

**BULLETIN N° 193**  
**ACADÉMIE EUROPEENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**Lundi 2 mars 2015 à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**A)Présentation** par notre collègue *Gilles Cohen-Tannoudji* de son travail en cours:  
*"Constantes universelles et limites du possible en physique"*

**B) Contribution** par notre Collègue *Jean Pierre TREUIL* à une lecture critique de  
 l'article de David Deutsch et Chiara Marletto:  
*Constructor Theory of information (Proc. R. Soc. A471:20140540, 2015)*

**Prochaine séance :**

**Lundi 13 avril 2015 à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**Conférence de Simone SPEZIALE**

Chargé de Recherche (CR1) CNRS

Groupe de Gravité quantique

Centre de Physique Théorique (CPT), UMR 7332,

CNRS-Luminy Case 907, 13288 Marseille Cedex 09-F

***"Gravité quantique à boucles: des atomes d'espace aux trous noirs"***

# ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

**PRESIDENT** : Pr Victor MASTRANGELO  
**VICE PRESIDENT** : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Claude ELBAZ

**MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :**

Gilbert BELAUBRE  
 François BEGON  
 Bruno BLONDEL  
 Michel GONDRAN

**COMMISSION FINANCES**: Claude ELBAZ,  
**COMMISSION MULTIMÉDIA**: Pr. Alain CORDIER  
**COMMISSION EDITION**: Robert FRANCK et Pr Pierre NABET

**COMMISSION CANDIDATURES**: Pr. Jean-Pierre FRANÇOISE

**PRESIDENT FONDATEUR** : Dr. Lucien LEVY (†)  
**PRESIDENT D'HONNEUR** : Gilbert BELAUBRE  
**SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR** : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :**

**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** :

**CONSEILLERS SPECIAUX:**

**EDITION**: Pr Robert FRANCK  
**AFFAIRES EUROPEENNES**: Pr Jean SCHMETS  
**RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF**: Michel GONDRAN ex-Président  
**RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA**: Pr Alain CORDIER  
**RELATIONS AX et MÉCENAT** : Gilbert BELAUBRE

**SECTION DE NANCY :**

**PRESIDENT** : Pr Pierre NABET

mars 2015

# N°193

**TABLE DES MATIERES**

p. 03 Séance du lundi 2 mars 2015  
 p. 04 Annonces  
 p. 05 Documents

**Prochaine séance :**

**lundi 13 avril 2015 à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**Conférence de Simone SPEZIALE**

Chargé de Recherche (CR1) CNRS

Groupe de Gravité quantique

Centre de Physique Théorique (CPT), UMR 7332,

CNRS-Luminy Case 907, 13288 Marseille Cedex 09-F

***"Gravite quantique à boucles: des atomes d'espace aux trous noirs"***

# **ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**

**Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.**

**Séance du Lundi 3 mars 2015**

**Maison de l'AX 17h**

La séance est ouverte à 17h **sous la Présidence de Victor MASTRANGELO** et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Jean-Pierre BESSIS, Jean-Louis BOBIN, Alain CORDIER, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Ernesto DI MAURO, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Jean - Pierre FRANCOISE, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Gérard LEVY, Pierre MARCHAIS, Edith PERRIER, Jean SCHMETS, Alain STAHL, Jean-Pierre TREUIL.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CARDON, Juan-Carlos CHACHQUES, Daniel COURGEAU, Vincent FLEURY, Robert FRANCK Jacques LEVY , Antoine LONG, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, Claude MAURY, Pierre PESQUIES, Jean VERDETTI.

Notre conférencier Franck LALOE, victime impromptue d'une forte grippe, a malheureusement été dans l'impossibilité de nous présenter sa conférence très attendue sur "*La mécanique quantique: historique et interprétation*". Fort heureusement il pourra nous la présenter le lundi 4 mai prochain et nous nous en réjouissons. Nous avons néanmoins pu maintenir la séance du 2 mars 2015 grâce à nos collègues Gilles COHEN-TANNOUDJI et Jean-Pierre TREUIL auxquels nous sommes très redevables. Ils nous ont fourni:

**A) Une présentation** par notre collègue *Gilles COHEN-TANNOUDJI* de son travail en cours: "*Constantes universelles et limites du possible en physique*"

**B) Une contribution** par notre Collègue *Jean Pierre TREUIL* à une lecture critique de l'article de David Deutsch et Chiara Marletto: *Constructor Theory of information (Proc. R. Soc. A471:20140540, 2015)*

## **compte-rendu des présentations**

Les comptes-rendus complets ont fait l'objet d'une collaboration entre nos collègues Gilles COHEN-TANNOUDJI, Michel GONDRAN et Jean-Pierre TREUIL que nous remercions chaleureusement. Il seront accessibles prochainement sur le site de l'AEIS <http://www.science-inter.com>

Notre Président Victor MASTRANGELO procède ensuite à la clôture de cette très riche séance.

Irène HERPE-LITWIN

# Annances

- 1) Notre Collègue Jean-Louis BOBIN nous fait part de la prochaine parution chez EDP Science de son ouvrage: "*Demain quelle Terre? Dialogue sur l'environnement et la transition énergétique*"

COLLECTION BULLES DE SCIENCES

JEAN-LOUIS BOBIN

## Demain, quelle Terre ?

Dialogue sur l'environnement et la transition énergétique

Énergie et environnement sont les deux partenaires d'un couple infernal. La perspective d'une pénurie de ressources et la menace d'un changement climatique poussent à entamer une transition énergétique difficile à définir car ses objectifs diffèrent suivant les interlocuteurs. Les défenseurs de la Nature voient le salut de la planète dans une forte réduction de la consommation d'énergie qui automatiquement minimiserait les atteintes à l'environnement. D'autres comptent sur des avancées technologiques afin de poursuivre le développement des sociétés tout en respectant le cadre naturel.

Cet ouvrage se présente sous forme d'un dialogue, inspiré de celui écrit par Galilée en 1632 mettant en scène trois personnages aux visions différentes. Pendant quatre jours, ils vont confronter leurs points de vue sur les relations que les hommes entretiennent avec la Nature et les enseignements qu'il convient d'en tirer afin de mener à bien une transition énergétique imposée par la conjoncture de ce début de millénaire. Place de l'Homme dans les écosystèmes, climat, énergie, organisation de la société, sont tour à tour abordés dans un débat où se mêlent l'histoire, les sciences, l'économie... et par instants, la mauvaise foi !

Écrit dans un style fluide et ne nécessitant pas de connaissances scientifiques préalables, cet ouvrage intéressera tout lecteur se sentant concernés par les problèmes énergétiques mondiaux actuels.

**JEAN-LOUIS BOBIN**, ancien élève de l'École Polytechnique, docteur ès sciences, est professeur à l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6) depuis 1981 (émérite à partir de 2002), après avoir été ingénieur de recherches au Commissariat à l'Énergie Atomique. Il est auteur ou coauteur de plusieurs ouvrages sur l'énergie.



9 782759 616743

ISBN : 978-2-7598-1674-3  
16 € TTC - France  
[www.edpsciences.org](http://www.edpsciences.org)

COLLECTION BULLES DE SCIENCES

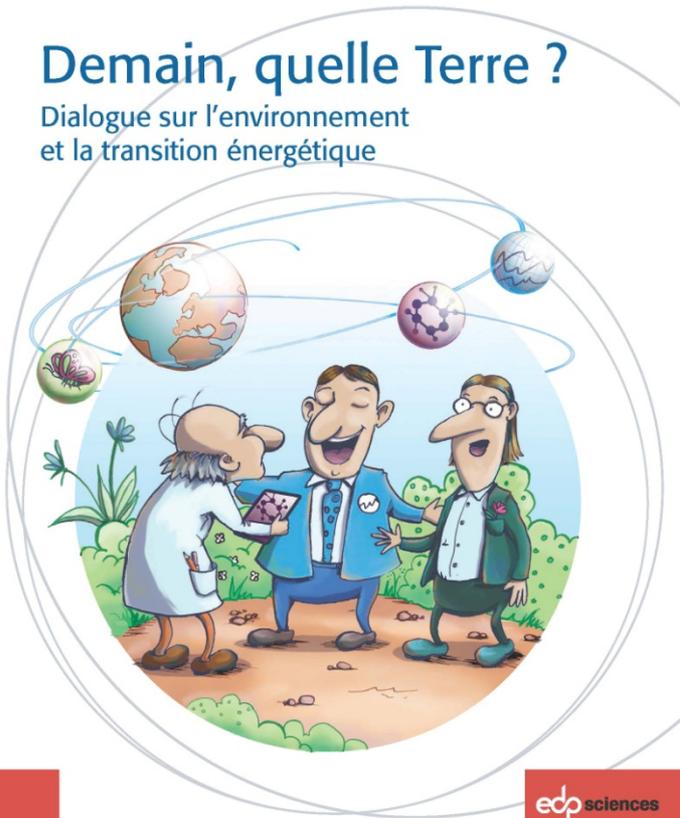
JEAN-LOUIS BOBIN

## Demain, quelle Terre ?

Dialogue sur l'environnement  
et la transition énergétique



Demain, quelle Terre ?  
JEAN-LOUIS BOBIN



edp

edp sciences

## Documents

### I. Pour préparer la conférence de Simone SPEZIALE nous vous proposons:

p.06 : un résumé de sa présentation .

p.07 : un article de Carlo ROVELLI "*Il faut oublier le temps*" issu de Propos recueillis par Hélène Le Meur dans La Recherche [mensuel n°442](#)

p.10 : un autre article de Carlo ROVELLI " De la gravitation quantique à boucles" paru dans sur le site du CNRS :

[http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/06\\_Rovelli.pdf](http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/06_Rovelli.pdf)

### II. Pour illustrer la présentation de notre collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI, nous vous proposons:

p .19 son article, "*Constantes universelles et limites du possible en physique*" présenté à Pif le 22/11/2014 qui a inspiré sa présentation

### III. Pour vous initier à la théorie du constructeur de David DEUTSCH et Chiara MARLETTO nous vous proposons de consulter les sites suivants:

– l'article de David DEUTSCH et Chiara MARLETTO *Constructor Theory of information* (*Proc. R. Soc. A471:20140540, 2015* issu du site :

<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/royprsa/471/2174/20140540.full.pdf>

– l'article de Rémi SUSSAN sur "*Vers une physique de l'information*" paru dans Internet Actu.net sous l'adresse:

<http://www.internetactu.net/2014/06/13/vers-une-physique-de-linformation/>

– l'Article "*Deeper Than Quantum Mechanics—David Deutsch's New Theory of Reality*" paru dans la revue The Physics arXiv Blog le 28 mai 2014:

<https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/deeper-than-quantum-mechanics-david-deutschs-new-theory-of-reality-9b8281bc793a>

Simone SPEZIALE

Chargé de Recherche (CR1) CNRS

Groupe de Gravité quantique  
Centre de Physique Théorique (CPT), UMR 7332,  
CNRS-Luminy Case 907, 13288 Marseille Cedex 09-F

- **Gravité quantique à boucles: des atomes d'espace aux trous noirs**

La gravité quantique à boucles décrit une quantification de la relativité générale où l'espace-temps qu'on observe émerge de l'agrégation d'atomes d'espace, chacun de dimension typique de l'échelle de Planck,  $10^{-33}$  mètres. Ces atomes d'espace interagissent entre eux et avec la matière selon des lois probabilistes. Dans cet exposé visé aux non-experts, je vais présenter les idées de base de la théorie, ses résultats majeurs et questions principales ouvertes, ainsi que des applications récentes à la physique des trous noirs, qui notamment soutiennent l'hypothèse que les trous noirs existant en nature ne possèdent pas de singularité centrale.

# CARLO ROVELLI : « Il faut oublier le temps »

[dossier](#) - 01/06/2010 par Propos recueillis par Hélène Le Meur dans [mensuel n  442](#)    la page 41 (1606 mots) | Gratuit

Entretien: Du comportement des particules élémentaires à l'évolution des galaxies, peut-on décrire le monde sans invoquer le temps ? C'est possible, et c'est même une nécessité aux yeux de Carlo Rovelli. Selon ce théoricien, il faut revoir notre conception du temps.

**LA RECHERCHE : Dans un article intitulé « *Forget time* », vous affirmez que le temps n'existe pas : qu'entendez-vous par là ?**

**CARLO ROVELLI :** Je veux dire qu'au niveau le plus fondamental nous n'avons pas besoin de ce paramètre pour décrire le monde qui nous entoure. Le cadre théorique que je propose permet de ne pas l'utiliser : c'est celui de la gravité quantique à boucles. Cette théorie cherche à concilier la relativité générale qui explique les lois de la physique à très grande échelle et la mécanique quantique qui, elle, explique le comportement de l'infiniment petit. Ce n'est pas la première théorie capable de se passer du temps. Car l'idée, en soi, est ancienne. En effet, on peut tout à fait interpréter le formalisme mathématique de la mécanique classique newtonienne sans jamais considérer le temps comme une variable particulière. En réalité, ce paramètre existe au même titre que d'autres variables, comme la valeur du champ électrique, ou la position de la Lune, par exemple. Et ce sont des relations entre toutes ces variables que donne la théorie classique. On peut ainsi tout formuler sans attribuer au temps un caractère spécial. Cette idée a donc été avancée bien avant la relativité générale.

**Qu'apporte sur ce sujet la relativité générale ?**

**C.R. :** Elle change complètement la donne. Ce qui était seulement une possibilité avec la mécanique classique devient une nécessité : en relativité générale, il n'y a pas « un » temps physique, car chaque objet possède son temps propre. C'est-à-dire que chaque objet décrit une trajectoire dans l'espace-temps. Et c'est la géométrie de cet espace qui définit son temps propre. Celui-ci ne s'écoule donc pas de la même façon si l'objet se trouve à l'intérieur de la galaxie ou en dehors. Ce temps n'a plus rien à voir avec le temps de Newton. Ce dernier peut être vu comme une grande horloge extérieure à l'Univers dont les aiguilles indiquent un même temps absolu pour tout le monde. Alors qu'en relativité générale le temps n'est pas externe à la théorie puisqu'il dépend de la géométrie, par conséquent du champ gravitationnel dans lequel on se trouve. Il s'agit là d'un tout autre temps que celui de la physique usuelle.

**Et le problème se corse encore quand on cherche à prendre en compte la mécanique quantique.**

**C.R. :** En effet ! et cela de façon considérable puisqu'à l'échelle où la mécanique quantique devient importante pour l'espace-temps, au-dessous de la longueur de Planck 10<sup>-33</sup> centimètre, les trajectoires n'existent plus ! Les particules élémentaires ne suivent plus des trajectoires mais des superpositions de différentes positions. On ne peut même plus utiliser les temps propres ! Aucune variable n'est une bonne horloge au-dessous de la longueur de Planck. Pour expliquer toutes les échelles, c'est assez contre-intuitif, mais le monde réel doit être une superposition d'  tats quantiques. Il n'y aurait pas un temps dans lequel les choses passent, mais des superpositions de temps propres différents. Cette fois encore, écrire les équations fondamentales de la physique sans faire référence à la variable temps n'est plus une simple possibilité mais une nécessité.

