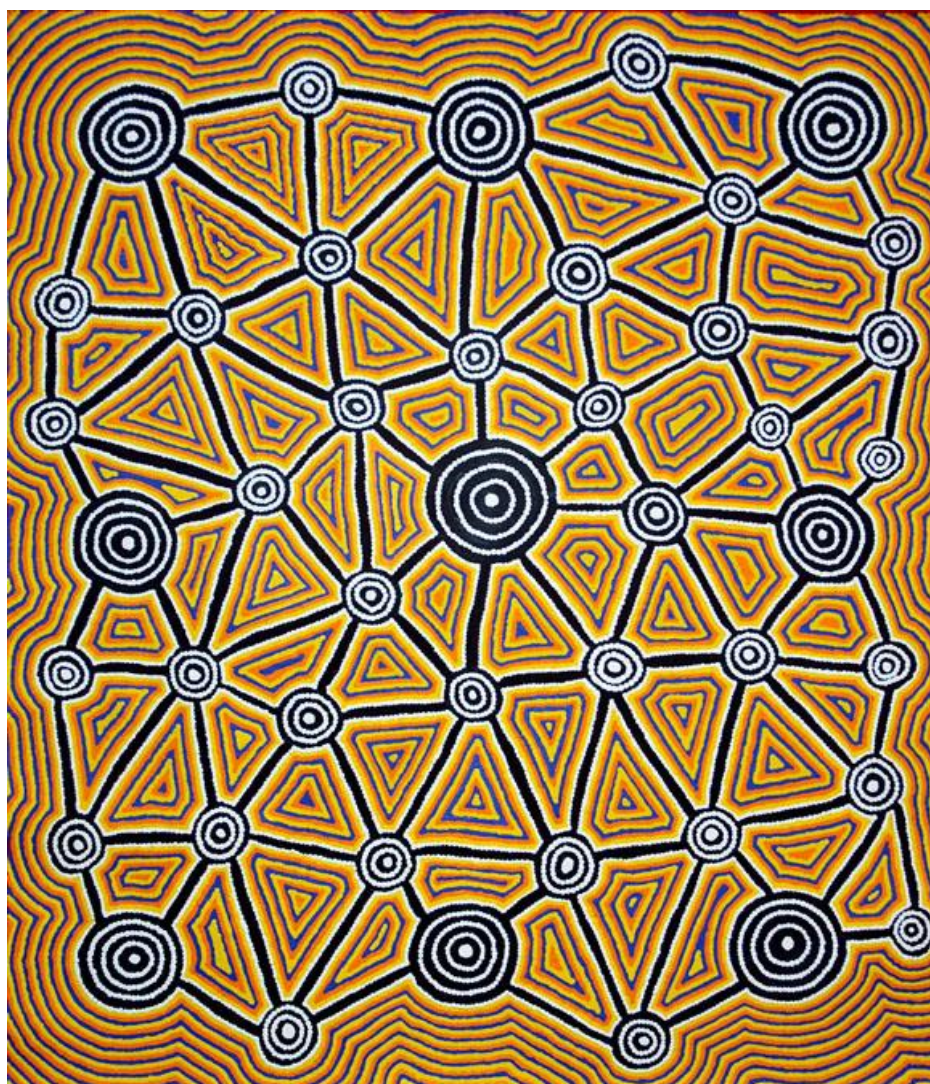


# Univers : origine et évolution

*Les récents développements autour de la cosmologie  
et de la gravité quantique*

*par Laurent Gautret , docteur en astrophysique*



*C.W.Nakamura*

*14 Juin 2016. 18h15. Centre culturel Langenier.*

*Saint Pierre. La Réunion*

*<http://amis-univ-reunion.fr/>*

## Résumé :

La cosmologie est l'étude de l'évolution, de l'origine de l'Univers et de sa structure depuis l'infiniment petit jusqu'à l'infiniment grand.

Cette discipline scientifique très jeune fête 100 ans de découvertes extraordinaires: la relativité, l'espace-temps, le big-bang, les particules élémentaires dont le fameux boson de Higgs, la découverte d'un terme d' « Energie noire » qui accélère exponentiellement l'expansion du vide entre des centaines de milliards de galaxies (prix Nobel de Physique en 2011) et enfin la mesure très récente des ondes gravitationnelles prédites par Einstein.

Jusqu'à il y a peu, le Big Bang faisait figure de singularité initiale à l'origine du temps. Le caractère infini des phénomènes qui s'y produisent rendait ce temps 0 inaccessible à nos expériences et à nos conjectures. Depuis moins de deux décennies des modèles principalement mathématiques tentant d'unifier nos connaissances en physique quantique et en relativité générale ont vu le jour et ont « ouvert le temps » : il est désormais possible d'envisager un avant à notre Univers, et un après, voire même une « bio »-diversité d'Univers dans un Multivers avec des mécanismes de sélection naturelle d'Univers !

La théorie des cordes et la gravité quantique à boucles sont deux courants de cette pensée foisonnante qui pourraient dans les années à venir établir les nouvelles bases de la physique et lancer de sérieux défis philosophiques touchant de près ou de loin au sens même de l'évolution.

Tout ceci n'est pas une science-fiction car un certain nombre d'expériences décisives ont commencé ou sont sur le point de livrer leur verdict quant à une bonne voie d'unification. Ces expériences touchent à tous les domaines des très hautes énergies comme par exemple les trous noirs, leur thermodynamique et leurs possibles collisions. Les ondes gravitationnelles récemment découvertes pourraient potentiellement être le livre ouvert de ces secrets.

## Contenu

<b>Introduction : Cosmologie, Philosophies et Religions .....</b>	<b>3</b>
<b>Gravité. Relativité générale. Matière &amp; ondes gravitationnelles. ....</b>	<b>4</b>
<b>Matière noire. Energie noire. ....</b>	<b>6</b>
<b>Equation de l'Univers. « Cosmic doom » &amp; « Fine tuning ».....</b>	<b>8</b>
<b>Cordes. Inflation. Multivers à bulles de Linde. Principe anthropique .....</b>	<b>11</b>
<b>Boucles. Grand rebond. Trous noirs. CNS de Lee Smolin .....</b>	<b>13</b>
<b>Science ou science-fictions. Observations clés .....</b>	<b>18</b>
<b>Espace-temps et conscience. Penrose. IIT de Tononi. Tegmark.....</b>	<b>19</b>
<b>Conclusion et résumé .....</b>	<b>23</b>

## Introduction : Cosmologie, Philosophies et Religions

La Cosmologie fête 100 ans de découvertes extraordinaires : la relativité, l'espace-temps, le big-bang, les particules élémentaires dont le fameux boson de Higgs, la découverte d'un terme d'Energie noire ou « Energie du vide » qui accélère exponentiellement l'expansion du vide entre des centaines de milliards de galaxies (découverte qui a valu le prix Nobel de Physique en 2011) et enfin la mesure très récente des ondes gravitationnelles prédites par Einstein.

Les Astronomes du Cosmos sont capables à la fois de modéliser le réel avec des approches mathématiques magnifiquement créatives et d'observer les confins de l'Univers et de la matière avec des outils ultra-sophistiqués (accélérateur de particules LHC, Satellite Planck d'observation de la lumière la plus ancienne de l'Univers, expériences LIGO/VIRGO et bientôt eLISA de détection d'ondes gravitationnelles).

La conjonction de la théorie et de l'observation bloquait il y a encore une dizaine d'année sur le quasi-infiniment petit du temps et de l'espace qui est aussi le quasi-infiniment grand des hautes énergies. Depuis peu le voile commence à se lever sur cette singularité et le temps s'ouvre. Il n'est plus exagéré de parler de temps avant le Big-Bang, avant même l'existence de notre Univers. Et de temps après la fin de notre Univers ... Cosmologie et Religion s'interpellent !

Depuis Copernic, Galilée, Darwin et Einstein la science moderne vit un paradoxe : c'est en sortant l'humain de son piédestal anthropocentrique que semble s'accomplir le miracle de la conscience. Notre horizon de connaissances se nourrit des théories qui nous sortent du centre du monde.

Spatialement : Copernic décentre La Terre. Galilée et Einstein, en prédisant avec justesse un Univers homogène et isotrope (aucune direction privilégiée) à grande échelle, suppriment l'existence même d'un centre à l'Univers.

Temporellement : d'après la théorie de l'Evolution, nous devenons une espèce parmi d'autres. Si la vie est découverte d'ici quelques années sur des planètes extrasolaires, ce décentrage sera quasi-total !

Einstein s'amusait de ce paradoxe : « *the most incomprehensible thing about the Universe is that it is comprehensible.* »

Nous allons le voir, ces deux problématiques de la conscience au monde (« Quel lien y a-t-il entre conscience et matière ») et de l'anthropocentrisme un peu reformulé (« Pourquoi comprenons-nous l'Univers ? ») sont des clés de voûte du mystère cosmologique moderne. Cosmologie et Philosophie s'interpellent aussi plus que jamais !

## Gravité. Relativité générale. Matière & ondes gravitationnelles.

Sur Terre, nos montagnes sont le fruit de l'histoire géologique des forces qui ont modelé les lieux. L'eau de pluie ruisselle sur leur dos en suivant la ligne de plus grande pente, qui n'est souvent pas linéaire, mais courbe.

