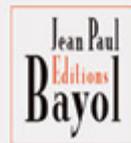


Jean-Paul Baquiast

# Pour un principe matérialiste fort



DécohérenceS

**Compléments du livre**

**"Pour un principe matérialiste fort"**

# **Chapitre 1**

## **La révolution apportée par la physique quantique**

**Chapitre 1, section 1 : L'intrication quantique**

**Chapitre 1, section 1 : Petit rappel sur la décohérence et la réduction de la fonction d'onde**

**Chapitre 1, section 2 : L'émergence de l'émergence :**

**Un pont entre la physique quantique et le macroscopique**

**L'âge de l'émergence**

**Chapitre 1, section 3 : Le vide peut-il générer du non-vide ?**

**Chapitre 1, section 3 : Chaque modification physique impliquant l'univers est aussi une opération informatique**

**Chapitre 1, Section 3 : Si l'univers est un ordinateur quantique, il continue à calculer à grande échelle**

**Chapitre 1, Section 4 :  
La question des mathématiques**

**Chapitre 1, Section 5 : MCR, une méthode de formalisation des connaissances inspirée de la physique quantique**

**Chapitre 1, section 5 : Résumé de la méthode MCR**

## Chapitre 1, section 1 :

### L'intrication quantique

L'observation du monde quantique la plus surprenante, qu'Einstein s'était toute sa vie refusé d'admettre, concerne l'intrication (entanglement). Lorsqu'un système expérimental produit deux particules corrélées, toute intervention sur l'une affecte instantanément l'autre, quelles que soient leurs distances respectives. Leurs états sont corrélés. Supposer qu'une action à distance (non productrice il est vrai de transfert d'information) puisse se produire instantanément, même si les particules intriquées sont séparées par l'univers entier, remet en cause radicalement nos conceptions de l'espace et du temps.

Mais il sera sans doute de plus en plus difficile d'admettre l'intrication comme une simple curiosité scientifique, sans conséquence sur nos conceptions du réel instrumental qui sert d'arrière-plan à notre vie quotidienne. Un article tout à fait révélateur du rédacteur scientifique Michaël Brooks publié dans le NewScientist du 27 mars 2004 nous dit pourquoi. Des physiciens font désormais l'hypothèse que l'intrication entre particules existe partout, tout le temps, et qu'elle est susceptible d'affecter le monde macroscopique, nous obligeant à modifier radicalement nos conceptions de celui-ci. Ceci pourrait avoir des conséquences relatives à notre compréhension des phénomènes qui nous demeurent encore en partie mystérieux, ceux de la vie, auxquels nous ajouterons ceux de la conscience.

On l'a dit, l'intrication n'est plus seulement aujourd'hui une propriété théorique. Elle est utilisée pratiquement dans certaines applications, comme la cryptologie quantique. Toute intervention (lecture) sur une particule corrélée avec une autre affecte immédiatement l'état de la particule sœur, si bien que deux correspondants étant convenu d'utiliser un système intriqué comme clef de sécurisation pour leurs échanges peuvent constater en temps réel les tentatives d'effraction sur ce système, lesquelles se traduisent par la réduction immédiate et visible de la fonction d'onde des particules.

Mais l'article cite d'autres exemples où l'intrication entre particules, photons, électrons, atomes ou même molécules, se manifeste de façon détectable par la physique ordinaire. La corrélation en ce cas affecte un grand nombre de particules et non plus un couple. Elle se produit donc à l'échelle macroscopique et doit être prise en considération dans l'étude des états possibles d'un matériau. Les expériences mentionnées apparaîtront au profane assez exotiques et peu susceptibles encore d'applications ou d'extensions. (Corrélation entre les états magnétiques d'atomes d'holmium au sein d'un sel magnétique, dans l'expérimentation de Sayantani Ghosh de l'université de Chicago, référencé par

Nature, vol 425, p. 48 (1). Mais pour les spécialistes, elles ne trompent pas. Tout laisse supposer que la physique et plus généralement la science sont à la veille de bouleversements conceptuels profonds.

Dans l'expérience de Sayantani Ghosh, intéressant un sel magnétique contenant des atomes d'holmium, on a pu montrer qu'à très basse température, ces atomes coordonnaient leur orientation magnétique au sein d'un champ d'une façon explicable seulement par un effet d'intrication. Cet effet avait été prévu théoriquement 3 ans auparavant par le physicien théoricien Vlatko Vedral de l'Imperial College à Londres et a été ainsi vérifié. C'est la première fois qu'un tel effet est mis en évidence à échelle macroscopique. Ceci voudrait dire qu'il faudrait dorénavant prendre en compte les effets de l'intrication si l'on voulait prédire le comportement et les propriétés de certains matériaux (de tous matériaux ?) à l'interface de leurs comportements macroscopiques d'une part, quantiques de l'autre.

Mais, selon Michaël Brooks, il va falloir étudier l'effet de l'intrication dans de nombreux autres cas, par exemple dans la supraconductivité à haute température, où des paires d'électrons apparaissent intriquées. D'autres physiciens suspectent que l'intrication est partout, dans le vide quantique (Reznik, référencé par Foundations of Physics, vol 33, p. 137), dans les photons qui nous parviennent d'une étoile, entre les atomes qui composent notre corps (Thomas Durt de la Vrije Université à Bruxelles).

Mais les effets étranges de l'intrication ne s'arrêtent pas là. On commence à suspecter, au moins en théorie, qu'elle peut se faire sentir à travers le temps. Si l'on mesure l'état d'un système quantique au temps  $t$ , ceci peut affecter l'état de ce système tel qu'il avait été mesuré au temps  $t-1$  précédent (Caslav Brukner, de l'université de Vienne, cité dans l'article).

Evidemment, suspecter ces divers phénomènes est une chose, prouver leur réalité en est une autre, en tirer des conséquences pratiques une troisième. La première difficulté consiste à produire des particules intriquées de façon courante et en nombre suffisant pour pouvoir expérimenter sur elles. Les difficultés ne sont pas seulement physiques, mais mathématiques et informatiques, car les outils actuellement disponibles pour en calculer les effets sont insuffisamment puissants. Il faudra aussi s'assurer que les premières observations relatives à l'intrication entre plusieurs particules se retrouvent dans les nombreux autres domaines où l'on pourrait a priori suspecter la présence de particules quantiques intriquées avec des particules matérielles, y compris dans les systèmes biologiques. Il faudra aussi expliquer pourquoi des particules quantiques peuvent conserver leurs caractères, notamment l'intrication, alors qu'elles sont au contact d'un très grand nombre de particules matérielles ? Elles devraient "décohérer" immédiatement, comme l'avaient montré les expériences conduites depuis une vingtaine d'années sur la décohérence.

Cela étant, il ne faut pas s'étonner que les observations précèdent les explications. Peut-être même faudra-t-il se résoudre à ne pas expliquer ce que l'on observera. Comme l'on sait, en mécanique quantique, on se borne à mesurer (observer puis prédire en termes statistiques) les phénomènes, sans pouvoir véritablement les expliquer, tout au moins dans les termes de la physique classique. Il est tout à fait possible que les explications scientifiques traditionnelles demeurent limitées aux domaines des sciences macroscopiques, celles-ci n'apparaissant plus que comme des cas particuliers d'une science d'arrière-plan où l'on se bornera à observer et mesurer - ce qui n'empêchera pas d'ailleurs d'agir.

Par contre, montrer que des particules quantiques interviennent efficacement dans des systèmes macroscopiques constitués d'un nombre immense de particules classiques changerait évidemment notre façon de voir le monde. C'est d'abord dans le domaine de la biologie que la question doit être posée.

Nous avons précédemment cité les hypothèses du Dr Mac Fadden, par lesquelles il cherche à montrer que l'évolution biologique s'exerçant par l'intermédiaire des mutations des ADN ne se faisait pas entièrement au hasard, sur le mode mutation/sélection du néo-darwinisme classique. Elle pouvait être orientée par des particules quantiques se déplaçant par effet tunnel à l'intérieur des atomes d'un gène et modifiant les caractères chimiques des atomes constitutifs de la molécule d'ADN considérée, d'une façon orientée. Cela lui conférerait des propriétés plus favorables à la survie que si le gène avait muté seulement de façon spontanée. L'auteur de cette hypothèse s'était donné beaucoup de mal pour expliquer pourquoi la particule quantique conservait son état de superposition jusqu'à trouver le bon atome (la bonne liaison chimique) qui rendrait le gène efficace. Son hypothèse, à notre connaissance, n'avait été ni vérifiée ni infirmée. Elle avait rejoint un certain nombre d'hypothèses analogues faisant intervenir les particules quantiques dans les processus biologiques, restées en suspens faute de démonstrations précises. Ne peut-on pas penser alors que les nouvelles hypothèses évoquées dans le cadre de l'intrication entre un grand nombre de particules quantiques permettraient de relancer ces travaux sur des bases plus solides ?

L'objection constamment faite aux biologistes évolutionnistes est que le néo-darwinisme ne permet pas d'expliquer le démarrage du processus répliatif (voir chapitre 2). On pourrait envisager que l'interaction de particules quantiques intriquées leur ait permis de trouver, parmi une quasi-infinité de solutions testées dans le même instant, la bonne ou les bonnes solutions susceptibles, une fois matérialisées dans le monde macroscopique, de se répliquer. En appliquant la même hypothèse, on pourrait admettre que des particules quantiques intriquées avec des particules physiques entrant dans la composition des molécules d'ADN pourraient, à chaque mutation, calculer les solutions les plus efficaces à la répliation du génome ou de l'organisme qui en est le porteur. Ceci répondrait à

l'autre objection faite aux biologistes évolutionnistes : comment les bonnes solutions génétiques apparaissent-elles si vite, alors que le jeu spontané des mutations/sélections au hasard pourraient demander un nombre d'années bien supérieur à ce qu'est l'âge de la vie. lui expliquerait l'autre. Les partisans d'une évolution finalisée par un facteur extérieur perdraient là leur principal argument.

On demandera comment des particules quantiques intriquées pourraient se livrer à des calculs informatiques gigantesques en un temps quasi nul. La réponse pourrait être à chercher du côté de ce que l'on étudie désormais en vue de la réalisation d'un ordinateur quantique, précité. Les q.bits, tant qu'ils ne sont pas réduits, affectent tous les états possibles entre le zéro et le un. Un petit nombre d'entre eux est donc capable de procéder aux calculs que ferait un super-ordinateur doté de milliards de bits. La technologie est loin d'être encore maîtrisée, mais ce sont les questions pratiques qui posent problème : comment maintenir en état de superposition des q.bits qui sont constamment menacés de décohérence du fait qu'ils voisinent dans le dispositif avec des atomes ordinaires ? Certains des algorithmes de calcul qui seront utilisés dans les ordinateurs quantiques ont déjà été conçus. Rien n'interdit de penser que, dans la nature, des algorithmes autrement plus puissants aient pu être sélectionnés au cours de l'évolution. Ceci dit, l'ordinateur quantique ne constitue certainement qu'une solution parmi de nombreuses autres permettant à des computations extrêmement puissantes de s'effectuer dans l'univers en utilisant des particules quantiques.

Evoquons ici d'un mot l'autre hypothèse, encore plus révolutionnaire, signalée par l'article de Michaël Brooks : celle selon laquelle les particules quantiques disposeraient d'états intriqués dans le temps. Si je mesure une particule donnée au temps  $t$  et lui trouve tel état, si je renouvelle la mesure une seconde fois, je constate un lien entre la seconde mesure et la première. Tout se passe comme si ma seconde mesure avait affecté la première, par une action à distance dans le temps (analogue à l'action à distance dans le temps qui lie les mesures de l'état de deux particules intriquées). Selon Caslav Brukner, ceci ne permet pas de transmettre des informations dans le passé car il n'y a pas transmission d'énergie, mais peut avoir une conséquence autrement importante, sur le plan théorique : c'est que l'espace et le temps sont également quantifiés et mesurables. La mécanique quantique n'admet pas que le temps soit un observable, mais ce ne devrait pas être le cas de la gravitation quantique, dont on attend un jour ou l'autre, peut-être prochain, des propositions révolutionnaires, par rapport à la physique actuelle, propositions selon lesquelles le tissu ultime de l'univers ne ferait pas référence au temps non plus qu'à l'espace considérés comme des cadres absolus - ce qui est déjà le cas dans le vide quantique ou plus simplement dans les trous noirs.

