (voir Figure 2). A partir de ces découvertes, des avancées dans la rigueur de l'axiomatisation et l'étendue de la géométrie seront notamment réalisées par David Hilbert et Jean-Victor Poncelet.

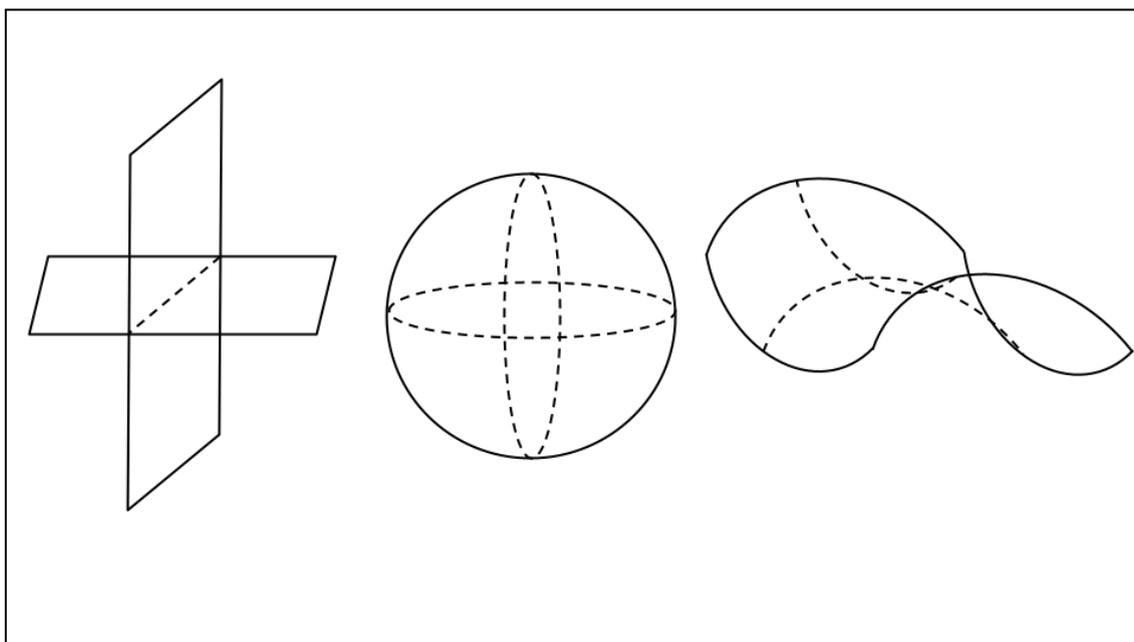


Figure 2 : Représentation schématique des espaces de trois dimensions euclidien (gauche), sphérique (milieu) et hyperbolique (droite, sous la forme d'un parabolôïde hyperbolique). L'espace euclidien est plat, il a une courbure nulle en tout point. L'espace sphérique a une courbure positive en tout point, et l'espace hyperbolique a une courbure négative en tout point.

C'est en 1854 que la conception de la notion d'espace change radicalement, avec la présentation orale de son mémoire « Les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie »⁴⁶ par Bernhard Riemann, publié un an après sa mort, à l'occasion des épreuves d'admission à la faculté philosophique de Göttingue précédée d'une dissertation inaugurale (thèse) en 1851 nommée *Théorie générale des fonctions d'une grandeur variable complexe*⁴⁷. Riemann a laissé derrière lui un héritage mathématique extrêmement dense, qui s'inscrit dans la continuité et l'influence des travaux de Carl

⁴⁶ Riemann, B., Sur les hypothèses qui servent de fondement à la Géométrie. *Annali di Matematica* 3, pp. 309–326, 1869. DOI : 10.1007/BF02422984

⁴⁷ Riemann, B., *Théorie générale des fonctions d'une grandeur variable complexe*, Göttingue, 1851.

Friedrich Gauss, qui fut son maître de thèse, et Augustin Louis Cauchy. Dans son texte de 1851, il introduit ce qui est désormais appelé les surfaces de Riemann dont la sphère et le parabolöide hyperbolique font partie, et il en fait une généralisation abstraite à plus de deux dimensions sous le nom de variétés. Si les mathématiques permettant de définir correctement ces notions sont bien trop complexes pour être exposées dans un mémoire d'épistémologie, remarquons tout de même que la généralisation de la notion de distance dans ces espaces non euclidiens s'avérera un outil indispensable et majeur pour la mise en place de la théorie de la relativité restreinte un demi siècle plus tard, et Riemann se place par ailleurs ainsi en père de la topologie moderne⁴⁸. La plus grande révolution conceptuelle concernant l'espace que propose Riemann dans ses travaux est sûrement que là où ses prédécesseurs fondaient la géométrie sur une liste d'axiomes à admettre, il soutient qu'il faut partir des propriétés infinitésimales de l'espace pour déterminer ses propriétés globales. Les propriétés métriques d'un espace peuvent désormais être déterminées en définissant une structure riemannienne : la distance m entre un point x et un point infiniment voisin $x + dx$ est donnée par la racine carrée de ce qu'on appelle une forme quadratique (polynôme dont tous les termes sont de degré

deux) : $m = \sqrt{ds^2} = \sqrt{\sum_{i,j} g_{ij}(x^1, \dots, x^n) dx^i dx^j}$. Les quantités g_{ij} sont des coefficients

qui dépendent du point x considéré, n est la dimension de la variété considérée et les termes dx^1, \dots, dx^n sont les composantes de dx en n dimensions. En termes

mathématiques, le symbole $\sum_{i,j}$ signifie que l'on fait la somme en répétant les termes

suivants, et en faisant varier les indices i et j . De plus, en chaque point, Riemann introduit des quantités invariantes qui sont aujourd'hui appelées des courbures sectionnelles. Dans le cas où la courbure est constante en chaque point de l'espace, si la courbure est nulle, on retrouve la géométrie euclidienne, si la courbure est négative, on retrouve les géométries hyperboliques de Bolyai et Lobatchevski, et si la courbure est positive, on obtient la géométrie sphérique. Plus généralement, l'approche novatrice de Riemann permet de considérer des espaces plus généraux, non nécessairement

⁴⁸ Ceci n'est pas le seul domaine où Bernhard Riemann a été fondateur, ses travaux en analyse sont également majeurs et une fonction bien célèbre et largement étudiée, ainsi qu'une théorie du calcul intégral, porte son nom.

homogènes et isotropes, ce qui inspirera Einstein pour fonder la relativité générale. Finalement, Riemann propose également des idées physiques nouvelles : à petite échelle, ce sont les propriétés physiques de la matière qui déterminent la géométrie, qui ne peut pas être décrite entièrement par le modèle mathématique qu'il vient d'élaborer. En cinquante ans et avec les efforts d'autres scientifiques comme Bruno Christoffel, Gregorio Ricci-Curbastro ou Tullio Levi-Civita (dont les noms reviennent dans divers éléments mathématiques des théories d'Einstein), la géométrie différentielle s'est développée et avec elle le calcul tensoriel, le calcul différentiel absolu, la notion de transport parallèle et de géodésiques. Tous ces éléments de mathématiques avancées sont les fondements sur lesquels se sont construites les mathématiques de la relativité générale. Cependant, à part dans cette théorie, les implications sur l'espace physique des idées de Riemann sont restées peu connues pendant près d'un siècle.

L'influence directe des travaux de Riemann se retrouve dans ceux du mathématicien et physicien théorique allemand Hermann Weyl, et dans ceux du mathématicien français Élie Cartan, le premier ayant simplifié les développements de Riemann et le second en généralisant les travaux de Weyl, un travail qui sera achevé par un second mathématicien français, Charles Ehresmann, dans les années 1950.

Par ailleurs il y a, depuis les développements de la physique quantique, dans l'espace physique, une échelle de longueur, appelée longueur de Planck et qui vaut environ $l_p = 1.616244 * 10^{-35}$ m. Cette longueur, déterminée à partir de constantes fondamentales de la physique moderne, correspond à l'échelle de longueur en dessous de laquelle il faut prendre en compte la mécanique quantique afin de rendre compte des effets de la gravité. La théorie permettant d'expliquer avec succès des caractères quantiques de la gravité n'existe pas, et il est incertain qu'elle puisse exister, mais ce serait d'une telle théorie dont les physiciens théoriciens auraient besoin pour décrire les phénomènes de cette force fondamentale à très petite échelle.

Finalement, une autre propriété majeure de l'espace physique mathématisé est l'ensemble de ses symétries. Dès l'Antiquité, les symétries de bases de l'espace euclidien, par exemple d'un triangle, faisaient l'objet de théorèmes. C'est dans la plus moderne théorie des groupes, attribuée principalement au français Évariste Galois dans les années 1830, que la théorisation systématique des symétries de l'espace naît. Il est possible d'envisager des transformations de l'espace, sous la forme de rotations,

translations, déformations ou autres, et une symétrie est invariante sous certains types de transformations. Par exemple, une symétrie axiale se caractérise par l'absence de changement de l'espace après une rotation quelconque autour de l'axe en question. Si c'est à la théorie des groupes qu'on attribue ce genre d'étude géométrique, c'est parce que l'objet mathématique étudié n'est pas tant l'espace lui-même, mais plutôt le groupe des transformations envisageables et dont on cherche les invariants une fois un espace choisi. Encore une fois, Felix Klein a joué un rôle majeur dans le développement de ce domaine, ainsi que le mathématicien norvégien Sophus Lie qui a travaillé notamment aux universités de Leipzig et d'Oslo durant la deuxième moitié du XIX^e siècle et dont les travaux datant de 1873-1874 sur des transformations sur les symétries continues de l'espace ont fortement influencé les mathématiques de la physique quantique. Le point culminant de l'influence de la notion mathématique de symétrie en physique est certainement le théorème de Noether, nommé après la mathématicienne allemande Emmy Noether qui l'a énoncé au début du XX^e siècle. Ce théorème s'énonce de la manière suivante : À toute transformation infinitésimale qui laisse invariante l'intégrale d'action correspond une grandeur qui se conserve. Concrètement, ce que cela signifie est qu'étant donné un espace, si cet espace ne change pas après une certaine transformation, alors il existe une quantité physique qui se conserve. Par exemple, dans un espace homogène (qui a les mêmes propriétés partout), à une invariance par translation dans l'espace correspond une conservation de l'impulsion, cette dernière étant le produit de la masse et de la vitesse d'un corps physique. Dans un espace isotrope (qui a les mêmes propriétés dans toutes les directions), une invariance par rotation dans l'espace correspond à une conservation du moment cinétique, qui, à quelques approximations près, quantifie pourquoi une personne qui tourne sur elle-même sur la glace gagne en vitesse de rotation en resserrant les bras.

Le temps :

Nous discutons ici du temps physique, comme dimension constituée d'une succession d'instants (dont la continuité est à discuter). À la manière de la coordonnée d'un point sur une droite, un instant peut se définir par un seul et unique nombre : une date par exemple. Ce temps s'écoule localement régulièrement, contrairement au temps psychologique qui peut sembler plus long lorsqu'on s'ennuie, et qui semble s'arrêter ou

être raccourci lorsqu'on dort et distordu lorsqu'on rêve. D'ailleurs, en sciences physiques, le temps n'est habituellement pas défini, il est posé *a priori* et existe sans besoin d'une entité préexistante. Il peut l'être dans certaines théories modernes de gravitation quantique à boucle, dont l'un des fondateurs est l'italien Carlo Rovelli, qui étudie la contingence du temps physique dans son ouvrage de vulgarisation *Et si le temps n'existait pas* ?⁴⁹. Dans cette théorie, il n'y a d'ailleurs ni temps ni espace de référence, et ces objets sont formés par dessus un substrat physique qui les précède mathématiquement.

Des prémices à la mécanique classique se trouvent dans les travaux d'Aristote et Platon durant l'Antiquité. Ces visions sont plus philosophiques que physiques, mais il est tout de même pertinent d'en exposer les principaux aspects puisqu'elles ont laissé une empreinte forte sur la pensée occidentale jusqu'à l'apparition de la physique classique. Chez Platon, le devenir des choses se distingue de l'ensemble des apparences visibles dans leurs mouvements, et est un objet abstrait du monde des idées. Il distingue donc le mouvement et les évolutions du monde des apparences et le devenir qui se meut dans le monde des idées. Il mythifie les mouvements du ciel en les attribuant aux volontés des dieux qui les ordonnent suivant un ordre cyclique. L'idée d'un temps cyclique, qui boucle, se retrouve d'ailleurs dans d'autres cultures dans l'Antiquité et après, notamment en Asie de l'Est. Aristote développe l'idée de Platon mais propose une conception qui ne lui est pas tout à fait identique : l'ordre auquel les mouvements obéissent n'est pas confiné à un monde d'essences que serait le monde des idées, mais correspond davantage à un moteur pour les apparences, ce sont des causes physiques et non pas uniquement des structures mathématiques abstraites⁵⁰. La théorie générale des causes que propose Aristote implique que le mouvement des astres est lui-même la conséquence d'une cause. Dans ce type de raisonnement, assimilable au trilemme de Münchhausen^{51,52} (ou d'Agrippa), pour échapper à une régression des causes à l'infini, Aristote choisit d'inventer une première cause divine et donc opte pour l'issue de l'arrêt

⁴⁹ Rovelli, C., *Et si le temps n'existait pas ?*, Dunod, 2023, 192p.

⁵⁰ Aristote, *Physique*, , Livre 2, Chapitre 2, § « Physique et mathématique », 193b-194a, pp. 122-123 Paris : Flammarion, 2010. ISBN : 978-2-08-070887-8

⁵¹ Empiricus, S., *Les Esquisses pyrrhoniennes*, I, 15

⁵² Empiricus, S., (traduit du grec ancien par Pellegrin, P.), *Esquisses pyrrhoniennes*, Paris, Seuil, 1997, 570 p. ISBN : 2-02-026298-3)

dogmatique. Ce qu’essaient d’accomplir ici Platon et Aristote, c’est de montrer que le devenir des choses est explicable, et surtout rationalisable.

Par la suite, durant le Moyen Âge, le temps passe de qualité à quantité, notamment avec le développement de l’horlogerie et donc le développement de la pratique de la mesure des durées et de la quantification des instants. Le temps comme paramètre physique naît avec les écrits de Galileo Galilei (ou Galilée) qui étudie en premier lieu, vers 1573 (il avait alors dix-neuf ans) à Pise, l’isochronisme des pendules et ce qui sera nommé plus tard la mécanique galiléenne : la chute des corps. Il en déduit notamment, en choisissant le temps comme paramètre fondamental, que la vitesse d’un corps en chute libre est proportionnelle à la durée de sa chute. Puis Newton formalisera cette idée et utilisera le paramètre t dans ses équations, et il devient alors un degré de liberté, une dimension, permettant de suivre les interactions de la matière dans l’espace. Cette dimension est alors représentée par une ligne, un objet mathématique analogue également à une dimension, et cette ligne est orientée, c’est la flèche du temps qui va du passé vers le futur. De même, les points sur la ligne représentent des instants, et leur proximité entre voisins est infinie. Cette mathématisation n’est pas anodine, elle fait de chaque instant, passé présent ou à venir, une entité abstraite, et le cours du temps se reconstruit à l’aide de condition initiales et d’une équation différentielle sur t (*i.e.* qui exprime des variations dans le temps) connue comme la seconde loi de Newton, ou le principe fondamental de la dynamique :

<p><u>Principe fondamental de la dynamique en translation :</u> Dans un référentiel galiléen, l’accélération du centre de masse d’un corps physique de masse m constante est proportionnelle à la résultante des forces qu’il subit et inversement proportionnelle à sa masse :</p> $\vec{a} = \frac{\sum_i \vec{F}_i}{m}.$
--

ou a est l’accélération, donc la variation dans le temps de la vitesse du corps, ici sous forme vectorielle (donc dirigée et avec un sens) et les forces sont tout ce qui agit sur le corps physique en question et sont notées F_i , également sous forme vectorielle dans l’équation. Par ailleurs, d’une manière analogue aux symétries par transformations dans l’espace, le théorème de Noether s’applique également avec la dimension temps : les équations de la physique, comme le principe fondamental de la dynamique, sont symétriques par rapport à une translation dans le temps (les lois physiques s’expriment de la même manière peu importe l’instant), et cette symétrie-ci implique aussi la

conservation d'une quantité qui est l'énergie impliquée dans l'interaction entre les objets en jeu.

Revenons sur les notions de cause et de circularité du temps : il existe en physique un principe, donc un énoncé non démontré, qui n'a encore jamais été infirmé. Il s'agit du principe de causalité, qui contient en fait deux énoncés : 1) une cause précède toujours ses effets, et 2) un effet ne peut pas rétroagir sur sa cause (ce point en particulier rend difficilement concevable des voyages dans le temps vers le passé de phénomènes déjà existants). Ce principe est une contrainte imposée à toute théorie mathématique pour qu'elle soit réaliste et physiquement admissible, et a été énoncé clairement par le savant et encyclopédiste français Jean Le Rond d'Alembert et le mathématicien suisse Leonhard Euler au XVIII^e siècle. Entre autres, le principe de causalité implique un temps non cyclique : sur un cercle, aucun point n'occupe de position particulière, et aucun instant positionné sur un cercle ou même toute courbe fermée plus généralement ne serait plus positionné avant qu'après tous les autres instants. Les conséquences pourraient donc, dans ce type de structure temporelle, précéder leurs causes. On retrouve ici aussi une notion de flèche du temps, notion introduite pour la première fois par l'astrophysicien britannique Arthur Eddington en 1928⁵³, et qui attribue un sens à la droite représentant la dimension temps et composée d'instant. Cependant, les équations de la physique indiquent qu'il semble qu'aucun phénomène à l'échelle microscopique ne peut se produire que dans un sens, ils sont réversibles. Pour trouver une raison à la flèche du temps, il faut chercher dans la nature des phénomènes irréversibles. En pratique, à l'échelle macroscopique, il paraît habituel que certains phénomènes ne se passent que dans un sens : un verre brisé ne se reforme pas spontanément, et sans action extérieure les échanges de chaleur entre deux corps se font toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. C'est le physicien et philosophe autrichien Ludwig Boltzmann qui a d'abord tenté d'expliquer la flèche du temps à l'aide de la thermodynamique et de la physique statistique qu'il a grandement développé, notamment dans son traité « Sur le rapport entre le second principe de la théorie mécanique de la chaleur et la théorie des probabilités en relation avec les lois de l'équilibre thermique »⁵⁴. L'idée de Boltzmann est relativement simple à expliquer

⁵³ Eddington, A., *The Nature of the Physical World*, Cambridge, Cambridge University Press, 1928, pp. 95-96.

⁵⁴ Boltzmann, L., « Sur le rapport entre le second principe de la théorie mécanique de la chaleur et la théorie des probabilités en relation avec les lois de l'équilibre thermique (Über die Beziehung dem

vulgairement, mais les aspects mathématiques qui y sont associés font intervenir de nombreuses notions physiques et équations intermédiaires : la flèche du temps telle qu'elle est comprise en thermodynamique est donnée par l'évolution d'une quantité physique appelée entropie, caractérisant le degré de désordre d'un système physique, pour la première fois utilisée par le physicien prussien Rudolf Clausius en 1865, et qui fait l'objet du second principe de la thermodynamique aussi appelé principe de Carnot : l'entropie d'un système fermé (sans interaction avec l'extérieur) ne peut qu'augmenter, ou rester constante si le système est à l'équilibre thermodynamique (il ne subit alors aucune évolution à l'échelle macroscopique). La statistique intervient dans la caractérisation de ce qu'est le désordre pour chaque état possible du système : un verre dans lequel on introduit de l'eau chaude et de l'eau froide peut évoluer vers une quantité gigantesque d'états différents, par exemple un verre où l'eau chaude et l'eau froide sont séparées, ou un verre où la température s'est homogénéisée après mélange et échanges thermiques. Ce dernier état est bien plus probable que le premier, et son entropie est plus élevée car il n'y a pas d'organisation particulière des molécules d'eau. Toutefois à l'équilibre thermodynamique, l'entropie atteint un maximum et dans ce cas, le temps perd sa flèche. Se pose la question de l'Univers : s'il est un système fermé, alors le second principe de la thermodynamique devrait pouvoir lui être appliqué, cependant d'autres idées font concurrence à cela, par exemple celle d'un Univers qui évolue vers un maximum de complexité structurelle par les effets de la gravitation, et non pas de désordre. Ces aspects sont difficilement vérifiables et encore très spéculatifs. Il existe une autre possibilité commune d'expliquer une flèche du temps en physique : la propagation d'un rayonnement, qui ne se fait que vers l'extérieur de la source qui l'émet. Ceci est communément représenté par un cône de lumière, nommé ainsi à la suite des travaux du physicien théoricien Hermann Minkowski en 1905, et dont la partie basse représente la lumière qui parvient du passé et la partie haute celle qui s'étend dans l'espace dans le futur, comme dans le cas d'un rayonnement à deux dimensions d'espace (il serait difficile de représenter un rayonnement à trois dimensions qui se propage dans le temps, donc dans quatre dimensions). Un exemple de cône de lumière est donné en Figure 3. Par ailleurs, cette flèche radiative met en évidence que toute source non alimentée est vouée à s'éteindre : le rayonnement se faisant vers l'extérieur

zweiten Hauptstädte der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärme Gleichgewicht) », *Wiener Berichte*, Vol. 76, 1877, p. 373-435.

et s'accompagnant d'une perte d'énergie correspondant à l'énergie des photons libérés, l'énergie d'une source seule ne peut que s'épuiser en se dispersant sous la forme de radiation.

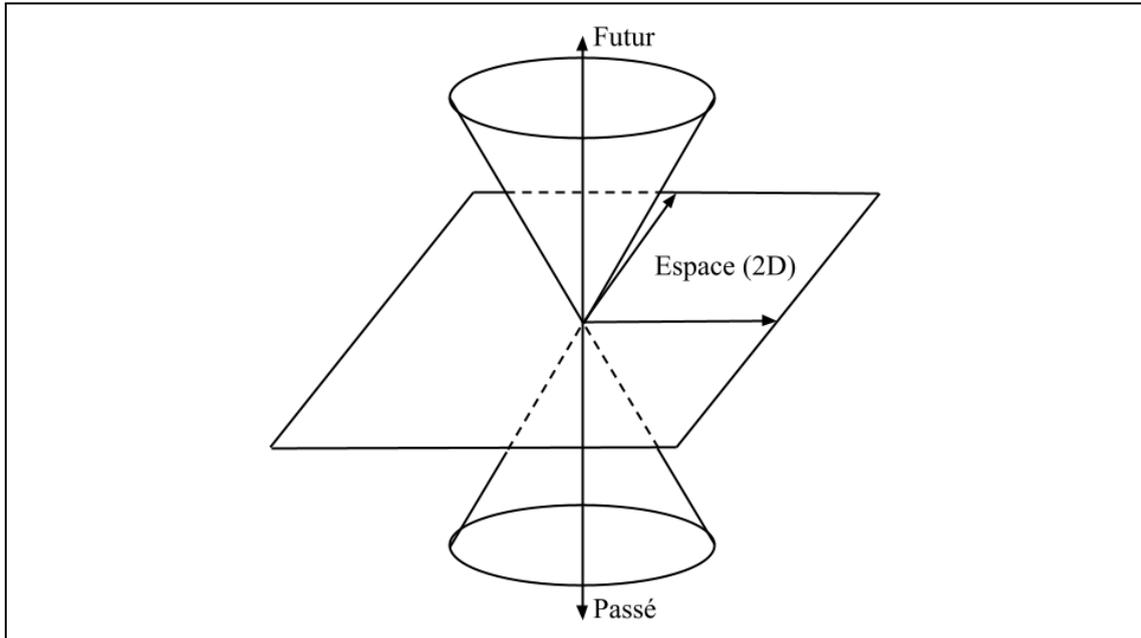


Figure 3 : Représentation schématique d'un cône de lumière, ou cône de Minkowski, pour un rayonnement se propageant sur une surface plane (deux dimensions d'espace). La troisième dimension représentée par une droite verticale est le temps. Pour une source située à l'origine, le rayonnement pointe vers l'extérieur, alors le cercle s'agrandit du présent vers le futur. De manière analogue, on peut représenter l'ensemble des points dont la lumière peut atteindre la source à l'origine et alors le cercle diminue du passé vers le présent.

Remarquons que l'ensemble des processus définissant un sens au temps (le principe de causalité, le second principe de la thermodynamique, la gravitation ou la radiation) ne sont pas compris comme des causes de la flèche du temps mais bien comme des explications : il existe une flèche du temps et l'on peut tenter de la définir et d'en montrer l'existence, mais la raison de cette existence reste à ce jour mystérieuse. Lorsqu'il est possible de fonder cette existence par-dessus un autre objet physique, comme dans la théorie de Carlo Rovelli, la question se pose alors d'expliquer l'existence de cet objet initial, ce qui revient à des considérations métaphysiques relativement équivalentes.

Si les équations de la physique sont invariantes par translation dans le temps, elles ne le sont pas nécessairement par renversement du temps (transformation du paramètre t en $-t$). Cette symétrie, appelée symétrie T, n'est effectivement pas toujours vérifiée par exemple en physique des particules. Le consensus veut plutôt que

la symétrie CPT soit la règle, soit une combinaison de la symétrie T avec les symétries C et P. Le C signifie charge électrique, donc une charge positive devient négative et inversement, et une particule neutre le reste. Le P signifie parité, donc le vecteur d'espace (x, y, z) devient $(-x, -y, -z)$. En 1954, les physiciens allemand et autrichien Gerhart Lüders et Wolfgang Pauli ont établi une démonstration du théorème CPT qui est apparu pour la première fois dans les travaux de Julian Schwinger en 1951 et qui indique qu'une « théorie quantique des champs locale invariante au sens de Lorentz avec un hamiltonien hermitien doit posséder une symétrie CPT »⁵⁵. On ne développera pas précisément chaque point de cette théorie, mais ce qu'elle indique en pratique est qu'une théorie de la physique quantique convaincante doit être constituée de lois respectant la symétrie CPT, donc qui sont invariantes si l'on renverse le temps, la parité et la charge électrique. Le temps joue donc l'un des rôles centraux concernant la validité des lois physiques également au niveau quantique.

Finalement, en complément à la longueur de Planck, il existe un temps de Planck, valant environ $t_p = 5,391 * 10^{-44}$ s. Il s'agit du temps théorique qu'un photon prendrait pour parcourir la longueur de Planck dans le vide. Dans ce contexte, il s'agit donc de la plus petite durée pour laquelle les théories scientifiques actuelles ont un sens, et la question sur la continuité ou la discrétion du temps ne peut pas être physiquement étudiée en deçà d'une durée égale au temps de Planck.

L'espace-temps :

Notons que l'on ne va pas étudier la notion d'espace-temps en physique quantique et dans les théories visant à unifier relativité générale et physique quantique, car ces considérations sont encore trop récentes et très incomplètes. Afin de traiter de l'espace-temps, complétons d'abord l'exposé précédent sur l'espace par un élément majeur de l'histoire de la physique moderne que l'on a volontairement omis jusqu'ici : l'éther. Ce terme a, à travers l'histoire, désigné différentes notions qui dans l'ensemble correspondent à la substance matérielle jouant le rôle de support de la transmission

⁵⁵ Il est bien sûr inenvisageable de développer les termes énoncés dans ce théorème dans un travail d'épistémologie dont ce n'est pas le sujet principal. Cependant on pourra se référer à l'ouvrage de David Griffiths qui sert d'introduction à la physique des particules et qui traite notamment de la symétrie CPT: Griffiths, D., *Introduction to Elementary Particles*, New York/Chichester/Brisbane etc., Wiley & Sons, 1987, 392 p. ISBN : 0-471-60386-4

d'effets entre deux corps, comme la transmission de la force gravitationnelle, du rayonnement électromagnétique, ou la diffusion des gaz par exemple. Cette notion est davantage descriptive qu'explicative, et son histoire est complexe et regroupe de nombreuses idées physiques parfois contradictoires ou détachées les unes des autres. Nous n'en donnons ici qu'une vue panoramique qui permet de situer le contexte du développement de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, et pour un développement plus complet sur cette notion on pourra lire *Einstein 1905: de l'éther aux quanta* de la physicienne et historienne Françoise Balibar qui nous sert de référence ici⁵⁶, ou plus directement le récit et les discussions d'Einstein lui-même dans *La relativité: théorie de la relativité restreinte et générale, la relativité et le problème de l'espace*. Commençons dans l'Antiquité : tel qu'il a été étudié et analysé par son successeur, Aristote (qui n'est pas le seul ni le premier à utiliser cette notion, mais certainement le plus éminent et retenu) indiquait dans son traité *Du ciel*⁵⁷ qu'il existe un cinquième élément en plus de l'eau, de la terre, du feu et de l'air qui correspond à l'éther et qui n'est présent que dans la sphère céleste. Cet éther est l'élément des corps célestes qui possède la nature de se déplacer en décrivant des cercles, et est plus noble plus il est éloigné de la Terre. Selon les auteurs, l'éther peut être composée de plusieurs substances (il y a trois éthers chez les pythagoriciens, qui sont différents des trois éthers de Platon) et se rapprocher d'un ou de plusieurs des quatre éléments du monde d'Aristote. Au Moyen Âge, l'avènement de l'alchimie nourrit des ambitions d'utiliser de l'éther dont parlent les écrits grecs pour, par exemple, transformer le plomb en or : il s'agit alors d'une essence divine (dont le caractère divin se retrouvait déjà chez les grecs à l'antiquité, Ether étant le dieu primordial personnifiant l'air pur, celui que respirent les dieux, le ciel et sa brillance) ou quintessence, et il devient aussi l'objet des ésotéristes et non plus seulement des savants. La révolution scientifique qu'est l'apparition de la physique classique change le statut donné à l'éther, et c'est en fait de deux éthers dont il est maintenant question : l'éther gravitationnel et l'éther luminifère.