De même notre espace-temps est déformé par la présence locale d'énergie ou de matière (par exemple une planète, une étoile, une galaxie, ou encore un amas de galaxies). La lumière fait « comme l'eau de pluie », elle ruisselle le long de ces déformations de la grille d'espace-temps. Elle suit alors des trajectoires qui peuvent être très courbées si cette densité locale d'énergie ou de matière est forte (par exemple un trou noir) et d'autant plus si cet attracteur est situé sur la ligne entre le point source et nos yeux. Dans certains cas rares d'alignements on peut même parfois apercevoir des effets de fantômes gravitationnels : la courbure devenant distorsion, créant parfois des anneaux de lumière, voire des images multiples d'un même objet, par exemple d'une galaxie très lointaine.

La lumière étant composée de photons dépourvus de masse, la gravitation Newtonienne n'explique pas ces courbures de trajectoires. Seule une théorie géométrique de la Gravitation le peut : c'est la Relativité Générale d'Einstein. Elle a 100 ans !

Alan Guth résume ainsi cette théorie : « Space tells matter how to move. Matter tells space how to curve. » (*L'Espace dit à la matière comment bouger. La matière dit à l'Espace comment se courber*)

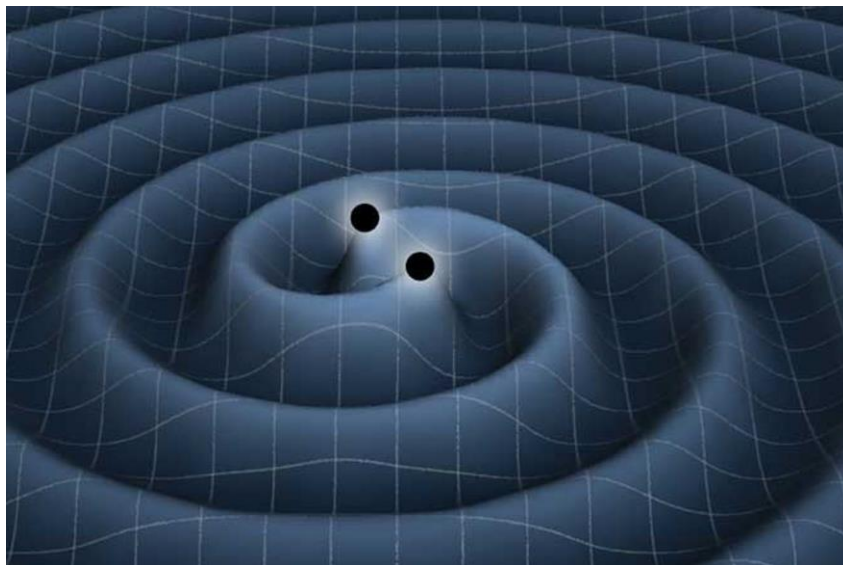
Poursuivons l'analogie entre l'eau de pluie qui serpente le long de la grille irrégulière que constitue la carte topologique de nos montagnes et la lumière qui « ruisselle » sur la grille d'espace-temps que constitue la distribution de matière et d'énergie dans l'Univers :

Lorsque sur Terre nos montagnes bougent, elles créent des ondes sismiques très intenses à proximité de l'épicentre, qui se propagent et sont mesurables même à grande distance, en faisant vibrer pendant une certaine durée la carte topologique du paysage. De même lorsque dans l'Univers ont lieu des cataclysmes entre titans cosmologiques (chocs de trous noirs, ou inflation de l'Univers peu après le Big-Bang) la grille d'espace-temps est parcourue d'ondes gravitationnelles qui se propagent à la vitesse de la lumière mais d'intensité très ténue loin de l'épicentre. Ce sont ces vibrations que les oreilles de l'instrument LIGO ont détectées récemment.

Une « oreille » de détection d'onde gravitationnelle est composée d'un émetteur/récepteur laser et d'un miroir réfléchissant, dont la distance à l'émetteur est à la fois très stable et très grande de quelques km (cas du détecteur Terrestre LIGO : 4 km) à quelques millions de km (cas du futur détecteur spatial eLISA, horizon 2030). Si une onde gravitationnelle traverse le parcours du rayon laser, elle génère une courbure de ce rayon et une variation mesurable du temps de parcours. Avec deux oreilles perpendiculaires entre elles, on peut même avoir une vision 3D de l'onde gravitationnelle et reconstruire son chemin, sa source et les caractéristiques de sa naissance. Sur Terre, les détecteurs doivent être situés dans des zones ultrastables loin de toute activité humaine. Le futur instrument spatial eLISA sera capable de détecter des variations de distances de la taille d'un atome sur des échelles de plusieurs millions de km.

La première mesure des ondes gravitationnelles le 14 Septembre 2015 n'est finalement pas une surprise en comparaison de ce que leur lecture dans les années prochaines va nous apprendre. Einstein avait prédit leur existence il y a un siècle et déjà en 1974 des physiciens américains (Taylor & Hulse) avaient observé un phénomène astronomique capable de générer des ondes gravitationnelles mesurables : la création probable d'un trou noir !

Lorsque deux objets très denses tels que des pulsars (résidus de fin de vie d'étoiles beaucoup plus massives que notre soleil) orbitent l'un autour de l'autre, la théorie de la RG prévoit qu'ils perdent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Cette perte d'énergie les rapproche et accroît leur vitesse de rotation jusqu'à l'inévitable collision vers un objet plus dense encore : un trou noir. C'est ceci qui a été probablement observé par LIGO : en 1/5 de seconde LIGO a vu la rotation des deux « titans » (chacun faisant environ 30 masses solaires pour un rayon d'environ 100 km) passer de 15 orbites par seconde à 250 puis plus rien. Ils avaient fusionné. Cet événement a eu lieu il y a 1,3 milliard d'années.



**Une représentation d'artiste d'ondes gravitationnelles se propageant dans le tissu de l'espace-temps et rayonnées par un couple de trous noirs spiralant l'un vers l'autre en perdant de l'énergie suite à l'émission de ces ondes. © K. Thorne (Caltech)-T. Carnahan (Nasa GSFC)**

L'événement n'est pas tant leur découverte que la capacité instrumentale récente à les mesurer, à les traquer : un nouveau livre vient d'être ouvert dont les caractères d'écriture sont connus, mais la compréhension de la syntaxe risque probablement d'ouvrir de nouveaux champs théoriques et d'en fermer d'autres.

Jusqu'à présent aucune lumière et donc aucun signal électromagnétique ne pouvait être observé plus tôt que environ 400 000 ans après le Big Bang, moment où l'Univers se refroidit suffisamment pour que particules et photons n'interagissent plus, libérant la lumière. Cette première Lumière visible de l'Univers, ou lumière fossile, a été observée finement par le satellite Européen Planck en 2013. Parmi les caractéristiques de cette lumière : l'extrême homogénéité (à 1 millionième près) et la quasi parfaite « platitude » de l'Univers primordial (la grille d'espace-temps n'a aucune courbure).

Les OG pourront à terme témoigner des mécanismes physiques opérant quasi-instantanément après la singularité du Big-Bang et en particulier au moment où de très fortes densités de matière sont en mouvement d'expansion à des vitesses extrêmes, permettant d'expliquer dynamiquement l'homogénéité et la platitude de notre Univers. Cette période très courte s'appelle l'inflation : un « flash » ayant fait « gonfler » le tissu d'espace de notre Univers post Big-Bang d'un facteur pouvant atteindre  $10^{100}$  en environ  $10^{-30}$  secondes ! De nombreuses sources théoriques possibles de cette inflation se confrontent actuellement. Les OG y mettront probablement bon ordre d'ici quelques années !

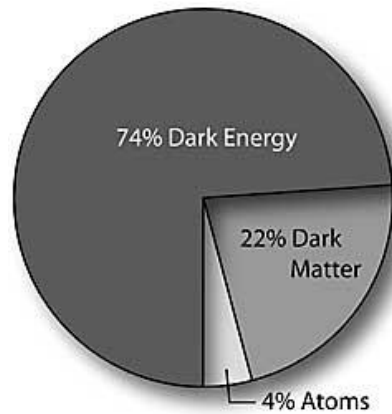
## **Matière noire. Energie noire.**

Il est déroutant de constater à quel point les modèles physiques et mathématiques qu'utilisent les cosmologistes – on parle de Modèle Standard MS - sont puissants à décrire et prédire la réalité (âge de l'Univers, ondes et fantômes gravitationnels, types de particules élémentaires, histoire thermique de l'Univers et proportions des différents constituants élémentaires ...) et à quel point pourtant notre connaissance de l'Energie et de la Masse qui composent notre Univers est lacunaire.

Le prix Nobel 2011 a été attribué à l'équipe américaine qui a su mesurer à partir de l'observation d'explosions de Supernovæ (d'un type bien spécifique : le type 1a), la part de l'Energie universelle provenant de la matière (environ 25%) et la part dite de l'« Energie du vide » ou « Energie noire » (le reste 75%).

Le premier mystère concerne la matière qui compose l'Univers, et qui compose donc environ  $\frac{1}{4}$  de son énergie. Nous ne connaissons qu'environ un cinquième à un dixième des constituants de cette matière : ce sont principalement les étoiles qui composent les galaxies et que nous sommes capables d'observer par le biais de leur rayonnement. La matière restante est inconnue et indétectée après plus de 20 ans de recherches acharnées. Elle est dénommée la « Matière noire ». La présence de cette matière mystérieuse est avérée par son effet gravitationnel sur les étoiles principalement en périphérie des galaxies, dont la vitesse serait moindre si seule la matière visible composait les galaxies. Il semble également que matière visible et matière noire aient des comportements différents : elles n'ont pas la même répartition, la matière noire occupant surtout la partie périphérique des galaxies et elles n'ont pas la même capacité d'interaction. Par exemple, lorsque deux galaxies fusionnent, leurs matières visibles frottent et se ralentissent l'une l'autre tandis que les halos de matière noire ont une plus grande inertie de mouvement.

