

Le statut du temps en Relativité Générale, géométrie et dynamique de l'espace-temps.¹

Renaud Parentani

Laboratoire de Physique Théorique, UMR 8627,
Université Paris-Sud 11, Bât. 210,
91405 Orsay Cedex, France

Venez illusions, ...

Faust, Goethe.

Résumé. *Nous distinguerons d'abord deux notions : celle de la durée et celle, plus élémentaire, de paramètre temporel permettant de suivre de manière ordonnée le déroulement de tout processus qu'il soit physique, biologique, mental ou social. Nous montrerons comment la géométrie de l'espace-temps en Relativité Restreinte donne un sens précis à la mesure du temps et au concept d'écoulement uniforme (qu'il convient de rapprocher du concept de temps absolu que l'on trouve en Mécanique Newtonienne). Nous verrons ensuite comment le caractère dynamique de la géométrie de l'espace-temps en Relativité Générale remet en cause ces notions en stipulant que le paramètre temps peut être arbitrairement choisi. Cette rupture se radicalise encore lorsqu'on passe à la version quantifiée de la Relativité Générale dans laquelle la "fonction d'onde de l'univers" ne dépend plus du temps. Partant de là, nous expliquerons enfin comment, sous certaines conditions, le temps peut être retrouvé.*

¹Ce texte reprend de manière plus détaillée l'exposé que l'auteur a donné lors du Colloque intitulé "*Le temps et l'espace existent-ils ?*" et organisé par France Culture et l'Université de Bruxelles en juin 2007.

1 Deux aspects du temps.

Quand on parle du temps, quand on utilise l'entité "le temps", plusieurs attributs du temps sont confondus. Commençons donc par distinguer deux de ces attributs qui joueront des rôles très différents par la suite.

Le premier est le plus primitif. Il semblera peut-être aller de soi au lecteur, mais on verra qu'il contient en germe des notions que l'on retrouvera en Relativité Générale.² Pour introduire ce premier aspect du temps, partons de l'observation du monde qui nous entoure. Il est indéniable que notre univers est le siège de multiples "processus". Ces processus sont de nature très diverse, ils peuvent être physiques –transitions atomiques, fonte de glace, formation et mouvements de galaxies–, biologiques –reproduction cellulaire, digestion, ...–, mentaux –apprentissage, développements d'idées, ...–, ou sociaux, voire civilisationnels. Quoi qu'il en soit, ils sont tous caractérisés par une succession (généralement ordonnée) d'états (de configurations) différents.

Le premier rôle du temps est de paramétrer cette succession, c'est-à-dire d'associer un nombre (une heure) à chacune des étapes. Comme il y a une énorme diversité de processus, on pourrait penser qu'il faudra faire appel à plusieurs paramètres "temps" pour pouvoir tous les suivre. On ferait ainsi appel à un temps biologique pour les processus biologiques, un temps physique pour la physique... Il n'en est rien, ce n'est pas nécessaire, un seul paramètre suffit pour suivre tous les processus indépendamment de leur nature. Cette unicité est renforcée lorsque l'on considère des processus se déroulant dans des lieux éloignés les uns des autres. On pourrait ici également penser qu'il faudra faire appel à des paramètres différents pour suivre des processus tellement éloignés que rien ne les relie. Ce n'est pas le cas non plus, un seul paramètre permet de suivre l'ensemble des phénomènes qui ont lieu dans une ville, sur Terre, dans le système solaire, dans notre galaxie et même dans tout notre univers visible. Ainsi, malgré la diversité et la pluralité des phénomènes de l'univers, un seul et même temps suffit pour en suivre l'évolution.

Nous nous trouvons donc confrontés à une énorme réduction du multiple à l'unique. Cela soulève deux questions. La première question est de savoir s'il pouvait en être autrement. La réponse est oui dans le sens que l'on peut parfaitement concevoir des modèles d'univers à plusieurs temps (irréductibles les uns aux autres). Mais comme les prédictions de ces modèles sont en désac-

²Le lecteur qui souhaite rafraîchir sa mémoire, ou acquérir quelques notions de Relativité Générale, trouvera en annexe une présentation succincte de cette théorie géométrique de la gravitation.

cord flagrant avec le monde tel qu'on l'observe, nous pouvons conclure que nous vivons bien dans un univers caractérisé par un seul temps. Ayant atteint cette conclusion, posons-nous la question de savoir si l'on peut comprendre l'*origine* de l'unicité du temps. Pour aborder cette question, il nous faudra un peu de patience et présenter le deuxième aspect du temps.

Avant cela, j'aimerais faire deux remarques pour éviter des malentendus, mais aussi pour répondre à ce qui fut dit par d'autres intervenants de ce colloque. Je souhaiterais d'abord attirer l'attention sur le raccourci de langage qui consiste à attribuer au temps ce qui est du ressort des situations qu'il désigne. Par exemple, lorsque l'on dit que l'instant est propice, ce que l'on veut dire c'est que les conditions réunies à cet instant (et en ce lieu) le sont. Le paramètre temps, le nombre qui le spécifie, est lui étranger à toute qualification liée à notre condition humaine. Deuxièmement, lorsque je dis qu'un seul temps suffit, cela ne veut pas dire que l'on ne peut pas introduire, ou définir, plusieurs temps, mais bien que si on le fait, ils seront reliés les uns aux autres de manière telle que l'on pourra tous les exprimer en fonction d'un seul. Etant réductibles à l'un d'entre eux, ils ne peuvent donc être considérés comme intrinsèquement différents. De plus ils ne seront distingués que par des propriétés étrangères au temps. L'utilisation de plusieurs "temps" n'est donc jamais nécessaire.

Le second aspect du temps dont nous allons maintenant parler est souvent confondu avec le temps lui-même : il s'agit du concept de durée, en ce qu'il implique une mesure du temps écoulé. Jusqu'à présent j'ai soigneusement évité d'en parler car cet aspect est disjoint de la paramétrisation des phénomènes et car il se révèle plus compliqué qu'il n'en a l'air.

Le point de départ de la notion de mesure du temps provient sans doute de l'observation des cycles diurnes, lunaires, saisonniers, ..., qui développe en nous l'idée que le temps s'écoule uniformément (comme s'il s'écoulait à vitesse constante). Si c'est le cas, il doit être possible d'identifier des mouvements dont la régularité va nous permettre d'en extraire le temps. Ainsi, au lieu de dire : "il est arrivé lorsque le soleil faisait une ombre qui pointait dans telle direction", on peut construire un cadran, s'en servir et dire qu'il est arrivé à telle heure.