**Alors, peut-on se passer du temps, aujourd'hui ?**

**C.R. :** Plusieurs étapes ont été franchies. On a d'abord montré que formuler la relativité générale dans ce langage sans temps était possible. Aujourd'hui, on cherche à le faire pour la gravité quantique. Le formalisme existe. La gravité quantique à boucles en est un exemple. Elle prédit des relations entre variables physiques qui permettent de décrire l'évolution du monde, sans recourir au temps. Mais nous n'avons pas encore de théorie complète crédible.

**Concrètement, comment cette théorie sans temps rend-elle compte des changements ?  
Comment décrit-elle notamment le mouvement des planètes ?**

**C.R. :** Classiquement, pour décrire le mouvement des planètes du système solaire, j'utilise une horloge. À chaque instant indiqué par mon horloge, la théorie me donne la position de chacune des planètes. Maintenant, je jette l'horloge : la théorie sans temps m'indique pour chaque position du Soleil où se trouve Vénus, où est Mercure, où est Jupiter, etc. Au final, je décris le même mouvement. À un niveau fondamental, cette variable temps au statut si particulier n'existe donc pas.

**C'est ce qui vous fait dire que le temps, tel qu'on le conçoit comme variable particulière, est un « truc » inventé par Newton ?**

**C.R. :** Pour expliquer cela, j'aime bien raconter comment Galilée a découvert que le pendule était une bonne horloge. La légende dit que, dans l'église de Pise, observant un grand chandelier suspendu osciller lentement, il a compté le nombre de ses battements cardiaques entre chaque oscillation. Comme c'était toujours la même, il en a conclu que le pendule est une bonne façon de mesurer le temps. Depuis, la plupart des horloges utilisent un pendule : dans une horloge mécanique il y a un petit pendule qui oscille, dans une horloge atomique, c'est un atome qui oscille. Et aujourd'hui, on mesure le pouls grâce à une horloge. En réalité, que mesurait Galilée ? La durée de l'oscillation par rapport à son pouls. Finalement, on ne mesure jamais le temps mais une variable par rapport à une autre ! L'idée de Newton a été d'imaginer une variable temps, que l'on ne mesure pas, mais par rapport à laquelle on décrit toutes les équations. Le mouvement du pendule, etc. Toute la physique utilise ce « truc ». Or, quand on cherche à allier la relativité générale à la mécanique quantique, ce truc ne marche plus, et on ne peut plus prétendre qu'une variable gouverne la danse de toutes les autres.

**Soit ! on peut tout repenser sans temps ! Mais comment expliquer notre expérience quotidienne du temps ?**

**C.R. :** On peut comparer ce problème à celui de la couleur. À la Renaissance, on a compris que la couleur n'était pas une propriété fondamentale de la matière. Mais, même si les atomes n'ont pas de couleur, il fallait bien expliquer pourquoi nos yeux la perçoivent. Autrement dit, il fallait retrouver dans la matière qui n'a pas de couleur, ce qui lui donne la couleur. Dans le cas du temps, nous devons comprendre dans quelles conditions il apparaît et ce qui nous donne cette expérience du temps. Mais redisons-le, ce n'est pas pour autant une propriété fondamentale.

**Comment fait-on émerger le temps d'une théorie sans temps ?**

**C.R. :** C'est une question ouverte. Avec le mathématicien français Alain Connes, nous avons proposé l'idée d'un temps thermique. Nous tentons, chacun de notre côté, de comprendre le temps en s'intéressant plutôt à sa nature thermodynamique que mécanique. En thermodynamique, on fait des statistiques. La chaleur correspond à de l'agitation thermique, on ne connaît pas le mouvement individuel des atomes mais on donne une description moyenne. Quand je dis « La tasse de thé est chaude », je parle seulement de la température mais pas du mouvement de chacune des molécules. En appliquant cette approche, nous avons mis en équation une formule précise qui donne un état statistique duquel on peut dériver une variable temporelle. En fait, pour nous, le temps est un effet de notre ignorance du détail. Si nous connaissions précisément chaque variable, la position exacte microscopique de chaque atome par exemple, il n'y aurait pas de statistique, et donc pas de temps.

**Si on reprend l'analogie avec les molécules de thé, là que regarde-t-on ?**

**C.R. :** Tout système thermique est décrit avec un état statistique, une distribution de probabilité sur toutes les configurations microscopiques. Cet état permet de calculer une variable temporelle. C'est la variable par rapport à laquelle le système est en équilibre. L'idée est que nous sommes des systèmes thermiques. Et, en tant que tels, nous avons naturellement une idée de temps qui nous est associée. Et, chaque fois qu'il y a un système en équilibre, il y a un temps. Il y a une direction privilégiée par rapport à laquelle on est en équilibre.

**Retrouve-t-on ainsi la flèche du temps, le fait qu'il ne s'écoule que dans une direction ?**

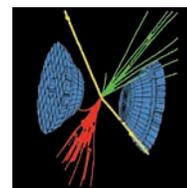
**C.R. :** Oui, d'une certaine façon. C'est l'équilibre qui détermine un temps. Nous vivons dans un monde qui est proche d'un état d'équilibre. On peut le penser comme un passage d'un état d'équilibre à l'autre. On peut donc décrire un temps qui possède toutes les propriétés thermodynamiques : son entropie \* augmente, et lui confère une direction privilégiée avec les caractéristiques du temps que nous connaissons. On comprend ainsi pourquoi dans notre monde existe cette variable si particulière qu'est le temps. Et une horloge est un objet mécanique correctement synchronisé avec ce temps.

**Comment vos idées sont-elles accueillies ?**

**C.R. :** Les réactions sont variées. Mais parmi les théoriciens, beaucoup reconnaissent qu'il faut changer en profondeur notre façon de voir le temps. C'est le cas du physicien américain, Edward Witten, une sommité en théorie des cordes. Et lors d'un colloque récent à Genève, le Prix Nobel David Gross, « cordiste » également, en appelait aussi à une révision de notre conception du temps. Certains adhèrent au fait que le temps n'existe pas au niveau fondamental. D'autres récuse cette idée, à l'instar de mon ami Lee Smolin, avec qui nous avons élaboré la gravité quantique à boucles. De plus, comme il n'existe pas encore de théorie de gravité quantique complète, les avis divergent sur la façon concrète de modifier notre vision du temps. Quant au temps thermique, c'est une idée très particulière que très peu de gens partagent. Rares sont ceux qui y travaillent, et les autres la regardent comme une idée étrange. La difficulté est de parvenir à la faire fructifier, pour les convaincre.

Par Propos recueillis par Hélène Le Meur

# De la gravitation quantique à boucles



**La théorie des boucles explore les propriétés quantiques de l'espace et du temps. Son étude s'est fortement intensifiée durant les dernières années, particulièrement grâce au développement de sa version covariante. 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.**

## Le problème de la gravité quantique

La « théorie des boucles » est une théorie quantique pour le champ gravitationnel. Son objectif est de décrire les phénomènes gravitationnels quand leurs effets quantiques ne peuvent pas être négligés. Comme exemples de ces phénomènes, on peut citer la cosmologie primordiale, certains aspects de la physique des trous noirs, ou tout simplement la diffusion élastique de deux particules élémentaires qui rebondissent à très haute énergie et très petite distance. Dans l'état actuel des théories physiques, ces phénomènes nous échappent.

L'étude de la théorie des boucles s'est considérablement développée en France durant la dernière décennie. Des groupes de recherche y travaillent actuellement dans plusieurs laboratoires du CNRS : à Orsay, Marseille, Lyon, Tours, Montpellier, Grenoble et à l'APC à Paris. Dans le monde, la théorie est étudiée par plusieurs douzaines de groupes de recherche dans de nombreux pays, et la communauté de recherche française y occupe une première place.

Pour éclairer l'enjeu de la théorie, il faut distinguer deux problèmes différents que l'on confond souvent. Le premier réside dans la nécessité de compléter la théorie élémentaire : arriver à un ensemble de théories cohérentes, capables en principe de rendre compte de tous les phénomènes. Le deuxième est le problème de l'unification, qui consiste à réduire tous les phénomènes à des manifestations d'une seule entité. Par exemple : la théorie des interactions fortes (la chromodynamique quantique, ou QCD) complète le modèle standard des particules élémentaires (sans gravité) et forme un ensemble cohérent avec les autres théories, sans constituer pour cela une unification des forces nucléaires avec les autres forces ; tandis que la

théorie de Maxwell unifie électricité et magnétisme. Dans l'état actuel des choses, nous n'avons pas une théorie unifiée de toute la physique ; nous n'avons même pas une description complète de la physique élémentaire. L'objectif de la gravitation quantique à boucles est de compléter et rendre cohérent l'ensemble des théories existantes, renvoyant au futur l'objectif plus ambitieux de trouver une éventuelle « théorie du tout » unifiée.

Le problème est difficile pour deux raisons. La première est la pénurie d'information expérimentale directe. Les phénomènes gravito-quantiques se manifestent à très courte distance (la longueur de Planck,  $L_{Pl} \sim 10^{-33}$  cm) ou très grande énergie ( $E_{Pl} \sim 10^{19}$  GeV) ou très grande densité ( $\rho_{Pl} \sim 10^{96}$  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

Article proposé par :

Carlo Rovelli, roveli@cpt.univ-mrs.fr

Centre de physique théorique, UMR 7332, CNRS / Univ. Aix-Marseille / Univ. Toulon, Marseille



## Encadré 1

## Les réseaux de spin

L'espace des états de la gravitation quantique à boucle peut être écrit comme limite d'une famille d'espaces d'états associés à des graphes. Pour chaque graphe, l'espace d'états est le même que celui d'une théorie de gauge  $SU(2)$  sur réseau : l'espace de Hilbert des fonctions de  $L$  éléments de  $SU(2)$  associés aux liens, invariante sous  $N$  transformations « de jauge » sur les nœuds. Pour comprendre l'origine de ces graphes, la façon la plus simple est de penser à une discrétisation de l'espace physique en  $N$  cellules séparées par  $L$  faces. Si on « efface » de l'espace physique les segments de la discrétisation, on obtient une variété  $M$  à topologie non triviale. L'espace des états de la gravitation quantique à boucle est la quantification de l'espace des connections  $SU(2)$  plates sur  $M$ . Le graphe est le dual de la discrétisation (le *graphe bleu dans la figure E1*). On montre que cet espace d'états admet une base, la base des réseaux de spin, labellée par le



Figure E1

graphe, un spin  $j$  sur chaque lien du graphe, et un tenseur invariant  $\nu$  sous  $SU(2)$  sur chaque nœud. Les spins sont les nombres quantiques qui déterminent l'aire de chaque face de la triangulation initiale, et les tenseurs invariants sont les nombres quantiques qui déterminent le volume des cellules. Les deux sont discrets. Un théorème établi par Roger Penrose montre que les états semi-classiques dans un tel espace d'Hilbert admettent une interprétation géométrique, qui associe un polyèdre à chaque nœud, comme dans la *figure E2*, où il faut penser les petits polyèdres verts (les quanta d'espace) comme collés les uns aux autres, pour « construire » l'espace physique. L'observation la plus importante est que ces états quantiques ne sont pas des états « dans l'espace », mais des états « de » l'espace.

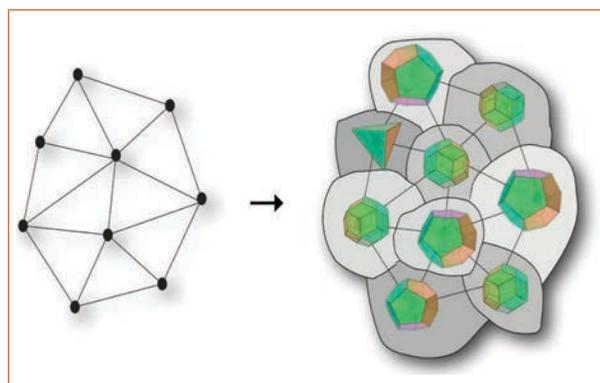


Figure E2

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.

Mais pour le moment les informations expérimentales directes sur l'échelle de Planck sont encore très limitées, loin de la grande quantité de données qui nous permet par exemple de formuler le Modèle Standard ou la mécanique quantique. Dans cet état des choses il est néanmoins raisonnable de chercher une nouvelle théorie fondamentale. Il faut se rappeler que de nombreuses avancées théoriques importantes ont trouvé leur origine non pas dans de nouvelles données, mais dans un effort pour résoudre des problèmes de consistance et cohérence entre des théories déjà empiriquement bien établies. C'est en effet l'effort pour combiner les théories de Kepler et de Galilée qui a conduit Newton à la théorie de la gravitation universelle sans besoin de données empiriques nouvelles ; les lois de Coulomb, Ampère et Faraday ont guidé Maxwell vers l'électromagnétisme ; l'électromagnétisme et la mécanique ont probablement été suffisants à Einstein pour aboutir à la Relativité Restreinte ; la gravitation newtonienne et la Relativité

Restreinte lui ont encore permis de construire la Relativité Générale, et même Copernic avait strictement les mêmes données que Ptolémée quand il a développé l'héliocentrisme. Bien évidemment, toutes ces théories ne sont ensuite devenues crédibles que lorsque leurs prédictions se sont révélées correctes, mais elles ont toutes été trouvées à partir de théories déjà bien testées, sans données nouvelles. Dans le même état d'esprit, les « données expérimentales » pour la construction de la gravitation quantique à boucles sont la Relativité Générale et la Mécanique Quantique : deux grandes théories appuyées sur de solides supports observationnels.

La pénurie de données expérimentales ne serait d'ailleurs un véritable problème que si nous avions plusieurs théories quantiques complètes de la gravitation : comment choisir la bonne théorie sans pouvoir tester les autres possibilités ? Mais dans la réalité, nous ne sommes pas en condition de devoir choisir entre plusieurs théories complètes et cohérentes. En trouver une seule et montrer sa cohérence serait déjà un succès. Ceci est l'objectif premier de la théorie des boucles.

Le problème abordé par la théorie des boucles est donc relativement bien posé : est-il possible d'écrire une théorie quantique consistante qui ait la Relativité Générale



d'Einstein comme limite classique ? Résoudre ce problème et écrire une telle théorie serait un premier succès. Ensuite, il faudrait demander à l'expérience si cette théorie est effectivement celle qu'a choisie la Nature.

La deuxième difficulté est liée aux particularités du champ gravitationnel. L'impressionnant succès empirique de la Relativité Générale d'Einstein rend crédible son idée centrale : la géométrie de l'espace-temps dans lequel nous avons l'impression de vivre n'est rien d'autre qu'une manifestation d'un champ physique qui est le champ gravitationnel. Il s'ensuit immédiatement que les propriétés quantiques du champ gravitationnel sont des propriétés quantiques de l'espace-temps lui-même. De façon intuitive (et imprécise), ce qui se passe à l'échelle de Planck peut être visualisé comme suit : les fluctuations quantiques du champ gravitationnel sont des fluctuations de l'espace-temps. Ces fluctuations augmentent lorsque l'échelle diminue. À l'échelle de Planck, leur énergie est suffisante pour en faire des trous noirs, de telle façon qu'il n'y a plus de véritable continuum spatio-temporel à cette échelle. On s'attend à une structure granulaire (« quantique ») de l'espace-temps même, à l'échelle  $L_{pl} \sim 10^{-33}$  cm, analogue à la granularité d'une onde électrique manifestée par l'existence des photons. Cette image intuitive, bien connue depuis les années 60, n'a trouvé son cadre mathématique approprié qu'avec la théorie des boucles.