Mi-2016 des expériences au LHC doivent être menées afin de confirmer ou d'infirmer une possible nouvelle particule bosonique « candidate » à cette matière noire, à une énergie de 750 GeV. En cas de confirmation, ce serait une grande découverte avec des conséquences importantes sur le modèle standard lui-même.



**Seule 4% de l'Énergie de l'Univers est « connue », c'est-à-dire observée et comprise : ce sont pour résumer les atomes qui composent les étoiles. 22% de l'Énergie provient d'une matière encore inconnue : la matière noire, dont la présence est attestée par son effet gravitationnel sur la trajectoire des étoiles. 74% de l'Énergie est celle du vide, découverte à partir de la mesure de l'accroissement de l'expansion de l'Univers (Prix Nobel de Physique 2011)**

Le deuxième mystère concerne l'Énergie noire. Il s'agit probablement de la plus grande découverte astronomique de la fin du XXe siècle, les premiers résultats datant de 1998. Revenons à cette épopée observationnelle. A ce moment-là plusieurs équipes, avec plusieurs méthodes complémentaires, cherchaient des indices convaincants sur la nullité ou la non nullité d'un terme de densité universelle d'énergie pouvant s'apparenter à une « énergie du vide » et noté  $\Lambda$ , et parfois aussi appelée constante cosmologique. L'existence de ce terme était en cohérence avec les principes de la physique quantique, où le vide est un état énergétique dans lequel se produisent des fluctuations quantiques.

La non nullité de  $\Lambda$  avec une valeur positive signifiait qu'entre l'Univers d'il y a quelques milliards d'années (c'est-à-dire les galaxies lointaines que nous observons) et l'environnement constitué des galaxies proches de nous (dont la lumière qui nous parvient est récente) il y a eu une accélération du taux d'expansion de l'Univers (que l'on nomme constante de Hubble et qui mesure entre deux galaxies quelconques leur vitesse d'éloignement divisé par leur distance relative). C'est cette accélération qui a été mesurée par des méthodes capables d'observer finement plusieurs « couches » d'Univers. L'étude de la courbure de la lumière provenant de ces différentes couches (ou méthode des lentilles gravitationnelles) fut l'une d'elles. Néanmoins la méthode la plus efficace fut celle des Supernovae de type Ia : observer des centaines d'explosions de Supernovae bien spécifiques (SNIa, ou contenant du Silicium, et ayant une courbe d'explosion bien calibrée : on parle alors de « chandelles standard ») dans des galaxies situées sur des plans de plus en plus lointains.

Depuis, avec les expériences Planck et CMAP, les mesures de  $\Lambda = 0.75$  ont été confirmées. La non nullité de l'« Énergie du vide » est désormais consensuelle parmi les cosmologistes.

Finalement la « révolution conceptuelle » vient non pas de la non nullité de  $\Lambda$ , mais plutôt du fait que  $\Lambda$  ait une valeur si petite ! En effet, si cette énergie du vide se comporte effectivement comme une constante universelle, alors elle devrait avoir gardé sa valeur originelle, peu de temps après le Big-Bang. Or cette valeur initiale est prévisible par la physique quantique : on devrait avoir  $\Lambda$  environ  $10^{120}$  fois plus grand que sa valeur mesurée, en sommant les énergies quantiques du vide de l'ensemble des particules élémentaires qui composent l'Univers ! La transition (on parle même de

transition de phase) entre un Univers ayant une valeur quasi-infinie d'énergie du vide et un Univers stable (le notre) où  $\Lambda$  atteint une valeur bien plus faible est décrite par le mécanisme d'inflation : elle se produit en une fraction de seconde, juste après le Big-Bang, et produit notre Univers, immense homogène et plat (on l'a vu).

Le grand mystère sur  $\Lambda$ , c'est « pourquoi être passé d'une valeur de  $10^{120}$  à 0.75 » et pas à 0 ou à  $10^{10}$  ? En effet ces dernières valeurs auraient généré des Univers profondément différents du notre, dans lesquels probablement la vie n'aurait pas pu exister ? Est-ce le fruit du hasard ou d'un mécanisme déterministe (dit de « Fine tuning » ou en français de « réglage fin ») ? Un mécanisme universel privilégiant pourquoi pas la vie ? Et quel mécanisme ?

## **Equation de l'Univers. « Cosmic doom » & « Fine tuning »**

Depuis les observations de galaxies et les mesures effectuées il y a quasiment un siècle par les astronomes Edwin Hubble et Henrietta Swan Leavitt (à l'origine d'une méthode de calcul de la distance entre les galaxies par l'observation de céphéides), nous savons que deux galaxies quelconques de notre Univers s'éloignent l'une de l'autre à une vitesse proportionnelle à leur éloignement respectif. C'est la célèbre loi empirique de Hubble, où H désigne la constante spatiale de proportionnalité entre vitesse et distance. Autrement dit, notre Univers est en expansion, comme si le tissu tridimensionnel de vide entre les galaxies se distendait uniformément. Du vide se crée, entre les galaxies qui individuellement ne changent pas de taille.

Le génie d'Einstein, dans les années 1920, fut de remarquer que si l'Univers est suffisamment homogène à grande échelle (c'est-à-dire si la densité de matière  $\rho$  ou nombre de galaxies par unité de volume est uniforme dans l'Univers vu à grande échelle) alors la relativité générale devrait être capable de décrire par une équation la dynamique de l'Univers et d'expliquer la loi de Hubble.

C'est réellement là l'acte fondateur de la Cosmologie : considérer l'Univers dans son ensemble comme une entité physique modélisable dynamiquement, avec un temps cosmique et donc une Histoire.

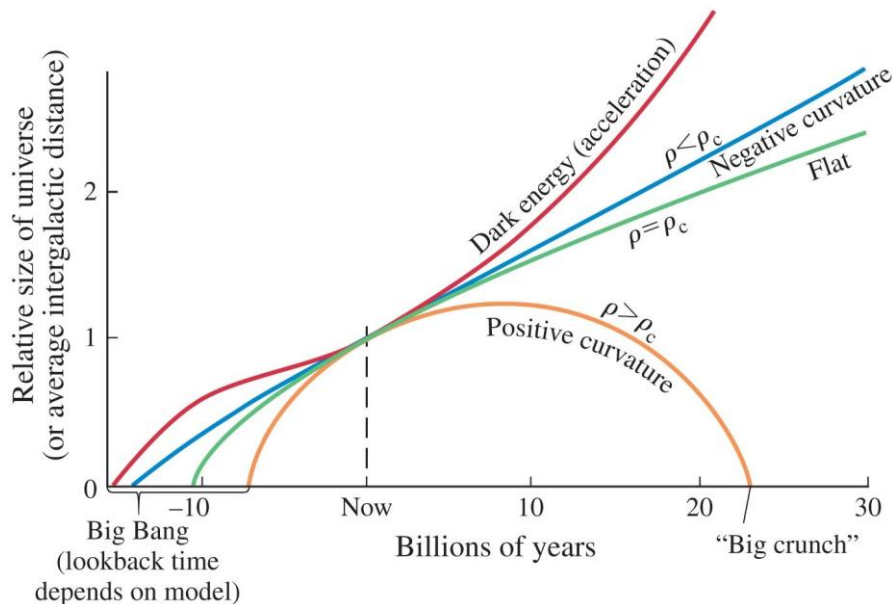
L'équation en question dite équation de l'Univers, ou équation d'Einstein-Friedmann est très simple, elle précise que le carré de la constante spatiale de Hubble  $H^2(t)$  (qui varie au cours du temps) est proportionnelle à la densité d'énergie, uniforme dans l'Univers :  $\rho(t)$ .

Or cette densité d'énergie a deux composantes : une composante constante temporellement qui est la densité d'énergie du vide (ou densité d'« Energie noire ») et une composante décroissante temporellement lorsque notre Univers est en expansion, c'est la densité d'énergie de la matière (matière visible + « matière noire »). L'équation de l'Univers est une simple équation différentielle non linéaire du premier ordre dont on connaît depuis peu (Prix Nobel de Physique 2011) une condition initiale: l'énergie de l'Univers actuel est composée à 75% de vide et 25% de matière.



La résolution de cette équation<sup>1</sup> est facilement accessible numériquement à des étudiants scientifiques post-bac. Elle donne au cours du temps l'évolution de la distance entre deux points actuels de notre Univers. Prenons par exemple une galaxie proche de nous distante d'environ 10 millions d'années lumières, nous appellerons D la distance au cours du temps entre le centre actuel de notre voie lactée et celui de cette galaxie: Il y a 10 milliards d'années, cette distance était 3 fois moindre, il y a 13.2 milliards d'années (à la naissance de notre galaxie) cette distance était 10 fois moindre. Il y a environ 13.8 milliard d'années (âge de notre Univers), cette distance était infiniment moindre : c'est la singularité du Big-Bang (temps théorique que l'on note souvent  $t=0$ ), caractérisée par un Univers extrêmement dense et chaud.

En réalité, il est important de comprendre que l'équation de Friedman ne peut pas décrire les événements physiques entre  $t=0$  (Big-Bang) et  $t=10^{-44}$  seconde (temps de Planck) : car les niveaux d'énergie en jeu requièrent pour être modélisés, une physique unifiant la théorie de la gravitation et celle de la physique quantique. L'enjeu de cette unification sera abordé plus loin dans cette conférence.