Il est évident que si des particules quantiques intriquées avec des particules classiques, celles notamment composant notre génome, pouvaient d'une façon ou d'une autre rétroagir sur leur état passé en fonction de leur état présent, ceci expliquerait encore mieux que l'appel à des computations quantiques l'apparente

finalité de l'évolution. Une solution isolée ayant réussi aujourd'hui pourrait modifier les paramètres lui ayant permis de voir le jour, de façon à ce que ceux-ci puissent produire à plus grande échelle la bonne solution. Mais n'explorons pas davantage de telles perspectives, car il est évident que si leurs fondements scientifiques se vérifiaient, bien d'autres conséquences pourraient en découler, n'intéressant pas seulement l'évolution biologique.

On pourrait aussi, dans la suite des expériences signalées par Michaël Brooks, se demander si le libre arbitre ne trouverait pas dans la suite de telles recherches une possible explication. Comment expliquer l'apparente liberté dont je dispose pour rechercher les solutions les plus aptes à assurer ma survie ? On sait que les sciences récentes tendent toutes à nier cette liberté, en mettant en évidence des déterminismes plus ou moins complexes qui m'obligent, selon elles, à agir comme je le fais et non autrement. Mon libre arbitre ne serait alors qu'une illusion. Malgré cela, je reste intimement convaincu (c'est même une donnée immédiate de ma conscience) que je suis libre de choisir l'action que je choisis, en éliminant d'autres choix également possibles. L'ennui est que l'observation du cerveau en action ne montre nulle part d'aires ou de réseaux neuronaux où pourrait s'exercer mon libre arbitre.

Mais que se passerait-il si les calculs qui me permettent de me concevoir comme capable d'agir librement se déroulaient dans le monde quantique. Dans ce cas, en un temps nul, les neurones supports des mécanismes d'auto-réflexion pourraient par l'intermédiaire de particules quantiques intriquées à certains de leurs éléments, procéder à des computations dont seul le résultat (supposé alors le meilleur) émergerait sous forme de décision observable. Quand je me sens libre de prendre telle ou telle décision, je ne prétends pas que je suis libre de faire n'importe quoi, par exemple décider de façon aléatoire comme si je tirais la solution au sort. Je me sens seulement libre de faire un choix responsable, engageant l'ensemble de mon être et de son histoire, conscient et inconscient. Mais dans le monde de la neurologie computationnelle macroscopique, je n'ai ni les ressources ni le temps de procéder aux innombrables computations qui seraient nécessaires. D'où ma tentation de considérer que ma supposée liberté n'est qu'une illusion et que je suis en fait agi par des déterminismes divers.

Tout changerait si mon cerveau neuronal macroscopique était doublé d'un cerveau quantique (fut-il beaucoup plus petit) capable de calculer comme le ferait un ordinateur quantique. Il suffirait pour cela que certains atomes composant les neurones de mon cerveau et placés dans des endroits clefs pour l'auto-représentation et la computation des solutions possibles soient intriqués avec des atomes quantiques auxquels ils délégueraient la responsabilité des calculs nécessaires à l'exercice du libre arbitre et plus généralement à l'heuristique permanente qui caractérise la conscience volontaire.

Ces supputations apportent de l'eau au moulin à la thèse de Seth Lloyd, exposée ci-après, selon laquelle l'univers serait un immense ordinateur quantique.

## Références

Sayantani :

Ghosh <http://home.uchicago.edu/~sghosh/CV.html>.

Voir aussi :

<http://home.uchicago.edu/~sghosh/research.html>.

Sur les effets de l'intrication dans des dipôles magnétiques, voir :

<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0402456>.

Vlatko Vedral :

<http://www.qubit.org/people/vlatko/>.

Publications de Thomas Durt à la Vrije University :

[http://rd-ir.vub.ac.be/vademecum/publication/FUND\\_pub.html](http://rd-ir.vub.ac.be/vademecum/publication/FUND_pub.html).

Caslav Brukner :

<http://www.ap.univie.ac.at/users/Caslav.Brukner/>.

Article: quantum entanglement in time :

<http://www.arxiv.org/abs/quant-ph/0402127>.

## Chapitre 1, section 1 :

### Petit rappel sur la décohérence et la réduction de la fonction d'onde

C'est à Erwin Schrödinger que l'on doit d'avoir popularisé la décohérence et la notion de réduction de la fonction d'onde. Son expérience imaginaire formulée en 1935, dite "paradoxe du chat de Schrödinger", est en effet désormais assez connue du grand public.

L'expérience est la suivante : dans une boîte fermée pourvue d'un hublot se trouve un chat, une fiole de cyanure, un marteau retenu par un fil et un détecteur quantique (un compteur Geiger). On y dépose un élément radioactif (atome d'uranium U) qui, dans un temps donné, a 50% de chance de se désintégrer en émettant un électron, électron qui ira frapper le détecteur; lequel actionnera alors le marteau qui brisera la fiole de poison mortel

Fermons la boîte, déclenchons l'expérience et demandons-nous avant de regarder par le hublot si le chat est vivant ou mort... C'est évident direz-vous : il y a 50% de chance que le chat soit vivant et autant qu'il soit mort...

Mais selon la physique quantique le chat, avant observation, est vivant ET mort à la fois ! Elle affirme que l'atome U est un être quantique auquel est applicable le principe de superposition : les particules atomiques peuvent exister dans plusieurs états superposés et simultanés. Ainsi, l'état vivant ou mort du chat ne dépend que de l'état (émission d'un électron ou non) de l'atome d'uranium. Or on sait que l'électron, étant donné sa nature ondulatoire, peut être localisé tout autour du noyau d'un atome. Il est présent simultanément à plusieurs endroits, et cela AVANT qu'il ne soit observé. De même, un atome radioactif d'uranium peut exister dans deux états superposés (intact et désintégré). Cet état de superposition cesse immédiatement dès qu'il y a observation, et donc interaction, de la particule. On dit alors qu'il y a décohérence lorsqu'un système A et B devient un système A ou B. Ainsi, regarder n'importe quelle particule quantique l'empêche de rester dans son double état (ET) ce qui l'oblige à en choisir un des deux (OU).

Dans l'expérience, l'état superposé de l'atome U devrait donc se transmettre à notre chat macroscopique et le transformer en mort-vivant, le fait d'observer le chat à travers le hublot entraînant la décohérence de son état (mort/vivant) et le choix d'un seul état. Cette explication, difficilement acceptable pour notre monde macroscopique, montre alors les difficultés d'interprétation que soulève le

formalisme mathématique quantique (où les états superposés sont faciles à concevoir lorsqu'ils sont définis par des fonctions d'onde car celles-ci s'additionnent sans problème).

Mais alors, le chat ? Est-il mort ou bien vivant ? En d'autres termes, cela s'applique-t-il vraiment aux êtres macroscopiques ? La réponse vient ici de chercheurs français qui ont déterminé que la période d'incertitude est inversement proportionnelle à la complexité d'un objet. Ce qui pour le chat, qui est un objet complexe, revient à une période tellement courte qu'elle est négligeable. Dit d'une autre façon, l'état superposé "vivant ET mort" dans lequel se trouve le chat ressemble à une bulle de savon : une bulle est éphémère et détruite à la moindre interaction. La décohérence des objets macroscopiques est quasi immédiate.

## Chapitre 1, section 2 :

### L'émergence de l'émergence :

#### Un pont entre la physique quantique et le macroscopique

Le scientifique moderne, même s'il ne pratique pas la philosophie de la connaissance, ne peut pas éviter de s'interroger sur la pertinence des modèles du monde qu'il utilise, au regard de ce que pourrait être la réalité ultime. Cette question inspire aussi l'intérêt du public pour la science et pour les nouvelles hypothèses scientifiques découlant de l'utilisation d'instruments de plus en plus perfectionnés. Pour beaucoup de gens, en dehors de ses apports utilitaires, la science telle qu'elle est traditionnellement comprise doit permettre de mieux connaître la nature profonde de l'univers, en permettant d'échapper à des descriptions métaphysiques qui ne se sont pas renouvelées depuis des siècles (mais il s'agit sans doute nous allons le voir d'une illusion qui relève d'une nouvelle sorte de métaphysique)

C'est la physique qui apporte le plus d'ouvertures sur ce que pourrait être l'univers. Mais malheureusement, pour ceux qui voudraient obtenir de la science une description aussi simple et homogène que possible de la réalité, la physique semble proposer des solutions différentes, sinon contradictoires. Nous l'avons rappelé, depuis le début du XXe siècle, elle s'est divisée en trois branches également fécondes, la cosmologie qui traite de l'univers dans son entier, la physique des particules élémentaires ou microphysique qui étudie les constituants ultimes de la matière et la physique de la matière macroscopique, aux multiples applications technologiques et industrielles. Toutes aujourd'hui, y compris la physique macroscopique, doivent tenir compte des observations de la physique quantique. Mais comment la physique macroscopique et plus généralement les sciences macroscopiques, qui travaillent sur des modèles à l'échelle de nos sens ordinaires, peuvent-elles établir un pont épistémologique avec la physique quantique ?

Ce pont nous paraît aujourd'hui devoir être fourni par le concept d'émergence. Celui-ci était jusqu'ici réservé aux sciences cognitives et aux sciences de la vie, dites aussi sciences de la complexité, qu'elles soient biologiques ou artificielles. Il n'intéressait que peu de chercheurs. On peut considérer, nous semble-t-il, que le physicien Robert Laughlin (Robert Laughlin. A Different Universe 2005) , précité, représente bien la génération de ceux que l'on pourrait appeler les militants de l'émergence, grâce à qui le concept est devenu indispensable.

De quoi s'agit-il ? Pour un nombre croissant de physiciens, la physique théorique, à elle seule, n'est pas capable d'expliquer la génération de complexité correspondant à l'apparition de la vie ou des grands systèmes cognitifs collectifs propres aux sociétés humaines modernes. Il faut trouver un autre paradigme explicatif. Depuis les travaux fondateurs de Stuart Kauffman (Stuart Kauffman. *At Home in the Universe, the Search for Laws of Complexity and Organisation*, 1996), on sait aujourd'hui que ce paradigme existe, c'est celui de l'émergence. Il peut être formulé d'une façon qui d'ailleurs n'est simple qu'en apparence : le Tout ne peut être déduit des parties. En forçant le trait, on dira que la théorie de l'émergence prend acte de l'échec de la pensée scientifique traditionnelle, analytique et mathématique, pour représenter le complexe. L'émergence n'explique pas tout, loin de là. Elle ne permet pas en général de comprendre pourquoi tel phénomène complexe apparaît. A fortiori elle ne permet pas de prévoir comment évoluera ce phénomène. Elle permet seulement d'affirmer que cette apparition n'est pas due à un miracle mais qu'elle relève d'un processus physique. Elle est un peu comparable en cela à la théorie de la sélection darwinienne en biologie (Voir chapitre 2.). La diversification des espèces s'explique en général par la sélection darwinienne, mais le détail de celle-ci comme la façon dont l'évolution se poursuivra à l'avenir ne peuvent être explicités par ce principe général. Ils ne peuvent qu'être constatés a posteriori.

Au plan d'une vision générale sur l'Univers, la théorie de l'émergence ne permet pas de comprendre immédiatement pourquoi le monde est ce qu'il est et moins encore ce qu'il deviendra. Elle permet juste de comprendre qu'aucune théorie réductionniste, fut-elle très détaillée, ne permettra jamais d'analyser et reproduire la complexité du monde. Mais en vérité elle fait beaucoup plus. Elle oblige à ouvrir les yeux sur des problèmes non résolus, voire insolubles en l'état, ce qui aura le grand avantage d'éviter que leur soient données de fausses solutions. Parmi ces problèmes non résolus se trouvent les mécanismes eux-mêmes qui permettent l'émergence. Rien ne dit qu'ils seront un jour explicités par la science. Sont-ils généraux ou propres à tel ou tel domaine de la matière et de la vie ? On ne peut le dire encore. Mais il n'est pas interdit qu'à force de travail et en évitant les fausses bonnes solutions, on puisse en faire progressivement apparaître quelques-uns.

