

La cosmologie à l'épreuve du temps

Par D. Gialis, astrophysicien

Depuis tout temps, les humains cherchent à définir l'Univers qui les entoure ; chaque peuple, chaque civilisation possède une ou plusieurs cosmogonies racontant et décrivant l'origine, le présent et le devenir de l'Univers. La cosmologie moderne, issue du développement sans précédent de nos connaissances scientifiques, nous propose aujourd'hui une vision riche et complexe qui est contrainte par un ensemble d'observations toujours plus fines et plus précises de l'univers observable. Les modèles cosmologiques, comme le modèle standard, n'ont pas d'autre choix que de tenir compte de ces observations. Rappelons le succès indéniable du modèle standard, appelé aussi modèle de concordance, expliquant notamment l'existence d'un fond diffus cosmologique (le fameux CMB), l'expansion de l'Univers ou bien encore l'abondance relative des éléments chimiques formés tout au long de l'histoire de l'Univers. Ces dernières années, les données du satellite Planck ont conforté ce modèle même si elles ont laissé dans l'ombre certains détails comme – par exemple – la nature exacte de la matière sombre, celle de l'énergie noire ou encore l'abondance du lithium.

Cependant, la construction des modèles cosmologiques reste basée sur plusieurs hypothèses, ou postulats, qu'il n'est pas aisé de remettre en cause. Par exemple, on postule que les lois de la physique, que l'on établit sur Terre et que l'on vérifie localement¹, sont valables en tout point de l'Univers et à tous les instants de son histoire. Autrement dit, les relations et les interactions entre les différents constituants ou entités de l'Univers (corps macroscopiques, particules, champs, cordes, ...) obéissent toujours et partout aux mêmes règles et ce, à toutes les échelles spatiales, de l'infiniment petit

à l'infiniment grand, et temporelles. Cela n'a rien d'une évidence dans un Univers si dynamique, dans lequel le changement et la transformation de ce qui existe semblent être la règle commune. Pourquoi les lois de la physique seraient-elles les seules caractéristiques immuables dans ce bouillonnement universel ? Les possibilités mathématiques apparaissent pourtant infiniment plus nombreuses, et c'est d'ailleurs cette piste qui est explorée – par exemple – dans certains modèles cosmologiques comme le modèle dit de *l'univers mathématique* (Tegmark, 2014). Outre ce postulat, une question plus fondamentale préoccupe tout physicien à la recherche d'un modèle cosmologique complet, un modèle théorique qui relierait l'instant initial du Big Bang au reste des observations. Cette question, abordée depuis des siècles par les philosophes comme par les scientifiques, est celle de la nature de l'espace et du temps.

La question de la nature de l'espace est centrale dans l'histoire de la physique : comment mesurer et décrire le mouvement de ce que l'on voit ? Comment différencier des entités physiques sans introduire forcément une notion de distance voire d'espace ? Comment repérer les objets les uns par rapport aux autres ? Cela est-il nécessaire pour étudier leurs interactions et leurs changements ? Depuis la relativité générale d'Einstein, ces interrogations ont fusionné avec celles liées au temps. Peut-être le lecteur sera-t-il familier des problèmes liés aux voyages dans l'Univers à des vitesses proches de celle de la lumière aboutissant au célèbre paradoxe des jumeaux de Langevin, de la modification dans la mesure des durées relatives à un phénomène suivant l'endroit où l'on se trouve, par exemple, au voisinage d'un trou noir comme dans le film *Interstellar* de Christopher Nolan

¹ Localement signifie ici sur Terre mais également dans l'univers que l'on a pu observer jusqu'à présent.

(2014). De même, le lecteur s'intéressant à la physique quantique se souviendra-t-il aisément de phénomènes non-intuitifs, voire étranges, comme l'état du chat de Schrödinger (à la fois mort et vivant), le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen, l'écroulement de la fonction d'onde ou l'interprétation d'Everett. Tous ces phénomènes, certains quantiques et d'autres gravitationnels, ont pour point commun d'utiliser un espace et un temps. Et c'est au physicien que revient le devoir d'expliquer ces phénomènes au sein d'une seule et même théorie, si cela a un sens, qui unifierait et préciserait la nature de l'espace et du temps.