Il est intéressant de remarquer que jusque dans les années 50, la mesure et donc la "définition" du temps était basée sur ce principe. Le mouvement de référence était celui effectué par la Terre autour du Soleil, moyenné pour en lisser les irrégularités. À cette époque l'amélioration des mesures astronomiques a permis de mettre en évidence un décalage systématique et croissant

entre les prévisions et les observations. Il a fallu se rendre à l'évidence, ce temps était mal défini car le mouvement de la Terre subit des effets de freinage. Depuis, le "vrai" temps est donné par des horloges atomiques dont le principe est très simple et, remarquons-le, très voisin de l'ancien système. Au lieu de définir une seconde comme une fraction de l'année solaire, la seconde est maintenant définie par un multiple d'oscillations d'un type d'atomes bien particuliers.

Ainsi, en considérant comment s'effectue la mesure du temps, (c'est-à-dire en acceptant de se confronter avec le monde tel qu'il est, par opposition à penser un monde idéal) on s'aperçoit que cette mesure n'est qu'indirecte et qu'elle repose aussi sur un postulat de périodicité. On voit ici germer l'idée selon laquelle le temps pourrait ne pas être fondamental. On la verra grandir.

2 Le temps en Mécanique Newtonienne

Les efforts pour mesurer le temps ont été fortement soutenus à l'époque moderne par les succès que remportaient la Mécanique Newtonienne. Ce point est essentiel car au travers de ces succès se joue le bien-fondé de notre conception du temps. En effet, la première des trois lois de la Dynamique de Newton implique qu'il existe un Temps Absolu, commun à tous les mouvements. Il importe donc de l'identifier et de le mesurer pour pouvoir comparer les prédictions de cette théorie avec les mouvements observés, et par là même, pour pouvoir valider (ou invalider) les postulats sur lesquels elle est fondée.

L'énoncé de la première loi, appelée aussi Principe d'Inertie est le suivant. Il stipule que tous les corps isolés, et donc soumis à aucune force, effectuent des mouvements rectilignes et uniformes, désignant par là un temps, dit aussi "inertiel" car tel que la vitesse de ces corps calculée à l'aide de ce paramètre est bien constante. Ce principe est complété par la seconde loi de Newton qui dit que la résultante des forces que subit tout corps modifie son mouvement en déterminant son accélération évaluée à l'aide de ce même temps.

À première vue il peut sembler que ce principe soit de nature tautologique puisque le temps est défini par l'uniformité des mouvements qu'il est censé mesurer. En fait il ne l'est pas, car de l'étude de chaque mouvement (inertiel, ou non-inertiel en utilisant la deuxième loi) on peut extraire un temps que l'on peut comparer aux autres temps obtenus par l'observation d'autres mouvements. On peut donc a posteriori vérifier s'ils coïncident entre eux comme l'affirme Newton, ou non.

Aux incertitudes expérimentales près, les temps ainsi collectés coïncident parfaitement.³ Cet accord est remarquable puisqu'il confirme que des mouvements n'ayant apparemment rien en commun car caractérisant des systèmes physiques de natures très différentes ou très éloignés les uns des autres partagent en fait le même temps. L'hypothèse qu'il existe un temps, commun à tous les mouvements et donc à tous les processus de l'univers, est ainsi validée, tout comme l'est le fait qu'il s'écoule de manière uniforme, en adéquation avec les mouvements inertiels.

Avant de passer au statut du temps en Relativité Restreinte, examinons de plus près les liens étroits qui unissent le temps et la Dynamique Newtonienne car ils sont riches d'enseignements. Sans vouloir entrer dans les détails du formalisme, il est utile de préciser qu'au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, les lois de la Dynamique ont été plusieurs fois reformulées jusqu'à ce que sa quintessence s'exprime de manière transparente. C'est ainsi que le Principe de Moindre Action a acquis une position centrale car il généralise les équations de Newton et s'applique à tout système physique. Autrement dit un même principe gouverne l'évolution temporelle de tous les systèmes physiques que l'on rencontre dans notre univers. Cette universalité fait bien sûr écho à celle du temps inertiel. En reconnaissant que le temps partage son universalité avec le principe fondateur de la Dynamique nous franchissons une étape capitale dans notre questionnement du temps.

Creusons davantage ce filon. L'universalité du Principe de Moindre Action conduit au fait que tous les systèmes physiques obéissent à une équation, dite d'Hamilton-Jacobi, qui a toujours la même structure.⁴ À droite de l'égalité, on trouve la fonction-énergie du système. Celle-ci fournit la valeur de son énergie en fonction de l'état dans lequel il se trouve (par ex. si sa vitesse est grande, son énergie le sera aussi). À gauche on trouve l'action du système, dérivée par rapport au temps inertiel. Le but de la Dynamique est de résoudre cette égalité et de calculer la valeur de l'action car sa connaissance fournit la trajectoire que va emprunter le système. La structure de l'équa-

³Je dois ici préciser que cette phrase n'est exacte que si l'on se restreint aux expériences effectuées avant 1890. Après cela les indications expérimentales plaident en faveur d'une refonte de la cinématique, ce qui est le sujet du chapitre suivant.

⁴Le lecteur pourra à juste titre s'étonner de voir ici exposer ce qui pourrait apparaître comme des détails techniques. Après réflexion, j'ai cependant opté pour la présentation de ce formalisme car c'est par celui-ci que la nature du temps est révélée en Relativité Générale. Pour aider le lecteur, nous expliquons en fin de texte, dans la note II, ce qu'est une *action* et pourquoi elle est un élément constitutif de la Mécanique.

tion d'Hamilton-Jacobi nous révèle ainsi deux propriétés fondamentales. La pluralité des processus de l'univers provient (uniquement) de la diversité des fonctions-énergie qui caractérisent les systèmes physiques. Par contre, le lien entre leur action et leur fonction-énergie, est lui universel et, de plus, il gouverne leur évolution temporelle. Ceci nous suggère l'idée que l'universalité du temps doit être liée à (voir même produite par) l'universalité des Lois de la Dynamique.

