

A l'assaut du mur de PLANCK

Vers l'origine de l'Univers

« C'est une chose étrange, à la fin, que le monde »

Jean d'Ormesson

Au cours du siècle qui vient de s'achever, la science, tant théorique qu'expérimentale, a fait des progrès gigantesques. La cosmologie a bénéficié de ce mouvement de fond de sorte, qu'aujourd'hui, on dispose avec la théorie du « Big Bang » d'une description cohérente et en grande partie vérifiée, de l'évolution de notre Univers et des grandes étapes qui se sont succédées depuis les premiers temps. Mais dans la remontée du temps vers l'Univers primordial, la Physique contemporaine butte sur une limite en amont de laquelle elle cesse d'être valable. Cette limite porte le nom évocateur de « mur de PLANCK » en souvenir du grand physicien allemand (1858-1947). La franchir permettrait d'avoir accès à « une terra incognita » et de là, pensent certains, à la connaissance ultime. Des efforts considérables sont entrepris pour y parvenir, mais autant dire, d'entrée, que le défi est loin d'être surmonté.

Le but de cet article est de donner un aperçu succinct de l'état actuel de la recherche qui demeure encore très spéculative.

Qu'est ce que le mur de PLANCK ?

Comme indiqué ci-dessus, ce terme désigne un état particulier de l'Univers, une phase par laquelle il est passé et qui est caractérisée par le fait que la physique actuelle est incapable de décrire ce qui s'est passé en amont. La physique est en effet dominée par deux grandes théories qui ont chacune un grand pouvoir prédictif mais dans des domaines différents :

- la relativité générale d'Albert Einstein ou théorie de la gravitation, s'applique à « l'infiniment grand », là où la gravité joue le premier rôle mais *elle ignore les autres forces de la nature*.
- la mécanique quantique s'applique au monde subatomique, c'est à dire à « l'infiniment petit », là où ces autres forces de la nature mènent le bal, *mais elle ignore la gravité*.

De plus, elles sont contradictoires car l'une (la relativité) est *déterministe* et l'autre (la mécanique quantique) est *probabiliste*. En particulier, la première attribue à une particule une position exacte dans l'espace (elle est « localisante »), la seconde lui affecte un volume d'incertitude (elle est « délocalisante »). Si la particule est un trou noir dont rien ne peut s'échapper, même pas la lumière, la localisation est absolue puisque la masse est irrémédiablement confinée dans le volume du trou noir. En égalant ce volume du trou noir au volume d'incertitude défini par la mécanique quantique, on obtient la limite de validité des deux théories, c'est à dire l'état de PLANCK, caractérisé par les valeurs suivantes :

Masse de Planck	$m_{pl} \approx 20 \mu\text{g}$
Energie de Planck	$E_{pl} \approx 10^{19} \text{Gev}$
Température de Planck	$T_{pl} \approx 10^{32} \text{°K}$
Temps de Planck	$t_{pl} \approx 10^{-43} \text{sec}$
Longueur de Planck	$l_{pl} \approx 10^{-33} \text{cm}$
Densité de Planck	$\rho_{pl} \approx 10^{93} \text{g/cm}^3$

A la recherche d'une théorie unificatrice

Au voisinage du temps de Planck donc, c'est à dire à l'époque la plus ancienne que nos théories parviennent à concevoir, l'Univers a une taille minuscule, une densité énorme et il est gavé d'une énergie colossale. Cet état paroxystique est hors d'atteinte expérimentalement. Pour tenter de le comprendre et de franchir l'obstacle impressionnant dressé devant nous, seule la théorie est

envisageable. Les 4 forces fondamentales - la *gravité* agissant sur les masses (traitée par le formalisme relativiste), la force *électromagnétique* agissant entre les particules chargées et les interactions *nucléaires forte et faible* agissant au niveau du noyau atomique, (toutes 3 traitées par le formalisme quantique) - interviennent **simultanément** de sorte que l'unique stratégie possible est de concevoir une théorie **unifiant** la relativité générale et la physique quantique.

Comment alors élaborer une théorie quantique de la gravitation ? En « mariant » les équations des 2 théories ? Ou bien en construisant une nouvelle théorie qui les inclut toutes les deux ? Ces différentes pistes ont bien sûr été envisagées depuis les 4 dernières décennies. Où en est-on ?

La première piste qui *conserve les hypothèses de base* des deux théories s'est révélée infructueuse : des quantités infinies apparaissent dans les calculs qui deviennent incertains, voire impossibles. Constatant cette impasse, les théoriciens en ont conclu qu'il fallait recourir à des postulats ou à des principes radicalement nouveaux. D'où différentes tentatives.

:

◆ La théorie des supercordes¹

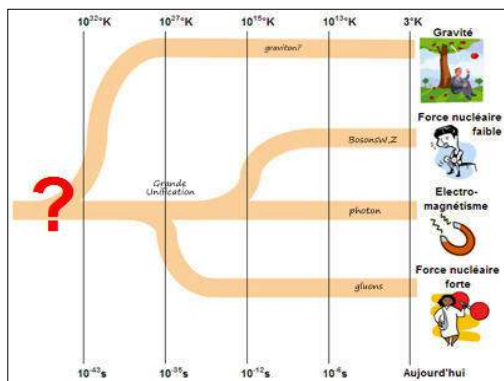
C'est celle qui a fait l'objet des travaux les plus nombreux depuis les années 1970. Les principes nouveaux qui sont introduits, sont les suivants :

→ Toutes les particules, qu'il s'agisse de la matière (les *fermions*) ou des forces agissant sur celles-ci (les *bosons* qui sont les véhicules de ces forces) sont des **cordes vibrantes**, ouvertes aux extrémités ou fermées en boucles, dont la longueur est de l'ordre de celle de Planck. Leurs vibrations en amplitude et en fréquence déterminent les propriétés de toutes les particules.



