La physique continue
Par Marc Lachièze-Rey
(in « Le continu », *Intellectica* 51, 2009, pp. ??-??)

Le rejet de l'Atomisme par Aristote peut être vu comme l'un des premiers actes d'un drame qui n'a cessé de se jouer dans la physique, celui de l'opposition continu – discontinu. La mise en place de la physique newtonienne en marque une étape prépondérante. Au XXè siècle, la physique quantique l'a totalement renouvelée et semble avoir réglé la question, en ce qui concerne la matière et les rayonnements.
Mais certaines lacunes de notre physique actuelle suggèrent que la situation n'est pas encore satisfaisante. A cette lumière, l'analyse de certaines incompatibilités entre physique quantique et théorie de la relativité motive quelques interrogations à propos de la continuité de l'espace et du temps, que la physique quantique n'avait pas remise en cause. Ces questions non résolues sous-tendent la recherche actuelle vers une nouvelle physique[1].

Les analyses successives de la continuité de la lumière, de celle de la matière, de celle de l'espace, nous ferons parcourir quelques étapes de l'histoire de la physique.

Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre

Un préalable géométrique s'impose. Toutes nos théories physiques, passées, présentes et en gestation, sont de nature géométrique : elles établissent des correspondances entre objets physiques et objets géométriques. (Ce qui n'empêche pas que l'on puisse les considérer selon d'autres points de vue, algébrique par exemple). Les questions de continuité dans la physique sont donc en correspondance avec celles qui se posent en mathématiques. Elles ne surgissent à vrai dire que parce que, dès le départ, le cadre mathématique appliqué en physique le permet.
La physique moderne a pris naissance avec les travaux de Newton, synthétisant ceux de ses prédécesseurs. Newton introduit un cadre géométrique précis, constitué de l'espace physique, décrit par l'espace euclidien R^3 ; et du temps, décrit par la droite [temporelle] réelle R. Ce cadre présente la propriété essentielle d'être continu. Cette continuité, qui reste préservée jusque dans physique actuelle, est-elle indispensable à la description du monde ? Ou au contraire, comme le pense par exemple Roger Penrose, n'est-elle qu'une commodité que nous avons introduite pour mieux décrire les phénomènes, qui ne correspondrait à rien de réel ou de fondamental ? Peut-être l'analyse ici présentée apportera-t-elle quelques éléments de réponse.

Pour le mathématicien, la *droite réelle* constitue le prototype de l'objet continu. Il s'agit de la droite ordinaire. Elle est baptisée réelle car elle peut être vue de manière tout aussi bien géométrique - comme la succession continue de ses points - qu'algébrique - comme l'ensemble des nombres réels, considérés comme coordonnées de ses points[2]. Le caractère continu se manifeste par l'existence entre deux points donnés, aussi proches soient-ils, d'une infinité d'autres points ; et ceci sans limite.

---

[1] Voir *Au-delà de l'espace et du temps*, Marc Lachièze-Rey, éd. Le Pommier 2008
[2] Au contraire de l'ensemble des nombres réels, celui des nombres entiers, par exemple, n'est pas continu mais « discret » : entre deux nombres entiers, il n'est pas toujours possible d'en trouver un autre (il suffit que les deux entiers se suivent). Entre deux nombres réels, en revanche, il existe toujours une infinité d'autres nombres réels. Ceci illustre une des propriétés du continu, par rapport au « discret ».

La droite R est un continuum à une dimension. Le plus simple continuum à 2 dimensions est le plan R^2 ; à 3 dimensions, l'espace euclidien[3] R^3, que Newton assimile à l'espace physique. De manière très générale, les objets mathématiques qui présentent cette notion de continuité – lignes, surfaces, espaces … – sont qualifiés de *variétés* [topologiques][4]. Ils sont très abondamment utilisés par la physique.