Dans le livre XI de ses Confessions, au IV^{ème} siècle de notre ère, Saint Augustin traduisait déjà cette interrogation à propos du temps par cette réflexion devenue célèbre : « Qu'est-ce que donc le temps ? Si personne ne me pose la question, je le sais. Mais si quelqu'un pose la question et que je veuille l'expliquer, je ne sais plus. » Finalement, le physicien contemporain, tout comme le philosophe, éprouve le même malaise par rapport à la définition que l'on devrait donner au temps. Aujourd'hui, c'est finalement l'entité espace-temps, pilier de la relativité générale, qui peine à être clairement définie. Certains peuvent même penser que ni l'espace, ni le temps n'existent, du moins pas sous la forme que nous imaginions jusqu'à présent, et qu'il nous faut repenser les notions qui leur sont attachées. Néanmoins, la structure envisagée, pour devenir une théorie scientifique, se doit de rendre compte des phénomènes spatio-temporel que nous observons.

Deux idées profondément différentes ont émergées peu à peu : d'un côté, il y a la vision newtonienne dans laquelle l'espace et le temps sont définis comme un cadre existant indépendamment des entités qu'il contient. Cet espace-temps (ou séparément cet espace et ce temps) est alors qualifié de *substantiel* : on dit que les phénomènes physiques se déroulent dans l'espace-temps et que rien ne peut le modifier. L'espace-temps apparaît comme le contenant de toute chose existant (au sens large). Dans la mécanique de Newton, on peut toujours trouver

une sorte d'horloge universelle, témoin d'un écoulement uniforme du temps, mais également une sorte de règle universelle pour effectuer, respectivement, des mesures de temps et d'espace. Toutes les horloges et toutes les règles peuvent être calibrées, ou synchronisées, afin de donner les mêmes mesures quel que soit l'observateur.

L'observateur est lui aussi plongé dans cet espace-temps, mais il n'a aucun moyen de le modifier car cela est fondamentalement impossible, par construction. Si tout le contenu de l'espace devait disparaître, l'espace vide tout comme le temps subsisterait comme unique réalité. Cette vision de l'espace et du temps n'est pas l'apanage d'une physique classique, qui serait désuète et qui remonterait à Galilée ou à Newton, car c'est justement dans ce cadre-là que se sont développées deux théories physiques majeures au début du vingtième siècle : la relativité restreinte (et non générale !) et la physique quantique.

La relativité restreinte d'Einstein, en introduisant la notion d'espace-temps (de Minkowski) et sans remettre en cause le caractère substantiel du temps, a permis la distinction fondamentale entre un temps local et un temps global, ce que ne faisait pas la mécanique de Newton : le temps local est celui mesuré par l'observateur lorsqu'il utilise une horloge qui lui est attachée, sa propre montre en quelque sorte. C'est celui qui va permettre de mesurer les durées relatives aux changements d'un objet physique qui est au repos par rapport à l'observateur : on parle alors de *temps propre*. Techniquement, il peut servir à paramétrer la ligne d'univers de l'observateur en supposant que celui-ci n'est pas un photon !

Le temps global sert quant à lui à mesurer des durées séparant des événements ayant lieu à différents endroits de l'espace-temps : ces durées seront relatives au référentiel choisi et conduisent aux problèmes de la simultanéité entre deux événements qui n'est pas absolue et qui dépend, contrairement à la causalité, de l'observateur. Par ailleurs, Einstein redéfinit

une classe particulière de référentiels de l'espace-temps, les référentiels inertiels (ou galiléens), c'est-à-dire ceux dans lesquels le principe d'inertie est vérifié, et il introduit, suite aux travaux de Minkowski, l'invariance de la distance spatio-temporelle associée aux transformations de Lorentz.

La mécanique quantique et les théories qui en découlent - comme la théorie quantique des champs ou le modèle standard de la physique des particules - ont très bien su s'adapter à la relativité restreinte en ce sens qu'elles partagent la même conception substantielle de l'espace-temps. La première interrogation que l'on peut avoir survient lorsque l'on s'aperçoit que les équations de la dynamique newtonienne comme celles de la mécanique relativiste ou quantique sont toutes insensibles au sens de l'écoulement du temps (on peut y remplacer t par $-t$)².