Cette idée est renforcée par le principe d'addition auquel obéissent les systèmes dynamiques. Lorsque l'on considère deux systèmes n'ayant rien en commun, ils sont décrits par deux équations déconnectées l'une de l'autre et que l'on peut donc résoudre séparément. On peut toutefois considérer l'ensemble formé par l'union de ces deux systèmes car la structure de l'équation d'HJ est toute disposée à cela. Il suffit du côté droit d'additionner les fonctions-énergie des deux systèmes pour former l'énergie du nouveau système dynamique, et à gauche d'additionner les dérivées de leur action respective (pour former la dérivée de la somme qui est l'action du nouveau système). Ainsi la Dynamique nous invite à considérer l'ensemble formé par la totalité des systèmes physiques (c'est-à-dire toute la matière de l'univers). Elle nous apprend que l'évolution de ce système-univers obéira une équation d'HJ dont la fonction-énergie n'est rien d'autre que la somme des énergies de ses constituants. Par ce principe d'addition des énergies et des actions, nous découvrons (émerveillés) que la totalité des processus dans l'univers est gouvernée par *une* équation d'HJ. Nous sommes partis en questionnant l'unicité du temps, et nous obtenons l'universalité de la Dynamique.

Essayons maintenant de relier la Dynamique à la Géométrie qui possède aussi un goût prononcé pour l'universel. Remarquons pour commencer que la possibilité de mesurer des intervalles de temps et que la notion d'écoulement uniforme relient toutes deux le temps à la géométrie euclidienne de l'espace tri-dimensionnel. En effet ces deux propriétés possèdent des correspondances précises avec des notions géométriques; la première avec celle de distance entre deux points, et la seconde avec celle d'homogénéité de l'espace. Ainsi quand on translate une règle, sa longueur ne change pas. De même quand on dit que 10 minutes se sont écoulées, il ne faut pas préciser à partir de quel moment il faut compter ces 10 minutes.

Ces relations entre Dynamique et Géométrie sont confirmées par l'étude (plus abstraite mais aussi plus spécifique) des transformations d'un référentiel inertiel vers un autre référentiel inertiel (sous lesquelles les lois de Mécanique Newtonienne sont inchangées). On peut par ce biais identifier la géométrie de

l'espace-temps sur laquelle est effectivement basée cette mécanique. Il s'agit d'une structure géométrique assez compliquée qui contient l'espace euclidien tri-dimensionnel, représentant l'ensemble des positions dans l'univers, et un espace uni-dimensionnel, représentant le temps et ses propriétés métriques. Comme cette structure est compliquée et comme le temps et l'espace y jouent des rôles différents, il est d'usage de ne pas parler d'espace-temps en mécanique non-relativiste, bien que cette notion soit bel et bien présente.

Ce qui est tout simplement remarquable c'est qu'avec l'avènement de la RR, cette géométrie va se simplifier, on pourrait même dire, se décanter. Eureka !

3 Le statut du temps en Relativité Restreinte

Le principal changement opéré par la RR est de remplacer le cadre géométrique sur lequel se fonde la mécanique. Le nouveau cadre est une géométrie quadri-dimensionnelle où la coordonnée temps joue maintenant un rôle très semblable à celui joué par les trois coordonnées d'espace.

Les propriétés de cette géométrie sont bien précises : il ne s'agit pas d'une quadri-géométrie quelconque mais bien d'une quadri-géométrie particulière, appelée espace-temps de Minkowski. Pour se représenter cette géométrie, le plus simple est de partir de la géométrie euclidienne à deux dimensions, c'est-à-dire de la géométrie du plan. Parmi toutes les surfaces (peu courbées, très courbées, pas courbées...) que l'on peut plonger dans l'espace à trois dimensions, le plan occupe une place singulière : c'est la seule géométrie bi-dimensionnelle plane et infinie. De la même façon, l'espace-temps de la RR est la seule (pseudo)-géométrie quadri-dimensionnelle plane et infinie. Le préfixe "pseudo" désigne le fait que la distance dans un espace-temps ne satisfait pas le critère habituel de positivité. Alors que dans le plan, le carré de la longueur entre deux points est, comme le stipule le théorème de Pythagore, égal à la somme des carrés des longueurs des deux segments perpendiculaires ; dans l'espace-temps, le carré de la pseudo-longueur entre deux points-événements, repérés chacun par quatre coordonnées cartésiennes, est égale à la *différence* entre le carré de la longueur du segment "temps" et la somme des carrés de la longueur des trois segments "espace". Autrement dit, si l'on remplaçait cette différence par une somme, on obtiendrait le théorème de Pythagore à quatre dimensions. Mis à part ce signe " – " dans l'expression de la distance, l'espace-temps de la RR est donc identique à l'espace euclidien à quatre

dimensions. D'un point de vue géométrique, les choses sont très claires : Il n'y a pas d'espace-temps plus simple.

D'un point de vue physique, les choses sont moins simples car elles bouleversent notre représentation du monde et parce que deux aspects s'affrontent. D'une part, l'avènement de la RR a constitué une véritable surprise car au début du XX^e siècle, les notions de temps et d'espace semblaient acquises (étant donnés les succès répétés de la Mécanique Newtonienne et de ses développements). Ceci est tellement vrai que Lorentz et Poincaré ne sont pas parvenus à tirer les conséquences physiques des aspects mathématiques de la RR qu'ils avaient pourtant compris en étudiant la théorie de l'électro-magnétisme de Maxwell. C'est Einstein qui a pris conscience qu'il fallait rompre avec l'ordre établi.⁵ D'autre part, les modifications apportées par la RR sont en fait assez légères. En effet, les propriétés de la Mécanique Newtonienne se retrouvent dans la Mécanique Relativiste, soit inchangées, comme par exemple celles liées à l'homogénéité et l'isotropie de l'espace, soit simplifiées, comme l'est l'invariance des lois de la physique quant à la vitesse relative entre deux observateurs en mouvement rectiligne uniforme.

