



Temps et causalité ne sont plus ce qu'ils étaient ...

Pierre-Yves Turpin*

Le principe de causalité affirme que si un phénomène (nommé *cause*) produit un autre phénomène (nommé *effet*), alors *l'effet ne peut précéder la cause*.

Selon le déterminisme classique, *dans les mêmes conditions, les mêmes causes produisent toujours les mêmes effets*.

Remarques :

– Si la notion de temps peut se passer du concept de causalité, l'inverse n'est pas vrai : la causalité nécessite de faire appel au temps, dans le sens d'une relation séquentielle nécessaire entre un phénomène et un autre ou d'une production du second par le premier.

– Selon le déterminisme, non seulement *l'antécédent* doit précéder temporellement le *conséquent*, mais encore on doit pouvoir *prédire à coup sûr* le second si l'on connaît tout du premier.

Si le « moment newtonien » a fourni, jusqu'à l'orée du XX^{ème} siècle, l'univers matériel et mental suffisant pour s'accommoder du monde dans lequel nous vivons – pas seulement au plan des représentations mais aussi de la réalité -, les avènements de la relativité générale d'une part et de la mécanique quantique d'autre part ont mené à l'évidence que le monde n'est pas newtonien, mais régi par des notions plus difficiles à appréhender voire plus « floues » telles que le temps *dépendant*, le hasard, la probabilité, l'incertitude, etc.

Donc première question : y a-t-il un temps « universel », valable pour tous, qui puisse répondre à la condition déterministe du concept de causalité ?

À l'origine de la symbolisation mathématique du temps par la lettre « t », Newton s'est placé dans un monde où espace et temps existent *en soi* indépendamment des objets qui s'y trouvent¹ : le temps newtonien implique que dans un certain *intervalle* du temps vrai, absolu,

* Intervention à l'association "Petite enfance et psychanalyse", Saint-Quentin, 2015. Pierre-Yves Turpin est physicien, Professeur Émérite à l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

¹ C'est la conception du monde dite substantielle.

mathématique, intervalle qu'il appelle durée ou temps relatif, une infinité de choses différentes peuvent se produire dans l'univers sans changer d'aucune manière cet intervalle.

De ce fait il montre que les intervalles de temps ne préexistent pas mais sont en quelque sorte créés par ce qui se fait dans l'univers pendant ces intervalles. Ce qu'il décrit comme le temps relatif, le temps commun qu'on utilise, est le plus souvent défini au moyen d'un *mouvement* mesuré par nos sens. Mais force est de remarquer que les mesures concernent des choses concrètes : au plan astronomique, la lune croît ou décroît, elle est pleine ou nouvelle, les saisons passent... Et plus proche de nous : des ombres marquent les heures sur un cadran solaire, un fluide coule dans une clepsydre ou un sablier, une montre transforme une durée en un mouvement d'une aiguille sur un écran. On peut dire que ce sont les « habits du temps ». Mais on ne sait toujours pas définir le temps vrai, absolu, mathématique. Suivant Newton c'est une notion qui s'impose à nous, on la présuppose : si ensuite on veut la définir par rapport à elle-même, c'est aporétique. En revanche on sait définir et mesurer une durée : c'est une question de repères. Il n'empêche que *le temps* n'est pas la même chose que *ce qui se passe dans le temps*.

En relativité générale

La physique de Newton utilise des notions et concepts faisant partie de la vie quotidienne, tels que force, masse de matière, distance, etc. Les mots de la langue d'usage permettent de prendre pied sur le sol de l'expérience et de l'intuition ordinaires pour établir des lois valables dans un monde substantiel où espace et temps sont fondamentalement **découplés** l'un de l'autre : l'espace d'un côté, le temps d'un autre côté, ce dernier ayant un caractère d'absolu et universel : le temps absolu est le même pour tous et en tout lieu.

La physique déterministe de Newton est cependant incomplète, elle n'a pas pu tout prévoir, notamment au plan astronomique ; pour expliquer des observations dont elle n'avait su rendre compte il fallut à Einstein élaborer la relativité générale², qui reste déterministe, mais où les représentations des choses se complexifient, voire deviennent contre-intuitives. Pour compliqué que soit le nouveau formalisme, cela n'a pas que des conséquences négatives, car il élargit le champ des réponses possibles à quantité de questions posées par des phénomènes sortant du cadre défini par Newton. C'est ainsi que la gravitation selon la relativité générale – elle inclut la gravitation newtonienne comme un cas très particulier – va bien au delà de la nécessité empirique de la prise en compte de la masse des objets en interaction : elle répond à la question de savoir *pourquoi* deux objets doués de masse s'attirent...