Au XXè siècle, les théories de la relativité remplacent le continuum géométrique de la physique newtonienne - espace euclidien et droite temporelle - par un continuum à 4 dimensions : l'espace-temps. Le passage de 3+1 à 4 dimensions, l'acte fondamental de la physique relativiste, ne remet pas en cause la continuité. La théorie de la relativité générale munit ce continuum de propriétés structurelles additionnelles (métrique, connexion, courbure[5]…). Celles-ci représentent ses propriétés physiques, responsables de la cinématique, de l'optique, de la dynamique, de la gravitation.
Rien n'a changé du point de vue de la continuité. Espace et temps (chez Newton), ou espace-temps (en relativité), peuvent en principe être explorés jusqu'aux échelles (spatiales ou temporelles) les plus infimes, sans que l'on atteigne jamais de limite : le continuum est toujours divisible, avec pour entité ultime le point inaccessible.
Un tel cadre continu permet de considérer des objets continus : l'espace lui-même, les fonctions définies sur lui (pour la physique, des *ondes* ou des *champs*) ; mais aussi des objets discrets, comme les points, qui en physique représenteront les [positions des] particules.
Devons-nous nous satisfaire de cette géométrisation continue de notre physique ? Nous verrons que plusieurs raisons suggèrent une réponse négative.

L'alternative lumineuse

Ce fut à propos de la lumière que l'opposition continu / discontinu prit ses formes les plus virulentes. Newton voyait la lumière comme « faite de corpuscules, émis par les corps lumineux, se propageant en ligne droite dans l'espace, l'air, les corps transparents et homogènes ». Les différentes couleurs correspondraient à des vitesses de propagation différentes[6]. Au contraire, le physicien et astronome hollandais Christiaan Huygens décrivait (*Traité sur la lumière*, 1690) la lumière comme la propagation d'une onde, phénomène continu envisagé selon le modèle des vagues se propageant à la surface de l'eau : la lumière se constituerait des vibrations d'un support quasi-matériel qualifié d' *éther luminifère*.
Cette alternative onde – corpuscule constitue la version lumineuse du débat continu discontinu.
Au début du XIXè, les expériences d'interférométrie de l'anglais Thomas Young (1773-1829) et du Français Augustin Fresnel (1788-1827) mirent en défaut le modèle corpusculaire, incapable d'en rendre compte. Le modèle ondulatoire les explique bien, au contraire, ainsi que les lois de la réfraction et de la diffraction. Maxwell montre un peu plus tard que l'on peut

---

[3] Celui dont nous apprenons les propriétés à l'école. Newton n'avait guère le choix car jusqu'au XIXè siècle en effet, il constituait la seule géométrie connue.
[4] Un espace topologique (ou une variété topologique) est un ensemble de points muni d'une structure topologique, qui permet de parler de sa continuité.
[5] On peut donner à une variété topologique des structures additionnelles : sa structure *différentielle* permet de parler de dérivations, de vecteurs et de tenseurs ; sa structure *métrique* permet de définir angles et longueurs (et durées pour l'espace-temps) ; sa *connexion* définit le transport des objets…
[6] La vitesse finie de la lumière ayant été mise en évidence en 1676 grâce à l'observation des satellites de Jupiter par l'astronome danois Ole Christensen Römer.

considérer la lumière comme un cas particulier des *ondes électromagnétiques*, dont il exprime les lois.
Une onde occupe, à un instant donné, la totalité de l'espace, ou au moins un sous-ensemble continu ; des corpuscules occuperaient au contraire un ensemble discret de points dans l'espace : le continu l'emporte donc ici sur le discret ; l'avantage durera jusqu'au début du XXè.

L'année 1900 voit les prémices de la révolution quantique, sous la forme d'une atteinte à la continuité de la physique classique. Pour expliquer l'émission de la lumière par des corps portés à haute température, Max Planck introduit une nouvelle hypothèse : les échanges d'énergie entre lumière et matière se feraient par paquets discontinus. En mars 1905, Einstein va plus loin, afin de rendre compte de l'effet photoélectrique (découvert par Hertz en 1887), c'est-à-dire de la manière dont un corps solide émet des électrons sous l'action d'un rayonnement lumineux : la lumière – du moins lorsqu'on la considère du point de vue de son énergie, serait constituée de "grains" qu'il qualifie de "quanta ". Pour un rayonnement monochromatique (c'est-à-dire de longueur d'onde fixée), les énergies de tous les quanta sont identiques à une valeur fixe, proportionnelle à la fréquence du rayonnement, selon une relation qui fait intervenir une nouvelle constante, la *constante de Planck h*.
En même temps, Einstein sait bien qu'il n'est pas possible de renoncer totalement à l'aspect ondulatoire de la lumière, ne serait-ce que pour valider la notion de sa fréquence. Il y aurait donc, dans la lumière, du continu et du discontinu à la fois ! Et c'est bien là l'une des originalités – et des difficultés – de la physique quantique, qui se développe dans les premières décennies du XXè.