**Différents modèles dynamiques d'expansion ou de contraction de notre Univers. En rouge, le modèle découlant du Prix Nobel 2011 : Energie de la matière 25%, Energie du vide 75%. Dans ce modèle, notre Univers est destiné à se « diluer » dans le vide d'ici quelques centaines de milliards d'années ! (on parle de Cosmic Doom).**

Si maintenant nous analysons l'évolution de D dans l'avenir : dans 100 milliards d'années D sera 600 fois plus grande que maintenant ! Et dans quelques centaines de milliards d'années (400 à 500) les galaxies actuellement proches de nous (et toutes celles situées à au moins 10 millions d'années-lumière de notre voie lactée) seront sorties à la fois de notre horizon visible et de l'horizon

<sup>1</sup> Equation de l'Univers :  $H(t) = \frac{\dot{r}}{r} = H_0 \sqrt{\frac{\Omega}{r^3} + \Lambda}$  avec  $\Omega = 0.25$ ,  $\Lambda = 0.75$ ,  $H_0 =$  constante de Hubble actuelle =  $(13.6 \cdot 10^9 \text{ ans})^{-1}$ ,  $r(t)$  = facteur d'échelle de l'Univers définissant le facteur multiplicatif d'accroissement des distances entre galaxies ( $r=1$  aujourd'hui,  $r=r(t)$  au temps  $t$ ,  $\dot{r}(t)$  dérivée temporelle de  $r$ ).

d'interaction (la vitesse de fuite par rapport à nous atteignant la vitesse de la lumière) : Nous serons seuls dans un Univers de vide !

En réalité, entre-temps, notre voie lactée sera rentrée en collision avec les galaxies très proches telles qu'Andromède (située actuellement à 2.2 millions d'années-lumière de nous) pour former une nouvelle galaxie elliptique géante revivifiée thermiquement par cette collision ...mais qui à son tour sera probablement morte de vieillesse thermodynamique par manque de nouvelle collision avec une autre galaxie : et pour cause, il n'y en aura plus à portée d'interaction !

Bref le scénario glaçant qui se profile pour notre Univers, c'est l'anéantissement de toute matière et donc de toute vie dans le vide ! C'est ce que les cosmologistes appellent le « Cosmic doom ».

Einstein s'amusait en s'interrogeant : *le plus incompréhensible, c'est que le monde nous soit compréhensible*. On a envie d'ajouter : ... *A quoi bon Albert !?*

L'autre paradoxe auquel aboutit ce scénario, c'est le problème du « Fine Tuning » de la constante universelle  $\Lambda$ , mesurée à 0.75. Actuellement aucun mécanisme physique ne permet d'expliquer pourquoi la valeur de l'« Energie noire » se serait « ajustée » dans les premiers temps de notre Univers (au moment de l'inflation) d'une valeur de  $10^{120}$  à quasiment 1, plutôt qu'à n'importe quelle autre valeur, y compris négative.

Il se trouve que parmi l'infinité des valeurs possibles pour  $\Lambda$  seule une infime famille de valeurs (proches de 1) permet à la matière de se condenser en étoiles, en planètes, en vie. Pour la quasi-totalité des valeurs de  $\Lambda$  entre 0 et  $10^{120}$ , l'accélération exponentielle de l'expansion de l'Univers intervient trop vite : le vide l'emporte avant même que la matière n'ait eu le temps de se condenser en étoiles. Pour les valeurs négatives de  $\Lambda$ , c'est le contraire : l'Univers se recontracte en un nouveau big-bang avant que la matière n'ait pu se condenser, et ainsi de suite.

Notre compréhension actuelle de l'Univers semble finalement aboutir à la situation ubuesque suivante :

*Paradoxe 1 : Notre Univers semble infiniment peu probable !*

*Paradoxe 2 : Il est tel qu'il est parce que sinon nous ne serions pas là ! (la vie-même n'existerait pas)*

*Paradoxe 3 : L'Univers engendre des mécanismes complexes de vie et de conscience<sup>2</sup> qui semblent vains à se perpétuer indéfiniment. A quoi bon<sup>3</sup> Charles ?*

Une réponse possible à ces paradoxes est l'intervention d'un déterminisme divin : c'est une volonté externe ou intrinsèque à l'Univers qui l'a créé tel que la vie et la conscience puissent s'y développer. Mais, encore une fois, à quoi bon si notre Univers doit se diluer dans du vide et faire à terme disparaître les fruits de cette complexité de vie et de conscience ?

---

<sup>2</sup> « The laws of the universe have engineered their own comprehension ». Davies, 1999.

<sup>3</sup> « it is an intolerable thought that man and all other sentient beings are doomed to complete annihilation after such long-continued slow progress », Charles Darwin 1887

Deux autres alternatives « rationnelles » existent<sup>4</sup>. Elles ne nécessitent pas de pré-requis d'ordre religieux et sont à l'interface entre cosmologie et philosophie. Elles sont fascinantes car elles font intervenir l'idée d'un Multivers : c'est-à-dire l'idée générale que notre Univers est un Univers parmi une quasi-infinité d'Univers qui se reproduisent suivant des mécanismes physiques qui diffèrent suivant les théories, mais plus ou moins sur le principe des poupées gigognes !

Il est cependant nécessaire pour les aborder d'aller un pas plus loin dans le sens de l'unification des théories quantiques et gravitationnelles. On parle alors de gravité quantique, une discipline récente qui nécessitera, dans les années à venir, de se confronter aux observations.

## **Cordes. Inflation. Multivers à bulles de Linde. Principe anthropique**

L'alternative N°1, nous l'appellerons le « Multivers à bulles d'inflation ». Elle a plusieurs variantes et s'appuie historiquement à la fois sur les mécanismes quantiques de l'inflation post big-bang et sur une théorie d'unification de la gravité quantique dite théorie des cordes. Cette dernière a elle-même plusieurs variantes : supersymétries, théorie M, AdS/CFT ...

La théorie de la supersymétrie est plus ou moins la version la plus aboutie mathématiquement des idées ancestrales léguées depuis Platon, et que la Relativité Restreinte d'Einstein puis la théorie quantique des Champs ont magnifiées : idées selon lesquelles le monde réel et ce qui le compose (les particules en premier lieu) est un état, fonction de l'espace-temps, invariant par les lois de symétries fondamentales de cet espace-temps. Platon avait montré que seuls 5 polyèdres de l'espace étaient « supersymétriques » (composés de faces identiques) et avait naïvement mais génialement intuité qu'il devait y avoir 5 composantes fondamentales à la matière.

La théorie quantique des champs a en quelque sorte généralisé cette idée dans un formalisme mathématique qui est celui de la théorie des groupes, et a abouti à l'extraordinaire description (et prédiction) du réel qui est notre bouquet de particules élémentaires.

La théorie supersymétrique des cordes est allée encore plus loin dans le seul but d'unifier théorie quantique des champs et gravité : elle a fait en sorte que le graviton (particule associée à la force de gravité) devienne une particule élémentaire supplémentaire découlant de la symétrie. Pour réaliser cela elle a dû cependant « jouer à l'apprenti sorcier » en jouant avec les dimensions du réel : pour que ça marche, les particules doivent être de la dimension d'une corde vibrante de dimension 1 (mais infiniment petite : taille de l'ordre de  $10^{-33}$  cm) fermée ou non, et l'espace-temps doit être de dimension 10 ! Autrement dit notre espace-temps usuel de dimension 4 serait dû à notre incapacité à observer le repliement des 6 autres dimensions.

Il est surprenant de constater que plus de 95% des cosmologistes et physiciens théoriques sont dans cette optique-là : être « cordiste » étant devenu depuis une trentaine d'années dans la plupart des grandes Universités une condition d'embauche !

---

<sup>4</sup> Napoleon: M. Laplace, on raconte que vous avez écrit ce grand livre sur le système de l'Univers, et que vous n'avez même pas mentionné son Créateur  
Laplace: Je n'avais pas besoin de cette hypothèse !

Jusqu'à la fin des années 90 cependant la théorie des cordes était confrontée à une crise : aucune solution ne parvenait à décrire un Univers ayant une constante cosmologique (ou terme d'Énergie du vide) non nulle, en contradiction flagrante avec les observations !

Une possible révolution dans le monde des « cordistes » est survenue entre 2000 et 2004 (Article de Ashok et Douglas en 2004) : des mécanismes de ruptures de la supersymétrie ont été modélisés permettant de comprendre un Univers tel que le nôtre avec une valeur de  $\Lambda$  non nulle. Mais de ces travaux ce n'est pas un Univers qui s'est dessiné (ce que les cordistes espérait) mais  $10^{500}$  Univers possibles différents ayant des constantes universelles différentes, des dimensions différentes, et des valeurs de  $\Lambda$  très différentes dans des gammes de 0 à  $10^{120}$  ! On parle à ce sujet de « paysage de cordes ». La quasi-totalité de ces Univers étant incapables de créer de la matière condensée, des étoiles et de la vie. Autrement dit, notre Univers devenait un parmi une infinité de possibles.