Pour l'établir, Einstein change d'axiomatique essentiellement dans deux directions, qui font l'une et l'autre sortir du champ de l'intuition ordinaire. Premièrement il faut tenir compte qu'espace et temps **ne sont pas indépendants**, mais **couplés** : **le temps dépend de l'espace**. La conséquence majeure en est que la notion de **simultanéité** de deux phénomènes localisés **en deux points distincts de l'espace** est caduque³. Ceci provient du fait incontournable que l'invariant fondamental de la physique n'est pas le temps qui serait *le même en tout lieu* comme on le pensait : l'invariant fondamental est la **vitesse de la lumière** partout dans le vide, quelles que soient les vitesses des référentiels dans lesquels on la mesure (ce fut vérifié par l'expérience de Michelson en 1881). Deuxièmement, Einstein se place non plus dans le cadre de la géométrie euclidienne comme l'avait fait Newton, mais

² C'est notamment le problème de l'anomalie de l'avance du périhélie de Mercure qui a conduit Einstein sur la voie de l'élaboration de la relativité générale.

³ Un énoncé du type « il s'est produit simultanément une explosion sur Terre et dans la galaxie d'Andromède » est dénué de sens : des événements simultanés pour un observateur ne le sont pas obligatoirement pour d'autres (voir plus bas la notion de temps propre).

dans celui d'une géométrie elliptique dite de Riemann, où le postulat d'Euclide est invalide⁴. Einstein tient compte du fait qu'un mouvement n'est pas toujours *rectiligne* et de *vitesse uniforme* par rapport à un repère fixe – ce qui est une hypothèse de la relativité *restreinte* –, ce qui complique les relations de couplage à écrire entre espace et temps.

En relativité générale, les symboles sont les mêmes qu'en physique newtonienne mais leurs groupements sont différents : la masse dépend de la vitesse⁵, et en outre masse, énergie et impulsion sont d'une certaine manière interchangeable. L'interaction gravitationnelle ne s'exprime plus en termes de force et de matière mais de « champ de gravitation » et de « courbure de l'espace-temps⁶ ». Toute masse courbe l'espace-temps autour d'elle – la déformation étant d'autant plus grande que la masse est importante – et tout autre « masse » (matérielle ou non) qui se trouve ou se déplace dans cet espace courbé – et contribue elle-même à une déformation de l'espace-temps – suit une trajectoire déterminée par un principe général jamais mis en défaut, le « principe de moindre action »⁷. Dans ces conditions, le champ de gravitation apparaît comme une conséquence naturelle de la géométrie de l'espace-temps, même si *on ne sait toujours pas se représenter ce qu'est l'espace-temps* : tout ce qu'on en sait c'est *qu'il dépend du contenu* de l'Univers. Cela vaut aussi pour les photons, « quanta de lumière » ou encore « quanta d'énergie » associés à une onde lumineuse mais qui sont de *masse nulle*, ce qui étend encore les classes d'objets pris en compte par la théorie : cet effet prédit par la relativité générale fut vérifié expérimentalement en 1919 par l'observation de la déviation d'un rayon lumineux par le Soleil lors d'une éclipse totale.

On peut noter deux conséquences importantes de la relativité générale. Premièrement, chaque objet de l'Univers possède son *temps propre* : décrivant une trajectoire dans l'espace-temps, c'est la géométrie de ce dernier qui définit le temps propre de l'objet. Et le « temps absolu, vrai, mathématique » de la grande horloge extérieure de Newton, dont les aiguilles indiquent un même temps pour tout le monde, n'existe pas pour Einstein. Deuxièmement l'espace-temps n'est pas un cadre *en soi* défini dans le monde substantiel (newtonien), mais la localisation et l'évolution d'un objet ne se repèrent que *relativement* à l'évolution et à la localisation d'autres objets. Cette remarque nous achemine vers une tout autre manière de penser la physique et le monde, et le temps tout aussi bien.