La seconde interrogation, plus troublante, vient du fait que ces mêmes équations peuvent se ré-écrire sans faire intervenir le temps comme paramètre. Autrement dit, l'introduction du temps, ou de ce que l'on suppose être le temps, n'est pas nécessaire pour exprimer les changements et les relations entre les différentes entités physiques. Le temps que l'on introduit est-il alors un artefact mathématique, une sorte de variable bien commode mais non essentielle, ou bien a-t-il un sens qui nous échappe ? Pourquoi ressentons-nous quelque chose que l'on appelle le temps et qui nous suggère de distinguer un passé, un présent et un futur ? Citons, à ce propos, cette réflexion d'Einstein pour qui « *la distinction entre le passé, le présent et le futur n'est qu'une illusion obstinément persistante* ». Est-ce que le temps qui sert à se repérer, le temps vu comme une coordonnée (celle qui se rajoute aux trois d'espace), est bien le même que celui qui sert à mesurer des variations ou des changements ?

Le problème est apparu plus nettement il y a seulement un siècle lorsque Einstein a

développé la notion d'espace-temps : celui-ci est défini comme étant une variété de dimension quatre (trois d'espace et une de temps) munie d'une pseudo-métrique lorentzienne. Un des points clés dans la compréhension de la relativité générale est celui de la notion de coordonnées et du principe de covariance généralisée. Peu importe le choix des coordonnées sur la variété espace-temps, c'est-à-dire la façon dont on choisit de se repérer, les équations de la dynamique gardent la même forme. Les variables de temps et d'espace ne peuvent donc pas être clairement distinguées, comme cela est le cas en mécanique quantique. Localement, à tout changement de coordonnées correspond simplement un changement d'observateur (ou de référentiel). De même, la pseudo-métrique, c'est-à-dire la façon dont on définit une distance spatio-temporelle infinitésimale, est directement reliée au champ gravitationnel : tout comme lui, elle diffère en chaque point de l'espace-temps. D'une part, cela signifie que la distance spatiale entre deux points distincts perd son sens, car deux protocoles de mesure ou deux observateurs différents ne donneront pas la même mesure et, d'autre part, cela implique l'existence d'un temps arbitraire puisque chaque observateur ne dispose que d'un temps propre, celui qu'il mesure avec sa montre et qui est unique. On ne peut donc pas faire de distinction, comme en physique newtonienne, entre la cinématique et la dynamique.

Ainsi, l'espace-temps de la relativité générale a une structure dynamique qui dépend des entités physiques et de leurs interactions : par exemple, toute particule de matière, ou tout observateur, induit une modification, du fait de sa masse, de l'espace-temps qui l'entoure, même minime. De façon plus extrême, deux trous noirs en rotation l'un autour de l'autre génèrent même des ondes gravitationnelles, autrement dit, une modification de l'espace-temps qui se propage à l'ensemble des autres corps dans l'Univers. En relativité générale, ce n'est pas l'espace-temps qui dicte le mouvement mais plutôt le champ

2 Nous ne parlerons pas ici de la construction d'un temps dit thermique qui intervient dans l'énoncé du second principe de la thermodynamique.

gravitationnel vu comme un lien entre les différentes particules massives.

Finalement, la question de la mesure du temps et de l'espace, comme l'imaginait Newton, n'a plus vraiment d'importance dans la description physique : ce qui compte, ce sont les interactions entre les entités et les mesures des quantités physiques que l'on peut leur associer en tant qu'observateur³. De même, les mouvements entre les différents objets de l'Univers ne sont plus décrits à l'intérieur d'un espace-temps, mais relativement les uns aux autres. Cela nous amène à redéfinir, comme l'a fait Leibniz, l'espace-temps comme une structure relationnelle appelée *espace-temps relationnel*. Comme le dit justement Alexis de Saint-Ours (2011) : « *L'espace est l'ordre des coexistants et le temps est l'ordre des successions. L'espace et le temps n'ont pas de valeur ontologique mais une valeur logique : celle d'une relation d'ordre.* »

C'est cette idée qui est développée dans la géométrodynamique initiée par Wheeler : son équation dynamique maîtresse, l'équation dite *de Wheeler-DeWitt* ne contient même pas de variable temporelle. Les entités physiques ne sont pas plongées dans un espace-temps, elles constituent l'espace-temps lui-même et possèdent chacune des propriétés géométriques.