⁵⁶ Balibar, F., *Einstein 1905: de l'éther aux quanta*. Paris : PUF, 1992, 125 p. ISBN : 978-2-13-044298-1

⁵⁷ Du ciel, dans *Aristote, Œuvres complètes* (trad. Catherine Dalimier & Pierre Pellegrin), Éditions Flammarion, 2014, 2923 p. ISBN : 978-2081273160

Tout d'abord, l'éther gravitationnel trouve son origine dans les écrits sur sa théorie des tourbillons de René Descartes⁵⁸ : il refuse l'idée d'un vide dans lequel les planètes pourraient se déplacer, et lui préfère un espace composé de globules transparents formant des grands tourbillons qui emportent avec eux et maintiennent en place les planètes. La Terre est cependant immobile par rapport à son propre tourbillon, Descartes peut ainsi suivre les idées coperniciennes (le modèle héliocentrique) sans s'opposer à l'Eglise, cependant il ne s'agit pas d'une théorie prévisionnelle : les tourbillons de Descartes interviennent pour justifier le mouvement des planètes *a posteriori* mais pas de les calculer. La grande majorité des idées de Descartes se sont en fait avérées fausses, mais ont permis de nourrir le débat entre philosophie et physique, et d'inspirer à Newton de nouvelles idées. Celui-ci s'est opposé à la théorie des tourbillons, et était également contre l'idée d'une interaction entre corps physiques à travers le vide, mais face à l'efficacité de sa théorie de la gravitation universelle, il a lui aussi fait appel à un éther qui cette fois permet la transmission de la force gravitationnelle et qui n'est ni prédictif ni explicatif, mais *ad hoc* pour se débarrasser de la notion de vide comme milieu de propagation et d'interaction. Remarquons que cet éther est le support de la force gravitationnelle mais ne la ressent pas, il ne ressent pas d'ailleurs l'influence des lois physiques et n'intervient nulle part dans les calculs⁵⁹. Suite aux publications de Newton, le physicien néerlandais Christiaan Huygens change d'avis et renonce à ses idées cartésiennes. Dans son *Discours de la cause de la pesanteur*, il indique :

« Je n'avais point étendu l'action de la pesanteur à des si grandes distances, comme du Soleil aux planètes, ni de la Terre à la Lune, parce que les tourbillons de Monsieur Descartes qui m'avaient autrefois paru fort vraisemblables, et que j'avais encore dans l'esprit, venaient à la traverse. »⁶⁰

Concernant l'éther luminifère, celui de Descartes joue également le rôle de support pour la propagation de la lumière sous forme de pression, et celui de Newton est

⁵⁸ Il s'agit bien d'une théorie physique, mais qu'on ne retrouve pas dans *Le Monde* mais plutôt dans *Les principes de la philosophie* : Descartes, R., *Les principes de la philosophie*, (Traduction française de l'abbé Picot), 1647 ; texte de l'édition Alquié.

⁵⁹ On trouve une description de l'éther mécanique de Newton dans le *Scholium général* du livre III de *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

⁶⁰ Huygens, C., *Discours de la cause de la pesanteur*, dans *Œuvres complètes*, tome XXI, pp. 451-488, 1691.

également celui qui permet la propagation de la lumière sous forme de corpuscules, et ses oscillations sont responsables des couleurs. Pour Huygens, la lumière s'y propage aussi mais cette fois sous la forme d'une onde, et un bilan est fait après les nombreux et intenses débats et avancements liés à l'électricité, le magnétisme et le problème de la nature de la lumière au XIX^e siècle par le père de l'électromagnétisme James Clerk Maxwell en ces mots :

« On inventa des éthers pour faire nager les planètes, pour constituer des atmosphères électriques et des effluves magnétiques, pour transmettre des sensations d'une partie de notre corps à une autre, et ainsi de suite, jusqu'à ce que tout l'espace ait été rempli trois ou quatre fois d'éthers... Le seul éther qui a survécu est celui inventé par Huygens pour expliquer la propagation de la lumière. »⁶¹

Après le développement de la théorie de l'électromagnétisme par Maxwell et la formulation des équations de Maxwell, les physiciens sont toujours à la recherche de preuves de l'existence d'un éther, et bien que les descriptions données sont variées, celui-ci doit être solide (rigide) et élastique, ce qui rend difficilement concevable sa structure. Cet éther est la plupart du temps en repos absolu, et constitue donc un référentiel préférentiel auquel se référer. Cette histoire prend un tournant majeur en 1887 lorsque les physiciens américains Albert Abraham Michelson et Edward Morley publient les résultats d'une expérience, aujourd'hui connue comme l'expérience de Michelson et Morley, qui vise à montrer le mouvement de la Terre dans l'éther⁶². Il s'agit d'une expérience optique à la précision exceptionnelle, qui leur vaudra le prix Nobel de physique en 1907, et qui reste dans l'histoire comme l'une des expériences à résultat négatif les plus importantes qui aient eu lieu. En effet, les résultats de cette expérience montrent entre autres que l'existence de l'éther et son mouvement doivent au moins être mis en cause, et c'est Mach qui le premier est arrivé à la conclusion de l'inexistence de l'éther. Une autre conclusion impliquée par cette publication est le caractère absolu de la vitesse de la lumière dans le vide déduit par le physicien théorique néerlandais Hendrick Lorentz qui par ailleurs continua de soutenir la thèse de l'éther en cherchant des formes alternatives. Cependant cette hypothèse faisait débat

⁶¹ Maxwell, J., *Ether*, dans *Encyclopedia britannica*, 9^e éd, VIII, 1878, pp. 568-572.

⁶² Michelson, A. A., Morley, E. W., *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, *American Journal of Science*, vol. s3-34, no 203, 1^{er} novembre 1887, pp. 333-345. DOI : 10.2475/ajs.s3-34.203.333.

dans la communauté scientifique au début du XX^e siècle, et comme le préfigurait déjà Poincaré⁶³, elle sera abandonnée à la suite des travaux d'Einstein.

Le premier travail d'Einstein qui nous intéresse ici est la formulation de la théorie de la relativité restreinte, qui se fait dans un contexte d'unité de l'électromagnétisme grâce principalement à Maxwell et qui indique que la vitesse de la lumière ne dépend que des propriétés du milieu, donc entre autres, de constance de la vitesse de la lumière dans le vide peu importe le référentiel, et d'abandon progressif de l'éther. L'idée principale derrière la relativité restreinte est de proposer une théorie permettant de passer de lois physiques exprimées dans un référentiel inertiel aux mêmes lois mais exprimées dans un autre référentiel inertiel tout en conservant la vitesse de la lumière dans le vide constante et indépendante du référentiel de l'observateur. Par ailleurs, des physiciens et mathématiciens comme l'allemand Woldemar Voigt, Poincaré et Lorentz ont, avant 1905, déjà travaillé sur les formules permettant de passer d'un référentiel à l'autre dans le cadre défini par la relativité galiléenne, dont ce qu'on connaît aujourd'hui comme les transformations de Lorentz :

<p><u>Transformations de Lorentz :</u> Soient (t, x, y, z) et (t', x', y', z') les coordonnées d'un événement dans deux référentiels inertiels donc la vitesse relative v est selon l'axe des x, et c la vitesse de la lumière dans le vide. Alors on a les relations suivantes entre les coordonnées :</p> $\begin{cases} t' = \gamma(t - \frac{vx}{c^2}) \\ x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$ <p>avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.</p>

Les rôles respectifs de ces scientifiques dans les travaux attribués à Einstein ont d'ailleurs fait l'objet de vives controverses dans les années 2000. Toujours est-il qu'en 1905, Einstein publie depuis Berne le très fameux article « *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* » (De l'électrodynamique des corps en mouvement)⁶⁴ dans lequel il présente la relativité restreinte. Les postulats regroupés dans cette théorie sont 1) les lois de la physique vérifient le principe de relativité, 2) la vitesse de la lumière dans le vide est constante dans tous les référentiels inertiels et ne dépend ni du mouvement de la source ni de celui de l'observateur, et 3) l'éther est une notion arbitraire qui n'intervient

⁶³ Poincaré, H., *La Science et l'Hypothèse*, Chapitre 12, Flammarion, 1917, pp. 245-259.

⁶⁴ Einstein, A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik*, vol. 17, 1905, pp. 891-921.

DOI : 10.1002/andp.19053221004

pas dans la relativité. Il apparaît avec cette théorie et les équations de Lorentz que l'espace (trois coordonnées) et le temps (une coordonnée) jouent des rôles indissociables et qu'il ne s'agit alors plus d'espace et de temps mais bien d'un continuum espace-temps, qui sera par la suite étudié ainsi et donc en quatre dimensions par Minkowski dans le cas où l'espace est plat, d'où l'appellation d'espace de Minkowski dans ce cas. Une autre conséquence de la relativité restreinte est que l'espace-temps est homogène et isotrope, donc possède les mêmes propriétés vis-à-vis des lois physiques en tout point et dans toutes les directions : c'est le principe cosmologique. Plus spectaculaire encore et résolument moins intuitif : en passant d'un référentiel à un autre, non seulement les longueurs observées peuvent être raccourcies ou dilatées, mais c'est aussi le cas des durées : la durée entre deux événements mesurée dans un référentiel inertiel quelconque sera toujours plus grande que celle mesurée dans le référentiel dans lequel ces deux événements sont à la même position spatiale (on utilise le terme événement dans son sens en relativité restreinte, à savoir point de l'espace-temps), le temps absolu proposé par Newton disparaît donc complètement. Cette propriété vient de la nature du facteur de Lorentz γ qui est toujours supérieur à l'unité.

À la suite de la relativité restreinte, Einstein développe la théorie de la relativité générale qui, comme son nom l'indique, généralise la relativité à la gravitation. Il soumet son article en 1915 à l'Académie royale des Sciences de Prusse⁶⁵ et celui-ci sera re-publié en mars 1916 dans la revue *Annalen der Physik* n°49. Einstein imagina plusieurs expériences de pensée dans le cadre de la relativité restreinte, et détermina qu'en assimilant la masse gravitationnelle (celle qui fait chuter un corps soumis à la gravitation) à la masse inertielle (celle qui fait la proportionnalité entre la force et l'accélération), il faut conclure qu'il y a une équivalence locale entre un mouvement accéléré et un mouvement en chute libre. Cette égalité stricte des deux types de masses reste jusqu'à aujourd'hui vérifiée. De plus, en cherchant à rendre inchangées les lois physiques que sont les lois de la dynamique, de la gravitation et de l'électromagnétisme peu importe le référentiel (donc plus uniquement dans les référentiels inertiels), les mathématiques nécessaires pour exprimer ces lois sont celles du calcul tensoriel. Il remarqua également que la présence de masses et d'énergie dans l'Univers implique des

⁶⁵ Einstein, A., On the General Theory of Relativity, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.*, Berlin, 1915, pp. 778-786.

phénomènes impossibles dans un espace parfaitement plat en tout point : l'espace-temps est donc non euclidien. Il en résulte une théorie où la présence de masse-énergie (terme regroupant à la fois la masse et l'énergie qui partagent le même rôle dans la théorie d'Einstein, ce qu'on peut voir dans l'expression $E = mc^2$ pour une masse m au repos qui équivaut à un facteur c^2 près à une énergie E) courbe localement l'espace-temps et où la notion de distance et l'expression des lois physiques sont à revoir en termes de calcul tensoriel. Sans rentrer dans les détails des mathématiques développées par un ensemble de mathématiciens des XIX^e et XX^e siècles ayant influencé ou directement travaillé avec Einstein dont on peut entre autre citer Hilbert, Minkowski, Levi-Civita, Ricci-Curbastro, Christoffel et Mileva Einstein (alors épouse d'Albert, et dont la participation potentiellement invisibilisée à la théorie attribuée à son mari est source de controverses), on peut tout de même discuter ici de l'équation d'Einstein :

Equation d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Les termes ayant comme indices μ et ν sont des tenseurs, ici des objets mathématiques à quatre dimension et les indices μ et ν varient entre 1 et 4 (pour les trois dimensions d'espace et pour la dimension temps). Cette équation est donc en fait un ensemble de 16 équations différentielles. Le coté gauche représente la courbure de l'espace-temps et le tenseur $g_{\mu\nu}$ est appelé tenseur métrique, et contient les informations nécessaires à la détermination des distances entre évènements dans l'espace-temps. D'ailleurs résoudre l'équation d'Einstein revient à déterminer une métrique et donc à pouvoir connaître la géométrie de l'espace-temps. Le côté droit correspond à la quantité de matière-énergie, et $T_{\mu\nu}$ s'appelle le tenseur énergie-impulsion. On peut faire une remarque sur le terme contenant un Λ : ce paramètre s'appelle la constante cosmologique. Il a d'abord été introduit par Einstein pour des raisons idéologiques (il voulait ainsi s'assurer un univers statique, ni en expansion ni en contraction) et a ensuite été abandonné face aux observations de l'expansion de l'Univers. La constante cosmologique a été réintroduite par Peebles en 1980 pour expliquer l'accélération de cette expansion. Cette théorie de la relativité générale a eu de très nombreuses et spectaculaires vérifications observationnelles comme la prédiction de la précession du périhélie de Mercure, les

effets de lentilles gravitationnelles ainsi que l'existence des trous noirs à la suite de la découverte de la métrique de Schwarzschild⁶⁶ en 1916 par l'astronome allemand Karl Schwarzschild, qui est une solution aux équations d'Einstein dans le cas d'un observateur extérieur à un corps isolé sphérique sans rotation (qui peut en général s'appliquer à des étoiles, planètes ou objets compacts comme les trous noirs ou les étoiles à neutrons). Elle permet notamment, si contrairement à la première intuition d'Einstein on admet un Univers non stationnaire, d'obtenir la métrique FLRW (pour Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, résultat des travaux de l'ensemble de ces théoriciens) qui montre que trois modèles homogènes et isotropes de l'Univers sont possibles : en moyenne plat, à courbure positive (l'Univers est alors fermé, de volume fini), ou à courbure négative (l'Univers est alors ouvert, de volume infini) et l'on peut faire une analogie avec des surfaces à deux dimensions comme présentées en Figure 2. De plus, la théorie de la relativité générale, couplée aux observations astronomiques qui lui succèdent, fait rentrer la cosmologie dans le domaine des sciences à modèles mathématiques, le modèle Λ CDM étant fondé sur la relativité générale.

1.1.2 L'astrophysique moderne et la naissance de la cosmologie

Nous revenons ici sur les étapes principales de la construction de la cosmologie à partir de l'astrophysique moderne à travers les tentatives de décrire des structures et des organisations des astres, des objets astrophysiques plus étendus, et de l'Univers lui-même. C'est une approche assez opportune car, comme nous allons le voir, cette science est d'abord pavée de découvertes d'objets de plus en plus grands et surtout de plus en plus lointains. Cependant, il est peu fait mention dans ce paragraphe de l'évolution des instruments et des techniques industrielles liées à l'astronomie, c'est un choix qui permet de centrer le propos sur les différentes structures célestes et leurs natures afin d'arriver à la notion de structure à grande échelle de l'Univers. Une discussion sera proposée au sujet des instruments d'observation en partie 3.1.2. De plus, nous n'entrons pas en détail dans chaque type d'objet observable dans l'Univers, car leur richesse est très grande et les propriétés physiques peuvent grandement varier au

⁶⁶ Schwarzschild, K., Die erste bekannte exakte Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss*, Berlin, 1916, pp. 189–196.

sein d'un même groupe d'objets (il suffit par exemple de voir la diversité de planètes trouvable simplement dans notre système solaire pour s'en rendre compte).

Tout d'abord, durant l'Antiquité, les Babyloniens, les Égyptiens et les Grecs observaient déjà des astres se déplaçant plus vite que les autres objets célestes, et ont déterminé qu'il s'agissait de planètes, mot dont l'étymologie signifie en grec ancien « astre errant ». En astronomie orientale, la référence a été l'*Amalgeste* de l'alexandrin Claude Ptolémée⁶⁷ d'environ l'an 150 à la publication des travaux de l'astronome Nicolas Copernic au début du XVI^e siècle, et constitue une collection des connaissances les plus avancées en astronomie à la fin de l'Antiquité. Pendant plus d'un millénaire, seules étaient connues d'autres étoiles, les planètes du système solaire, et d'occasionnelles astéroïdes. Il était aussi parfois mention de nébuleuses, dans l'*Amalgeste* par exemple, dont l'étymologie signifie nuage (de nebula) pour désigner des objets à la luminosité diffuse dont les techniques d'observation ne permettaient pas de déterminer la nature avec précision. Ceci changea au début du XX^e siècle grâce aux travaux de Hubble à Pasadena : premièrement, en 1924, il montre qu'il existe d'autres systèmes composés de nombreuses étoiles comme le nôtre, et donc qu'il existe d'autres galaxies que la Voie lactée (encore appelées à l'époque nébuleuses, terme qui porte un tout autre sens en astrophysique aujourd'hui) et notamment la plus proche voisine de la Voie lactée, Andromède⁶⁸ qui est le seul objet visible à l'œil nu dans le ciel se trouvant hors de la Voie Lactée. Plus précisément, Andromède n'a pas été la première à être qualifiée de galaxie, ce titre revint à NGC 6822 en 1925, mais avec le temps Hubble catalogue plusieurs centaines de galaxies, et d'autres sont découvertes à partir de sa méthode par d'autres astronomes. Il développe également une méthode de classement des galaxies en fonction de leurs morphologies : la séquence de Hubble, ultérieurement modifiée et complétée par Gérard de Vaucouleurs, encore utilisée aujourd'hui malgré la difficulté à faire rentrer l'ensemble des galaxies observées dans un nombre limité de cases. Ceci est la marque de la diversité des formes, tailles et couleurs que peuvent prendre les galaxies, et se pose alors déjà la question du rôle et de la raison de ces différentes structures. Par la suite, en plus des travaux de l'abbé Lemaître restés jusqu'ici inconnus, dans son article de 1929 Hubble observe que ces galaxies

⁶⁷ Hamilton, N. T., Swerdlow, N.M., Toomer, G. J., *The Canobic Inscription: Ptolemy's Earliest Work*, dans Berggren J. L., Goldstein, B. R. (éd.), *From Ancient Omens to Statistical Mechanics*, 1987.

⁶⁸ Hubble, E., A spiral nebula as a stellar system, Messier 31, *The Astrophysical Journal*, vol. 69, 1929, pp. 103-158.

s'éloignent de la Voie lactée et que leur vitesse d'éloignement semble proportionnelle à leur distance à la Voie lactée. En résulte la loi de Hubble-Lemaître qui permet d'accéder, à partir d'observation spectroscopiques, de connaître avec une certaine précision la profondeur des objets observés, et l'idée que l'Univers est en expansion : les galaxies n'ont pas forcément une vitesse propre qui les éloigne de nous, mais l'espace-temps lui-même évolue et l'Univers s'étend, emportant dans son expansion les galaxies comme des raisins dans un pain qui gonfle (cette analogie commune reste limitée à un espace en trois dimensions). Dans les années 1960, les astronomes découvrent en observant le ciel dans les longueurs d'ondes radio que certains astres sont à la fois extrêmement lointains et extrêmement lumineux. Ces astres sont appelés des quasars pour *quasi-stellar objects* car ils ont d'abord été associés à des étoiles. En particulier, l'objet 3C 48 fait l'objet de nombreuses publications entre 1960 et 1963⁶⁹, et il faudra attendre les travaux de l'astrophysicien Donald Lynden-Bell en 1969 pour clairement les identifier comme des galaxies contenant en leur centre un trou noir dit supermassif qui est la source des émissions radio⁷⁰. Il a d'ailleurs été le premier à suggérer que la plupart des galaxies possèdent un trou noir supermassif en leur centre. Entre-temps, l'accumulation d'observations de galaxies individuelles a permis de montrer que certaines régions de l'espace sont très denses en galaxies, et d'autres plus vides. Ces régions denses, lorsque les galaxies sont gravitationnellement liées entre elles, forment soit des groupes soit des amas de galaxies. En pratique, un groupe est un rassemblement de l'ordre de la dizaine ou la centaine de galaxies qui sont gravitationnellement liées, alors que les amas sont bien plus grands, contenant potentiellement des milliers de galaxies aussi gravitationnellement liées et pouvant s'étendre sur plusieurs Mégaparsecs. Les amas ont été recensés pour la première fois dans le catalogue de l'astronome américain George Abell en 1958, ce dernier travaillant alors à Los Angeles⁷¹, et ici aussi il existe autant de types d'amas que d'amas, chacun ayant une géométrie et une structure propre certainement influencée par son environnement et son histoire. Lorsque des amas sont eux-mêmes gravitationnellement liés, apparaît alors la notion de superamas, dont le

⁶⁹ Schmidt, M., The Discovery of Quasars, *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 155, No. 2, 2011, pp. 142-146.

⁷⁰ Lynden-Bell, D., Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars, *Nature*, vol. 223, 1969, p. 690. DOI : 10.1038/223690a0

⁷¹ Abell, G. O., The distribution of Rich Clusters of Galaxies, *Astrophysical Journal Supplement*, vol. 3, p.211, 1958. DOI : 10.1086/190036

premier, celui dans lequel notre galaxie évolue, a été étudié dans les années 1950 par Gérard de Vaucouleurs, aboutissant par une publication en 1958⁷², bien que le terme soit longtemps resté vague : les limites de ce superamas ne sont clairement définies que depuis 2014, date à laquelle le groupe constitué de R. Brent Tully, Hélène Courtois, Yehuda Hoffman et Daniel Pomarède publie dans *Nature* la carte des courants cosmiques (les mouvements des galaxies) et permet de dessiner les contours d'une forme globale complexe pour ce superamas désormais nommé Laniakea⁷³. Les observations révèlent que plus on observe de grandes structures, moins leur densité est élevée par rapport à celle moyenne de l'Univers. Les galaxies contiennent, dans quelques kiloparsecs de large, une densité cent millions fois plus grande que celle de l'Univers en moyenne, pour les grands et riches amas, il s'agit de mille fois plus dans quelques Mégaparsecs, et pour un superamas, cette densité est seulement dix fois supérieures à la densité moyenne de l'Univers. Ceci mène à penser qu'il n'existe pas de structure identifiable plus étendue que cela, un super-superamas. Si de telles structures n'ont en effet pas été observées et qu'à des échelles encore plus grandes, l'Univers devient bien homogène et isotrope, les observations spatiales de la fin du XX^e siècle et du début du XXI^e siècle ont tout de même montré l'existence de structures filamenteuses reliant les amas entre eux. La première observation de ce type a été rendue publique dans l'article de Gregory et Thompson en 1973 et suivie par divers travaux dont l'article majeur de Geller et Huchra, « Mapping the Universe » en 1989 dans lequel un filament de galaxies s'étendant sur des centaines de Mégaparsecs, le « Grand Mur » où « Grand Mur Cfa2 » visible en Figure 4, est décrit comme la plus grande *thin sheet-like* structure détectée à la date de publication. Ces structures sont entourées de vastes vides cosmiques,

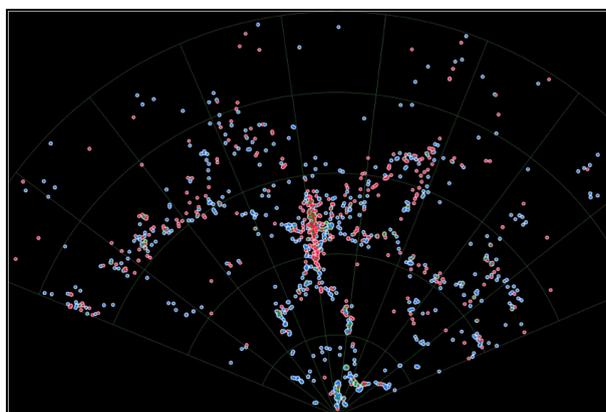


Figure 4 : Vue en projection d'une tranche d'Univers d'après le *Cfa Redshift Survey*. L'observateur terrestre se situe à la base du cône. Les points rouges représentent des galaxies jeunes et les points bleus sont des galaxies anciennes. Le centre correspond à l'amas de Coma, et le Grand Mur le traverse horizontalement. Tiré de Lapparent, Geller et Huchra (1986).

⁷² Vaucouleurs de, G., Further evidence for a local super-cluster of galaxies: rotation and expansion, *The Astronomical Journal*, Vol. 63, no 7, 1958, pp. 253-265. DOI : 10.1086/107742

⁷³ Tully, R., Courtois, H., Hoffman, Y., Pomarède, D., The Laniakea supercluster of galaxies. *Nature* 513, 2014. DOI : 10.1038/nature13674

d'encore plus immenses régions où la densité moyenne est inférieure à la densité moyenne de l'Univers et dont les filaments, les murs et les amas définissent les frontières. Ces observations de régions de plus en plus vastes et de plus en plus profondes sont de plus en plus l'outil observationnel de la cosmologie : à cette échelle, les cosmologistes étudient l'organisation de ces amas, filaments et murs, ce qui constitue donc l'étude de la structure à grande échelle de l'Univers. Actuellement, le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) est l'un des relevés astronomiques les plus importants et les plus exhaustifs jamais réalisés, avec une seizième publication de données à venir en 2024⁷⁴. Ces études se font dans l'espace, la répartition en trois dimensions des galaxies ainsi que du reste de la matière (gaz, matière noire, poussières), et aussi dans le temps : cette structuration doit être le résultat d'interactions physiques, possiblement sur des temps cosmiques. A ce sujet, les cosmologistes se tournent vers des observations révélant le passé de l'Univers, comme celles du fond diffus cosmologique, d'abord mis en évidence par Penzias et Wilson après diverses prédictions par différents physiciens (Alpher, Herman, Gamow, Zel'Dovich, Dicke, Peebles, Roll et Wilkinson) dans les années 1960, puis observée plus en détail successivement par les satellites COBE lancé en 1989, WMAP lancé en 2001 et Planck lancé en 2009, avec des résolutions toujours plus fines. Les cartes des anisotropies du fond diffus

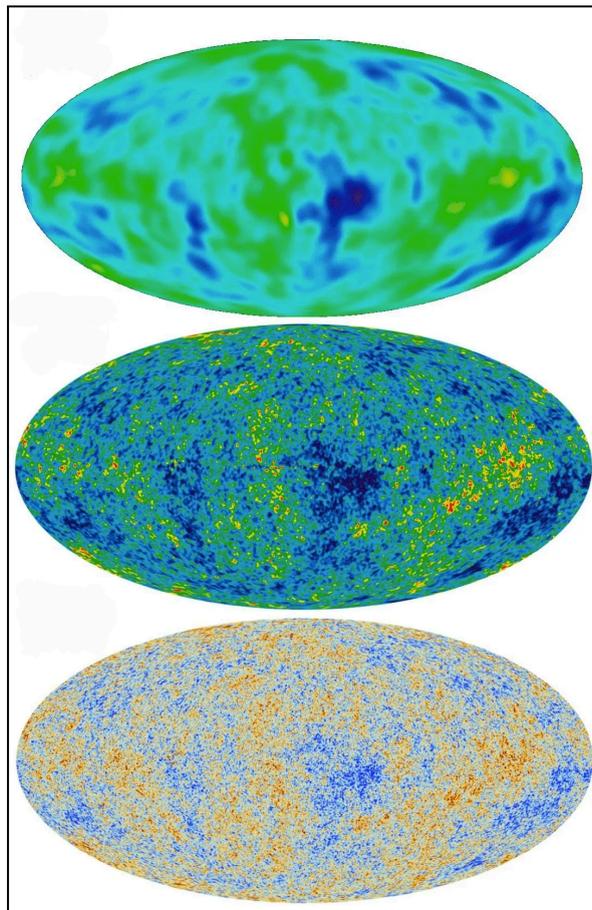


Figure 5 : Cartes des anisotropies du fond diffus cosmologique prises sur le ciel entier par COBE (haut), WMAP (milieu) et Planck (bas). Les cartes initiales ne contiennent pas la partie centrale, cachée par la Voie lactée, et celle-ci est construite statistiquement (par *inpainting*). Les points rouges sont des régions plus énergétiques et les points bleus sont des régions moins énergétiques. En pratique, ces cartes sont données en Kelvins, unités de température, et il y a une différence de 200 μK entre le point le plus froid et le point le plus chaud. Crédit : NASA/WMAP Science team; ESA et la collaboration PLANCK.

⁷⁴ Les informations concernant le SDSS sont disponibles sur le site internet du relevé : <https://www.sdss.org/>

cosmologique observées par ces trois satellites sont données en Figure 5. En pratique, le fond diffus cosmologique correspond aux photons émis à l'époque de l'Univers où la lumière a pu pour la première fois se propager librement, sans être en constante interaction avec la matière, et qui sont encore partout dans l'Univers. La distribution très légèrement inhomogène de la matière à cet instant implique que certaines régions de l'Univers sont légèrement plus chargées en photons que d'autres, et contiennent donc plus d'énergie. Ce sont ces fluctuations d'énergie dans le fond diffus cosmologique que les satellites ont pour mission d'observer, et qui informent les cosmologistes sur le contenu et l'état de l'Univers à cet instant. Notamment, si la distribution spatiale de la matière est connue à cet instant grâce au fond diffus cosmologique et aujourd'hui grâce au positionnement des galaxies, il est alors envisageable de proposer une théorie de la formation et de l'évolution de la structure à grande échelle de l'Univers dans le temps.

1.2 L'Univers et sa structure

Notre étude épistémologique a commencée avec des éléments d'histoire des notions de temps et d'espace en physique, qui amènent à l'apparition de la cosmologie scientifique, construite sur un modèle dominant, Λ CDM, fondé sur la relativité générale d'Einstein et les observations astronomiques aux échelles galactiques et extragalactiques.

Afin d'étudier la structure à grande échelle de l'Univers et ses représentations, nous allons d'abord discuter de la notion de structure en général en sciences physiques. La majorité des théories physiques dans lesquelles ce terme apparaît sont d'ailleurs apparues avant la cosmologie moderne. Nous nous permettrons également d'aborder rapidement d'autres domaines, tels la linguistique ou la biologie, pour donner une idée plus complète de ce que le terme *structure* peut englober. A partir de ces idées, il sera possible de dresser plus précisément les éléments d'une épistémologie historique de la structure à grande échelle de l'Univers.

1.2.1 La notion de structure

Posons ici la question des significations du mot structure en sciences. Quand et pourquoi ce terme est-il utilisé, et quelles illustrations peuvent l'accompagner ? Tout d'abord, il est possible de s'intéresser à cette notion dans le contexte d'autres sciences que l'astrophysique, par exemple en sciences de la matière (aux échelles subatomique, atomique, moléculaire et des solides cristallins) et dans d'autres sciences (sciences de la vie et de la Terre), ainsi qu'en linguistique. Les paragraphes qui suivent servent donc d'exemples, de clarification, et montrent les possibilités d'évolution des représentations de différentes structures à travers le temps.