Or une physique qui comporte la possibilité de « quanta d'espace » et de superposition quantique de géométries différentes exige une révision profonde des notions élémentaires d'espace et de temps utilisées habituellement en physique. La focalisation sur ces aspects conceptuels difficiles du problème rend la théorie singulière et ardue, mais lui donne son aspect le plus fascinant, et son goût particulier. La théorie des boucles fait face directement à ces problèmes et offre une possible réponse assez claire au problème de la description cohérente des propriétés quantiques de l'espace-temps.

## La théorie des boucles

La théorie des boucles est définie par un espace d'états, et par une équation qui donne les probabilités de transitions entre ces états. C'est une formulation similaire à celle de l'électrodynamique quantique (QED) dans laquelle les états décrivent des ensembles de photons et d'électrons, c'est-à-dire les « quanta » individuels des champs électromagnétique et fermionique. Les états de photons avec des nombres quantiques élevés peuvent décrire un champ électromagnétique macroscopique et les amplitudes de transition entre états peuvent y être calculés ordre par ordre dans un développement perturbatif utilisant les graphes de Feynman, lesquels décrivent les processus possibles entre les quanta élémentaires.

De façon similaire, les états de la théorie des boucles décrivent des ensembles de « quanta d'espace », ou quanta du champ gravitationnel. Le nom technique de ces états

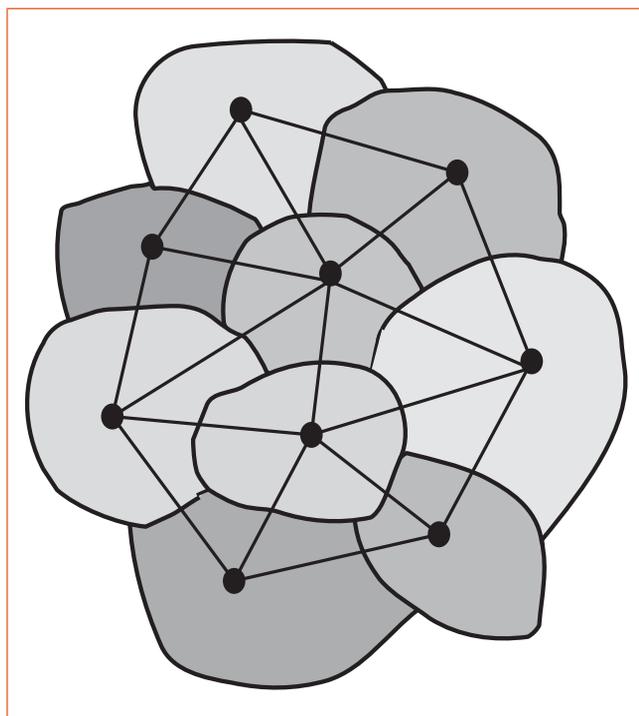


Figure 1 – Représentation d'un état du champ gravitationnel dans la théorie des boucles : un réseau de spin et les « graines », ou « quanta » d'espace correspondantes, avec en leur centre les nœuds du réseau.

est « réseaux de spin » (*spin networks*). L'usage du mot « spin » sera justifié par l'équation donnée un peu plus loin et le terme « réseau » fait référence à la structure mathématique particulière de ces états, qui tient compte non seulement du nombre de quanta individuels et de leur « taille », mais aussi de leurs relations de contiguïté (qui est à côté de qui). Chaque état est donc caractérisé par un réseau, qui indique quel « quantum d'espace » est en contact avec quel autre (voir [figure 1](#)). Le mot « boucle » utilisé pour la théorie désigne le réseau le plus simple : juste une boucle, et ne survit aujourd'hui que pour des raisons historiques.

Certains états de réseaux de spin avec des nombres quantiques élevés décrivent des champs gravitationnels macroscopiques, et donc des géométries macroscopiques de l'espace physique. On retrouve donc dans le domaine quantique la particularité du champ gravitationnel : admettre une interprétation géométrique. La découverte que les réseaux de spin quantiques admettent une interprétation géométrique, c'est-à-dire que chaque réseau de spin détermine un espace géométrique, est le contenu d'un théorème important, dû au mathématicien anglais Roger Penrose, le « *spin-geometry theorem* ».

Un résultat de la théorie est que la taille de ces quanta ne peut prendre que certaines valeurs discrètes, qui peuvent être calculées, comme celles de la quantification de l'énergie des photons. L'énergie d'un mode d'oscillation du champ électromagnétique est donnée par  $E = 2\pi\hbar\nu n$  où  $\hbar$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence du mode et  $n$  un nombre quelconque entier positif. De



Encadré 2

La géométrie quantique

La géométrie décrite dans l'encadré 1 est « quantique » pour trois raisons différentes.

i) D'abord, les quantités qui définissent la géométrie de chaque polyèdre sur chaque nœud sur réseau (par exemple l'angle entre deux normales des faces et l'aire d'une face, voir la figure E3) ne commutent pas entre elles (tout comme la position et l'impulsion d'une particule quantique), et donc ne peuvent pas être toutes bien définies au même temps. Donc la géométrie de chaque polyèdre est « fluctuante ». Dans ce sens, un nœud d'un réseau de spin est un polyèdre seulement comme une particule quantique avec spin (dont les composants du moment angulaire ne commutent pas non plus) est un objet en rotation.

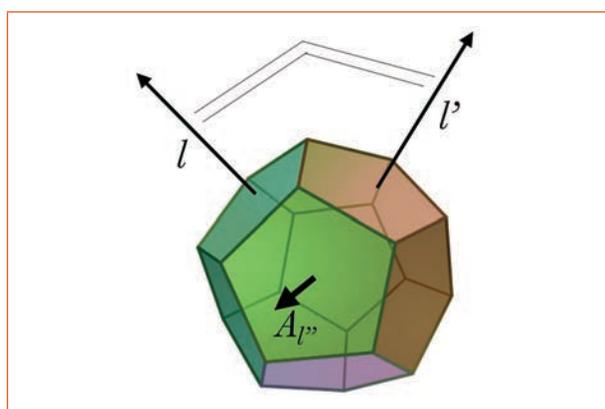


Figure E3 – Éléments de la géométrie d'un polyèdre : angles entre normales et aire d'une face.

ii) Un état générique est une superposition quantique de différents réseaux de spin. Donc on peut avoir des superpositions quantiques de géométries différentes.

iii) Les valeurs propres des aires des faces et des volumes des cellules sont discrètes. Les valeurs propres de l'aire des faces sont données par la formule qui se trouve dans le texte (formule (1)). Le spectre du volume des cellules est plus compliqué. Ses valeurs propres calculées numériquement pour différentes valeurs de l'aire de faces (ici égales entre elles) sont données comme exemple dans la figure E4.

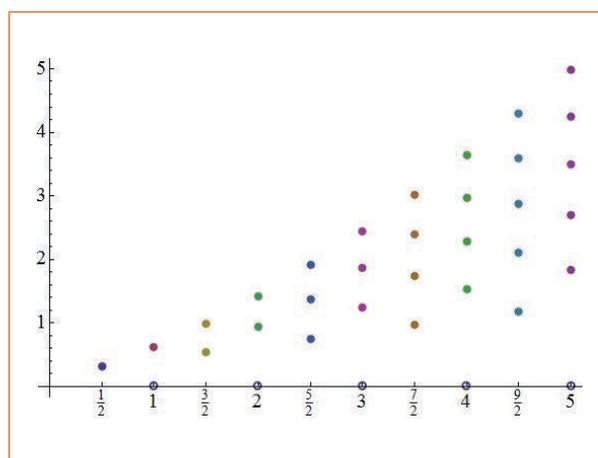


Figure E4 – Spectre du volume, à valeur fixe de l'aire de faces (unités de Planck  $L_{pl} = 1$ ).

façon analogue, l'aire d'une petite surface en gravité quantique est donnée par :

$$A = 8\pi\gamma \frac{\hbar G}{c^3} \sqrt{j(j+1)} \quad (1)$$

où  $G$  est la constante de Newton,  $c$  la vitesse de la lumière,  $\gamma$  est une constante fondamentale sans dimension dans la théorie des boucles, appelée paramètre d'Immirzi, et  $j$  est un nombre entier ou semi-entier positif quelconque (ou « spin », d'où le nom « réseaux de spin »). Il y a donc une taille minimale des grains d'espace, de l'ordre de  $(L_{pl})^2 \sim \hbar G / c^3$ , qui détermine la structure granulaire fine de l'espace.

Ce résultat important est obtenu de la même façon que toute discrétisation en mécanique quantique, comme celle des niveaux discrets de l'énergie des orbites des électrons dans les atomes. Techniquement, il provient de la solution du problème aux valeurs propres (« problème spectral ») pour l'opérateur qui décrit l'aire de la surface ; la géométrie est donnée par le champ gravitationnel qui est une variable quantique, et est donc décrite par un

opérateur quantique. Les valeurs propres de cet opérateur déterminent la taille des quanta d'espace.

C'est cette « quantification » de la géométrie qui est responsable des phénomènes les plus caractéristiques de la théorie des boucles : la structure granulaire de l'espace à l'échelle de Planck, l'absence de longueurs d'onde arbitrairement petites. La conséquence la plus importante est la finitude ultraviolette de la théorie, c'est-à-dire la disparition du problème des infinis qui minent la théorie quantique des champs ordinaire quand on néglige les propriétés quantiques de l'espace.

Les amplitudes de transition entre les états de la théorie sont ensuite données par une équation relativement simple, écrite explicitement dans l'encadré 3. Il s'agit d'une « somme de Feynman » sur des « histoires de réseaux de spin ». Le nom technique de ces histoires est « mousses de spin » (*spinfoams*). Un graphe de Feynman visualise en effet les trajectoires (ou lignes d'univers) des particules dans l'espace-temps et de leurs interactions, donc une « histoire de particules ». Une mousse de spin visualise de la même façon les lignes d'univers dans l'espace-temps des nœuds et des liens d'un réseau. Une mousse de spin



Encadré 3

Les amplitudes de transition

Une amplitude de transition est déterminée par une mousse de spin  $C$  : un « 2-complex », c'est-à-dire un ensemble de vertex  $v$ , connectés par des arêtes  $e$  qui bordent des faces  $f$ , comme dans la *figure E5*. Une telle mousse de spin détermine la probabilité de transition entre la géométrie décrite par le graphe en bas (bleu) et celle du graphe en haut (rouge), à une approximation donnée. L'expression de l'amplitude de la gravitation quantique à boucles peut s'écrire (ici avec la constante cosmologique  $\Lambda = 0$ ) comme une intégrale sur les groupes de Lie  $SU(2)$  (essentiellement le groupe de rotations) et  $SL(2, \mathbb{C})$  (le groupe de Lorentz), de la façon suivante, que je donne ici sans spécifier les détails (voir « Pour en savoir plus »), uniquement pour illustrer la forme générale des amplitudes :

$$Z_c(h_i) = \int_{SL(2, \mathbb{C})} dg_{ve} \int_{SU(2)} dh_{ef} \sum_{j_f} \prod_f (2j_f + 1) \chi^{\gamma j_f} \left( \prod_{e \in \partial f} g_{ef}^{\varepsilon_f} \right) \prod_{e \in \partial f} \chi^{j_f}(h_{ef})$$

Les deux fonctions  $\chi^j$  et  $\chi^{\gamma j}$  sont les caractères de représentations unitaires de  $SU(2)$  et  $SL(2, \mathbb{C})$  respectivement. Les variables d'intégration  $g_{ve}$  et  $h_{ef}$  sont, respectivement, des éléments de  $SL(2, \mathbb{C})$  et de  $SU(2)$  associés à chaque couple vertex-arête et arête-face. Cette formule condense entièrement la définition de la dynamique de la gravitation quantique à

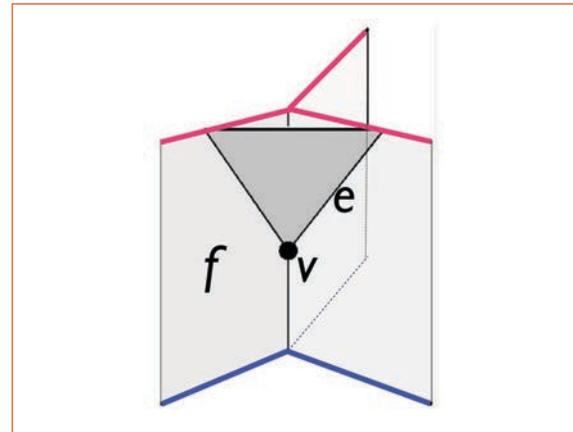


Figure E5

boucles. Un théorème montre que cette amplitude se réduit à des exponentielles de l'action d'Einstein-Hilbert dans une certaine limite. Ces amplitudes de transition devraient donc permettre de retrouver la Relativité Générale dans la limite classique.

peut être visualisée comme une mousse de bulles de savon : faces qui se joignent sur des arêtes, qui à leur tour se joignent sur des vertex (voir la *figure E5*). Une mousse de spin est un ensemble de faces, arêtes et vertex, coloré avec un spin sur chaque face. Comme pour les graphes de Feynman, la théorie associe un nombre complexe (une amplitude) à chaque réseau de spin. Ces amplitudes déterminent les probabilités quantiques pour tout processus physique. À partir de ces amplitudes on a pu dériver, par exemple, des aspects de la limite classique de la théorie comme l'équation de Friedmann, qui est l'équation principale de la cosmologie, ou la linéarisation de la Relativité Générale autour de l'espace de Minkowski. La physique usuelle émerge donc dans une approximation appropriée, à partir d'objets abstraits comme les réseaux de spin et les mousses de spin.

Il est intéressant de remarquer qu'une mousse de spin admet deux interprétations physiques apparemment différentes. D'abord elle peut être vue comme un graphe de Feynman de la théorie : elle représente alors un processus d'interaction entre des quanta d'espace, comme on fait en QED. Les vertex de la mousse de spin sont les lieux d'interaction, comme les vertex des graphes de Feynman ; les arêtes de la mousse sont les lignes d'univers des nœuds

du réseau de spin ; et les faces de la mousse sont les surfaces d'univers des liens du réseau de spin, c'est-à-dire les surfaces balayées par ces liens dans l'espace-temps. Mais une mousse de spin peut être aussi directement interprétée comme une discrétisation de l'espace-temps, comme les réseaux utilisés pour des calculs numériques sur les grands systèmes d'ordinateurs en QCD « sur réseau ». *A posteriori*, la convergence du cadre conceptuel de la QED et de la QCD sur réseau n'est pas surprenante, car les sites du réseau de la QCD sont des petites régions d'espace, mais dans une théorie quantique de la gravité une petite région d'espace est un quantum du champ gravitationnel ; donc le réseau lui-même est une « histoire des quanta » et donc aussi un graphe de Feynman du champ gravitationnel. Cette convergence entre les cadres conceptuels (graphes de Feynman de la QED et réseaux de la QCD) des deux formalismes de base de la théorie des champs quantique moderne est un bel aspect de la théorie des boucles.

