



lité de la Terre n'ont été valides et utiles qu'un temps dans l'histoire. Or la même chose se produit avec la notion de temps. Par exemple, nous savons aujourd'hui que le temps n'est pas universel. La durée d'un événement semble en général la même pour différentes personnes, mais l'unique raison de cette belle concordance est que nos montres sont très peu précises. Les horloges atomiques ont permis de vérifier, conformément à la théorie de la relativité d'Einstein, que le temps qu'elles indiquent dépend de leurs vitesses, de leurs altitudes et d'autres facteurs. Et avec les progrès de la physique, d'autres caractéristiques du temps intuitif ont perdu leur pertinence (voir les articles de Craig Callender et de Marc Lachièze-Rey).

La révision des notions fondamentales de la physique, et en particulier celle de temps, ne s'est pas interrompue avec la théorie de la relativité d'Einstein. Elle se poursuit aujourd'hui, et c'est ce que nous allons détailler.

Le statut du temps est à revoir

Commençons par une petite leçon que nous a donnée l'histoire. Il y a plus d'un siècle, Einstein a pu prédire que le temps ne s'écoule pas au même rythme pour tous les observateurs. Comment y est-il parvenu ? Il disposait à son époque de la mécanique de Newton et Galilée, de l'électromagnétisme de Faraday et Maxwell, et de la théorie newtonienne de la gravitation. D'un côté, ces théories étaient très efficaces, et donc crédibles ; mais de l'autre, elles étaient fondées sur des notions en contradiction apparente (par exemple : invariance de la vitesse de la lumière en électromagnétisme *versus* addition des vitesses relatives en mécanique newtonienne). Einstein a compris qu'il fallait trouver de nouveaux schémas conceptuels où les résultats de ces théories pouvaient être réunis de façon non contradictoire, et que pour ce faire, il fallait revoir certaines notions fondamentales, notamment celle de temps.

Nous nous retrouvons aujourd'hui dans une situation similaire. Nous disposons de deux théories qui se sont montrées très efficaces, et donc crédibles, tout au long du dernier siècle : la mécanique quantique et la relativité générale d'Einstein. Mais, une fois encore, ces théories sont fondées sur des notions qui apparaissent en conflit, et il semble nécessaire de

1. LA DIFFICULTÉ À ÉDIFIER UNE THÉORIE quantique de la gravitation, qui unirait la physique quantique et la relativité générale d'Einstein, conduit une partie des physiciens à mettre en doute la réalité du temps. De fait, il est possible de formuler les théories fondamentales sans utiliser de paramètre temporel. Mais il reste à expliquer comment se construit le temps, c'est-à-dire comment il vient s'imposer à notre intuition.

L'AUTEUR



Carlo ROVELLI est professeur à l'Université de la Méditerranée et travaille au Centre de physique théorique de Luminy (CNRS), près de Marseille.

revoir notre notion de temps pour construire un schéma conceptuel cohérent.

La physique quantique et la relativité générale, prises ensemble, indiquent que pratiquement tous les aspects de la notion naïve de temps ne sont que des propriétés locales et partielles de la temporalité, qui dépendent des limites de nos sens et des particularités de notre expérience.

Comment est-on parvenu à cette conclusion ? Oublions un instant la mécanique quantique. Le succès de la théorie de la relativité nous a appris que le temps est indissociable d'un continuum nommé espace-temps, et que cet espace-temps est une entité dynamique, qui bouge : c'est comme un immense mollusque mobile au sein duquel nous sommes immergés, pour

nous mesurons en réalité n'est jamais le temps, mais toujours quelque variable physique qui change « avec le temps ». Par exemple, nous mesurons le « temps » en observant la position des aiguilles de notre montre ; mais pourquoi ces aiguilles nous donnent-elles le « vrai temps » ? Parce que leur lecture est la même que celle de l'horloge de la mairie ou de l'horloge diffusée sur le Web. Mais ces horloges nous indiquent-elles le « vrai temps » ?