Structure atomique et moléculaire :

La recherche sur les structures moléculaires a été profondément influencée par des avancées majeures, notamment la spectroscopie, la diffraction des rayons X (au début du XX^e siècle) et la résonance magnétique nucléaire dans les années 1940. Parmi les scientifiques dont les travaux ont le plus influencé le domaine, on trouve le chimiste américain Linus Pauling qui a obtenu le prix Nobel de chimie pour ses travaux sur les liaisons chimiques entre atomes, le biochimiste américain Robert Corey dont les travaux ont principalement porté sur la structure des protéines, et Dorothy Crowfoot Hodgkin, pionnière dans l'utilisation des rayons X pour sonder la structure de la matière. La structure moléculaire, dans sa définition, englobe la disposition spatiale des atomes au sein d'une molécule, incluant à la fois la connectivité interatomique et l'orientation géométrique des liaisons. Un même ensemble d'atomes peut être lié et agencé de différentes manières, notamment par la disposition des électrons dans la molécule, et donc constituer différentes structures moléculaires : on parle alors de formes de résonance ou mésomères. Cette structure est un facteur décisif dictant la réactivité chimique et les caractéristiques physiques d'une molécule. Cette conceptualisation trouve une représentation tangible à travers des représentations tridimensionnelles de molécules, où les liaisons atomiques et l'arrangement spatial des atomes sont délimités. L'utilisation de distinctions de couleur facilite l'identification des atomes individuels et des groupes fonctionnels. Des représentations bidimensionnelles analogues à ces maquettes tridimensionnelles existent et sont très couramment utilisées. Parmi elles, on

retrouve les représentations de Lewis qui permettent de visualiser les enchaînements d'atomes, ou de Cram qui donnent une idée plus avancée de la géométrie des molécules. Ces dernières sont une manière de faire émerger la structure des molécules sur un support bidimensionnel et donc limité.

Structure interne des particules élémentaires :

En physique des particules, l'examen de l'architecture interne des particules élémentaires, telles que les quarks, les leptons et les bosons, sert à comprendre les forces et les interactions fondamentales qui régissent l'Univers à l'échelle microscopique. Des découvertes pionnières, telles que l'identification du neutron par James Chadwick en 1932 et la postulation des quarks par Murray Gell-Mann et George Zweig dans les années 1960, ont contribué de manière significative à dévoiler la constitution interne de la matière. L'avènement des accélérateurs de particules, notamment le LHC, a facilité l'exploration des constituants élémentaires de la matière : par chocs à grande énergie, il est possible de casser les particules et de détecter leurs constituants. De la même manière qu'en physique atomique et moléculaire, l'utilisation du terme structure est fondée sur l'arrangement subatomique des particules. Les diagrammes de Feynman, emblématiques des interactions de particules, aux côtés de représentations schématiques délimitant l'architecture interne de protons, de neutrons et d'autres hadrons, servent de supports visuels couramment utilisés pour représenter et mettre en équations la dynamique des particules et de l'organisation subatomique. On notera cependant que les diagrammes de Feynman sont des représentations d'interactions dans l'espace-temps et non seulement dans l'espace, comme l'on a vu avec les cônes de lumière. Une structure peut donc aussi contenir des notions temporelles, parce qu'elle évolue ou qu'elle émerge dans le temps. Par ailleurs, en physique quantique, essentielle à cette échelle de la matière, les sphères de Bloch sont un moyen de représenter géométriquement, « structurellement » un système quantique à deux niveaux, qui est donc la superposition quantique de deux états.

Structure matérielle, structure cristalline :

Dans le domaine de la mécanique des matériaux, la caractérisation de la structure d'un matériau concerne l'arrangement interne de ses éléments constitutifs, tels que les grains

au sein de substances polycristallines ou les fibres au sein de matériaux composites. Cette organisation a d'ailleurs une influence sur les attributs mécaniques des matériaux, notamment la résistance à l'effort, la dureté et l'élasticité. La trajectoire de la recherche sur la structure des matériaux a été considérablement façonnée par des contributions majeures, notamment les études du savant Robert Hooke sur l'élasticité remontant à 1660 et les travaux de l'ingénieur anglais Alan Arnold Griffith sur les mécanismes de fracture des matériaux en 1920, aux côtés d'avancées décisives en microscopie électronique dans les années 1930. L'emploi du terme structure souligne cette fois la nature hiérarchique de l'arrangement interne d'un matériau : quels éléments sont plus gros que d'autres et quelles sont leurs importances relatives dans les caractéristiques de la matière ? Même pour les matériaux amorphes comme le verre ou les plastiques, l'organisation locale des atomes joue un rôle majeur dans les propriétés de la matière. De même en mécanique des fluides, les écoulements laminaires proviennent d'une organisation structurale des couches de fluides, et les écoulements turbulents sont explicables par la présence de structures tourbillonnaires et de couches de fluides locales. Par ailleurs, par extension de la mécanique, l'architecture contient une notion de structure qui désigne l'ensemble des éléments qui maintiennent et supportent les bâtiments. Concernant les représentations visuelles dans ces domaines, on trouvera principalement des images obtenues avec des microscopes électroniques montrant l'arrangement microscopique des constituants de la matière, ainsi que les diagrammes schématiques illustrant la disposition spatiale des grains ou des fibres, ainsi que des différentes couches de matières, à différentes échelles.

Dans le domaine de la cristallographie, proche à la fois de la physique des matériaux et de la physique atomique, la structure cristalline d'un matériau désigne la disposition systématique et régulière des atomes ou des ions au sein d'un réseau cristallin, exerçant une influence considérable sur ses caractéristiques, dont la conductivité, la transparence, la résilience mécanique, et la forme macroscopique du cristal. L'étude de comment ces caractéristiques varient en fonction de l'organisation structurale -et donc l'étude des transitions de phases- de la matière est un domaine de recherche à part entière, et l'étude de telles structures en physique de la matière condensée et en nanosciences permet par exemple de créer des métamatériaux ou des méta surfaces qui ont des propriétés physiques encore non observées dans la nature. Les

études du physicien allemand Max von Laue sur la diffraction des rayons X à travers les cristaux en 1912 a marqué un jalon crucial dans la quête pour observer les structures cristallines, et lui a valu le prix Nobel en 1914. Par la suite, la formulation de la loi de Bragg en 1913 par les australiens William Henry Bragg et William Lawrence Bragg (respectivement père et fils) a permis d'établir une théorie pratique pour utiliser les observations par rayons X afin de comprendre l'organisation des atomes et ions dans un cristal qui se caractérise par des symétries et une périodicité de schémas atomiques récurrents. De ces observations ressort d'ailleurs le « facteur de structure » qui, formellement, caractérise la transformée de Fourier de la structure atomique d'une maille du cristal et qui est une quantité directement mesurable lors de la diffraction d'un faisceau lumineux par un cristal. Les autres représentations visuelles pertinentes à la cristallographie englobent les diagrammes en treillis cristallins et les représentations unidimensionnelles, bidimensionnelles ou tridimensionnelles des arrangements atomiques, utilisant souvent des distinctions de couleur pour accentuer les configurations atomiques spécifiques.

Structure en sciences de la Terre. Géologie, météorologie et écologie :

Dans le domaine de la géologie, la structure géologique encapsule l'arrangement spatial et la configuration des roches, des failles et des plis au sein de la croûte terrestre, servant de cadre fondamental pour comprendre la genèse des formes terrestres et des phénomènes géologiques. Les connaissances sur cette structure ont été principalement avancées par des observations sur le terrain et l'évolution continue des méthodes géophysiques. Des pionniers dans le domaine, tels que le géologue écossais James Hutton au XVIII^e siècle (période d'apparition de la géologie en tant que science), ont permis la formation de premières théories expliquant l'évolution des couches rocheuses, et des avancées ultérieures dans des disciplines comme la sismologie et la cartographie ont contribué à une compréhension plus approfondie de l'organisation géologique de la Terre. Parmi les supports visuels pertinents à la structure géologique, on trouve des cartes géologiques délimitant la distribution des formations rocheuses à travers les paysages terrestres, ainsi que les diagrammes en coupe représentant les couches stratigraphiques rencontrées au sein de la croûte terrestre. Ces illustrations n'ont cessé d'évoluer avec les avancées de la géologie.

En météorologie, la structure verticale de l'atmosphère délimite la manière dont les attributs atmosphériques, notamment la température, la pression et l'humidité, subissent des altérations en fonction de l'altitude. La compréhension de la structure verticale de l'atmosphère est fondée sur l'analyse des données météorologiques et l'application de techniques avancées de modélisation numérique. Entre autres, le mathématicien britannique Lewis Fry Richardson a imaginé pour la première fois, entre 1916 et 1917, utiliser des modèles physiques prenant en compte cette structure pour prédire les évolutions météorologiques. La structure verticale de l'atmosphère est définie comme la distribution spatiale des propriétés atmosphériques en relation avec l'altitude, exerçant une influence discernable sur la manifestation des phénomènes météorologiques. Les représentations visuelles pertinentes à la structure verticale de l'atmosphère incluent les profils de température verticale, les diagrammes de stabilité atmosphérique et les cartes de pression atmosphérique.

Dans le domaine de l'écologie, la structure de l'écosystème désigne l'arrangement et la dispersion des espèces vivantes ainsi que leurs interactions. Les pionniers de la pensée écologique, notamment Charles Darwin au XIX^e siècle, ont d'abord étudié les relations complexes entre les espèces et leur environnement, la structure des écosystèmes a donc en premier lieu été un réseau d'interactions. Les avancées ultérieures dans la modélisation écologique et l'écologie des populations ont ajouté une mathématisation et des modèles scientifiques pour étudier cette structure. Ce terme contient donc à la fois les propriétés géographiques des entités biotiques et leurs interrelations ainsi que leurs relations avec les entités abiotiques. Les représentations visuelles pertinentes à la structure de l'écosystème incluent des représentations des réseaux trophiques illustrant les interactions entre les espèces, des cartes délimitant les distributions de population et des diagrammes montrant les flux d'énergie au sein des écosystèmes.

Structure cellulaire biologique :

Dans le domaine de la biologie cellulaire, la structure cellulaire concerne l'arrangement des composantes d'une cellule et leurs relations qui définissent les fonctions cellulaires et les interactions au sein de tous les organismes biologiques. Les premières traces de la notion de cellule biologique remontent à Robert Hooke qui publie en 1665 son ouvrage

*Micrographia*⁷⁵ pour rendre compte de ses observations, qui seront ensuite identifiées comme des cellules mortes, vidées de leur contenu. Au début du XIX^e siècle, en observant des plantes, le botaniste allemand Matthias Schleiden affirme l'importance du noyau des cellules dans la croissance des végétaux, et inspire le physiologiste Theodor Schwann qui formule la théorie cellulaire dans son ouvrage fondateur, dont le titre contient d'ailleurs le mot structure : *Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen* (Enquêtes microscopiques sur la correspondance entre la structure et la croissance des animaux et des plantes)⁷⁶. Ensuite, l'avènement des techniques de microscopie avancées, notamment le développement scientifique et industriel du microscope électronique dans les années 1930, a permis aux chercheurs de sonder les cellules biologiques à des niveaux de résolution de plus en plus fins et d'en réaliser des images de plus en plus précises. A partir de ce type d'observations, les représentations visuelles qui accompagnent cette structure cellulaire incluent des micrographies électroniques montrant les organites cellulaires en deux dimensions, ainsi que des modèles tridimensionnels illustrant la configuration architecturale globale d'une cellule.

Structure syntaxique :

Dans le domaine de la linguistique, la structure syntaxique concerne l'arrangement séquentiel et l'organisation des mots et des parties au sein d'une phrase. Les travaux, publiés après sa mort, du linguiste suisse Ferdinand de Saussure au sujet de la linguistique structurale, effectués au cours du XX^e siècle, ont posé les bases fondamentales pour l'examen des structures syntaxiques à travers les langues. Saussure est l'un des pères du structuralisme qui vise à étudier chaque système d'objets comme un ensemble de relations plutôt que d'unités élémentaires. Des chercheurs comme Noam Chomsky ont ensuite considérablement fait progresser ce domaine à partir des années 1950, notamment par le développement de la théorie de la grammaire générative selon laquelle chaque langue forme une structure unique résultant d'un système de construction du langage universel et inné. Bien que les représentations linguistiques soient intrinsèquement abstraites, les aides graphiques telles que les arbres de syntaxe

⁷⁵ Hooke, R., *Micrographia : or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*, Londres, J. Martyn and J. Allestry, 1665, 331 p.

⁷⁶ Schwann, T., *Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen*. Sander, Berlin 1839.

offrent un moyen de représenter la structure hiérarchique des phrases. Les arbres de syntaxe illustrent visuellement les relations syntaxiques entre les mots et les phrases au sein d'une phrase, les branches représentant les connexions entre divers éléments linguistiques.

Enfin, si l'on fait un bilan des précédents paragraphes, on remarque que les termes *arrangement* et *organisation* reviennent souvent, mais que la structure ne s'arrête pas à une simple disposition spatiale d'éléments. Elle contient aussi les *relations entre ces éléments, ainsi que les modèles qui permettent de décrire le système étudié*. Les représentations sont diverses, mais ont en commun qu'elles permettent soit de fixer des observations comme avec les microscopes ou les rayons X, de schématiser des dispositions spatiales et des relations entre éléments comme dans les *modèles tridimensionnels* ou des *arbres syntaxiques*, ou encore de faire l'intermédiaire entre des éléments et des équations comme les *diagrammes de Feynman*. Il existe par ailleurs un domaine de recherche en sciences physiques qui étudie les systèmes *a priori* sans structure, dit physique non linéaire. Ce sont de tels systèmes qui ont des comportements chaotiques, et ce chaos fait lui-même apparaître des structures sous la forme de configurations géométriques comme des fractales, notamment dans l'espace des phases (espace composé à la fois des positions et des vitesses/impulsions), dont l'attracteur de Lorenz qui est sûrement le représentant le plus connu des systèmes non linéaires. Enfin, et surtout en sciences physiques, la structure est une notion omniprésente : la recherche d'organisations, d'interactions, de relations géométriques ou dans le temps correspond à la recherche de structures.

1.2.2 Application à l'Univers

Notre brève introduction à la cosmologie moderne s'est arrêtée sur les observations du fond diffus cosmologique. Revenons sur cette histoire et poursuivons la, en nous concentrant maintenant sur la découverte de la structure à grande échelle de l'Univers, les idées et publications qui y sont liées, et ses représentations graphiques et mathématiques. Tout d'abord, sur la base de données *ADS* de la NASA recensant les publications parues dans les revues scientifiques à comité de lecture ou non, si l'on

cherche les apparitions dans les articles complets de la suite de termes « *large-scale structure of the Universe* » (les articles scientifiques en cosmologie étant pour l'immense majorité écrits en anglais), on en compte un nombre toujours grandissant depuis les années 1970 (voir la Figure 6 pour l'évolution du nombre de parutions).

Le succès des travaux de Hubble sur la caractérisation des galaxies et l'expansion de l'Univers en 1929 au mont Wilson sur le télescope Hooker, s'appuyant sur la découverte du décalage vers le rouge de raies spectrales par Vesto Slipher en 1912⁷⁷ et précisant la publication peu médiatisée de Georges Lemaître de 1927, rend sa vision d'un Univers homogène prédominant et fait entrer la cosmologie dans un paradigme n'admettant pas de structuration particulière des galaxies à grande échelle. Cette vision est notamment contestée par le rival de Hubble, Harlow Shapley. De 1914 à

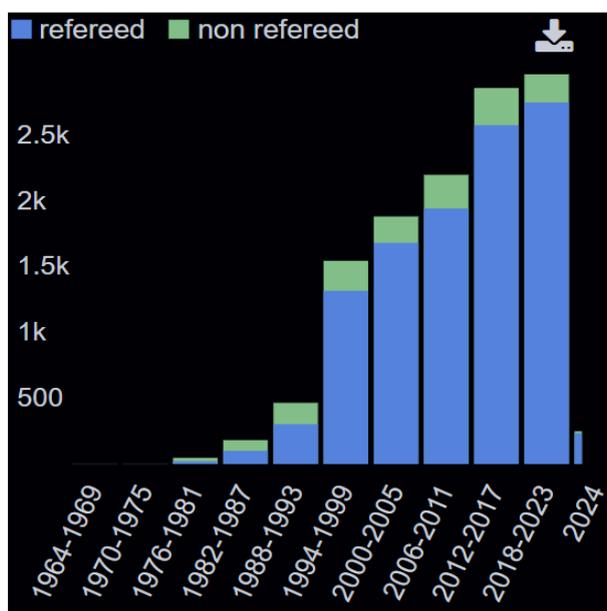


Figure 6 : Capture d'écran, prise en début 2024, des statistiques résultant de la recherche sur le site internet de la base de données ADS de la NASA. Les articles comptés en bleu sont ceux parus dans des journaux à comité de lecture, et ceux en vert sont ceux issus d'articles soit refusés, soit non présentés à ce type de journaux.

1921, celui-ci travaille à mont Wilson, il y a donc été en même temps que Hubble à l'approche de 1920. En 1932, Shapley et l'astronome Adelaide Ames publient un catalogue des galaxies les plus brillantes (et donc généralement les plus proches) du ciel complet. Ce catalogue Shapley-Ames est essentiellement une réédition et actualisation des travaux de William et Caroline Herschel, datant du XVIII^e siècle, à partir des connaissances nouvelles en astronomie, notamment la connaissance de galaxies extérieures à la Voie lactée et la relation trouvée par Henrietta Leavitt en 1908 entre la luminosité de certaines étoiles variables (les céphéides) et leurs pulsations qui permit de mesurer la distance de ces étoiles à la Terre⁷⁸. En interprétant ce catalogue, Shapley remarque que la distribution spatiale de ces galaxies, projetée sur une carte du ciel à deux dimensions, est hautement inhomogène. Malgré la volonté de Shapley de partager

⁷⁷ Slipher, V., *The radial velocity of the Andromeda Nebula*, Lowell Observatory, Bulletin n°58, 1912.

⁷⁸ Leavitt, H., Pickering, E., Harvard College Observatory Circular, volume 173, 1908, pp. 1-3.

son point de vue, ses interventions auprès de figures comme Sir Arthur Eddington ou Lemaître n'ont laissé qu'une empreinte faible sur l'imaginaire commun des cosmologistes du début du XX^e siècle. Si Hubble n'a pas remarqué cela, c'est qu'il observait des petites régions du ciel sur des distances longues contrairement à Shapley et Aimes qui couvraient le ciel entier sur une courte distance. L'effet de projection sur les observations de Hubble l'a mené à conclure à un Univers comportant un nombre assez constant de galaxies dans toutes les directions, et donc homogène sur les échelles observées. A la lumière de la cosmologie moderne, ceci est un erreur d'interprétation, et elle n'est pas la seule que fera Hubble : il refusera d'associer ses observations d'éloignement accéléré des galaxies à un Univers en expansion, et défendra comme l'avait fait Einstein un modèle d'Univers statique.

C'est aux alentours de 1950 qu'une transition majeure va s'effectuer avec le développement des études de la répartition des galaxies. Jusqu'ici, il était reconnu que des *clusters*, ou amas de galaxies pouvaient exister, mais la question des amas d'ordre supérieur, des *superclusters* ou superamas, est encore controversée. En 1948, les astronomes américains Charles Shane et Carl Wirtanen travaillent à l'observatoire Lick à l'université de Californie, à l'est de

San José (Shane en est d'ailleurs le directeur de 1945 à 1958). Ils publient des cartes de la distribution des galaxies sur une région correspondant à 70% du ciel, ce qui correspond à la portion du ciel visible depuis l'observatoire Lick, et notamment des cartes topographiques (voir Figure 7) analogues aux cartes géologiques ou météorologiques. Ces résultats, revisités en 1954⁷⁹, montrent des pics de densité de galaxies (amas) mais aussi des étendues plus larges contenant visiblement aussi un nombre

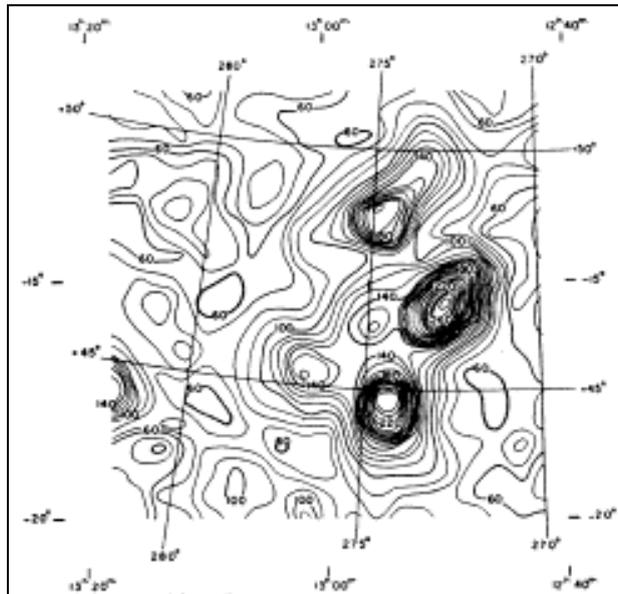


Figure 7 : Reproduction de la Figure 13 de l'article de Shane et Wirtanen : The distribution of extragalactic nebulae (1954). Les *clusters* de galaxie sont identifiables comme des pics de densité et donc des maximums tomographiques, et leur caractère étendu laisse présager des structures plus grandes, des *superclusters*.

⁷⁹ Shane, C. D., Wirtanen, C. A., The distribution of extragalactic nebulae, *Astrophysical Journal*, vol. 59, 1954.

élevé de galaxies, plus élevé que la moyenne. Ceci est une première tentative de visualiser les galaxies comme un ensemble, une structure plus étendue, et aussi une première représentation de cette structuration par des moyens graphiques différents d'un ensemble de points. L'étude de Shane et Wirtanen a été effectuée sur 800000 galaxies, ce qui est gigantesque pour l'époque. Cependant, les régions de sur-densités les plus étendues ne sont pas encore bien définies par leurs cartes, ainsi les prolongements de ces résultats concernent principalement les amas. En particulier, en collaboration avec Jerzy Neyman et Elizabeth Scott, tous deux professeurs de mathématiques à Berkeley, ils proposent un modèle de répartition des galaxies à trois paramètres reposant sur l'hypothèse que chaque galaxie appartient à un groupe ou amas. En ajustant leurs paramètres sur les observations de Shane et Wirtanen, ils parviennent à rendre compte de la distribution des galaxies sur le ciel complet, et en renversant le processus, ils arrivent à créer une simulation du ciel à partir des valeurs de ces trois paramètres, qui correspond qualitativement aux vraies observations. Ceci est remarquable, surtout en l'absence de vides cosmiques dans cette simulation. Le catalogue de galaxies de Lick sera utilisé encore longtemps, et en 1970 Shane indiquera que ce catalogue montre la présence de structures plus étendues que les *clusters*, et même peut être l'absence d'un fond uniforme de galaxies⁸⁰. De manière complètement indépendante, D. Nelson Limber publie en 1953⁸¹ une méthode statistique pour étudier la distribution des galaxies à partir d'un outil développé par son directeur d'études à l'observatoire de Yerkes, Subrahmanyan Chandrasekhar, avec l'assistance de son collègue Guido Munch. Cet outil est la fonction de corrélation. En pratique, elle permet de mesurer avec quelle probabilité, à partir d'une galaxie connue, on peut trouver une autre galaxie à une certaine distance. Si l'opération est répétée pour un échantillon assez large de galaxies, ou pour toutes les galaxies d'un relevé, alors la fonction de corrélation moyenne donne les caractéristiques statistiques spatiales du relevé. Toutefois, ceci est un outil utilisé sur des cartes du ciel à deux dimensions, et cette méthode n'est donc pas sensible à la profondeur mais seulement à deux dimensions d'espace. A peu près en même temps, et sans le savoir, Vera Rubin est en concurrence avec Limber. Elle finit sa thèse à l'université de Georgetown en 1954 sous la direction de Gamow, et alors qu'elle

⁸⁰ Shane, C., Distribution of Galaxies, dans *Galaxies and the Universe*, A. Sandage, M. Sandage, & J. Kristian (ed.), Chicago, University of Chicago Press, 1970, pp.647–63.

⁸¹ Limber, D. N., The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field, *Astrophysical Journal*, vol. 117, 1953.

applique la fonction de corrélation aux relevés de Shapley, son article sera refusé par Chandrasekhar, alors éditeur de l'*Astrophysical Journal*. Elle publie alors ses résultats dans *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Cette méthode est encore largement utilisée en cosmologie et surtout dans l'étude de la structure à grande échelle de l'Univers, et est décrite en détails dans le manuel de Peebles publié en 1980⁸².

La découverte des superamas de galaxies est légèrement plus tardive. En 1958, Abell publie ses résultats majeurs, le catalogue d'Abell, dans lequel il recense des milliers d'amas de galaxies observés durant sa thèse à Caltech à l'occasion de sa participation au *National Geographic Palomar Observatory Sky Survey* qui produisait alors des images d'excellente qualité et d'une profondeur sans précédent grâce à des temps d'exposition particulièrement longs. En plus de les répertorier, Abell donne une taille aux amas à partir de la luminosité de la dixième galaxie la plus lumineuse au sein de chaque amas. A partir de cette taille, il a donc pu estimer plus précisément le nombre de galaxies appartenant à chaque amas. Suivant les premières indications laissées par Shane et Wirtanen, Abell s'est employé à identifier des groupes d'amas, qu'il appela alors amas de second ordre et qu'on connaît aujourd'hui sous le nom de superamas. Il proposa ainsi une première étude statistique et quantitative concrète des caractéristiques de ces superamas. Après sa mort prématurée à l'âge de 56 ans en 1983, ses travaux seront poursuivis par Harold G. Corwin Jr. et Ronald Olowin. Durant la décennie 1960-1970, certains chercheurs comme le suisse Fritz Zwicky tentent de s'opposer à l'existence des superamas. Dans le cas de Zwicky, qui reste aujourd'hui une figure controversée de l'astrophysique, l'absence de méthode systématique et l'utilisation de tracés « à l'œil » de la répartition des amas et de leurs limites spatiales⁸³ ont eu tendance à décrédibiliser les arguments en faveur d'un Univers presque homogène à ces échelles. Peebles a lui aussi défendu la vision traditionnelle d'un Univers homogène, ou au moins dénué d'amas de second-ordre, jusqu'à la fin des années 1970. En effet, avant l'arrivée de relevés de galaxies plus importants et surtout plus profonds, un doute planait sur le caractère artificiel des superamas, que l'œil humain pourrait créer sans qu'ils soient effectivement physiquement présents. En 1969, Peebles et son étudiant Jer-Tsang Yu publient une nouvelle analyse du catalogue d'Abell et concluent que la présence de

⁸² Peebles, P. J. E., *The Large-Scale Structure of the Universe*. Princeton University Press, 1980, pp. 172-175.

⁸³ Zwicky, F., Kowal, C. T., *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies*, ESO, Pasadena, California Institute of Technology, vol. 6, 1968.

superamas n'est pas encore prouvée, et que la distribution des galaxies à cette échelle pourrait aussi s'expliquer par le hasard⁸⁴.

Pour commencer l'étude des superamas, le couple de français Gerard et Antoinette de Vaucouleurs s'intéresse à celui dont fait partie la Voie lactée : le superamas local, ou superamas Poisson-Baleine du nom des constellations qu'il faut viser dans le ciel pour l'observer. Celui-ci avait été interprété par Herschell comme une homogénéité locale de l'Univers, et Shapley comme un ensemble de galaxies qui entouraient l'amas local, ou amas de la Vierge. En 1953 et 1956, Gérard de Vaucouleurs publie des vues en trois dimensions du superamas local, donc extérieures à celui-ci. Il l'appelle alors la supergalaxie, un terme qui n'est plus utilisé aujourd'hui, et qu'il ne faut pas confondre avec galaxie. Une reproduction des travaux de de Vaucouleurs est donnée en Figure 8.

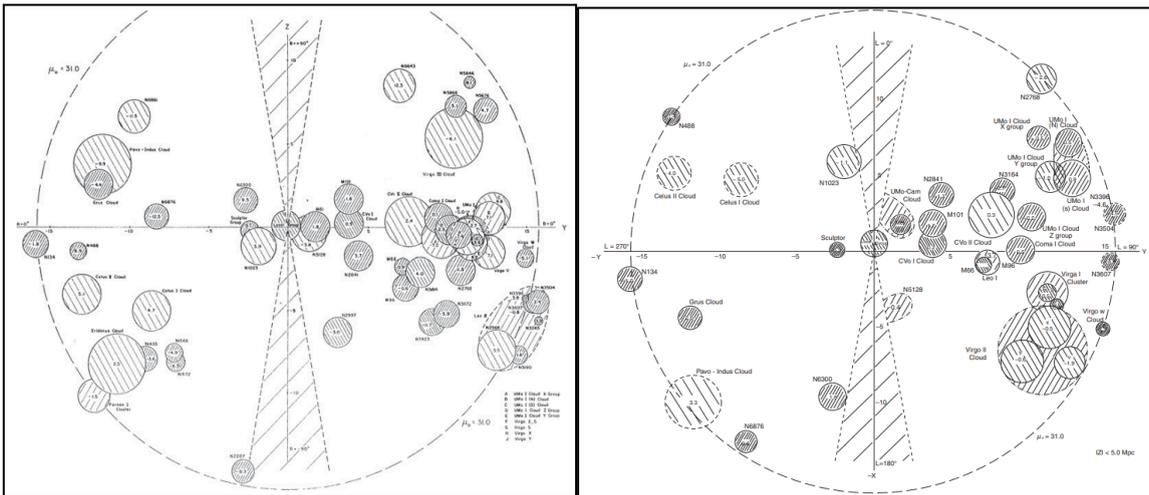


Figure 8 : Premières cartes représentant le superamas local sur trois dimensions à partir des observations et connaissances disponibles dans les années 1950-1960. Le panneau de gauche montre la distribution des amas de galaxies dans le plan perpendiculaire au plan du superamas local. Le panneau de droite montre la distribution des amas de galaxies dans le plan qui coïncide avec le plan du superamas local. Le groupe local est au centre. Chaque cercle hachuré est un amas de galaxies. La partie rayée est la région du ciel cachée par la Voie lactée dans laquelle nous sommes. Crédit : G. de Vaucouleurs, dans *Galaxies and the Universe*, A. Sandage, M. Sandage, & J. Kristian (ed.), Chicago, University of Chicago Press, 1970, pp. 557–600.