→ Un principe, dit de *supersymétrie* est introduit qui postule une relation profonde entre les fermions et les bosons et associe à chaque particule une « superpartenaire » de haute énergie. D'où le nom de *supercordes* donné aux cordes.

→ La théorie s'exprime dans un cadre spatio-temporel, (on parle habituellement d'*espace-temps*)² dont le nombre de dimensions est supérieur à 4 et peut comporter selon les variantes jusqu'à 22 dimensions de plus que l'espace-temps ordinaire. Ces dimensions supplémentaires, de longueur voisine de celle de Planck, nous sont imperceptibles car elles sont supposées repliées sur elles mêmes.



Que nous apporte cette théorie ?

→ Elle prévoit l'existence du **graviton**, le boson qui est supposé être le médiateur de la gravité, à l'instar des médiateurs des 3 autres interactions (photon, bosons W et Z, gluons). Ainsi, la gravitation, non postulée au départ, devient une prédiction découlant des principes mêmes de la théorie.

→ Elle rend possible l'unification des forces de la physique. La supersymétrie permet en effet d'expliquer la convergence à très haute énergie, vers 10²⁷ °K, des interactions non gravitationnelles, convergence baptisée **grande unification** ; elle prévoit aussi que l'intensité de la

force gravitationnelle rejoint celle des 3 autres forces au voisinage de la température de Planck, conduisant ainsi à donner à toutes les forces une origine commune, celle d'une **superforce**.

→ Elle permet de faire apparaître les théories dont se servent les physiciens pour décrire les phénomènes aux échelles spatiales auxquelles ils ont expérimentalement accès : en particulier, elle engendre la théorie qui est à la base du modèle standard de la physique des particules

→ Elle prédit aussi que la température au sein de l'Univers ne peut dépasser une valeur *maximale* à laquelle peut être associée une *densité maximale* : ceci, comme nous le verrons, a un impact fondamental sur la manière dont nous concevons habituellement le Big Bang.

¹ Les pionniers: Gabriele Veneziano, Joël Scherk, Bernard Julia, John Schwarz, Michael Green

² L'espace-temps est le cadre dans lequel se déroulent les événements physiques. A notre échelle, il comporte 3 dimensions d'espace et 1 de temps, soit un total de 4.

Ainsi, nous venons de le voir, la théorie des supercordes a un pouvoir unificateur fabuleux, ce qui a conduit certains physiciens à la qualifier par anticipation de « *théorie du Tout* ». Mais si elle est mathématiquement belle, est-elle physiquement vraie ? Les avis sont partagés pour les raisons suivantes :

→ Elle n'a pas reçu à ce jour de confirmation expérimentale, tant la taille des cordes est petite par rapport aux capacités actuelles de mesure : il suffit de remarquer que la dimension la plus petite accessible aujourd'hui est de 10^{-17} cm, à comparer à la longueur de Planck 10^{-33} cm, soit une différence de 16 ordres de grandeur !

→ Elle est loin d'être achevée: il en existe actuellement 5 versions dont chacune a son domaine d'application. Les spécialistes pensent qu'elles seraient englobées dans une théorie plus générale baptisée **Théorie M** (pour Mystérieux !) qui reste à construire.

→ Elle ne permet pas de déduire les caractéristiques particulières de notre monde, ou plutôt elle propose une multitude de solutions ; il faut alors faire des hypothèses « ad-hoc » pour orienter le choix, ce qui n'est pas très satisfaisant.

→ Elle a été bâtie morceau par morceau, découverte après découverte, mais un principe organisationnel central qui engloberait toutes ces découvertes dans un cadre souverain, manque toujours. Ce principe qui rendrait peut-être la théorie inévitable, existe-t'il ? Est-ce la théorie M? Personne n'en sait rien.

◆ La théorie de la gravitation à « boucles »³

Ces difficultés ont conduit plusieurs théoriciens à bâtir, à partir du milieu des années 80, une autre théorie reposant sur des principes différents.

La physique quantique et la relativité généralisée ont, en effet en commun, une hypothèse concernant la structure de l'espace-temps : celui-ci est supposé *continu, lisse, sans aucune discontinuité* : (par exemple, dans un espace à 3 dimensions dont 2 d'espace, on peut se représenter ce dernier par une feuille de papier plane ou courbée). De plus, dans le premier cas, il est *rigide et invariable*, alors que dans le second, il est *souple et en perpétuelle évolution* car déformé par la matière qu'il contient.

Se pourrait-il que cette hypothèse soit à reconsidérer et que l'espace-temps soit *discontinu, granulaire, discret*, selon le principe même que la physique quantique applique à la matière, tout en demeurant *souple et dynamique* comme en relativité ? A l'aide d'un nouveau langage mathématique, ces physiciens sont arrivés à la conclusion que l'espace-temps est bien constitué de quantités *insécables* : (pour donner une image comme précédemment, l'espace ressemblerait en 2 dimensions, à un morceau d'étoffe tissé de fibres distinctes). Longueurs, surfaces et volumes, mais aussi le temps, sont quantifiés en ce sens qu'ils ne peuvent prendre que des valeurs multiples de *quantas* élémentaires déterminées par les dimensions de Planck. Cette structure en *boucles* minuscules, s'estompe à grande échelle, où elle apparaît continue, et est bien décrite par la relativité générale. Mais à l'échelle des boucles, elle s'en écarte radicalement. Le calcul montre en effet que la densité d'énergie qu'un quantum d'espace est susceptible d'emmagasiner, ne peut dépasser un certain seuil au-delà duquel des forces de répulsion apparaissent : la gravitation peut ainsi devenir **répulsive**. Là est un point essentiel sur lequel nous reviendrons, car à l'instar de la théorie des cordes, il montre que la densité de l'Univers ne peut dépasser une valeur *maximale*.