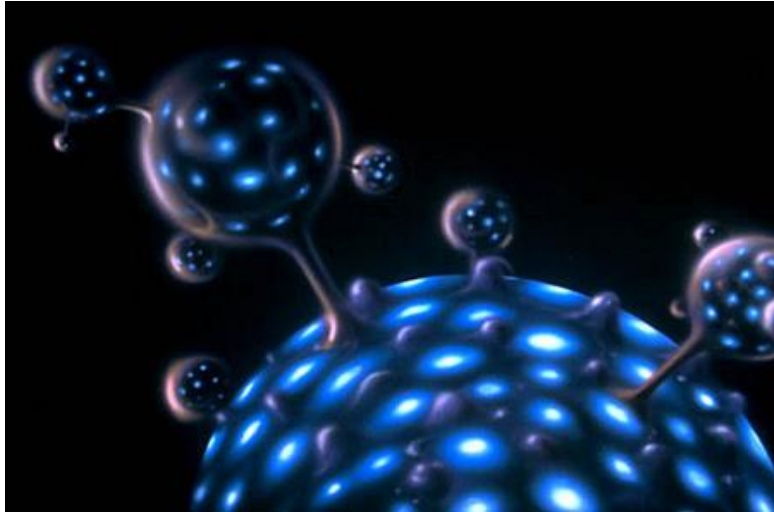
Une quasi-infinité d'univers possibles (dont le nôtre, ouf !) ne signifie pas une quasi-infinité d'univers existants, donc ne signifie pas l'existence d'un Multivers. Il manque à cela une étape : le mécanisme dynamique de création d'Univers multiples. En réalité, cette étape avait déjà été franchie au début des années 90, en particulier par Andrei Linde qui a explicité un mécanisme de ce type au sein de l'inflation, c'est-à-dire dans la toute première fraction de seconde d'existence d'un univers. A ce moment-là l'univers grandit violemment comme la surface d'une bulle qui gonfle, simultanément à une baisse toute aussi violente de l'Énergie du vide, jusqu'à stabilisation de sa valeur dans l'un des  $10^{500}$  univers possibles. Le vide quantique initial (avant inflation) est composé de fluctuations quantiques qui vibrent suivant toutes sortes de longueurs d'ondes : ces fluctuations sont alors violemment étirées (leur longueur d'onde grandit violemment jusqu'à couvrir la taille de l'Univers) et gelées dans des positions aléatoires les unes par rapport aux autres. Leur superposition aléatoire à la fin de l'inflation produit les inhomogénéités primordiales de l'Univers. Andrei Linde montre que statistiquement, si l'énergie du vide du départ est suffisamment grande, alors en certains points rarissimes mais existants de l'univers créé, cette superposition de fluctuations crée une zone ponctuelle à très forte énergie pouvant à son tour générer une inflation : une nouvelle bulle, et ainsi de suite ... d'où le nom de Multivers à bulles d'inflation de Linde.

Examinons nos trois paradoxes à l'aune de ce modèle de Multivers.

*Paradoxe 1 : Notre Univers semble infiniment peu probable ! Ce n'est plus vrai. Notre Univers est tout à fait probable, comme un phénomène rarissime à une chance sur  $10^{120}$  dans  $10^{500}$  « tirages » d'Univers différents !*

*Paradoxe 2 : L'Univers est tel qu'il est parce que sinon nous ne serions pas là ! (la vie-même n'existerait pas). Oui, nous vivons dans cette famille d'Univers rarissimes capables de créer la vie. Nous avons cette chance ! Mais cette chance n'est plus improbable.*

*Paradoxe 3 : L'Univers engendre des mécanismes complexes de vie et de conscience qui semblent vains à se perpétuer indéfiniment. A quoi bon ? Pas de réponse à ce troisième paradoxe. Si ce n'est une réponse très partielle et « moyennement réconfortante » : il n'est pas si grave que notre Univers ait une fin, puisque d'autres Univers existent porteurs de vie, et il en existera probablement toujours au gré des infinités de bulles d'Univers qui se créent. Cependant cette réponse est insatisfaisante car cette théorie de Multivers ne prévoit pas d'interaction possible entre univers, pas de transfert d'information entre univers et donc pas d'Évolution au sens global.*



*Image d'artiste du Multivers à bulles de Linde*

## **Boucles. Grand rebond. Trous noirs. CNS de Lee Smolin**

L'alternative N°2, nous l'appellerons le « Bio-Multivers ».

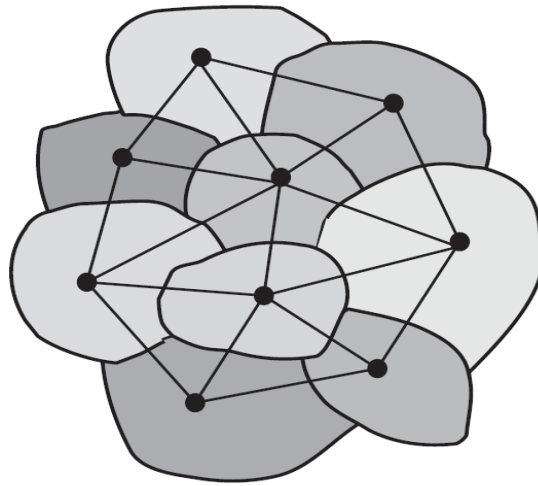
Pour la comprendre il nous faut rentrer dans la logique d'une autre tentative pour rendre cohérentes les lois de la Gravité et de la Physique Quantique. Il s'agit de la Gravité Quantique à Boucles (LQG, pour Loop Quantum Gravity en anglais). Elle est en partie concurrente à la théorie des cordes (ou peut-être complémentaire, même si aucune mise en cohérence des deux n'a pour l'instant abouti).

La théorie des boucles explore les propriétés quantiques de l'espace et du temps. Son étude s'est fortement intensifiée durant les dernières années. Cette théorie est utilisée pour étudier la physique du début de l'expansion de l'Univers, le comportement thermique des trous noirs et la structure discrète de l'espace physique à très petite échelle. La communauté scientifique française et européenne a une place de tout premier plan dans le développement de cette théorie, avec en particulier le centre de Physique Théorique de Marseille et les travaux de Carlo Rovelli. Au Canada Lee Smolin (Perimeter Institute for Theoretical Physics) est aussi l'un des précurseurs de cette théorie.

La principale différence entre cordes et boucles concerne le statut de l'espace-temps: les « cordistes » considèrent un espace-temps préexistant et font émerger le graviton et la gravité des propriétés quantiques issues de la symétrie d'un espace chapeau à 10 dimensions, sans faire émerger les propriétés quantiques de l'espace-temps. Il y a à la fois une grande efficacité dans la théorie des cordes (la gravitation découle de la mécanique quantique) mais aussi une sorte de « vice de forme » initial puisque la relativité générale considère comme indissociables gravité et espace-temps : pourquoi quantifier l'un sans quantifier l'autre ?

Au contraire, les « bouclistes » n'ont pas besoin de la préexistence de l'espace. Ils adoptent la méthode mathématique la plus « naturelle » pour le quantifier et constatent avec surprise ... que ça marche !

Cette quantification consiste à discrétiser l'espace en cellules reliées par des faces ou encore en nœuds (le centre des cellules, cf figure (1)) reliés entre eux par les liens vibrants qu'on appelle spin (vibration quantique primordiale). Il découle de cette modélisation mathématique que les quanta d'espace sont purement géométriques et de taille finie calculable ! Autrement dit le problème des singularités liées aux échelles plus petites que celle de Planck disparaît, l'espace admettant une granulosité limite non nulle. A cette échelle l'espace doit être vu comme une superposition d'états quantiques (un état quantique étant un réseau de cellules d'une géométrie bien spécifique) avec chacun une probabilité d'existence. La probabilité de transition entre état est également définie par la LQT et aboutit bien à une généralisation dans le monde quantique des propriétés de la relativité générale.



**(1) Représentation d'un état du champ gravitationnel dans la théorie des boucles : un réseau de spin et les « graines », ou « quanta » d'espace correspondantes, avec en leur centre les nœuds du réseau (Sce. Carlo Rovelli)**

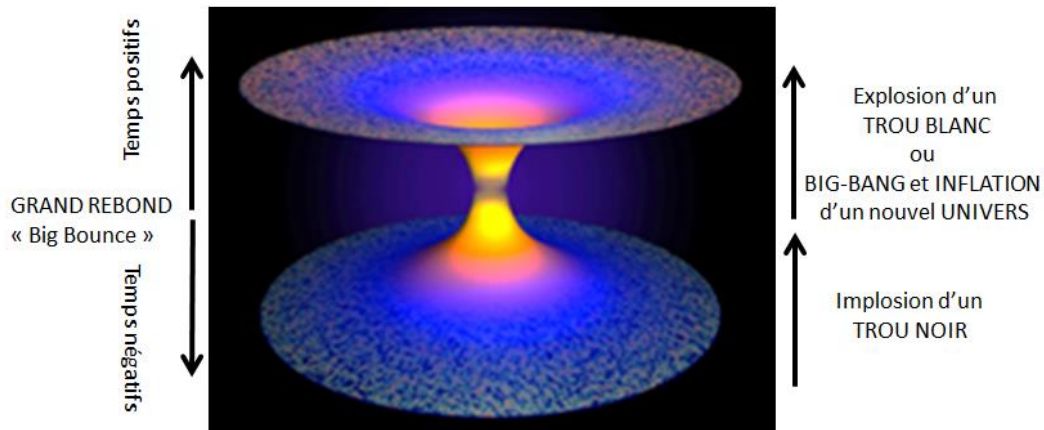
Les « bouclistes » ne peuvent pas revendiquer d'aussi grandes avancées théoriques que les « cordistes », étant donnés les faibles moyens de recherche dédiés à la LQT (100 fois moindre actuellement que ceux dédiés aux cordes, au niveau mondial). Cependant les boucles ont des arguments indéniables pour être potentiellement une voie très prometteuse :

Premier argument : les « bouclistes » quantifient l'espace-temps

Deuxième argument : les « bouclistes » ne requièrent pas d'espace chapeau à 10 dimensions. Les 4 dimensions naturelles suffisent

Troisième argument : les « bouclistes » résolvent le problème de la singularité liée à l'échelle de Planck, c'est-à-dire aux très petites dimensions et aux très grandes densités d'énergie. Il devient donc possible de modéliser (de façon encore préliminaire) deux phénomènes sur lesquels la physique se cassait les dents : le Big-Bang et les phénomènes physiques liés aux très fortes densités de matière à l'intérieur de l'horizon des trous noirs. A ces échelles, l'équation de dynamique (décrivant le facteur d'échelle de l'Univers ou celui de la matière interne au trou noir) est légèrement modifiée sous la forme  $H^2$  proportionnel non pas à  $\rho$  mais à  $\rho(1 - \frac{r}{r_P})$ , où  $r_P$  désigne la taille de Planck ( $10^{-43}$  cm). On retrouve bien le comportement dynamique de l'Univers pour des échelles bien au-delà de l'échelle

de Planck. Par contre, lorsque l'on se rapproche de l'échelle de Planck il se produit un phénomène surprenant : un grand rebond ! (Big-Bounce en anglais). Ce rebond pouvant décrire ce qui se passe au « temps 0 » du Big-Bang, mais aussi aux temps inférieurs à 0 ! Par symétrie de ce qui se passe aux temps positifs ! (cf figure (2)).