De Vaucouleurs n'avait pas les outils requis pour observer correctement au-delà du superamas local, mais il postulait tout de même que les inhomogénéités, et donc la taille des structures à ces échelles, continuent de s'accroître avec la profondeur des

⁸⁴ Yu, J.T., P.J.E. Peebles, Superclusters of galaxies, *Astrophysical Journal*, vol. 158, 1969, pp. 103-113. DOI :10.1086/150175

observations. Ces idées sont restées marginales et n'ont pas été développées au-delà des années 1970.

A ce point de notre histoire, il est important de s'arrêter sur la notion de profondeur d'observation. Lorsque les astronomes observent le ciel à l'œil, l'image qui apparaît n'est qu'une projection sur la sphère céleste de la lumière émise par les étoiles dans les galaxies. Dans d'autres longueurs d'ondes, d'autres signaux électromagnétiques nous parviennent, comme des rayons X, gamma, ultraviolets ou infrarouges qui émergent de divers phénomènes astrophysiques. Lorsqu'ils sont très éloignés, l'accès à la troisième dimension, à la profondeur des objets observés, se fait par une mesure de leur décalage vers le rouge, leur *redshift* (on continuera d'utiliser cette appellation commune). Selon l'interprétation de Hubble à partir de ses travaux de 1929, qui prévaut aujourd'hui, le *redshift* est le décalage vers le rouge du spectre d'une galaxie qui s'éloigne de l'observateur. Plus une galaxie est lointaine, plus sa vitesse d'éloignement est grande à cause de l'expansion accélérée de l'Univers, et plus son *redshift* est important. En pratique, le *redshift* est une quantité physique calculée à partir de la longueur d'onde d'un photon émis par une galaxie et de la longueur d'onde de ce même photon lorsqu'il est observé sur Terre.

Redshift :

Soient λ_0 la longueur d'onde d'un photon émis par une galaxie et λ_{obs} la longueur d'onde du même photon observé sur Terre. Le *redshift* z de la galaxie est alors :

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

A des distances très faibles entre l'émission et l'observation, $\lambda_0 \approx \lambda_{obs}$ et donc $z \approx 1$. Comme les galaxies les plus lointaines s'éloignent plus rapidement, λ_{obs} augmente avec la distance et donc z aussi.

La mesure du *redshift* implique donc des mesures spectroscopiques : on repère sur les spectres de lumière des galaxies des raies d'absorption ou d'émission connues, et on compare leur position en longueur d'onde à une même raie mesurée en laboratoire sur Terre. Pour connaître le *redshift* d'une galaxie, les astronomes ne peuvent donc pas se contenter d'observer la lumière visible, mais doivent décomposer cette lumière ainsi que la lumière dans des longueurs d'onde invisibles à l'œil (comme l'infrarouge) pour en déterminer le spectre. En astronomie, l'analyse spectrale a d'abord été utilisée par William Hyde Wollaston puis Joseph Fraunhofer entre la fin du XVIII^e et le début du XIX^e siècle pour déterminer une partie de la composition du Soleil. Son utilisation pour

des observations de galaxies s'est démocratisée avec des investissements importants, surtout aux États-Unis à partir de la fin des années 1960. Plus les années avancent, plus les technologies de mesures permettent des observations à des *redshifts* élevés.

À l'orée des années 1970, des investissements importants sont faits au département d'astronomie de l'université d'Arizona dont le directeur est alors l'américano-néerlandais Bart Jan Bok. De nouveaux télescopes sont installés sur le *Kitt Peak National Observatory* (KPNO) et notamment un tout nouveau spectrographe. Dans ce contexte, des astronomes comme William Tift, Herbert Rood, Guido Chincarini, Laird Thompson et Stephen Gregory travaillent sur des relevés de *redshifts* de galaxies au cours des années 1970 sur les différents appareils du KPNO. Parmi leurs objectifs, il y a l'ambition de mieux connaître la structuration des galaxies lointaines en trois dimensions, et donc la structure à grande échelle de l'Univers. Ces études permettent notamment à Gregory et Tift de publier, en 1976, un article utilisant pour la première fois la représentation moderne du ciel en cône⁸⁵ (voir Figure 9). Dans cet

article intitulé « Direct observations of the large-scale distribution of galaxies », les auteurs étudient l'amas de Comas et concluent que presque aucune galaxie n'est isolée, qu'elles sont au contraire toutes comprises dans un amas ou un groupe, et qu'il y a visiblement des structures de surdensités de matière qui s'étendent au-delà de l'amas. Cette observation est encore trop peu étendue pour faire apparaître clairement ces structures et les vides qu'il y a autour. C'est en 1978 que Thompson et Gregory publient la première observation de ces vides cosmiques dans l'article « The Coma/A1367 supercluster and its environs ». Dans

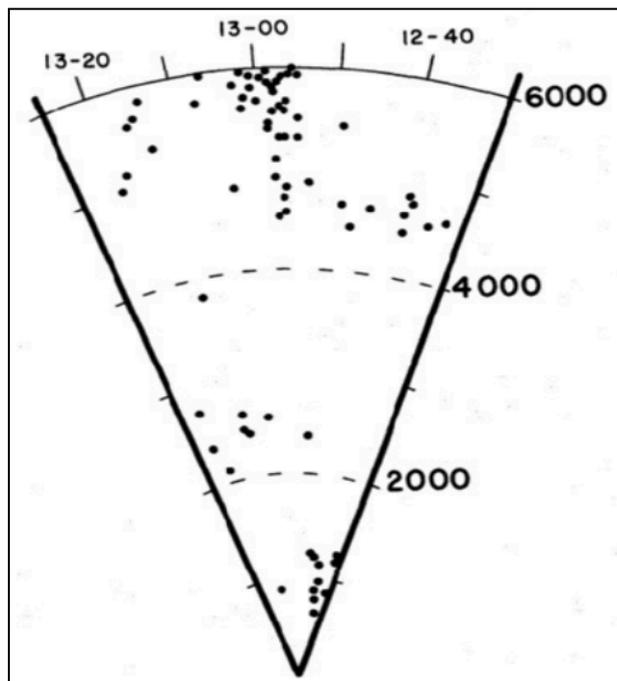


Figure 9 : Reproduction de la Figure 1 de l'article de Tift et Gregory (1976). L'amas de Coma est identifiable à l'ordonnée 4500. Les ordonnées sont en vitesses de récession, ce qui correspond au redshift, et les abscisses sont en degrés et représentent l'ascension droite (angle suivant la longitude terrestre).

⁸⁵ Tift, W., Gregory, S., Direct observations of the large-scale distribution of galaxies, *Astrophysical Journal*, vol. 205, 1976, pp. 696–708.

cet article, les auteurs utilisent aussi des cartes topographiques, mais plutôt qu'un cône, ils choisissent de représenter leurs observations dans un triangle représenté en Figure 10. Dans tous les cas, les effets de projection causés par l'attraction gravitationnelle des galaxies vers le centre de l'amas créent une distorsion selon l'axe des *redshifts*. Les formes observées des amas sont allongées selon cet axe, ce qui laisse apparaître des formes de cigares mises en évidence sur la partie droite de la Figure 10. Ces formes ont été surnommées des « doigts de Dieu », et, plus ils sont massifs, plus les amas apparaissent longs. A partir de ce point historique, les représentations des structures visibles dans le ciel ont en général cette distorsion corrigée. La Figure 10 met aussi en évidence un ensemble de galaxies entre l'amas de Coma et l'amas A1367, qui ressemble à un pont. Des études postérieures à cet article, comme les missions CfA et CfA2,

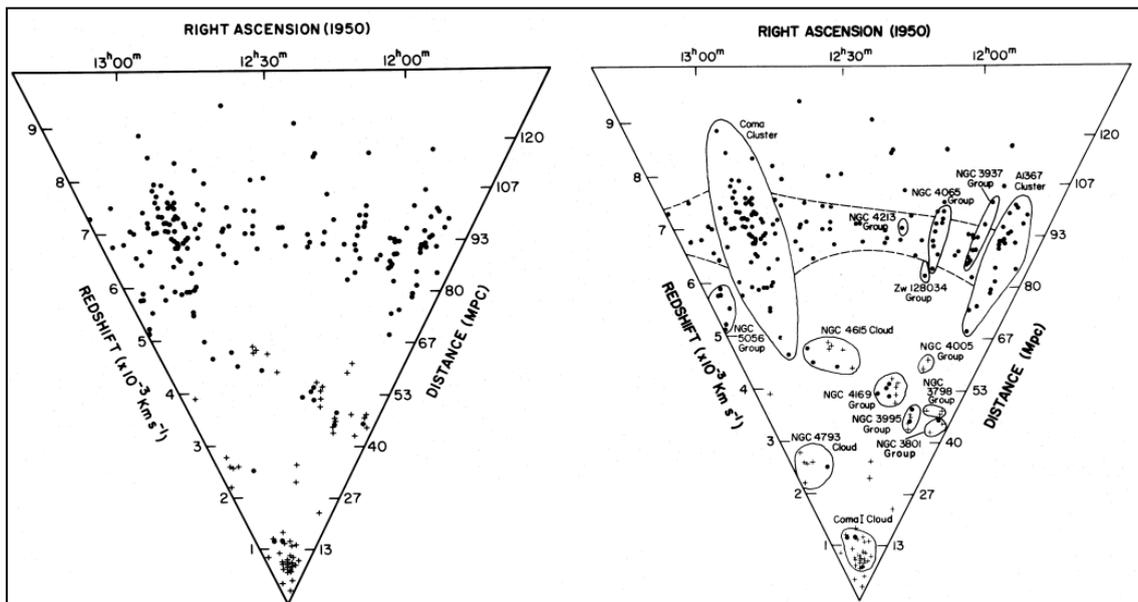


Figure 10 : Panneau de gauche : l'amas de Comas situé à gauche, et l'amas A1367 à droite. Entre les deux, les points forment comme un pont. Un grand vide cosmique est particulièrement visible vers $z = 5$. Chaque point est une galaxie. Panneau de droite : interprétation par les auteurs des formes des structures formées par les galaxies. En particulier, les groupes et les amas apparaissent sous des formes allongées. Credit : Gregory, S. A., Thompson, L. A., The Coma/A1367 supercluster and its environs, *Astrophysical Journal*, Vol. 222, 1978, pp. 784-799.

montreront que cet ensemble est en fait une partie d'une immense structure filamentaire qui sera surnommée le Grand Mur. Il faut bien comprendre ici que ces galaxies ne forment pas comme un mur au sens littéral, qui bloquerait le passage, mais plutôt que cette région de l'espace en contient plus que les autres régions en moyenne. Les distances entre les galaxies sont tout de même plusieurs ordres de grandeurs au-delà de

la taille d'une galaxie individuelle, et celles-ci se déplacent en des temps extrêmement longs sur de telles distances. Dans le même temps, Rood et Chincarini produisaient des figures rectangulaires, avec le *redshift* sur l'axe des ordonnées et la distance au centre de l'amas sur les abscisses. Ce genre d'image ne permet pas de révéler la structure géométrique tridimensionnelle, ni même bidimensionnelle, des amas : deux galaxies à distances égales du centre mais situées de part et d'autre et à même *redshift* se trouvent tracées au même endroit sur l'image, alors qu'elles sont physiquement séparées par une grande distance. Toujours est-il qu'à partir de ce moment, le concept de vide ou de trou cosmique est d'usage, et cet usage devient de plus en plus fréquent avec le temps, malgré les difficultés de Thompson et Gregory à faire valoir leurs résultats⁸⁶. De même, le terme de pont est apparu, notamment dans le titre d'un article de 1981⁸⁷, et l'on en parle alors comme une structure filamentaire, ce qui rendra le terme filament plus courant. Un exemple plus extrême de vide cosmique, et qui par des jeux de communication et de médiatisation deviendra plus célèbre que celui découvert par Gregory et Thompson, est le vide de Boötes, décrit dans une publication de 1981 par Kirshner, Oemler, Shechter, et Sackett⁸⁸. Pour la première fois, un vide cosmique était suffisamment étendu pour tester des modèles cosmologiques : un modèle implanté dans une simulation doit pouvoir permettre de reproduire de tels vides.

C'est également à cette époque que différents modèles de formation des galaxies émergent, à la fois aux États-Unis et en URSS, à Moscou. Peebles favorise une formation *bottom-up*, soit une succession d'accrétion de masses sphériques qui deviennent des masses plus grandes, jusqu'à former des galaxies, et même des groupes ou amas de galaxies. Zel'Dovich préfère une version *top-down*, où des grandes structures de surdensités s'effondrent gravitationnellement pour laisser place à des structures plus petites. Cette dernière théorie prendra forme sous le nom d'approximation de Zel'Dovich. En particulier, ces modèles ont parfois été respectivement qualifiés de *meatballs* (boulettes de viande) et de *pancakes* : les

⁸⁶ Les controverses autour de la paternité de la découverte des vides cosmiques est relatée du point de vue de L. Thompson dans son ouvrage *The Discovery of Cosmic Voids*. En particulier, il reproche à la communauté des cosmologistes d'avoir plus ou moins volontairement ignoré ses travaux en commun avec Gregory.

Thompson, L., *The Discovery of Cosmic Voids*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, 291 p.

⁸⁷ Chincarini, G., Thompson, L. A., Rood, H. J., Supercluster bridge between groups of galaxy clusters, *Astrophysical Journal*, vol. 249, 1981. DOI : 10.1086/183656

⁸⁸ Kirshner, R. P., Oemler, A. Jr., Schechter, P. L., Sackett, S. A., A million cubic megaparsec void in Boötes ?, *Astrophysical Journal*, vol. 248 1981. DOI : 10.1086/183623

meatballs fusionnent pour en former de plus en plus grandes, et les *pancakes* (murs) s'effondrent selon l'axe le moins dense pour former des filaments qui eux même forment des halos. Ces deux modèles ne sont pas simplement des représentations mentales de la structuration à grande échelle de l'Univers, ils impliquent aussi et surtout des procédés physiques prédominants différents : soit la structure à grande échelle est arrivée avant les galaxies qui se forment dedans, soit les galaxies se forment d'abord et définissent ensuite cette structure à grande échelle. Les structures dont il est question dans l'approximation de Zel'Dovich sont représentées en Figure 11. A cause de la guerre froide, et surtout des impossibilités pour Zel'Dovich de s'éloigner

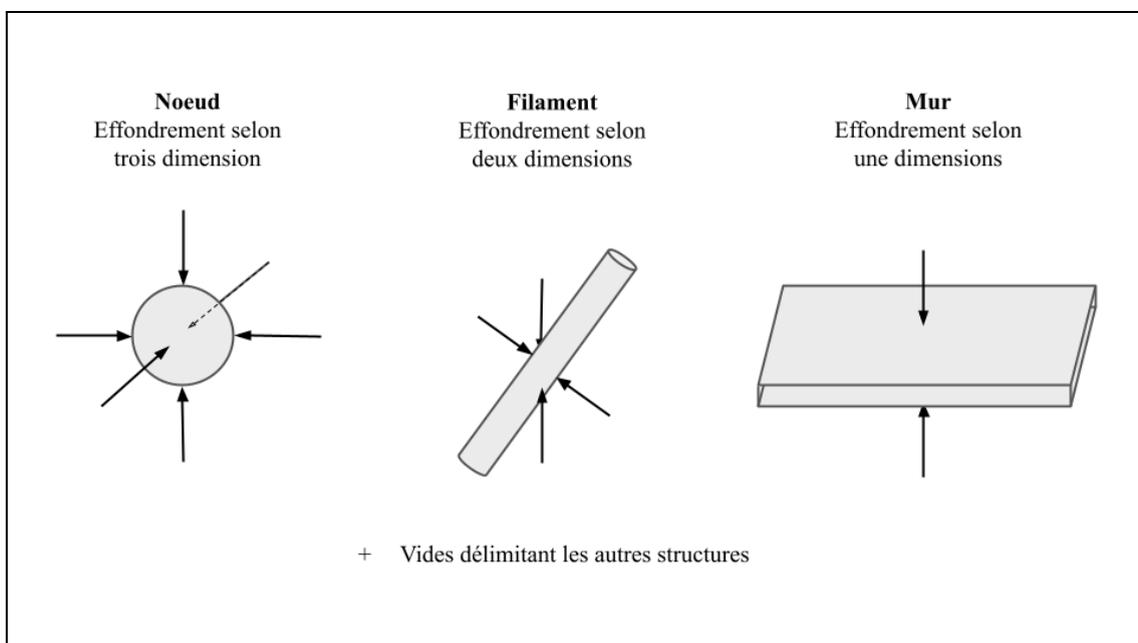


Figure 11 : Représentation schématique, avec une échelle arbitraire, des structures constitutives de la toile cosmique, ainsi que les axes selon lesquels l'effondrement gravitationnel a eu lieu selon l'approximation de Zel'Dovich. Les vides, bien qu'évidemment compliqués à représenter, sont parfois mentionnés comme des structures, et séparent et délimitent les filaments, murs et halos.

géographiquement de l'URSS, les idées de l'Est ont mis plusieurs années à se propager, alors que Peebles faisait déjà référence à l'Ouest, notamment grâce à son implication dans la découverte et l'analyse du fond diffus cosmologique⁸⁹. En l'absence de données suffisantes pour les départager, ces idées concurrentes ont coexisté pendant une grande

⁸⁹ Cette histoire est racontée de manière abordable et romancée dans la vidéo de la chaîne YouTube History of the Universe : Farrow, J., Kelly, D., *Why Does The Universe Look Like This?*, History of the Universe, YouTube, 2022. https://www.youtube.com/watch?v=iDqQ9qgTWmg&t=1188s&ab_channel=HistoryoftheUniverse

partie de la décennie. L'interlocuteur qui put réunir et faire se confronter ces écoles de pensée fut le britannique Martin Rees, qui occupa d'ailleurs le poste de président de la *Royal Society* entre 2005 et 2010. Sous sa direction, l'américain Richard Gott⁹⁰ développa une autre théorie. Il rencontra Zel'Dovich en Estonie (alors encore en URSS), place forte des discussions en cosmologie à cette époque, en 1977 à l'occasion d'un séminaire à Tallinn, et en profita pour proposer une topologie de l'Univers se plaçant entre les deux visions majeures : une éponge, ou un *honeycomb* (rayon de miel) pour rester dans les métaphores culinaires. Dans ce modèle, les surdensités (amas, superamas, filaments, murs) et sousdensités (vides) sont complémentaires et peuvent être échangées sans que la structure à grande échelle de l'Univers ne change de caractéristiques globales. Mais les métaphores proposées n'ont pas toujours été attachées à des modèles. Dans *Discovery of the Cosmic Voids*, Thompson explique que lors d'un séminaire, Abell se figurait les lumières de la ville une fois la nuit tombée pour représenter visuellement cette structure :

« [Abell] described the large-scale distribution of galaxies as being somewhat similar to a view of the Los Angeles city lights at night from his home on Mulholland Drive. The grid of street lights resembled the ridges of galaxies in filamentary superclusters, and cosmic voids were the dark areas in between. It was a fitting comparison. »⁹¹

Toujours durant la décennie 1970-1980, les estoniens Jaan Einasto et Mihkel Jõeveer qui travaillaient alors à l'observatoire de Tartu s'intéressent en particulier à la notion de superamas, et parlent d'une structure en cellules (*cell-like structure*) de l'Univers. Cette vision sera mise en défaut par le manque de données de l'époque concernant les superamas, mais reste une tentative de description qui fut discutée durant le séminaire de 1977. Par ailleurs, les modèles proposés n'ont pas toujours été rapportés à des métaphores, comme ce fut le cas pour la théorie alternative des turbulences cosmiques du physicien théoricien russe Leonid Ozernoi à cette même période⁹². Celui-ci appliquait des principes de mécanique des fluides à l'Univers pour expliquer le caractère turbulent de la formation des structures, à la fois à petite et à grande échelle.

⁹⁰ Gott développe de manière informelle sa carrière et ses travaux dans son ouvrage paru en 2016 : Gott, J. R., *The Cosmic Web*, Princeton, Princeton University Press, 2016, 272 p.

⁹¹ *Discovery of the cosmic voids*, p.110.

⁹² On pourra par exemple se référer à cet article de 1973 :

Jones, B. T., Cosmic Turbulence and the Origin of Galaxies, *Astrophysical Journal*, vol. 181, 1973. DOI : 10.1086/152048

Pour finir, on peut aussi mentionner le néerlandais Vincent Icke qui en 1973 a également proposé un modèle ressemblant sur certains points à l'approximation de Zel'Dovich (ils n'en avaient alors pas conscience, puisqu'aucune communication ne se faisait entre les deux chercheurs) alors qu'il travaillait à l'observatoire de Leiden⁹³.

Ce sont des relevés comme le *2dF Galaxy Redshift Survey* ou le SDSS⁹⁴, lancé en 2000, qui permirent enfin de trancher entre ces différents modèles grâce à des observations sur de grandes régions du ciel (25% du ciel dans le cas du SDSS) répertoriant énormément d'objets astrophysiques (plus de 100 000 000 pour le SDSS) à

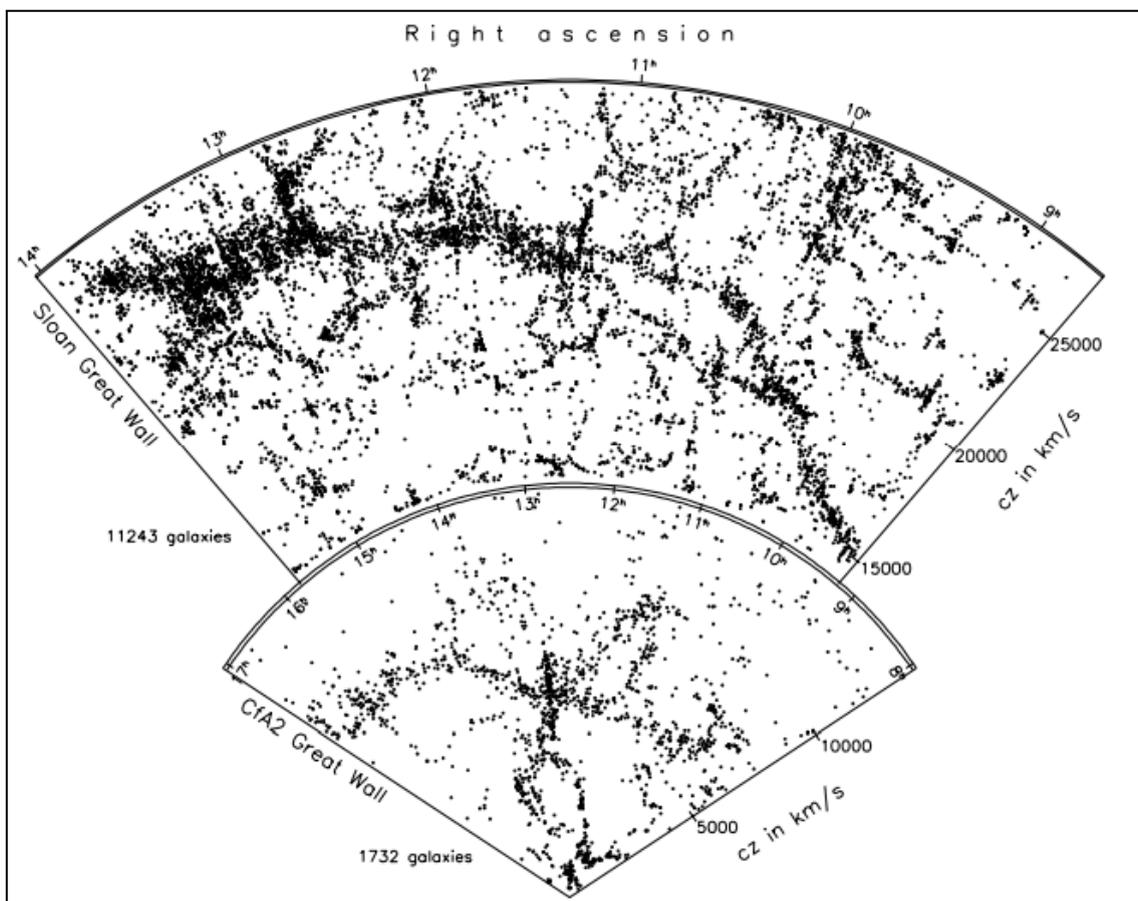


Figure 12 : Comparaison entre les échelles de distance des observations de CfA2 (en bas) et de SDSS (en haut). Le Grand Mur CfA2 et le Grand Mur de Sloan sont annotés sur le côté gauche. Encore une fois, chaque point est une galaxie, et les axes sont le *redshift* et l'ascension droite. Crédit : Gott, J. R., et al, A Map of the Universe, *Astrophysical Journal*, vol. 624, 2005.

⁹³ Icke, V., Formation of Galaxies Inside Clusters, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 27, 1973.

⁹⁴ Une comparaison entre les observations de CfA2 et du SDSS sont disponibles en Figure 12, tirée de Gott, J. R., et al, A Map of the Universe, *Astrophysical Journal*, vol. 624, 2005.

des *redshifts* parfois très élevés. La Figure 12, tirée d'un article de Gott de 2005, rend compte des différences d'échelles entre les relevés SDSS et CfA2, et fait notamment une immense structure filamentaire, plus grande que le Grand Mur CfA2, le Grand Mur de Sloan. Comme la lumière voyage à une vitesse finie dans l'Univers, les objets observés à de hauts *redshifts* nous apparaissent tels qu'ils étaient il y a longtemps, des milliards d'années pour les plus lointains. Ces observations modernes font donc apparaître la structure à grande échelle de l'Univers non pas seulement comme une structure de l'espace local, mais bien comme une structure de l'espace-temps, et parmi toutes les images utilisées pour décrire cette structure, l'éponge semble être la moins éloignée de la réalité : celle-ci est composée de plusieurs sous-structures comme des amas, des ensembles filamentaires ou aplatis comme des murs, mais forme un tout sous la forme de régions connectées de surdensités entourées par ou entourant des sousdensités. Ces relevés montrent également qu'à des échelles supérieures à des milliards d'années lumières, l'Univers devient enfin homogène, et la structure disparaît dans des détails alors petits devant les échelles d'observations.

Entre temps, Λ CDM s'est imposé comme le modèle standard de la cosmologie. Il a été formellement adopté au courant des années 1990⁹⁵. Ce rappel est l'occasion d'introduire la matière noire dans notre histoire et d'en expliquer le rôle qui lui attribuent les cosmologistes dans la structuration de la matière visible⁹⁶. Zwicky avait pour la première fois postuler la présence d'une matière encore non observée pour expliquer la vitesse de déplacement des galaxies dans l'amas de Coma dans les années 1930. Ça n'est qu'en 1970 que le concept de matière noire, possiblement composée de particules encore inconnues, s'est formalisé et a été plus largement pris au sérieux, notamment grâce aux observations de Rubin sur la vitesse de rotation des étoiles autour du centre galactique d'Andromède⁹⁷. Dans les deux cas, les observations indiquent que les effets gravitationnels mesurés ne s'expliquent pas avec la seule matière visible, et qu'une source d'attraction gravitationnelle invisible doit exister, et des observations comme le spectre de puissance du fond diffus cosmologique ou des lentilles

⁹⁵ L'un des articles précurseurs concernant Λ CDM est de Peebles en 1988 :

Peebles, P. J. E., Ratra, B., *Cosmology With A Time Variable Cosmological 'Constant'*, *Astrophysical Journal*, vol. 325, 1988.

⁹⁶ Une discussion accessible au sujet de la matière noire et de la matière visible est disponible dans l'ouvrage *Les idées noires de la physique* de Bontems et Lehoucq, illustré par Pennor's.