Cette redéfinition du temps n'apparaît pas essentielle aux échelles de la physique classique, aux faibles énergies ou dans de faibles champs gravitationnels. La physique classique fonctionne très bien. En revanche, cette distinction entre un espace-temps substantiel et un espace-temps relationnel semble cruciale aux échelles microscopiques telle que l'échelle de Planck (10^{-33} cm) et dans les situations extrêmes que l'on rencontre dans notre Univers comme -

3 Imaginez que vous regardiez l'heure sur votre horloge : vous associez le changement observé sur l'horloge au passage du temps, alors que vous ne constatez que votre propre changement en coïncidence avec celui de l'horloge. Ce changement reste profondément différent d'une mesure du temps, et surtout, il n'est nul besoin d'introduire un temps pour parler de changement.

par exemple – le centre des trous noirs ou l'Univers au moment du Big Bang. Elle est le départ d'une des meilleures pistes, avec la théorie des cordes, qui essaient de réconcilier relativité générale et physique quantique, à savoir, la gravitation quantique à boucles.

Pour résumer très brièvement, la gravitation quantique à boucles est une théorie qui est construite depuis plus d'une trentaine d'années (Ashtekar, 1986) et qui repose sur une application des règles de quantification à la relativité générale en utilisant le formalisme hamiltonien (Rovelli, 1999 & 2001). Plus précisément, cette théorie est définie par un espace d'états et par une équation donnant les probabilités de transition entre ces états, tout comme l'électrodynamique quantique. La conséquence est un espace-temps qui semble très éloigné de la conception classique et relativiste : ce dernier est constitué de ce que l'on appelle des *réseaux de spin* formés de nœuds, ou de boucles entrelacées, et de liens entre ces nœuds indiquant quel nœud est à proximité de quel autre. La modification des réseaux de spin, via l'action d'un hamiltonien, crée une structure, analogue à l'espace-temps quadridimensionnel usuel, que l'on appelle *mousse de spin* (Hugget & Wüthrich, 2013). Néanmoins, la structure de cette mousse de spin est bien discrète et se distingue fondamentalement de la structure continue de l'espace-temps relativiste : autrement dit, il existe des volumes et des aires élémentaires qui sont insécables - donc qui n'ont pas de partie – et l'espace a bien une structure granulaire. Les grains sont appelés *atomes* ou *quanta d'espace*, en référence aux quanta de la théorie quantique des champs. La grandeur qui correspondrait à leur taille est quantifiée c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que des valeurs discrètes liées à un entier ou à un demi-entier appelée *spin*. Au centre de chaque atome d'espace se trouve un nœud du réseau. Enfin, ces entités élémentaires sont reliées par des relations probabilistes analogues à celles rencontrées en théorie quantique, et les équations qui les gouvernent ne comportent plus de variable temporelle. Au niveau de l'échelle de Planck, le temps ne serait

plus que variation et perdrait la possibilité de servir de coordonnée : la notion d'horloge deviendrait caduque.

Comment le lien se ferait-il entre une telle théorie et la physique telle qu'on l'a éprouvée jusqu'à aujourd'hui ? En fait, l'espace-temps de la relativité générale ou celui de la théorie quantique ne serait qu'une approximation, qu'une structure émergeant de celle de l'espace-temps relationnel défini par la théorie de la gravité quantique à boucles. Tous les résultats fondamentaux de ces deux grandes théories sont inclus dans une vision mathématique plus large et plus riche de la réalité dont la différence ne se fait sentir que dans des situations physiques extrêmes, là où les deux théories initiales font apparaître des incohérences et, par là même, leurs limites. Même si une formulation complète quant à la limite classique d'une telle théorie reste encore à faire, les conséquences pour la cosmologie et pour la physique des trous noirs seraient nombreuses tant aux échelles cosmologiques qu'aux échelles microscopiques. Par exemple, la quantification de l'espace-temps apporte une solution finie dans la détermination du nombre d'états (ou de formes) possibles pour l'horizon d'un trou noir et elle aboutit simplement à la détermination de son entropie.