Conséquence de la relativité générale sur la notion de temps, ou plutôt de durée : la notion de temps propre, liée à la question de la simultanéité évoquée plus haut. Prenons un exemple. Si vous mettez deux heures à lire un article, assis chez vous dans un fauteuil, vous mettez aussi deux heures à le lire en étant assis dans un TGV qui roule à 300 km/heure. C'est votre temps propre à vous, lecteur, le temps mesuré par la montre que vous portez. Si maintenant votre TGV vous permet de quitter un ami (immobile) à Nantes pour rejoindre un autre ami (immobile) à Paris et si vous avez au préalable synchronisé le top départ des trois montres, les trois montres marqueront la même heure à l'arrivée. Vous êtes dans le cas de la physique newtonienne : les montres restent (assez bien) synchronisées parce que le TGV ne

⁴ Dans l'espace de Riemann deux « droites » distinctes ne peuvent jamais être parallèles, elles se coupent au moins en un point situé à distance finie.

⁵ La masse tend vers l'infini quand la vitesse de l'objet tend vers celle de la lumière.

⁶ Espace et temps n'étant plus indépendants, on est obligé de raisonner dans un repère à quatre dimensions (4D), constitué des 3 dimensions de notre espace ordinaire plus une dimension de temps, ce qui est étranger à nos représentations spatio-temporelles classiques.

⁷ Ce principe est aussi fondamental que celui de la conservation de l'énergie. C'est Maupertuis qui en eut le premier l'intuition : parmi toutes les possibilités qui s'offrent à la nature pour passer d'un état à un autre, elle choisit toujours celle qui est « la plus efficace ».

se déplace pas à la vitesse de la lumière qui est de 300.000 km/seconde. Mais si le TGV roulait à une vitesse comparable à celle de la lumière, disons 30.000 km/seconde, il n'en serait pas ainsi : les montres des deux amis immobiles seraient encore toutes deux synchronisées et indiqueraient la même heure, mais seraient très en avance par rapport à la vôtre qui se déplace avec vous dans le TGV. La désynchronisation des horloges résulte de leur mouvement relatif dans l'espace, et elle est d'autant plus importante que les vitesses en jeu dans les mouvements relatifs sont importantes. Comment dès lors parler de temps vrai, absolu ?

À l'inverse, on peut s'inspirer du Mr. Tompkins de Gamow : imaginez que la vitesse de la lumière soit de 80 km/h⁸. Si vous partez sur le boulevard périphérique de Paris (il fait 35 km de « circonférence ») au Km 0 en y laissant quelques amis et si vous roulez à 75 km/h, vous mettrez environ une demi-heure pour revenir au point de départ mais les amis qui s'y trouvent seront devenus d'honorables vieillards (on pourrait faire le calcul exact). Le temps propre (mesuré par votre montre) pour vous qui vous déplacez à une vitesse comparable à celle de la lumière aura été grandement désynchronisé des temps propres (mesuré par leurs montres) des amis immobiles. Moralité, suivant Einstein : il y a autant de temps propres qu'il y a d'observateurs. Cela réintroduit donc du « sujet » dans la notion de temps en particulier et dans la science en général.

En mécanique quantique

Malgré la complication du formalisme la relativité générale reste déterministe, comme l'est la physique newtonienne ; en revanche la mécanique quantique est fondée sur un **indéterminisme** radical. Si les prédictions de cette dernière sont particulièrement fécondes dans le monde de l'infiniment petit, elles sont souvent en complète contradiction avec le sens commun, ou à tout le moins dérangent des notions comme le réalisme et la localité, ou encore des principes communément admis comme le principe de causalité. Les prédictions de la mécanique quantique n'ont cependant jamais été démenties par l'expérience jusqu'à présent, mais au contraire de mieux en mieux vérifiées au fil de l'amélioration des moyens d'observation et c'est pourquoi, en faisant progressivement taire nombre de critiques scientifiques et philosophiques, sa validité perdure.

Un premier indéterminisme fut exprimé en 1927 par les relations d'incertitude de Heisenberg : elles *traduisent* le fait qu'il est impossible de mesurer l'un quelconque des paramètres physiques – énergie, moments linéaire, angulaire, magnétique... – associés à un objet du monde de l'infiniment petit – atome, électron, nucléon... – sans *perturber* l'objet ou le système étudié. L'acquisition de l'information lors de la mesure a nécessairement un coût : l'impossibilité de la connaissance *simultanée* de variables *couplées* de l'espace-temps de l'objet en question, telles que position **et** vitesse, énergie **et** temps, etc., **avec une précision aussi grande que l'on veut**. Conséquence : plus on mesure l'une de ces variables couplées avec précision, plus la mesure de l'autre est imprécise, voire « indéterminée ».