La théorie de l'émergence relève en effet du domaine scientifique. Elle ne se borne pas à constater l'hétérogénéité ou la non-prédictabilité des phénomènes, ce qui n'aurait aucun intérêt pratique – ou laisserait le champ libre au surnaturel. Lorsque le scientifique constate l'apparition d'un phénomène émergent, il a tout à fait le droit de l'étudier, en faire la typologie, l'incorporer au corpus des connaissances du moment. Il ne dira pas que le phénomène émergent révèle la réalité en soi du monde, il dira seulement qu'il s'intègre à l'ensemble des relations établies ici et maintenant entre un réel inconnaissable en essence, des instruments permettant de générer des phénomènes nouveaux et des esprits humains générateurs de systèmes de représentation symbolique. Dans cette perspective, le

scientifique se doit d'être d'abord un expérimentateur instrumentaliste, aux yeux ouverts. C'est en effet en observant les phénomènes inattendus générés par le fonctionnement des appareils traditionnels ou nouveaux qu'il peut identifier des émergences pouvant expliquer ces phénomènes. Il ne prétend pas en faisant cela accéder à une quelconque réalité en soi, à un quelconque univers fondamental. Il se borne à dire qu'il construit une réalité relative à lui et à ses observations, s'inscrivant momentanément et parfois localement dans le devenir de la société scientifique humaine, qui constitue elle-même une émergence plus globale.

Le physicien Robert Laughlin s'est principalement intéressé, au cours de sa carrière, à ce que l'on pourrait appeler les états ou propriétés émergentes de la matière, lorsque celle-ci est soumise en laboratoire à des conditions extrêmes. L'exemple classique en est la superconductivité, déjà citée, grâce à laquelle des métaux conducteurs de l'électricité n'opposent plus de résistance au courant lorsqu'ils sont convenablement refroidis. Ce qui a frappé Robert Laughlin est qu'il est généralement impossible de prévoir les résultats d'une expérience lorsque les conditions de celle-ci s'écartent un tant soit peu des normes jusque-là pratiquées. L'effet Hall quantique (voir ci-dessous) dont il a assuré la formulation théorique, ce qui lui a valu le prix Nobel, partagé avec ses deux collègues, a ainsi été découvert par hasard. Selon lui, aucune recherche a priori n'aurait pu aboutir à ce résultat, car nul esprit humain n'aurait été capable de l'imaginer. Pourtant, l'effet Hall quantique est aujourd'hui à la source de très nombreuses applications scientifiques et industrielles. L'observation initiale a été rendue possible par la conjonction, à un certain moment et en un certain lieu, d'un instrument produisant des résultats inattendus et d'esprits humains suffisamment alertes pour s'étonner de ces résultats et chercher à les comprendre. Il en est de même, selon lui, de toutes les découvertes importantes de la physique moderne. On voit que pour lui, l'émergence se produit à partir des composants primaires de la nature, inconnus de nous, et elle intéresse toutes les structures associant la matière et l'énergie. Elle ne concerne donc pas seulement les phénomènes biologiques ou leurs modèles informatiques tels les automates cellulaires (Voir chapitre 5. Un monde artificiel bientôt plus vrai que nature.), comme on le croit souvent. Cependant, pour le grand public, c'est évidemment en biologie et en anthropologie que le phénomène de l'émergence est le plus visible et le moins discuté.

Robert Laughlin n'ignore évidemment rien de la mécanique quantique, dont il a eu en permanence à appliquer les principes ou les résultats dans ses propres travaux. Il a lui-même été surnommé le Robert Feynman de sa génération. Mais pour lui comme pour la plupart des physiciens, la mécanique quantique ne permet pas de comprendre l'univers en profondeur, et moins encore d'agir sur lui. Elle permet juste d'interpréter un certain nombre des phénomènes nouveaux que révèle le développement des instruments et des expériences, par exemple au sein des accélérateurs de particules. Le monde quantique, dans ses profondeurs, est et restera pour lui inconnaissable. C'est ainsi que parler de vide quantique représente

simplement une façon de désigner quelque chose d'inconnaissable, sous-jacent à la réalité matérielle, dont on constate seulement telle ou telle manifestation dans telle ou telle expérience. De même les particules qui émergent du vide quantique ne sont ni des ondes, ni des particules ni les deux à la fois. Elles sont définitivement autre chose. Ceci ne nous empêche pas de les utiliser, dans certaines conditions.

Robert Laughlin n'ignore pas plus la cosmologie que la physique quantique. Mais là il se sépare profondément des travaux des cosmologistes théoriciens. Pour lui, toutes les hypothèses visant à décrire de façon réaliste les états passés, présents et futurs de l'univers relèvent non seulement de la science fiction mais d'une méconnaissance profonde de ce qu'est selon lui l'univers, c'est-à-dire le produit d'une émergence. Il s'en prend particulièrement à la Théorie du Tout, qui prétendrait trouver une équation unique à partir de laquelle on pourrait déduire toutes les autres formes de connaissances. Cette ambition, triomphe du réductionnisme, selon laquelle les lois des mécanismes élémentaires permettent de déduire la loi du système complexe, ignore dramatiquement, selon lui, la théorie de l'émergence.(1)

Pour comprendre les grands systèmes auxquels nous avons affaire dans la nature, il n'est pas nécessaire de connaître les lois qui régulent leurs composants microscopiques, mais seulement les principes d'organisation collective qui permettent leur apparition. Plus généralement, ce ne sont pas les lois des parties qui expliquent l'émergence de l'organisation, mais plutôt cette dernière qui donne un sens et des lois aux parties. Cela signifie notamment qu'il est illusoire de prétendre que la connaissance des lois élémentaires, intéressant par exemple les particules quantiques et les processus chimiques à l'œuvre dans la nature, suffiront à décrire et prédire exhaustivement l'ensemble du monde auquel nous avons affaire. On reprend là le combat jamais clos contre les prétentions du réductionnisme du démon de Laplace (2) à pouvoir nous dire de quoi est fait le monde et vers quoi il va. Certes, comme tous les scientifiques, Robert Laughlin reconnaît ne pas pouvoir éviter d'être réductionniste, c'est-à-dire rechercher d'abord d'éventuelles causes élémentaires ou premières aux phénomènes encore incompris. Mais il refuse les abus du réductionnisme, conduisant à penser qu'aujourd'hui la science a tout compris et n'a plus rien de profond à découvrir.

Les systèmes complexes, comme les événements météorologiques, sont régulés par les lois de leurs composants microscopiques (en l'espèce les atomes des molécules d'eau) mais dans le même temps leurs aspects les plus sophistiqués sont insensibles à ces lois et parfois même en contradiction avec elles. L'organisation en ce cas prend le dessus sur les parties et les transcende. Le concept d'organisation ne désigne pas seulement un principe théorique mais un phénomène du monde physique, aussi « réel » que les phénomènes microscopiques. Cela s'applique évidemment aussi aux êtres vivants et à l'homme lui-même. Tous les systèmes physiques étudiés par la science découlent de mécanismes d'organisation collective,

et pas seulement les plus complexes. Il est illusoire de distinguer des lois fondamentales dont découleraient des lois subordonnées. Cela entraîne la conclusion que la prétention consistant non seulement à identifier ces lois fondamentales, mais à leur donner une formulation mathématique qui permettra ensuite de représenter par des équations les systèmes émergents à base d'organisation est également une illusion. Ce point de vue n'est pas partagé par tous. Nous le verrons dans le chapitre 2 en présentant les travaux de chercheurs visant à élaborer une théorie générale de la vie.

Il en résulte que la recherche des lois physiques, à quelque niveau qu'elle se fasse, ne peut se faire par la seule déduction, ni même par induction (Exemple de déduction : les quadrupèdes ont 4 pattes. Cet animal que je rencontre n'en a que 3. J'en déduis (déduction fautive) qu'il s'agit d'un représentant d'une espèce vivante inconnue – ou bien alors (déduction vraie) qu'il a subi une amputation.)

- Exemple d'induction : l'homme dispose d'un cerveau qui le rend apte à l'intelligence. J'en induis que le singe, qui dispose aussi d'un cerveau, devrait être également apte à l'intelligence. Selon les définitions que l'on donnera de celle-ci, l'induction se révélera soit fautive, soit très fructueuse. On parle de plus en plus aussi d'abduction, qui consiste à formuler des hypothèses de très grande ampleur, pouvant conduire à des théories très générales. On ne confondra pas ce type d'abduction avec l'abduction ou enlèvement temporaire dont plus d'un million d'américains prétendent avoir été victimes du fait d'extra-terrestres. Elle doit faire appel à l'expérimentation, seule à même de faire apparaître les phénomènes complexes d'organisation que l'on serait conduit à ne pas voir en s'en tenant aux explications par les lois élémentaires. Mais encore faut-il expérimenter avec une grande ouverture d'esprit. Comment acquérir celle-ci ? Il faudrait commencer par se persuader que le monde est rempli de choses pour le moment incompréhensibles, à commencer par nous-mêmes. La science doit nous aider à les comprendre en nous mettant, grâce à la force brute de l'expérimentation, elle-même constamment rendue plus efficace grâce à l'évolution technologique, en présence de phénomènes que nous n'avons pas vus jusqu'ici et qu'il nous faudra bien introduire dans notre représentation générale du monde. Mais ce n'est pas pour autant que tout s'éclaircira.

## **Vivre avec l'incertitude**

Les biologistes et les chercheurs en sciences humaines admettent que l'incertitude est inséparable de leurs représentations de la nature. On ne peut jamais prédire exactement, en s'appuyant sur les lois censées réguler les composants biologiques ou psychologiques, la façon dont se comportera un système associant

plusieurs de ces composants. Cela se manifeste à tous les niveaux d'organisation du vivant, de la molécule biologique à l'homme. Par contre, pour les physiciens du monde macroscopique, il importe d'éliminer l'incertitude, laquelle ne peut découler que d'expérimentations insuffisantes. Cela les conduit à procéder à des mesures de plus en plus précises. Faire apparaître des erreurs de mesure conduit logiquement à remettre en cause une théorie jusque là admise. Mais le fait d'obtenir une très grande précision dans la mesure ne doit pas conduire à penser que le phénomène est définitivement décrit et maîtrisé. Ainsi la physique contemporaine repose sur la connaissance de ce que l'on appelle des constantes universelles. Il s'agit en réalité d'expériences donnant un résultat universel. Il en existe dix à vingt, telle la vitesse de la lumière dans le vide. Mais le caractère apparemment universel de telles expérimentations est un piège. Il conduit à faire penser que ces constantes ont mis en évidence les briques primitives à partir desquelles est construite la réalité.

Pour Robert Laughlin, si la vitesse de la lumière apparaît constante aujourd'hui, ce ne serait pas parce que la lumière serait une composante élémentaire de l'univers. Prendre en considération les phénomènes d'émergence montre que cette constante elle-même résulte d'un phénomène d'organisation sous-jacent. La lumière pourrait être le produit d'une émergence. Fondamentalement, derrière les constantes, on peut retrouver si on s'en donne la peine l'incertitude et l'inconnu. Toutes les constantes dites fondamentales requièrent un contexte environnemental organisationnel pour prendre un sens. La réalité quotidienne est un phénomène d'organisation collective, se traduisant par des « vérités » statistiques ou probabilistes (ce qu'ont dit depuis longtemps les biologistes comme les physiciens quantiques). On peut pour des besoins pratiques, dans le monde quotidien, décrire les objets macroscopiques comme des constructions d'atomes situés dans l'espace-temps newtonien, mais l'atome isolé n'est pas newtonien. Nous avons vu dans la section précédente que c'est une entité quantique « éthérée » manquant de la première des caractéristiques du monde newtonien, la possibilité d'être définie par une position identifiable. Cela apparaîtra non seulement dans les expériences de la physique quantique, mais dans les expériences de la physique des matériaux et des états de la matière intéressant la vie quotidienne. Les physiciens s'intéressant aux phénomènes macroscopiques doivent donc eux aussi apprendre à gérer l'incertitude née de l'émergence, considérée comme un aspect incontournable de toute « réalité » et la voie permettant d'accéder à de nouvelles découvertes.