Mais la théorie pose aussi de nombreux problèmes :

→ comme pour la théorie des cordes et pour les mêmes raisons, elle n'est pas directement vérifiable au niveau fondamental. Cependant, elle est peut-être testable car elle prédit que la vitesse de photons très énergétiques est modifiée par la traversée du tissu discret de l'espace-temps et cet effet pourrait être mesuré par l'observation astronomique.

→ elle n'unifie pas les 4 forces de la nature, ce qui n'était d'ailleurs pas son objectif initial. Mais des idées semblent se faire jour pour y parvenir.

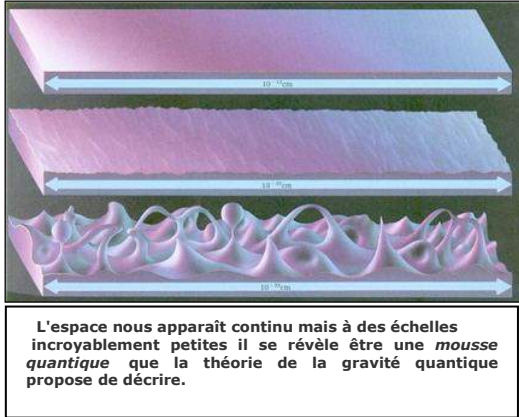
En résumé, nous disposons de 2 théories ayant fait l'objet de très nombreux travaux, reposant sur des principes différents, qui proposent une quantification de la gravité. Aucun test expérimental ne permet aujourd'hui de dire si l'une d'elles est la bonne ou si aucune n'est valable. Les physiciens travaillent intensément à cet objectif : on attend beaucoup de l'accélérateur le plus puissant actuellement, qui vient d'être mis en service à la frontière franco-suisse (le LHC) et qui pourrait détecter d'éventuelles particules superpartenaires, ainsi que des mesures par satellite sur des photons gammas émis aux

³ Les pionniers : Abhay Ashtekar, Ted Jacobson, Carlo Rovelli, Lee Smolin...

confins de l'Univers. Peut-être alors saura-t-on si on est sur la bonne voie où s'il faut explorer d'autres directions.⁴

En amont du mur de Planck

Ne disposant donc pas de l'outil « breveté », ce que l'on peut dire de ce qui se dissimule derrière le mur de Planck, ne peut être que *spéculatif*. Cela n'empêche toutefois pas les cosmologistes de faire des hypothèses sur la physique à cette époque ni de bâtir des scénarios. Mais toutes ces idées sont sujettes à divergence de points de vue dans la communauté scientifique.



◆ L'espace-temps

Notre conception habituelle de l'espace-temps est à modifier complètement. Du fait de la nature quantique dominante à cette échelle dont nous savons qu'elle est fondamentalement caractérisée par les relations d'*incertitude* d'Heisenberg⁵, l'espace-temps n'est plus une surface lisse mais plutôt une surface tourmentée et constamment en changement, une sorte de **mousse** très agitée dans laquelle des liens se font et se défont sans arrêt.

Pour le dire autrement, observons que le supposé graviton qui véhicule la force de gravité, apparaît comme un *concentré d'espace-temps* puisque la gravité résulte,

selon la relativité, d'une déformation (courbure) de celui-ci. En interaction permanente avec les autres particules présentes, réelles ou virtuelles⁶, les successions frénétiques de création et de disparition de gravitons, engendrent d'importantes fluctuations de la courbure qui déchirent le tissu de l'espace-temps.

Dans ce maelström quantique, notre conception de l'espace et du temps telle qu'elle se fonde sur notre réalité sensorielle, est fondamentalement altérée : le « tout proche » peut voisiner avec le « tout lointain » dans un univers éventuellement multidimensionnel ; le passé, le présent et le futur se mélangent et peut-être même que le temps disparaît !⁷ Il faut que l'Univers en expansion franchisse le mur de Planck pour que notre monde tridimensionnel apparaisse et que le temps émerge puis s'écoule paisiblement du passé vers le futur.

◆ Le scénario du vide quantique

Il paraît évident à tout un chacun qu'un volume vide est un volume dans lequel on a retiré toute matière qui y était présente. Mais cette évidence est battue en brèche par le physicien quantique pour qui le vide, même exempt de toute matière, ne l'est en définitive pas, car il contient une certaine énergie minimale, non nulle, qui, de plus, est susceptible de *fluctuations* en raison des relations d'incertitude (5) : on parle alors d'*énergie du vide*. On a vu, (6) que des particules virtuelles pouvaient se matérialiser un bref instant de sorte que le vide apparaît comme l'état de base de la matière, celui

⁴ Citons parmi les idées avancées (avec de jolis petits noms !!) : les *twisters* de l'Anglais Roger Penrose, la *géométrie non commutative* du Français Alain Connes, les *triangulations dynamiques causales* du Danois Jan Ambjorn et de la Néerlandaise Renate Loll.

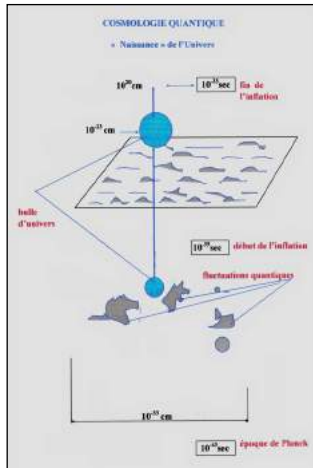
⁵ Werner Heisenberg a démontré en 1927 que l'on ne pouvait connaître simultanément la position et la quantité de mouvement (produit de sa masse par sa vitesse) d'une particule, ni son énergie et le temps nécessaire pour l'atteindre. On les nomme *relations d'incertitude*.