De même, cette théorie apporterait une solution élégante à la singularité centrale d'un trou noir comme à l'événement que l'on appelle Big Bang. Pour ce dernier cas, en effet, à la célèbre équation de Friedman-Lemaître, qui permet de décrire l'évolution de l'Univers à grande échelle, la gravité quantique à boucles rajoute une correction quantique faisant intervenir la densité de Planck (environ 10^{96}kg/m^3) et dont les effets ne se font sentir que lorsque l'on se rapproche de l'instant initial associé au Big Bang. Cette correction agit alors comme une force répulsive - à l'image de celle qui empêche l'électron de s'écraser sur le noyau atomique via le principe d'incertitude d'Heisenberg. Elle empêche simplement l'Univers de se contracter jusqu'à avoir une densité infinie et lui impose une taille minimale, extrêmement petite mais non nulle, correspondant justement à la densité de Planck.

Cette idée est tout à fait extraordinaire dans le sens où ni la théorie quantique, ni la relativité générale n'apporte de solution à l'instant zéro de la naissance de notre Univers : ici, la théorie quantique à boucle, par sa nouvelle approche du temps et de l'espace, propose une autre solution que celle de ce que l'on nomme un *Big Bounce*, c'est-à-dire un rebond ayant lieu immédiatement après qu'un univers semblable au nôtre se contracte jusqu'à atteindre la taille minimale et qui précède la naissance de l'Univers dans lequel nous sommes. Elle permet donc d'imaginer un avant Big Bang. Bien que nous manquions d'observations pour confirmer ou infirmer cette théorie et que certaines théories concurrentes existent, elle possède néanmoins de nombreux atouts permettant de s'affranchir de nombreuses singularités, des quantités physiques qui tendent vers l'infini et qui sont présentes dans les théories quantique et relativiste. Peut-être, une analyse plus fine du spectre associé au fond diffus cosmologique pourra-t-elle laisser entrevoir les traces d'un tel Big Bounce ? Peut-être le développement d'une astronomie gravitationnelle c'est-à-dire basée sur l'observation des ondes gravitationnelles apportera d'autres contraintes décisives ?

En revenant à la question de la nature du temps et de l'espace, de nouvelles théories physiques semblent donc imaginables et nous éclairent quant aux origines possibles de notre Univers. C'est donc un enjeu important pour la cosmologie moderne et la physique en général dans les prochaines décennies. D'autres pistes, que nous ne détaillerons pas, ont été explorées pour décrire la structure fine de l'espace-temps comme la théorie des cordes ou la géométrie non commutative. Le plus difficile dans ces théories est d'apporter des preuves expérimentales de ce qu'elles impliquent ou prédisent, car elles ne se distinguent des autres théories plus classiques que dans des conditions physiques qui échappent à toutes les mesures actuelles.

Pour aller plus loin

La disparition du temps en gravitation quantique, A. de Saint Ours, *Philosophia Scientiae*, 2011.

Notre univers mathématique, M. Tegmark, Ed. Dunod, 2014.

De la gravitation quantique à boucles, C. Rovelli, *Images de la physique*, 2011.

Localization in quantum field theory : how much of qft is compatible with what we know about space-time ?, C. Rovelli, Ed. Cambridge University Press, 1999.

Quantum space-time : what do we know ?, C. Rovelli, Ed. Cambridge University Press, 2001.

New Variables for Classical and Quantum Gravity, A. Ashtekar, *Physical Review Letter*, 1986.

Emergent spacetime and empirical (in)coherence, N. Hugget & C. Wüthrich, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2013.