Cela s'applique à la physique quantique, notamment au processus de la mesure. Nous avons indiqué plus haut qu'il faut se garder de la tentation d'expliquer par des termes du langage courant, masquant l'irréductibilité du monde quantique sous-jacent, des phénomènes comme l'intrication. La matière quantique n'est pas faite d'une superposition d'ondes et de particules, comme on le dit souvent. Elle est faite ni d'ondes ni de particules, mais de quelque chose de différent, qu'il faut se résoudre à qualifier d'« autre chose » sans chercher à en définir l'essence. Mais cela n'empêche pas d'utiliser la fonction d'onde pour

représenter l'entité quantique avec la précision nécessaire aux applications de plus en plus nombreuses requises par la technologie moderne.

## **Qu'est ce que l'Effet Hall quantique,**

théorisé par Robert Laughlin, travail qui lui a permis d'obtenir le Prix Nobel?

## **Qu'est-ce d'abord que l'effet Hall ?**

La découverte remonte à 1879 lorsque le physicien américain Edwin Herbert Hall, étudiant en thèse du professeur Rowland de l'université Johns Hopkins de Baltimore, plaça une feuille d'or dans un champ magnétique et lui appliqua un courant électrique.

Il observa alors une tension perpendiculaire à la direction du courant et à celle du champ magnétique. Cette tension transverse, dite tension de Hall  $V_H$ , résulte de la force de Lorentz  $F_L$  qui dévie la trajectoire des électrons vers un bord de la feuille, entraînant une accumulation de charges négatives sur ce bord, un excès de charges positives sur l'autre bord, et l'apparition d'un champ électrique  $E$ .

L'équilibre est atteint lorsque la force électrique  $F_E$ , due au champ de Hall, compense la force de Lorentz. Une tension  $V_H$ , perpendiculaire au courant  $I$ , peut être alors mesurée. Celle-ci est proportionnelle à la densité de flux magnétique  $B$ , alors que la tension longitudinale  $V_{xx}$ , liée aux processus classiques de diffusion des électrons dans le métal, reste faible et constante en présence d'un champ magnétique.

La tension de Hall  $V_H$ , ou la résistance de Hall  $R_H$ , est une grandeur intéressante à mesurer dans le domaine de la magnétométrie.

Cette mesure présente aussi un grand intérêt dans la caractérisation des semi-conducteurs au cours de leur élaboration. La mesure de  $V_H$  donne en effet accès aux paramètres principaux d'un semi-conducteur, à savoir la nature des porteurs (électrons ou trous), leur densité  $n$  et leur mobilité  $\mu$ .

L'Effet Hall possède des utilisations dans des domaines variés et très différents.

Par exemple, il est utilisé dans les gaussmètres, les ampèremètres, les wattmètres, les moteurs à courant continu, les multimètres analogiques, les compas magnétiques et de nombreux autres instruments et dispositifs. Ceci sous forme de sonde à Effet Hall, qui est une sonde magnétique utilisant l'effet Hall et dont la réponse est proportionnelle au champ magnétique.

## L'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique est observé sous certaines conditions:

- le mouvement des électrons doit être restreint de telle manière qu'ils ne puissent se mouvoir que dans un "flatland" à deux dimensions. Cela peut être accompli en confinant les électrons dans une couche extrêmement fine d'un semi-conducteur, ainsi les transistors à effets de champ de types MOSFET sont un terrain d'exploration très fructueux.
- la température doit être très basse (aux alentours de 4.2 K ou en dessous).
- un champ magnétique très intense (de l'ordre de 10 Tesla) doit être utilisé.

Le champ magnétique, appliqué perpendiculairement à la couche de semi-conducteur, produit la tension transversale de Hall,  $V_H$ , comme pour l'effet Hall ordinaire. Le rapport entre  $V_H$  et le courant est la résistance de Hall.

Toutefois, à certaine valeur de température, la conductivité et la résistivité du solide tombent à zéro, comme dans le cas des supraconducteurs. Le graphique de résistance de Hall en fonction de  $B$  fait apparaître des marches, qui correspondent aux valeurs pour lesquelles la conductivité vaut zéro.  $R_{xx}$  et  $R_{xy}$  sont respectivement la résistance longitudinale et transversale

L'effet Hall quantique (EHQ) est observé à très basse température ( $< 1$  K) dans un gaz électronique à deux dimensions de haute mobilité ( $\mu > 2 \text{ T}^{-1}$ ), soumis à un fort champ magnétique perpendiculaire au plan de conduction. Un gaz électronique bidimensionnel peut par exemple être réalisé dans un transistor MOSFET ou dans une hétérostructure en GaAs/AlGaAs. Si l'on mesure la résistance de Hall en fonction de la densité de flux magnétique  $B$  dans ces conditions expérimentales, des plateaux de résistance constante apparaissent. La résistance de Hall  $R_H$  est quantifiée sur ces plateaux et la relation  $R_H = h/i \cdot e^2$  s'applique,  $i$  étant un nombre entier.

La résistance  $h/e^2$  est également appelée constante de von Klitzing  $R_K$ . La résistance longitudinale de l'échantillon révèle un comportement oscillatoire marqué (effet Shubnikov de Haas). Les plateaux de résistance Hall coïncident avec des minima étendus de la résistance longitudinale. Aux plus basses températures, la résistance dans ces minima devient infiniment petite et ne peut plus être mesurée. Par conséquent, pour le zéro absolu de température au moins, le transport de courant à travers l'échantillon s'effectue sans perte.

## Application métrologique

L'effet Hall quantique est utilisé par la plupart des Instituts nationaux comme résistance étalon primaire depuis le 1er janvier 1990. A cette fin, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a fixé la constante de von Klitzing  $R_K$  à une valeur de  $R_{K-90} = 25812.807 \text{ } \Omega$ , soit la meilleure valeur possible pour l'état des connaissances à l'époque de la détermination. L'incertitude relative de cette constante dans le SI est d'environ  $2 \times 10^{-7}$  et est ainsi deux ordres de grandeur supérieure à la reproductibilité basée sur l'effet Hall quantique. L'incertitude au sein du SI n'a cependant d'importance qu'en cas de combinaison d'unités électriques et mécaniques.

Un pont de mesure de résistances de haute précision permet de comparer des résistances étalons traditionnelles ( $100 \text{ } \Omega$  et  $10 \text{ } \Omega$ ) à la résistance de Hall quantique et par-là même de les étalonner de manière absolue. Ces résistances étalons servent dans une étape ultérieure d'étalons de transfert pour étalonner des étalons de clients. La structure de mesure mise en place par METAS permet de comparer une résistance étalon à la résistance de Hall quantique avec une précision relative de  $1 \times 10^{-9}$  (3). Cette incertitude de mesure a été confirmée en novembre 1994 lors de la comparaison directe avec l'étalon de Hall quantique transportable du BIPM.

L'effet Hall quantique intégral est dû, (en partie seulement), à la présence d'un gap d'énergie (celui entre les niveaux de Landau). Pour expliquer l'effet Hall quantique fractionnaire, il est essentiel de considérer l'effet des interactions coulombiennes entre électrons. Dans ce cas, c'est l'ensemble du gaz d'électrons qui doit être décrit par une fonction d'onde (une fonction d'onde à  $N$  particules). L'étude des deux effets Hall quantiques est un domaine de recherche très actif de la physique de la matière condensée où sont introduites des idées comme les charges électriques fractionnaires, les anyons, les excitations topologiques (skyrmions et mérons), les états de bords, etc.

L'effet Hall quantique est aujourd'hui un défi pour la physique théorique. De façon surprenante, des structures mathématiques riches ont pu être dégagées des résultats expérimentaux. De la même manière que la spectroscopie a influencé le développement de la mécanique quantique, ces structures sont des guides incontournables pour la modélisation et la compréhension de ce phénomène.

1 : Observons que dans la vie de tous les jours, nous sommes constamment en présence de l'émergence, ceci sans l'avoir théorisée. L'observateur politique qui cherche à pronostiquer l'avenir de la constitution européenne, par exemple, sait bien qu'il ne pourra rien pronostiquer de solide. Il sera obligé d'attendre que

l'Europe institutionnelle émerge de la confusion apparente des évènements politiques pour pouvoir commencer à l'étudier. Certains physiciens ont fait la même observation à propos des concepts de superposition d'état ou d'intrication évoqués ci-dessus. Constamment, dans la vie quotidienne, nous nous trouvons personnellement en superposition d'état : à la fois assis à notre table de travail et rêvant à mille choses différentes. De même, les couples amoureux ou les équipes soudées donnent de bons exemples d'intrication. On objectera qu'il ne s'agit pas des mêmes phénomènes que ceux désignés par la physique quantique. C'est vrai... ou est-ce vrai ?

2 : Le physicien français Pierre Simon Laplace (1749-1827) a réalisé des travaux remarquables en astronomie et en mathématiques. Déterministe convaincu, il était persuadé qu'avec une bonne théorie et en connaissant les données de départ, un démon imaginaire pourrait calculer tous les développements d'un système, fut-il aussi compliqué que l'univers. Laplace avait également expliqué à Napoléon médusé qu'il n'avait pas besoin de Dieu dans ses équations. Aujourd'hui, on sait qu'un tel déterminisme mathématique ne peut être utilisé que dans un nombre de cas limité. On le remplace par le déterminisme statistique s'appliquant aux grands nombres. Il n'est donc pas nécessaire de réintroduire Dieu dans les équations.

3 : Hypothèse de l'inflation cosmologique. Dans les premiers instants de la vie de l'univers, celui-ci aurait subi une énorme augmentation de taille. Celle-ci expliquerait pourquoi aujourd'hui il nous apparaît illimité dans l'horizon visible. Cette hypothèse, qui explique beaucoup de choses, semble aujourd'hui de plus en plus contestée. Elle paraît vraiment conçue, selon l'ancienne expression, pour sauver les apparences. On en saura davantage après le lancement de la sonde européenne Planck, vers 2010/2012, destinée à mesurer de façon plus précise qu'actuellement les anisotropies ou différences dans le rayonnement micro-onde à 4° résultant du Big Bang.

## Chapitre 1, section 2 :

### L'émergence de l'émergence :

#### L'Age de l'Emergence

La science, selon Robert Laughlin, découvre aujourd'hui une nouvelle frontière, celle de l'émergence. Mais elle est encore loin de disposer des outils lui permettant de faire face aux défis qui en résultent. Deux types de "lois" continueront à s'opposer, la loi des parties et la loi du collectif.

Autrement dit la science balancera toujours entre deux Ages, celui du Réductionnisme et celui de l'Emergence. Mais aujourd'hui, il est indispensable de comprendre que les succès indéniables du réductionnisme, justifiant notamment le pouvoir absolu des mathématiques, ne doivent pas faire oublier les frontières qu'il atteint. C'est la difficulté que doit résoudre toute activité scientifique qui fondamentalement vise à construire des modèles (Sur la science et les modèles, voir Les grands concepts de la philosophie des connaissances, en annexe. La réalisation de modèles est un processus fondamental aussi bien dans les sciences que dans les technologies. La modélisation consiste à représenter en format réduit et simplifié (qui sont souvent des équations ou des programmes informatiques) tels « évènements » ou « objets » du monde « réel » trop complexes pour qu'il soit possible d'expérimenter directement sur eux. Nous mettons des guillemets pour introduire les nuances qui seront exposées ultérieurement, relativement au concept de réalité.). Ces modèles ne peuvent, même quand ils découlent de lois mathématiques rigoureuses, être exhaustifs ni totalement prédictifs. Il faut aborder l'Age de l'Emergence, y compris en acceptant toutes les fausses explications qui peuvent momentanément résulter d'une recherche nécessairement aléatoire des processus générant l'émergence. Nous ne pouvons en ce qui nous concerne qu'adopter pleinement ce point de vue.