Le second indéterminisme de la mécanique quantique provient de son principe fondamental de superposition des états. Pour résumer : si un système **isolé** peut accéder à plusieurs états *discrets* et *distincts* possibles, ce qui est le cas d'un atome constitué d'un noyau entouré d'électrons, pour décrire complètement (formellement, c'est à dire en termes mathématiques) un état physique donné il faut se le représenter comme étant à *la fois dans tous ces états*, c'est à dire comme réparti entre plusieurs réalités différentes. En termes d'équations il convient d'associer à *chaque état* une certaine *amplitude complexe de probabilité* – au sens des nombres complexes des mathématiques – qui possède un module et une phase. Dans la superposition d'états qui le décrit, selon une combinatoire linéaire

⁸ Je reprends là un exemple cité par Etienne Klein dans une de ses causeries « Qu'est-ce qui fait durer le temps ? », avril 2010.

qu'on appelle « fonction d'onde », la *probabilité* d'obtenir un résultat ou un autre lors d'une mesure éventuelle se présente comme le carré d'une somme d'amplitudes : ces dernières se renforcent si elles sont en phase, elles se soustraient si leurs phases sont opposées. C'est selon ce principe que l'on peut expliquer l'observation expérimentale de phénomènes d'interférences avec des *corpuscules matériels* tels que des électrons, des neutrons ou même des atomes entiers, comme on en voit pour des *ondes lumineuses*. On voit donc que le pilier mathématique formel de la mécanique quantique est la théorie des probabilités, à telle enseigne que Michel Bitbol n'hésite pas à écrire que « [la mécanique quantique] est *elle-même* une forme généralisée de calcul des probabilités, doublée d'un procédé d'évaluation probabiliste par l'utilisation réglée de symétries⁹ ».

Cela dit, il faut bien comprendre que la théorie quantique stipule la *non observabilité des états superposés* quantiques du système isolé, tels qu'écrits dans les équations¹⁰. Dans tout acte d'observation cette *superposition cohérente* d'états disparaît : il y a un « effondrement de la fonction d'onde », c'est-à-dire qu'une action de mesure sélectionne *instantanément un et un seul état parmi l'ensemble des états superposés* possibles, qui devient de ce fait seul observable. En effet quand on réalise une mesure, **le système n'est plus isolé** : on obtient une information par le biais d'une interaction entre ce système quantique et un appareil de mesure (« observateur », voltmètre, cellule électrique, tout autre objet quantique employé comme sonde, etc...). L'appareil de mesure délivre un seul résultat, correspondant à *une* et une seule des valeurs propres possibles de la fonction d'onde. En d'autres termes, lors de la mesure, il y a *instantanément* une « réduction des états » qui entrent dans l'écriture formelle de la fonction d'onde du système isolé. L'action de faire une mesure fait passer d'une *superposition d'états* (dans laquelle se trouve le système quand il est isolé) à la *réalisation d'un état particulier* du système, avec une certaine probabilité, quand le système n'est plus isolé mais en interaction avec l'appareil de mesure.

La description ci-dessus en termes de « réduction d'états » instantanée est essentiellement postulatoire. Une analyse fine du processus de mesure fait intervenir la notion de **décohérence** : il peut s'écouler un certain temps, dépendant de la taille du système et de l'environnement, pour passer des états superposés du système à la réduction (objective, spontanée ou induite par la mesure) à un seul d'entre eux¹¹. Dans ce cadre, l'état d'un système représente l'ensemble des *informations possibles* sur lui, les différents états discrets et distincts qui sont accessibles sont *mutuellement exclusifs*, ce qui implique que suite à la décohérence l'état physique prend bien une et une seule valeur, *les autres valeurs étant alors inaccessibles*. Avec cette définition de l'état d'un système, l'unicité de la valeur finale de la mesure découle implicitement de l'exclusion mutuelle. Par transitivité, on peut conclure que l'unicité découle implicitement de la décohérence.