⁶ La notion de particule *virtuelle* est un aspect étrange de la physique quantique. Selon le §5 ci-dessus, en effet, il n'est pas possible de connaître simultanément l'énergie mise en jeu dans un processus et sa durée ; cela signifie que de l'énergie peut apparaître ou disparaître à condition que cela se fasse dans un temps déterminé par la relation d'*incertitude* et, comme masse et énergie sont équivalentes, cela signifie aussi que des particules peuvent naître ou disparaître avec une durée de vie très brève. On les appelle particules *virtuelles* car elles ne deviennent observables qu'au moyen d'un emprunt d'énergie - où ? - au vide quantique qui, autre aspect étrange de cette physique vraiment contre-intuitive, est gavé d'énergie.

⁷ Carlo Rovelli : « Qu'est ce que le temps ? Qu'est ce que l'espace ? » Bernard Gilson éditeur 2008
Voir aussi l'article de Bernard Miltenberger « L'énigme du temps » Bulletin N°46 de l'ARCEA/CESTA

qui contient toute sa potentialité d'existence. Dès lors, si on peut apporter de l'énergie venant de l'extérieur, des particules sont susceptibles de se matérialiser, donc de devenir réelles et engendrer l'Univers. Un problème crucial est que l'Univers étant *un tout, sans extérieur*, il n'y a pas de source d'énergie extérieure possible pour forcer le vide à « cracher » ses particules. Mais l'astrophysicien Edgard Gunzig⁸ a déjoué cette impossibilité en faisant jouer à **l'expansion** ce rôle d'apport d'énergie comme si elle provenait de l'extérieur. De plus, au cours de l'expansion, la densité d'énergie matière diminue progressivement tandis que celle du vide reste constante (c'est l'énergie minimale que l'Univers peut avoir) : il en résulte qu'au bout d'un certain temps, c'est l'énergie du vide qui domine et que l'Univers finit par ne plus se distinguer du vide quantique ; à l'occasion d'une autre fluctuation du vide, une autre aventure cosmologique peut se reproduire et ceci, indéfiniment. L'Univers apparaît ainsi comme sa propre cause en s'autoengendrant et en s'autoreproduisant.

Nous ne pouvons résister au plaisir de reproduire la description très poétique de ce scénario qu'en a fait Michel Cassé⁹, astrophysicien au CEA :



« Avant qu'existassent la géométrie et le temps ordonnateurs, l'espace-temps était écume et végétation. Une bulle infime de prématière s'éleva au-dessus de l'écume spatio-temporelle, comme une goutte de brouillard au-dessus d'une cascade, vide de particule mais pleine d'un champ. Champ scalaire parfait, chargé d'énergie et donc instable.

La perle de champ se dilata vertigineusement sous l'effet de la pression négative (du vide), et se retrouva lisse, lavée de toute courbure et chaude, infiniment ou presque (10^{32} K). Et le champ, comme un orage, se vida de son énergie en un éclair.

Au terme de l'expansion accélérée qui n'avait pas durée plus d'une fraction infime de seconde (10^{-32} sec.), l'énergie du vide instable avait laissé la place à l'énergie matérielle et l'évolution subséquente put alors être décrite par la théorie usuelle, du Big Bang chaud, à ceci près que la création ex nihilo avait cédé la place à une transformation de phase.

La nature même des fluctuations est de se reproduire à l'infini tant spatialement que temporellement. Selon cette conception dont le

physicien russe Andréi Linde s'est fait le héraut, la floraison de notre cosmos ne serait qu'un événement parmi d'autres, (cf. ci-après § sur le multivers), émaillant le continuum d'espace-temps habité par le vide quantique. L'infini spatial se double d'un infini de possibilités. »

◆ Le scénario du rebond

Nous avons vu que les 2 théories prédisent que la densité de l'Univers ne peut dépasser une valeur limite. On en déduit que la singularité (volume nul, densité infini) à laquelle aboutit l'extrapolation de la Relativité (dans un domaine où on sait qu'elle n'est plus valide), disparaît. Ceci veut dire que l'Univers aurait connu avant le Big Bang une évolution *symétrique* de celle qu'il a connu après : au cours de cette phase, l'Univers s'est contracté jusqu'à atteindre la densité limite puis en quelque sorte, a rebondi sur lui-même. Dès lors, la signification donnée habituellement au Big Bang change : il ne serait plus le commencement (et le mythique temps 0 disparaît) mais simplement une transition entre deux phases distinctes d'un seul et même Univers.

◆ Le scénario branaire



Brane est l'aphérèse (suppression du début du mot) du mot *membrane*. Une *brane* ou plutôt une *p-brane* est un objet de la physique quantique qui a p dimensions d'espace plus celle du temps, c'est-à-dire que dans l'espace-temps, elle possède $p+1$ dimensions : ainsi une 1-brane est une corde (1 dimension d'espace), une 2-brane est une surface (2 dimensions d'espace), une 3-brane est un volume (3 dimensions d'espace) etc.... De plus, ces branes « flottent » dans un espace-temps comportant toutes les dimensions (les fameuses dimensions supplémentaires dont nous avons parlé ci-dessus ne sont plus supposées repliées sur elles mêmes mais au contraire déployées à grande échelle).