⁹⁷ Rubin, V., Ford, W. K. Jr., *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, *Astrophysical Journal*, vol. 159, 1970. DOI : 10.1086/150317

gravitationnelles renforcent ensuite ce besoin d'une matière invisible pour expliquer les phénomènes astrophysiques. Aujourd'hui, les observations indiquent que la matière noire composerait environ 85% de la matière totale, laissant seulement 15% de matière visible. En 1978, White et Rees travaillent à Cambridge sur un nouvel ingrédient à introduire dans les modèles de formation des galaxies⁹⁸. Leur idée, largement retenue aujourd'hui, est que les galaxies se forment dans des halos invisibles composés de matière qui n'interagit que par la force gravitationnelle, donc sans collisions et sans émettre de lumière. Une fois un halo de matière noire en place, la matière baryonique, classique, est attirée par le potentiel gravitationnel ainsi créé et forme des galaxies. C'est cette théorie qui introduit la composante CDM (*cold dark matter*) qui vient compléter la constante cosmologique ou énergie noire Λ de Λ CDM. Quelques années plus tard, à partir de 1982, des discussions sur la nature des particules composant cette matière noire ont commencé. Ces discussions sont encore d'actualité et s'accompagnent de modèles concurrents à CDM, qu'ils soient aussi des modèles de matière noire mais d'une autre nature, ou des modèles de gravitations modifiée. En particulier, le début des années 1980 correspond à la période où les simulations numériques de formation de galaxies commencent à prendre en compte cette matière noire. Des tentatives de reproduire numériquement les vides cosmiques et les superamas ainsi que la structure filamentaire de la répartition des galaxies ont vu le jour à l'Est avec l'américain Adrian Melott et les russes Sergei Shandarin et Anatoli Klypin ainsi que des contributions du groupe d'Einasto à Tartu⁹⁹. Ces premiers essais ont notamment permis de comparer les modèles de matière noire, et la structure à grande échelle de l'Univers prend alors le statut d'outil de vérification et non plus uniquement d'observable. À l'Ouest, une équipe composée par White, l'américain Marc Davis et le mexico-britannique Carlos Frenk utilise une autre méthode informatique, plus fine et détaillée, pour reproduire la structure filamentaire des ensembles de galaxies à grande échelle. En pratique, une fois la simulation effectuée, ce sont les fonctions de corrélation des galaxies réelles et simulées qui sont comparées pour estimer la validité de la simulation. Après avoir

⁹⁸ White, S. D. M., Rees, M. J., Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 183, 1978. DOI : 10.1093/mnras/183.3.341

⁹⁹ Melott, A. L., Einasto, J., Saar, E., Suisalu, I., Klypin, A. A., Shandarin, S. F., Cluster analysis of the nonlinear evolution of large-scale structure in an axion/gravitino/photino-dominated universe, *Physical Review Letters*, vol. 51, 1983.

complété sa thèse à Oxford, le britannique George Efstathiou a été invité à rejoindre le trio pour former un groupe de quatre chercheurs, surnommé le *Gang of Four* et dont l'objectif était de comprendre et modéliser toujours plus finement la structure à grande échelle de l'Univers avec des simulations¹⁰⁰. Ce groupe a publié des résultats majeurs à partir de 1985, sur des volumes au début relativement petits, avec un modèle CDM et une géométrie de l'espace-temps euclidienne. Ils ont en particulier montré que l'introduction d'un biais galactique (les galaxies se forment plus dans les halos les plus massifs) améliore considérablement l'adéquation entre les simulations et les observations. C'est à partir de ce moment que les dernières réticences à accepter l'existence des superamas, filaments et murs de matières à l'échelle cosmique ont disparu, dix ans après la mise en évidence du premier

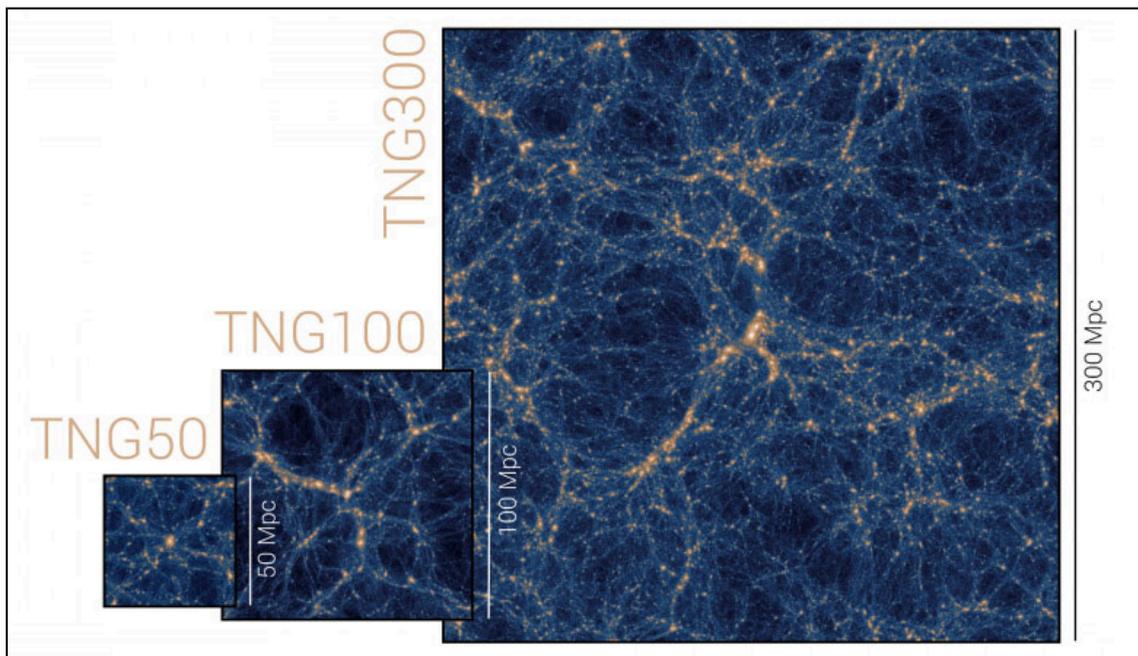


Figure 13 : Représentation en projection bidimensionnelle de la structure à grande échelle de l'Univers dans trois *runs* de la simulation IllustrisTNG. Les points les plus sombres correspondent à des sousdensités (vides) et les points clairs sont des surdensités (superamas, amas, filaments) dans lesquels se forment des galaxies. Crédit : IllustrisTNG.

vide et filament cosmique. Beaucoup de simulations de l'Univers à grande échelle peuvent être considérées comme des descendantes de ces travaux datant des années 1980. En particulier, on peut citer IllustrisTNG, la simulation Millennium, Uchuu ou

¹⁰⁰ L'un de leurs travaux majeurs compte presque 5000 citations aujourd'hui : Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., White, S. D. M., The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter, *Astrophysical Journal*, vol. 292, 1985. DOI : 10.1086/163168

Horizon-AGN. Toutes ces simulations, et d'autres, ont vu le jour au XXI^e siècle et sont encore utilisées aujourd'hui. De nombreuses images leur sont associées. On donne ici par exemple des vues en projection de ce que fournissent IllustrisTNG (Figure 13) et Millennium (Figure 14). Ces images sont colorées à des fins de visualisation, et dépendent grandement de ce que l'on cherche à montrer. Les structures visibles varient en fonction de si l'on regarde la température de la matière, sa densité, le gaz ou la

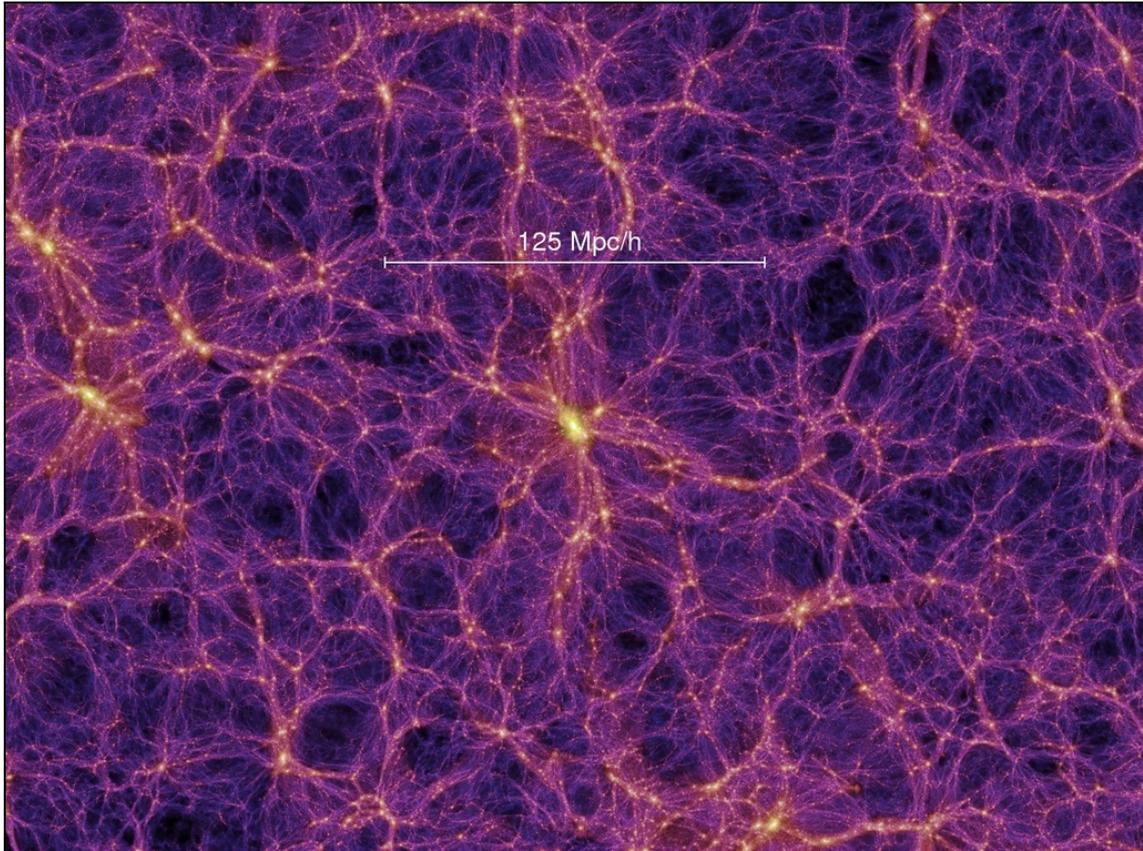


Figure 14 : Représentation en projection bidimensionnelle de la structure à grande échelle de l'Univers dans la simulation Millennium. Le code couleurs est similaire à la simulation IllustrisTNG (Figure 13). Cette simulation a demandé un temps de calcul d'un mois sur le super-ordinateur de l'institut Max Planck à Garching bei München. Crédit : The Millennium Simulation Project.

matière noire, des surfaces de choc ou des limites topologiques mathématiquement définies. Avec de telles simulations, chaque paramètre peut mener à un type d'image, et les représentations de la structure à grande échelle de l'Univers sont alors nombreuses et variées, et dépendent de l'âge de l'Univers simulé. Ceci est illustré en Figure 15.

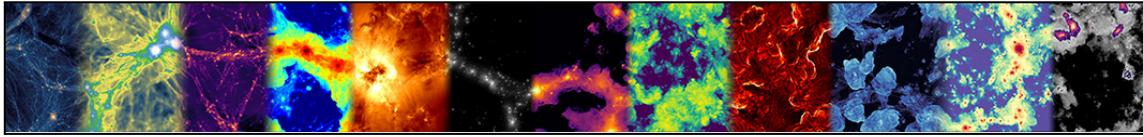


Figure 15 : Tiré de TNG50 à $z = 0$. De gauche à droite : la distribution de la matière noire, la distribution de la masse du gaz, l'émission Lyman-alpha, la température du gaz, la vitesse du gaz, la masse stellaire, l'émission de rayons X, la métallicité du gazeuse, le nombre de Mach du choc cosmique, le taux de dissipation d'énergie due aux chocs, l'intensité du champ magnétique et enfin la densité d'oxygène. Crédit : IllustrisTNG.

Une fois les découvertes observationnelles majeures faites, l'une des grandes questions qui se pose aux cosmologistes est celle de la raison de l'existence de la structure à grande échelle de l'Univers. Celle-ci est composée de matière noire formant une enveloppe et de matière baryonique qui forme des galaxies, comme un squelette visible au sein de cette enveloppe. Mais pourquoi, si l'Univers est homogène aux plus grandes échelles observées, la matière est répartie d'une telle manière inhomogène ? Nous n'allons pas développer précisément les éléments de réponse que sont le fond diffus cosmologique (dont nous avons déjà discuté brièvement) et la théorie de l'inflation cosmique, mais nous pouvons ici en donner les grandes lignes. Comme nous en avons déjà discuté, à partir des années 1960 et en particulier à partir de la première observation du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson, les mesures ont été de plus en plus fines jusqu'à en voir en détail les fluctuations de température avec le satellite Planck. Ces fluctuations de température sont une empreinte des inhomogénéités initiales dans la répartition spatiale de la matière très tôt après le Big Bang. La théorie dominante, dont les cosmologistes cherchent des preuves expérimentales aujourd'hui, est la théorie de l'inflation cosmique, qui implique qu'en un temps extrêmement court, l'Univers ait subi une expansion très rapide qui aurait lissé ces inhomogénéités initiales pour laisser place à celles qu'on connaît aujourd'hui, permettant à la matière noire de former l'enveloppe dans laquelle les galaxies se forment. Cette théorie est prise en compte dans les simulations d'évolution de l'Univers depuis 1985 et les travaux du *Gang of Four*, et est jusqu'ici couronnée de succès lorsqu'il s'agit de reproduire, à partir du fond diffus cosmologique, la structure à grande échelle observée aujourd'hui. Entre autres, l'inflation est aussi un moyen efficace d'expliquer le caractère plat de l'Univers : toute courbature globale initiale est aplatie lors de ce processus extrême. Les premières

propositions d'un Univers inflationnaire viennent d'abord de l'américain Alan Guth (MIT, 1980)¹⁰¹, et ont été retravaillées indépendamment par l'américano-russe Andreï Linde¹⁰² et le russe Alexei Starobinsky¹⁰³ en 1982 puis se sont démocratisées.

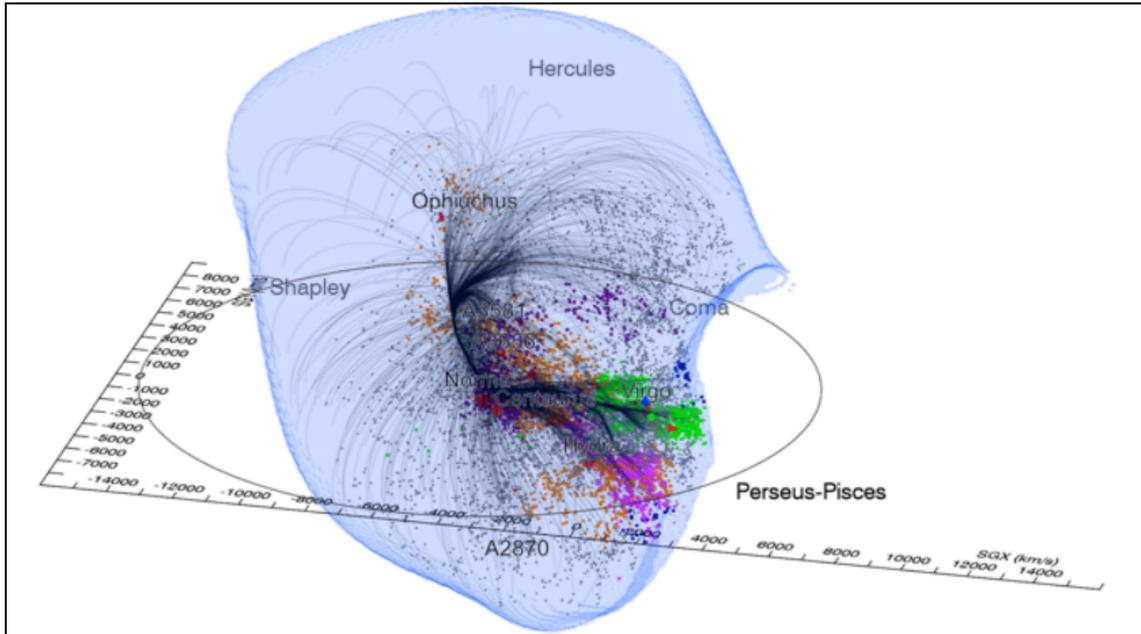


Figure 15 : Panneau du bas de la Figure 1 de l'article « The Laniakea supercluster of galaxies ». Les lignes de vitesses sont en noir, ce qui auparavant était nommé superamas local est en vert, les points de couleurs sont des galaxies individuelles, et la surface bleue représente la limite des flux de vitesse représentés. Des sous-structures sont annotées à leur emplacement dans *Laniakea*. Crédit : Tully, Courtois, Hoffman & Pomarède (2014).

Pour conclure ce chapitre, mentionnons qu'en 2014, une équipe de l'université de Lyon composée de R. Brent Tully, Hélène Courtois, Yehuda Hoffman et Daniel Pomarède a pu proposer une représentation avancée du superamas dans lequel la voie lactée se situe (observer la structure dans laquelle notre propre galaxie se trouve est un grand défi : il est plus facile d'observer les maisons environnantes depuis chez-soi que de se figurer l'extérieur de sa propre maison si l'on ne le connaît ni ne le voit pas). Ce superamas a été surnommé *Laniakea* (« paradis incommensurable » ou « horizon céleste

¹⁰¹ On pourra se référer au livre de Guth pour les questions d'histoire de la théorie de l'inflation : Guth, A. H., *The inflationary universe : the quest for a new theory of cosmic origins*, New-York, Basic Books, 1997, 328 p. ISBN : 978-0-201-32840-0

¹⁰² Linde, A. D., A new inflationary universe scenario: a possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems, *Physics Letters B*, vol. 108, 1982.

¹⁰³ Starobinsky, A. A., Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations *Physics Letters B*, vol. 117, 1982.

immense » en hawaïen) et la découverte a été publiée dans *Nature*¹⁰⁴. Avec des cartes des vitesses des galaxies composant *Laniakea*, les auteurs de cet article proposent une reconstruction à trois dimensions de la forme du superamas accompagnée de lignes de flux de vitesses. Cette image est reproduite en Figure 15.

¹⁰⁴ Tully, R. B., Courtois, H., Hoffman, Y., Pomarède, D., The Laniakea supercluster of galaxies, *Nature*, vol. 513, 2014. DOI : 10.1038/nature13674

Chapitre 2 : Entretiens de chercheurs et chercheuses

Dans l'enquête menée dans *La vie de laboratoire*, Bruno Latour montre que la science de laboratoire, dont la cosmologie fait partie bien qu'elle ne soit expérimentale que de manière limitée et indirecte, peut être soumise à l'analyse des sciences humaines que sont la sociologie et l'histoire ainsi qu'à celle de la philosophie. En critiquant la tradition sociologique qui l'a précédé, Latour montre comment la science n'est pas isolée et indépendante de son contexte. L'anthropologie en particulier permet de pénétrer au sein d'un champ scientifique donné et d'en faire un objet d'étude. Si la notion de réseau développée par Latour s'avère trop générale et peu pertinente pour l'analyse que nous souhaitons faire ici de l'attitude des cosmologistes vis-à-vis de la structure à grande échelle de l'Univers et de ses représentations¹⁰⁵, l'enquête par entretien s'y prête tout à fait.

Pour réaliser ces entretiens, une prise de contact par mail a d'abord été nécessaire. Chaque demande a reçu une réponse, une seule d'entre elle fut négative pour cause de manque de temps malgré un intérêt avoué par la personne concernée, ce qui montre l'envie des cosmologistes de discuter de leur discipline en des termes accessibles ainsi que de prendre un recul historique et philosophique sur les objets qu'ils étudient. Une fois l'entretien convenu, chaque intervenant ou intervenante a reçu la liste des questions quelques jours à l'avance. L'objectif, en communiquant cette liste, était de permettre la formation de premières idées qui se concrétiseront par la suite et dans la discussion, tout en essayant de ne pas influencer les avis de chacun avant l'entretien. Il est remarquable que dans plusieurs cas, au cours d'une discussion préalable, des cosmologistes mettaient en cause leur légitimité à répondre à des questions d'ordre épistémologique, tout en fournissant ensuite des éléments de réponse pertinents et bien développés. Sans vouloir rendre les entretiens trop formels, le vouvoiement a tout de

¹⁰⁵ En fait, il ne s'agit pas ici d'une étude ethnologique de la manière de faire des cosmologistes au travail, ni des savoirs tacites en jeu, car ces éléments sont ici connus sans ambiguïté. Les entretiens se rapportent plutôt à un travail d'enquête permettant de récolter divers points de vue explicites au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers, et de donner la parole à des individus à la fois intéressés et concernés.

même été systématiquement utilisé lorsque la discussion était en français. Chaque entretien a été réalisé suivant les mêmes règles, et la place était le plus possible laissée aux improvisations et cheminements de pensées, même incomplets, des cosmologistes. Par ailleurs, la discussion se faisant entre deux personnes connaissant le langage propre à l'astrophysique, les réponses étaient formées naturellement sans faire d'efforts particuliers de syntaxe et d'explications du sujet ce qui les a rendu plus complètes et claires. L'effort d'explication sera fait lors de l'analyse si les éléments historiques donnés en Chapitre 1 ne sont pas suffisants. Nous présentons ici en premier lieu les questions posées et (sommairement) les personnes participant aux entretiens, puis une première analyse des réponses récoltées.

2.1 Questions et entretiens

L'objectif des questionnaires utilisés était de traiter de notions liées à la structure à grande échelle de l'Univers tout en discutant aussi de questions générales de cosmologie, à savoir des questions sur la politique de la recherche, autour des modèles utilisés et leur raisons d'être, ainsi que sur le passé et le futur de la cosmologie. Cette discussion générale permet non seulement d'agrémenter la philosophie des cosmologistes au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers par des éléments de contexte plus généraux, mais aussi de montrer le spectre des centres d'intérêts de ces derniers concernant leur propre recherche. Ceci permet aux personnes entendues d'exprimer plus complètement leurs philosophies. Chaque entretien était prévu pour durer d'environ trente minutes à une heure, ce qui a été le cas presque à chaque fois.

Voici l'ensemble des questions¹⁰⁶ envoyées quelques jours avant chaque entretien, et adaptées pour chaque cas en fonction de la tournure que l'entretien prenait :

-
- 1) Depuis combien de temps travaillez-vous en astrophysique/cosmologie ?
 - 2) Pourquoi avoir choisi ce milieu ?

¹⁰⁶ Si les questions sont écrites ici en français, elles l'étaient en anglais pour environ la moitié des entretiens. La traduction entre français et anglais est aussi littérale que possible, il n'y a donc pas grand intérêt à écrire à nouveau les questions dans une autre langue dans ce mémoire écrit en français. On donne la version anglaise en annexe.

- 3) Pensez-vous que les différents modèles (de matière noire, de gravitation, d'espace-temps) devraient être traités de manière égale (financements, vulgarisation/médiation, jugement de la communauté) ?
 - Si oui, pourquoi cela n'est visiblement pas le cas ?
 - Si non, qu'est-ce qui fait les modèles dominants ?
 - 4) Pensez-vous que Λ CDM, le modèle de halo, et la cosmologie actuelle sont objectifs ?
 - 5) Diriez-vous « structure » ou « structures » à grande échelle ? Et quelle serait la différence avec la toile cosmique ?
 - 6) Qu'est-ce qui parvient de notre connaissance de la structure de l'Univers au grand public ? Quel effet cela a sur l'imaginaire commun ?
 - 7) Comment envisagez-vous le futur de la cosmologie, et quelles différences faire avec son passé ?
 - 8) Les tensions cosmologiques et les points d'ombres actuels annoncent-ils un changement de paradigme ?
 - 9) Quelles questions d'épistémologie vous intéressent concernant la cosmologie et la structure à grande échelle de l'Univers ? Quelles réponses y donneriez-vous ?
-

La dernière question en particulier permet aux personnes entendues de développer sur un ou des sujets qui les intéressent particulièrement, qui ont potentiellement émergé au cours de la discussion ou à la lecture préalable du questionnaire. Nous le verrons, chaque réponse a été différente et un ensemble de questions intéressantes a été soulevé. Si à chaque fois le questionnaire a été adapté, notamment en ce qui concerne l'ordre des questions pour fluidifier la discussion, chaque entretien apporte des éléments de réponse à chacune des questions présentées. Les dix entretiens se sont déroulés entre le 8 février et le 21 mars 2024, la moitié en français et l'autre en anglais, une moitié en ligne et l'autre sur le terrain, que ce soit un institut ou observatoire, ou le domicile d'un chercheur. En même temps que le questionnaire, les intervenants et intervenantes ont reçu la consigne de parler autant que voulu sur les

questions qui les inspiraient le plus. Voici une courte¹⁰⁷ présentation de chaque intervenant ou intervenante, dans l'ordre chronologique des entretiens¹⁰⁸ :

08/02/2024 - Benjamin L'Huillier : professeur assistant français à l'université de Sejong, en Corée du Sud, il utilise les données cosmologiques les plus avancées possibles pour tester la validité de Λ CDM et ses hypothèses sous-jacentes. Il étudie plusieurs sondes cosmologiques à grande échelle comme les supernovae Ia, les oscillations acoustiques des baryons, ainsi que les distorsions dans l'espace des redshifts. Il s'intéresse en particulier à l'énergie noire et la matière noire, et la possibilité d'un changement de paradigme en cosmologie si Λ CDM est falsifié, ou si les tensions actuelles persistent et ne sont pas des erreurs d'observations et de mesures. L'entretien s'est déroulé en ligne, avec caméras, après une rapide rencontre en personne lors d'une de ses visites pour une conférence à l'observatoire astronomique de Strasbourg. B. L'huillier était à Séoul lors de notre appel.

14/02/2024 - Roland Lehoucq : chercheur français au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), enseignant, auteur de livres et de travaux de médiation et de vulgarisation en sciences physiques et en science fiction qui lui valent plusieurs distinctions, il s'intéresse dans son travail de recherche à la topologie cosmique, *i.e.* la forme, la courbure et la géométrie de l'Univers et de l'espace-temps à grande échelle. L'entretien s'est déroulé en ligne, avec caméras.

20/02/2024 - Jim Peebles : de nationalité canadienne et actuellement Professeur émérite à l'université de Princeton, il a entre autres reçu le prix Shaw d'astronomie en 2004 et le prix Nobel de physique en 2019 pour ses contributions majeures aux domaines de l'énergie noire, de la matière noire, du Big Bang et de la nucléosynthèse primordiale, de la structure à grande échelle de l'Univers ainsi qu'à la prédiction du fond diffus cosmologique. J. Peebles était dans son domicile à Princeton lors de l'entretien qui s'est donc déroulé en ligne et avec caméras.

27/02/2024 - Simon White : l'un des quatre directeurs de l'Institut Max-Planck d'astrophysique à Garching bei München et de nationalité britannique, il a notamment

¹⁰⁷ On essaie de donner les éléments essentiels justifiant de l'intérêt d'un entretien avec chaque intervenant ou intervenante. Ces descriptions ne peuvent bien sûr pas être complètes et vont omettre certains éléments comme la formation académique ou de potentielles distinctions et récompenses.

¹⁰⁸ Notons que les présentations correspondent à la situation de chaque chercheur ou chercheuse au moment de l'entretien. Certaines carrières sont encore jeunes et vont continuer d'évoluer au-delà de ce qui est présenté, sommairement d'ailleurs, ici.

travaillé sur la formation des galaxies, la formation des grandes structures ainsi que Λ CDM, et a travaillé avec Martin Rees sur l'influence de halos de matière noire, dont il a proposé une structure universelle avec Julio Navarro et Carlos Frenck, sur les propriétés des galaxies. Il est impliqué dans de nombreux travaux de simulations numériques dont la *Millennium Simulation* suivant la formation de plus de deux millions de galaxies. Nous nous étions rencontrés à l'Institut Max Planck à Garching bei München en 2022, et nous avons réalisé l'entretien en ligne avec caméras.

01/03/2024 - Katarina Kraljic : chargée de recherche à l'observatoire astronomique de Strasbourg, elle étudie en particulier la répartition des galaxies dans la structure à grande échelle de l'Univers à partir d'observations astronomiques, ainsi que le rôle de leur position sur leurs propriétés, notamment et en particulier leur morphologie et leur activité. Nous nous sommes rencontrés à l'observatoire astronomique de Strasbourg en 2023, et c'est dans son bureau à l'observatoire que nous nous sommes entretenus.

05/03/2024 - Françoise Combes : astrophysicienne française et titulaire de la chaire « Galaxies et cosmologie » au Collège de France, avec notamment un cours sur la structure à grande échelle de l'Univers en 2018-2019, elle a entre autres reçu la médaille d'or du CNRS en 2020 pour ses travaux sur la physique galactique dans un contexte cosmologique. Elle étudie différents modèles de matière noire ainsi que des alternatives de gravité modifiée. Elle est également autrice de nombreux ouvrages de médiation et de vulgarisation en physique et en astronomie et astrophysique. Lors de l'entretien que nous avons fait en ligne et filmés, F. Combes était à Paris.

11/03/2024 - David Alonso : de nationalités espagnole et britannique, il est professeur à l'université d'Oxford. Il s'intéresse à l'histoire de l'Univers ainsi qu'à sa structure à grande échelle. Il est membre du *Legacy Survey of Space and Time* qui vise à étudier l'énergie noire, ainsi que du *Simons Observatory* qui cherche à déterminer l'impact de potentielles ondes gravitationnelles primordiales sur le fond diffus cosmologique. Nous nous connaissons personnellement depuis 2022, et nous avons discuté dans son bureau à Oxford.

12/03/2024 - Rebecca Smethurst : connue sous le nom Dr. Becky sur YouTube et dans sa carrière de médiation et vulgarisation, cette astrophysicienne observationnelle britannique travail comme chercheuse junior à l'université d'Oxford sur le rôle des trous

noirs supermassifs dans l'activité stellaire des galaxies. Sa carrière scientifique ainsi que celle de communication scientifique lui ont valu plusieurs récompenses. Nous nous étions rencontrés en 2022 et l'entretien s'est déroulé en ligne entre l'institut de cosmologie de l'université d'Oxford et son domicile.

15/03/2024 - John Peacock : professeur britannique à l'*Institute for Astronomy* à l'université d'Édimbourg, dont il a été le directeur, il a entre autres reçu le prix Shaw d'astrophysique en 2014 et la médaille d'or de la *Royal Astronomical Society* en 2023. Il s'intéresse à la structure à grande échelle de l'Univers ainsi qu'à la structure des galaxies. Il a été responsable pour le *2dF Galaxy Redshift Survey* qui a participé à la découverte de la structure à grande échelle de l'Univers. Nous nous sommes entretenus à son domicile, à Edinburgh.

21/03/2024 - Aniruddh Herle : doctorant de nationalité indienne à l'observatoire de Leiden aux Pays-Bas, il s'est d'abord intéressé au lentillage gravitationnel fort et à la nature de la matière noire à l'Institut Max Planck d'astrophysique à Garching bei München puis étudie actuellement le lentillage gravitationnel faible et l'alignement intrinsèque des galaxies au sein de la toile cosmique. Nous nous connaissons personnellement depuis 2022 et nous nous sommes entretenus en ligne, alors qu'il était à Leiden, en étant filmés.