On peut enfin noter que l'introduction des probabilités comme « faille indéterministe » ne date pas de la création de la mécanique quantique : elle lui est bien antérieure. Elle fut rendue incontournable en physique classique après la découverte de la radioactivité par Becquerel : la désintégration *spontanée* d'un noyau radioactif ou d'une particule instable implique un processus qui, pour ce noyau ou cette particule, échappe à toute description déterministe. Elle ne peut être que probabiliste : tout au long de sa vie, un noyau radioactif donné conserve la même probabilité par unité de temps de se désintégrer *spontanément*. Ceci n'empêche pas de faire des prédictions, que ce soit au un-par-un ou à l'échelle d'une population de noyaux ou de particules instables. C'est sur cette base, sur celle de la

⁹ M. Bitbol « *La mécanique quantique comme théorie des probabilités généralisée* », dans « *Prédiction et probabilités dans les sciences* », Ed. E. Klein et Y. Sacquin, Editions Frontières, 1998, p. 37.

¹⁰ On a récemment mis en évidence l'existence de particules présentes en deux endroits à la fois. Ces nouvelles particules, prédites par Majorana (« Fermions de Majorana »), ont été observées et photographiées (voir *Le Monde* du 13/10/14 « Les fermions de Majorana, doués d'ubiquité »).

¹¹ La mise en évidence et la mesure expérimentale de temps de décohérence ont valu à Serge Haroche le prix Nobel de Physique en 2009.

mécanique quantique et de la notion de « brisure de symétrie »¹² qu'est bâtie l'une des quatre interactions fondamentales de la physique, celle dite de l'interaction faible, qui rend compte de la radioactivité artificielle (produite par les physiciens dans leurs accélérateurs de particules).

Réalisme, localité, causalité

La mécanique quantique remet en question un certain nombre de convictions indissociables de la notion de science, dure ou pas. La première de ces convictions est qu'une théorie scientifique se doit de décrire le monde *tel qu'il est* (en soi), indépendamment des moyens mis en œuvre pour explorer les phénomènes qui s'y manifestent¹³. C'est l'hypothèse du réalisme cher à Einstein : le résultat d'une mesure faite sur une particule reflète une propriété qu'elle avait *avant* la mesure, que celle-ci ait été ou non effectuée.

Seconde hypothèse défendue par les détracteurs de la mécanique quantique : celle de localité. On nomme ainsi un principe selon lequel deux événements séparés dans l'espace *ne peuvent pas avoir d'influence mutuelle instantanée*. Cela serait contraire au postulat relativiste énonçant que l'information ne peut pas se propager plus vite que la vitesse de la lumière. C'est ainsi que pour une paire de particules couplées ou comme on dit dans le jargon, « intriquées », c'est-à-dire qui ont interagi à un moment donné puis se sont éloignées l'une de l'autre aussi loin que l'on veut, la mesure d'une propriété – la position, la vitesse, la polarisation... – faite sur l'une des deux ne peut pas exercer d'influence *instantanée* sur la mesure – effectuée ou non – d'une quelconque propriété de l'autre particule.

C'est sur la base de ces deux hypothèses qu'Einstein, spécialiste des expériences de pensée, proposa le « paradoxe EPR »¹⁴ : si on pouvait l'effectuer, l'expérience proposée invaliderait les relations d'incertitude de Heisenberg, prouvant ainsi que la mécanique quantique est une théorie incomplète. Dans la même veine, John Bell établit un peu plus tard certaines inégalités mathématiques applicables à des paires de particules intriquées et respectant les hypothèses de réalisme et de localité, qui, si elles étaient vérifiées par l'expérience, seraient incompatibles avec les prévisions de la mécanique quantique¹⁵.

Pour rejeter l'hypothèse de réalisme contenue dans le paradoxe EPR, Bohr répliqua qualitativement que l'on ne peut pas attribuer une propriété à une particule quand on se coupe des conditions expérimentales permettant de la mettre en évidence¹⁶. Par la suite, les tenants de la mécanique quantique effectuèrent, dès les années 1970, nombre d'expériences destinées à corroborer ses prévisions. La réfutation expérimentale directe des inégalités de Bell, *de la manière prédite par la mécanique quantique*, ne fut réalisée qu'en 1982 par les expériences d'Alain Aspect¹⁷. Elles validaient le phénomène d'intrication quantique : les résultats de mesures effectuées sur l'une des particules sont corrélés à ceux

¹² Pour une introduction à la brisure de symétrie, lire par exemple François Englert sur le site de *La Recherche* : <http://www.larecherche.fr/content/Homepage/article.html?id=23872>. La même notion est citée pour l'attribution du prix Nobel de Physique 2008.