De fait, la physique quantique représente la lumière par un nouveau type d'objet : une *fonction d'onde* (puis, plus tard, par un *champ quantique*). Il est continu, dans le sens où il occupe la totalité de l'espace, dont la continuité est toujours implicitement supposée. Et sa propagation donne lieu aux interférences comme pour une onde classique, ce qui traduit son aspect ondulatoire. En revanche, il interagit avec la matière de manière discontinue et localisée : un détecteur, ou n'importe quel système matériel, ne peut recevoir ou émettre que des « paquets » de champs, des *quanta* localisés qui ressemblent à des corpuscules. Pour la lumière, on les appelle des *photons*.

Pour traduire ces comportements distincts, les débuts de la physique quantique évoquaient une « dualité onde – corpuscule ». Mais ce terme est plutôt source de confusion. Il reflète une interprétation – dite de Copenhague – qui prescrivait de parler de la réalité quantique en termes des concepts classiques d'onde (continue) et de corpuscule (discret). Tous deux sont en fait inadaptés et leur évocation s'est révélée une source de contradictions et de paradoxes. Une vision pleinement quantique renonce au langage classique et assigne aux objets des propriétés pleinement quantiques, rendant caduques les notions classiques et la dualité. La question du continu s'y manifeste d'une manière nouvelle.

Matière discrète ?

Ceci concerne la lumière, et clôt un long débat. Mais en 1923, le français Louis de Broglie avait suggéré qu'il en est de même pour la matière. À notre regard, la matière apparaît essentiellement continue : il semble que l'on puisse la subdiviser sans limite, selon un processus [en puissance] infini. Pourtant, les Atomistes grecs avaient déjà suggéré qu'il puisse devenir impossible de pousser la division au-delà d'une certaine échelle infime. On

atteindrait un niveau où la matière se présente de manière discrète, sous forme de corpuscules, baptisés à l'époque *atomes* (dans son sens étymologique, le terme signifie « qui ne peut être dissocié »). L'atome – nous dirions aujourd'hui le corpuscule -- représentait ainsi un élément de discontinuité de la matière.
Pour passer sur une longue histoire, la physique des XIXè et XXè siècles aboutit tout d'abord à une description apparemment satisfaisante de la matière comme composée de corpuscules élémentaires : atomes, eux-mêmes constitués de particules qualifiées de fondamentales (électrons, protons,…). Une succession de découvertes expérimentales dans les premières décennies du XXè siècle a validé cette conception corpusculaire et donc discontinue.
Mais la suggestion de de Broglie s'est finalement révélée la bonne : la physique quantique doit être étendue à la matière. La description strictement corpusculaire ne s'y applique pas davantage qu'à la lumière, ce que confirmèrent de nouvelles expériences. Même si nos instruments « voient », ou enregistrent la matière sous forme de corpuscules, nous avons compris que – comme pour la lumière – son essence est plus subtile, et mêle également continu et discontinu. Ce n'est que lors d'échanges ou d'interactions qu'elle se manifeste sous forme de quanta, et que son comportement prend une apparence discontinue et localisée.

C'est un des grands succès de la physique quantique que de nous fournir une telle description commune pour la matière et la lumière (plus généralement, les rayonnements). Leur statut commun, décrit par une fonction d'onde ou un champ quantique, n'est ni celui de l'onde classique, ni celui du corpuscule.