⁸ Edgard Gunzig « Que faisiez-vous avant le Big Bang » Odile Jacob 2001

⁹ Michel Cassé « Du vide et de la création » Odile Jacob 1993

Hypothèse essentielle, les extrémités des cordes ouvertes constituant notre monde, à l'exception de la gravitation qui est une corde fermée, sont astreintes à se déplacer sur une 3-brane (cf. figure A), ce qui revient à dire que notre univers fait partie d'un ensemble plus vaste, un super-univers. Toutes les galaxies que nous voyons et toute la lumière qui nous parvient font partie de cette brane et ne peuvent en sortir cf. figure B), *hormis la gravitation* qui, elle, voit toutes les dimensions de l'espace-temps total. Notons que le fait que la gravitation « vive » dans toutes les dimensions du super-univers, permet d'expliquer que dans notre univers, (notre brane), elle soit très faible devant les autres forces



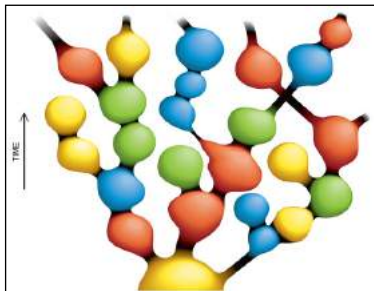
Le scénario branairiste consiste alors à supposer l'existence d'autres branes et le Big Bang serait un échange d'énergie monumental qui se produirait lorsque deux branes se touchent¹⁰ (cf. figure C). L'une transmet une quantité phénoménale d'énergie et de matière sous forme très condensée à l'autre, et l'autre fait de même. Notre Univers aurait déjà subi plus d'un Big-Bang et cet événement se renouvelerait donc à nouveau. Ce scénario porte aussi le nom d'*ekpyrotique*, du grec « ekpyrosis » (embrasement). Il laisse aussi imaginer un univers cyclique à l'instar de « l'éternel retour » proposé par *Héraclite* (vers 540-480 av.J.C.).

◆ Le scénario du multivers

Le terme « multivers » est une contraction de l'expression « multiple univers » pour indiquer qu'une multitude d'univers existe et que notre univers, celui que nous observons, n'est ni le seul existant ni le seul possible. Cette idée est ancienne et remonte à l'époque grecque, en fait à *Anaximandre de Milet*, (610-547 av.J.C.), qui fut le premier penseur grec à concevoir une cosmologie non mythologique et à admettre « une infinité de mondes qui naissent et disparaissent dans l'infini du temps et de l'espace ». Selon une telle idée, notre univers, pourtant immense, ne serait ainsi qu'une infime partie d'une structure cosmique bien plus vaste, un simple échantillon d'une multitude de mondes. Les théories précédentes avancent des processus différents pour expliquer la genèse de ces mondes multiples.

→ le processus de la théorie des cordes associée à l'inflation cosmique

Rappelons d'abord que l'inflation est une hypothèse¹¹ (non vérifiée) de la théorie du Big Bang selon laquelle juste après le temps de Planck, vers 10^{-34} sec et jusqu'à 10^{-32} sec (c'est-à-dire pendant un temps de l'ordre de 10^{-32} sec), l'Univers aurait connu une période d'expansion gigantesque, (d'un facteur 10^{43}), c'est-à-dire « immensément plus » que depuis ce temps jusqu'à aujourd'hui. Cette



hypothèse permet d'expliquer certaines énigmes du modèle du Big Bang.

Mais *Andréi Linde* est allé plus loin¹² : il a supposé qu'une multitude de régions de l'espace connaîtraient toujours une telle phase d'expansion accélérée, donnant lieu à la naissance de nouveaux univers qu'il appelle des « univers bulle ». C'est le scénario dit de « l'inflation éternelle ». Associé à la théorie des supercordes dont on a mentionné ci-dessus qu'elle offrait une multitude de solutions d'univers différentes dues aux différents choix possibles de repliement des dimensions supplémentaires, c'est un multivers d'une diversité fascinante qui se dessine : un très

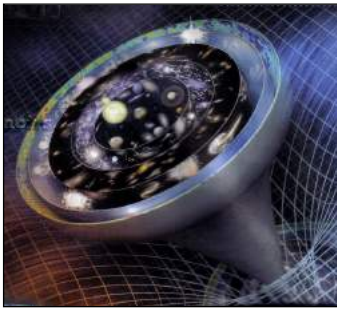
grand nombre d'univers bulles se développant par inflation éternelle, et contenant chacun une infinité d'univers présentant chacun ses propres lois physiques. En clair, tout ce qui est possible en matière d'univers serait réalisé quelque part.

¹⁰ Justin Khoury, Paul Steinhardt, Neil Turok Physical Review 2001

¹¹ Alan Guth (Physical Review 1981).

¹² Andrei Linde (Physical Letters 1982).

→ le processus associé à la gravitation à boucles



La gravitation à boucles prédit qu'au centre d'un trou noir, la gravité devient répulsive. Il en résulte que la matière se contracterait vers le centre pour rebondir ensuite à son voisinage dans une nouvelle phase d'expansion. Un nouvel univers en expansion naîtrait ainsi à l'intérieur même du trou noir¹³ et chaque trou noir formé dans ce nouvel univers engendrerait lui-même un nouvel univers. On a affaire à un univers « imbriqué » où chaque univers transmet à sa descendance ses propres lois de la physique, légèrement modifiées toutefois en raison des fluctuations quantiques au moment du rebond. Notre univers aurait 10^{18} enfants créés par ses propres trous noirs. Mais l'horizon du

trou noir restant en place, aucun signal provenant de l'univers en expansion ne peut atteindre la région « mère » où l'effondrement a eu lieu.

Pour résumer :

① Au cours des 4 dernières décennies, deux théories cherchant à unifier la Relativité générale et la Physique quantique, ont fait l'objet d'un important développement. A l'heure actuelle, aucune ne s'impose absolument et chacune présente bien des défauts ou des lacunes. De plus il ya le sérieux problème de la confrontation avec l'expérience car parvenir à des dimensions de l'ordre de la longueur de Planck nous est probablement interdit pour toujours. Reste à trouver des prédictions dérivées vérifiables.