**(2) Image d'artiste du rebond cosmique (Big-Bounce) pouvant intervenir dans une zone de très haute densité de matière : début de l'Univers ou intérieur d'un Trou-Noir, se transformant après rebond en « Trou-blanc » voire en nouvel Univers, qui à son tour pourra former des trous noirs...et ainsi de suite. Cf. la théorie de la Sélection Naturelle Cosmique de Lee Smolin.**

Analysons maintenant les conséquences possibles de cette théorie à l'aune des paradoxes posés par le « Fine Tuning » de l'Energie du vide.

Essayons de comprendre l'avenir de notre Univers pour en comprendre le passé. Il serait erroné d'imaginer que dans l'avenir notre Univers va stopper son expansion et se recontracter pour revivre un Big-Bang c'est-à-dire un Big-Bounce et ainsi de suite : en effet cette expansion a au contraire toutes les chances de s'accroître exponentiellement, comme le montre l'équation de notre Univers.

Cependant une nouvelle idée a germé depuis moins de deux décennies : c'est la possibilité que des trous noirs, et plus spécifiquement la zone centrale hyperdense, pour certaines morphologies de trous noirs, puisse s'effondrer en leur centre et connaître un Big-Bounce ... pour créer un nouvel Univers ! (on appelle aussi cette deuxième vie du trou noir un TROU BLANC ! Troublant non ?).

Et pourquoi ne pas imaginer que l'avenir des étoiles et des planètes happées par un trou noir est finalement de transformer à terme leur matière en l'énergie des premiers temps d'un nouvel Univers. Allons plus loin : et si notre Univers était un trou blanc, né d'un trou noir !?

Nous discuterons à la toute fin de cette conférence de l'existence ou non de moyens observationnels de confrontation de cette théorie et des « conjectures fantaisistes » que nous faisons. Il y en aura.

Lee Smolin a essayé de pousser jusqu'au bout cette idée, dans sa théorie de la Sélection Naturelle Cosmique (CNS pour Cosmic Natural Selection) parue à la fin des années 90. Son argumentaire est plus ou moins le suivant :

L'approche purement probabiliste du Multivers à bulles que propose la théorie des cordes n'est pas satisfaisante d'un point de vue scientifique : le chemin vers la rareté de notre Univers en termes d'ajustement fin de la constante cosmologique et d'existence de la complexité de la vie n'est

expliqué par aucun mécanisme rationnel. Cette problématique est simplement balayée par un sophisme anthropique : *Notre univers est rare mais non improbable, il est ce qu'il est car sinon nous ne serions pas là pour l'observer ainsi !* D'autre part un tel sophisme est invérifiable par les observations : les multiples Univers n'interagissant pas entre eux nous n'avons aucune trace d'eux.

Ce que propose Smolin c'est de bâtir un scénario d'Evolution (au sens Darwinien) du Multivers (ou « Bio-Multivers ») amenant naturellement de façon déterministe (et non pas statistiquement) la création dominante d'Univers tels que le nôtre avec une constante cosmologique capable de créer complexité et vie.

Dans la théorie de l'Evolution et de la sélection naturelle de Darwin, une espèce devient dominante si elle possède un certain nombre de qualités : Capacité à se reproduire, Progéniture plus abondante que les autres espèces, Transmission de caractères héréditaires (avec une variabilité adaptative).

Transposons cela à la théorie de Sélection naturelle cosmique :

- Ce qu'on appellera l'espèce dominante (on l'espère), c'est la famille des univers porteurs de vie, c'est-à-dire ayant une Energie noire viable (valeur faible positive, proche de 0, comme la nôtre).
- La capacité à se reproduire en de nouveaux univers c'est la présence de Trous noirs, dans l'hypothèse Big-Bounce vue précédemment : effectivement des Univers tels que le nôtre possèdent des trous noirs.
- L'abondance de progéniture et donc de géniteurs dans notre type d'Univers, relativement à des Univers non viables : pour cela il nous faudrait avoir des indices comme quoi les Univers à faible  $\Lambda$  génèrent plus de trous noirs que les Univers autres. A ce sujet il est clair que dans l'immense gamme des valeurs de  $\Lambda$  de 0 à  $10^{120}$ , c'est la gamme des faibles valeurs de  $\Lambda$  qui sont capables de produire des trous-noirs. Néanmoins il n'y a pas encore consensus sur le fait que notre valeur précise de  $\Lambda$  serait un optimum. Il y a donc *a minima* une réduction drastique de la gamme des Univers possibles dans le cadre de la CNS.
- Transmission de caractères héréditaires (en ce qui concerne les Univers, les caractères héréditaires ne sont pas l'ADN mais la valeur des constantes universelles, en particulier  $\Lambda$ ). On ne sait rien de ce que peuvent être ces mécanismes : en quoi un Trou noir connaissant un Big-Bounce ferait-il varier  $\Lambda$  dans l'Univers qu'il génère ? Cette hérédité doit être suffisamment stable pour que la filiation d'Univers viables soit efficace, mais elle ne doit pas être trop stricte, sinon comment expliquer une convergence progressive vers les bonnes valeurs de  $\Lambda$ , au cours de l'Evolution du Multivers ?

Relisons nos trois paradoxes avec le prisme de la CNS :

*Paradoxes 1 et 2 : Notre Univers semble infiniment peu probable ! L'Univers est tel qu'il est parce que sinon nous ne serions pas là ! (la vie-même n'existerait pas).*

Au contraire notre type d'Univers devient incontournable, c'est le fruit de l'Evolution !

*Paradoxe 3 : L'Univers engendre des mécanismes complexes de vie et de conscience qui semblent vains à se perpétuer indéfiniment. A quoi bon ?*



Pourquoi être si nihiliste ! Au contraire notre Multivers serait condamné à survivre éternellement en créant des univers dont les pouponnières sont les trous noirs. Cette réponse n'apporte cependant pas de réel « réconfort » en ce qui concerne la perpétuation de la vie et de la conscience, pour deux raisons : Premièrement, il n'est pas prouvé que les Univers les plus propices aux Trous noirs soient aussi les plus propices à la vie. On sait cependant que les gammes de valeurs de constantes cosmologiques sont proches dans les deux cas. Deuxièmement, et sur un plan plus philosophique, la CNS revient à énoncer peu ou prou que le sens-même de l'Evolution est la perpétuation du Multivers par les Trous noirs : la vie et la conscience ne seraient que des effets collatéraux.

Serait-il possible de trouver une version de la théorie CNS qui positionne vie et conscience comme un sens-premier voire un vecteur de l'Evolution du Multivers ? Cela permettrait peut-être de trouver une voie d'équilibre entre science et philosophie. Certains théoriciens ont effectivement franchi ce pas et proposé des conjectures de ce type, dont nous pourrions discuter un peu plus loin l'« observabilité ».

Nous pouvons citer deux de ces conjectures, peut-être les plus pittoresques :

Conjecture Méduso-Anthropique de Louis Crane (1994) : D'après ce modèle, les civilisations les plus avancées devront nécessairement être confrontées à la maîtrise des très hautes densités de matière (pour des soucis de capacité de traitement de l'information, il est probable que les civilisations futures utiliseront les propriétés gravitationnelles plutôt qu'électromagnétiques de la matière, en se rapprochant du grain fondamental de l'espace tel que décrit par la LQT) et des très hautes énergies et donc des trous noirs (pour la maîtrise des déchets voire des capacités de voyage interstellaire). Louis Crane pense que ces civilisations très avancées seront capables de générer des trous noirs, et donc des Univers par effet Big-Bounce induit volontairement ou pas.

Conjecture des Starivores de Clément Vidal (2012) : Ce modèle s'inscrit dans une définition élargie de la de la vie et du métabolisme : une capacité à transformer de la matière en énergie et à générer et gérer des déchets, à se reproduire, à générer de la diversité. Dans ce sens, C. Vidal voit dans de très nombreux systèmes d'étoiles doubles caractérisés par des systèmes d'accrétion de matière (l'une des deux étoiles finit par ingérer l'autre, dans une diversité frappante de scénarii) toutes les caractéristiques potentielles de vies voire de consciences avancées. Ces systèmes aboutissent également dans certains cas à des formations de trous noirs.