Ayant rappelé ces points essentiels, examinons-en les conséquences particulières qui concernent le statut du temps. En proposant comme nouvelles fondations de la Mécanique la notion d'espace-temps quadri-dimensionnel, la RR confirme le bien-fondé des correspondances entre la géométrie de l'espace tri-dimensionnel et les propriétés liées à la mesure du temps inertiel que l'on voyait poindre en Mécanique Newtonienne. Dans cette nouvelle géométrie en effet, la coordonnée temps joue un rôle identique à bien des égards aux trois autres coordonnées d'espace. Les seules différences proviennent du caractère "pseudo-Euclidien" de la distance dont nous avons parlé. Soulignons donc les correspondances. Tout comme l'espace plat tri-dimensionnel est naturellement décrit par trois coordonnées cartésiennes, le temps est maintenant

⁵Cette prise de conscience provenait du fait que la cinématique Galiléenne et l'électromagnétisme lui paraissaient incompatibles. Au lieu de tenter de les concilier comme cela avait été tenté sans succès, Einstein a compris qu'il fallait refonder la cinématique en adoptant un nouveau cadre géométrique dans lequel cette difficulté n'existe tout simplement plus. Il convient toutefois de noter que la rupture n'est pas totale dans le sens où l'ancienne cinématique réapparaît de manière approchée lorsque l'on considère la RR dans une certaine limite (de faibles vitesses). On verra dans les Notes Complémentaires apparaître des difficultés de compatibilité entre la Relativité Générale et la Mécanique Quantique. Il s'agit vraisemblablement là d'une précieuse indication que le cadre conceptuel que l'on utilise aujourd'hui doit lui-aussi, à son tour, être abandonné et considéré comme émergeant d'un cadre plus large lorsqu'on considère une certaine limite.

décrit par la quatrième coordonnée cartésienne. Celle-ci encode très précisément les deux propriétés qui nous ont aiguillés vers la géométrie. D'une part, la notion de durée des intervalles de temps fait partie intégrante de la pseudo-longueur de l'espace-temps, et d'autre part l'uniformité de l'écoulement du temps est maintenant la conséquence d'une isométrie de l'espace-temps, exactement comme l'est l'homogénéité de l'espace tri-dimensionnel. Ainsi, les notions qui émergeaient de la Mécanique Newtonienne se retrouvent tout à la fois, confirmées, simplifiées et géométrisées par la RR.

De cette clarification, deux propriétés importantes se distinguent. Premièrement, parmi tous les paramètres temps que l'on peut utiliser, c'est-à-dire parmi toutes les coordonnées que l'on peut mathématiquement définir, il existe une classe de temps privilégiés par la géométrie de l'espace-temps : ceux qui correspondent à des coordonnées cartésiennes. Deuxièmement, le temps issu d'une horloge atomique (en mouvement inertiel) est précisément l'une de ces coordonnées cartésiennes. On obtient donc une correspondance dénuée d'ambiguïté entre une quantité physiquement mesurée et une coordonnée définie par la géométrie.

On peut maintenant apprécier ce qui a été effectivement modifié par l'adoption de la RR. La notion d'un temps inertiel unique, mesuré par n'importe quelle horloge, a disparu au profit d'une infinité de temps inertiels associée à la classe des coordonnées cartésiennes temporelles que possède l'espace-temps de Minkowski. Ainsi deux horloges en mouvement de translation uniforme l'une par rapport à l'autre ne désignent pas le même temps car leurs mesures s'effectuent le long d'axes qui diffèrent à cause de leur mouvement relatif. Cette pluralité des temps est à l'origine du célèbre paradoxe des jumeaux. (D'après la RR, le jumeau qui est resté sur terre a d'avantage vieilli que celui qui a voyagé lorsque ce dernier revient sur terre. Ce décalage des temps a été mesuré (et vérifié) en embarquant une horloge atomique dans un avion supersonique et en la comparant après revenu au point de départ avec une horloge jumelle restée sur terre.) Plutôt que d'insister sur le caractère paradoxal de ces différents temps, il nous semble plus instructif de mettre en évidence son caractère conventionnel. Considérons de nouveau l'exemple de la géométrie plane pour nous mettre sur la bonne voie. Si l'on veut munir le plan d'un repère constitué de deux coordonnées cartésiennes orthogonales entre elles, comme cet espace est isotrope, nous devons choisir de manière arbitraire dans quelle direction faire pointer les axes qui portent ces coordonnées. Il y a donc une infinité de coordonnées cartésiennes liées à l'infinité des directions que l'on peut choisir. Le point important est que

deux repères différents sont reliés l'un à l'autre par une isométrie du plan, en l'occurrence ici une rotation. De la même manière, deux coordonnées cartésiennes temps, correspondant aux temps de deux horloges en mouvement relatif, sont associées à deux repères qui sont reliés par une isométrie de l'espace-temps de Minkowski, appelée transformation de Lorentz. Autrement dit, si l'on accepte l'idée que l'espace et le temps forment un espace-temps (de Minkowski), l'existence d'une infinité de temps (reliés les uns aux autres) est une conséquence inévitable de cette géométrisation.

Concluons cette section liée à la RR en faisant le bilan des points essentiels. Premièrement, avec l'adoption de la RR, on a géométrisé le temps en l'incluant dans la notion d'espace-temps et en lui faisant jouer un rôle très voisin de celui des coordonnées d'espace. Deuxièmement, la géométrie de l'espace-temps définit ce qu'est la durée d'un intervalle de temps, tout comme elle définit la longueur d'un intervalle d'espace. Troisièmement, n'importe laquelle des coordonnées cartésiennes temps est "universelle" (globalement définie) dans le sens où elle peut être utilisée partout dans l'espace. Comme c'était le cas en mécanique newtonienne, il n'est donc pas nécessaire d'introduire d'autres temps pour paramétriser la totalité des processus de l'univers. Quatrièmement, le temps mesuré par une horloge atomique (c'est-à-dire l'ancien temps inertiel-universel de la mécanique newtonienne) est l'une de ces coordonnées cartésiennes, celle définie le long de l'axe qui est orthogonal aux trois positions relatives mesurées par rapport à l'horloge en question. Bien qu'ayant renoncé au caractère unique du temps newtonien, on conserve la correspondance entre temps atomique et temps inertiel.

Si l'on en restait là, le statut du temps en physique et dans notre univers serait très simple car son sort est scellé dans les propriétés "universelles" de la géométrie de l'espace-temps de Minkowski. Ce sont en effet les propriétés intangibles de cet espace-temps, car tout à la fois homogènes, statiques et a priori fixées, qui confèrent au temps ce statut si simple et, reconnaissons-le, à peine différent de celui du Temps Absolu de Newton.