En effet, la gravité quantique à boucles ressemble fortement à la QCD sur réseau par plusieurs aspects : comme la QCD sur réseau, elle vise à une quantification non-perturbative d'une théorie de champs. La différence, importante, est que dans le contexte de la QCD la théorie



physique n'est définie que dans la limite à laquelle le réseau devient grand et la taille des mailles négligeable. Dans ce contexte le réseau est en effet un artifice mathématique pour définir la théorie et n'a pas de signification physique. En gravité, au contraire, le réseau est physique : il représente la granularité physique de l'espace à l'échelle de Planck. La taille physique réelle des cellules du réseau est déterminée par la valeur du champ gravitationnel qui vit sur le réseau même. Le résultat final est une formulation de la théorie quantique des champs qui ressemble aux théories connues, mais qui s'en éloigne dans quelques aspects fondamentaux. Ces aspects reflètent le fait que dès que l'on ne néglige plus la dynamique du champ gravitationnel, la structure de l'espace temps n'est pas donnée en avance, mais émerge des états quantiques mêmes de la théorie.

Le résultat le plus important de la théorie est un théorème qui assure que ses amplitudes de transition sont finies, à tous les ordres. Cette finitude est importante puisque la difficulté principale pour construire une théorie quantique de la gravité a toujours été liée aux divergences des amplitudes de transition. La raison pour laquelle ces infinis disparaissent est simple : ils proviennent des régions arbitrairement petites de l'espace qui, dans la théorie des boucles, n'existent plus. La granularité de l'espace implique une coupure naturelle sur les infinis. En d'autres termes, la solution proposée par la gravitation quantique à boucles à l'obstacle constitué par les infinis de la théorie quantique des champs est que *tous* ces infinis soient des pathologies dues à notre façon de considérer l'espace, en négligeant sa véritable nature quantique et donc granulaire à petite échelle. Si cette solution est physiquement correcte, l'emploi de la théorie des champs quantiques dans la physique des particules est similaire à son emploi en matière condensée : une description approchée, qui néglige la structure discrète physique réelle sous-jacente.

Finalement, la théorie des boucles est formulée en quatre dimensions physiques, donc cohérente avec le monde que nous observons. Son couplage avec le reste du modèle standard, en particulier avec les champs fermionique et les champs de Yang-Mills a été défini récemment. La théorie inclut de façon naturelle une petite constante cosmologique positive (nécessaire pour éliminer les divergences infrarouges). La théorie est localement invariante de Lorentz (dans le même sens que la Relativité Générale). Elle n'a pas besoin de la supersymétrie, ni de dimensions supplémentaires pour être cohérente.

La théorie est donc bien compatible avec le reste de notre connaissance du monde, et avec les indications expérimentales plus récentes qui, pour le moment, semblent pointer vers l'absence de brisure de l'invariance de Lorentz à haute échelle, l'absence de supersymétrie au moins à basse échelle, et la présence d'une petite constante cosmologique  $\Lambda$  positive, révélée par l'observation récente de l'accélération cosmique reconnue par les derniers Prix Nobel en physique.

## Cosmologie et trous noirs

Les deux applications les plus importantes de la théorie qui ont été bien étudiées concernent la cosmologie primordiale et la physique des trous noirs.

En cosmologie, la théorie des boucles impose des corrections quantiques à l'équation de Friedmann, équation qui décrit l'évolution à très grande échelle de l'Univers. Lorsqu'on est proche du Big Bang et que l'on peut négliger les termes de constante cosmologique ainsi que la courbure spatiale, l'équation de Friedmann qui découle de la Relativité Générale classique d'Einstein s'écrit ainsi :

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho,$$

où  $a(t)$  est le facteur d'échelle lié à la taille de l'Univers,  $\dot{a} = da/dt$  est la vitesse d'expansion et  $\rho$  la densité d'énergie moyenne de l'Univers. À noter que la quantité à droite de cette équation étant positive, la vitesse d'expansion ne peut jamais s'annuler et l'Univers ne peut cesser sa contraction ou son expansion. En gravitation quantique à boucles, cette équation devient :

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{Pl}}\right),$$

où  $\rho_{Pl}$  est la densité de Planck déjà mentionnée. Quand la matière de l'Univers a une densité  $\rho$  négligeable par rapport à cette densité, c'est-à-dire pour presque toute l'histoire de l'Univers, la parenthèse est proche de l'unité et la correction est négligeable. Mais près du Big Bang la densité  $\rho$  de la matière devient très élevée et approche  $\rho_{Pl}$  ; le terme de droite s'annule donc comme la dérivée  $\dot{a}$ . Il n'y a alors plus de contraction ni d'expansion, et la densité de la matière ne peut plus croître au-delà de la densité de Planck  $\rho_{Pl}$ . Tout se passe comme s'il y avait une force répulsive qui empêche l'univers de devenir trop petit. Cette force, d'origine quantique, n'est pas très différente de celle qui retient l'électron de tomber sur le noyau en conséquence du principe d'incertitude d'Heisenberg. À cause de cette force répulsive à très petite distance, un univers en contraction sous le poids de l'attraction gravitationnelle va rebondir violemment, et passer à une phase d'expansion. La théorie indique ainsi que l'explosion initiale de notre univers visible, le Big Bang, pourrait être le résultat d'un gigantesque rebondissement cosmique, un « Big Bounce », consécutif à la contraction cosmique d'un univers similaire au nôtre (figure 2).

Ce ne sont évidemment que des spéculations qui, pour le moment, ne sont soutenues par aucune observation directe. Mais la cosmologie nous a accoutumés à des prédictions spectaculaires vérifiées ensuite, et on peut espérer que l'histoire puisse se répéter. Si le « Big Bounce » s'est effectivement produit, les possibilités d'en voir des traces dans des observations cosmologiques des prochaines années, par exemple sous la forme de petites déformations de la forme du spectre du fond de radiation

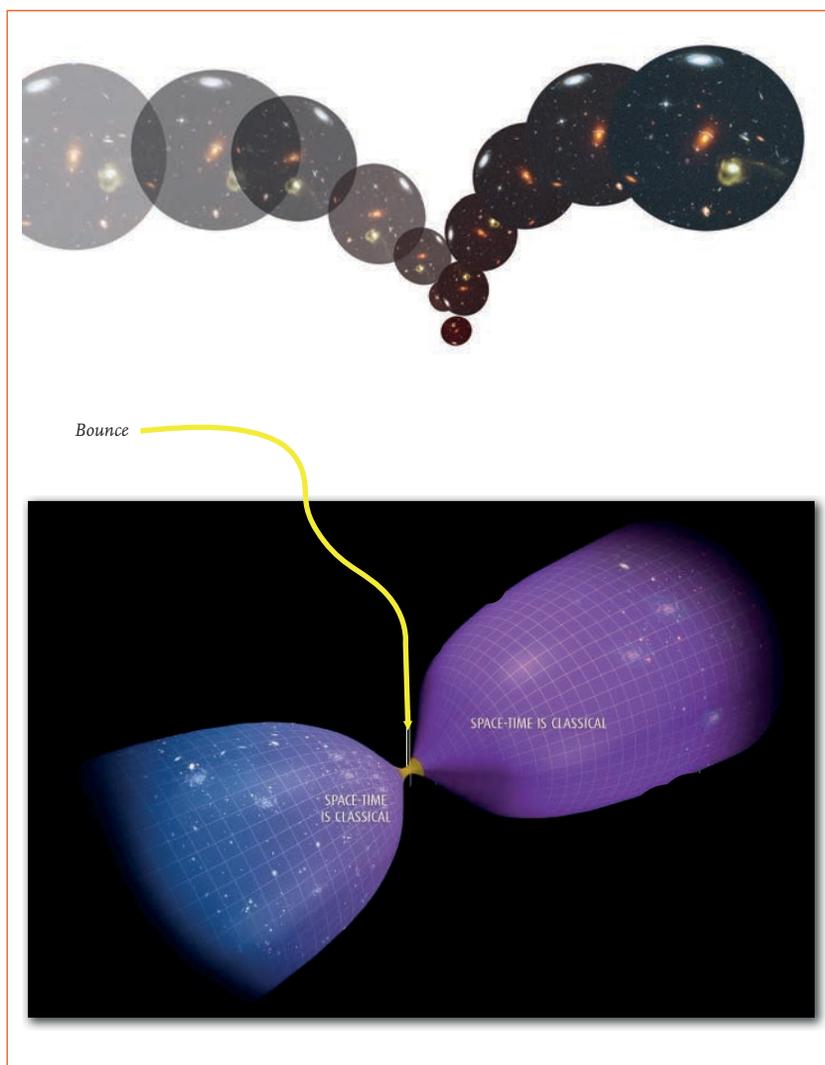


Figure 2 – Deux images intuitives du rebondissement cosmique de l'univers. Sur la seconde, de chaque côté du rebond (Bounce), l'espace-temps est classique.

cosmique, ne devraient pas être nulles, et la recherche se focalise aujourd'hui sur ces possibilités.

Il est en tous cas intéressant de disposer d'une théorie physique dont les équations ne s'arrêtent pas, comme celles de la Relativité Générale classique, au Big Bang. On peut montrer en effet que toutes les singularités cosmiques dangereuses, c'est-à-dire celles que la théorie classique ne peut traiter, sont résolues de cette manière en théorie des boucles.

La deuxième application caractéristique de la gravitation quantique à boucles est le calcul de l'entropie des trous noirs. L'observation semble encore plus problématique ici qu'en cosmologie, et la question reste théorique. Des arguments indirects, mais convaincants, indiquent que les trous noirs ont des propriétés thermodynamiques ; or on a besoin, pour dériver directement ces propriétés, d'une théorie quantique de la gravité. Un bon test pour toute tentative d'élaboration d'une théorie de la gravité est donc la possibilité de calculer les caractéristiques thermodynamique des trous noirs, et en particulier leur entropie.

La gravité quantique à boucles réussit très bien ce test, mais d'une façon un peu facile, car la présence d'une constante libre dans la théorie, le paramètre de Immirzi  $\gamma$ , permet d'ajuster l'entropie à la valeur souhaitée.

Plus intéressante est l'interprétation physique que la théorie permet pour la thermodynamique des trous noirs. À tout moment, la géométrie (la « forme ») de l'horizon d'un trou noir fluctue, en raison des fluctuations quantiques et thermiques. Le calcul de l'entropie des trous noirs peut se réduire au calcul du nombre de possibles « formes » de l'horizon. Ce nombre est évidemment infini en théorie classique, parce qu'il y a un continuum de formes possibles, mais devient fini en théorie quantique, puisque la géométrie est discrète. Un gaz a des propriétés thermodynamiques bien définies parce qu'il est formé d'un nombre assez grand, quoique fini, de particules. De la même façon, l'horizon d'un trou noir a des propriétés thermodynamiques bien définies parce qu'il est formé d'un nombre assez grand de quanta d'espace. Chaque quantum de surface peut être représenté intuitivement comme l'intersection du réseau de spin – qui donne l'état quantique de l'espace – avec la surface du trou noir. L'image intuitive d'un trou noir quantique en théorie des boucles est donnée par la [figure 3](#).

La relation entre la thermodynamique, la Relativité Générale et la Mécanique Quantique reste encore un territoire largement inexploré et probablement de grande importance pour mieux comprendre l'Univers.

Il faut dire que ni l'une ni l'autre de ces deux applications de la gravité quantique à boucles n'utilise entièrement le formalisme de la théorie. Le calcul de l'entropie des trous noirs dépend surtout de la structure

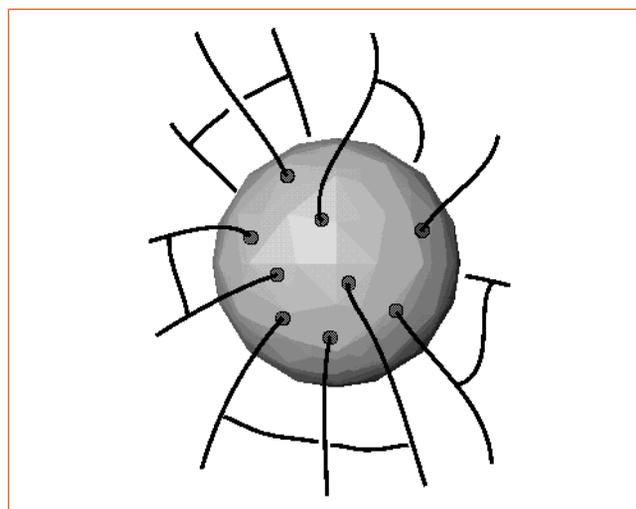


Figure 3 – L'horizon d'un trou noir, traversé par les liens du réseau de spin qui détermine sa géométrie.



## Encadré 4

**Boucles et Cordes**

Le nom de la théorie des « Boucles » autant que celui de la théorie des « Cordes » sont des restes d'étapes antérieures de la compréhension de chacune des deux théories. Dans le premier cas, on parle aujourd'hui plutôt de « graphes » que de boucles, et dans le deuxième cas on parle plutôt de « branes » que de cordes. Boucles et cordes sont des cas particuliers de graphes et branes.

Cela dit, quelle est, finalement, la différence intuitive entre une « boucle » de la théorie des boucles et une « corde » de la théorie des cordes ? À première vue les deux objets semblent assez similaires : dans les deux cas, il s'agit d'un objet quantique élémentaire à une dimension. Mais la différence est de poids : une « corde » est un objet qui bouge dans l'espace. Une « boucle » est un constituant de l'espace.

La différence est la même entre un fil de coton (corde) posé sur un T-shirt (espace), et un fil de coton qui forme le tissu même de l'espace (boucle).

Comme une formulation fondamentale de la théorie des cordes n'est pas encore accessible, on peut se demander si, après tout, il pourrait y avoir une relation entre ces deux approches majeures des problèmes de la gravité quantique. Est-ce que, par exemple, les méthodes de définition de la théorie quantique des champs sans référence à un espace-temps de fond pourraient jouer un rôle dans la formulation fondamentale de la théorie des cordes ? L'hypothèse a été considérée, mais pour le moment sans aucun résultat substantiel. Les relations entre les deux théories devraient probablement être mieux étudiées.



Cordes et Boucles : Une corde (gauche) vit dans l'espace, tandis que les boucles forment elles-mêmes l'espace (droite).

de l'espace des états, donc de la cinématique, tandis que la cosmologie quantique à boucles est fondée sur une approximation drastique, qui est davantage une réutilisation de certains résultats globaux qu'une véritable déduction à partir de la théorie. Le formalisme complet des mousses de spin a seulement jusqu'à présent été utilisé pour vérifier la limite classique de la théorie. Les véritables effets dynamiques quanta-gravitationnels restent encore à explorer.