Or la science et plus généralement la société ne paraissent pas en état de le faire. Vivre à l'âge de l'Emergence signifie, nous l'avons vu, vivre avec l'incertitude, et cela la société ne l'accepte pas. Sous des pressions diverses, y compris politiques et économiques, la science a tendance à tenter de sauver le réductionnisme en inventant des mythologies que Robert Laughlin compare aux anciens Dieux de l'Olympe, destinés à rassurer les hommes. Parmi ces mythologies, il range les hypothèses concernant les premiers instants du Big Bang, l'ère inflationnaire (Hypothèse de l'inflation cosmologique. Dans les premiers instants de la vie de l'univers, celui-ci aurait subi une énorme augmentation de taille. Celle-ci

expliquerait pourquoi aujourd'hui il nous apparaît illimité dans l'horizon visible. Cette hypothèse, qui explique beaucoup de choses, semble aujourd'hui de plus en plus contestée. Elle paraît vraiment conçue, selon l'ancienne expression, pour sauver les apparences. On en saura davantage après le lancement de la sonde européenne Planck, vers 2010/2012, destinée à mesurer de façon plus précise qu'actuellement les anisotropies ou différences dans le rayonnement micro-onde à 4° résultant du Big Bang.), la génération de bébé-univers, le principe anthropique (1), la théorie des cordes au niveau subatomique et tout ce qui fait aujourd'hui la réputation d'une certaine physique théorique renonçant à la possibilité d'être vérifiée de façon instrumentale.

Robert Laughlin ne refuse pas l'utilisation des grands instruments en astronomie ou en physique. Il ne refuse pas la recherche de mesures de plus en plus précises. Mais il voudrait que ces instruments soient utilisés les yeux grands ouverts sur l'insolite voire sur l'incompréhensible qu'ils pourraient révéler. Il s'agit d'une démarche difficile, non programmable par le pouvoir politico-scientifique, qui repose essentiellement sur la liberté d'esprit et de création des chercheurs. Il fait le pari que, malgré le poids des appareils, de tels chercheurs existeront toujours, du moins dans les démocraties.

Comment cependant tenir compte de l'émergence dans l'enseignement des sciences ou dans celui des bonnes méthodes scientifiques ? Une première difficulté apparaît, qui consiste à identifier les objets émergents afin de ne pas les confondre avec des objets susceptibles d'être analysés à partir de la connaissance de leurs composants. Si je suis en présence d'une machine relativement simple, comme l'est un moteur automobile, je pourrai analyser ses pannes en testant le fonctionnement de ses diverses parties. Si je me trouve confronté à un système complexe, comme un réseau de télécommunication dense, je serai obligé d'admettre que certaines pannes pourraient être émergentes. Je ne pourrai pas les détecter et moins encore les réparer en intervenant sur les nœuds ou les terminaux pris un par un. Je devrai me résoudre à une approche interactionniste (me connecter au système et observer comment il répond) ou même systémique, de type probabiliste. Autrement dit, un dépanneur informatique pourra expliquer la survenue d'un bug en faisant appel à l'émergence. Un mécanicien automobile ne le pourra pas... en principe.

Il est difficile de se rendre compte de la complexité des objets et phénomènes du monde, entraînant la nécessité de définir des modes d'analyse et d'intervention spécifiques à la totalité et ne se limitant pas à agir sur telles ou telles de ses parties. On pourrait affirmer que le progrès contemporain des sciences repose actuellement pour l'essentiel sur cet exercice. Il oblige à sortir des approches compartimentées pour établir des synthèses. Mais jusqu'où aller dans la définition des limites d'un phénomène ou d'un organisme complexe réputé émergent ? On voit la difficulté quand il s'agit par exemple de thérapeutique. Faut-il identifier puis traiter les pathologies au plan local ou à celui de l'organisme entier ? Faut-il aller

plus loin et réintroduire l'organisme dans son environnement écologique ou sociologique ?

Vu l'importance que représente pour l'innovation scientifique l'identification de l'émergence, on aurait pu penser que le phénomène aurait fait depuis longtemps l'objet d'études méthodologiques sur le thème : « Apprenons à ne pas confondre le Tout avec ses Parties » ou, inversement, « Apprenons à identifier un Tout possible derrière les Parties qui se manifestent à nous ». Mais rien n'a apparemment été fait de façon systématique dans cette direction.

Par ailleurs, faudra-t-il traiter l'émergence comme un mécanisme général intervenant dans l'importe quel domaine de la connaissance scientifique ? Ou bien sera-t-il nécessaire de distinguer selon les domaines, l'émergence en biologie ne se définissant pas de la même façon que l'émergence en physique ou en sciences humaines ? A priori, nous serons tentés pour ce qui nous concerne d'essayer d'analyser l'émergence comme un phénomène global du monde profond, et non pas comme quelque chose à décliner de façon différente selon les domaines. Ceci n'empêchera pas cependant d'étudier ensuite la façon dont elle se manifeste au cas par cas, afin notamment de faire des comparaisons. Ainsi l'émergence du comportement en essaim ou celle du langage ne se produira pas exactement de la même façon dans les espèces vivantes ou dans les modèles informatiques, automates cellulaires ou robots, censés la reproduire.

Mais si détecter l'émergence est considéré comme un élément essentiel à la création scientifique, on pourrait dire aussi qu'elle ne se produit que dans l'esprit de l'observateur. Dans le monde réel, tout est lié depuis les origines. Le propre de la découverte scientifique humaine consistera à élargir les modèles du monde qu'il se donne par la pratique expérimentale précédemment décrite. Le scientifique établit des lois et, subitement, il découvre en continuant à expérimenter que ces lois ne sont plus pertinentes et qu'il faut en proposer d'autres. Alors il parlera d'émergence. Pour identifier les « faits » expérimentaux susceptibles de remettre en cause des lois établies, il faut beaucoup de clairvoyance, de courage et une certaine dose d'inadaptation à l'establishment scientifique dominant.

Cela obligera peut-être à développer un thème de plus en plus à l'ordre du jour en matière d'incitation à la créativité scientifique, celui de la sérendipité (Le mot anglais serendipity ('sérendipité' en transcription) a été forgé il y a 251 ans. La sérendipité est l'art de découvrir, inventer et créer ce à quoi on ne s'attend pas. Les dictionnaires français n'ont pas encore accepté ce terme. Ce qui peut révéler un certain état d'esprit.). Tout ou presque de ce qui a été dit sur la sérendipité pourrait s'appliquer à la détection de l'émergence. Malheureusement, on constate que la sérendipité n'est pas enseignée. Sa méthodologie reste à faire. On peut seulement réfléchir sur les nombreux exemples de découvertes pouvant lui être attribuées, et s'efforcer d'en tirer profit dans sa vie quotidienne.

1 : Selon le principe anthropique, l'univers paraît étonnamment compatible avec l'apparition de la vie et de la pensée. Certains en déduisent (principe anthropique fort) qu'il a été organisé en ce sens par une puissance supérieure. On rejoint l'hypothèse du Créateur ou de l'évolution finalisée vers un but. D'autres pensent (principe anthropique faible) que l'univers évolue spontanément vers des formes de matière et d'énergie propices à la vie et à l'intelligence. Nous discutons cette hypothèse ci-dessous.

## Chapitre 1, section 3 :

### Le vide peut-il générer du non-vide ?

Le lecteur ne doit pas conclure, à la lumière des considérations sur le vide que nous venons de présenter, que la question du vide est désormais résolue. Elle est au cœur de multiples interrogations rapportées par la presse scientifique. Le physicien américain des particules Victor J. Stenger (Sur Victor Stenger, voir <http://www.colorado.edu/philosophy/vstenger/> ), dans un livre récent (The Comprehensible Cosmos. Where do the laws of physics come from ? Prometheus, 2006) explique que les lois de la physique (notamment les prétendues « constantes fondamentales ») ne viennent pas d'en haut, autrement dit elles ne précèdent pas le vide ou ne découlent pas de lois plus profondes intrinsèques au vide, non plus d'ailleurs qu'à une organisation logique de notre univers. Ce point de vue, notons-le, n'est pas celui de Seth Lloyd présenté dans les pages suivantes.

Pour Stenger, les lois de la physique sont des inventions humaines. Mais ce ne sont pas des inventions arbitraires. Elles ne consistent pas à décrire une « réalité » physique concernant le comportement de la matière lequel serait contraint par ces lois. Elles consistent en contraintes que s'imposent les physiciens pour décrire ce comportement. En effet, les scientifiques ont découvert depuis longtemps qu'ils devaient, pour décrire objectivement la réalité, s'imposer un point de vue invariant. Les lois de la physique découlent de la nécessité d'un tel point de vue invariant. Autrement dit, nous vivons dans un cosmos compréhensible, parce que nous voulons qu'il le soit. Notre développement en dépend.

Stenger prend comme exemple le principe de symétrie, qui est responsable de la plupart des lois physiques actuelles, notamment de la puissante théorie quantique. Celle-ci ne cesse de se voir confirmée par des résultats expérimentaux. Que faut-il en déduire ? Seulement que le principe de symétrie est la seule façon permettant aux physiciens de s'accorder sur des points de vue indépendants de leur propre subjectivité, comme du lieu et de l'époque où les lois en découlant sont élaborées. Mais pour Stenger (qui devient ici plus difficile à suivre car son livre comporte une bonne moitié de formules mathématiques), les symétries qui conduisent aux lois actuelles de la physique sont exactement les mêmes que celles qui s'appliqueraient si l'univers était totalement vide. Ce sont des symétries du vide.

Comment alors quelque chose comme notre univers, qui est loin d'être vide, peut-il provenir du vide ? Pour Stenger, la réponse est simple. Comme les lois de la physique sont les lois de rien, nous n'avons besoin de rien pour provenir de rien. Pourquoi alors l'univers, qui n'est pas rien ? Parce que quelque chose qui n'est pas

rien est plus stable que rien. Au début, il y avait le vide, gouverné par les lois du vide, mais du vide a émergé quelque chose, et quelque chose de structuré. Pourquoi ? Parce que quelque chose qui est structuré est plus stable que rien. De même l'eau liquide se change en glace (cristallisée) à basse température parce que la glace est plus stable que l'eau liquide à ces températures. Nous retrouvons là sous une autre forme une des hypothèses mentionnées dans le présent livre. Notre univers serait né d'une fluctuation aléatoire de l'énergie du vide, dont les particules auraient pu aussi bien s'annihiler que se matérialiser, par la création (elle-même aléatoire) d'un seul atome lequel aurait provoqué des décohérences en chaîne dans les particules quantiques du vide initial.

Nous pouvons nous intéresser au travail de Stenger, aussi ésotérique puisse-t-il paraître, pour une raison plus immédiate, liée à la question du matérialisme. Stenger est un matérialiste convaincu. Son livre veut démonter les arguments des physiciens spiritualistes pour qui des lois de la physique, préexistantes ou intrinsèques au vide, révéleraient l'existence d'un Dieu intemporel et immatériel. Pour lui, le vide ne révèle rien du tout en soi. Les physiciens peuvent s'accorder ou non sur l'existence de lois découlant du vide et définissant le comportement de notre univers. Il ne s'agit que d'une question d'opportunité. S'ils éliminent l'hypothèse d'un Dieu créateur, susceptible de multiples interprétations, cela leur permettra plus commodément de s'accorder sur la « réalité » d'un univers matériel objectif qu'en fait, ce faisant, ils contribueront à construire. On rejoint là le constructionnisme évoqué dans notre livre.

On notera que dans un second livre à paraître en 2007, *God, the Failed Hypothesis. How Science shows that God does not exist (Prometheus)*, il aborde un thème que beaucoup de scientifiques matérialistes n'osent pas traiter de front : comment la science démontre-t-elle la non-existence de Dieu. Dans un livre précédent de 2003, *(Has Science found God?)* il démontait les arguments selon lesquels la science justifiait l'existence de Dieu. Dans celui-ci, il explique que la science démontre la non-existence de Dieu, tout au moins d'un Dieu tel que le définissent les religions monothéistes judéo-chrétiennes et islamiques. Autrement dit, il n'argumente pas seulement sur l'absence de preuves positives mais sur le fait que la science apporte des preuves très fortes à l'affirmation que Dieu n'existe pas. Non seulement l'univers ne montre aucun indice de l'existence d'un Dieu quelconque mais encore il se révèle être exactement tel qu'il devrait être s'il n'y avait pas de Dieu. Dans un dernier chapitre, il explique pourquoi, selon lui, il est préférable de vivre dans un monde sans Dieu.