Nombres quantiques et spectres

Parmi ses innovations les plus remarquables, la nouvelle vision quantique modifie le statut des grandeurs physiques que l'on peut observer ou mesurer. Elles sont désormais qualifiées d'*observables* (pour « observables quantiques »).
Prenons l'exemple de l'énergie. En physique classique, c'est une grandeur qui peut prendre, pour un système donné, n'importe quelle valeur (sauf contraintes spécifiques). Au contraire, la physique quantique édicte que ses valeurs possibles – par exemple celle d'un électron dans un atome -- occupent un certain ensemble discontinu appelé le *spectre*. On peut numéroter ces valeurs par des nombres entiers (et non pas par une continuité de nombres réels) : elles constituent des *niveaux quantiques*, versions quantifiées des *orbites* de la physique classique. Un électron ne peut passer d'un niveau à l'autre que de manière discontinue, par un *saut quantique.* Il émet à cette occasion un photon, paquet discontinu (quantum) de rayonnement. Ce fut cette quantification de l'énergie du rayonnement électromagnétique qui apparut à Planck et à Einstein, et qui fut à l'origine de la découverte de la physique quantique.
Le point de vue quantique se traduit donc (ici pour l'énergie) par l'apparition du discret là où il y avait du continu. Ceci est exprimé mathématiquement par la nouvelle théorie : l'observable *classique* était représentée par une *fonction*, pouvant prendre *a priori* n'importe quelle valeur de manière continue. L'observable quantique est un objet mathématique différent, un *opérateur* ; de manière très générale, la théorie algébrique des opérateurs associe à chacun d'eux un ensemble de valeurs, le plus souvent discontinu, appelé son *spectre*. En physique quantique, le spectre d'un opérateur représente l'ensemble des valeurs possibles que peut donner une *mesure* de la grandeur physique associée.

Incertitudes

Le caractère quantique se manifeste d'une autre manière qu'exprime le *principe d'indétermination* (ou *d'incertitude*). A un système donné, par exemple une particule, la physique classique associe une valeur précise de la position. Nous ne connaissons pas nécessairement cette valeur, mais elle est censée exister. En physique quantique au contraire il n'y a aucun sens (sauf dans certains cas particuliers) à déclarer qu'un système donné – par exemple un électron – occupe une certaine position. La question n'est pas de savoir si nous pouvons ou non connaître cette position ; la théorie nous dit que tout simplement elle n'existe pas.
Ce qui paraît alors paradoxal, c'est qu'une *mesure de position* fournira pourtant une valeur, prise dans le spectre de l'opérateur associé. Mais cela ne veut pas dire que l'électron occupait cette position avant la mesure. Tout ceci est en fait parfaitement cohérent dès lors que l'on utilise les notions quantiques adaptées ; en renonçant par exemple à parler de la position d'une particule, notion valable en physique classique mais non quantique.
Toute mesure comporte des incertitudes. Le *principe d'indétermination* implique qu'elles ne peuvent être aussi petites que l'on veut. Plus précisément, le produit des incertitudes sur les mesures de position et d'impulsion (produit $p=mv$, de la vitesse v par la masse m) ne peut être inférieur à la constante de Planck h : $\Delta x \, \Delta p > h$.
Cette limitation ne représente pas une imperfection de la théorie, mais une propriété fondamentale de la nature, largement confirmée par les expériences. L'impossibilité qu'une mesure de position atteigne une précision absolue peut s'interpréter comme l'inaccessibilité du point : une négation – en pratique - de la continuité.

Espaces flous et géométrie non commutative

De fait, cette situation ouvre une nouvelle piste. Positions et vitesses constituent les grandeurs fondamentales de la *cinématique*, l'étude des mouvements, ou de la dynamique. Depuis longtemps, ces disciplines considèrent ces eux grandeurs comme les dimensions d'un « espace abstrait », l'*espace des phases*. Celui ci englobe, en quelque sorte, l'espace ordinaire dont les dimensions se constituent des seules positions. Il constitue le cadre de la cinématique. Mathématiquement, c'est une variété, continue, munie d'une structure particulière dite *symplectique* [7]. Le passage de la mécanique classique à la mécanique quantique -- si l'on préfère, la « quantification » des mouvements -- s'interprète alors comme une modification du statut géométrique de l'espace des phases : ce dernier devient une entité d'un nouveau genre, un *espace flou*. Ceci constitue la formulation géométrique du remplacement des fonctions par les opérateurs. Notons au passage que, lorsque les positions et les vitesses deviennent des opérateurs, il en est de même pour l'énergie qui s'exprime à en fonction d'elles. On a ainsi une équivalence entre les trois points de vue :
physique : Quantifier
géométrique : Rendre la géométrie [de l'espace des phases] floue (non commutative)
algébrique : remplacer les fonctions par des opérateurs

Les « espaces flous » ne sont pas des « espaces » dans le sens de la géométrie ordinaire (ce ne sont pas des variétés). Ils relèvent d'une nouvelle sorte de géométrie dite « non commutative », dont les développements formels ont été dus essentiellement, ces dernières