### Est-ce que le problème de la gravitation quantique est résolu ?

Avons-nous résolu le problème de la gravitation quantique ? La réponse est non. Tout d'abord, une théorie ne devient crédible que lorsque des prédictions nouvelles et spécifiques de cette théorie sont confirmées par l'expérience. Elle demeure sinon provisoire et spéculative. Une partie importante de la recherche vise donc aujourd'hui à chercher des ponts entre le formalisme théorique et de possibles fenêtres d'observation. En première ligne de cette direction de recherche se trouve la cosmologie. Un

effort est en cours, particulièrement en France, pour déduire de la théorie des conséquences observables précises, dans le contexte cosmologique, en particulier sur le fond de rayonnement diffus.

La théorie présente de plus bien des aspects encore peu clairs, qui pourraient se révéler fatals. La plus importante des questions ouvertes concerne la convergence de la série perturbative dans laquelle les amplitudes de transition sont calculées. Pour obtenir ces amplitudes il faut choisir une mousse. Celles qui ont été calculées jusqu'ici sont en accord avec la bonne limite classique : elles sont compatibles avec la Relativité Générale ; mais ces calculs ont été effectués jusqu'à présent seulement sur des mousses simples, c'est-à-dire « en première approximation ». Les approximations suivantes vont-elles confirmer ou détruire ces résultats positifs ? Un risque existe, les approximations suivantes étant de plus en plus dominées par les corrections radiatives caractéristiques de la théorie quantique des champs.

Dans le contexte de la théorie des champs usuelle, ces corrections radiatives peuvent être infinies. Dans le contexte présent, le risque d'infinis n'existe pas, ni dans l'ultraviolet (c'est-à-dire à petite distance, à cause de la granularité de l'espace à l'échelle de Planck), ni dans l'infrarouge (c'est-à-dire à grande distance, grâce à la constante



cosmologique, qui limite les tailles possibles de quanta « grands »). Un théorème nous assure en effet que les amplitudes de transition sont finies sur n'importe quelle mousse. Mais le risque que les corrections radiatives, même finies, détruisent les bons résultats trouvés aux ordres plus bas et interfèrent avec la convergence de l'approximation, est réel. Tant que ces corrections radiatives ne sont pas mieux contrôlées, la cohérence de la théorie n'est pas démontrée. Il faut donc, pour le moment, considérer la théorie des boucles comme une possibilité intéressante à approfondir, et non comme un résultat établi, ni par une corroboration empirique directe, ni en tant que possible théorie complète du champ gravitationnel quantique.

La recherche suit également d'autres pistes, alternatives à la théorie des boucles, pour tenter d'éclaircir la physique quantique du champ gravitationnel. La concurrente la plus développée de la théorie des boucles, en termes d'investissement actuel de ressources, est la théorie des cordes, présentée dans le numéro 2010 des *Images de la Physique*. La théorie des cordes a des ambitions beaucoup plus étendues que la théorie des boucles : son objectif est d'être une théorie unifiée de toute la physique

élémentaire. Une autre piste est la description de la structure fine de l'espace temps avec la géométrie non commutative. Comme le problème reste ouvert, il est essentiel de ne pas se limiter à une seule direction de recherche, qui pourrait se révéler mal choisie.

Mais dans ce contexte la théorie des boucles, même avec ses imperfections présentes, représente aujourd'hui l'effort le plus abouti de construction d'un cadre mathématique complet et d'un cadre conceptuel simple et clair pour une théorie des propriétés quantiques de l'espace temps.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- Rovelli C., « Loop Quantum Gravity: the first twenty five years », *Class. Quantum Grav.*, **28**, 153002 (2011).  
<http://arxiv.org/abs/1102.3660>
- Gambini R., Pullin J., « A First Course in Loop Quantum Gravity », Oxford University Press (2011).
- Rovelli C., « Loop Quantum Gravity », Cambridge University Press (2004).

## Constantes universelles et limites du possible en physique

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM) CEA Saclay

**Résumé :** La prise en compte de quatre constantes universelles de la physique, la constante de la gravitation  $G$ , la vitesse de la lumière dans le vide  $c$ , la constante de Planck  $h$  et la constante de Boltzmann  $k$ , structure le cadre général de la physique. Ces constantes universelles traduisent des *principes restrictifs* : des impossibilités, qui s'imposent au sujet connaissant – à tout sujet connaissant – dans son rapport expérimental avec la réalité objective. A l'opposé du consensus interprétatif dominant, j'argumenterai sur la nécessité d'inclure parmi les constantes universelles fondamentales, la constante de Boltzmann, interprétée comme un quantum d'information, si l'on veut comprendre, d'un point de vue épistémologique, la portée du tournant informationnel, pris par l'interprétation de la physique fondamentale (physique quantique et cosmologie). Je donnerai un aperçu de ma conjecture selon laquelle la quantification de la relativité générale, qui est au fondement de la théorie géométrique de la gravitation, pourrait se faire à l'aide de trois quantifications, celle des interactions, celle de l'information et celle de la géométrie.

### Introduction

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, l'apogée de la physique classique, aboutissement de la révolution scientifique qui a vu naître puis se développer la science moderne, consistait en trois théories qui concrétisaient d'importantes synthèses ou unifications et qui permettaient de modéliser de façon satisfaisante l'ensemble des phénomènes alors observables : la théorie électromagnétique de la lumière de Faraday, Maxwell et Hertz qui unifiait les phénomènes électriques, magnétiques et optiques, la théorie de la gravitation universelle de Galilée et Newton qui unifiait mécanique terrestre et mécanique céleste et l'unification de la mécanique rationnelle et de la conception atomiste à l'aide de la mécanique analytique de Lagrange et Hamilton, de la théorie cinétique de la matière et de la thermodynamique statistique de Maxwell et Boltzmann. Les succès remportés avec ces trois théories étaient tels que Lord Kelvin (William Thomson), analysant en 1900 le champ d'investigation de la physique, annonçait que celle-ci était en voie d'achèvement à deux « petits nuages » près, dont il pensait qu'ils ne nécessiteraient que quelques ajustements pour être résorbés. Il s'agissait, voir la figure 1, de l'échec de la détection du mouvement de la terre dans l'éther (expérience de Michelson-Morley) et de l'absence d'explication théorique au spectre observé du corps noir, problèmes auxquels se sont rajoutés celui de l'effet photoélectrique et celui de la précession du périhélie de Mercure.

Comme nous allons le montrer, la prise en compte de quatre constantes universelles, la constante de la gravitation  $G$ , la vitesse de la lumière dans le vide  $c$ , la constante de Planck  $\hbar$ <sup>1</sup>, et la constante de Boltzmann  $k$ , est à l'origine des théories de la relativité et des quanta, grâce auxquelles les petits nuages ont été dissipés, et qui sont au fondement de la révolution scientifique du XX<sup>e</sup> siècle.

La structure en trépied du cadre théorique de la physique classique, telle qu'elle apparaît dans la figure 1, se maintient dans la physique du XX<sup>e</sup> siècle. Ce cadre comprend maintenant trois théories prenant chacune en compte deux de ces quatre constantes universelles et prolongeant les théories du cadre de la physique classique, ainsi (voir la figure 2) :

1. La *théorie quantique des champs* (constantes  $\hbar$  et  $c$ ) prolonge, englobe la théorie électromagnétique de la lumière et la redonne comme une approximation quasi-classique, et elle est au fondement de la physique de haute énergie qui explore, aux échelles subatomiques, la structure de la matière (constituants élémentaires et interactions fondamentales). La découverte en 2012 au CERN, avec le LHC, du boson de Higgs, clé de voûte du modèle standard de cette physique, est la marque d'une véritable apogée
2. La théorie de *la relativité générale* (constantes  $G$  et  $c$ ) prolonge, englobe et redonne comme une approximation non relativiste la théorie de la gravitation universelle de Newton. Elle est au fondement de la cosmologie moderne, qui, depuis le premier modèle du Big bang rendant compte de l'expansion de l'univers aux échelles extragalactiques, jusqu'à l'apogée actuelle de l'astrophysique observationnelle, s'est aussi dotée d'un authentique modèle cosmologique standard.
3. La statistique quantique (constantes  $\hbar$  et  $k$ ) prolonge la mécanique analytique, la théorie cinétique de la matière et la thermodynamique statistique et sert de base à la modélisation (ou à la simulation numérique) de tous les phénomènes qui, de l'échelle de l'atome à celle de la galaxie, relèvent de la physique statistique et à propos desquels les effets quantiques ne peuvent être négligés. Cette physique est le cadre de la consolidation phénoménologique des modèles standards de la physique de la structure de la matière et de la cosmologie en termes d'une cosmogonie scientifique dont l'objet, selon Georges Lemaître, « est de rechercher des conditions initiales idéalement simples d'où a pu résulter, par le jeu des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité<sup>2</sup>. » Alors que relativité générale et théorie

quantique des champs forment la base de ce que l'on pourrait appeler la physique des lois et structures fondamentales de l'univers, la statistique quantique est au fondement de la physique de l'émergence du monde observable à notre échelle.

En ce début de 21<sup>ème</sup> siècle, la situation de la physique n'est pas sans analogie avec celle qui prévalait il y a une centaine d'années, à l'orée de la double révolution scientifique de la relativité et des quanta. D'une part, les spectaculaires progrès de la physique des particules (découverte en 2012 du boson de Higgs, clé de voûte du modèle standard) et de la cosmologie observationnelle avec l'établissement d'un nouveau modèle standard, dit  $\Lambda$ CDM (pour Lambda Cold DarkMatter) ont porté la physique à une apogée au moins aussi importante que celle de la physique classique au tournant du XX<sup>e</sup> siècle. D'autre part, tout comme les efforts de Planck et Einstein pour réconcilier la thermodynamique et la théorie électromagnétique de la lumière ont débouché sur la mise en chantier de la physique quantique, la découverte inattendue de liens entre la thermodynamique et la relativité générale a fait entrevoir de nouveaux concepts, peut-être annonciateurs d'une nouvelle révolution scientifique, comme celui d'holographie et permis d'envisager une « route thermodynamique vers la cosmologie quantique. »

## **L'interprétation des constantes universelles en termes de principes de limitation**

### ***La vitesse de la lumière $c$***

Ce que l'on appelle usuellement *constantes fondamentales* et que l'on appelle ici plutôt *constantes universelles*, sont les valeurs universelles de quantités physiques (dimensionnées ou pas) qui entrent dans l'établissement de schémas théoriques destinés à décrire la réalité physique. Elles peuvent apparaître dans le cadre de certains modèles, comme c'est le cas, par exemple, des divers paramètres dont dépend le modèle standard de la physique des particules. Elles peuvent aussi permettre l'unification de certains domaines préalablement disjoints de la physique, comme c'est le cas, par exemple, du rôle joué par la charge de l'électron  $e$  et la vitesse de la lumière  $c$  dans l'unification de l'électromagnétisme et de l'optique. Elles peuvent aussi servir de facteurs de conversion entre certaines quantités physiques, comme c'est le cas de la constante de Boltzmann  $k$  qui, selon le consensus interprétatif dominant n'est qu'un facteur de conversion entre énergie et température, ou bien comme c'est le cas de la vitesse de la lumière  $c$  qui, selon Einstein,

« est [certes] une grandeur qui intervient en tant que ‘constante universelle’ dans les équations de la physique. Mais si on prend comme unité de temps, non plus la seconde, mais le temps que met la lumière pour parcourir 1 cm,  $c$  n’apparaît plus dans les équations. En ce sens on peut dire que la constante  $c$  n’est qu’une constante universelle apparente. Il est manifeste, et universellement admis, que l’on pourrait aussi éliminer deux autres constantes universelles en introduisant à la place du gramme et du centimètre, des unités ‘naturelles’ choisies de manière adéquate (par exemple, la masse et le rayon de l’électron)<sup>3</sup>. »

Mais, toujours dans son autobiographie scientifique, le même Einstein nous raconte comment il a découvert la théorie de la relativité, en prenant le contrepied de cette interprétation qui tend à dévaluer le rôle de la constante  $c$  et lui a attribué le rôle de refléter un principe d’impossibilité :

« J’avais devant les yeux le modèle de la thermodynamique dont le principe général s’énonçait ainsi : les lois de la nature sont ainsi faites qu’il est impossible de construire un *perpetuummobile* (du premier ou du second type). Mais comment trouver un principe général de ce genre? Au bout de dix ans de réflexion, ce principe émergea d’un paradoxe auquel je m’étais heurté à l’âge de seize ans. Si je poursuis un rayon lumineux à la vitesse  $c$  (vitesse de la lumière dans le vide), je devrais percevoir ce rayon de lumière comme un champ électromagnétique oscillant sur place dans l’espace; or il semble bien qu’il n’existe rien de tel ni dans le domaine de l’expérience, ni selon les équations de Maxwell. (...) Le principe général de la théorie de la relativité restreinte est contenu dans le postulat suivant : les lois de la physique sont invariantes par les transformations de Lorentz (lors du passage d’un système inertiel à n’importe quel autre système inertiel). Il s’agit, pour les lois de la nature, d’un principe restrictif comparable au principe de non-existence d’un *perpetuum mobile* qui est à la base de la thermodynamique<sup>4</sup>. »

### **La constante de Planck $\hbar$**

C’est la constante de Planck  $\hbar$  qui se prête le mieux à une interprétation en termes de principe fondamental d’impossibilité, comme le montrent les deux citations qui suivent :

« L’étude des phénomènes de la microphysique à l’échelle atomique que nous avons essayé de retracer a amené le physicien du XX<sup>e</sup> siècle à des actes de renoncement importants :

Il est impossible de discerner les corpuscules de même espèce les uns des autres.

Il est impossible d’assigner une trajectoire déterminée à un corpuscule de la microphysique.

Il est nécessaire, en microphysique, de renoncer au déterminisme qui caractérise les événements de la macro-physique.