Nous ne pouvons pas ici faire la revue de toutes les thèses récentes intéressant la cosmologie. Signalons cependant, à propos de l'origine de l'univers, le livre d'Alex Vilenkin, directeur de l'Institut de Cosmologie de l'Université Tufts, *Many worlds in one. The search for other universes*, Hill and Wang 2006. Pour lui, l'univers est issu de rien. Pas seulement d'un espace vide, ni d'un vide physique, et

moins encore du vide quantique, mais de rien, du rien pur et simple. Il démontre sa thèse dans ce livre d'une façon qui ne convaincra peut-être pas tous les lecteurs, mais cependant les passionnera. Ajoutons en forme de plaisanterie que les Chrétiens ne pourront pas cependant arguer que ce rien est précisément Dieu car si Dieu était rien, il ne serait pas Dieu. —

## Chapitre 1, section 3 :

### Chaque modification physique impliquant l'univers est aussi une opération informatique

Pour comprendre la façon dont est né et évolue notre univers, Seth Lloyd nous invite à porter un double regard sur chacun des changements d'état qui peut affecter la plus élémentaire des parties composant cet univers. Ces changements d'état doivent être vus à la fois comme des actions physiques et comme des opérations informatiques. Il n'y a là en fait que du très banal. Prenons un exemple. Si un rayon ionisant (par exemple un rayon cosmique) modifie l'état d'excitation (ou d'énergie électrique) d'un atome dans une molécule chimique ou biologique, ce rayon entraîne, fut-ce d'une façon non perceptible par nous, une modification de la façon dont l'atome contribue aux propriétés de cette molécule et à son rôle fonctionnel. Nous sommes donc là en présence d'un effet physique. Mais il s'agit aussi d'un effet informatique dans la mesure où l'atome est engagé de fait, par interaction avec ses voisins, dans un ou plusieurs des circuits logiques qui sont à la base du calcul informatique booléen : ET, OU, NON, COPIE, etc. En effet, modifier l'état de l'atome a pour effet de changer sa valeur informatique, autrement dit de réaliser une opération élémentaire de calcul. Dans la numération binaire, on dira que la valeur informatique de l'atome passera de 0 à 1 ou de 1 à 0 (avec possibilité d'adopter toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et 1 si on estime devoir se situer au plan d'une opération analogique et non digitale). Ce changement de valeur informatique aura lui-même un résultat physique obligé. Ainsi, au cas où l'atome était lié à un voisin dans une porte logique ET, utilisée pour obtenir un niveau de sortie 1 si tout les niveaux d'entrée sont à 1, son changement d'état transforme la sortie 1 en sortie 0, ce qui peut modifier non seulement l'état physique immédiat de la molécule mais la façon dont celle-ci, considérée à son tour comme un élément de calcul dans un réseau plus vaste, interagit avec le reste de son environnement physique et biologique. On obtiendrait exactement le même résultat si le rayon ionisant tombait sur une des mémoires d'un ordinateur. Non seulement l'état physique de cette mémoire serait modifié (avec possibilité de destruction incapacitante) mais le programme faisant appel à cette mémoire, ainsi modifiée, serait lui-même modifié : soit rendu plus efficace (avec beaucoup de chance) soit plutôt affecté d'un bug entraînant des effets parasites ou même bloquants.

Seth Lloyd nous propose alors de réfléchir au concept d'entropie. Le changement d'état physique et informationnel d'une unité quelconque de l'univers entraîne des effets très importants au regard de "l'entropie énergétique et informationnelle" de ce dernier. De même qu'il rapproche l'état physique d'un élément de l'univers avec son état informationnel, Seth Lloyd rapproche l'état

d'entropie énergétique de cet élément avec son état d'entropie informationnelle. L'énergie de l'univers, mesurée par son niveau d'entropie est "ce qui lui permet de faire telle ou telle chose. L'information est ce qui lui commande de faire telle ou telle chose". Dans ce cas, l'entropie informationnelle est l'information nécessaire pour analyser les mouvements au hasard des atomes et des molécules de l'univers. Comme ces mouvements sont trop petits pour être identifiés par nous, l'information les concernant nous sera invisible. On parlera alors d'entropie informationnelle pour ce qui nous concerne ici et maintenant. Elle mesure notre ignorance relative à l'état de détail de ce système (ignorance qui n'était pas celle, on s'en souvient de l'imaginaire démon de Maxwell, qui savait tout sur l'état de toutes les molécules d'un gaz enfermé dans une enceinte). La 2e loi de la thermodynamique (une autre des lois de la physique que Seth Lloyd considère comme universelle) précise que l'entropie énergétique ne diminue jamais. Autrement dit, l'énergie inutilisable s'accroît sans cesse aux dépens de l'énergie utilisable. Il en est de même de l'information. L'essentiel de l'information intéressant un système physique (par exemple les positions relatives de chacun de ses atomes) nous est inconnu. Nous n'avons que des informations statistiques ou de probabilité à leur sujet. Nous pouvons préciser ces informations - sous réserve des limites imposées par la physique quantique et tenant au principe d'incertitude. Mais ceci exige alors une recherche d'information introduisant plus de désordre informationnel dans le système global que nous n'obtenons d'ordre permettant d'améliorer la précision de notre description.

Pour Seth Lloyd, l'univers entier se comporte comme un ordinateur quantique universel. Il ne s'agit pas sous sa plume d'une image mais d'une réalité. Autrement dit, l'univers n'a pu apparaître et se développer qu'en se servant à lui-même d'ordinateur quantique. De la même façon, notre organisme ne peut croître et se protéger des agressions qu'en utilisant ses propres capacités computationnelles. Evidemment, comme la théorie de l'information prescrit que n'importe quel ordinateur peut simuler n'importe quel autre, il est intéressant pour nous que l'univers soit fondamentalement un ordinateur quantique. Nous pourrions ainsi le simuler quand nous aurons réalisé un de ces instruments. Mais le point essentiel est que, dans le scénario proposé par Seth Lloyd, si l'univers n'avait pas été un ordinateur quantique, il n'aurait pas pu acquérir dans les 14 milliards d'années de sa vie supposée, la complexité que nous lui connaissons aujourd'hui. En effet, les toutes premières informations reçues par l'univers à sa naissance, si elles avaient été traitées de façon linéaire par un ordinateur séquentiel, n'auraient pas permis d'explorer en temps utiles les multiples branches d'opportunité nécessaires à ce que soient dégagées les solutions les plus viables à la survie de l'univers sous la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, depuis la création des galaxies jusqu'à celle de la vie et de l'intelligence sur notre Terre. L'univers se serait développé de façon linéaire, sans doute très monotone. Il aurait ressemblé à un lac sans vent.

Au contraire, la multiplication des calculs en superposition a permis d'explorer toutes les possibilités d'évolution en parallèle. Certes, toutes les hypothèses n'ont pas été matérialisées. Seules certaines ont été retenues. Mais par qui et de quelle façon ? Selon Seth Lloyd, elles l'ont été par l'interaction entre les bits quantiques et les bits matériels résultant des premières opérations logiques de type ET, OU, NON, COPIE réalisées initialement. Cette interaction «matérialisante» résulte du phénomène désormais admis par les physiciens quantiques, dit de la décohérence. En termes plus classiques, on parle de la réduction de la fonction d'onde d'un système quantique suite à la mesure réalisée par un observateur macroscopique.

Seth Lloyd nous invite à prendre comme exemple une des toutes premières opérations réalisées par l'univers dès sa naissance (soit approximativement 10-44 secondes en temps de Planck). Il s'agit de la façon dont des instabilités dans la répartition de l'énergie initiale sont apparues à la suite des fluctuations quantiques des niveaux d'énergies. Si l'on considère ces fluctuations comme des opérations informatiques, explorer leurs conséquences aurait pris beaucoup trop de temps à un ordinateur digital, au rythme imposé par l'inflation. L'univers serait resté homogène. Leur exploration en parallèle par un ordinateur quantique a permis de faire apparaître de nombreux types de répartition de la densité énergétique. Un multivers aux innombrables branches a été esquissé. Mais le propre de l'ordinateur quantique est de décohérer dès que l'on veut connaître le résultat de ses calculs. En l'espèce, comme il n'y avait pas à l'époque d'observateur macroscopique capable d'interagir avec les calculs de l'ordinateur quantique universel, c'est un simple hasard qui a entraîné le choix d'un embranchement parmi les multiples histoires virtuellement possibles. C'est ce hasard qui a produit les inégalités dans la densité de matière énergie du cosmos initial, détectées par la sonde Wilkinson.

De proche en proche, ces premiers choix ont entraîné des décohérences en chaînes portant sur les innombrables calculs quantiques que continuait à faire l'ordinateur quantique universel. L'univers tel que nous le connaissons en a résulté. Chaque fois qu'un q.bit de l'ordinateur quantique universel proposait un grand nombre, sinon une infinité de choix, l'interaction avec la matière déjà créée obligeait l'univers à choisir une solution et une seule. Mais ceci ne veut pas dire que l'« histoire » ainsi écrite était obligée de redevenir linéaire. Les fluctuations propres à la physique quantique introduisaient en permanence des éléments générateurs de diversité, dont certaines mutations génétiques donnent un exemple en biologie.

## Chapitre 1, Section 3 :

### **Si l'univers est un ordinateur quantique, il continue à calculer à grande échelle**

Nous avons donc avec ces hypothèses (1) des pistes très intéressantes permettant à la science matérialiste de répondre à la question de l'origine de l'univers, en échappant à la nécessité de choisir entre le récit de la Genèse (qui n'est pas une réponse scientifique) et le silence embarrassé du physicien traditionnel confronté aux limites de sa connaissance. On nous objectera que l'« histoire » résumée ci-dessus ne nous fait que reculer dans le temps, sans nous apporter de réponse définitive. En effet, la question des origines reste posée : comment se serait créé le monde quantique dont notre univers serait l'émanation ? Mais parler de physique quantique, nous l'avons vu, nous oblige à changer de références. On ne peut plus se placer dans le temps, en évoquant des chaînes de causalité échelonnées dans une chronologie, car le monde quantique est sans dimensions, ni temporelles ni spatiales. La question « qui a créé quoi ? » y perd son sens. Beaucoup d'autres questions de la culture humaine traditionnelle y perdent aussi leur sens, notamment celle du réel. Nous allons y revenir. Ces questions conservent leur sens dans l'univers macroscopique qui est le nôtre, mais nous devons apprendre chaque fois que nécessaire à nous déconnecter de la science macroscopique et des significations que nous croyons y trouver si nous voulons faire progresser notre connaissance du monde quantique et, peut-être, les chemins que nous pourrions y ouvrir pour découvrir à notre existence des significations toutes différentes. Dans certains cas, on pourra y retrouver des intuitions propres aux religions. Cela ne nous surprendra pas car depuis la nuit des temps, l'interrogation métaphysique et religieuse a précédé la réflexion véritablement scientifique. Mais ce ne sera pas aujourd'hui une raison suffisante pour considérer les propos des religions sur la science, fussent-ils très respectables, comme ceux dispensés régulièrement par le Dalai Lama, comme pouvant orienter la recherche scientifique de notre temps.

Nous avons d'autant plus intérêt à comprendre ce monde qu'en fait, nous restons en permanence reliés à lui par d'innombrables échanges entre particules quantiques. Notre univers ne s'est pas définitivement déconnecté du vide initial quand la fluctuation dont il est issu s'est trouvée matérialisée. Il continue à interagir avec le continuum quantique sous-jacent. La physique moderne, ne fut-ce que dans l'exemple de l'ordinateur quantique évoqué ci-dessus, montre et démontre que nos systèmes (décohérés) entretiennent en permanence des relations causales avec le monde quantique. On soupçonne dorénavant, nous l'avons dit plus haut, que sans cesse la rencontre d'atomes et de molécules de notre univers avec des particules

quantiques émergées de façon aléatoire du vide quantique modifie l'organisation de ces atomes et particules. Bien plus, des phénomènes d'intrication entre particules quantiques et atomes ou molécules de notre monde pourraient conférer à ces dernières les propriétés computationnelles des bits quantiques. Tout ceci entraînerait un renouvellement permanent bien que peu observable de l'architecture et des fonctionnalités des entités matérielles, biologiques et informationnelles peuplant notre monde.