¹³ A. Einstein, *J. Int. Coll. Surg.* 14, 1950, p. 755. « *There exists a physical reality independent of substantiation and perception* ».

¹⁴ A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen, *Phys. Rev.* 47, 1935, p. 777.

¹⁵ J. S. Bell, *Rev. Mod. Phys.* 38, 1966, p. 447 ; J. S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1987, ISBN-13-978-0521368698.

¹⁶ N. Bohr *Phys. Rev.* 48, 1935, p. 696.

¹⁷ A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1982, p. 91 ; A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1982, p. 1804.

sur l'autre particule, et ceci de manière *instantanée*, ce qui établit du même coup le principe de non-localité. Elles apportaient ainsi une réponse expérimentale au paradoxe EPR.

Se pose dès lors une question sur la nature de l'influence non-locale instantanée entre particules corrélées : est-ce une action causale? Si c'était le cas, fût-ce à une vitesse de transmission supérieure à celle de la lumière, il y aurait un retard, même très faible, de l'effet par rapport à la cause : la corrélation ne peut être causale que si la propriété-effet est **postérieure** à la propriété-cause. Or la mécanique quantique prédit que **la corrélation est indifférente à l'ordre temporel**. Ce dernier point fut vérifié expérimentalement par Antoine Suarez¹⁸ : la corrélation *ne dépend pas de l'ordre chronologique* des événements de détection, ce qui réfute l'hypothèse causale et confirme une fois de plus les étranges prédictions quantiques.

Un scoop de la physique contemporaine : le temps n'existe pas !

Et maintenant, où en est-on en ce qui concerne le temps ? Pour le moment, dans l'état le plus avancé de la réflexion en physique pour construire *une théorie unique* qui puisse rendre compte des relations entre tous les « objets » du monde, depuis la plus petite distance d'espace physiquement concevable (10^{-35} m, ce que les physiciens appellent « le mur de Planck ») à la plus grande (la dimension de l'Univers), avançons un « scoop » : « *le temps n'existe pas* » ou encore « *il faut oublier le temps* ».

En effet, dans la recherche qui s'ébauche aujourd'hui, il s'agit de concilier les points de vue de la mécanique quantique, indéterministe, valable dans le monde l'infiniment petit (en dessous de la dimension de l'atome, disons 10^{-10} m) et applicable à un milieu *très condensé* (la matière), et ceux de la relativité générale (déterministe) – valable dans un milieu méso-, micro- et macroscopique jusqu'aux dimensions de l'Univers – et applicable à un milieu *très dilué*, la validité de chacune de ces deux théories s'appuyant sur toute sa puissance de vérifications et de prévisions jamais prise en défaut depuis plus d'un siècle, pour l'une comme pour l'autre. Néanmoins chacune d'elles est incomplète, ne s'applique pas aux mêmes objets, et l'on n'a pas encore su les rassembler pour en faire une théorie unique du tout (à ne pas confondre avec une théorie de tout !).

Ou encore : on peut se représenter l'Univers comme étant essentiellement du vide peuplé de galaxies, de trous noirs, d'étoiles, de planètes et autres objets astronomiques constituant des singularités gravitationnelles. En quelque sorte le *négatif* photographique du fromage de gruyère : le vide est le négatif de la pâte du fromage, les trous sont les négatifs des singularités. La physique quantique théorise les propriétés des parties les plus denses des singularités (correspondant au négatif des trous du gruyère), en deçà d'une dimension de quelques 10^{-10} m ; la relativité générale théorise la gravitation dans l'espace situé au delà de la dimension de l'atome (correspondant au négatif de la pâte du gruyère) jusqu'aux dimensions ultimes de l'Univers. Si l'on a su faire une théorie unique pour prendre en compte trois des quatre interactions fondamentales de la physique que sont les interactions entre charges électriques (interactions « électromagnétiques »), les interactions « fortes » (responsables de la radioactivité naturelle, qui est *spontanée* et relative essentiellement à la désintégration de noyaux atomiques lourds) et les interactions « faibles » (responsables de la radioactivité artificielle) **plus** la relativité *restreinte* dans le cadre d'un modèle qu'on appelle « le Modèle Standard »¹⁹, en revanche on ne sait pas encore faire *une théorie du tout* englobant ce dernier **et** la gravitation au sens de la relativité *générale*.