Il est impossible, à l’observateur humain, de connaître le déroulement de la ‘réalité objective’. Il ne peut en acquérir qu’une connaissance discontinue, limitée aux processus d’observation. Chaque observation est une intervention qui altère ce déroulement. » *Alfred Kastler*<sup>5</sup>

« La caractéristique nouvelle de la physique atomique due au caractère fini du quantum d’action – qui exclut une subdivision des processus quantiques individuels – est l’impossibilité de prendre en

considération par des corrections déterminables l'influence entière des instruments de mesure sur les objets mesurés. » *Wolfgang Pauli*<sup>6</sup>

### **La constante de la gravitation G**

La constante  $G$  permet, dans la théorie de la gravitation universelle de Newton, d'unifier mécanique terrestre et mécanique céleste. Dans l'élaboration de sa théorie de la relativité générale, Einstein l'associe à ce qu'il appelle le *principe d'équivalence* selon lequel il est impossible de distinguer un état de mouvement non-inertiel (i.e. comportant au moins une accélération) d'un état de repos dans un champ gravitationnel adéquat. Dans l'équation d'Einstein qui exprime la relativité générale, elle intervient dans le facteur de proportionnalité  $\kappa$  reliant le tenseur de courbure de l'espace-temps qui figure dans son membre de gauche au tenseur d'énergie impulsion de la matière qui figure dans son membre de droite :

$$R_{\mu\nu}(x) - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}(x)R = -\kappa T_{\mu\nu}(x)$$

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^2}$$

### **Les échelles de Planck**

En 1899, Planck qui connaissait la constante qui porte son nom, avant même d'avoir établi sa fameuse formule sur le rayonnement du corps noir dans laquelle elle intervient de manière déterminante, avait remarqué qu'à partir de  $G$ ,  $c$  et  $\hbar$  il était possible de définir une longueur  $L_P$ , une durée  $T_P$  et une énergie  $E_P$  que l'on appelle la 'longueur, la durée et l'énergie de Planck', qui représentent les échelles auxquelles il faudrait, dans le cadre d'une hypothétique théorie de la gravitation quantique, tenir compte des effets quantiques dans la théorie de la gravitation, ou tenir compte des effets de courbure de l'espace-temps en physique quantique. Notons que Planck qui connaissait aussi la constante de Boltzmann (puisque c'est lui qui lui a donné ce nom !) a aussi introduit une 'température de Planck',  $\Theta_P = E_P / k \approx 1.410^{32} K$ , qui serait l'énergie moyenne par particule en gravitation quantique.

$$L_P = \sqrt{\hbar G / c^3} \approx 10^{-35} m$$

$$T_P = \sqrt{\hbar G / c^5} \approx 10^{-43} s$$

$$E_P = \sqrt{\hbar c^5 / G} \approx 10^{19} GeV$$

$$M_P = E_P / c^2 \approx 2.2 \cdot 10^{-8} kg$$

$$\Theta_P = E_P / k \approx 1.410^{32} K$$

## Le consensus interprétatif dominant

A propos des constantes universelles, le consensus interprétatif<sup>7</sup> qui, jusqu'à présent reste dominant, consiste à limiter à trois le nombre des grandeurs physiques fondamentales, à savoir celles de la mécanique classique, longueur, durée et énergie. L'entropie, ou son négatif, l'information, n'est pas considérée comme fondamentale, et donc, la constante de Boltzmann  $k$ , qui a le contenu dimensionnel d'une entropie n'est pas incluse dans le jeu des constantes universelles fondamentales. Mais avec trois grandeurs fondamentales et trois constantes dimensionnées, les échelles de Planck pourraient permettre d'en fixer les unités, et alors toute la physique pourrait s'exprimer entièrement au moyen de constantes sans dimension. C'est un peu ce qu'Einstein préconisait à la suite du texte où il présentait la constante  $c$  comme une constante universelle apparente :

« Imaginons que cela ait été réalisé [élimination de deux constantes universelles au profit, par exemple de la masse et du rayon de l'électron] ; alors n'apparaissent plus, dans les équations fondamentales de la physique que des constantes 'sans dimensions'. Au sujet de ces dernières, j'aimerais énoncer un principe qui, provisoirement, ne peut être fondé sur rien d'autre que sur ma confiance en la simplicité, ou plutôt l'intelligibilité, de la nature: il n'existe pas de constantes arbitraires de ce type. Autrement dit: la nature est ainsi faite qu'il est logiquement possible d'établir des lois si fortement définies que seules des constantes susceptibles d'une détermination rationnelle complète apparaissent dans ces lois (il n'y a donc pas de constantes dont les valeurs numériques puissent être modifiées sans que la théorie soit détruite)<sup>8</sup>. »

Une telle interprétation est celle du « camp à zéro constante » dans lequel se range :

M. J. Duff :

« Je soutiens que les lois de la physique devraient être indépendantes du choix des unités ou du dispositif de mesure. C'est le cas si elles s'expriment en termes de nombres sans dimensions tels que la constante de structure fine  $\alpha$ , par exemple. Le modèle standard de la physique des particules a 19 tels paramètres sans dimensions sur les valeurs desquels tous les observateurs peuvent s'accorder, indépendamment de quelles horloges, règles, échelles...ils emploient pour les mesurer. Les constantes dimensionnées, d'autre part, comme  $\hbar$ ,  $c$ ,  $G$ ,  $e$ ,  $k$  ..., sont de simples constructions humaines dont le nombre et les valeurs diffèrent selon le choix des unités. En ce sens, ne sont « fondamentales » que les constantes sans dimension<sup>9</sup>. »

Sans aller jusqu'à cette position extrême, le consensus interprétatif intègre les deux théories à deux constantes du trépied théorique de la figure 2, la théorie quantique des champs et la relativité générale, à la base des lois et structures fondamentales de la physique, mais il est silencieux à propos du troisième pied, celui de la statistique quantique, à la base de la physique de l'émergence, et le remplace par la recherche de ce qui est présenté comme le graal de la physique théorique, la « théorie de tout » qui unifierait relativité générale et

physique quantique dans une théorie de la gravitation quantique. Le schéma qui est souvent utilisé pour représenter la structuration de la physique théorique au moyen de la prise en compte des trois constantes universelles est, voir la figure 3, le cube des théories, imaginé dès 1928 par Gamow, Ivanenko, et Landau<sup>10</sup>.

## **Le tournant informationnel de l'interprétation de la physique quantique et de la cosmologie**

### ***La constante de Boltzmann k***

Il est intéressant de noter que c'est à partir d'une analogie avec la thermodynamique, le domaine de la physique dans lequel c'est la constante de Boltzmann  $k$  qui joue le rôle déterminant qu'Einstein a trouvé le fil conducteur qui l'a amené à la théorie de la relativité à partir de ce qu'il appelle un *principe restrictif*, c'est-à-dire, dans le cas présent, l'impossibilité de se déplacer à la même vitesse que la lumière (dans les transformations de Lorentz qui laissent invariantes les lois de la physique, la vitesse de la lumière est indépassable.) Or, c'est parce que la thermodynamique, avec ses deux principes restrictifs, est l'archétype d'une théorie à principes, qu'il peut être dommageable, du point de vue de l'épistémologie de la physique, d'omettre l'entropie ou l'information dans la liste des grandeurs physiques fondamentales et donc d'exclure la constante de Boltzmann du jeu des constantes universelles fondamentales.

C'est ce que je me suis gardé de faire depuis le livre sur les constantes universelles que j'ai publié en 1991 et qui a été traduit et réédité plusieurs fois<sup>11</sup>, en passant par l'article faisant suite à ma participation, en 2007, à l'école internationale de physique théorique des Houches sur la métrologie fondamentale<sup>12</sup>. Je me suis trouvé encore conforté dans cette position par la lecture d'un article récent de D. Deutsch et C. Marletto qui « présente une théorie de l'information ne visant qu'à distinguer parmi les transformations de systèmes physiques celles qui sont possibles et celles qui sont impossibles – c'est-à-dire dans les termes d'une théorie-constructeur (*conductortheory*)<sup>13</sup> –

Le principal argument en faveur de cette position, que je voudrais ici développer, réside dans la nécessité de prendre en compte ce que Grinbaum<sup>14</sup> appelle le *tournant informationnel* qu'a pris l'interprétation de la physique quantique, un tournant qui, à mon avis, a aussi été pris par l'interprétation de la cosmologie.

### ***Le renouveau de l'interprétation de la mécanique quantique***

Phénomène, conditions de l'observation et information

Au cœur de l'interprétation dite de Copenhague de la mécanique quantique se trouve la nécessité de prendre en compte, dans l'épistémologie<sup>a</sup> de la physique quantique, les conditions de l'observation incluant la totalité du dispositif expérimental. C'est ce qu'exprimait N. Bohr dans sa contribution au numéro spécial de la revue *Dialectica* consacré en 1948 à la notion de complémentarité :

En ce qui concerne la question de la complétude du mode de description en mécanique quantique, on doit reconnaître que nous avons affaire à un schéma mathématiquement cohérent qui soit adapté à tout processus de mesure et dont l'adéquation ne puisse seulement être jugée qu'à partir d'une comparaison des résultats prédits avec les observations réelles. À cet égard, il est essentiel de noter que, dans n'importe quelle application bien définie de la mécanique quantique, il est nécessaire de spécifier la disposition expérimentale dans sa totalité et que, en particulier, la possibilité de disposer des paramètres qui, en mécanique quantique, définissent le problème traité, ne fait que traduire notre liberté de construire et de manipuler le dispositif de mesure, ce qui donc signifie la liberté de choisir entre les différents types complémentaires de phénomènes que nous souhaitons étudier.

Et, un peu plus loin, N. Bohr revenait sur le soin qu'il est, selon lui, impératif de porter aux questions de terminologie, et en particulier, sur la nécessité de redéfinir le concept particulièrement important de la philosophie de la connaissance, celui de *phénomène*

« Comme manière plus appropriée d'expression, on peut fortement préconiser de n'utiliser le mot phénomène que pour se référer exclusivement aux observations obtenues dans des circonstances spécifiques incluant un compte-rendu de l'expérience dans sa totalité<sup>15</sup>. »

### La théorie quantique de l'information et la réponse aux critiques d'Einstein

Cette intervention de N. Bohr visait surtout à répondre aux vives critiques d'ordre épistémologique qu'Einstein, reprenant dans le même numéro de *Dialectica* les arguments du fameux article EPR<sup>16</sup>, adressait à la physique quantique, à propos de ce qu'il affirmait être son incapacité à rendre compte de façon complète de la réalité physique sauf à violer un principe qui lui paraissait incontournable, celui des actions par contiguïté, qu'il exprimait ainsi :

« Et ce qui apparaît essentiel dans cet arrangement des choses introduites en physique, c'est qu'à un moment donné ces choses revendiquent une existence autonome dans la mesure où elles se trouvent dans des « parties différentes de l'espace ». Sans cette hypothèse d'existence autonome (un « être ainsi ») des choses spatialement distantes – hypothèse issue, à l'origine, de notre expérience de tous les jours –, la pensée physique, au sens qui nous est habituel, serait impossible. On ne voit pas non plus comment, sans cette disjonction bien nette, il serait possible de formuler des lois physiques et de les vérifier. La théorie du champ a développé à l'extrême ce principe, dans la mesure même où les choses

---

<sup>a</sup> Le terme *interprétation* est à prendre ici au sens épistémologique et non pas comme signifiant un simple mode d'emploi du formalisme pour rendre compte des faits expérimentaux. En réalité, en tant que mode d'emploi, l'interprétation de Copenhague donnait, et continue à donner entière satisfaction. D'un point de vue épistémologique, les controverses sont toujours aussi vives.

élémentaires, existant de façon indépendante les unes des autres, sur lesquelles elle se fonde, ainsi que les lois élémentaires qu'elle postule pour celles-ci, y sont localisées à l'intérieur d'éléments spatiaux (à quatre dimensions) infiniment petits.

L'idée qui caractérise l'indépendance relative des choses distantes spatialement (A et B) est la suivante : toute influence extérieure s'exerçant sur A n'a aucun effet sur B qui ne soit médiatisé. Ce principe est appelé *principe des actions par contiguïté* et seule la théorie du champ en a fait une application conséquente. L'abolition complète de ce principe fondamental rendrait impensable l'existence de systèmes (quasi) fermés et donc l'établissement de lois empiriquement vérifiables, au sens habituel du terme<sup>17</sup>. »

Quant au critère de complétude, voici comment Einstein le formulait, en 1935 dans une lettre à Schrödinger dans laquelle il donnait quelques explications complémentaires à propos de l'article EPR

« En théorie quantique, on décrit un état réel d'un système par une fonction normée des coordonnées  $\psi$  (de l'espace de configuration). L'évolution dans le temps est donnée de façon non équivoque par l'équation de Schrödinger. On aimerait bien pouvoir dire :  $\psi$  est coordonnée de façon biunivoque à l'état réel du système réel. Le caractère statistique des résultats de mesure est à mettre exclusivement au compte des appareils de mesure. Quand ça marche, je parle de description complète de la réalité par la théorie. Mais, si une telle interprétation s'avère impraticable, je dis que la description théorique est *incomplète*<sup>18</sup>. »

Le tournant informationnel qui a permis le renouveau de l'interprétation de la mécanique quantique, et qui a pu permettre de répondre aux critiques d'ordre épistémologiques d'Einstein, a consisté à reconnaître le rôle irremplaçable d'une véritable théorie de l'information ne serait-ce que pour donner un sens précis à la prise en compte des conditions de l'observation

### L'interprétation informationnelle de l'entropie

En réalité, le tournant informationnel a été amorcé dès le milieu du XX<sup>e</sup> siècle avec la *théorie de l'information de Shannon*<sup>19</sup> et l'interprétation informationnelle du second principe de la thermodynamique : l'entropie est interprétée comme l'information, considérée comme le négatif de l'entropie ou *néguentropie*, qui est sacrifiée lorsque, à cause de l'énormité du nombre de configurations microscopiques, appelées complexions, donnant lieu au même macro-état, on doit se contenter pour décrire l'état du système de moyennes statistiques. L'équation fondamentale de la thermodynamique (inscrite comme épitaphe sur la tombe de Boltzmann), relie l'entropie au logarithme du nombre  $W$  de complexions

$$S = k \text{Log } W .$$

Cette équation a été utilisée par Einstein en 1905, de deux façons différentes, soit à partir d'une évaluation des probabilités, pour en déduire l'entropie (théorie du mouvement

brownien<sup>20</sup>), soit à partir de la fonction entropie, déterminée empiriquement, pour déterminer la probabilité statistique des états individuels (réinterprétation de la loi du corps noir de Planck en termes de quanta de lumière<sup>21</sup>).

### Le démon de Maxwell exorcisé

La quantification de l'information est préconisée par toutes les approches qui font jouer à l'information un rôle fondamental. Voir, par exemple la déclaration de Zeilinger dans un hommage à Wheeler, le père de l'aphorisme '*itfrom bit*' : « En conclusion, on peut très bien dire que l'information est le noyau irréductible dont tout le reste découle. Ainsi, à la question pourquoi la nature apparaît-elle quantifiée, la réponse est simplement que c'est une conséquence du fait que l'information est quantifiée par nécessité. »

Comme le nombre de complexions, dans l'équation de Boltzmann, est nécessairement un nombre entier, et que, en l'absence de mouvement, c'est-à-dire à température nulle, on n'a qu'une complexion, il semblerait que  $k\text{Log}2$  puisse être interprété comme un « quantum d'entropie », i.e. qu'il n'existerait pas d'entropie, et donc pas d'information entre  $k\text{Log}2$  et 0. C'est à cette conclusion qu'est parvenu R. Landauer lorsqu'il s'est attaché à « exorciser le démon de Maxwell », ce personnage allégorique qui serait capable de trier les molécules d'un gaz à l'équilibre selon leurs vitesses et de créer, sans dépense d'énergie une différence de température, violant ainsi le second principe de la thermodynamique. Selon lui

« L'acte thermodynamiquement coûteux, qui empêche le démon de violer le second principe, n'est pas (comme cela est souvent supposé) la mesure par laquelle le démon acquiert une information sur la molécule triée, mais plutôt l'opération de réinitialisation par laquelle cette information est détruite en vue de faire la prochaine mesure<sup>22</sup>. »

Cette information, nécessairement détruite, est le coût en entropie d'un bit d'information, c'est un quantum d'entropie ou d'information, évalué à  $k\text{Log}2$ .