---

[7] La structure symplectique constitue le fondement mathématique de l'étude des systèmes dynamiques, discipline très générale qui englobe la dynamique usuelle, et qui en justifie les approches lagrangienne et hamiltonienne. À ce sujet, on consultera avec profit les travaux de Jean-Marie Souriau (http://www.jmsouriau.com/) ou de Patrick Iglésias (http://math.huji.ac.il/~piz/Site/Welcome.html).

décennies, aux travaux du mathématicien Alain Connes. On peut tenter un parallèle entre la mise au point des géométries non euclidiennes, au XIXè, qui a permis la relativité générale ; et celle de la géométrie non commutative qui a d'ores et déjà abouti à la physique quantique (et dont on peut penser que nous n'avons pas encore exploité toutes les possibilités). Durant la première moitié du XXè siècle, les physiciens fondateurs de la mécanique quantique faisaient de la géométrie non commutative sans le savoir !

Vu à nos (grandes) échelles, un espace flou ressemble à un espace ordinaire : dans la vie de tous les jours, tant qu'on ne demande pas une précision trop importante, la nature quantique du monde n'est guère apparente. Elle se manifeste en empêchant une localisation trop précise. La différence apparaît aux petites échelles (en physique quantique, en dessous des échelles caractérisées par la constante de Planck). En particulier, elle interdit une localisation absolue et implique très exactement les relations d'incertitude quantiques. Un espace flou ne comporte pas de points : l'accès au continu a disparu, sans que l'on puisse proprement parler de discontinu. La *géométrie non commutative* offre ainsi une sorte de compromis entre le continu et le discontinu.
Mathématiquement, la manière la plus aisée d'exprimer les propriétés d'un espace flou fait appel à l'algèbre. Un espace habituel est décrit par des *coordonnées* ; ce sont des *fonctions*, qui prennent des valeurs en chaque point de l'espace. Les « coordonnées » d'un espace flou ne sont plus des fonctions, mais des êtres algébriques différents, précisément des opérateurs. Leurs produits ne commutent pas, ce qui conduit à la dénomination de cette approche. Comme nous avons vu, un opérateur ne peut prendre ses valeurs que dans un *spectre*, en général discontinu.

Notons cependant que, si la mécanique quantique se caractérise par un espace des phases devenu flou, l'*espace* lui-même, dans le sens habituel, reste indemne. L'espace ordinaire ne constitue qu'une composante de l'espace des phases ; l' « espace des vitesses » peut être vu comme une autre composante ; c'est la relation entre les deux qui a changé.

Quantifier la gravité

L'espace lui-même (comme le temps) échappe à cette « quantification ». Par ailleurs, la physique quantique traite de la matière et des rayonnements, et de leurs interactions (comme l'électromagnétisme), mais l'interaction gravitationnelle lui échappe. Et beaucoup de physiciens estiment que la physique ne sera vraiment complète et unifiée que lorsque cette interaction sera traitée de la même manière que les autres.
Puisque la relativité générale décrit la gravitation comme la géométrie même de l'espace-temps, ceci semble ouvrir une voie naturelle : quantifions l'espace et le temps ! La théorie gagnera en cohérence, la gravitation acquerra un statut identique à celui des autres interactions. Les fondateurs de la physique quantique, à commencer par Dirac, s'y sont essayés sans succès. Depuis, il s'est avéré qu'il était impossible de quantifier l'espace-temps (ou la gravitation) *de la même manière que les autres interactions*. Il faut donc trouver autre chose, ce qui constitue aujourd'hui un des sujets de recherche les plus actifs et les plus passionnants de la physique fondamentale.

Nous pensons que ce doit être aux infimes échelles d'espace et de temps, bien inférieures à celles des particules élémentaires, que les effets doivent se manifester le plus crucialement : la description géométrique habituelle doit devenir caduque autour de la *longueur de Planck*, soit $L_P = 10^{-35}$ m. Nous ignorons encore comment elle doit être modifiée, mais de nombreux indices suggèrent que la continuité doit disparaître.

Certains suggèrent des modifications de type topologique : les théories des cordes et branes imaginent que des dimensions supplémentaires se manifesteraient aux petites échelles ; d'autres approches, comme certaines théories de triangulation, suggèrent au contraire que la dimensionnalité de l'espace-temps pourrait diminuer aux très petites échelles. D'autres encore imaginent des morceaux d'espace-temps déconnectés les unes des autres. D'une manière ou d'une autre, une nouvelle géométrie « quantique » doit être invoquée, où la continuité disparaitrait en dessous de la longueur L_P, ou du moins se reformulerait différemment.
Je mentionnerai ici trois familles d'approches de la gravité quantique qui impliquent des conceptions discrètes de l'espace-temps

Vers un discontinuum spatio-temporel ?