Comme ces présentations l'indiquent, en dix entretiens sont représentées diverses origines et universités. Par ailleurs, différents domaines de recherche sont représentés et lorsque le lien avec le sujet précis de la structure à grande échelle de l'Univers est plus faible, la personne concernée apporte un point de vue jeune dans le cas d'Aniruddh Herle, ou de médiateur ou médiatrice dans les cas de Roland Lehoucq ou Rebecca Smethurst par exemple. Ces entretiens sont donc représentatifs de différentes générations, de différentes écoles de pensée et de différentes manières de travailler au quotidien. Ces éléments font partie des critères de sélection pour les entretiens, mais on retiendra aussi que certaines personnes étaient faciles à contacter directement ou par un intermédiaire, ce qui est commode à la fois pour rencontrer les personnes les plus pertinentes possibles ainsi que pour les rencontrer tôt dans le processus de construction de ce mémoire. Quand aucun contact direct ou quasi-direct n'était possible, les chercheurs et chercheuses ont toujours rapidement répondu aux e-mails et cela avec une attitude très bienveillante et en se montrant intéressés par le

sujet. Par ailleurs, une fois les dix entretiens réalisés, il aurait été trop chronophage et peu fructueux d'en réaliser plus, bien que d'autres personnes aient été recommandées. Dans le cas de ces personnes, le critère de sélection principal a été leur légitimité à s'exprimer au sujet de la structure à grande échelle de l'Univers, de l'histoire de la cosmologie, ou de l'imaginaire du grand public et des scientifiques au sujet de l'Univers. Concrètement, la liste des intervenants et intervenantes a évolué au fur et à mesure de la réalisation des entretiens. Les premières personnes interrogées sont celles qui ont été disponibles le plus rapidement après avoir répondu positivement à l'e-mail de prise de contact, peu importe leur situation géographique (les appels en ligne simplifiant beaucoup l'ensemble du processus). Il y a nécessairement une grande part d'aléatoire dans l'ordre des entretiens, et ceux menés à Oxford ou à Edimbourg ont dû se faire sur une seule semaine à l'occasion d'un voyage dans ces villes. Le hasard n'a cependant que peu sa place dans le choix de ces personnes : la majorité avait été désignée par des membres de la communauté astrophysique à Strasbourg ou Oxford comme légitimes et intéressants, et bien qu'il y ait une forte part de subjectivité dans les relations humaines, même au sein de la communauté scientifique, les présentations précédentes viennent appuyer cette tentative d'objectivité. Finalement, il semble que ce panel d'entretiens est nécessairement subjectif, mais qu'un effort a été fait pour représenter la communauté scientifique, et réaliser les entretiens dans des situations équivalentes malgré la différence entre des interactions dans un bureau, dans un logement, et en ligne. Durant les entretiens, trois coupures d'enregistrement ont eu lieu. Ces coupures causées par des interventions extérieures ou des problèmes de logiciels d'enregistrement n'ont jamais complètement modifié la discussion ni sa continuité.

De chaque entretien reste au moins un enregistrement audio non disponible et une transcription de cet enregistrement à l'écrit, en annexe, dans la langue d'origine et revue avant analyse par la personne concernée. Quelques anonymisations ou censures de termes, phrases ou parties ont eu lieu, mais rien qui puisse affecter le fond du discours. Pour éviter toute perte ou tout ajout d'information, les citations seront données dans la langue utilisée pendant l'entretien et non traduites. L'analyse sera cependant faite en français.

2.2 Analyse

Dans une logique latourienne, l'analyse de ces entretiens suit le principe de symétrie : la nature et la société ne sont pas des objets séparés, et la science n'est pas dissociable du contexte sociopolitique dans lequel elle se fait. Aucun acteur du réseau associé à la structure à grande échelle de l'Univers n'occupe de place privilégiée, et tous les propos recueillis doivent être traités de manière cohérente : ils sont tous également importants. On s'efforcera de montrer ce que les chercheurs et chercheuses font de leur objet de recherche autant que l'inverse, à savoir l'influence qu'a cet objet sur la recherche scientifique et comment il nous apparaît.

Tout d'abord, les entretiens permettent une étude des images et des métaphores qui accompagnent la structure à grande échelle de l'Univers. Lorsque des images ou des idées en lien avec des représentations graphiques sont mentionnées dans les discussions, il faut comprendre d'où elles viennent et qui les a produites quand elles ont été couchées sur le papier pour les analyser. Il faudra alors nous intéresser à la question des images en cosmologie plus en détail, notamment à la manière donc une simulation ou des observations astronomiques permettent de créer des images, et la part d'interprétation qui entre en jeu, mais aussi aux critères de sélection qui font que certaines images prévalent. Ces deux éléments sont traités par Catherine Allamel-Raffin notamment dans deux articles tout à fait à propos dont les titres sont « La complexité des images scientifiques. Ce que la sémiotique de l'image nous apprend sur l'objectivité scientifique »¹⁰⁹ et « Quelles images les physiciens insèrent-ils dans leurs publications ? Les critères de sélection adoptés en physique des matériaux et en astrophysique »¹¹⁰, on pourra alors nous référer à ces travaux pour mener notre analyse.

Ensuite, nous pouvons analyser quelles autres représentations sont mentionnées, notamment des représentations plus abstraites et parfois plus mathématiques de la structure à grande échelle de l'Univers. Quels objets, mots et concepts sont invoqués pour en parler, pour la décrire, pour l'expliquer et l'interpréter ? En particulier, les

¹⁰⁹ Allamel-Raffin, C., La complexité des images scientifiques. Ce que la sémiotique de l'image nous apprend sur l'objectivité scientifique, *Communication & Langages*, vol. 149, 2006, pp. 97-111. DOI : <https://doi.org/10.3406/colan.2006.4620>

¹¹⁰ Allamel-Raffin, C., Quelles images les physiciens insèrent-ils dans leurs publications ? Les critères de sélection adoptés en physique des matériaux et en astrophysique, *Visible*, vol. 10, 2013. DOI : <https://doi.org/10.25965/visible.507>

entretiens révèlent une diversité dans les interprétations et les choix de vocabulaires possibles pour parler de l'Univers. Ceci peut être étudié à travers la notion de version développée dans l'ouvrage *Starmaking*, et permet de poser la question du réalisme en cosmologie. Dans cet ouvrage, Goodman et Elgin soutiennent que nous n'accédons jamais au monde directement, mais toujours à travers des versions construites de ce monde. Une version est donc une représentation, une interprétation ou une description de la réalité. Chaque version est une façon spécifique d'organiser et de comprendre le monde, influencée par nos langues, nos cultures, nos théories et nos pratiques, mais toutes les versions ne se valent pas, il existe des critères scientifiques de cohérence et de testabilité, et des critères artistiques d'originalité et d'expressivité. Nous soumettrons alors les entretiens à une critique argumentée par cette approche.

Ces entretiens permettent aussi d'étudier la question du holisme structurel à partir des différences entre structure (au singulier) et structures (au pluriel). Cette notion existe d'ailleurs dans d'autres domaines des sciences physiques que la cosmologie, principalement en physique quantique et en théorie des champs, il sera alors possible de faire des liens et des différences entre ces domaines. Nous verrons les liens faits dans les entretiens entre différents types de structures, et nous étudierons la question de la place des vides cosmiques dans la structure à grande échelle de l'Univers. Cette partie du prochain chapitre se rapporte à la théorie philosophique du structuralisme, cependant il en existe deux formes principales qui sont le structuralisme épistémologique selon lequel les structures sont davantage des outils pour organiser les connaissances et représentations du monde, et le structuralisme ontique selon lequel les structures et relations entre et au sein des structures sont la substance fondamentale du réel. Nous verrons ce que ces deux approches apportent à l'interprétation des entretiens.

Finalement, nous pouvons analyser les portes que cette notion ouvre en cosmologie. La structure à grande échelle de l'Univers est, entre autres, un exemple de cosmographie moderne, *i.e.* de manière de représenter graphiquement le monde. Ceci est à comparer avec les cosmographies précédant les grandes découvertes et observations astronomiques du demi-siècle dernier, et ouvre la discussion sur le futur de la cosmologie. Nous verrons aussi quels liens font les personnes participant aux entretiens entre cet objet de la cosmologie et d'autres domaines scientifiques, ainsi que les questions épistémologiques que ces chercheurs et chercheuses se posent à partir de

réflexions au sujet de leur domaine de recherche. Ces échanges soulèvent des interrogations sur la nature de la réalité et sur la manière dont les structures observées influencent notre compréhension de la physique et en particulier de ce qu'est un modèle, et de ce qu'est un « bon » modèle. Ces éléments sont à la limite du sujet de ce mémoire, mais nous pouvons toutefois en tirer les grandes lignes.

Remarquons que sur l'ensemble des entretiens, il a fallu sélectionner des citations pour illustrer certaines pensées et développer les points d'intérêt du Chapitre 3. Bien sûr, un entretien de plusieurs dizaines de minutes ne peut pas être résumé ni être correctement représenté par un nombre limité de citations. De plus, certaines idées sont partagées par plusieurs personnes interrogées, mais il serait déraisonnable d'exposer l'ensemble des citations allant dans le sens d'une idée en particulier. Dans ce contexte, rappelons que les propos développés par la suite utilisent aussi fidèlement et raisonnablement que possible les propos des cosmologistes participant, mais n'engagent pas leur responsabilité. Ce mémoire n'engage que la responsabilité de son auteur.

Chapitre 3 : Éléments de philosophie sur l'Univers

Dans son essai « The physicists philosophy of physics », Peebles reprend les hypothèses qu'utilisent consciemment ou non les scientifiques dans leur activité de recherche. Il rappelle, en concluant le chapitre correspondant à l'introduction de ces hypothèses, que comme le physicien et auteur américain Steven Weinberg le disait dans le chapitre *Against Philosophy* dans son ouvrage *Dreams of a Final Theory*,

« *Physicists do of course carry around with them a working philosophy. For most of us, it is a rough-and-ready realism [but] we should not expect [philosophy] to provide today's scientists with any useful guidance about how to go about their work or what they are likely to find.* »¹¹¹

Selon Weinberg, l'activité scientifique se fait dans un contexte philosophique, mais ne requiert pas ni ne demande l'avis de la philosophie au sujet du monde. Si les communications entre scientifiques et philosophes étaient importantes jusqu'au début du XX^e siècle, il est vrai que cette tradition s'est en grande partie perdue aujourd'hui, et que le stéréotype prévalant est plutôt que la science ne fait pas grand usage de la philosophie. Dans ce Chapitre 3, nous nous attacherons à montrer que, au moins dans le contexte de la recherche sur la structure à grande échelle de l'Univers, ceci n'est pas tout à fait vrai, voire majoritairement faux. Les entretiens présentés en Chapitre 2 sont ici analysés en suivant l'organisation annoncée en 2.2, et servent à montrer comment science et épistémologie communiquent et se servent mutuellement, que ce soit inconsciemment ou consciemment, dans l'esprit, les discours et l'activité des cosmologistes. En ce sens, ce travail partage l'ambition de Peebles et, il faut l'espérer, peut montrer une utilisation plus enthousiasmante de concepts épistémologiques en sciences de la nature.

¹¹¹ Weinberg, S., *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature*, New York, Knopf Doubleday Publishing Group, 1992, 352 p.

3.1 Représentations de la structure à grande échelle de l'Univers

Cette partie et la partie suivante font l'usage implicite des discussions autour de la notion de version compilées dans *Starmaking*. Nous ne discutons pas de toutes les alternatives aux propositions philosophiques de Goodman, mais plutôt de son travail et des nuances qui y sont apportées par les autres auteurs présents dans le livre. Goodman introduit la notion de version. Chaque expérience personnelle du monde provoque la création de représentations, qui sont alors des objets propres à l'humain, et ces versions font des mondes. En ce sens, Goodman défend la thèse selon laquelle les objets physiques sont des créations humaines, et ceci est également valable pour la structure à grande échelle de l'Univers, et plus généralement pour le monde tout entier : « *we make versions, and right versions make worlds* ». Lorsque nous évoquons ici des représentations, celles-ci sont à comprendre comme des versions selon Goodman avec les ajouts de Elgin et Rorty. Nous laissons de côté le réalisme modéré défendu par Putnam, Lewis et Scheffler car, comme nous allons le montrer plus tard, il ne correspond que très peu à ce qu'exposent les entretiens. Selon Elgin, les versions sont non seulement des constructions humaines, mais aussi des outils cognitifs. Elle insiste sur l'idée que ces versions permettent de mieux comprendre et d'interagir avec le monde, et montre que différentes versions peuvent être évaluées non pas en termes de vérité objective, mais en termes de leur utilité, cohérence interne, et capacité explicative. Rorty apporte une vision très pragmatique de la notion de version. En effet, selon lui, la valeur d'une version n'est pas son objectivité comme le veut Goodman, mais sa capacité à se révéler pratique. Ces aspects cognitifs et pratiques des représentations sont essentiels pour comprendre comment pensent les scientifiques.

Tout d'abord, intéressons-nous à l'imaginaire du grand public lorsqu'on parle de l'Univers. Sur ce point, les cosmologistes interrogés sont unanimes : peu voire très peu des découvertes et observations astronomiques sont comprises en dehors du milieu académique. Plusieurs ont fait la remarque que le grand public est mal défini, et l'on retrouve en pratique trois grandes catégories : les personnes qui n'ont aucune formation scientifique et qui ne s'y intéressent pas, les personnes qui ont une formation scolaire en

sciences de la nature, et les personnes qui, peu importe leur formation, s'intéressent à ces sujets par des conférences, de la vulgarisation, des vidéos et autres médias. En particulier, les domaines de recherche que sont la matière noire et l'énergie noire, dont dépend la structure à grande échelle de l'Univers, sont mal compris bien qu'ils soient ceux qui intéressent le plus, principalement car ils apparaissent comme mystérieux et que les cosmologistes eux-mêmes reconnaissent volontiers qu'ils ne savent pas exactement ce qui se cache sous ces termes d'ailleurs dénoncés comme mal choisis :

« It is an unfortunate naming. It sounds a bit scary if you don't know what it is. But there is some rationale behind those words, as it falls in this realm of the unknown. » -

A. Herle

« People usually get really, really confused with dark energy, dark matter and the Big bang, for example. It's very easy to conflate the expansion of the universe with the existence of dark energy. [...] The nomenclature itself trips people off quite a lot. [...] Very often people think of [dark matter and dark energy] as being the same thing. » - D.

Alonso

Par ailleurs, les échelles auxquelles font références les différents objets astrophysiques sont aussi peu comprises :

« The one thing that I come across a lot is that the general public do not understand the distinction between the scales of the Universe. So, for example, galaxy versus universe often gets used interchangeably by the public and people are not aware of the scales beyond that. » - R. Smethurst.

« En astrophysique, ce sont des échelles qui sont à la fois gigantesques et microscopiques. Donc de facto, et parce que la science en général s'est construite contre les apparences, on est déjà un peu dans un autre monde. On pense contre les apparences du monde et contre ce que l'on est habitué à voir du monde quotidien. C'est difficile pour le grand public et pour les acteurs de l'astrophysique et de la science en général de penser contre soi-même et de penser contre les apparences du monde. » - R.

Lehoucq

Par conséquent, l'imaginaire commun n'est pas aussi riche que ce que l'histoire exposée en Chapitre 1 pourrait indiquer. Nous reviendrons sur ce point en conclusion, mais notons tout de même que les intervenants et intervenantes, notamment R. Lehoucq, B. L'Huillier et A. Herle, insistent sur le fait que pour créer un imaginaire cohérent et aussi scientifiquement correct que possible chez le grand public, des efforts doivent être faits par les cosmologistes pour expliquer qu'en effet, il reste des questions encore non

résolues, mais qu'on en sait tout de même beaucoup plus qu'il y a un siècle sur l'Univers et entre autres sur ses plus grandes structures et leur évolution.

Penchons-nous maintenant sur les images invoquées par les cosmologistes dans leurs discours. Cette attention portée aux images est motivée par les mêmes raisons qu'exprime Allamel-Raffin : « *Le travail scientifique est souvent renvoyé, soit à la simple observation, soit à la pure formalisation, soit, inversement, au statut de langage ou de discours plus ou moins comparable aux autres. Toutes options qui sous-estiment l'apport particulier des images en science : celles-ci ne sont ni des données brutes de l'expérience, ni de simples fictions, elles permettent un type de médiation particulier avec le réel* »¹¹². En cosmologie, la plus évidente de ces images est sûrement la plus célèbre, à savoir la toile cosmique. Elle n'est pas tant une image qu'une formule utilisée pour désigner simplement ce que l'on perçoit sur les images de la structure à grande échelle de l'Univers. A ce sujet, deux tendances principales se dégagent des entretiens. La première, assez directe, veut que la toile cosmique ne soit pas plus, ou pas beaucoup plus, qu'un terme pratique pour désigner la forme de la distribution des galaxies à grande échelle :

« *I think cosmic web is a colloquial term for the large scale structure.* » - R. Smethurst

« *La toile cosmique, c'est l'ensemble des filaments. C'est pour ça qu'on parle une toile d'araignée, on a l'impression de filaments qui se croisent. Ça ressemble à des neurones, ça ressemble à beaucoup de choses et en effet, ce sont des filaments, [...] c'est la grande structure.* » - F. Combes

« *La structure ou la structuration de l'Univers, c'est une question générale qu'on peut poser et telle qu'on le comprend actuellement, cette structure ou cette structuration est sous forme d'une toile cosmique.* » - B. L'Huillier

La deuxième tendance que l'on retrouve, bien que plus nuancée, n'entre pas en contradiction avec les propos précédents. Elle consiste à dire que la toile cosmique est non seulement une image pratique ou utile, mais aussi que nommer ainsi ce que l'on observe porte un sens plus profond. Pour Peebles, cette description peut biaiser la manière dont l'esprit traite l'information qu'il obtient par les observations, et White insiste sur le fait que l'interprétation visuelle d'une image de la structure à grande échelle dépend en fait de ce sur quoi l'on insiste dans la représentation graphique. Finalement, Peacock ajoute à cette discussion l'origine de cette manière de penser les

¹¹² Allamel-Raffin, C., La complexité des images scientifiques, p. 97.

représentations graphiques, et indique qu'elle se trouve en fait plutôt dans la théorie que dans les observations : les simulations numériques font apparaître, par l'approximation de Zel'Dovich, des structures filamenteuses qui se rejoignent en des noeuds ce qui, selon les manières habituelles de montrer les résultats de ces simulations, entraîne une image similaire à une toile d'araignée (ou un filet de pêche pour Peebles) qui divise l'espace en différentes sous-structures et qui prend le dessus sur le champ de gravitation qui lui a pourtant donné naissance. Dans cette cosmologie moderne, les simulations sont alors une source plus importante que les observations pour représenter l'Univers aux grandes échelles.

« It is true that the name provides a connotation which can bias your thinking. The cosmic web is very evocative of a web, and especially as in a fisherman's web. It is a good description of the observations of how the galaxies are distributed : there are these fine filamentary-like structures. » - J. Peebles

« So you then see pictures [...] of the galaxy distribution [...] that look kind of vaguely like a neural network. And this is what people think of when they think about the cosmic web. [...] But it is very much dependent on the visual representation that you have. You can make visual representations which emphasise the densest structures and where the low density connections between them are less evident, and then it looks much less web-like. » - S. White

« The cosmic web is often used as a term for a subdivision of space into interiors of different topological characters. So typically one would talk about voids, sheets, filaments and nodes, and those represent places where the gravitational potential field has different properties. And those distinctions are useful, first of all because they match what you see visually. Obviously, you can create mathematical tools out of thin air, but the useful tools are the ones that you feel are capturing something of the impression that you gain when you inspect the data yourself. [...] The cosmic web is an interesting thing actually. Did it come from observations in the real Universe or did it come in theory? I think the honest answer is it came more from the theory, from making simulations of non-linear gravitational collapse. » - J. Peacock

Par ailleurs, Alonso fait une différence entre les images de toile cosmique et les images de filaments et de vides. Selon lui, la toile cosmique est un squelette morphologique, donc une représentation visuelle qui souligne la forme des structures observables, mais qui ne montre pas ce qui les crée. Ce qui crée ces structures, et qui n'est pas représenté par la toile cosmique, serait plutôt une carte des inhomogénéités dans la distribution de

matière, comme par exemple les cartes du fond diffus cosmologique en Figure 5 :

« So I think for me large-scale structure is anything that studies large-scale inhomogeneities. The cosmic web is kind of a morphological skeleton for this structure, that's a more narrow statement than what tells you something about the non gaussianity in the distribution of matter which is what actually gives rise to filaments and huge void. » - D. Alonso

Au sujet de la carte du fond diffus cosmologique faite par Planck, Lehoucq rappelle d'ailleurs que ce genre d'observations du ciel complet est modifié pour pallier le manque d'informations dans la direction de la Voie lactée qui cache alors les arrières plans.

« Sur la carte complète de Planck, ils découpent la Voie Lactée entièrement et puis ils font de l'inpainting pour compléter les bouts qu'ils ont ôtés parce que c'est impossible de voir le fond diffus cosmique à travers le plan de la Voie Lactée. [Si l'image] était montrée réelle, il y aurait un énorme trou dans le plan de la Voie Lactée et on n'observe bien que ce qu'il y a autour. » - R. Lehoucq

D'autres aspects géométriques de l'Univers sont mentionnés, et sont plus subtils à transcrire sur des graphiques. On trouve chez Lehoucq des évocations de la topologie cosmique, qui bien qu'étant un domaine différent de l'étude de la structure à grande échelle de l'Univers, propose des figures permettant de représenter à deux dimensions des exemples de formes que pourrait prendre un Univers fini sans bords. L'Huillier, qui travaille sur des comparaisons de différents modèles cosmologiques, parle entre autres de la courbure de l'Univers qui bien qu'elle apparaisse nulle aujourd'hui pourrait être légèrement non-nulle et ainsi impliquer un Univers non-plat, et Peebles parle de la théorie des cordes cosmiques qui pourrait expliquer la structuration de la matière à grande échelle à partir de lignes d'énergie et de masse. Ces idées sont typiquement représentées respectivement par des distributions de probabilité sur les paramètres cosmologiques de base ou des diagrammes décrivant les interactions entre particules ou entre cordes. Si ces images ne sont pas directement des représentations de la structure de l'Univers, elles en disent tout de même quelque chose. En pratique, ces images font partie d'études cherchant entre autres à comprendre cette structure.

« Au sens propre, on suppose un univers plat, mais en fait c'est très facile d'inclure aussi une courbure. [...] On voit souvent ça comme des contours : plus le pouvoir de contrainte [des observations sur la courbure] est fort, plus ces contours vont être petits.

» - B. L'Huillier

« There was a notion back in the last century, in the 1990s, perhaps even earlier, of cosmic strings, lines of energy that in some versions of fundamental theory of particle physics are predicted. Cosmic strings are lines of mass produced by a field. It's an elegant theory. For a time, people were arguing this might be the way the Universe is built. As it's going, by the way we saw it, it didn't work. But the idea of a cosmic string is still very relevant, and what effect it would have is in running across the Universe, it would produce concentrations of matter and maybe even close to flat sheets. » - J. Peebles

Si les images font partie des outils de la recherche scientifique, elles la complexifient également : *« Le fait même qu'elles soient mixtes modifie encore la nature des difficultés rencontrées par les scientifiques lors de la production de ces images. En effet, quand un problème apparaît, le scientifique ne sait pas a priori s'il est lié à l'aspect symbolique de l'image (c'est-à-dire aux programmes informatiques) ou à l'aspect indiciaire de l'image (au fonctionnement du télescope, de la caméra CCD, des perturbations atmosphériques) ou encore aux choix que le scientifique a établis lors du processus de production de l'image. Là encore, le facteur humain n'a pas été évacué, loin s'en faut ! »*¹¹³, comme l'indique ici Allamel-Raffin, introduire des images dans la science implique d'introduire des images dans les choix scientifiques, et ajoute une couche de détermination à ces choix.

Les différents propos précédemment exposés montrent un certain attachement aux aspects fondamentaux de la cosmologie chez les intervenants et intervenantes. En général, les discussions au sujet de la toile cosmique ou de comment voir et représenter la structure à grande échelle mènent à des réflexions sur ce qui crée cette structure et sur l'Univers qui la contient. White ajoute à cela :

« It is clear that the structure is not like a soap foam, for example, where there are very clear bubbles which are made of air, which are separated by walls made of soapy water. That is not a good description of the structure in the universe. And so whether things look separated or not is very, very dependent on how you define them. » - S. White

Ainsi, si des images sont utilisables pour discuter de l'Univers et de sa structure, d'autres sont aussi des exemples de ce à quoi cette structure ne ressemble pas, et de répartition de matière qui ne correspond pas à ce qui est observé. Cette manière de

¹¹³ Allamel-Raffin, C., La complexité des images scientifiques, p. 110.

procéder par éliminations est pertinente en sciences physiques, et a notamment été utilisée pour départager les principales idées de formation de galaxies à la fin du XX^e siècle. Les sciences physiques fonctionnent davantage par élimination des idées fausses que par affirmation des idées vraies, car la notion de vrai est extrêmement subtile et rien n'assure qu'il puisse exister des modèles correspondant exactement à la nature.

On trouve plus aisément des métaphores et des propos centrés sur les images utilisables pour parler de structure hors des termes usuels de la cosmologie. S'autoriser à utiliser du vocabulaire d'autres domaines scientifiques, c'est s'autoriser à parler en analogies, et donc avoir des propos plus libres et plus illustratifs. Ainsi, Herle utilise la notion de structure architecturale pour détailler sa pensée. De même, la paléontologie, avec en particulier la reconstruction d'un système complet à partir d'un squelette est utilisée deux fois, par Lehoucq et Peebles.

« The building has a structure. If the building is being built and they have just put iron pillars, they put the structure up. The structure upon which to build the building. So if you zoom way out, then it's the large-scale structure. But there are structures within this thing. So if you ask what a halo is, it is a structure and there are lots of halos within the large-scale structure. » - A. Herle

« En paléontologie, ils ont un bout d'os et avec ça ils reconstruisent un dinosaure entier parce qu'ils ont des modèles, des représentations d'êtres vivants, des comparaisons d'os de tout un tas d'êtres. Ils reconstruisent l'être complet, y compris sa peau et sa démarche. » - R. Lehoucq

« This is an epoch of time when people are gathering data in great abundance and learning from it what happened. People look at fossils and deduce the presence of unlikely objects like these massive dinosaurs. Astronomers now are examining, in as much detail as they can master, the way galaxies are distributed and the way the galaxies are. » - J. Peebles

L'analogie entre les galaxies et les dinosaures est intéressante. En effet, nous l'avons vu, la profondeur à laquelle les galaxies se situent est connue par l'intermédiaire du *redshift*. Comme la lumière se déplace dans l'espace-temps à une vitesse finie, plus un objet est lointain, plus la lumière qui nous parvient a été émise il y a longtemps, et donc plus l'image obtenue est une image de la galaxie telle qu'elle était il y a longtemps. En pratique, les relevés astronomiques observent donc des restes d'époques cosmiques révolues, et les cartes du ciel sont construites à partir de lumière déjà âgée. Lehoucq

parle même de la reconstruction de la démarche et de la peau des dinosaures à partir de fossiles. Pour l'Univers, on reconstruit son évolution et son contenu à partir d'une répartition observée aujourd'hui de la lumière émise par les concentrations de masses. Ces analogies montrent aussi que la notion de structure à grande échelle de l'Univers contient plus que des images. Ces images, comme nous l'avons montré, sont de différents types. Allamel-Raffin en donne une classification en astrophysique : il existe des images sources constituées de données brutes, des images retraitées, des images de simulation et de modélisation (de synthèse) visant à étudier le produit retraité¹¹⁴. En pratique, et on le voit ici, les images retraitées et de simulation créent une base pour l'imaginaire des scientifiques et pour des discours qui se veulent objectifs et mesurés. Les images de synthèse sont davantage illustratives et ce sont elles qui font naître des discours métaphoriques et plus libres, plus adaptés à l'interprétation de chaque individu. Si elles sont fabriquées dans un institut ou un laboratoire et produites à partir d'une combinaison d'instruments et de traitements, les images n'y sont pas confinées. Elles évoluent et deviennent des pensées plus larges qui à leur tour influencent ce que les scientifiques perçoivent lorsqu'ils observent une représentation graphique. La nature de ces images n'est pas unique, et c'est aussi ce que souligne Allamel-Raffin au sujet des images du CfA : une classification précise et exhaustive est inenvisageable, et chaque type d'image est de nature mixte¹¹⁵. De plus, certains éléments sont fixes, comme l'image sur le papier ou sur l'écran, mais l'interprétation est toujours susceptible de changer.

3.2 Ce que regroupe la notion de structure à grande échelle de l'Univers

Dans l'article « Quelles images les physiciens insèrent-ils dans leurs publications ? Les critères de sélection adoptés en physique des matériaux et en astrophysique », Allamel-Raffin souligne quatre critères majeurs influant sur la sélection des images à introduire dans les publications scientifiques : les caractères informatif et novateur, la clarté et la concision de l'image, ainsi que sa pertinence en tant que support du discours

¹¹⁴ Allamel-Raffin, C., La complexité des images scientifiques, p. 101.

¹¹⁵ Allamel-Raffin, C., La complexité des images scientifiques, p. 102-104.

scientifique. En effet, nous avons vu que ces éléments se retrouvent à la fois dans l'histoire des représentations de la structure à grande échelle de l'Univers et dans ce que disent de ces images les personnes interrogées. Ajoutons à cela que les images n'existent pas seules et sont intrinsèquement liées à des équations et des concepts scientifiques. Les représentations de la structure à grande échelle de l'Univers sont graphiques, mentales, mais aussi mathématiques, conceptuelles et philosophiques. Tout d'abord, les équations mathématiques de la physique, et en particulier de la cosmologie, sont perçues à la fois comme un moyen de décrire et de prédire la répartition des galaxies. Peacock insiste sur leur importance puisque ce sont les quantités mises en équation qui précisent l'objet que l'on étudie, et que les objets définis à partir de la quantité fondamentale qu'est la densité, représentée par le champ de densité, sont moins significatives physiquement :

« If you talk about structures it's like botany. The way I look at it as a physicist is you say : what's the quantitative thing that you're dealing with? And that is the position-dependent density field, a density which is a function of space and time. End of the story. You can analyse that in very quantitative ways by definitions of what you mean by a void, filaments, superclusters and so on. But these are human made definitions. » - J. Peacock

Cependant, il ne considère pas que de telles équations fassent partie de la notion de structure à grande échelle. Il y a ici une contradiction entre ses propos et ceux, par exemple, de Kraljic qui estime que cette notion regroupe tout un ensemble de concepts mathématiques et géométriques.

« - So would the large-scale structure of the Universe also include some materials, or some terms and mathematical equations?