### Théorie quantique de l'information et décohérence, la réponse aux critiques d'Einstein

S'il existe un quantum d'entropie ou d'information, alors la théorie classique (à la Shannon) de l'information qui est au fondement de la thermodynamique statistique, adaptée à la description des systèmes à très grand nombre de degrés de liberté est inadaptée à la description des systèmes quantiques à petit nombre de degrés de liberté. La théorie de l'information à mettre en relation avec la mécanique quantique pour renouveler son interprétation épistémologique est ce que l'on appelle la *théorie quantique de l'information*.

Dans cette théorie, le quantum d'information est porté par un système quantique à deux états (les états de polarisation d'un électron ou d'un photon, par exemple), ce que l'on

appelle un *qubit* (pour ‘quantum bit’) que D. Deutsch et P. Hayden définissent ainsi dans l’article dans lequel ils *affirment*<sup>b</sup> *démontrer que la mécanique quantique obéit au principe des actions par contiguïté* :

« Lorsqu’il est utilisé pour stocker ou transmettre des données discrètes, comme les valeurs de nombres entiers, à une destinataire inconnu, la capacité d’un qubit est exactement un bit, en d’autres termes, il porte l’une des deux valeurs possibles ; de plus, tout observateur qui sait de quelle observable la valeur est stockée dans le qubit, peut découvrir cette valeur en mesurant cette observable. Cependant, les états dans lesquels le qubit ‘porte une valeur’ ne sont en ce sens qu’une paire isolée dans un continuum d’états possibles. Par conséquent il y a beaucoup plus qu’un bit d’information dans un qubit, même si la plupart de ces bits ne sont pas accessibles par des mesures effectuées sur ce seul qubit<sup>23</sup>. »

Selon l’interprétation de la physique quantique développée par M. Gell-Mann et J. Hartle<sup>24</sup>, l’objet de la physique quantique est d’évaluer les probabilités de certaines séquences d’événements ou *histoires*, concernant un système quasi-isolé. Ces probabilités sont évaluées à partir d’une intégrale fonctionnelle (appelée par R. Feynman, *intégrale des chemins*) portant sur toutes les histoires envisageables. Notons que ces probabilités sont des probabilités *a priori*, et non pas des probabilités statistiques, c’est-à-dire qu’elles ne relèvent pas de la théorie classique de l’information, mais qu’elles relèvent plutôt de la théorie quantique de l’information. Pour que ces probabilités puissent être utilisées à bon escient dans le traitement statistique de mesures répétées, il apparaît nécessaire de procéder à ces mesures avec un *grain* suffisamment *grossier* (*coarsegraining*)

« pour que l’intégration sur tous les chemins et variables auxquels on ne s’intéresse pas détruise, avec une précision suffisante, les interférences entre histoires qui ruinteraie les axiomes de la théorie classique des probabilités (comme l’attribution de probabilités additives à des événements indépendants. Les séquences d’événements auxquelles on peut attribuer des probabilités sont appelées des *histoires décohérentes*, le processus irréversible d’élimination par intégration des interférences est appelé *décohérence*, et l’intégrale de chemins conduisant aux probabilités, la fonctionnelle de *décohérence*.<sup>25</sup> »

Comme ce grain suffisamment grossier ne concerne que les mesures, on peut dire que cette interprétation respecte le critère de complétude d’Einstein, cité ci-dessus.

En ce qui concerne l’interprétation de la physique quantique, le bilan du tournant informationnel est que la complémentarité doit plutôt être considérée comme celle entre les moyens d’observation relevant de la théorie quantique de l’information et le système observé relevant de la mécanique quantique ou de la théorie quantique des champs, que comme celle

---

<sup>b</sup> Plus de quinze ans après la publication de cet article, les débats sont encore très vifs à propos de la validité de cette affirmation. Il n’est pas possible, dans le cadre du présent exposé, d’entrer dans un compte-rendu détaillé des points de vue qui s’affrontent dans ce débat. Je me dois de préciser que mon accord avec le point de vue de Deutsch et Hayden n’engage que moi.

entre deux limites classiquement contradictoires (ondes ou corpuscules, par exemple) de la physique quantique.

### ***Le tournant informationnel en cosmologie***

#### L'Univers entier et notre univers observable

La gravitation est la seule interaction capable de tellement courber l'espace-temps qu'elle peut provoquer la formation d'une « membrane à sens unique », un horizon informationnel capable de cacher à la perception d'observateurs situés en deçà de lui l'information qui se trouverait au-delà de lui. En cosmologie, à cause de l'expansion de l'Univers, il existe un horizon, appelé *horizon des particules*, défini par la distance au-delà de laquelle se trouvent les galaxies dont la lumière (ou tout autre information, sous quelque forme que ce soit) n'a pas eu le temps de nous parvenir. Au-delà de cet horizon, pourrait se situer, dans le cas où la constante cosmologique serait différente de zéro, un autre horizon, appelé *horizon des événements*, défini par la distance au-delà de laquelle aucune information ne peut ni ne pourra jamais nous parvenir. C'est pourquoi la nécessité de tenir compte des conditions de l'observation n'est pas moins importante en cosmologie qu'en physique des constituants de la matière : la cosmologie scientifique ne peut prétendre décrire l'Univers entier (que je note avec un  $U$  majuscule) sans tenir compte des conditions de l'observation de sa partie qui nous est observable (que je note univers avec en  $u$  minuscule).

#### Une route thermodynamique vers la cosmologie quantique

En théorie de la relativité générale, l'archétype d'un objet présentant un horizon des événements est le *trou noir* : son horizon des événements est la surface au-delà de laquelle toute matière (et donc toute information) est irrémédiablement soustraite à la perception. Mais, comme l'information inaccessible est, en thermodynamique statistique, équivalente à de l'entropie, il semble naturel d'associer de l'entropie à un tel horizon. J.D. Bekenstein<sup>26</sup> détermine en 1973 l'expression précise de l'entropie du trou noir à l'aide d'arguments de la physique quantique. Reprenons son raisonnement. Un bit d'information  $k \ln 2$  est injecté dans le trou noir sous la forme d'un photon dont la longueur d'onde est égale au rayon (dit de *Schwarzschild*)  $R = 2GM / c^2$  de l'horizon. L'augmentation d'énergie correspondante est donnée par la relation d'Einstein,  $\Delta E = h\nu = h c / R$ . À l'augmentation de masse correspondante  $\Delta M = \Delta E / c^2$ , correspond une augmentation du rayon de l'horizon  $\Delta R = 2\Delta M G / c^2 = 2hG / c^3 R$ , et ainsi à une augmentation de l'aire valant  $\Delta A = 8\pi R \Delta R = 4hG / c^3 = 4A_p$ . Cette aire n'est rien d'autre que quatre fois l'aire de Planck  $A_p$ . Elle est indépendante des caractéristiques particulières du trou noir (comme sa masse). À

partir de cette évaluation différentielle, on peut remonter à l'entropie totale du trou noir en notant que l'entropie d'un trou noir de taille nulle étant nulle, il n'y a pas de constante d'intégration. On s'attend donc à ce que l'entropie totale du trou noir soit égale à  $S = \eta k \text{Ln } 2A/4A_p$  où la constante inconnue  $\eta$  est d'ordre 1. Par ailleurs, Hawking<sup>27</sup> a montré qu'il est alors valeur de la constante inconnue  $\eta$ . On trouve alors que  $S = k \frac{A}{4A_p}$ .

L'apparition de l'échelle de Planck dans l'expression de l'entropie et de la température de l'horizon du trou noir montre que, vraisemblablement la physique du trou noir relève de la gravitation quantique ; c'est pourquoi cette physique est devenue un laboratoire théorique privilégié pour explorer des voies conduisant à la quantification de la gravitation.

Mais, comme en cosmologie les horizons sont inévitables, on peut aussi espérer ouvrir avec la thermodynamique des horizons, une route vers la *cosmologique quantique*. Comme la formation d'un trou noir est la façon la plus efficace de comprimer de la matière dans un certain volume, l'entropie de Bekenstein apparaît comme la borne supérieure de l'information qui peut être contenue dans une sphère d'espace-temps. Cette borne supérieure s'exprime à l'aide du *principe holographique*<sup>28</sup> : « Combien de degrés de liberté y-a-t-il dans la nature au niveau le plus fondamental ? Le principe holographique répond à cette question en termes d'aires de surfaces dans l'espace-temps (...) Une région comportant une frontière d'aire  $A$  (en unités d'aire de Planck) est complètement décrite par au plus  $A/4$  degrés de liberté, soit un bit d'information par aire de Planck.<sup>29</sup> »

La connexion gravité-thermodynamique a été découverte par T. Jacobson<sup>30</sup> qui a utilisé la proportionnalité de l'entropie et de l'aire de d'un horizon (pas nécessairement celui d'un trou noir) et pour assimiler l'équation d'Einstein à une équation d'état. Les implications de cette connexion ont été analysées de façon approfondie par T. Padmanabhan<sup>31</sup>.

## Une conjecture interprétative, la complémentarité générale

Pour conclure cet article sur les constantes universelles et les limites du possible en physique, je voudrais donner un aperçu de la conjecture interprétative<sup>c</sup> que j'ai ébauchée récemment<sup>32</sup> et sur laquelle je reviendrai sans doute dans une publication plus approfondie et plus technique.

---

<sup>c</sup> Selon cette conjecture, la complémentarité générale serait en quelque sorte à la complémentarité de l'interprétation de Copenhague ce que la relativité générale est à la relativité restreinte

Cette conjecture repose sur une interprétation des constantes universelle utilisant un nouveau cube des théories, le *cube de la triple quantification* (voir la figure 4). Par rapport au cube des théories de la figure 3, j'ai remplacé l'axe  $1/c$  par l'axe du quantum d'information  $k_B = k \text{Log} 2(c)$ , traité maintenant comme un facteur de conversion est posé à 1). Les deux autres axes sont celui du quantum d'action,  $\hbar$  et celui du quantum d'aire d'espace-temps<sup>d</sup> $A_p$ . A l'origine du cube, la mécanique newtonienne est remplacée par la relativité générale classique ( $A_p \rightarrow 0; \hbar \rightarrow 0; A_p / \hbar \rightarrow G$ ). D'après ma conjecture, la quantification de la relativité générale, au fondement d'une théorie géométrique de la gravitation, se ferait au prix d'une *triple quantification*, avec trois théories à un quantum,

- la théorie quantique des interactions (i. e. la théorie quantique des champs, rappelons-nous que nous avons posé  $c$  à 1) sur l'axe  $\hbar$ ,
- la théorie quantique de l'information sur l'axe  $k_B$
- et la théorie quantique de la géométrie spatio-temporelle sur l'axe  $A_p$ .

Aux sommets du cube situés dans les plans du système de coordonnées, figurent maintenant les trois complémentarités de paires de quanta

- la complémentarité interaction-information ( $\hbar, k_B$ ), l'objet de ce que j'ai appelé plus haut le tournant informationnel de l'interprétation de la physique quantique
- la complémentarité information-géométrie ( $A_p, k_B$ ), au fondement du principe holographique
- la complémentarité interaction-géométrie ( $\hbar, A_p$ ), qui pourrait généraliser, au niveau quantique le principe d'équivalence.

Au sommet opposé à l'origine du cube se trouverait la théorie triplement quantique de la gravitation.

Dans la figure 5, intitulée *le paysage phénoménologique de la cosmologie quantique*, j'ai repris le trépied théorique de la physique du XX<sup>e</sup> siècle (de la figure 2), en montrant comme sur la figure 1 avec les « petits nuages », quels ont les problèmes qui se posent aux intersections des théories du trépied, qui nécessitent d'explorer l'au-delà des modèles standards, et pour lesquels la complémentarité générale pourrait permettre d'ouvrir quelques pistes de recherche. Pour compléter cette figure, je me contenterai de deux conseils de lecture au sein d'une littérature foisonnante et trop ardue pour un public non spécialisé : pour la complémentarité interaction-information, la thèse d'Alexei Grinbaum<sup>33</sup> et pour la

---

<sup>d</sup>En réalité,  $A_p = L_p T_p = \hbar G / c^4$

complémentarité information-géométrie, un article très accessible à un large public reliant la thermodynamique de l'espace-temps à la théorie quantique de l'information<sup>34</sup>

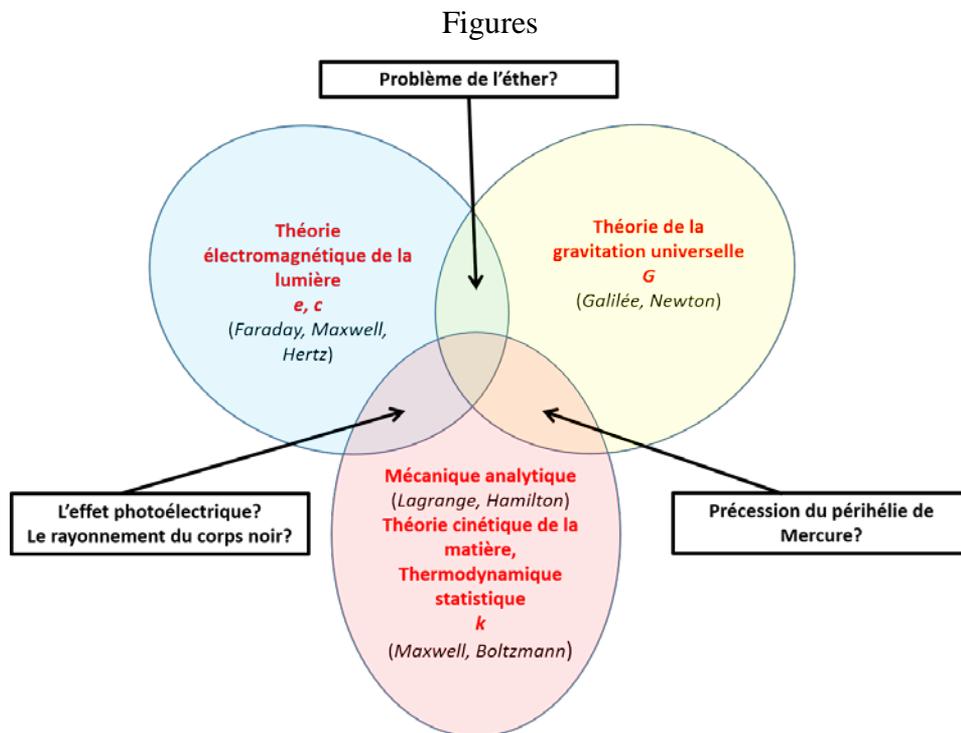


Figure 1: L'apogée de la physique classique au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, le trépied théorique et les « petits nuages »