② Les 2 théories, bien que partant de bases différentes, aboutissent au résultat spectaculaire selon lequel la densité de l'univers ne saurait être infinie comme le prévoit la Relativité, mais ne pourrait dépasser une valeur maximale. Ce qui conduit à remplacer la singularité du Big Bang par une phase de transition et donc de concevoir un « *pré Big Bang* », c'est-à-dire à imaginer que « quelque chose » aurait précédé ce que l'on a considéré jusqu'ici comme l'origine de notre Univers. Soulignons que ceci est une tendance de beaucoup de cosmologistes qui sont gênés par l'idée des infinis, mais que ce n'est évidemment pas une certitude.

③ Quelque chose qui aurait préexisté à notre univers et non pas le néant ! Mais alors, se pose la question : « d'où vient ce quelque chose » ? Qu'il s'agisse du vide quantique, ou des branes, ou de l'univers avant le Big Bang, force est de constater que personne n'en sait rien.

Le réglage fin des paramètres

Une autre question essentielle concerne le réglage extrêmement précis des paramètres de notre univers (en Anglais, *fine tuning*). Les physiciens se sont, en effet, rendus compte de l'extrême improbabilité de l'émergence de la Vie et de la Conscience dans un univers aux constantes fondamentales et conditions initiales quelconques par rapport aux nôtres. Donnons quelques exemples :

◆ Paramètres gouvernant les forces fondamentales

→ Force de gravité

* augmentation : le cœur des étoiles est trop comprimé, elles épuisent trop vite leur carburant et l'évolution vers la Vie n'a pas le temps de se faire.

* diminution : les nuages interstellaires ne peuvent plus s'effondrer et atteindre la température nécessaire pour enclencher les réactions nucléaires. Donc, plus d'étoiles qui s'allument.

→ Force nucléaire forte

* augmentation : les protons ne pourront pas rester libres et ils se combineront avec d'autres protons et neutrons pour former des noyaux lourds. Donc, pas ou peu d'hydrogène, pas d'eau, pas de vie.

* diminution : excès contraire, aucun noyau autre que l'hydrogène ne pourra survivre. Donc, plus de possibilité de combustion en hélium, plus de réactions nucléaires, plus d'étoiles sources d'énergie.

¹³ Lee Smolin Cambridge University Press 2007
Martin Bojowald Nature Physics 2007

→ *Force nucléaire faible*

Une légère modification de son intensité et les explosions de supernovae ne pourront avoir lieu, privant ainsi les planètes des éléments chimiques lourds nécessaires à la Vie (comme le carbone et l'oxygène).

→ *Force électromagnétique*

*augmentation : les électrons sont plus fortement liés au noyau, les réactions sont plus rares car demandant plus d'énergie. Donc, la formation de l'ADN devient improbable.

*diminution : les liaisons chimiques et la formation de molécules complexes deviennent impossibles. Donc, même résultat que ci-dessus.

◆ **Condition initiales**

→ *Densité de l'Univers*

* augmentation : l'Univers s'effondre sur lui-même, il a une durée de vie trop courte et l'évolution n'aura pas le temps de gravir les échelons de la complexité.

* diminution : la durée de vie est longue, mais la matière, trop diluée, ne peut se condenser en galaxies et l'Univers est condamné à la stérilité.

* aujourd'hui, la densité est voisine de la densité critique (10^{-29} g/cm³). On a montré que l'écart entre valeurs réelle et critique augmente proportionnellement au temps, de sorte qu'au temps de Planck, 10^{60} fois plus faible qu'aujourd'hui, la densité avait la valeur critique avec une précision de 60 chiffres après la virgule !

→ *Homogénéité et isotropie de l'Univers*

* l'Univers ne doit pas être trop homogène pour permettre l'existence de germes qui donneront les galaxies futures.

* il ne doit pas être non plus trop inhomogène pour permettre leur croissance sinon les mouvements anarchiques les dissiperaient en chaleur.

* on a montré que le taux d'expansion ne doit pas s'écarter de plus de 10^{-30} dans les différentes directions.

◆ **Le principe anthropique**

Le monde qui nous entoure est donc extraordinairement particulier. Ce qui a conduit l'astrophysicien Brandon Carter¹⁴ à énoncer en 1974 ce qu'on a appelé *le principe anthropique* qui se décline en deux versions :

→ la version **faible** : « *Notre position dans l'Univers est nécessairement privilégiée en ce sens qu'elle doit être compatible avec notre existence en tant qu'observateurs* ».

→ la version **forte** : « *l'Univers, et donc les paramètres fondamentaux dont il dépend, doit être tel qu'il permette la naissance d'observateurs en son sein, à un certain stade de son développement* ».

Le principe faible fait l'objet d'un large consensus. Il est sensé concerner un type particulier d'univers avec lequel l'observateur est confronté et il indique *où* et *quand* il peut exister dans cet univers « bioadapté ».

Le principe fort est davantage discuté en raison de sa connotation finaliste. Contrairement au précédent, il suppose une pluralité d'univers et il introduit une idée de *restriction* sur les constantes fondamentales : quand un observateur existe, les propriétés de l'univers doivent être telles qu'elles permettent son apparition. Il ne donne pas d'explication mais il peut être un outil de prédiction.¹⁵

◆ **A la recherche d'une explication**

Nous n'avons pas de théorie qui prédit les valeurs correctes des constantes fondamentales conduisant naturellement et nécessairement à l'existence de la Vie (l'hypothétique théorie du Tout).

¹⁴ Brandon Carter IAU Sym 1974

¹⁵ A titre d'exemples :* il prévoit une condition nécessaire pour la synthèse du carbone dans les étoiles à partir de l'hélium, ce qui a été vérifiée expérimentalement.

* il prévoit aussi que depuis l'origine de l'humanité, pas plus de 1200 milliards d'individus auront peuplé la planète, ce qui, pour une population stabilisée à 10 milliards, devrait intervenir en l'an 9120. C'est ce qu'on a appelé la « catastrophe de Carter » ou encore « l'argument de l'apocalypse ».