4 Le statut du temps en Relativité Générale

Lorsque l'on passe de la RR à la RG, plusieurs changements sont opérés, *c.f.* la note I en fin de texte. D'un point de vue conceptuel, le plus important est sans conteste le suivant : pour la première fois, la géométrie de l'espace et du temps n'est plus a priori donnée. Au contraire, elle est maintenant

"plastique", ou pour être plus précis *dynamiquement déterminée*, c'est-à-dire que son évolution est soumise aux lois de la Dynamique comme l'est celle de tout autre système physique (pendule, position d'une particule, champ électro-magnétique, ...). Ainsi en acquérant un caractère dynamique, la géométrie de l'espace et du temps perd son statut de cadre intangible dans lequel prenaient place les événements et les processus. De manière imagée on peut dire qu'elle rentre dans le rang. Notre but est maintenant de montrer à quel point cette soumission aux lois de la Dynamique bouleverse le statut qu'avait acquis le temps.

Tout d'abord, le concept de coordonnée cartésienne temporelle globalement définie qui prévalait en RR a disparu corps et âme car dans un espace-temps courbe ce type de coordonnée n'existe plus. Par contre le concept plus primitif de paramètre temporel permettant de suivre les processus survit. En outre, comme avant, un seul paramètre suffit pour la totalité des processus. En ayant perdu le cadre rigide de la RR, on se trouve confrontés à une infinité de tels paramètres car il existe une infinité de manières de le choisir. Posons-nous donc la question de savoir s'il en existe un qui soit privilégié, ou au moins s'il existe une classe de paramètres privilégiés comme c'était le cas en RR.

Pour y répondre, examinons ce que nous dit la Dynamique puisque, rappelons-nous, c'est bien elle qui nous avait permis d'isoler et de définir le temps inertiel en Mécanique Newtonienne. Puisque la géométrie de l'espace-temps est maintenant traitée comme une quelconque variable dynamique, elle obéit, elle aussi, au Principe de Moindre Action. Ainsi la géométrie possède une énergie qui contribue au bilan énergétique de l'univers, et à cette énergie est associée une action. En extrémisant cette action, on détermine quelle seront les propriétés de la géométrie à partir de la connaissance de ses propriétés actuelles (et de la répartition de la matière). Et comme c'est toujours le cas, cette action obéit à une équation d'Hamilton-Jacobi.

Le fait remarquable c'est qu'en RG, cette équation possède une structure tout à fait particulière, et en fait unique. Le temps n'y apparaît plus, plus du tout.

D'un point de vue mathématique, cette disparition traduit le fait que l'action est inchangée lorsque l'on change de paramètre temps (cette invariance s'applique aussi aux trois coordonnées spatiales). Autrement dit la valeur de l'action ne peut ni désigner, ni donc privilégier, de paramètre-temps. D'un point de vue physique, ce résultat implique que cette coordonnée-temps n'est pas une quantité que l'on peut mesurer. C'est uniquement une variable auxi-

liaire qu'il est (parfois) utile d'introduire pour, par exemple, simplifier la description de phénomènes et les équations qui les décrivent. (Il convient toutefois de noter que la disparition du temps ne remet pas en cause la notion de causalité. Celle-ci reste présente bien que la disparition de la structure géométrique rigide de l'espace-temps en RR la rende moins manifeste.)

Mais la véritable leçon est ailleurs. Si l'on veut obtenir "un temps" qu'on puisse ensuite utiliser pour chronométrer un processus, on ne peut le faire qu'à partir de relations existant entre sous-systèmes. L'un d'entre eux jouera le rôle d'horloge, et les autres auront leur évolution paramétrée par les variables qui caractérisent cette horloge. Loin de représenter une nouveauté, on retrouve ici la procédure qui prévalait déjà en Mécanique Newtonienne.

Dans cette mécanique, la situation était paradoxale (en fait peu cohérente) car bien que l'existence et l'unicité du temps inertiel y fussent postulées, lorsqu'on voulait le mesurer, il fallait se contenter de le faire de manière indirecte en utilisant un mouvement de référence. Ce que fait donc la RG, et que ne faisait pas la RR, c'est de légiférer cet état de fait en précisant que le temps ne peut être introduit qu'à partir de relations entre sous-systèmes. En Mécanique Newtonienne subsistait l'espoir que le Temps Absolu existât, la RG nous enseigne que cet espoir est vain.

En y regardant de plus près, on s'aperçoit que cela découle du fait que la somme des énergies de la matière et de la gravitation est identiquement nulle, quel que soit le type d'univers que l'on considère. Cette nullité donne un sens précis au fait que l'univers, pris dans sa totalité, est isolé. Cet isolement prévient la possibilité de définir un temps qui serait a priori donné, et qui serait donc extérieur (ou pourrait dire étranger) à notre univers. Nous récoltons ici les premiers enseignements de la RG. Elle met fin à une chimère (le Temps Absolu de la Mécanique Newtonienne, mais également l'espace-temps absolu de la RR), et clarifie les choses en validant l'utilisation d'un mouvement de référence comme seul moyen d'avoir accès à la temporalité.

Ceci dit, bien que radicalement différente de l'ancienne conception du temps, cette nouvelle vision est néanmoins parfaitement compatible avec l'ancienne car en analysant de près la nature des corrélations entre sous-systèmes on découvre qu'il existe des sous-systèmes "horloges" qui possèdent les propriétés suivantes. D'une part, lorsque plusieurs d'entre elles sont disponibles, les paramétrisations qu'elles offrent d'un même processus coïncident. D'autre part, cette paramétrisation peut se décrire, si l'on veut, en termes d'un temps (exactement de la même façon que la direction de l'ombre du soleil sur un cadran peut se décrire en termes d'une heure). De manière assez ironique,

on arrive au constat suivant : bien que le temps n'existe plus en RG en tant que quantité fondamentale et autonome, on retrouve néanmoins ses attributs *engendrés* par les corrélations présentes dans notre univers.

Parmi ces propriétés retrouvées, celle liée à l'indépendance quant au choix de l'horloge, et donc à l'unicité de la description qui en découle, pose maintenant une question fondamentale. En effet, dans l'ancienne Mécanique, l'unicité du temps inertiel découlait du Principe d'Inertie. On se servait de ce temps unique pour bâtir la Dynamique et il nous fallait l'identifier et le mesurer. Maintenant la situation est tout autre : il nous incombe cette fois de comprendre l'origine de cette unicité puisque le Principe d'Inertie n'est plus. Ce qui est absolument remarquable c'est qu'un autre principe, celui de l'addition des énergies (et des actions) dont nous avons précédemment parlé, garantit l'indépendance de la description quant au choix de l'horloge utilisée. Ainsi le principe qui permettait en Mécanique Newtonienne de considérer l'ensemble formé de deux systèmes comme un nouveau système dynamique (en additionnant leurs énergies et leurs actions), nous permet maintenant, en séparant l'ensemble en deux et en étudiant l'évolution de l'un en fonction de l'autre, de récupérer la notion de temporalité, et par là même, d'en comprendre l'origine et l'unicité. Cette dernière découle du fait que, quelle que soit la composition de l'univers, les énergies des différentes composantes forment une seule somme, et que c'est celle-ci qui est partagée.

