**A propos des « Sept brèves leçons de physique » de Carlo Rovelli**

**(Alain Bruyère – Janvier 2016)**

Les sept leçons

Comment expliquer en termes simples des concepts aussi complexes que la relativité générale et la mécanique quantique ? C’est le défi qu’a relevé le physicien italien Carlo Rovelli (également historien des sciences et membre senior de l’Institut universitaire de France) dans un petit opuscule s’intitulant « Sept brèves leçons de physique » paru aux Editions Odile Jacob en 2014.

Pour que mon épouse, romaniste, elle-même écrivaine mais non scientifique, après avoir lu ce petit livre de 90 pages, en italien, me dise qu’elle avait tout compris de ces deux grandes théories développées au XXe siècle, il fallait en effet que ce fût clair, court, concis, compréhensible et particulièrement bien écrit. J’ai donc embrayé ne voulant pas être en reste et lu d’une traite ces 90 pages réparties en 7 leçons s’intitulant : 1) La plus belle des théories (la relativité générale), 2) Les quanta (la mécanique quantique), 3) L’architecture du cosmos (l’évolution de univers), 4) Les particules (les particules élémentaires), 5) Grains d’espace (la nature de l’espace et du temps, la gravité quantique), 6) La probabilité, le temps et la chaleur des trous noirs (la thermodynamique et la physique statistique), 7) Nous (l’humain, la conscience)

Rédigé initialement en italien et paru sous forme d’articles dans le supplément culturel du quotidien Il Sole 25 Ore, ce petit livre a été heureusement traduit en français par Patric Vighetti, philosophe français. Rédigé à l’intention d’un public non spécialiste, il propose ces sept leçons pimentées de questions-réponses , approche didactique bien connue des bons pédagogues. Aussi posons-nous de même dans ce résumé, les nombreuses questions que se pose Carlo Rovelli et tentons-nous de synthétiser les réponses qu’il y apporte lui-même.

Que retenir de ces sept leçons ?

Ne voulant pas revenir sur les deux piliers de la Physique du XXe siècle que sont la relativité générale et la mécanique quantique, ni sur la théorie de l’évolution du cosmos ni ré-aborder le domaine des particules élémentaires, je me limite dans cet article aux aspects qui m’ont personnellement le plus attiré et qui sont abordés dans les leçons 5 et 6 et 7.

Carlo Rovelli nous rappelle tout d’abord que la réalité physique est bien différente de celle que nous « voyons ». Ceci n’est en soi pas une grande nouveauté mais ce rappel mérite cependant d’être fait, tant la question du temps par exemple, que nous abordons plus loin, est une belle illustration de cette illusion toute humaine qu’est « le temps qui s’écoule ». Nous retrouvons ici le « Réel voilé » du physicien et philosophe français décédé en 2015, Bernard d’Espagnat, qui illustre bien les limites à la connaissance.

L’illusion de l’espace et du temps continus

Concentrons-nous tout d’abord sur l’espace et plus précisément sur ces grains d’espace que Carlo Rovelli nous présente comme des nœuds d’un treillis qui constituent l’espace même, celui-ci n’étant dès lors plus continu, mais quantifié par des atomes d’espace. Spécialiste et adepte de la gravité quantique à boucles (1), Carlo Rovelli nous décrit cet espace comme un champ spatio-temporel dynamique. Une espèce d’immense mollusque mouvant dans lequel nous sommes plongés, qui peut se comprimer, se tordre (relativité générale (2)) mais qui d’autre part est quantifié et présente donc une structure granulaire, constituée de grains (mécanique quantique (3)) que la théorie de la gravité quantique à boucles décrit à l’aide d’équations mathématiques déterminant leur évolution. «*On les appelle boucles ou anneaux, parce que chaque atome d’espace n’est pas isolé mais relié à d’autres formant un réseau de relations qui tisse la trame de l’espace physique comme des anneaux de fer tissent une cotte de maille. Où se trouvent ces quanta d’espace ? Nulle part. Ils ne sont pas dans l’espace, puisqu’ils constituent l’espace lui-même. L’espace est créé par l’interaction mutuelle des quanta de gravité individuels. Encore une fois le monde semble être relation avant d’être un ensemble d’objets*».