En conséquence, face au problème du « fine tuning », il existe, à priori, quatre attitudes possibles :¹⁶

→ *le hasard* : dès lors qu'il pourrait exister une multitude d'univers ayant des combinaisons différentes de constantes fondamentales et de conditions initiales, il est statistiquement possible que nous nous trouvions dans un univers permettant l'émergence de la Vie.

→ *la chance* : nous avons été chanceux car tout aurait pu être différent. Dans le coup de dé initial, nous avons eu l'incroyable chance que l'Univers se réalise dans la situation permettant l'apparition de la Vie dont la probabilité était dérisoire pour ne pas dire quasi nulle.

→ *l'élan vital* : nous n'avons pas été particulièrement chanceux, mais la Vie, étant un processus d'adaptation, finalement n'importe quel jeu de paramètres aurait pu conduire à un univers peuplé d'êtres vivants.

→ *le dessein intelligent* : l'Univers a été programmé par un principe créateur que nous appelons Dieu pour que la Vie soit possible.

La première proposition exprime l'idée du principe anthropique fort : les dés auraient été jetés plusieurs fois et notre univers aurait eu la combinaison gagnante pour être « fertile », la plupart des autres ayant une combinaison perdante et étant « stériles ». Rappelons que l'objection usuelle au concept d'univers multiples est qu'ils sont inaccessibles à l'observation et donc *invérifiables*. De plus, en requérant une infinité d'univers pour en justifier un seul, il contredit le principe dit du « rasoir d'Occam »¹⁷ qui suggère qu'une explication simple a plus de chances d'être vraie qu'une explication compliquée.

La seconde proposition, quoique logiquement irréfutable, a un goût d'inachevé, d'incomplétude, de principe brut à admettre tel quel. Ou pour résumer d'un mot, elle apparaît comme un *solipsisme* de la création (solipsisme : conception philosophique selon laquelle le Moi est la seule réalité possible, Petit Larousse).

La troisième proposition est attrayante, mais les faits, au sein de notre propre univers, tendent à la défavoriser : nous n'observons que des formes de vie relativement proches les unes des autres et pas de vie, semble-t-il, dans le soleil ou au sein du magma terrestre ou dans le vide interstellaire. Brandon Carter, lui-même, a tiré du principe anthropique faible la conséquence que la Vie était très improbable dans notre voisinage galactique. Ceci ne veut pas dire que des intelligences extra-terrestres n'existent pas, étant donnés les milliards et les milliards de planètes : le programme SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) d'écoute de l'Univers est voué à cette recherche.

Enfin, la quatrième proposition est considérée par la plupart des scientifiques comme hors du champ de la science, car d'essence métaphysique. Cela n'empêche cependant pas qu'elle ait un sens.

Science et transcendance

◆ A propos des lois scientifiques

On leur attribue certaines propriétés caractéristiques. Elles sont :

- *éternelles*, c'est-à-dire qu'elles sont indépendantes du temps
- *universelles*, c'est-à-dire qu'elles s'appliquent infailliblement à tout l'univers
- *omnipotentes*, c'est-à-dire que rien n'échappe à leur pouvoir
- *absolues*, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de l'état réel du monde

Leur statut pose problème : sont-elles *immanentes* ou *transcendantes* ?

La permanence des lois physiques s'oppose à la temporalité de l'univers : comment se fait-il qu'un univers qui évolue puisse être régi par des lois qui n'évoluent pas ? Il semble bien que cette

¹⁶ Aurélien Barrau, « Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers » CNRS/IN2P3

¹⁷ Guillaume d'Occam, (vers 1295-1349), franciscain d'origine anglaise à qui on attribue la formule : « *C'est en vain que l'on fait avec plusieurs ce que l'on peut faire avec un petit nombre* »

invariance des lois ne s'accorde guère avec un univers « fermé » sur lui-même en ce sens qu'il produirait de lui-même les lois qui le régissent¹⁸. Elles doivent plutôt appartenir à un autre monde.

→ Face à ce dilemme, beaucoup évoquent un monde platonicien, du nom du philosophe grec qui se confronta au problème de ce paradoxe fondamental et qui imagina un monde *transcendant, parfait et immuable* de principes mathématiques et de structures géométriques au sommet duquel trônait *Dieu* (il le nommait le *Dieu du Bien*), notre monde n'en étant qu'une copie imparfaite façonnée par ce qu'il appelait le *Démiurge*.

→ D'autres refusent ce postulat métaphysique ou religieux et imaginent que les lois ne sont pas invariantes mais évoluent au cours du temps comme l'univers. Cette idée fait surgir immédiatement la question de savoir si cette évolution est pilotée par une super loi, si cette super loi est à son tour pilotée par une super super loi, ce qui conduit à une régression infinie, insatisfaisante.

→ D'autres enfin pensent que ces questions n'ont aucun sens et qu'il nous faut accepter les lois comme un fait brut car leur origine nous échappera toujours, ce qui ne concorde guère avec ce besoin profondément inhérent à l'esprit humain, de comprendre et d'expliquer.

Comme on le constate, le sujet fait débat.

◆ En quête de sens¹⁹

- Pourquoi y-a-t-il quelque chose plutôt que rien ?
- Quelle est l'origine de notre Univers ?
- Le monde étudié par la science, est-il l'unique réalité ou existe t-il une réalité plus profonde ?
- La nature est-elle un processus aléatoire et fortuit ou un projet doté d'un objectif ?
- L'Homme peut-il être entièrement compris en termes de sciences naturelles ou existe t-il une dimension transcendant l'existence humaine ?

Ces questions (et quelques autres) constituent le fondement, « l'essence du sens » de notre propre existence qu'une sorte de force instinctive nous pousse à rechercher depuis toujours. Et lorsqu'on les évoque, *Dieu n'est pas très loin*.