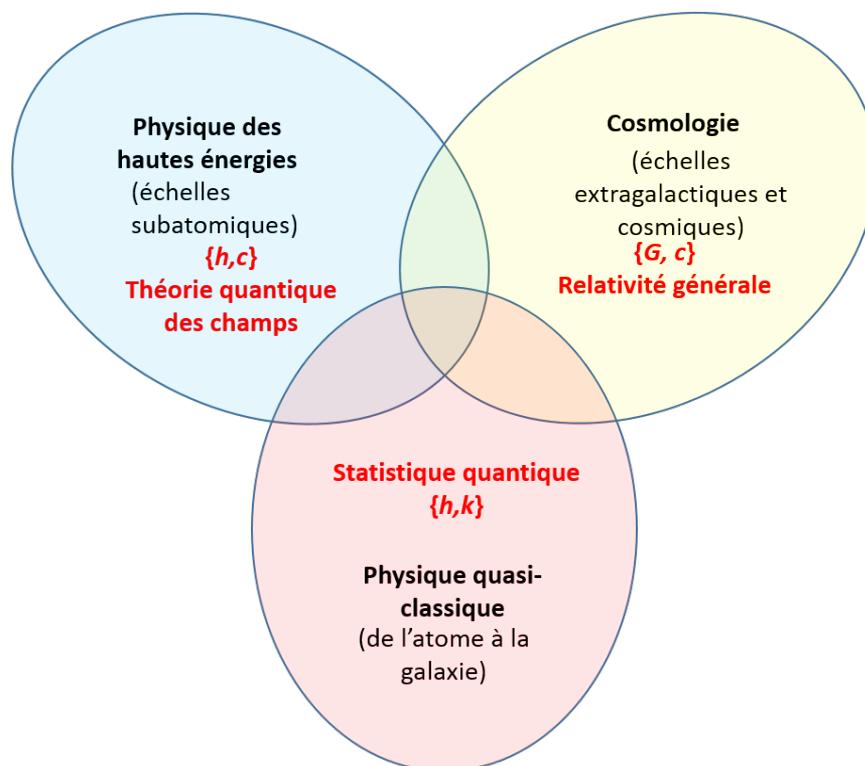


Figure 2 : Le trépied théorique de la physique du XX<sup>e</sup> siècle : trois théories à deux constantes et leurs domaines d'applicabilité

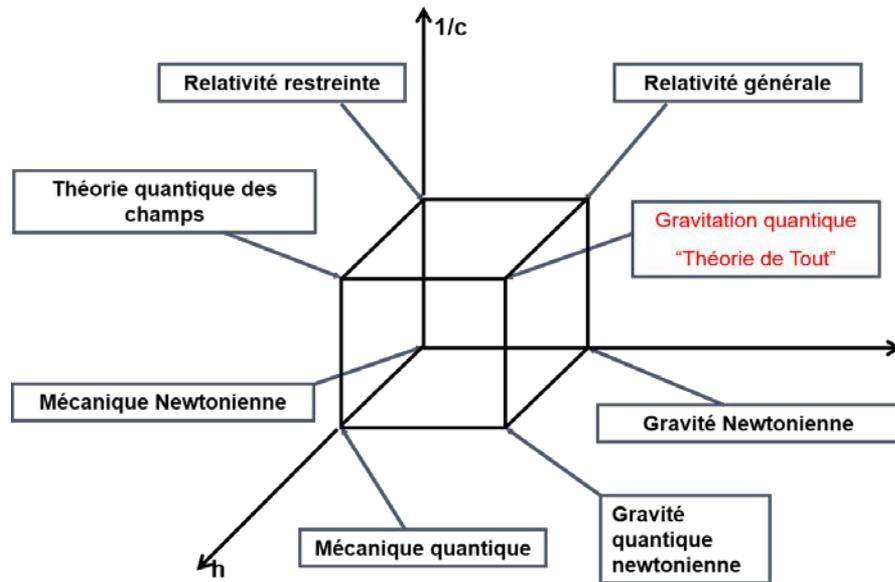


Figure 3 Le cube des théories

Représentation dans un schéma à trois dimensions de la structuration des théories en fonction de la prise en compte des trois constantes universelles, la vitesse de la lumière  $c$  (axe  $1/c$ ), la constante de Planck (axe  $h$ ) et la constante de la gravitation (axe  $G$ ). 0 l'origine du système d'axes est placée la mécanique newtonienne ; le long des axes sont placées les théories où les constantes sont séparément prises en compte et posées à 1 ; dans les plans, les théories où les constantes sont prises en compte par paires et sur le sommet du cube, est placée, la « théorie de tout », celle de la gravitation quantique.

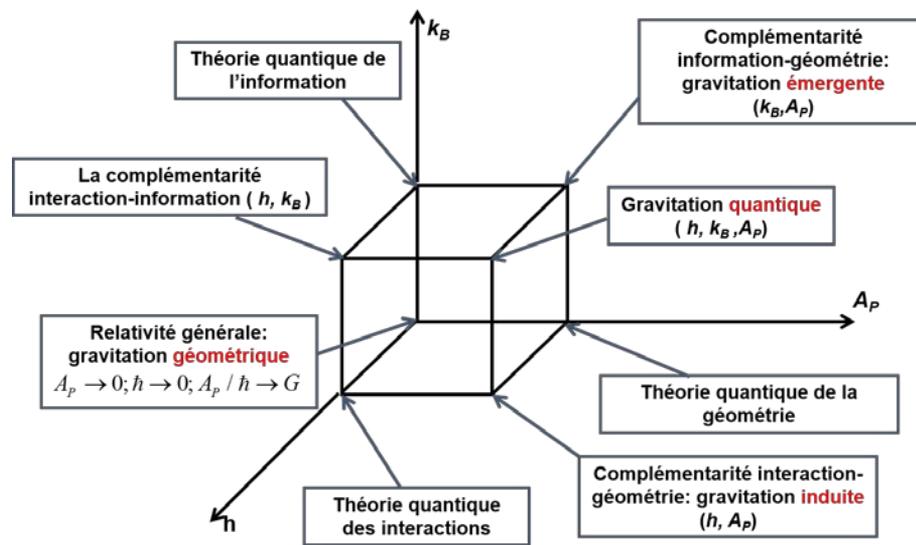


Figure 4 : Le cube de la triple quantification

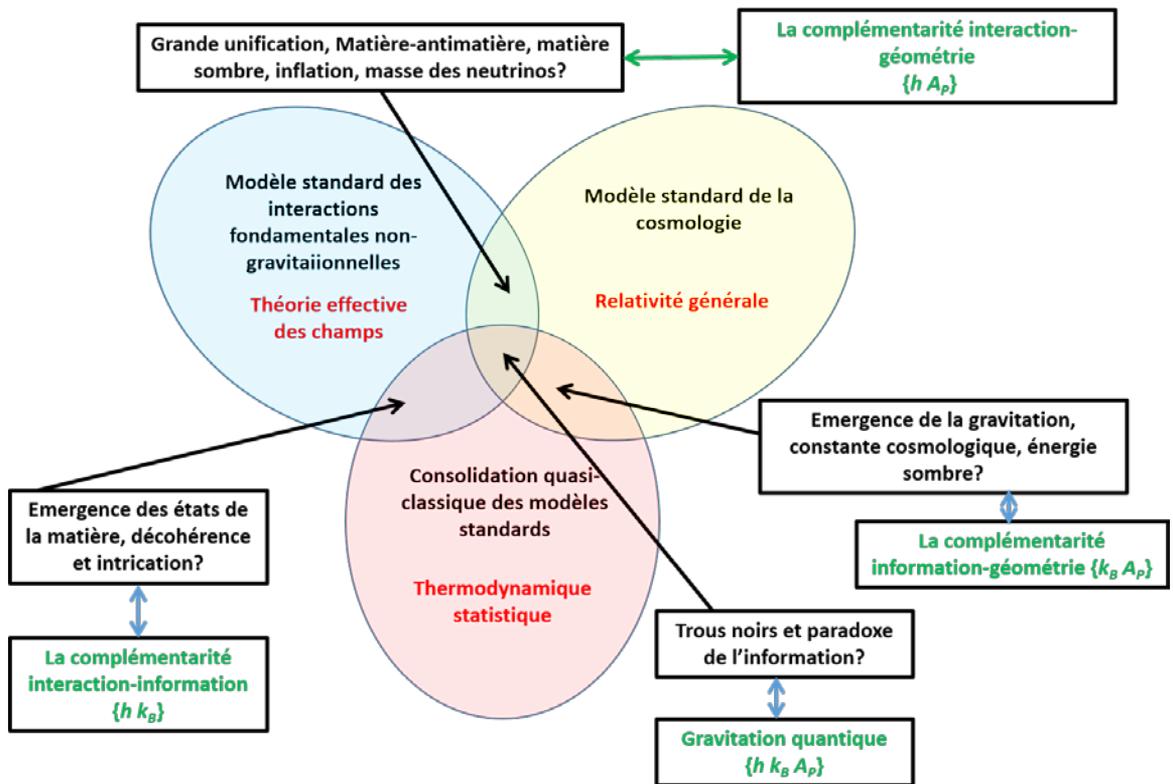


Figure 5 Paysage phénoménologique de la cosmologie quantique

## Références

- 
- <sup>1</sup> La constante découverte par Planck  $h$  vaut environ  $6.6 \cdot 10^{-34}$  Joule. Seconde. Usuellement,  $\hbar = h / 2\pi$  est ce que les physiciens appellent maintenant « constante de Planck ».
- <sup>2</sup> Georges Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif – Essai de cosmogonie* – p. 176, Editions du Griffon, Neuchâtel, 1946
- <sup>3</sup> Albert Einstein, *Autobiographie scientifique* (1949) in Albert Einstein, physique, philosophie, politique, textes choisis et commentés par Françoise Balibar, pp. 199-200, Le Seuil, Points, 1993
- <sup>4</sup> A. Einstein, *Autobiographie scientifique*, in Albert Einstein, Physique, philosophie, politique, textes choisis et commentés par Françoise Balibar Seuil, Points sciences, p. 192 et 196
- <sup>5</sup> Alfred Kastler, *Cette étrange matière*, p.156 Paris: Stock 1976
- <sup>6</sup> Wolfgang Pauli, *Editorial* numéro spécial, consacré à l'idée de complémentarité de la revue *Dialectica* Vol. 2 N° 3-4, p. 307
- <sup>7</sup> M. J. Duff, L. B. Okun et G. Veneziano, *Triologue on the number of fundamental constants*, JHEP 0203, 023 (2002) [physics/0110060].
- R. Lehoucqet J.-P. Uzan, *Les constantes fondamentales* Belin, Paris, 2005
- <sup>8</sup> Albert Einstein, *Autobiographie scientifique*, op. cit. p. 200
- <sup>9</sup> M.J. Duff, *How fundamental are fundamental constants?* arXiv:1412.2040v2 [hep-th]
- <sup>10</sup> G. Gamow, D. Ivanenko et L. Landau, *World constants and limiting transitions*, Russian Journal of Physico-chemical Society (1928) repris par J.P Uzan et R. Lehoucq dans *Les constantes fondamentales* op. cit.p. 133
- <sup>11</sup> G. Cohen-Tannoudji *Les constantes universelles*, Hachette Litterature, 1991, 1996, 1998
- <sup>12</sup> G. Cohen-Tannoudji, *Universal Constants, Standard Models and Fundamental Metrology*, Eur.Phys.J.ST.172:5-24,2009 (rXiv:0905.0975 [hep-th])
- <sup>13</sup> D. Deutsch et C. Marletto, *Constructor Theory of Information*(ArXiv:1405.5563)
- <sup>14</sup> A. Grinbaum *Mécanique des étreintes – Intrication quantique* – Editions les belles lettres, collection Encre marine, 2014
- <sup>15</sup> N. Bohr, *On the notions of causality and complementarity*, L'idée de complémentarité, numéro spécial, pp. 316-317 *Dialectica*, vol. 2, n° 3 / 4, Neuchâtel, 1948
- <sup>16</sup> A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen, *Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité une description complète* *Phys ; Rev.* Vol. 47, p. 777-780
- <sup>17</sup> A. Einstein, *Mécanique quantique et réalité*, Contribution au numéro de *Dialectica* sur la complémentarité (op. cit. pp. 321-324), traduit en français dans Albert Einstein, œuvres choisies, Tome 1 Quanta, pp.244-247, Seuil CNRS
- <sup>18</sup> Albert Einstein, Physique, philosophie, politique, textes choisis et commentés par Françoise Balibar, Éditions du Seuil, collection Points Sciences, p. 468
- <sup>19</sup> C.E. Shannon, (1948), *A Mathematical Theory of Communication*, Bell System Technical Journal, 27, pp. 379–423 & 623–656, July & October, 1948.
- <sup>20</sup> A. Einstein, *Mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos, comme conséquence de la théorie cinétique moléculaire de la chaleur* *Annalen de Physik*, vol. XVII, 1905, p. 549-560
- <sup>21</sup> A. Einstein, *Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905, p. 132
- <sup>22</sup> R. Landauer *Irreversibility and heat generation in the computing process*, IBM Journal of Research and Development, 5 pp. 183-191, 1961
- <sup>23</sup> D. Deutsch et P. Hayden, *Information Flow in Entangled Quantum Systems* Proc. R. Soc. Lond. A456 1759-74 (arXiv:quant-ph/9906007)
- <sup>24</sup> M. Gell-Mann et J. Hartle, *Quasiclassical Coarse Graining and Thermodynamic Entropy* ArXiv: quant-ph/0609190
- <sup>25</sup> Gilles Cohen-Tannoudji et M. Spiro, *Le boson et le chapeau mexicain – un nouveau grand récit de l'univers* – p. 464, Gallimard (Folio Essais) 2013
- <sup>26</sup> J.D. Bekenstein, *Black Holes and Entropy* Phys. Rev. D 7, 2333, (1973)
- <sup>27</sup> S.W. Hawking, *Black hole explosions?* Nature 248 5443 (1974)
- <sup>28</sup> Le raisonnement basé sur les arguments de Bekenstein et Hawking ici présenté est essentiellement heuristique. C'est dans le cadre de la théorie des supercordes qu'a été mené de façon rigoureuse le calcul de l'entropie associée à l'horizon d'un trou noir, voir E. Witten, *Anti-de Sitter space and holography*, Adv. Theor. Math. Phys. 2, 253. (ArXiv:hep-th/9802150)
- <sup>29</sup> R. Bousso, *The holographic principle*, Rev.Mod.Phys.74:825-874 (2002) (arXiv:hep-th/0203101)
- <sup>30</sup> T. Jacobson, Phys. Rev. Letters 75, 1260 (1995)
- <sup>31</sup> T. Padmanabhan, *Emergence and expansion of Cosmic Space as due to the quest for Holographic Equipartition*, arXiv: 1206.4916v1 [hep-th] 21 Jun 2012

- 
- <sup>32</sup> G. Cohen-Tannoudji *An interpretive conjecture for physics beyond the standard models: generalized complementarity* (arXiv:1402.0823)
- <sup>33</sup> A. Grinbaum, *The Significance of Information in Quantum Theory*, PhD Thesis (arXiv:quant-ph/0410071v1)
- <sup>34</sup> G. Goro, M. Chirco, Hal M. Haggard, Aldo Riello, Carlo Rovelli *Spacetime thermodynamics without hidden degrees of freedom* arXiv:1401.5262 [gr-qc]