Mais la deuxième conséquence de cette théorie, encore plus extrême, c’est que « … *de même que disparaît l’idée de l’espace continu …de même disparaît l’idée d’un temps continu élémentaire … qui s’écoule indépendamment des choses. ….L’écoulement du temps est interne au monde, il nait dans le monde même, à partir des relations entre les événements quantiques qui sont le monde et qui sont eux-mêmes la source du temps*». Les équations qui décrivent les grains d’espace et de matière sont en effet indépendantes du temps. « *... les champs qui forment le monde fluctuent à petite échelle, et les particules qui sont continuellement créées et détruites par ces frémissements vivent de brèves vies éphémères. ….le monde est un pullulement continuel et instable d’objets, une apparition-disparition incessante d’entités éphémères. Un ensemble de vibrations ….Une poignée de types de particules élémentaires, qui vibrent et flottent continuellement entre l’existence et la non-existence…* »

«*Le monde que décrit cette théorie (la gravité quantique à boucles) s’éloigne encore plus du monde qui nous est familier. Il n’y a plus d’espace « contenant » le monde, et il n’y a plus de temps « au cours duquel » ont lieu les événements. Il n’y a que des processus élémentaires où des quanta d’espace et de matière interagissent continuellement. L’illusion de l’espace et du temps continus autour de nous est la vision floue de ce pullulement dense de processus élémentaires* ».

Les trous noirs, sources de connaissance de la théorie de la granularité de l’espace

Cependant, comment vérifier cette théorie de la granularité de l’espace ? C’est ici qu’interviennent ces fameux trous noirs formés par les étoiles qui s’effondrent sur elles-mêmes. Un tel effondrement provoque ce qu’on appelle un trou noir, l’étoile implose mais par réaction, un rebond s’opère et le trou noir explose. Vu que le temps est déformé pour un observateur sur une telle étoile de Planck (étoile où la pression engendrée par les fluctuations de l’espace-temps contrebalance le poids de la matière) par rapport à un observateur sur la terre, ce qui pour celui-ci apparaît comme un processus très lent est en fait pour celui-là un rebond rapide. « *C’est pourquoi nous voyons les trous noirs semblables à eux-mêmes pendant des temps très longs.*».

Se pose alors la question de savoir où est partie la matière dont les étoiles étaient formées après leur implosion ? L’auteur nous répond : « *Si la théorie de la gravité quantique à boucles est correcte, la matière ne peut pas s’être effondrée en un point infinitésimal*. » Il n’y a en réalité pas de points infinitésimaux, uniquement des régions finies d’espace. La matière s’écroule sous son propre poids, devient de plus en plus dense, jusqu’à ce que la mécanique quantique puisse engendrer une pression contraire, une force répulsive qui contrebalance le poids de la matière et provoque sous forme de rebond phénoménal une gigantesque explosion que nous appelons ……..Big-Bang. « … *notre monde pourrait être né d’un univers précédent qui était en train de se contracter sous son propre poids, jusqu’à s’effondrer dans un espace très petit, avant de « rebondir » et de recommencer à se dilater, pour devenir l’univers en expansion que nous observons autour de nous.  Le moment du rebond, lorsque l’univers a la taille d’une coquille de noix, est le royaume de la gravité quantique : espace et temps ont disparu, et le monde s’est dissous en un nuage probabiliste que les équations parviennent toutefois à décrire* ».

Finalement, notre univers ne serait que la conséquence du rebond d’un univers précédent qui aurait implosé en s’effondrant sur lui-même et serait passé par une phase intermédiaire sans espace ni temps avant de se redéployer en espace et temps tels que nous les connaissons aujourd’hui.

Lien entre chaleur et temps … mais encore ?

L’auteur nous remet alors en mémoire le lien intime entre la chaleur et temps. Au fond, qu’est-ce que la chaleur ? Depuis Maxwell et Bolzman nous savons que l’air chaud est un air où les molécules bougent plus fort, plus vite, l’air froid, où les molécules bougent moins fort, moins vite, et non un fluide comme le croyaient les physiciens précédemment. Mais nous savons aussi que la chaleur va toujours des objets chauds vers les objets froids et non l’inverse. Pourquoi ?