En conclusion, la RG nous fournit deux enseignements majeurs. Premièrement, le temps n'existe pas dans le sens où il n'apparaît pas (et ne joue donc aucun rôle) dans l'évolution dynamique de l'univers et de ses constituants. Toutefois cette disparition n'engendre ni difficulté de principe, ni même de conflit avec la dynamique Newtonienne qui postulait l'existence d'un Temps Absolu, car la dynamique de la RG est telle que l'on peut, si l'on veut, retrouver une paramétrisation temporelle des processus en divisant l'univers et en traitant l'une des parties comme horloge et l'autre comme le système à étudier ; validant ainsi une procédure que les hommes ont utilisée depuis la nuit des temps.⁶

⁶Le lecteur courageux et désireux de savoir comment ces aspects se développent lorsque l'on quantifie la gravitation est invité, après une pose bien méritée, à lire les notes III, IV et V. Il y découvrira un problème qui constitue, aux yeux de l'auteur de ces lignes, l'un des défis majeurs posés à la physique théorique contemporaine.

NOTES COMPLÉMENTAIRES

I. La Relativité Générale

Pour aider le lecteur à situer le cadre dans lequel prend place notre exposé, présentons en quelques mots la théorie de la Relativité Générale qui reste à bien des égards mal connue et mal appréciée par le public.

Cette théorie, conçue par Einstein au cours des années 1912-1915, est fondée sur l'hypothèse que les phénomènes gravitationnels résultent de la courbure de l'espace-temps. Comme on va le voir progressivement, la RG remplace de manière particulièrement radicale l'ancienne théorie de la gravitation, proposée par Newton, qui était fondée sur le concept de force gravitationnelle agissant sur les objets massifs, force inversement proportionnelle au carré de la distance entre ces objets et proportionnelle au produit de leur masse.

Lorsque l'on souhaite présenter la RG, on se trouve confronté, quel que soit le public auquel on s'adresse, grand public ou étudiants, à une embarrassante multitude de nouveautés dont la présentation requiert du temps et de l'espace. Faute de temps, il est d'usage de se contenter d'expliquer une partie d'entre elles, comme par exemple les propriétés non-euclidiennes de la géométrie de l'espace-temps. Ce faisant on néglige souvent un aspect d'accès plus difficile mais dont la nouveauté est plus radicale et les conséquences plus profondes : le caractère dynamique de cette géométrie.

Pour pouvoir apprécier ce second aspect, revenons un instant au début du XX^e siècle. Avant de concevoir la théorie de la Relativité Générale, Einstein avait introduit la théorie de la Relativité Restreinte (RR). Vers 1905, il avait en effet compris que la cinématique Galiléenne sur laquelle est fondée la Mécanique Newtonienne devait être remplacée par une nouvelle cinématique, dite relativiste, fondée sur l'hypothèse que l'espace et le temps forment une structure géométrique quadri-dimensionnelle, justement appelée "espace-temps".

Malgré les succès remportés par cette théorie Einstein s'est rapidement aperçu qu'il fallait la généraliser pour pouvoir y incorporer la gravitation. Le fil conducteur qui le mena à la RG est issu d'une particularité des forces de gravitation. Ces forces sont telles que les trajectoires des objets massifs qui les subissent sont indépendantes de leur masse. Ceci soulève un problème car, en mécanique newtonienne, il existe deux concepts de masse a priori distincts : la masse inertielle qui quantifie l'inertie d'un corps (la capacité que

son mouvement soit peu modifié par une force extérieure), et la masse grave qui quantifie l'importance de la force gravitationnelle que subit et que fait subir un corps. L'indépendance des trajectoires quant à la masse des corps, ainsi que toutes les expériences, indiquent que ces deux quantités distinctes, qui pourraient donc prendre des valeurs différentes, sont en fait égales. La théorie de Newton est incapable d'expliquer cette égalité qui apparaît comme une coïncidence mystérieuse. Einstein a considéré que cette coïncidence résultait d'une mauvaise formulation de la gravitation et qu'une bonne formulation devait garantir l'indépendance des trajectoires par rapport à la masse des objets. Il a érigé ceci en principe (dit Principe d'Équivalence) et recherché une formulation qui le garantirait. C'est ainsi qu'est née la RG et avec elle l'idée que les phénomènes gravitationnels sont l'expression des propriétés métriques locales de l'espace-temps ; c'est-à-dire liées au fait que la distance entre deux points voisins dépend de la géométrie au voisinage de ces points.

En remplaçant la RR par la RG, il a opéré plusieurs changements. Premièrement, d'un point de vue mathématique, la géométrie plate de l'espace-temps qui caractérise la RR est remplacée par une géométrie courbe, dont la courbure peut varier dans le temps et dans l'espace. Deuxièmement, d'un point de vue physique, le concept newtonien de force gravitationnelle disparaît des principes fondamentaux puisque les phénomènes gravitationnels sont maintenant (entièrement) inclus dans les propriétés courbes de l'espace-temps. Toutefois ce concept réapparaît en tant qu'approximation lorsque les vitesses des corps sont lentes et la courbure faible comme c'est le cas pour les planètes extérieures du système solaire. Ainsi la trajectoire de Jupiter prévue par la théorie de Newton coïncide parfaitement avec celle prévue par la RG et celle observée. Troisièmement, d'un point de vue conceptuel, la géométrie de l'espace et du temps n'est plus donnée une fois pour toutes. Au contraire, elle est maintenant soumise aux lois de la Dynamique comme l'est tout autre système physique. Le but de notre exposé est précisément de montrer à quel point cette soumission aux lois de la Dynamique modifie le statut qu'avait acquis le temps en RR et en Mécanique Newtonienne.

Concluons cette note en parlant du statut observationnel de la RG. Bien que la qualité des observations a énormément progressé au cours du XX^e siècle, leur confrontation avec les prédictions de la RG n'a pas (encore) révélé le moindre désaccord. En revanche, l'amélioration de ces observations a permis d'éliminer les théories rivales de la RG qui différaient notablement de celle-ci. Autrement dit, les théories qui survivent forment un dernier carré, centré à ce jour autour de la RG, et dont les côtés continuent à diminuer avec

l'amélioration des observations. En conclusion, la RG fournit un cadre permettant de décrire et d'interpréter les phénomènes naturels observés. C'est à ce titre qu'il convient d'analyser le statut du temps qu'elle renferme.