¹⁸ A. Stefanov, H. Zbinden, N. Gisin et A. Suarez, *Phys. Rev. A* 67, 2003, p. 042115.

¹⁹ C'est dans le cadre du Modèle Standard développé entre les années 1950 et 70 que l'on avait prédit l'existence du Boson de Higgs, observé finalement expérimentalement en 2012 au LHC à Genève.

De fait, on a eu comme une prémisse de l'affirmation que « *le temps n'existe pas* » dès l'avènement de la physique quantique : toutes les tentatives de maintien des piliers ontologiques classiques ont été au cours du temps réfutées expérimentalement, *d'une manière prédite exactement par la mécanique quantique*. Comme on l'a vu plus haut le réalisme, la localité et la causalité sont caducs. Et notamment par rapport à cette dernière, comme il n'y a pas de postérité de l'effet par rapport à la cause, il n'y a pas besoin du temps.

Au niveau fondamental, du comportement des particules élémentaires à l'évolution des galaxies, les théoriciens veulent maintenant écrire une théorie de la « gravitation quantique »²⁰. Disons d'emblée qu'une telle théorie n'est pas encore aboutie sous une forme complète, crédible, et surtout vérifiable expérimentalement. Cependant, pour ces physiciens théoriciens, il est *nécessaire* (et pas simplement possible) d'écrire les équations fondamentales de la physique *sans faire référence à la variable temps*. Car la notion de temps propre qui était nécessaire à la relativité générale se complique encore aux échelles où la mécanique quantique devient importante pour l'espace-temps²¹, parce que les trajectoires n'existent plus en tant que telles ! Les particules élémentaires ne suivent plus des trajectoires définies mais des *superpositions de différentes trajectoires ou positions* : il n'y a plus de temps propre, ou plutôt il n'existe plus que des *superpositions de temps propres différents*. Et le monde réel n'étant somme toute qu'une gigantesque assemblée d'objets quantiques, sa description en termes mathématiques doit pouvoir s'écrire en termes de superpositions d'états quantiques. Dès lors écrire les équations fondamentales de la physique sans faire référence à la variable temps n'est plus une possibilité mais une *nécessité*.

Est-ce bien grave ? Non, car on ne mesure jamais le temps mais *une variable par rapport à une autre* : il ne s'agit plus d'une conception substantielle, où les phénomènes se passent dans une arène ou sur une scène immuable et universelle, mais d'une conception *relationnelle* où les phénomènes dépendent des relations engagées entre des objets. Pour Galilée c'était la durée d'oscillation d'un pendule dans une église de Pise par rapport à son pouls, et on sait bien qu'après lui et pendant des siècles les horloges ont utilisé des pendules. Maintenant on définit la seconde au BIPM par une « horloge atomique » où le pendule oscillant est un atome de césium dont on sait mesurer la période d'oscillation à la 14^{ème} décimale près, ce qui suffit pour avoir une valeur assez précise de la *durée* d'une seconde. L'idée de Newton d'imaginer une variable temps immuable est un « truc » qui a « marché » pendant des siècles, l'habitude a été prise et l'on croit que la représentation du monde qu'elle permet est plus facilement intelligible.

En quoi consiste le « truc » ? Par exemple, pour mesurer la durée x d'une éclipse de Lune par la durée d'écoulement d'un sablier y , lui-même mesuré par ma montre z que j'ai calée sur l'horloge parlante h , j'obtiens une suite de relations $x(y)$, $y(z)$, $z(h)$. Newton ajoute une variable t abstraite qui acquiert le statut de paramètre indépendant, et les relations précédentes sont exprimées en fonction de t par $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ et $h(t)$. Voilà en quoi consiste le truc.

Cependant le truc ne marche plus quand on veut relier relativité générale et mécanique quantique : il n'y a pas de variable particulière qui mène la danse de toutes les autres, il n'y a que des *évolutions relatives* entre variables dynamiques.



²⁰ Il s'agit notamment du cadre de la « gravité quantique à boucles » développée essentiellement par Abhay Ashtekar, puis Carlo Rovelli et Lee Smolin.

²¹ C'est à dire à l'échelle de dimension correspondant au « mur de Planck », de l'ordre de 10^{-35} m.