C’est dans la réponse à cette question que le temps se retrouve intimement lié à la chaleur. En effet dans tous les cas où il n’y a pas d’échange de chaleur, le futur est semblable au passé. Un pendule qui ne dissiperait pas de chaleur pourrait être filmé et le film repassé à l’envers sans que l’on remarque un quelconque changement dans son évolution, il oscillerait à l’infini. Par contre, un pendule qui dissipe, à cause des frottements, de la chaleur, ralentit et le futur est donc différent du passé. «*Le phénomène fondamental qui distingue le futur du passé est donc le fait que la chaleur va des objets les plus chauds vers les objets les plus froids. ……La chaleur ne va cependant pas des objets les plus chauds vers les objets les plus froids en obéissant à une loi absolue; elle y va seulement avec une très grande probabilité. La raison est qu’il est statistiquement plus probable qu’un atome de la substance chaude, qui se déplace plus vite, heurte un atome froid et lui transmette une part de son énergie, que l’inverse… il n’est pas improbable qu’un corps chaud s’échauffe davantage en entrant en contact avec un corps froid : c’est seulement terriblement improbable. C’est cette partie de la physique que nous appelons physique statistique. … et le triomphe de cette physique a été de comprendre l’origine probabiliste de la thermodynamique, càd du comportement de la chaleur et de la température.* »

Probabilité et probabilité

Notons ici une différence importance que souligne l’auteur entre la notion de probabilité utilisée en physique quantique et celle utilisée pour expliquer la dynamique de la chaleur.

En mécanique quantique, la probabilité est liée de manière intrinsèque à la nature même des particules élémentaires qui ne sont pas localisées par exemple en un point précis et unique mais peuvent être en même temps en deux lieux différents avec des probabilités différentes (ce n’est que lors d’une mesure que l’on localise la particule de manière univoque, l’onde de probabilité s’effondrant pour donner la valeur exacte et précise de la localisation de la particule).

La probabilité liée à la chaleur quant à elle, « .. *a une origine différente et ne dépend pas de la mécanique quantique. La probabilité en jeu dans la science de la chaleur est liée à notre ignorance. …pour la plupart des phénomènes physiques également, nous savons quelque chose de leur état mais pas tout et nous ne pouvons faire que des prévisions probabilistes. … La partie de la physique qui explique ces choses est la physique statistique et le triomphe de cette physique a été de comprendre l’origine probabiliste de la thermodynamique, càd du comportement de la chaleur et de la température, à partir des idées de Boltzman. … la probabilité ne concerne pas l’évolution des corps en soi. Elle concerne l’évolution des valeurs de sous-classes de propriétés des corps lorsque ceux-ci interagissent avec d’autres corps »*. …La valeur des variables (ex la température) qui caractérisent le micro-état des corps n’est pas suffisante pour prévoir le comportement futur exact, mais elle l’est pour estimer qu’avec une excellente probabilité, les corps vont se réchauffer ou se refroidir.

Champ gravitationnel, chaleur et expérience de l’écoulement du temps

Et Rovelli d’avouer alors que nous ne comprenons pas encore comment le champ gravitationnel se comporte quand la chaleur s’y diffuse. Nous savons qu’un champ électromagnétique chaud se caractérise par un rayonnement électromagnétique dont les ondes vibrant au hasard distribuent l’énergie. Mais qu’est-ce qu’un champ gravitationnel chaud ? « *Le champ gravitationnel est l’espace lui-même, et même l’espace-temps ; par conséquent, lorsque la chaleur se diffuse dans le champ gravitationnel, l’espace et le temps eux-mêmes doivent vibrer… Cela nous ne savons pas le décrire* ». Survient alors le paradoxe suivant : « … *la direction du temps apparaît seulement quand il y a de la chaleur … La chaleur est la vibration de n’importe quoi … y compris de l’espace-temps même.. il n’y a pas de temps dans la gravité quantique à boucles*. ».