• Gravité en boucles et réseaux de spins

La gravité quantique *canonique* se donne pour tâche de quantifier la théorie de la relativité générale. Elle mène aux approches qualifiées de *gravité en boucle* et de *réseaux de spin*, que beaucoup considèrent comme très prometteuses. Il est certainement trop tôt pour parler de théories physiques établies, mais ces approches proposent une réelle géométrie quantique. Ce que l'on appelle boucles, ou réseaux de spins, constituent les états quantiques de la géométrie quantique. Les grandeurs géométriques habituelles, surfaces et volumes par exemple, sont remplacées par des opérateurs. Comme en physique quantique ordinaire, un opérateur géométrique ne peut prendre ses valeurs que dans un spectre. Les spectres des opérateurs géométriques ont été effectivement calculés ; ils sont discontinus [8]. Cela veut dire par exemple qu'une mesure de surface, représentée par l'application de l'opérateur surface à un état, ne peut donner que certaines valeurs discontinues (multiples de la longueur de Planck).

L'idée de réseau de spin fut au départ proposée par le physicien britannique Roger Penrose : les nœuds reproduisent les propriétés des interactions entre particules, sans référence explicite à un substrat géométrique sous-jacent ; ce dernier – ou du mois certaines de ses propriétés - est censé apparaître comme un sous-produit de la théorie (on dit qu'il serait « émergent »). Aux nœuds du réseau (et à ses autres caractéristiques telles que bords, polygones ou polyèdres), ne sont pas associées des fonctions, à valeurs numériques, mais des opérateurs, dont les caractéristiques définissent le caractère quantique de la nouvelle théorie.

• Ensemble causaux

Les réseaux de spins, qui représentent les états de la géométrie selon les approches précédentes, sont des objets fondamentalement discontinus ; ils possèdent certaines mais pas toutes, des propriétés de la géométrie ordinaire. D'autres approches procèdent en introduisant dès le départ un tel réseau (ou un graphe) pour représenter l'espace-temps. Elles exigent une propriété minimale, à savoir que l'on puisse y établir des relations de causalité : on parle d' *ensemble causaux* (*causal sets*, ou *cosets*) ou de *réseaux causaux* (*posets*, pour « partially ordered sets »). Mathématiquement, ce sont des ensembles [partiellement] ordonnés, la relation d'ordre représentant la causalité physique.

---

[8] Ce qui est lié au caractère compact du groupe de symétries qui intervient dans cette quantification

Un ensemble causal représente l'ensemble des événements possibles, avec les relations (causales) qui les lient. Ces événements ne sont pas situés dans un espace-temps défini par ailleurs : il n'y a pas d'espace-temps *a priori* dans la théorie. Mais le réseau qu'ils constituent, c'est-à-dire l'ensemble des relations entre eux, définit une structure fondamentale qui joue le rôle de l'espace-temps. Selon cette approche, ceci devrait suffire pour définir le cadre de la physique ; une partie de travail consiste précisément à le montrer, à faire apparaître explicitement les propriétés que l'on attribue en général à l'espace-temps, comme une notion dérivée, « émergente » à partir d'une description purement relationnelle[9].

• Triangulations

Un troisième type d'approche introduit aussi une discontinuité dans la description géométrique ; mais au départ uniquement dans le but pratique d'effectuer une approximation de la géométrie facilitant les calculs.
Rappelons qu'une manière de voir la physique quantique ordinaire consiste à envisager toutes les trajectoires possibles, ou *chemins*, que peut prendre une particule. Et c'est à partir de l'ensemble de ses chemins possibles que l'on calcule[10] le destin quantique de la particule. Certains approchent la gravité quantique de manière similaire, ce qui implique de considérer le très vaste ensemble de toutes les géométries possibles pour l'espace-temps, ces géométries jouant le rôle des chemins.
L'approche demande ensuite d'effectuer le calcul d'une certaine intégrale (de chemins) à partir de cet ensemble. La tâche est extrêmement difficile, ne serait-ce que pour simplement identifier tous ces chemins, autrement dit les géométries possibles. Ces théories [11] de « triangulations » (« triangulations causales » pour les plus récentes) remplacent les géométries (continues) par des approximations discontinues[12]. Elles quantifient ainsi une approximation discrète de la géométrie continue de l'espace-temps. De nombreux travaux tentent d'estimer la validité d'une telle procédure. Elle présente au moins l'avantage de ramener certaines questions à des calculs qui peuvent être effectués concrètement, notamment par ordinateurs. Certains résultats pourraient par exemple permettre de comprendre pourquoi notre espace-temps possède 4 dimensions.