Depuis l'aventure de Galilée, une frontière bien nette sépare science et religion, une sorte de « Yalta » philosophique : *la science s'occupe des faits, la religion des valeurs*. Cette position a été popularisée sous l'acronyme NOMA (Non Overlapping Magisteria- non recouvrement des magistères).

Néanmoins, l'évolution des idées montre qu'un tel « séparationnisme » devient difficile à tenir dès lors qu'on aborde ces questions ultimes.²⁰

Un des enseignements essentiels qui résulte du développement de la Physique et des Mathématiques au XXème siècle, conduit à une mutation profonde de la pensée scientifique : les notions de permanence et de stabilité, de prévision, de déterminisme, et par là, de maîtrise, sont remises en cause :

- la mécanique quantique nous apprend à travers les relations d'incertitude d'Heisenberg déjà citées, que **l'incertain** est irrémédiablement associé à la connaissance.
- les mathématiques, langage privilégié de la Physique, ne sont pas non plus exemptes de limitation : le théorème d'incomplétude démontré en 1931 par le logicien Kurt Gödel, indique qu'il existe des propositions **indécidables** et des énoncés **vrais indémontrables**.

¹⁸ Etienne Klein : « Discours sur l'origine de l'Univers » Flammarion 2010

Paul Davies : « L'esprit de Dieu » Hachette 1998

¹⁹ « Science et quête de sens » Presses de la Renaissance 2005, sous la direction de Jean Staune

²⁰ Pour illustrer ce propos, voici quelques déclarations d'éminents savants qui n'ont pas hésité à « transgresser le magistère » :

- Albert Einstein : « *Si la religion sans la science est boiteuse, la science sans la religion est aveugle* »

- Louis Pasteur : « *Un peu de science éloigne de Dieu mais beaucoup y ramène* »

- Werner Von Braun : « *Plus nous comprenons les complexités de l'Univers, plus nous avons des raisons de nous étonner de la conception inhérente qui le sous-tend* »

-Steven Weinberg : « *Plus nous comprenons l'Univers, plus il semble dépourvu de signification* »

-Stephen Hawking : « *Si nous parvenions à découvrir une théorie unificatrice, [], ce serait le triomphe de la pensée humaine qui nous permettrait alors de connaître l'esprit de Dieu* ».

Il en résulte que nous savons désormais *qu'il y a des choses que nous ne connaissons jamais*. Il en résulte ainsi qu'une autre Réalité existe au delà de la réalité empirique dans laquelle nous sommes immergés. Cette Réalité est *non connaissable* et *transcendante*. Ces limitations n'entraînent cependant pas que le projet de la Science ait failli. La méthode scientifique reste la source effective de notre savoir, mais ayant identifié elle-même ses propres limites, elle sait désormais qu'elle peut écrire une *partie* de l'histoire du monde, mais pas *toute* l'histoire.

Point n'est besoin de commenter abondamment l'émerveillement que ressentent les scientifiques qui découvrent dans leurs observations l'ordre et la beauté du monde. Albert Einstein est un de ceux qui ont intensément éprouvé une telle expérience et ont tenté de le dire : « *L'homme éprouve l'inanité des désirs et des buts humains et le caractère sublime et merveilleux de l'ordre qui se révèle dans la nature et le monde de la pensée. Il ressent son existence individuelle comme une sorte de prison et veut vivre la totalité de ce qui est comme une chose qui a une unité et un sens* ». Cet ordre et cette beauté de la réalité empirique (le monde phénoménal) que la science nous révèle, doivent être le reflet de la Réalité transcendante (la Réalité en soi) au sein de laquelle doivent également régner ordre et beauté : sorte de vision néo-platonicienne qu'on ne peut appréhender que par l'intuition, la révélation, la spéculation ou un acte de foi, et identifiable pour le croyant au « Royaume des cieux ». Ce paradigme est porteur de sens. Pour le non croyant ou l'agnostique, il s'agit aussi d'un paradigme, mais est-il porteur de sens ?

Pour conclure

◆ A l'issue de cette incursion aux frontières de la science actuelle, je retiens, pour ma part, trois observations :

① Nous ne disposons pas encore d'une théorie unifiant les deux monuments de la Physique du XX^{ème} siècle que sont la Relativité et la Physique Quantique, qui fasse l'objet d'un consensus général.

② En conséquence, le mur de Planck continue de se dresser devant nous et ce que nous imaginons de la « terra incognita » qu'il dissimule, reste spéculatif.

③ La Science d'aujourd'hui ouvre une fenêtre sur une réalité riche et mystérieuse dont une partie nous sera toujours obscurcie. Et ce rapprochement entre science et ontologie est un élément majeur dans la recherche humaine sur le sens du monde.

◆ La dimension rationnelle n'est pas la seule caractéristique de la pensée humaine. Il faut y adjoindre tout ce qui relève de l'esthétique, du sentiment, de la morale, c'est-à-dire du *cœur*. En conséquence, c'est à l'homme de lettres dont j'ai mentionné en tête de cet article le titre d'un livre récent, que j'emprunte ce dernier propos :

« Le monde n'est pas un chaos. Il y a de l'ordre dans l'Univers. Et il y a de la beauté dans l'Univers. D'où vient l'ordre ? D'où vient la beauté ? Personne n'ôtera de la tête de beaucoup d'êtres humains l'idée que le monde est un projet en œuvre et qu'en dépit de tant de mal et de tant de souffrances, il garde un sens caché.

La science d'aujourd'hui détruit l'ignorance et elle fera figure d'ignorance au regard de la science de demain. Dans le cœur des hommes, il y a un élan vers autre chose qu'un savoir qui ne suffira jamais à expliquer un monde dont la clé secrète est ailleurs ». (Jean d'Ormesson).

Pierre LAHARRAGUE

Octobre 2011