La réponse à ces questions apparemment sans fin a été donnée par Newton dans une très belle page de sa grande œuvre, les *Principia*. En effet, notait Newton, nous ne mesurons jamais le temps t . Nous ne faisons qu'observer des grandeurs physiques A , B , C , etc. et constater qu'elles prennent à chaque fois des valeurs différentes. Les quantités observables nous apparaissent changer continuellement. Il est fort utile, remarquait Newton, de postuler l'existence d'une variable physique t qui n'est pas observable, mais qui serait comme l'occulte chef d'orchestre qui mène le ballet des grandeurs observables. Quand le paramètre t change, les variables physiques changent et leur modification est décrite par des fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc.

Toute la physique, proposait Newton, peut être exprimée en termes d'équations qui régissent ces fonctions de t . Nous n'observons jamais ces fonctions, parce que ce n'est pas la variable t que nous observons, mais seulement les quantités A , B , C , etc. et leur ballet. Autrement dit, nous observons comment A change avec B , C , etc., B avec A , C etc., C avec A , B , etc., et ainsi de suite. En d'autres termes, expérimentalement, nous n'avons accès qu'aux fonctions $A(B, C, \dots)$, $B(A, C, \dots)$, $C(A, B, \dots)$, etc. Mais d'un point de vue théorique, il se révèle plus facile d'accéder aux relations entre les grandeurs observables en déterminant les fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc. : il suffira alors d'exprimer t en fonction de l'une de ces grandeurs et ainsi de retrouver les relations entre A , B , C , etc.

Cette démarche un peu saugrenue, qui consiste à faire appel à un paramètre temporel t sous-jacent et inobservable, est à la base de la physique newtonienne et de ses avatars. Elle fonctionne très bien... jusqu'à ce qu'on essaie de construire une théorie quantique de la gravité. Le schéma newtonien du temps montre déjà ses limites en relativité générale, puisque par exemple les temps de systèmes différents ne sont généralement pas les mêmes (voir l'article

« LA MEILLEURE OPTION EST D'ABANDONNER la notion de temps tout entière, un peu comme nous avons abandonné la notion de couleur pour décrire la matière au niveau atomique. »

utiliser une métaphore chère à Einstein. Cette étape réduit déjà le temps à quelque chose de très différent de la notion intuitive que l'on en a. Maintenant, si nous prenons en compte la mécanique quantique, cette dernière révèle que toute entité dynamique, par exemple le champ électromagnétique, est en réalité bien plus complexe qu'un continuum mobile : ses manifestations peuvent seulement être décrites en termes de lois de probabilités. Il s'ensuit que le temps, qui n'était déjà plus universel comme l'a montré la relativité, n'est plus orienté et perd même sa structure linéaire...

Je suis ainsi convaincu que, pour conceptualiser la temporalité, le devenir et l'évolution d'une façon qui soit compatible tant avec la mécanique quantique qu'avec la relativité générale, c'est-à-dire qui puisse fonder une théorie quantique de la gravitation, la meilleure option est d'abandonner la notion de temps tout entière, un peu comme nous avons abandonné la notion de couleur pour décrire la matière au niveau atomique, ou comme nous avons abandonné le caractère absolu de la simultanéité dans la théorie de la relativité restreinte.

S'affranchir entièrement de la notion de temps est une option moins radicale qu'il n'y paraît. Tout bien réfléchi, le temps n'est pas si essentiel en physique. Ce que

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Rovelli, *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?*, Bernard Gilson Éditeur, 2006.

C. Rovelli, *Quantum Gravity*, Cambridge University Press, 2004.

✓ SUR LE WEB

C. Rovelli et M. Smerlak, *Thermal time and the Tolman-Ehrenfest effect : temperature as the « speed of time »*, 2010, disponible sur : <http://fr.arxiv.org/abs/1005.2985>

C. Rovelli, *Forget time*, 2008, essai disponible sur : <http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/RovelliTime.pdf>

C. Rovelli, *Gravité quantique : quand le temps et l'espace n'existent plus*, conférence donnée le 19 mars 2005, disponible sur : http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/04-05/conferences/01-05-einstein/03-rovelli/index.htm