- No, it's broadly the matter. It's whatever fields are necessary to describe everything that's going on. So there are fluctuations in spacetime curvature, fluctuations in the density of matter, there are fluctuations in the phase space distribution of photons, you know, but all these things are specified by a certain number, a limited number of functions of the position. So there's a complete description at the classical level, at least, of everything in the Universe in terms of the number of fields. » - J. Peacock

« Dans « large-scale structure of the Universe », tu n'as pas seulement la distribution anisotrope de la matière elle-même, mais toute la notion, par exemple, de fonction à deux points, de spectre de puissance, de l'espace-temps même et ses propriétés, donc sa topologie, sa courbure etc. » - K. Kraljic

En particulier, la fonction à deux points et le spectre de puissance sont des outils mathématiques de description statistique des observations. Le premier permet de compter les galaxies et d'analyser leur répartition de manière statistique à partir d'une formule, et le second est une manière de quantifier physiquement cette répartition statistique. Il n'y a d'ailleurs pas que des équations ou des formules qui sont mentionnées, mais aussi des termes mathématiques plus généraux, comme les termes géométriques employés par Kraljic ci-dessus, mais aussi le terme paramètre comme employé par L'Huillier :

« On arrive à expliquer tout en un tas d'observations depuis le CMB, la distribution des des galaxies, des grandes structures de l'univers, etc juste avec ces six paramètres [de Λ CDM]. » - B. L'Huillier

En parlant des simulations, Herle indique que pour repérer des éléments au sein de la structure à grande échelle, il faut d'abord se demander comment définir informatiquement ces éléments. Dans ce cas, les outils utilisés comme par exemple un algorithme de détection appelé le *halo finder* influencent la structure que l'on observe et les structures qui la composent. Ces outils mathématiques sont donc inclus dans ce qu'on appelle, en résultat de telles analyses, la structure à grande échelle.

« If you are working with simulations, this is a very important question to ask. What is a structure? What is an object? And then your results vary drastically because this depends on your halo finder and all this stuff, but this has nothing to do with the real world. This is a simulated structure formation question. And then when you're an observer, you want to say that you studied this object, but it needs to be reasonably self-contained in order to say that this is one entity. But it's interesting because from perturbation theory you come up with the relation that this thing has to be a certain value into the mean density contrast for it to sort of separate out from the expansion of the rest of the material. » - A. Herle

On remarque dans ces propos que la question mathématique se pose aussi dans le cas des observations. Un objet astrophysique est considéré comme une entité à part entière s'il se dégage du reste de la matière environnante, Herle parle d'autonomie ou d'indépendance vis-à-vis de cet environnement. Et pour cela, une branche des mathématiques appelée théorie perturbative permet de définir des seuils à partir desquels une quantité est une entité à part entière. De ce fait, dans cette entité est ancrée une notion mathématique

Comme on le voit apparaître progressivement, il y a des intermédiaires à la définition, l'observation et la représentation mentale de ce que peut être une structure pour les cosmologistes. Les entretiens permettent d'en dégager trois principaux. Le premier, comme le rappelle L'Huillier, est un intermédiaire observationnel : l'échelle cosmique.

« On a ce qu'on appelle l'échelle cosmique. On va mesurer des distances à des objets connus, à une certaine distance, puis ensuite on va se servir des distances pour mesurer des trucs plus lointains etc. » - B. L'Huillier

Cette échelle cosmique est construite à partir de chandelles standard, terme utilisé pour désigner des objets comme les céphéides étudiées par Leavitt pour déterminer des distances. Un type d'objet bien déterminé permet de construire un échelon de l'échelle cosmique, à partir duquel d'autres objets, comme des supernovas, sont calibrés pour créer d'autres échelons. L'observation et le positionnement des galaxies traçant la structure de l'Univers repose sur l'utilisation de ces chandelles standard, et les représentations de cette structure contiennent donc implicitement cette information. Un second intermédiaire conceptuel entre les observations et les représentations est rappelé par Lehoucq :

« On essaie de reconstruire le volume du cône à partir de sa surface, cône qui n'est pas à deux dimensions spatiales et une de temps, mais trois dimensions spatiales et une de temps. » - R. Lehoucq

En effet, les observations astronomiques se font sur un ciel sur lequel est projetée la lumière qui nous parvient. Observer une portion du ciel, c'est observer une projection sur un capteur d'instruments de la lumière contenue dans le cône défini par l'ouverture angulaire de la portion du ciel en question. La structure observée peut être aussi projetée, alors en deux dimensions, ou représentée avec une dimension de *redshift* permettant de montrer le cône, mais il faut tout de même sacrifier une dimension d'espace pour projeter ce cône sur le papier pour écrire un article. Finalement, Peacock mentionne un troisième intermédiaire qui est tout à fait fondamental et qui se trouve entre autres dans les simulations. Il s'agit des phénomènes physiques qui, dans le temps, séparent différentes régions de l'espace en différentes structures.

« So you look at how the structures emerge in simulations. You find yourself thinking about the tidal aspects of the gravitational force, the properties of the gravitational potential, and see how space was split up in certain areas and have different visual

impressions. » - J. Peacock

Si cet intermédiaire est particulièrement mentionné pour les simulations, c'est parce que c'est dans ce contexte que de tels phénomènes qui ont lieu sur des temps cosmiques sont observables en accéléré. Ainsi, comme peut laisser penser le propos de Peacock, penser à la structure à grande échelle de l'Univers, c'est penser à divers phénomènes. Nous voyons ici que ces phénomènes peuvent être observationnels, numériques ou purement physiques. Les représentations mentales de cette structure font en quelque sorte appel à des cartes mentales, et ces cartes contiennent plus que la seule distribution spatiale de la matière.

L'une des notions majeures associées, au moins mentalement, à cette structure à grande échelle est celle d'infini, ou de manière plus limitée, de grands espaces. Combes insiste sur ce point : le cerveau humain est en difficulté lorsqu'il essaie de se représenter des espaces très grands par rapport à ceux dont il fait l'expérience au quotidien.

« Je pense que dans les questions qu'il faut expliquer en général, il y a l'infini, le grand, les grands espaces. On ne se rend pas compte de ces grands espaces. » - F. Combes

Pour représenter l'Univers et les grandes échelles intuitivement, différents moyens existent, et Peebles mentionne par exemple celui du ballon qu'on gonfle qui imite l'Univers qui s'étend en faisant l'analogie entre la surface du ballon et l'espace-temps à quatre dimensions :

« The great Dutch astronomer Willem de Sitter introduced a very handy model of a balloon in which we live on a surface. You blow up the balloon, we move apart, and yet every observer sees the galaxies around moving away. » - J. Peebles

Cependant, il insiste aussi sur le fait que nous n'avons accès qu'à une partie de l'Univers, l'Univers observable. Sur ce point, Lehoucq le rejoint et justifie ainsi les questions générales sur la topologie de l'Univers complet, et notamment la question de l'existence de frontières ou bords :

« You could say large-scale structure or you could say large-scale structure of the Universe. Which has an interesting implication: we don't know what the world is, what the Universe is like. We know what we see, which could be a tiny patch of an immense, larger Universe. And maybe what we're seeing is some local aberration, who knows, we can only speak of what we can see. » - J. Peebles

« L'idée implicite qu'on a en cosmologie, c'est que l'Univers est infini parce que s'il n'est pas infini, l'alternative, c'est qu'il y ait un bord. Or, un Univers avec des bords,

évidemment, ça pose des problèmes philosophiques. [...] Les Univers finis sans bords, ça ne rentre pas dans le cadre d'un modèle cosmologique acceptable. [...] Un Univers fini avec des bords,] ce serait une version sophistiquée de condition limite périodique. L'Univers serait plus petit que l'Univers observable, plus petit ou de taille voisine, et ça changerait beaucoup de choses sur notre position et sur la façon dont on interprète les observations. » - R. Lehoucq

Représenter la structure à grande échelle de l'Univers, que ce soit graphiquement, conceptuellement, mathématiquement ou bien mentalement, c'est faire face à des limites et des questionnements physiques sur le sens du mot échelle. De quelle taille est cette structure en pratique, et peut-on vraiment se la figurer à partir d'observations et d'équations ? Surtout, parler de structure à grande échelle, c'est parler de la structure à grande échelle de l'Univers visible. Comme le précise Peebles, on ne peut parler de, et interpréter, que ce que l'on voit.

3.3 Holisme structuraliste : structuralismes épistémologique et ontique

La notion de structure elle-même constituée d'éléments mis en relation par des lois physiques et changeantes avec le temps pose la question du holisme structuraliste. Pour donner des définitions courtes et standards de ces deux termes, on peut commencer par le holisme. Il existe plusieurs définitions de ce terme en fonction du contexte dans lequel il est utilisé. Dans notre cas, il s'agit du holisme ontologique, voulant que les propriétés de chaque ne sont compréhensibles que dans leur totalité. Selon ce courant de pensée, un être est déterminé par le tout auquel il appartient, et connaître ce tout est nécessaire pour comprendre ses propriétés non réductibles à celles de ses éléments. Suivant cette approche, le structuralisme est un courant de pensée holiste qui s'applique à la structure (dont la définition n'est pas unique, surtout si l'on considère les différents domaines scientifiques auxquels il peut appartenir). On peut distinguer deux structuralismes principaux, d'abord le structuralisme ontique selon lequel la nature même du monde réel est fondamentalement composée de structures, puis le structuralisme épistémologique, ou simplement structuralisme, selon lequel notre connaissance du monde et la manière dont l'humain comprend et appréhende le monde

est structurale : nous utilisons des structures conceptuelles pour représenter et appréhender le monde. Le structuralisme s'est intéressé à différents domaines, comme la sociologie ou la philosophie des sciences, notamment et surtout en physique quantique. Une référence dans ce domaine est le philosophe britannique Steven French et son ouvrage *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*¹¹⁶. En cosmologie, bien que le structuralisme ne s'y soit pas encore intéressé, le point de vue ontique impliquerait que les structures à grande échelle, telles que les filaments de galaxies et les vides cosmiques, soient plus fondamentales que les galaxies elles-mêmes. Les propriétés des galaxies et des amas de galaxies seraient alors dérivées des structures sous-jacentes du réseau cosmique qui seraient un accès direct aux caractéristiques réelles et fondamentales de l'Univers. Le point de vue épistémologique pourrait impliquer que nos modèles de l'univers, tels que Λ CDM, ne sont pas des descriptions directes de la réalité, mais des structures mathématiques qui organisent nos observations et nos connaissances. Les paramètres cosmologiques, comme la densité de matière noire ou l'énergie noire, et même les objets comme les galaxies ou les amas de galaxies, seraient alors vus comme des éléments mis en relation au sein de la structure théorique plutôt que comme des entités physiques autonomes.

Avant de nous pencher sur la discussion entre structuralisme ontique et structuralisme épistémologique, voyons d'abord quelle est la pensée des cosmologistes sur la structure et sur les structures observables dans l'Univers. Les structures sont les objets physiques qui dessinent la forme de la structure à grande échelle de l'Univers. Remarquons que ce terme s'applique à toutes les échelles, Smethurst associe d'ailleurs cela à une grande variété d'objets :

« If you said structures, I would think about everything from gas filaments in the Milky Way to entire galaxies to clusters. [...] And I think it comes from the context of what you're reading. » - R. Smethurst

Cependant, et comme l'illustrent les propos de L'Huillier, White et Kraljic par exemple, la tendance générale de nos entretiens est plutôt que, accordé au pluriel, le mot structures correspond à un ensemble d'objets au moins à l'échelle galactique, comme les galaxies ou les amas :

« J'aurais tendance à dire les structures, les grandes structures de l'Univers, pour

¹¹⁶ French, S., *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*, Oxford, Oxford University Press, 2016, 414 p. ISBN : 9780198776666

parler par exemple de tout ce qui est super cluster, etc. Et j'aurais plutôt tendance à dire la structuration à grande échelle de l'Univers, donc la manière dont l'univers est structuré et qui est une forme de toile cosmique en effet. Donc les grandes structures, ce serait des structures individuelles, des morceaux de la toile cosmique. » - B. L'Huillier
« If I wanted to emphasise galaxies, galaxy clusters and galaxy superclusters, I would talk about structures. » - S. White

« [Large-scale structures], ce sont toutes les structures à grande échelle ou grandes. Ça dépend de la définition, mais typiquement au-delà des groupes de galaxies. Au-delà, disons, du mégaparsec ou de dix mégaparsecs. » - K. Kraljic

La structure à grande échelle de l'Univers, à proprement parler, est une notion plus subtile que cela. Par exemple, Herle et Kraljic sont d'accord sur le fait que c'est un terme très large. Herle précise d'ailleurs que le terme est, selon lui, tellement vague qu'on ne peut pas lui attribuer de réel sens physique sans plus d'informations :

« Large-scale structure of the Universe, au singulier, je pense que c'est une formulation très large. Elle veut dire une chose, à mon avis, très générale. » - K. Kraljic
« I think large-scale structure is a nice name. It is spectacularly vague. There is nothing you can get from that apart from: it is a structure at large scale. » - A. Herle

En pratique, le sens donné au terme structure à grande échelle se trouve dans la raison pour laquelle ce domaine de recherche existe. Alonso relie ainsi le problème des inhomogénéités locales de l'Univers et la question de sa structure, et cette vision se retrouve dans l'explication qu'en donne L'Huillier en parlant des vides cosmiques :

« Right now, we kind of have that idea that the large-scale structure is inhomogeneities in the distribution of non relativistic matter, which by definition is the cosmic web, because we know that that matter does distribute itself according to filaments, sheets, voids and clusters. However it has very often been understood as the fact that there are anisotropies in the universe. » - D. Alonso
« Moi, je considérerais [les vides cosmiques] comme une structure parce que ça fait partie de la structuration de l'Univers qui est constitué de sous-densités et de sur-densités. Donc pour moi, si une sur-densité, c'est une structure de l'univers, une sous-densité, ça l'est aussi. » - B. L'Huillier

La tendance qui se dégage en général est que la structure de l'Univers ne correspond pas seulement aux sous-structures que peuvent être les filaments, les murs et les amas. On retrouve d'autres termes, comme les notions d'inhomogénéités, de structuration (et donc d'évolution dans le temps), de champs de densité et de gravitation par exemple. Le

holisme structuraliste réside ici dans l'idée que la structure à grande échelle de l'Univers ne se réduit pas à un ensemble d'objets individuels. On trouve cependant une exception à cette vision dans les propos de Combes, qui estime qu'il ne s'agit que d'une question de vocabulaire :

« Quand c'est au singulier : la structure à grande échelle, la structuration à grande échelle ; ou alors les grandes structures. C'est un peu la même chose. Mais c'est un petit peu une convention qui arrive à la fois en anglais et en français. Donc je pense que c'est vraiment du vocabulaire et que c'est la même chose. » - F. Combes

Cependant, White le rappelle, le vocabulaire n'est pas anodin. Les définitions attribuées aux mots et la manière dont sont représentées les données justifient ou non le sens physique d'un discours, en particulier ici au sujet de la densité de certaines régions de l'Univers et des vides cosmiques :

« You can meaningfully talk about high and low density regions, and then the low density regions are clearly spatially connected. And then whether you think of them as a space filling low density regions or as a set of separate low density, as separated regions, as voids... It very much depends on how you represent the data. » - S. White

On le voit ici, la notion de structure est importante car elle regroupe beaucoup de choses, que ce soit des entités physiques, des relations entre ces entités, ou des définitions importantes pour clarifier l'objet physique que l'on étudie. En particulier, on voit avec ces exemples que la définition de la structure à grande échelle n'est pas unique, et que différentes personnes de différentes nationalités et travaillant dans différents instituts peuvent tenir des propos variant légèrement.

Maintenant, en admettant que la structure à grande échelle de l'Univers est un thème central auquel les chercheurs et chercheuses en cosmologie peuvent rattacher différentes notions et différents concepts, voyons si les pensées exprimées dans les entretiens à son sujet relèvent davantage du structuralisme ontique ou du structuralisme épistémologique. La structure est-elle un outil de représentation du monde ou une réalité fondamentale ? Comme on pourrait s'y attendre venant de cosmologistes, le point de vue épistémologique est majoritaire. C'est d'ailleurs, à une nuance près, le seul qui se retrouve explicitement discuté dans les entretiens. En particulier et de manière très explicite, Peebles et Peacock reconnaissent que les modèles cosmologiques, comme Λ CDM ou la notion de champ de gravitation ou d'autres champs sont des approximations de la réalité, et que la recherche scientifique vise à améliorer cette

approximation afin de toujours mieux faire correspondre les modèles aux observations. Peebles questionne d'ailleurs la réalité dont la science prétend faire une approximation :

« I avoid belief. I think there is a very strong case that the Λ CDM theory is a good approximation to reality. Even that is rather a controversial statement. What is reality? We don't know. We feel we have an approximation to reality because the theories fit so many tests. We don't know that that means that the theory is a good approximation to reality. But the case seems persuasive. [...] And I have often wondered why do we think the Universe operates in a rational way, when we are subject to apparently irrational aspects of the Universe all the time? Why is the fundamental nature of reality logically arranged to obey physical laws that are written down in mathematical terms? Why do we assume that? Well, because it works. But someone had to assume it before we knew it worked. And of course, the planets were a good lesson. » - J. Peebles

« There's a complete description at the classical level, at least, of everything in the Universe in terms of the number of fields. Except even that is an approximation. [...] I think there's implicitly some loss of information, some averaging that hides these very fine scale details, but that's a good approximation. » - J. Peacock

L'aspect mathématisable des phénomènes physiques est une tradition qui n'a cessé de se renforcer depuis Newton, et comme l'indique French « Perhaps then we simply have to accept that the distinction between the mathematical and the physical has, at the very least, become blurred or that it cannot be drawn at all. »¹¹⁷. Les modèles mathématiques peuvent se confondre avec les phénomènes physiques. En plus de cela, Lehoucq insiste sur son questionnement de la nature de l'Univers, et de l'approximation que constituent les Univers modèles simulés dans lesquels il est possible de recréer la distribution des galaxies à grande échelle. White, spécialiste des simulations cosmologiques, explique que la structure à grande échelle est l'un des trois aspects majeurs d'une modélisation complète de l'Univers qui permet de représenter un ensemble à comparer avec des observations directes du monde tel qu'il nous apparaît.

« Ce serait quoi l'Univers observable ? Et est ce qu'il y aurait d'autres variantes d'Univers ? Il y a des Univers modèles, par exemple ceux qui sortent des modélisations de grandes structures où on fait l'évolution [de l'Univers] sur des milliards d'années avec toutes les structures qui se forment et avec des systèmes multi échelle tellement sophistiqués qu'on arrive même presque à voir des galaxies individuelles dans des mailles qui sont absolument gigantesques. » - R. Lehoucq

¹¹⁷ French, S., *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*, p. 230.

« I'd say there are three aspects of the Universe. The geometry of the Universe, the contents of the Universe, the structure in the Universe, which you can think of as somehow setting initial conditions at some time, plus a set of physical laws to determine its evolution. If all those aspects are defined, then, in principle, past the time when quantum uncertainties are significant, it is a deterministic problem, and then you can evolve forwards in time and ask whether the results are consistent with what we see at different epochs. » - S. White

Lehoucq partage d'ailleurs cette approche épistémologique plutôt qu'ontique au sujet de la matière noire :

« Cette question de matière noire, voilà comment elle pourrait apparaître : comme un fantôme, littéralement un fantôme pour expliquer le réel. On est dans une situation qui s'est déjà produite dans l'histoire des sciences où on "invoque" des fantômes pour expliquer un phénomène qui se manifeste devant nos yeux. » - R. Lehoucq

Une autre subtilité à cette vision épistémologique est apportée par Alonso. En effet, dans ses propos, le lien entre la notion de structure à grande échelle et la réalité du monde est légèrement plus fort car étudier la structure mène à se poser des questions fondamentales sur la nature de l'Univers. Cette manière de procéder a pour effet de regrouper sous la notion de structure des observations qui permettent de répondre à ces questions fondamentales, comme le fond diffus cosmologique :

« Why are there anisotropies in the universe? That's a fundamental question which connects with inflation. And the initial conditions that give you small fluctuations in the density of the universe, where do they come from? Why are they there? So depending on who you talk to, the CMB would be part of the structure in the sense that it allows you to understand where all these structures are coming from. » - D. Alonso

La nuance qu'il faut apporter à ces propos est que les scientifiques peuvent tout de même admettre qu'il existe une réalité objective des objets dont ils parlent et qu'ils étudient. Peacock propose ainsi une vision ontique des objets cosmologiques, au moins à l'échelle des particules et de l'Univers entier :

« This is the core philosophical question. Is there actually a truth about the Universe? You can say there's no such thing as objective truth. It's just a set of explanations, of models that approach more closely to the matching with what we see observationally. And I think personally that's too abstract of a point of view. In the space between us now, there are thousands of neutrinos left from the early stages of the Big Bang, no doubt that these particles have an objective existence. So it's not just a sociologically

determined way of looking at the Universe. » - J. Peacock

L'ensemble de ces propos est intéressant car il contraste avec ce que nombre de philosophes disent des objets de la science. Par exemple, French et d'autres grandes figures du structuralisme comme James Ladyman défendent un structuralisme ontique alors que des penseurs dont l'activité principale est une activité de recherche scientifique, comme David Bohm, Basil Hiley ou Henri Poincaré penchent plutôt vers une interprétation épistémologique. En complément à cela, le statut épistémologique des vides cosmiques nous informe aussi sur ce que les cosmologistes considèrent réel ou pas, et ce qui est désignable comme structure. A ce sujet, les avis diffèrent. Herle par exemple considère qu'ils sont plutôt définis comme l'absence de structure, alors que Alonso et Peacock sont de l'avis opposé et acceptent volontiers d'attribuer le statut de structure aux vides, qui font ainsi partie intégrante de la plus large structure à grande échelle de l'Univers :

« I think it is by definition the absence of structure. It is an absence of density, an under density, it is a negative convergence. » - A. Herle

« Yes, it is a structure in the sense that, by definition, a void is something that is surrounded by objects that have a higher density. So in that sense, it is a structure, it implies the existence of structures around it. » - D. Alonso

« They are a visually striking phenomenon. You can make catalogs of regions of space according to a certain definition of voids, although it is not a unique definition. So you have some predilection there, but the regions of space with underdensities have objective property. So they are as real structures as anything. » - J. Peacock

En pratique, ces trois points de vue ne sont pas en désaccord philosophique sur ce qu'est un vide cosmique. Si les avis sont différents, c'est surtout car les définitions utilisées pour en parler sont différentes. C'est aussi ce que souligne Peacock : il existe plusieurs définitions des vides cosmiques. Remarquons que les réponses pourraient suivre une toute autre tendance si l'on s'adressait à des chercheurs et chercheuses d'un autre domaine des sciences physiques.

Finalement, et dans la suite de ce développement sur les vides cosmiques, l'un des éléments qui ressort le plus lorsque les cosmologistes sont interrogés sur la structure à grande échelle de l'Univers et son statut épistémologique est que cette notion n'est pas assez définie, ou tout du moins pas parfaitement définie. Et selon White, c'est justement à cause du fait qu'elle est une structure, et que le nombre de composantes et de relations

qu'englobe un amas est assez faible, contrairement par exemple à une galaxie d'étoiles :

« On the whole, galaxies are very different objects from stars, and you can think about them separately. Large-scale structures are less well defined because even the biggest clusters only have a thousand galaxies, that is not a very large number. And typically when people look at large-scale structures, they are defined by relatively small numbers of galaxies, and what people would call a filament have a few tens or fifty galaxies. So it is a rather noisy definition that depends on how you link things together, exactly where you would even put the filament or what you think is a filament. » - S. White

Ainsi, avant de proprement définir et accorder la communauté sur le statut de la structure à grande échelle de l'Univers, il conviendrait de définir précisément et uniquement des objets comme les filaments. A ce sujet, Peebles parlait de filaments avec beaucoup de précautions dans les années 1980, et cette précaution se retrouve encore dans l'entretien mené quarante ans après :

« You need to be careful about this because the human eye is very good at finding patterns, even in noise. It's far better to see the occasional leopard that's not there than to miss a leopard that is there. It's very important to see patterns that are just barely, barely, barely detectable and may, of course, be false. [...] There's a web-like structure. And it's seen both in observations and in simulations. Because it's seen in simulations with standard Λ CDM, it is not a challenge to the theory, whether it is a distraction from more interesting aspects of large-scale structure. » - J. Peebles

Finalement, Kraljic ajoute à cela que les objets astrophysiques en général sont assez abstraits. A son avis, il serait bon de revoir les définitions et le sens des termes utilisés par les cosmologistes à la base des théories. Selon Peacock, la base de toutes ces études est le champ de densité, et celui-ci est bien défini. Ce serait alors à partir de ce champ qu'il faudrait établir clairement ce qui constitue des structures.

« On côtoie chaque jour les objets assez abstraits dont on ne connaît rien. Et peut-être que ça serait bien d'essayer de se reposer la question de la théorie qui est basée sur ces principes que l'on a posés dès le début. Est-ce qu'on ne pourrait pas revenir dessus ? Je pense que ça serait une boucle assez intéressante qui nous ramène toujours à la connaissance de notre non connaissance. » - K. Kraljic

« You can change how you classify things and the classifications change, but the density field is the fundamental thing that underlies all of this and is not subject to hidden definitions. » - J. Peacock

Finalement, comme la cosmologie s'est construite à partir de principes et d'observations

dont la qualité et la résolution ne cesse d'augmenter, les définitions de termes abstraits comme les structures ou même la structure à grande échelle de l'Univers sont changeantes, mais dans ce cas le statut de ces objets change aussi. Puisque la structure est ici un outil de représentation plus qu'une réalité fondamentale de l'Univers, elle évolue avec ses représentations et les concepts qu'elle regroupe. Il y a encore cinquante ans, les vides et les superamas n'étaient pas connus. Aujourd'hui, les observations les plus modernes peuvent sonder des époques de l'Univers très anciennes, et les définitions s'améliorent. Cependant, elles sont tout de même construites sur des travaux précédents, et une introspection de la cosmologie, comme l'indique Kraljic, pourrait mener à une clarification de ce qu'est, ontologiquement et épistémologiquement, la structure à grande échelle de l'Univers. De telles introspections ont eu lieu et ont encore lieu en physique quantique par exemple, où le statut du photon et des particules élémentaires a fortement évolué et s'est éloigné de ce qui était admis comme correct il y a plus d'un siècle.

3.4 La place de la structure à grande échelle de l'Univers en cosmologie

Pour finir ce chapitre, voyons les ouvertures qu'évoque la structure à grande échelle de l'Univers aux cosmologistes interrogés. Cette analyse permet surtout de situer ce domaine de recherche dans un réseau plus large, et de comprendre l'importance de ce domaine plus directement à partir des propos de chercheurs et chercheuses. Ce positionnement peut d'abord se faire dans le temps. En particulier, la différence entre la cosmologie du siècle passé et ce qui se fait aujourd'hui est importante, surtout en termes de force de travail et d'investissements financiers :

« On est passé d'une entreprise individuelle à de la Big Science, des collaborations avec des milliers de personnes. » - B. L'Huillier

« I personally find [the future of cosmology] quite depressing. The results that we get from the modern experiments are very precise, but achieved at great financial and human cost. So in the absence of really, really clever new ideas, what the field is doing is basically taking the things that succeeded in the past and scaling them up. » - J. Peacock

Le terme Big Science utilisé par L'Huillier a tout à fait sa place en cosmologie. A ce sujet, on peut se référer au récit de la création et de l'utilisation de l'emblématique télescope Hubble par Smith : *The Space Telescope. A study of NASA, science, technology, and politics*. Après les premiers projets de Big Science (entamés surtout par la construction d'armes de destruction massive durant la seconde guerre mondiale), des premières idées de télescopes scientifiques en orbite au-dessus de l'atmosphère terrestre ont émergé dans les années 1950. Ce télescope a été envisagé dans les années 1970, mais n'a été lancé que dans les années 1990, et des corrections ont été nécessaires après son lancement. La quantité ne ressemblait à rien de ce qui était connu jusqu'ici. Avant 1970, l'étude de l'Univers se faisait par des équipes de quelques dizaines voire centaines d'individus qui parfois se réunissaient lors de séminaires. Aujourd'hui, la majorité des collaborations astrophysiques, notamment celles visant à étudier la toile cosmique, sont des sujets politiques et administratifs importants. Face à ce constat, et à l'acquisition toujours plus importante d'images et de données, Peebles, Kraljic et Alonso sont plus optimistes. Le premier souligne les questions qui restent ouvertes en cosmologie et qui devraient susciter des efforts de recherche encore grandissants. Les deux autres s'inquiètent quelque peu de la manière dont les cosmologistes vont parvenir à ce progrès, car il semble qu'il faudrait s'adapter et changer de fonctionnement afin d'éviter ce que Peacock craint, à savoir toujours refaire les mêmes analyses mais sur toujours plus de données. Les solutions mentionnées sont l'intelligence artificielle, qui apporterait une approche nouvelle à l'étude de la structure à grande échelle de l'Univers, en particulier en l'analysant sans l'utilisation directe de l'oeil humain, ainsi que des rapprochements entre la cosmologie et l'astrophysique :

« In the years around 2000, experimental programs in progress became clear, complete enough to tell us a story that seemed to be convincing. A dramatic advance like that happens rarely. And I don't know whether we will have another such advance in cosmology. There are many open questions in cosmology. We've mentioned only a few. The properties of galaxies are pretty well accounted for within the standard Λ CDM, but not totally. But of course, that is in part because galaxies are complicated. We were able to make good progress in cosmology so far because we focused on the simplest of all problems in which the predictions are pretty easy to compute and compare to measurements that are going to be done very precisely. The properties of galaxies surely tell us something about the nature of physical reality and in particular about the nature

of dark matter, which is, the evidence says, distributed around the outskirts of the galaxy. As I said, I can't believe the present model for dark matter is complete. I'm looking for advances that will teach us, maybe, it can be made more complete. » - J. Peebles

« On va trouver les outils et maintenant ça va être beaucoup d'intelligence artificielle pour aider justement à travailler avec et analyser toutes ces données. Dans le passé, la fenêtre était beaucoup plus ouverte à différents modèles parce que justement, il n'y avait pas de contraintes observationnelles. Maintenant, on a tellement de données et tellement de contraintes [...] que la fenêtre de toutes ces possibilités est quand même un peu plus restreinte que dans le passé. » - K. Kraljic

« I think I am excited about cosmology, but maybe not for the same reason that we were excited about cosmology in the past. In the past you were excited about cosmology because you were accessing the origins of scales, or time scales that would allow you to uncover new potential areas of the standard physics model. You knew for sure you would probably be able to detect something new there. I don't see where it is going now. We know that the uncertainties with which we know certain core parameters are going to improve over the next decade, but they're not going to improve by orders of magnitude, so I don't think there will be massive new surprises that come from that. However, in order to get those improvements, we're going to need to understand the signals that we are detecting a lot better than we do right now. We are going to get outstanding maps of the large-scale structure over most of the sky, going all the way to redshift three or four. We are going to have maps of the universe on many different wavelengths, on many different scales. In order for us to extract the most information from that, we need to understand what we are seeing and so far there has been this huge divide between cosmology and the galaxy evolution and astrophysics. » - D. Alonso

L'un des principaux sujets abordés dans les entretiens est Λ CDM sur lequel repose la théorie de la structure à grande échelle de l'Univers. La validité ou la non-validité de Λ CDM est un sujet très cher aux cosmologistes au vu de l'attachement que chacun a eu à développer ses pensées et son avis dans notre discussion. Il semble que Λ CDM soulève beaucoup de questions philosophiques, par exemple, pour L'Huillier et Kraljic, celle du rasoir d'Ockham et le nombre de paramètres nécessaires et suffisants pour décrire avec une bonne approximation la structure de l'Univers :

« [Avec des modèles concurrents,] on va avoir des paramètres en plus et en physique, en sciences, on a le rasoir d'Ockham, donc l'idée que si on a deux modèles pour décrire la même chose, on va avoir tendance à préférer le plus simple. Tant qu'on n'a pas de

vraie raison de rejeter Λ CDM, on va le garder comme modèle principal. [...] En ce moment, on a le "Stage IV", donc la quatrième génération de relevés cosmologiques avec DESI, avec Euclid en Union Européenne, avec le LSST... Si les résultats n'indiquent pas de déviation à Λ CDM ou au modèle de concordance, est ce que ça va être possible d'aller plus loin ? Où est-ce qu'elle est la limite sur ces paramètres ? » - B. L'Huillier

« Λ CDM est un modèle à six paramètres. Il y a certains régimes, certaines échelles où le modèle n'explique pas suffisamment de données. Donc je ne dirais pas que c'est le plus simple parce que si tu prends un modèle avec vingt paramètres, il fit beaucoup mieux. Et dans ce cas on pourrait se dire qu'on a un modèle parfait qui explique les données. [...] Mais on apprend pas plus en ajoutant plus. C'est juste que ça revient plus à de la phénoménologie si tu as de plus en plus de paramètres. » - K. Kraljic

Peebles quant à lui insiste sur la solidité de Λ CDM et le fait qu'il survit à de très nombreux tests depuis sa création, ce qui est non seulement impressionnant pour une théorie physique, mais aussi le mieux qu'on pourrait en attendre : un tel modèle ne sera jamais parfait, car la perfection d'une description de l'Univers complet n'est certainement pas atteignable. Selon lui, avoir en main ce modèle est particulièrement encourageant pour les recherches cosmologiques à venir.