II. Le Principe de Moindre Action et la Mécanique

On ne peut surestimer le rôle que joue le formalisme d'action tant en Mécanique Classique que Quantique. Cependant, ce formalisme reste méconnu et sous-estimé, même par les physiciens, car par sa nature même une action est un être mathématique dont l'utilisation requiert une certaine expertise. Ainsi, son enseignement est souvent reporté en fin de programme, voire écarté.

Pour apprécier à sa juste valeur le rôle qu'il joue, il suffit de mentionner les points suivants.

Premièrement, toutes les théories fondamentales actuelles (l'électro - magnétisme, la théorie des forces nucléaires et la RG) sont *définies* par une action. Autrement dit, pour chacune de ces théories, la connaissance de l'action est nécessaire. Deuxièmement, l'ensemble des prédictions de ces théories, leurs lois de conservations, ... peuvent s'obtenir à partir de la seule donnée de l'action. Autrement dit, la connaissance de l'action suffit : toute l'information pertinente y est présente. Troisièmement, la procédure de quantification d'un système dynamique (qui définit la Mécanique Quantique) est directement fondée sur l'existence et les propriétés de l'action de ce système. Ainsi les fondements de la physique actuelle reposent sur l'existence et la connaissance des actions.

Ceci dit qu'est-ce qu'une action ? Pour aborder cette question, demandons nous tout d'abord quels en sont les "ingrédients". Le point de départ, ce sont les propriétés des systèmes dynamiques que l'on veut décrire. On s'aperçoit que l'état d'un système est entièrement déterminé par la connaissance d'un certain nombre de variables, appelées variables dynamiques ou degrés de liberté. Ce premier point est essentiel, car il indique que toutes les quantités ne sont pas pertinentes, au contraire un certain ensemble bien défini de variables suffit (et est nécessaire). On s'aperçoit ensuite que ces variables pertinentes apparaissent en couples ; on parle de variables conjuguées. Pour une particule ponctuelle, la position et la vitesse constituent ces variables conjuguées. Le troisième point est que les systèmes dynamiques possèdent une fonction-énergie dont la valeur est univoquement fixée par la donnée des variables conjuguées.

La connaissance des variables conjuguées et de la fonction-énergie déter-

mine l'action du système en question. En effet, quelque soit le système dynamique étudié, celle-ci est donnée par une intégrale sur le temps d'une certaine combinaison (toujours la même) des couples des variables conjuguées et de la fonction-énergie. L'action est donc ce qu'on appelle une fonctionnelle (et non une fonction, comme l'est l'énergie) car sa valeur n'est fixée que si l'on se donne une trajectoire qui relie l'état initial à l'état final du système.

Cette propriété est essentielle car elle permet de formuler le Principe de Moindre Action. Celui-ci stipule que parmi toutes les trajectoires que l'on peut mathématiquement définir, celle qui sera réalisée dans la nature minimisera la valeur de l'action. La force de ce principe est donc de nous permettre d'identifier la trajectoire "retenue" par le monde physique. Le fait que ce principe s'applique à tous les processus physiques est absolument remarquable car on aurait pu très légitimement penser que la complexité des processus physiques (qui est bien réelle) resultait d'une multitude de principes dynamiques (ce qui n'est pas le cas).

Rajoutons un dernier point qui va nous permettre de faire le lien avec des notions utilisées dans le texte. On montre en effet que l'action d'un système, calculée à l'aide de la trajectoire qui en minimise la valeur, obéit à l'équation d'Hamilton-Jacobi correspondante. Cette dernière, ainsi que l'équation de Schrödinger qui en est la version quantifiée, doivent donc être conçues comme des produits dérivés du Principe de Moindre Action, ce qui souligne, si besoin était, le rôle fondamental de ce principe.

III. La quantification de la Mécanique.

Au début du XX^e siècle, la Mécanique Quantique a bouleversé les concepts et les outils de la physique de manière plus radicale encore que ne l'a fait la RG. Cependant comme ces modifications concernent la manière dont il convient de traiter et d'interpréter la Dynamique et ses prédictions, elles n'ont pu être largement diffusées malgré leur caractère révolutionnaire. Le seul endroit où l'on peut vraiment en prendre connaissance est sans doute un cours de fac entièrement consacré à leur présentation. J'estime toutefois qu'il est nécessaire de rappeler ici ce qu'est la Mécanique Quantique car le statut du temps prend un nouvel éclairage lorsque l'on quantifie la RG.

La première notion clé c'est que la MQ offre une nouvelle description des systèmes physiques possédant une action et une fonction-énergie. Ainsi, à chaque action obéissant à une équation d'Hamilton-Jacobi dans la version classique de la mécanique, correspond une fonction d'onde quantique obéis-

sant à une équation de Schrödinger. La correspondance est assurée par le fait que c'est la même fonction-énergie du système en question qui est utilisée dans les deux descriptions. On n'a donc pas affaire à un nouveau système dynamique, mais à une nouvelle description du même système physique. C'est dans ce sens qu'il faut comprendre la procédure de "quantification".

Le caractère révolutionnaire de cette quantification réside dans le fait que les prédictions concernant les valeurs que peuvent prendre les variables dynamiques conjuguées sont entachées d'incertitudes (dites d'Heisenberg) qui sont intrinsèques à la MQ. Celles-ci ne résultent pas d'une méconnaissance du système ni de l'état dans lequel il se trouve mais, au contraire, elles font partie intégrante de la description quantique des systèmes dynamiques. Elles conduisent à de nouveaux phénomènes qui *paraissent* paradoxaux lorsqu'ils sont décrits et interprétés en termes de concepts qui étaient en vigueur en Mécanique Classique. La leçon est qu'il faut (selon toute vraisemblance, restons prudents) renoncer à l'ancienne conception du monde et non essayer d'intégrer la MQ dans ce cadre désuet.