Ces deux conjectures ont deux points communs : d'abord mettre la vie et la conscience (au sens large) au cœur du processus évolutif, ensuite associer ces processus à la physique des Hautes Energies. C'est pourquoi elles sont classées dans le domaine de l'« Astrobiologie des Hautes Energies ».

Si l'une de ces deux conjectures est vraie, alors l'ajustement fin (« fine tuning ») des constantes universelles, et en particulier celui de  $\Lambda$ , ne cessera pas avec des Univers optimisés pour la création uniquement d'étoiles et de trous noirs. La Sélection continuera jusqu'à ce que des formes de consciences ou de civilisations avancées dominent les Univers, par leur capacité à ensemençer le Multivers.

## Science ou science-fictions. Observations clés

De théoriciens un peu utopistes, redevenons astronomes et posons-nous la question de l'observabilité, bref de la preuve par l'expérience. Sommes-nous dans le domaine de l'observable, c'est-à-dire de la science, ou sommes-nous définitivement dans celui de la science-fiction ?

Avons-nous les moyens par exemple de valider les théories de gravité quantiques : boucles ou cordes ?

Ci-dessous l'avis de Carlo Rovelli à ce sujet, avant même la découverte des ondes gravitationnelles:

« Les phénomènes gravito-quantiques se manifestent à très courte distance (la longueur de Planck,  $10^{-33}$  cm) ou très grande énergie ( $10^{19}$  GeV) ou très grande densité ( $10^{96}$  Kg/m<sup>3</sup>). Ces échelles sont des dizaines d'ordres de grandeur au-delà des capacités d'observations des accélérateurs de particules.

Cela ne veut pas dire que ces échelles soient complètement inaccessibles, parce que nous avons d'autres moyens d'explorer les hautes énergies que les accélérateurs. Par exemple l'élégante théorie unifiée SU(5) (le modèle de Georgi-Glashow) a été réfutée par les expériences sur la désintégration du proton, qui testent une échelle ( $10^{16}$  GeV) beaucoup plus élevée que celle des accélérateurs et assez proche de l'échelle de Planck. Des mesures récentes en astrophysique vont même plus loin. Par exemple, la mesure des différences de polarisation entre composantes de haute et basse énergie des sursauts gamma, obtenue par l'observatoire INTEGRAL de l'ESA (Agence Spatiale Européenne), limite une certaine possibilité de brisure de symétrie de Lorentz à l'échelle de  $10^{-46}$  cm, donc très en dessous de l'échelle de Planck. Ces mesures contraignent toute théorie de gravitation quantique. On s'attend de plus à ce que les observations du fond de rayonnement cosmologique ouvrent bientôt une importante fenêtre d'observation sur de possibles phénomènes quanta-gravitationnels en cosmologie primordiale. La gravité quantique n'est donc pas très éloignée, aujourd'hui, de la physique observationnelle.

Un dialogue s'instaure, de plus en plus vif, entre cosmologistes proches des observations et théoriciens de la gravité quantique, spécialement en France. »

La mesure des ondes gravitationnelles aura une part à jouer centrale dans la validation des théories de gravité quantique, mais il faudra être patient. Les outils terrestres tels que LIGO et VIRGO pourront observer des collisions de trous noirs ou de pulsars, mais c'est eLISA, le projet spatial prévu pour un lancement après 2030, qui aura théoriquement la capacité d'observer les ondes primordiales, créées au moment de l'inflation. Ces mesures devraient ouvrir une fenêtre sur la dynamique des premiers instants après le Big-Bang, avant tout ce qu'ont pu nous révéler jusqu'ici les observations lumineuses du fond diffus cosmologique (limitées à  $t = 300\ 000$  ans après le Big-Bang). De même l'intérieur des trous-noirs (en deçà de leur horizon) était insondable par les méthodes d'observation de la lumière, puisque celle-ci est prisonnière de la gravité. Par contre les ondes gravitationnelles générées par la gravité à l'intérieur de cet horizon pourraient devenir une source d'information nouvelle et précieuse.

On pourra alors peut-être trancher : Cordes, Boucles, ou autre ...

D'ici là, d'autres mesures sont très attendues.

Certaines sont déjà en cours actuellement grâce à un satellite du CNES nommé MICROSCOPE, qui devrait dans les 6 mois à venir confirmer ou infirmer le principe d'équivalence (principe « intuité » et validé historiquement par Galilée depuis le sommet de la tour de Pise : 2 corps de masses différentes et soumis au même champ de gravité, ont exactement la même trajectoire) avec une précision 100 fois meilleure que toutes les mesures faites jusqu'ici. Ce principe est un pilier de la relativité générale d'Einstein: certaines théories de gravité quantique anticipent de très légères violations de ce principe, qui pourraient être mesurées par MICROSCOPE.

D'autres mesures pourraient concerner l'observation de « flash » de lumière gamma (Gamma Ray burst) dont l'origine provient des chocs de titans entre les tous premiers trous noirs de notre Univers, voire même de l'explosion de trous noirs hypermassifs primordiaux. Certaines théories envisagent que la lumière gamma générée devrait avoir des variations de vitesse en fonction de la longueur d'onde lumineuse (ce qui revient à une brisure de la constance de la vitesse de la lumière, appelée en physique l'invariance de Lorentz). Si ce phénomène est réel, alors il devrait être observable : de nombreux télescopes dans le monde cherchent à observer ce Graal !

L'observation de l'explosion d'un trou noir (Big-Bounce) serait d'une portée théorique considérable, et aurait peut-être des traces sous formes d'ondes gravitationnelles. Il est même envisageable que dès à présent des trous noirs hyper massifs, comme celui qui est au centre de notre voie lactée (Sagittarius A) soient en phase de Big-Bounce (voire de création de Trou-Blanc ou de nouvel Univers !). Et pourtant ce Big-Bounce dure moins d'un milliardième de milliardième de milliardième de seconde ! Mais à cause de la contraction du temps en zone de très très forte gravité, il nous apparaîtrait à nous pouvant durer autant que l'âge de notre Univers : il peut avoir commencé sans être encore visible !

Lee Smolin a référencé les pistes d'observations d'indices possibles de la sélection naturelle cosmique par les trous noirs. En particulier, dès le début des années 90, il avait estimé que cette théorie impliquait l'impossibilité de découvrir d'étoile à neutron de plus de 2 masses solaires. Depuis ce temps, 1.9 masse solaire reste en effet le record observé.

Il existe même des pistes de recherche d'indices dans le domaine de l'astrobiologie des Hautes Energies : Recherche de Trou-noirs de faible masse, Analyse des quantités et des distributions d'étoiles binaires en accrétion dans des galaxies de plus en plus lointaines,...

Sans parler de pistes de recherche d'éventuels messages provenant de systèmes binaires contenant un pulsar : piste qui serait une forme de re-définition des tendances actuelles de recherche de traces de vie primitive dans les planètes extrasolaires en une recherche de traces de « conscience » au sens large dans l'Univers ...

## **Espace-temps et conscience. Penrose. IIT de Tononi. Tegmark**

La Physique a toujours soigneusement évité de traiter de la conscience comme d'un phénomène physique en soi, et a été confortée par l'efficacité de ses théories à décrire le réel. Et pourtant la conscience de l'expérimentateur fournit le matériau de base de la Physique : l'observable qui est

confrontée à la théorie. Mais cet aspect conscient de la mesure a toujours été considéré comme extérieur aux phénomènes physiques observés.

Depuis moins d'un siècle la Physique Quantique a envahi de ses réalisations technologiques notre environnement proche (80% du Produit Intérieur Brut mondial est issu de la physique quantique, en particulier via la technologie des semi-conducteurs). Et le fait est que ni la théorie ni l'industrialisation n'ont eu besoin de théoriser voire même de comprendre le phénomène de la conscience pour cela.

Et pourtant, la physique quantique présuppose dans ses fondements que la conscience de l'observateur (le physicien qui fait une mesure et a conscience de résultat de cette mesure) influe sur le réel ! En effet la réalité quantique est multiple : par exemple un électron peut occuper différents niveaux d'énergie autour d'un noyau atomique, et en réalité à chaque instant il est dans chacun de ses niveaux à la fois, avec une probabilité pour l'occupation de chaque niveau : sa fonction d'onde qui décrit son état complexe est une combinaison linéaire des fonctions d'ondes élémentaires qui décrivent les états élémentaires d'occupation d'un niveau d'énergie à la fois. Juste avant que la mesure soit faite par le physicien, le niveau d'énergie est multiple et la fonction d'onde est complexe.

La mesure du physicien ne peut pas être multiple : c'est un des quanta (niveau) d'énergie et un seul qui peut être mesuré. Au moment précis de la mesure, la fonction d'onde de l'électron passe donc d'une fonction complexe multi-états à une fonction d'onde élémentaire mono-état : la mesure a modifié le réel ! De nombreuses expériences ont démontré cette interaction.

Cependant, les mécanismes physiques à l'origine de l'interaction entre le réel et la mesure (c'est à dire la conscience du réel par l'expérimentateur) restent encore aujourd'hui un mystère.

Si jusqu'à présent ce mystère était sans intérêt pour décrire la réalité, il se trouve qu'aujourd'hui la majorité des « points chauds » débattus en physique théorique et en astrophysique impliquent l'interprétation des notions d'observation et d'observateur.