Site web du satellite *Planck*
<http://public.planck.fr/>

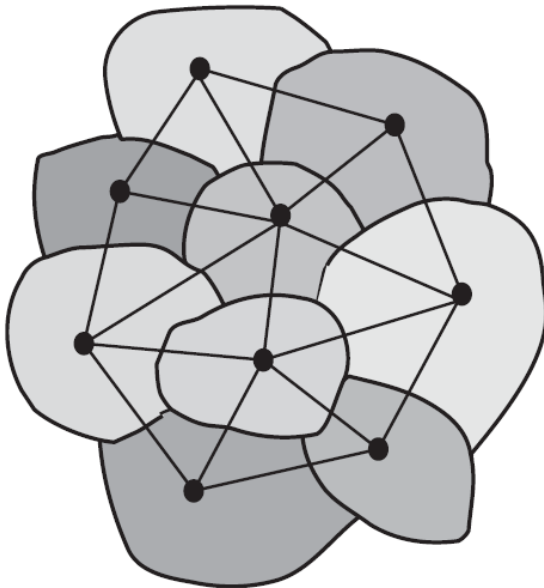


Fig. 1 : Représentation d'un état du champ gravitationnel, l'équivalent d'un morceau d'espace-temps dans la théorie de la gravitation quantique à boucles : un réseau de spin est formé de quanta d'espace (les différentes zones grisées) avec en leur centre les noeuds du réseau. (Rovelli, 2011)

Encadré - Le temps des philosophes et des scientifiques au cours de l'histoire...

Les philosophes et les scientifiques ont été nombreux à chercher une définition ou une explication au phénomène du temps. Voici quelques unes des réflexions qu'ils nous ont laissées :

Pour Parménide d'Elée (vers 500 av. J.C.) : à propos du temps, il dira « *et jamais il ne fut, et jamais ne sera, puisqu'au présent il est, tout entier à la fois; un et un continu.* »

Pour Héraclite (vers 500 av. J.C.), le temps s'apparente à un perpétuel changement : « *On ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve.* » Le temps est la forme du devenir universel de toutes choses.

Pour Aristote (vers 350 av. J.C.), le temps est un nombre qui caractérise le mouvement et le changement : « *le temps n'existe pour nous qu'à la condition du mouvement et du changement [...] Le temps n'est pas le mouvement [...] Sans le mouvement le temps n'est pas possible [...] Voici bien ce qu'est le temps: le nombre du mouvement par rapport à l'antérieur et au postérieur[...] Le temps est ce qui est numbré, et non ce par quoi nous nombrons.* »

Isaac Newton (1642 - 1727) défend la nature substantielle du temps : « *le temps absolu, vrai et mathématique, qui est sans relation à quoique ce soit d'extérieur, en lui-même et de sa nature coule uniformément; on l'appelle aussi durée.* »

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716) développe l'idée d'un temps relationnel : « *Supposé que quelqu'un demande pourquoi Dieu n'a pas tout créé un an plus tôt, et que ce même personnage veuille inférer de là que Dieu a fait quelque chose dont il n'est pas possible qu'il y ait une raison pourquoi il l'a faite ainsi plutôt qu'autrement : on lui répondrait que son illation serait vraie si le temps était quelque chose hors des choses temporelles; car il serait impossible qu'il y eût des raisons pourquoi les choses eussent été appliquées plutôt à de tels instants qu'à d'autres, leur succession demeurant la même. Mais cela même prouve que les instants hors des choses ne sont rien, et qu'ils ne consistent que dans leur ordre successif.* »

Emmanuel Kant (1724 -1804) fait quant à lui la distinction entre l'ordre du temps (de nature causale) et l'écoulement du temps : « *la plus grande partie des causes efficientes dans la nature existent en même temps que leurs effets, et la succession dans le temps de ceux-ci tient uniquement à ce que la cause ne peut pas produire tout son effet en un moment [...] Il s'agit de l'ordre du temps et non de son cours: le rapport demeure, même s'il ne s'est pas écoulé de temps.* »

Thibaut Damour (en 2002) nous parle de la flèche du temps, de la perception du passé, du présent et du futur : « *il est probable que la notion d'écoulement du temps n'a de sens que pour certains systèmes complexes, qui évoluent hors de l'équilibre thermodynamique et qui gèrent d'une certaine façon les informations accumulées dans leur mémoire [...] L'espace-temps constitue un bloc rigide qui n'est nullement orienté a priori: il ne le devient que pour nous.* »