Au niveau expérimental, le XX^e siècle nous a appris qu'il fallait appliquer cette quantification à tous les systèmes physiques : à savoir, aux particules élémentaires et à leurs interactions, aux noyaux, aux atomes, aux molécules, à la lumière, ... Il nous a également appris qu'aucun désaccord entre prédictions de la MQ et mesures expérimentales n'a été enregistré malgré tous les efforts pour en trouver. Nous devons donc admettre que le monde dans lequel nous vivons est bien gouverné par les lois de la MQ. À ce propos, il est particulièrement intéressant de noter que la MQ prévoit aussi que le comportement des objets macroscopiques coïncidera avec celui prévu par la Mécanique Classique. En d'autres termes, la MQ prévoit son propre effacement, nous offrant ainsi l'explication du fait que le monde, à notre échelle, ne *paraît* pas être gouverné par ses lois (expliquant par là même les aspects paradoxaux, pour les humains, des phénomènes microscopiques).

Il faut également signaler que la MQ conserve intactes les autres propriétés de la mécanique classique. Ainsi le principe d'addition des énergies est conservé, ce qui garantit que le système formé par la réunion de deux sous-systèmes quantiques obéissant séparément à leur équation de Schrödinger obéit à une nouvelle équation de Schrödinger gouvernée par la somme de leurs fonctions-énergies.

IV. L'absence du temps en RG quantifiée, un problème insurmontable ?

Comme la RG obéit aux principes de la Dynamique et comme tout système dynamique doit être quantifié, on ne peut échapper à la conclusion qu'il faut également quantifier la RG. Nous devons donc renoncer à la description classique de la géométrie que l'on a utilisée jusqu'à présent au profit de sa description quantique. Lorsque l'on franchit le Rubicon, on obtient en lieu et place de l'équation d'Hamilton-Jacobi de la RG sa version quantifiée appelée équation de Wheeler-DeWitt, et non plus de Schrödinger car, comme la correspondance classique-quantique est fidèle, cette équation ne possède pas la structure habituelle puisque le temps n'y apparaît plus, pas plus qu'il n'apparaissait dans l'équation d'HJ de la RG, souvenons-nous en.

Ainsi la "fonction d'onde de l'univers", solution de l'équation de Wheeler-DeWitt, censée contenir la *totalité* de l'information concernant notre univers, ne dépend-elle pas du temps. Avec la quantification de la RG, on assiste donc à une radicalisation de la disparition du temps.

Malgré cette disparition, on se doute bien qu'il doit être possible de récupérer (au moins en très bonne approximation) le concept d'évolution temporelle fondée sur l'équation de Schrödinger car c'est à partir de cette équation que sont obtenues les prédictions de la MQ qui sont en si bon accord avec les observations. Et de fait, le principe d'addition des énergies que nous avons utilisé en RG classique peut être de nouveau exploité et appliqué cette fois-ci à la fonction d'onde de notre univers pour récupérer au travers des corrélations entre sous-systèmes, une description quantique de l'évolution de l'un d'eux paramétrisée par le reste de l'univers qui sert d'horloge.

Toutefois une difficulté propre à la MQ surgit. Comme l'équation de Wheeler-DeWitt est une équation du second ordre contrairement à celle de Schrödinger qui est du premier ordre, on assiste à un doublement des solutions; les unes décrivant des univers en expansion, les autres en contraction. Ce doublement en soi ne pose pas de problème car ces deux types de solutions sont présentes en RG classique. Mais, contrairement à ce que prévoyait cette dernière, la RG quantifiée prévoit que ces solutions ne sont pas strictement découplées. Autrement dit elle prévoit l'existence d'un dialogue dynamique entre univers en expansion et univers en contraction. Il convient de souligner qu'aucune interprétation satisfaisante n'en a été trouvée. Il s'agit là cependant d'un problème de principe, et non de compatibilité avec les observations, car ce couplage est aujourd'hui tellement petit qu'il ne peut être détecté.

V. La RG et la MQ sont-elles compatibles ?

L'impossibilité d'interpréter ce couplage doit être prise au sérieux car lorsque l'on considère, par exemple, de petits univers, ce couplage devient important, ce qui indique qu'il aurait pu jouer un rôle lors de la phase primordiale de notre univers. Plus fondamentalement, la physique ne peut se contenter d'une interprétation approximative des solutions de l'équation de Wheeler-DeWitt car cette équation repose directement et uniquement sur la MQ et la RG qui sont, dans leurs domaines respectifs, en parfait accord avec les observations. Comme notre monde ne peut être saucissonné, MQ et gravitation doivent être conciliables. Il faut donc pouvoir interpréter ce couplage quantique entre univers en expansion et en contraction. On peut considérer ce problème comme l'un des défis majeurs posés à la physique théorique.⁷

Si je devais proposer une tentative de réponse, je me rangerais à l'idée suivante : au lieu d'essayer de *résoudre* ce problème dans le cadre interprétatif conventionnel de la MQ (comme cela a été tenté sans succès) on devrait au contraire l'accepter et le considérer comme une indication selon laquelle ce cadre est caduque. Une analyse détaillée du problème soutient en effet l'idée que le concept de probabilité, qui est au centre de l'interprétation de l'équation de Schrödinger, et le concept de temps, qui apparaît dans le membre de gauche de cette équation, n'acquerraient de sens que lorsque notre univers serait devenu macroscopique. Autrement dit, il s'agirait d'accepter l'idée que les concepts qui nous paraissent aujourd'hui comme les plus fondamentaux puissent émerger lorsque certaines conditions sont remplies. Il faudrait donc une nouvelle fois renoncer à l'idée, si tentante, que ces concepts pré-existent.

Cette idée laisse sans réponse la question de savoir quel serait ce cadre plus large permettant de donner un sens au couplage entre univers en expansion et en contraction. Elle n'est constructive que dans le sens où elle met en avant l'idée qu'il est vain de rechercher une interprétation dans le cadre conventionnel de la MQ. Elle appelle donc à une refondation de la physique, à l'instar de celle que constitua la RR, voir note en bas de page 5, qui proposa un nouveau cadre (géométrique) où ne se posaient plus les difficultés de concilier mécanique et électro-magnétisme.

⁷Je ne peux passer sous silence le fait que la quantification de la RG engendre d'autres problèmes qui concernent le comportement de la théorie aux très petites distances, et qui donc ne sont (sans doute) pas reliés à la question qui nous occupe. Deux approches ont été proposées pour affronter ces problèmes : la Théorie des Cordes et la gravité quantique "à boucles" (Loop Quantum Gravity). Il semble toutefois que ni l'une ni l'autre n'offre de cadre permettant d'interpréter le couplage entre univers en expansion et en contraction.