A l'échelle de l'Univers, par exemple, la notion d'observateur pose problème. De Sitter a en effet montré il y a une cinquantaine d'années que le Hamiltonien (l'opérateur quantique « Energie ») de l'Univers dans son ensemble est nul. Or la mécanique quantique nous enseigne que la dérivée temporelle de la fonction d'onde décrivant l'Univers dans son ensemble est égale au Hamiltonien multiplié par cette fonction d'onde : donc zéro. Autrement dit la Physique quantique nous enseigne que l'Univers dans son ensemble est immuable (n'a pas de variation dans le temps) ! Ce qui est manifestement faux puisque le monde qui nous entoure ne l'est pas !

L'interprétation de cette erreur provient du fait que nous, observateur de l'Univers, observons en réalité l'Univers qui est extérieur à nous : cet Univers partiel n'étant pas l'Univers dans sa totalité, son Hamiltonien n'est pas nul, et la fonction d'onde de l'Univers que nous observons peut alors varier dans le temps.

Autrement dit, d'après la Physique quantique appliquée à l'Univers dans son ensemble : c'est la conscience (du ou des observateurs que nous sommes, voire de tout « système » capable de conscience) qui « crée » le temps !

La physique des trous noirs couplée à la théorie de l'information est un autre exemple de questionnement autour de l'observabilité en physique. On sait que la gravité étant si forte près d'un trou noir, aucune lumière ne peut s'échapper en-deçà d'une sphère externe, appelée horizon du trou noir. D'autre part, d'après la théorie holographique (développée dans les années 90), la surface de cette sphère externe doit contenir toute l'information contenue dans le trou noir ! Est-ce à dire que l'intérieur du trou noir est une vue de l'esprit ? Ou qu'il n'est pas possible de l'observer ? Les ondes gravitationnelles qui ne sont pas prisonnières de la gravité, permettront-elle néanmoins d'observer cet intérieur ?

Les questions se posent donc désormais avec plus d'acuité que par le passé: peut-on modéliser la conscience ? Quels sont les systèmes doués de conscience ? Quelle interaction y a-t-il entre matière et conscience ? Y a-t-il au moins quelques scientifiques « un peu fous » pour tenter cette modélisation de la conscience, voire tenter d'« unifier » matière, espace-temps et ... conscience ?

Eh bien oui ! Et citons tout d'abord les travaux de Giulio Tononi (spécialiste de neurosciences et psychiatre à l'Université du Wisconsin) sur la théorie de l'Information intégrée (acronyme IIT). Ce sont en effet les progrès récents dans le domaine des neurosciences qui ont commencé à ouvrir le champ (scientifique) inexploré de la conscience. L'idée de Tononi, présentée dans son article de 2008 « *Consciousness as Integrated information: a provisional manifesto* » et développée par la suite, c'est une forme de géométrie « en miroir » des propriétés connues de la conscience et celles de la réalité : à la fois la réalité physique de ce qui est observé et celle du système physique dans lequel se développe une forme de conscience (par exemple un réseau de neurones dans un cerveau, voire une machine, de la matière en interaction, le cosmos ?...).

Un système physique serait conscient s'il est capable de mémoriser un grand nombre d'informations élémentaires à partir du réel (ces informations étant codées par des réseaux de « portes logiques : cause → effet ») et surtout s'il est capable de traiter ces informations sous forme d'une décomposition unique et unifiée (d'où l'unicité de l'« image consciente » de la réalité) en blocs de sous-informations intégrées et indépendantes. Par exemple la conscience « complexe » générée par l'observation d'un livre bleu dans une bibliothèque est décomposée de façon unifiée et unique en sous-blocs intégrés : bibliothèque, livre, couleur bleue.

Il y a coïncidence (en est-ce une ?) entre la façon dont la théorie quantique des boucles modélise la granulosité de l'espace-temps (sous-forme de réseaux de grains d'espace) et la méthode propre à l'IIT de modéliser un système conscient : un réseau de portes logiques. Dans les deux cas, ces espaces mathématiques sont décrits par des opérateurs « réductibles » en sous composantes uniques qui définissent pour l'un les propriétés de l'espace-temps, pour l'autre les propriétés de la conscience.

Cette théorie devra dans les années prochaines se confronter à la réalité du terrain, et en particulier dans le domaine médical des neurosciences, où des « corrélatés » de plus en plus précis sont obtenus entre images IRM des zones activées du cerveau et stimuli de toutes sortes.

Avant de parler des tentatives en cours pour rapprocher conscience et gravité, ou conscience et physique quantique, listons déjà des perspectives incroyables qu'offre l'IIT en soi: possibilité à terme de mesurer quantitativement le niveau de conscience d'un système (noté  $\Phi$  dans la théorie de l'IIT), possibilité de discriminer des états végétatifs conscients ou non, de comparer les niveaux de

conscience des animaux, de déterminer des systèmes physiques conscients et pourtant non vivants au sens biologique ! ...

Mais la perspective la plus stimulante c'est l'éventuelle possibilité de rapprocher théoriquement, voire d'unifier un jour matière (dont le secret de la gravité quantique est encore bien gardé) et conscience : serions-nous sur la voie d'un nouveau panthéisme, d'un Multivers drapé d'une matière consciente ?...

Je terminerai juste en donnant deux pistes de recherche actuelle très sérieuses, portées par de grands théoriciens de la Mathématique et de la Physique :

La piste de Sir Roger Penrose, pour commencer : ou comment expliquer le fait que la conscience (d'un observateur) puisse modifier (réduire) la fonction d'onde du réel. Penrose cherche ce phénomène dans des éventuelles propriétés quantiques et gravitationnelles des phénomènes ayant lieu au sein même de nos neurones.

La piste de Max Tegmark (MIT, article de 2015 « Consciousness as a state of matter ») qui reprend les travaux sur l'IIT de Tononi et essaie d'extrapoler une théorie quantique (mais non gravitationnelle) de la conscience de la même manière qu'en physique quantique on théorise l'existence et les propriétés de la lumière.

Ces travaux sont pour l'instant une première ébauche. Il faudra probablement quelques décennies de recul pour y voir plus clair.

Néanmoins il apparaît que la conscience deviendra probablement dans les prochaines années l'un des sujets d'études incontournables pour une humanité ivre de sens et d'horizons lointains.

## Conclusion et résumé

La première révolution cosmologique a eu lieu il y a un siècle avec Einstein et la relativité générale : L'Univers est devenu vivant, avec un temps cosmique, un « début » (le Big Bang) et une histoire : la création progressive de la complexité de la matière, puis de la vie, puis de la conscience capable de « comprendre » ce monde.

Nous sommes peut-être à l'orée d'une deuxième révolution cosmologique qui sera aussi philosophique. Tous les ingrédients sont là : D'abord une crise des anciennes connaissances qui font face à des murs. Ensuite des empreintes fraîches à déchiffrer pour l'édification d'une théorie nouvelle unifiant gravité et physique quantique. Enfin et surtout, l'idée d'une Evolution globale d'un Multivers vers « toujours plus de conscience ».

La crise des connaissances : il nous faut expliquer pourquoi il est si improbable que notre Univers soit favorable à la vie, pourquoi il a généré les moyens de sa propre compréhension, alors que son expansion accélérée semble le conduire à la perte définitive de cette complexité accumulée !

Les empreintes fraîches : les ondes gravitationnelles seront dans les décennies prochaines le livre qu'il nous faudra déchiffrer. Contrairement aux ondes lumineuses qui rendent les phénomènes de la gravité et de la gravité quantique opaques, ces ondes gravitationnelles devraient faire du XXIème siècle celui des « secrets de la gravitation ». C'est-à-dire ouvrir les portes de l'intérieur des trous-noirs et des mécanismes de l'avant Big-Bang, en fournissant des preuves de la bonne voie d'unification : Cordes, Boucles ou autre.

L'Evolution : Il semblerait envisageable qu'un TEMPS nouveau se superposât au temps cosmique de l'histoire de notre Univers depuis son big-bang et au temps biologique de l'évolution des espèces de Darwin. Ce TEMPS serait celui de l'Evolution au sens large d'un Bio-Multivers géré par des règles de sélections d'Univers : Conscience ou/et Trous noirs (potentiellement liés car la conscience la plus aboutie pourrait être liée à des phénomènes de haute densité d'énergie) seraient des « essaimers » d'Univers nouveaux, à partir de mécanismes de grand rebond tels que ceux découverts dans la théorie quantique des boucles. C'est probablement une étape d'Unification ultérieure à celle de la gravité quantique qui permettra de lever le voile : l'unification matière-conscience, sur laquelle déjà planchent quelques théoriciens fameux.

Laurent GAUTRET. Juin 2016

### **Quelques infos sur mon parcours :**

Je suis actuellement professeur de Math en Classes préparatoires (PCSI) à La Réunion, polytechnicien, agrégé de mathématiques et docteur en astrophysique.

Le sujet de mon doctorat portait sur l'Énergie noire : j'ai participé aux premières mesures de l'accélération de l'expansion de l'Univers, entre 95 et 99 dans l'équipe de cosmologie observationnelle de Bernard Fort (Observatoire de Paris et Chili), par la méthode des fantômes gravitationnels.

J'ai également travaillé comme ingénieur à la NASA au Jet propulsion Laboratory de Pasadena (USA) sur la mission CASSINI d'exploration de Saturne, puis à l'Aérospatiale (EADS/Astrium, Toulouse) pendant 6 ans sur diverses missions en lien avec astrophysique (mission GAIA de cartographie de la voie lactée), exploration spatiale (mission VENUS EXPRESS) et militaire (conception d'un bouclier spatial anti-missile européen).

Je participe régulièrement à des stages de formation de Lycéens et Collégiens de La Réunion aux concepts à l'interface entre Mathématiques Astronomie et Cosmologie.