« First, you will have seen, I assume, the statistical measures of the angular distribution of the thermal radiation in which theory and measurements follow the same oscillations to remarkable precision. You may also be aware that in the Galaxy distribution, there is statistically the same pattern of oscillations in the power spectrum. The same theory with the same parameters fits both. It is, to me, deeply moving because these are two statistics that in the distribution of matter, in the distribution of radiation that are based on measurements that are very different. They're looking at the Universe in a very different way. [...] Λ CDM is really pretty good, but it's not perfect. How could we be surprised at that? Well, we are taking a stab at the nature of the Universe on the immense scales of cosmology. That we got close is, to me, wonderfully encouraging. In fact, surprising that we could do so well. » - J. Peebles

Ces propos sont à contextualiser : Peebles a connu la majorité des développements de la cosmologie moderne. Il a fait partie des efforts de recherche dans des domaines fondateurs des théories actuelles, et sa carrière a été riche de succès à tel point qu'il a reçu un important nombre de distinctions et récompenses, dont le prix Nobel. Cet optimisme et cet enthousiasme viennent de quelqu'un qui a essentiellement terminé sa

carrière. Ces propos ne sont pas intéressés, et il y a de bonnes raisons de penser qu'il est sincère. Ceci contraste avec les inquiétudes dont les cosmologistes font part dans les entretiens. En effet, les plus inquiets sont ceux dont la carrière est encore loin d'être terminée. Et lorsqu'on étudie l'Univers dans son ensemble, il est raisonnable d'être inquiet sur la capacité de la communauté scientifique à avancer vers une meilleure compréhension des phénomènes observés. Toutefois, des perspectives existent, et si comme Kraljic l'indique, certaines fenêtres sont plus restreintes que par le passé, la solidité des travaux effectués jusqu'ici et l'ensemble des questions encore ouvertes semblent être un terrain au moins fertile à la recherche scientifique, qui de plus en plus s'accompagne de questionnements épistémologiques. La question du choix d'un modèle en physique est dense et il n'est pas à propos de développer longtemps sur ce sujet ici. Néanmoins, nous pouvons voir que dans ces discours, Λ CDM correspond à ce que Duhem écrit dans *La théorie physique. Son objet, sa structure* : la théorie physique est commode (Λ CDM est très adaptable), esthétique (Λ CDM est simple et vise à modéliser l'Univers) et économe (Λ CDM n'a que six paramètres fondamentaux)¹¹⁸. Elle permet une classification et une composition de lois exprimées mathématiquement. Il est cohérent que ce modèle soit celui de la cosmologie et qu'il serve à modéliser la structure à grande échelle de l'Univers, et bien que les entretiens montrent que tous les scientifiques sont conscients de la part de subjectivité qui entre en jeu dans le choix des modèles dominants, ils montrent aussi que la confiance en Λ CDM et l'envie de toujours plus le tester sont justifiées. D'ailleurs, Duhem propose également une explication philosophique de ce qu'est une expérience scientifique, et cette explication s'applique en particulier aux observations aux plus grandes échelles : une expérience physique correspond à l'ensemble de deux parties. La première est l'observation, durant laquelle l'œil est l'outil principal. La seconde est l'interprétation de cette observation, et c'est ici qu'il faut être physicien, car la justification d'une interprétation et d'une représentation mentale ne peut, scientifiquement, venir que de la bonne connaissance et application des théories physiques.¹¹⁹ La cosmologie possède un statut particulier, car comme Lehoucq l'a rappelé durant l'entretien, il n'y a pas d'expériences possibles en laboratoire lorsqu'on traite de l'Univers. Il n'existe pas de Big Bang ou d'expansion de l'Univers sur la paillasse. Au mieux, des expériences de cosmologie sont des analogies entre un

¹¹⁸ Duhem, P., *La théorie physique. Son objet, sa structure*, item 30.

¹¹⁹ Duhem, P., *La théorie physique. Son objet, sa structure*, item 221.

système modèle et l'Univers tout entier¹²⁰. On trouve des discussions à ce sujet dans le livre *Philosophy of Astrophysics*, mais on peut aussi voir ici, à travers les propos des personnes interrogées, que les cosmologistes parlent volontiers de leur domaine comme d'une science comme toutes les autres, avec des modèles et des observations à comparer aux prédictions de ces modèles, et que la cosmologie est finalement le domaine scientifique qui nécessite le plus de connaissances de physique. Cette position est particulièrement bien résumée par Alonso :

« *Essentially, because the system you're trying to understand is so vast, you need to cover all these different areas. It gives you a good understanding, or it requires for you to have a good understanding of lots of different areas of physics.* » - D. Alonso

Et Lachièze-Rey parle de science d'observation¹²¹, à défaut d'une science expérimentale.

Ajoutons ici pour finir deux éléments : la structure à grande échelle de l'Univers n'est pas le seul élément dont le statut épistémologique est à préciser, et Combes et White mentionnent respectivement la gravitation et les systèmes complexes. Selon Combes, il serait aussi bon de rassembler les connaissances acquises depuis la formulation de la théorie de la relativité générale par Einstein, à savoir l'observation d'objets extrêmes comme les trous noirs, les tentatives de formulation de théories alternatives, la détection d'ondes gravitationnelles ou les observations de lentilles gravitationnelles, et d'étudier ce que ces phénomènes nous apprennent sur ce qu'est la gravitation, si son statut a évolué depuis :

« *On pourrait mettre plus en évidence le fait que l'Univers nous sert à comprendre non seulement comment sont formés les galaxies, l'origine des structures, mais aussi les équations fondamentales de la physique. Parce que je pense qu'on a bien appris ces derniers temps, ne serait-ce qu'avec les ondes gravitationnelles, les trous noirs, [...] mais qu'est ce que c'est que la gravité ?* » - F. Combes

Concernant les systèmes complexes, et comme il le développe dans l'essai « *Reconstructing the Universe in a computer: physical understanding in the digital age* », White s'interroge sur la manière dont il est possible d'extraire de la connaissance à partir d'études sur des objets comme les galaxies, qui sont composées d'énormément

¹²⁰ A ce titre, Karl Popper n'estime pas que la cosmologie puisse avoir le statut de science. Ce point de vue a été revu de nombreuses fois, et il est plutôt accepté aujourd'hui que les observations et les simulations constituent une base scientifique proche d'une base expérimentale.

¹²¹ Marc Lachièze-Rey, *Historicité de la cosmologie*, *Cahiers François Viète*, vol. 9/10, 2005, pp. 139-149.

d'éléments et sous l'influence de phénomènes physiques très divers comme les explosions de supernovae, l'accrétion de matière par les trous noirs ou la force de gravitation exercée par la matière baryonique et de la matière noire. Selon lui, la structure à grande échelle de l'Univers n'est pas un système complexe ni chaotique, et il est important de distinguer les deux régimes possibles, mettant en évidence que l'échelle spatiale étudiée n'est pas en corrélation avec la complexité du système.

« I'm very interested in the issue of what we mean by knowledge in complex systems. And I'm not sure that the large-scale structure of the Universe is actually one of the most complex ones, because in the end, it is not very far from a gas in a random field. It has been known to be amplified, but not so far from the initial Gaussian features that it has lost all memory of the initial conditions. People analysing the large-scale structure have schemes which allow them to reconstruct the initial conditions from the current large scale structure. » - S. White

Conclusion

Ce mémoire étudie la notion de structure à grande échelle de l'Univers à partir d'une approche historique et épistémologique. La question principale que nous nous posions était : quelles sont les représentations graphiques et mentales de la structure à grande échelle de l'Univers, et comment ont-elles évolué ? Cette question ouvre notre étude sur ce que pensent les cosmologistes des notions liées à la structure à grande échelle. Ainsi, après avoir proposé une histoire contextualisée des découvertes et des images liées à cette structure, nous avons étudié, à travers dix entretiens avec des cosmologistes ou des astrophysiciens et astrophysiciennes, le statut épistémologique de la structure, des sous-structures qui peuvent la composer, et des relations entre ces sous-structures. Nous avons aussi discuté de la place de cette notion dans l'histoire de la cosmologie, et des perspectives que l'état actuel des connaissances ouvre pour l'avenir de cette science encore jeune.

L'histoire proposée en Chapitre 1 commence par une mise en contexte de la notion d'espace-temps car la cosmologie étudie l'Univers et l'évolution ainsi que le contenu de cet espace-temps. A partir de cette mise en contexte, nous avons tiré les grandes lignes de l'astrophysique moderne, pour ensuite entrer en détails dans l'histoire de la notion de structure à grande échelle de l'Univers.

Le Chapitre 2 présente les entretiens qui ont été réalisés pour étudier les relations entre les pensées de la communauté scientifique et cette histoire. Les différents thèmes principaux qui ressortent de ces entretiens sont ainsi introduits. Nous étudions les images mais aussi les représentations mentales et mathématiques abordées, ainsi que la question du holisme structuraliste et la place de la structure à grande échelle de l'Univers dans le réseau plus large que forme la cosmologie, et par extension l'astrophysique.

C'est dans le Chapitre 3 que ces quatre points principaux sont étudiés plus en détail, avec l'utilisation d'un nombre important de citations directement extraites des entretiens. Ces citations permettent de présenter les propos de chaque personne interrogée sans risquer de trop filtrer et modifier leurs pensées, et de proposer une analyse épistémologique de la structure à grande échelle de l'Univers.

Notre analyse montre que l'histoire proposée en Chapitre 1 a une forte influence sur, par exemple, la notion de structure aujourd'hui. Les découvertes majeures se sont faites sur quatre voire cinq décennies, entre 1965 et les années 2000, et par étapes suivant les étapes principales de l'avancée des technologies d'observation et de modélisation. Ceci implique aujourd'hui des visions différentes sur les vides cosmiques, les définitions des structures et de la structure en général. En particulier, les discussions concernant les simulations numériques contiennent des avis plus tranchés sur ce qu'il est scientifiquement pertinent de discuter et sur la définition des filaments, des vides cosmiques, ou du squelette de la structure à grande échelle. Par ailleurs, si les observations du ciel avant 1990 avaient pour objet central les galaxies et leur répartition sur la voûte céleste et suivant l'axe du *redshift*, le terme qui revient comme objet central de la cosmologie aujourd'hui est davantage le champ de densité et ses inhomogénéités. Ce champ de densité se situe à un niveau d'abstraction supérieur des galaxies, mais ceci implique aussi que pour les scientifiques, il est plus fondamental. La discussion autour de la structure à grande échelle de l'Univers est donc passée d'une discussion observationnelle à une discussion sur les caractéristiques fondamentales de l'Univers. Les cosmologistes adoptent d'ailleurs un point de vue structuraliste épistémologique : la structure, c'est un système d'entités, de phénomènes et de relations permettant de représenter l'Univers sans pour autant présupposer que cette structure existe à un niveau fondamental. Elle n'est pas nécessairement une réalité, mais elle représente de manière pratique l'Univers que l'humain observe à grande échelle. Une nuance est tout de même à apporter : aujourd'hui, il semble encore que cette notion sorte difficilement de la communauté scientifique. Le constat est que le grand public, qu'il soit éduqué aux sciences physiques ou non, n'a qu'une connaissance très limitée de l'organisation du contenu de l'Univers. Ce mémoire propose un pont pour transférer cette notion dans un autre milieu, celui de l'épistémologie.

Rappelons que comme pour chaque étude historique, des choix ont été faits afin de proposer une histoire standard à laquelle se référer. Des contributions scientifiques ont certainement été oubliées et certains éléments ont volontairement été mis de côté afin de clarifier les éléments les plus importants pour notre étude. Peu de références en philosophie de la cosmologie existent, il n'a donc pas été possible de se rapporter à un texte qui ferait référence. Dans ce contexte, nous avons cherché à aller plus loin que les

travaux de vulgarisation ou de médiation en histoire de la cosmologie, et ceci dans un espace et un temps limité.

Pour finir ce mémoire, faisons une dernière remarque. La dernière question de chaque entretien était très libre. Elle proposait aux intervenants et intervenantes de discuter librement d'un ou de plusieurs sujets en épistémologie de la cosmologie qui les intéresse particulièrement. Les réponses à cette question sont difficilement utilisables dans le corps de ce mémoire, et seule une citation en est extraite. Cependant, il est remarquable que chaque réponse était très différente des autres, et donc que la diversité des sujets abordés est aussi importante que le nombre de participants. Parmi ces sujets, on retrouve le sens du mot Univers, l'utilité de toutes ces études cosmologiques, les raisons qui laissent penser que les équations mathématiques sont une bonne manière de représenter des phénomènes, la beauté philosophique des théories de la cosmologie qui, en peu de paramètres permettent d'expliquer une très grande quantité d'observations et d'autres. Ces réponses sont témoins de l'intérêt qu'ont, consciemment ou non, les chercheurs et chercheuses en astrophysique pour des questions d'ordre épistémologique. Chacun de ces sujets est certainement digne d'intérêt et d'études similaires à ce que ce mémoire propose. Cet enthousiasme et cette curiosité sont d'une part rassurants, car cela prouve que les scientifiques ne sont pas aveugles aux débats philosophiques et sociologiques qui entourent leurs disciplines, et d'autre part encourageants pour de futures études en épistémologie de la cosmologie qui est un domaine de recherche encore jeune et largement inexploré. Espérons que ce mémoire pourra être une source de motivation ou d'informations pour de futurs travaux.

Bibliographie

(ordre alphabétique)

Allamel-Raffin, C., La complexité des images scientifiques. Ce que la sémiotique de l'image nous apprend sur l'objectivité scientifique, *Communication & Langages*, vol. 149, 2006, pp. 97-111. DOI : <https://doi.org/10.3406/colan.2006.4620>

Allamel-Raffin, C., Quelles images les physiciens insèrent-ils dans leurs publications ? Les critères de sélection adoptés en physique des matériaux et en astrophysique, *Visible*, vol. 10, 2013. DOI : <https://doi.org/10.25965/visible.507>

Aristote, *Du ciel*, dans *Aristote, Œuvres complètes* (trad. Catherine Dalimier & Pierre Pellegrin), Éditions Flammarion, 2014, 2923 p. ISBN : 978-2081273160

Balibar, F., *Einstein 1905: de l'éther aux quanta*. Paris : PUF, 1992, 125 p. ISBN : 978-2-13-044298-1

Boltzmann, L., « Sur le rapport entre le second principe de la théorie mécanique de la chaleur et la théorie des probabilités en relation avec les lois de l'équilibre thermique (Über die Beziehung dem zweiten Hauptstädte der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht) », *Wiener Berichte*, Vol.76, 1877.

Bontems, V., Lehoucq, R., Pennor's, S., *Les idées noires de la physique*, Paris : Les Belles Lettres, 2016. ISBN : 978-2-251-44590-8

Boyd, N. M., De Baerdemaeker, S., Heng, K., Matarese, V. (ed.), *Philosophy of Astrophysics : Stars, Simulations, and the Struggle to Determine What is Out There*, Springer, Synthese Library, vol. 472, 2023, 332 p.

Chincarini, G., Thompson, L. A., Rood, H. J., Supercluster bridge between groups of galaxy clusters, *Astrophysical Journal*, vol. 249, 1981. DOI : 10.1086/183656

Combes, F., *Amas de galaxies et grandes structures de l'Univers*, Cours du Collège de France, 2018 - 2019.

Comte, A., *Cours de philosophie positive, Tome premier contenant les préliminaires généraux et la philosophie mathématique*, Paris : Rouen Frères, 1830, 751 p.

Descartes, R., *Les principes de la philosophie*, (trad. l'abbé Picot), texte de l'édition Alquié, 1647.

Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., Wilkinson, D. T., *Cosmic Black-Body Radiation*. in *The Astrophysical Journal*, 1965.

- Duhem, P., *La théorie physique. Son objet, sa structure*, Lyon : ENS Éditions, 2014 [paru 1906], 206 p. ISBN : 978-2-84788-834-8 et 2-84788-834-9
- Eddington, A., *The Nature of the Physical World*, Cambridge, Cambridge University Press, 1928, 361 p.
- Einstein, A., On the General Theory of Relativity, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss*, Berlin, 1915, pp. 778-786.
- Einstein, A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik*, vol. 17, 1905, pp. 891-921. DOI : 10.1002/andp.19053221004
- Empiricus, S., (traduit du grec ancien par Pellegrin, P.), *Esquisses pyrrhoniennes*, Paris, Seuil, 1997, 570 p. ISBN : 2-02-026298-3
- Empiricus, S., *Les Esquisses pyrrhoniennes*, I, 15.
- Farrow, J., Kelly, D., *Why Does The Universe Look Like This?*, History of the Universe, YouTube, 2022.
https://www.youtube.com/watch?v=iDqQ9qgTWmg&t=1188s&ab_channel=HistoryoftheUniverse
- French, S., *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*, Oxford, Oxford University Press, 2016, 414 p. ISBN : 9780198776666
- Geimer, P., *Images par accident: Une histoire des surgissements photographiques*, Dijon : Les Presses du Réel, 2018, 330 p. ISBN : 978-2840667094
- Geller, M. J., Huchra, J. P., Mapping the Universe, *Science*, 1989.
- Giudice, G. F., *A Zeptospace Odyssey: A Journey into the Physics of the LHC*. Oxford et New York : Oxford University Press, 2010.
- Gott, J. R., *The Cosmic Web*, Princeton, Princeton University Press, 2016, 272 p.
- Gott, J. R., et al, A Map of the Universe, *Astrophysical Journal*, vol. 624, 2005.
- Gregory, S. A., Thompson, L. A., The Coma/A1367 supercluster and its environs, *Astrophysical Journal*, Vol. 222, 1978, pp. 784-799. DOI : 10.1086/156198
- Guth, A. H., *The inflationary universe : the quest for a new theory of cosmic origins*, New-York, Basic Books, 1997, 328 p. ISBN : 978-0-201-32840-0
- Hacking, I., *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press, 1983, 304 p. ISBN : 978-0521282468
- Hacking, I., *The Emergence of Probability*, Cambridge University Press, 2^e éd., 2006, 246 p. ISBN : 978-0521685573
- Hamilton, N. T., Swerdlow, N.M., Toomer, G. J., *The Canobic Inscription: Ptolemy's Earliest Work*, dans Berggren J. L., Goldstein, B. R. (éd.), *From Ancient Omens to Statistical Mechanics*, 1987.

- Hooke, R., *Micrographia : or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*, Londres, J. Martyn and J. Allestry, 1665, 331 p.
- Hubble, E., A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1929, 15, pp. 168–173.
- Hubble, E., A spiral nebula as a stellar system, Messier 31, *The Astrophysical Journal*, vol. 69, 1929, pp. 103-158.
- Huygens, C., *Discours de la cause de la pesanteur*, dans *Œuvres complètes*, tome XXI, pp. 451-488, 1691.
- Icke, V., Formation of Galaxies Inside Clusters, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 27, 1973.
- Jones, B. T., Cosmic Turbulence and the Origin of Galaxies, *Astrophysical Journal*, vol. 181, 1973. DOI : 10.1086/152048
- Kirshner, R. P., Oemler, A. Jr., Schechter, P. L., Shectman, S. A., A million cubic megaparsec void in Bootes ?, *Astrophysical Journal*, vol. 248 1981. DOI : 10.1086/183623
- Kuhn, T., (1962, éd. augm. 1970), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press ; trad. fr. par Laure Meyer : *La Structure des révolutions scientifiques*, préface de Jean-Pierre Luminet, Paris, Flammarion (Champs), 2018.
- Lachière-Rey, M., Cosmologie scientifique, *Revue de Métaphysique et de Morale*, n° 3, 2004, pp. 399-411.
- Lachière-Rey, M., Historicité de la cosmologie, *Cahiers François Viète*, I-9/10 | 2005. DOI : <https://doi.org/10.4000/cahierscfv.1877>
- Thompson, L., *The Discovery of cosmic Voids*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, 291 p.
- Latour, B., Woolgar, S., *La vie de laboratoire: la production des faits scientifiques*, Paris : La Découverte, 2013.
- Louapre, D., *Les plus GRANDES structures de l'Univers*, ScienceEtonnante, YouTube, 2023.
https://www.youtube.com/watch?v=l_mYUOhIOMg&t=1s&ab_channel=ScienceEtonnante
- Leavitt, H., Pickering, E., Harvard College Observatory Circular, volume 173, 1908, pp. 1-3.
- Limber, D. N., The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field, *Astrophysical Journal*, vol. 117, 1953.
- Linde, A. D., A new inflationary universe scenario: a possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems, *Physics Letters B*, vol. 108, 1982.

Lynden-Bell, D., Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars, *Nature*, vol. 223, 1969, p. 690. DOI : 10.1038/223690a0

Maxwell, J., *Ether*, dans *Encyclopedia britannica*, 9^e éd, VIII, 1878, pp. 568-572.

McCormick, P. J. (ed.), *Starmaking*, Cambridge : The MIT Press, 1996, 240 p. ISBN : 9780262529143

Melott, A. L., Einasto, J., Saar, E., Suisalu, I., Klypin, A. A., Shandarin, S. F., Cluster analysis of the nonlinear evolution of large-scale structure in an axion/gravitino/photino-dominated universe, *Physical Review Letters*, vol. 51, 1983.

Michelson, A. A., Morley, E. W., On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether, *American Journal of Science*, vol. s3-34, no 203, 1^{er} novembre 1887, pp. 333–345. DOI : 10.2475/ajs.s3-34.203.333

Newton, I., *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1687, 2^e éd. 1713, 3^e éd. 1726.

Peebles, P. J. E., The physicists philosophy of physics, *arXiv*, 2024. DOI : 2401.16506

Peebles, P. J. E., *The Large-Scale Structure of the Universe*. Princeton University Press, 1980, 423p.

Peebles, P. J. E., Ratra, B., Cosmology With A Time Variable Cosmological 'Constant', *Astrophysical Journal*, vol. 325, 1988.

Penzias, A. A., Wilson, R. W., A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, *The Astrophysical Journal*, 1965.

Poincaré, H., *La Science et l'Hypothèse*, Chapitre 12, Flammarion, 1917, pp. 245-259.

Riemann, B., Sur les hypothèses qui servent de fondement à la Géométrie. *Annali di Matematica* 3, pp. 309–326, 1869. DOI : 10.1007/BF02422984

Riemann, B., *Théorie générale des fonctions d'une grandeur variable complexe*, Göttingue, 1851.

Rovelli, C., *Et si le temps n'existait pas ?*, Dunod, 2023, 192p.

Rubin, V., Ford, W. K. Jr., Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions, *Astrophysical Journal*, vol. 159, 1970. DOI : 10.1086/150317

Shane, C., Distribution of Galaxies, dans *Galaxies and the Universe*, A. Sandage, M. Sandage, & J. Kristian (ed.), Chicago, University of Chicago Press, 1970, pp.647–63.

Shane, C. D., Wirtanen, C. A., The distribution of extragalactic nebulae, *Astrophysical Journal*, vol. 59, 1954.

Schleiden, M., *Beiträge zur Phytogenesis*. Berlin: Veit et Comp., 1838, 40 p.

- Schmidt, M., The Discovery of Quasars, *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 155, No. 2, 2011, pp. 142-146.
- Schwann, T., Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen. Sander, Berlin 1839.
- Schwarzschild, K., Die erste bekannte exakte Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss*, Berlin, 1916, pp. 189–196.
- Slipher, V., *The radial velocity of the Andromeda Nebula*, Lowell Observatory, Bulletin n°58, 1912.
- Smethurst, R., *How do cosmic supervoids prove that dark energy exists? | Space is Weird - Boötes Void*, DR. Becky, YouTube, 2019.
https://www.youtube.com/watch?v=_ZopKQC4-gY&ab_channel=Dr.Becky
- Smith, R. W., Hanle, P. A., Kargon, R. H., Tatarewicz, J. N., *The Space Telescope. A study of NASA, science, technology, and politics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1993, 496 p. ISBN : 978-0521266345
- Starobinsky, A. A., Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations *Physics Letters B*, vol. 117, 1982.
- Swerdlow, N. M., (dir.), *Ancient Astronomy and Celestial Divination*, Cambridge, 1999, 388p.
- Tifft, W., Gregory, S., Direct observations of the large-scale distribution of galaxies, *Astrophysical Journal*, vol. 205, 1976, pp. 696–708.
- Tully, R., Courtois, H., Hoffman, Y., Pomarède, D., The Laniakea supercluster of galaxies. *Nature* 513, 2014, pp. 71-73.. DOI : 10.1038/nature13674
- Vaucouleurs de, G., Further evidence for a local super-cluster of galaxies: rotation and expansion, *The Astronomical Journal*, Vol. 63, no 7, 1958, pp. 253-265. DOI : 10.1086/107742
- Weinberg, S., *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature*, New York, Knopf Doubleday Publishing Group, 1992, 352 p.
- White, S., Reconstructing the Universe in a computer: physical understanding in the digital age, *arXiv*, 2018. DOI : 1806.06348
- White, S. D. M., Rees, M. J., Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 183, 1978. DOI : 10.1093/mnras/183.3.341
- XENON Collaboration. Dark matter search results from a one ton-year exposure of xenon1t, *Phys. Rev. Lett.*, 121:111302, 2018.
- Yu, J.T., P.J.E. Peebles, Superclusters of Galaxies, *Astrophysical Journal*, vol. 158, 1969, pp. 103-113. DOI :10.1086/150175

Zel'dovich, Y., An approximate theory for large density perturbations, *A&A*, 5, 84, 1970.

Zwicky, F., Kowal, C. T., Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, *ESO*, Pasadena, California Institute of Technology, vol. 6, 1968.

Annexes

Une centaine de pages de transcriptions d'entretiens complète ce mémoire. Cependant, cette annexe n'est ni publique ni vouée à être diffusée mais destinée au jury du mémoire. Toute autre personne intéressée par des éléments supplémentaires qui seraient dans cette annexe peut contacter l'auteur du mémoire par e-mail : baptiste.jego@etu.unistra.fr ; jegobapt@gmail.com.

Les entretiens retranscrits en partie I de l'annexe le sont sous la forme « Q : Question » pour Baptiste Jego, et « R : Réponse » pour la personne avec qui l'entretien est fait, dont le nom accompagne la date de l'entretien avant la transcription. Ils sont présentés par ordre chronologique. Chaque transcription a été validée, parfois après des anonymisations et censures par la personne concernée, et sont données avec leur autorisation. Les parties anonymisées sont disponibles après l'ensemble des transcriptions, en partie II, et ne sont pas remplacées par des crochets « [...] » dans le texte original afin de ne pas permettre d'identifier la personne à l'origine d'un propos anonyme. Les parties censurées ne sont bien évidemment pas disponibles et ont par ailleurs été supprimées sans indications particulières dans les textes. On notera que ces retranscriptions sont fidèles au langage parlé utilisé pendant les entretiens, ce qui explique une syntaxe parfois incorrecte mais tout de même compréhensible.

La partie III est informative et propose la version anglaise du questionnaire utilisée lorsque l'entretien se déroulait en anglais. La correspondance entre le questionnaire français et le questionnaire anglais se veut littérale.

I - Retranscription des entretiens

II - Parties anonymisées

Voir le document annexe pour les parties I et II.

III - Questionnaire en anglais

- 1) For how long have you been working and why do you work in astrophysics/cosmology?
 - 2) Why are you interested in this field?
 - 3) Do you think different cosmological models (of dark matter, gravitation, space-time) should be treated equally (funding, outreach, judgment of the community)?
 - If so, why is it not the case?
 - If not, what makes a model a dominant one?
 - 4) Do you think LCDM, the halo model, and current cosmology are objective?
 - 5) Would you say large-scale « structure » or « structures »? Is there a difference with the cosmic web?
 - 6) What does the general public know about the large-scale structure of the Universe? What does it imply for the common imagery?
 - 7) How do you picture the future of cosmology? How does it compare to the past?
 - 8) Do you think the cosmological tensions are announcing a paradigm shift?
 - 9) What epistemological questions are you interested in regarding cosmology and the large-scale structure of the Universe? What would be your answers?
-