Carlo Rovelli pose dès lors la question : «*Mais d’où vient alors la tenace expérience de l’écoulement du temps ?* » et il répond : « *Une piste de réponse vient justement du lien étroit entre le temps et la chaleur, le fait que c’est seulement quand il y a un flux de chaleur que le passé et le futur se différencient, à cause du fait que la chaleur est liée aux probabilités en physique, et celles-ci, à leur tour, à ce que nos interactions avec le reste du monde ne distinguent pas les détails fins de la réalité. …. L’écoulement du temps …. apparaît plutôt dans le cadre de la statistique et de la thermodynamique. Cette dernière pourrait être la clé du mystère du temps. Le « présent » n’existe pas plus de manière objective qu’il n’existe un « ici » objectif* …*Notre mémoire et notre conscience s’élaborent sur ces phénomènes statistiques. Pour une hypothétique vue très fine qui verrait « tout », il n’y aurait pas de temps qui « s’écoule » et l’Univers serait un bloc de passé, de présent et de futur »*

Des p’tits trous des p’tits trous toujours des p’tits trous …noirs

Carlo Rovelli nous indique alors combien nous sommes encore incapables de combiner les 3 pièces du puzzle, de bâtir une théorie capable de relier les 3  pièces de notre savoir fondamental sur le monde que constituent Quanta, Gravité et Thermodynamique. Et ce, malgré les avancées en mécanique quantique et les hypothèses de l’émission de chaleur par les trous noirs comme a réussi à le montrer le physicien Stephen Hawking. « *Hawking a réussi à montrer que les trous noirs sont toujours « chauds ». Ils émettent de la chaleur. …. Or cette chaleur est un effet quantique sur un objet, le trou noir, qui est de nature gravitationnelle. Ce sont les quanta individuels d’espace, ces grains élémentaires d’espace, les « atomes d’espace » qui en vibrant, chauffent la surface d’un trou noir.* »

Conscience, quanta, information et liberté

Dans sa dernière leçon, Rovelli pose d’emblée la question suivante: *« Si le monde est pullulement de quanta éphémères d’espace et de matière, un immense jeu d’emboitements d’espace et de particules élémentaires, nous-mêmes, que sommes-nous ? »* Et de tenter d’y apporter quelques réponses*: « …Nous sommes avant tout le sujet qui observe ce monde …nous sommes les nœuds d’un réseau d’échanges, … dans lequel nous nous passons des images, des outils, des informations, de la connaissance. … mais du monde que nous voyons, nous sommes aussi partie intégrante, nous ne sommes pas des observateurs extérieurs. Nous sommes situés en lui. … Les images que nous nous construisons de l’Univers vivent en nous, dans l’espace de nos pensées mais elles décrivent plus ou moins bien le monde réel dont nous sommes une partie. Notre savoir réfléchit ainsi le monde. Il le fait plus ou moins bien mais il reflète le monde que nous habitons*. »

Il eût été impensable dans cette dernière leçon de ne pas aborder la question de la communication, de l’information, de la connaissance et de la liberté. Bien que cette question à elle seule mériterait bien plus que quelques pages, Carlo Rovelli ne l’esquive pas. « *Cette communication entre nous et le monde n’est pas quelque chose qui nous distingue du reste de la nature. Les choses interagissent continuellement les unes avec les autres et, ce faisant, elles portent la trace de l’état des autres : en ce sens elles échangent sans arrêt de l’information les unes avec les autres. …Quelle est la différence entre le thermostat de ma chaudière et moi qui sens et qui sais qu’il fait chaud et qui décide librement d’allumer ou non le chauffage et qui sais que j’existe ? Comment l’échange continuel d’information dans la nature peut-il nous produire, nous-mêmes et nos pensées ? ».* Vaste question s’il en est, que d’ailleurs, Michel Godron dans son ouvrage « Ecologie et évolution du monde vivant » aborde à la section 16 portant le titre « La vie est une transmission d’information ».