---

[9] La conception « relationnelle » de la réalité remonte à Leibniz, qui refusait de considérer l'espace comme un *objet physique* à la manière de Newton : il n'y aurait pas d'espace ! (ou d'espace-temps, en adaptant à la physique actuelle). Seuls existent les objets et les événements ; ce que nous appelons espace-temps ne serait rien d'autre que l'ensemble des relations entre eux, présenté sous une forme particulière, adaptée à notre entendement.
Cette conception, qui fut défendue par Ernst Mach, fut à l'origine des réflexions d'Einstein pour construire sa relativité générale. Comme il l'avait souligné à l'époque, la conception relationnelle sous-tend sa théorie, même si cette dernière n'est que rarement formulée d'une manière qui le fasse apparaître explicitement. En physique actuelle, les approches qui revendiquent la fidélité à cette propriété essentielle de la relativité générale sont qualifiées de *background-independent*.
[10] par une « intégrale de chemins »
[11] qui reprennent des tentatives plus anciennes telles que « calcul de Regge ».
[12] On peut décrire une ligne courbe de manière approximative comme une succession de petits segments. On retrouve la courbe elle-même en faisant tendre les longueurs vers zéro. On peut de même « trianguler » une surface en la remplaçant par une juxtaposition de petits triangles ajustés sur elle (les architectes le savent bien). On peut de même « trianguler » un espace, ou un espace-temps à l'aide d'un maillage approprié.

Disparition des points

Même si ces méthodes utilisent une approximation discontinue du continu, l'idée qui sous-tend toutes ces approches est que le continu que nous expérimentons n'est qu'une approximation d'une réalité géométrique fondamentalement discrète.
Les physiciens sont depuis longtemps confrontés à des « défauts » de la physique quantique et de la relativité générale, qui se traduisent par l'apparition de quantités infinies indésirables, divergences ou singularités[13]. Depuis Einstein au moins, il était soupçonné que la solution de ces défauts passe par la disparition de la notion de point[14]. Or précisément, le caractère discontinu qui apparaît dans ces diverses approches entraîne la disparition du point.

Malgré quelques résultats concrets, surtout mathématiques, aucune de ces approches n'est aujourd'hui aboutie. D'autres points de vue, comme ceux des cordes ou de la géométrie non commutative, sont explorés. Au sein des nombreuses controverses qui accompagnent les recherches en cours, la disparition de la continuité de l'espace aux échelles infimes semble bénéficier d'un relatif consensus, sans doute dû au caractère bénéfique de la disparition du point.
Notre continuum spatio-temporel ne serait que la manifestation approximative, valable à nos échelles seulement, d'une géométrie quantique plus complexe. Si tel est bien le cas, il reste à caractériser cette nouvelle géométrie du monde !

Bibliographie

La nature de l'espace et du temps
S. Hawking et R. Penrose, Gallimard 1997)

Petit voyage dans le monde des quanta,
Etienne Klein, Champs-Flammarion 2004

Concepts d'espace ; une histoire des théories de l'espace en physique,
Max Jammer, Vrin 2008

A la découverte des lois de l'univers. La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique,
Roger Penrose, Odile Jacob, Paris, 2007 ;

Quantum gravity,
Carlo Rovelli (Cambridge Monographs on Mathematical Physics, 2007)

Rien ne va plus en physique ! : L'échec de la théorie des cordes,
Lee Smolin, Dunod 2007

Même pas fausse !,
Peter Woit, Dunod 2007

Géométrie non commutative,

---

[13] Voir *Au-delà de l'espace et du temps*, op. cit.
[14] voir par exemple *Concepts d'espace ; une histoire des théories de l'espace en physique*, Max Jammer, Vrin 2008

Alain Connes, Dunod

Les avatars du vide,
Marc Lachièze-Rey, éd. Le Pommier 2005