On se trouverait ainsi confronté à un puissant mécanisme générateur d'aléatoire et de mutations qui conduirait sans cesse de nouvelles entités biologiques et informationnelles créées au sein de notre univers à entrer en compétition darwinienne avec celles qui les ont précédées. Ainsi l'univers s'adapterait beaucoup plus vite que l'on ne le soupçonne aux contraintes nées de son propre développement. Nous allons retrouver de telles hypothèses dans le chapitre consacré à l'évolution. Elles permettraient notamment d'expliquer l'étonnante rapidité de l'apparition d'espèces profondément différentes les unes des autres, dans le court temps de quelques 600 millions d'années – ce que même les darwiniens ont un peu de mal à justifier.

Il est évident que ce que nous disons ici de l'interaction possible entre particules quantiques et objets du monde macroscopique ne devrait pas être réservé à ce qui se produit sur la Terre. C'est a priori le cosmos macroscopique tout entier qui évoluerait en interaction avec le tissu quantique de l'univers. Les formes ainsi créées n'auraient aucune raison de se ressembler. Il se pourrait pourtant que, si l'univers tout entier continuait à calculer son évolution comme le ferait un immense ordinateur quantique, il impose aux nouvelles formes émergentes dont il se trouverait doté une cohérence organique d'ensemble. De la même façon notre corps, quand il est en bonne santé, impose une logique d'ensemble assez étroitement contrainte aux mutations que subissent en permanence ses cellules.

Toutes ces perspectives, qui ne font en rien appel au spiritualisme (bien qu'elle soient semblables, au moins dans l'esprit, à des métaphores philosophico-religieuses telles que celles ayant trait au Tout et aux Parties), vont-elles décourager le recours aux hypothèses selon lesquelles l'univers serait une création divine ? Il ne faut pas l'espérer. Les spiritualistes diront en effet que la question des origines de l'univers reste posée mais doit être désormais abordée autrement : qui est à l'origine de la création du monde quantique, de ce continuum peuplé d'énergie indifférenciée dont désormais toute matière organisée paraît devoir émerger ? Les spiritualistes peuvent en effet accepter l'idée que l'acte fondateur de la création de l'univers par la divinité soit situé plus en amont, non pas dans le temps puisque le vide quantique ne connaît pas le temps, mais ailleurs.

Mais il faut voir que ce que cherchent les scientifiques matérialistes n'est pas de démontrer la non-existence de Dieu. C'est de décourager les explications spiritualistes simplistes que les religions voudraient leur imposer. Ceci parce qu'avec ces explications la poursuite des recherches scientifiques ne s'impose plus. Si les

explications sont là depuis 2000 ans, les chercheurs n'ont plus qu'à se faire moines contemplatifs. Les spiritualistes pourront utiliser l'hypothèse du vide quantique et de son immanence pour recréer à partir d'une terminologie modernisée une image de Dieu que leur liberté sera d'adorer, comme le prescrivent les Ecritures. Les scientifiques se sont au contraire ouverts un vaste champ d'observation instrumentale, d'expérimentation et de théorisation scientifiques dont ils ne sont pas près d'épuiser la richesse. Ils peuvent plus que jamais espérer construire un monde nouveau qui n'aurait pas besoin de la prière pour se développer. Ceci serait conforme à l'ambition constante du matérialisme scientifique. L'idée de Dieu lui est inutile. Il peut de son propre chef donner du sens à sa recherche et ouvrir des voies transcendantes.

1 : Evoquons à ce stade un point que nous développerons. Certains lecteurs s'étonneront de l'ethnocentrisme consistant à comparer l'univers à l'ordinateur, invention humaine bien plus modeste. Mais dans l'esprit de Seth Lloyd comme d'ailleurs dans le nôtre, si le cerveau de l'homme (ordinateur lui-même sous certains aspects, comme nous le verrons) a inventé l'ordinateur, ce fut parce que l'un et l'autre avaient incorporé sans s'en rendre compte des architectures de traitement des données qui étaient systématiques au cœur du grand ordinateur universel. Nous ne sommes, nous et nos ordinateurs, que des enfants (si on peut oser cette image) de l'ordinateur cosmologique. A travers nous, il poursuit sa computation permanente.

## Chapitre 1, Section 4 :

### La question des mathématiques

#### La question des mathématiques

Toutes les sciences ont recours aux mathématiques, y compris la physique quantique.

Elles le font d'abord par commodité. Une équation ou une figure géométrique permet de se représenter un phénomène, sous forme de modèle, plus facilement qu'en utilisant les périphrases du langage courant. De plus, aujourd'hui, les ordinateurs peuvent faire tourner des équations complexes sans effort, faisant apparaître des résultats insoupçonnables par l'imagination. En ce sens, les mathématiques sont la représentation la plus fidèle qui soit du réel instrumental produit par l'homme, tel que défini ci-dessus : par exemple un pont, une fusée spatiale, une fonction biologique.

Mais les mathématiques sont-elles pour autant l'expression la plus fidèle qui soit d'un hypothétique réel en soi, à supposer que nous conservions ce terme ? Autrement dit, le réel est-il mathématique ?

Beaucoup de mathématiciens ont tendance à le penser(1). Mais il est difficile de s'en convaincre, car il n'est pas de mathématiques sans supports matériels ou biologiques (neurones par exemple). Un tissu cosmologique composé de mathématique paraît aussi improbable que s'il était, comme le prétendent certains, fait d'informations. Des mathématiciens devenus informaticiens, comme Stephen Wolfram (Wolfram, op.cit.) prétendent d'ailleurs aborder l'ensemble des problèmes scientifiques du moment sans faire appel aux mathématiques, auxquelles ils substituent des automates cellulaires(2). Pour Wolfram, les mathématiques ne traitent que les questions qu'elles sont outillées pour résoudre. Elles ne cherchent donc pas à résoudre des questions qui pourtant seraient essentielles à la compréhension de beaucoup de phénomènes complexes. D'une certaine façon, elles interdisent même d'imaginer de tels phénomènes. On pourrait perfectionner les outils, comme le firent les grands mathématiciens du passé en inventant le calcul différentiel et le calcul infinitésimal. Mais encore faudrait-il que les mathématiciens d'aujourd'hui s'intéressent aux questions scientifiques qu'ils ne peuvent résoudre. Ils leur préfèrent généralement la théorie sans applications.

L'hypothèse que les mathématiques sont des constructions ou outils plus ou moins imparfaits dont l'évolution a doté les organismes vivants, en même temps qu'elle les dotait d'autres types de langages symboliques, pourrait être confortée par le fait que l'aptitude à dénombrer les éléments significatifs de l'environnement, comme d'ailleurs l'aptitude à construire des cartes géométriques de celui-ci, semblent très répandues, y compris chez des espèces qui ne sont pas considérées comme supérieures(3). Nous retrouvons alors l'hypothèse constructiviste. On construit les mathématiques dont on a besoin pour agir - ce qui justifie la revendication de scientifiques travaillant dans les secteurs émergents : donnez-nous les outils mathématiques qui nous manquent encore, au lieu de vous complaire dans la contemplation d'hypothétiques essences mathématiques.

1 : Un mathématicien français renommé, Alain Connes, parle de " mathématiques archaïques " qui constitueraient un univers profond indépendant des hommes et que le mathématicien aurait pour mission de découvrir, comme l'explorateur spatial découvre de nouvelles planètes. On lira de lui, notamment, Matière à penser (avec Jean-Pierre Changeux), Odile Jacob, 1989-2000 (rééditions).

2 : Voir chapitre 4.

3 : Des observations, toujours plus nombreuses, montrent que beaucoup d'animaux pourraient identifier et distinguer des groupes comportant de un à trois, voire cinq individus.

## Chapitre 1, Section 5 :

### **MCR, une méthode de formalisation des connaissances inspirée de la physique quantique**

Un certain nombre de points abordés dans cette section ont été développés dans le fichier suivant :

<http://www.automatesintelligents.com/biblionet/2006/sep/mms.htm>

Due à la physicienne et philosophe des sciences Mioara Mugur-Schächter, la Méthode de Conceptualisation Relativisée (dite ici MCR) a été élaborée progressivement à partir de 1982 (1). Ces travaux viennent d'être repris en français et considérablement augmentés sous le titre « Sur le tissage des connaissances » Hermès Lavoisier 2006. il s'agit d'un livre difficile, que nous ne conseillons qu'aux lecteurs résolument scientifiques. Nous résumons dans la section suivante les passages les plus significatifs du livre. Ce travail constitue selon nous une révolution dans la façon de se représenter les processus d'acquisition de la connaissance et par conséquent, la "réalité" ou le "monde" objet de cette connaissance. La question de la consistance du réel s'impose dans pratiquement tous les domaines des sciences macroscopiques : mathématiques, biologie, science des organisations, théorie de la communication, robotique et vie artificielle. Elle est évidemment aussi à l'ordre du jour dans la philosophie des connaissances ou épistémologie. Elle se situe d'une façon claire dans le débat entre le réalisme et le constructivisme. Enfin, elle intéressera très concrètement les regards que la politique de demain voudra poser sur le monde.

Aujourd'hui, nous l'avons dit, il faut admettre que la réalité, tout au moins les modèles et produits de toutes sortes résultant de l'activité humaine, est "construite" par cette dernière, d'une façon jamais terminée mêlant inextricablement le constructeur et son œuvre. C'est la physique quantique qui a imposé ce nouveau regard, mais celui-ci, nous dit Mioara Mugur-Schächter, devrait s'étendre désormais à l'ensemble des connaissances, qu'elles soient scientifiques ou qu'elles soient véhiculées par les langages empiriques assurant la communication inter-humaine. Dès les débuts de la physique quantique dans les années 1930, les physiciens quantiques avaient annoncé que les manifestations observables des micro-entités qu'ils étudiaient étaient "construites" au cours du processus d'investigation. Mais il aura fallu de nombreuses décennies pour que l'on puisse clairement distinguer entre

les méthodologies d'étude de la physique quantique et celles des sciences du macroscopique, c'est-à-dire de toutes les autres sciences.

Comme l'indique Mioara Mugur Schächter, ce délai a tenu en partie au caractère apparemment ésotérique du formalisme quantique ainsi qu'au peu d'intérêt des physiciens vis-à-vis des questions épistémologiques et philosophiques. Peu leur importait, sauf exceptions, d'envisager non seulement le type de méthodologie qu'ils utilisaient en terme de philosophie des connaissances, mais aussi ce qu'il y avait ou non derrière les observables, pourvu que les prévisions faites sur les phénomènes se révèlent justes. Ce souci de pragmatisme est encore dominant. Ainsi demain, les ingénieurs pourront réaliser un ordinateur quantique sans se poser la question de la consistance métaphysique de l'intrication et de la décohérence, pourvu qu'ils puissent tirer parti de ces deux phénomènes avec un taux d'erreur acceptable dans des technologies applicatives.

La méthode MCR propose ce qui aurait déjà dû être entrepris depuis longtemps par les scientifiques et les épistémologistes s'ils avaient davantage réfléchi aux implications de la physique quantique sur les méthodes d'acquisition de la connaissance : généraliser à l'ensemble des sciences les processus de représentation (ou plutôt de "construction du réel") utilisés par la physique quantique et y ayant fait leurs preuves.

1 : Method of Relativized Conceptualisation. La Méthode a fait l'objet de divers articles et discussions et d'un ouvrage de présentation détaillé : *Quantum Mechanics, Mathematics, Cognition and Action* (Kluwer Academic, 2002). Un ouvrage destiné à un public plus large est en cours de rédaction par l'auteur.

## Chapitre 1, section 5 :

### Résumé de la méthode MCR

C'est sur la base du nouveau regard sur le monde proposé par la physique quantique et pour le rendre applicable à l'ensemble des connaissances que Mioara Mugur-Schächter a voulu construire MCR de façon systématique. Elle était particulièrement légitime à faire ce travail, ayant conduit elle-même des recherches brillantes en physique et travaillé, jeune, avec les plus grands scientifiques de la génération précédente.