Et à la question : que signifie le fait que nous soyons libres de prendre des décisions, si notre comportement ne fait que suivre les lois de la nature ? Rovelli renchérit : « *N’y a-t-il pas contradiction entre notre sentiment de liberté et la rigueur avec laquelle nous savons désormais que se passent les choses dans le monde ? N’y a-t-il rien en nous qui échappe aux régularités de la nature et qui nous permette de les contourner ou de les détourner grâce à notre libre pensée ?* … *Lorsque nous disons que nous sommes libres - et il est vrai que nous pouvons l’être - cela signifie que nos comportements sont déterminés par ce qui se passe en nous-mêmes, dans notre cerveau, et qu’ils ne sont pas contraints de l’extérieur. Etre libre ne signifie pas que nos comportements ne sont pas déterminés par les lois de la nature. Etre libre signifie qu’ils sont déterminés par les lois de la nature qui agissent sur notre cerveau. Nos décisions libres sont librement déterminées par les résultats des innombrables et fugaces interactions entre les milliards de neurones de notre cerveau : elles sont libres lorsque c’est l’interaction de ces neurones qui les détermine.* *Nous avons cent milliards de neurones dans notre cerveau et un nombre encore plus astronomique de liens et de connexions par lesquels ces neurones peuvent interagir. Nous ne sommes pas conscients de tout cela « Nous » sommes le processus formé par cette complexité, non ce peu dont nous sommes conscients* ».

Retour à Lucrèce

« N*ous causons des dommages. Les changements climatiques et environnementaux que nous avons déclenchés ont été brutaux et ne nous épargneront guère….* *la vie sur la terre n’est qu’un essai de ce qui peut se produire dans l’univers* …. *Je crains que, bientôt, nous devenions également l’espèce qui verra consciemment arriver sa propre fin, ou du moins la fin de sa civilisation  Je pense que notre espèce ne durera pas longtemps* ». Même si Rovelli, en scientifique conscient, porte un regard plutôt pessimiste mais réaliste sur l’évolution du monde, du genre humain et de notre civilisation, tous appelés à disparaître comme les étoiles, en conclusion, il nous rappelle que la vie est précieuse et comme Lucrèce que « *notre appétit de vivre est vorace et notre soif de vie insatiable*  (De rerum natura, III, 1084»

« *Tous enfin nous sommes issues de la semence céleste,*

*le ciel est notre père et ses gouttes limpides*

*fécondent la mère accueillante et généreuse,*

*la terre qui enfante les blondes moissons,*

*les arbres florissants, les hommes et les bêtes,*

*et fournit à tous la nourriture qui repaît les corps,*

*et permet de mener douce vie et se reproduire* »

(II, 991-9971)

(1) La théorie de la gravité quantique à boucles cherche à combiner la relativité générale et la mécanique quantique directement sans rien y ajouter. (Ce type d’effort de synthèse de théories apparemment contradictoire a produit des résultats extraordinaires comme la théorie de l’électromagnétisme de Maxwell qui combine les théories électrique et magnétique et la relativité d’Einstein synthèse de la mécanique et de l’électromagnétisme).

(2) Relativité générale : s’attache au macrocosme : l’espace et le temps sont relatifs, ils peuvent se courber, se dilater, se contracter en fonction de l’effet gravitationnel. La gravitation est provoquée par la courbure de l’espace, lui-même étant courbé par la matière. L’électromagnétisme et la mécanique sont réconciliés au sein de la relativité générale qui englobe d’ailleurs la relativité restreinte (constance de la vitesse de la lumière, dilatation et contraction de l’espace et du temps en fonction de la vitesse)

(3) Mécanique quantique : s’attache au microcosme : l’énergie d’un champ électromagnétique est distribuée en quanta, càd en petits paquets d’énergie, appelés photons. L’électron ne peut prendre que des valeurs quantifiées d’énergie sur les orbites de son atome. Les électrons par exemple n’existent pas tout le temps, mais seulement quand on tente de les observer ou de les capter ou, de manière plus générale, quand ils interagissent avec quelque chose d’autre et qu’ils se matérialisent alors. De plus en mécanique quantique, les objets n’ont pas de position définie, si ce n’est quand ils heurtent quelque chose. Il est impossible de prévoir l’endroit où un électron va apparaître, on peut seulement calculer la probabilité qu’il apparaisse ici ou là.