Le nouveau regard apporté par la physique quantique, tout le monde le sait désormais, a signé, tout en moins dans cette discipline, la mort du « réalisme des essences », selon lequel il existerait une réalité indépendante de l'observateur, composée d'« objets » que l'observateur pouvait décrire « objectivement », en s'en approchant de plus en plus grâce à des instruments de plus en plus perfectionnés. Les physiciens de la grande époque de l'Ecole de Copenhague s'étaient aperçus qu'ils ne pouvaient absolument pas rendre compte de ce que montraient leurs instruments s'ils continuaient à faire appel au réalisme. Mais s'ils ont jeté les bases d'une nouvelle méthode, ils n'en ont pas tiré toutes les applications épistémologiques. Beaucoup de leurs successeurs ne l'ont d'ailleurs pas encore fait. Mioara Mugur-Schächter fut véritablement la première à proposer de généraliser cette méthode à l'ensemble des sciences. Son mérite est au moins aussi grand que celui de ses prédécesseurs.

Nous pouvons observer que c'est en premier lieu le perfectionnement des instruments d'observations appliqués aux phénomènes de l'électromagnétisme et de la radioactivité qui a obligé les physiciens utilisateurs de ces instruments à regarder autrement des phénomènes qu'ils ne s'expliquaient pas dans le cadre des anciens paradigmes, les contraignant par exemple à ne pas choisir entre le caractère ondulatoire et le caractère corpusculaire de la lumière. Or ces instruments étaient apparus, sur le « marché des instruments de laboratoires », si l'on peut dire, non pas du fait de « géniaux inventeurs » convaincus qu'ils abordaient de nouveaux rivages de la connaissance, mais du fait de modestes techniciens. Ceci correspond à l'intuition selon laquelle les super-organismes technologiques se développent selon des modes de vie propres, proches de la mémétique, et que c'est leur évolution quasi biologique qui entraîne celle des conceptualisations et connaissances organisées en grands systèmes dans les sociétés humaines.

Mais l'évolution technologique n'aurait pas suffi à provoquer seule la révolution conceptuelle. Il a fallu aussi que des mutations dans les modes de

représentation du monde hébergées par les cerveaux de quelques précurseurs de grand talent les obligent à voir les incohérences, plutôt que continuer à buter contre elles pendant encore des décennies. Nous estimons pour notre part que Mioara Mugur-Schächter a fait preuve d'un génie précurseur aussi grand, en sachant passer d'une pratique mal formulée et mal systématisée, inutilisable ailleurs qu'en physique, à une méthodologie rigoureuse applicable par toutes les sciences.

Evoquons ici en quelques lignes les grandes étapes indispensables à la construction des connaissances selon MCR. Il s'agit en fait d'une méthodologie pour la production des descriptions, car il n'y a de science que de descriptions, les « phénomènes en soi » étant réputés non-existants.

- Le Fonctionnement-conscience. On postule au départ l'existence d'un observateur humain, doté d'un cerveau lui-même capable de faits de conscience. Ce cerveau est tel qu'il peut afficher des buts au service desquels mettre une stratégie. Mioara Mugur-Schächter considère que l'organisme vivant, ceci à plus forte raison s'il est doté de conscience, est capable de téléonomie (1). Nous pensons pour notre part que le concept de Fonctionnement-conscience peut être étendu au fonctionnement de tous les êtres vivants, et peut-être même à celui de précurseurs matériels de la vie biologique, aux prises avec la Réalité telle que définie ci-dessous. Le terme de conscience ne peut donc alors être conservé que sous forme de métaphore. Les concepteurs de robots véritablement autonomes espèrent que ces robots pourront procéder de même afin de se doter de représentations ayant du sens pour eux.

- La Réalité. On postule qu'il existe quelque chose au-delà des constructions par lesquelles nous nous représentons le monde, mais (pour éviter les pièges du réalisme), qu'il est impossible – et sera à jamais impossible - de décrire objectivement cette réalité. Peut-être pourrait-on (la suggestion est de nous) assimiler cette réalité à ce que la physique contemporaine appelle le Vide quantique ou l'énergie de point-zéro, à condition d'admettre que ce Vide est et demeurera indescriptible, d'autant plus qu'il ne s'inscrit ni dans le temps ni dans l'espace propres à notre univers. Seules pourront en être connues les fluctuations quantiques en émanant, si elles donnent naissance à des particules qui se matérialiseraient par décohérence au contact avec notre matière. Ces diverses entités d'ailleurs n'acquerront de « réalité » que dans les conditions de formalisation des connaissances proposées par la méthode.

- Le Générateur d'Entité-objet et l'Entité-objet ainsi générée. Il s'agit d'un mécanisme permettant au Fonctionnement conscience, dans le cadre de ses stratégies téléonomiques, de créer quelque chose (un observable) à partir de quoi il pourra procéder à des mesures. Il n'y aurait pas de science sans ce mécanisme. Nous procédons de cette façon en permanence dans la vie courante. Nous construisons des « objets » d'étude, qui n'existaient pas avant notre intervention.

- Les Qualificateurs. Il s'agit des différents points de vue par lesquels nous décrivons d'une façon utilisable par nous les Entités-objets que nous avons créés. Ces Qualificateurs sont les moyens d'observation et de mesure, biologiques ou instrumentaux, dont nous disposons. Il n'y a qu'une qualification par mesure et celle-ci n'est pas répétable car généralement l'Entité-objet a changé. Mais la multiplication des qualifications donne ce que MCR appelle des Vues-aspects proposant des grilles de qualifications effectives et intersubjectives. L'opération peut conduire à la constatation de l'inexistence relative de l'Entité-objet créée aux fins d'observation (inexistence relative car il serait contraire à MCR de parler de faux absolu). Cela montre que l'on ne peut pas inventer n'importe quelle Entité-objet et construire des connaissances solides à son propos. Il faut qu'elle corresponde à quelque chose dans la Réalité telle que définie plus haut et qu'elle puisse être mise en relation avec les grilles de qualification déjà produites. Ainsi les connaissances construites s'ajoutent-elles les unes aux autres.

- Le Principe-cadre. Il s'agit du cadre d'espace-temps dans lequel on décide d'observer l'Entité-objet afin de la situer.

Tout cela permet d'obtenir un canon général de description, utilisable dans n'importe quel domaine. Il repose sur le postulat de la non-possibilité de confronter la description avec un réel en soi ou réel métaphysique quelconque. Il débouche par contre sur une « description relativisée », individuelle ou probabiliste, à vocation inter-subjective, c'est-à-dire partageable par d'autres Fonctionnements-consciences, à travers ce que MCR appelle des Descriptions relativisées de base Transférées. La somme de celles-ci devrait correspondre à la somme des connaissances scientifiques relativisées que grâce à MCR nous pouvons obtenir sur le monde.

Mioara Mugur-Shächter, depuis les premières années passées à élaborer la méthode, lui a donné plusieurs applications d'un intérêt méthodologique considérable. Elles apportent la preuve de l'intérêt de la révolution épistémologique qui découle de la généralisation de MCR à d'autres domaines de la représentation des connaissances. On y voit en effet remis en cause, d'une façon qui sera certainement fructueuse, l'essentiel de ce que l'on considérait jusqu'ici comme les bases de la conceptualisation dans les disciplines évoquées. Il ne devrait plus jamais être possible, dans ces disciplines, de continuer à raisonner selon les précédentes méthodes, sauf à le faire intentionnellement dans le cadre de recherches limitées.

Nous ne pouvons ici résumer l'argumentaire des démonstrations proposées par Mioara Mugur-Shächter. Elles concernent la logique, les probabilités, le concept de transmission des messages chez Shannon, la complexité et finalement le temps, vu sous l'angle des changements identité-différence qui peuvent s'y produire.

Bornons-nous à dire que, dans chacun de ces cas, on retrouve le postulat de MCR selon lequel on ne peut pas imaginer et moins encore rechercher une prétendue réalité ontologique ou en soi de phénomènes qui sont en fait des

constructions du Fonctionnement-conscience et du Générateur d'Entité-objet tels que définis dans la première partie du livre. Prenons l'exemple de la logique. Si celle-ci était considérée comme un instrument du même type que les mathématiques (dont la plupart des mathématiciens n'affirment pas qu'elles existent en soi), on pourrait lui trouver quelque utilité, mais seulement pour donner de la rigueur aux raisonnements abstraits. Elle ne servirait pas à obtenir de descriptions du monde. Or la logique prétend au contraire décrire des classes d'objets, auxquelles elle applique des prédicats. Mais ces objets et ces prédicats sont présentés comme existant dans la réalité ou traduisant des relations réelles entre éléments de la réalité. La logique ne se pose donc pas la question du processus de construction par lequel on les obtient. Elle suspend donc quasiment dans le vide l'ensemble de ses raisonnements. Faire appel à ceux-ci risque alors d'être inutile, voire dangereux, en égarant l'entendement dans des cercles vicieux (comme le montre le paradoxe du menteur). La logique ne retrouvera de bases saines qu'en utilisant MCR pour spécifier les objets de ses discours.

Il en est de même du concept de probabilités tel que défini notamment par le mathématicien Kolmogorov. L'espace de probabilité proposé par ce dernier ne devrait pas être utilisé dans les sciences, sauf à très petite échelle. Il ne peut que conduire à des impasses. Si l'on pose en principe qu'il existe des objets en soi difficilement descriptibles par les sciences exactes, dont la connaissance impose des approches probabilistes, le calcul des probabilités est un outil indispensable. Ainsi on dira que la probabilité de survenue d'un cyclone dans certaines conditions de température et de pression est de tant. Mais si, pour analyser plus en profondeur les phénomènes de la thermodynamique atmosphérique et océanique, on admettait que le cyclone n'existe pas dans la réalité, pas plus que l'électron ou le photon, mais qu'il est la construction ad hoc unique d'un processus d'élaboration de qualification selon MCR, le concept de probabilité changera du tout au tout. On retrouverait, à une échelle différente, l'indétermination caractéristique de la physique quantique et la nécessité de faire appel à des vecteurs d'état et à la mathématique des grands nombres pour représenter concrètement de tels phénomènes.

La mesure de la complexité oblige aux mêmes restrictions. Pour la science « classique » de la complexité, il existe des entités réelles (en soi) dont les instruments classiques de mesure ne peuvent pas donner, du fait de leur imperfection, de descriptions détaillées et déterministes. D'où une impression de complexité. Il faut donc tenter de mesurer les systèmes ainsi prétendus complexes par des méthodes détournées. Mais si l'on admettait que l'objet, complexe ou pas, est une création du Fonctionnement-conscience et relève donc de MCR dans la totalité de son étude, les choses se simplifieraient. On cesserait en fait de parler de complexité. On se bornerait à dire que l'on a créé une Entité-objet accessible aux opérations de qualifications, qui n'aurait pas d'intérêt en soi, mais seulement comme élément d'un processus plus général de construction de connaissances.

Mioara Mugur-Shächter ne le dit pas, mais ce qui précède pourrait selon nous s'appliquer au concept de système. La science des systèmes s'évertue à identifier ceux-ci dans la nature et se noie évidemment dans le nombre immense des candidats-systèmes qu'elle peut identifier. Mieux vaudrait admettre d'emblée que le système en général, tels systèmes en particulier, n'existent pas en soi, mais doivent être spécifiés en tant qu'Entités-objets créées par un Générateur ad hoc.

Le même type de raisonnement s'appliquera à la théorie de Shannon et au concept de temps, tels que présentés dans l'ouvrage.

1: Selon Wikipedia

<http://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9l%C3%A9ologie>, la téléologie est l'étude des systèmes finalisants acceptant différentes plages de stabilité structurelles et capables, en général, d'élaborer des buts ou de modifier leurs finalités, (en anglais : "purposeful systems"). Dans les systèmes humains psycho-socio-politique, cette téléologie peut se nommer "autodétermination". La téléonomie est l'étude des systèmes finalisés par une stabilité ; recherche de la stabilité structurelle et non du changement, (en anglais : "goal seeking systems"). En psychologie et en sociologie, la téléonomie peut se nommer "autonomie". Ces mots sont suspects pour les matérialistes. Mais il est tout à fait possible d'accepter les définitions ci-dessus sans se référer à des causes finales imposées par une divinité quelconque.