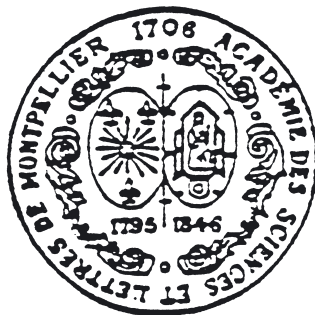


BULLETIN
DE
L'ACADÉMIE DES SCIENCES
ET LETTRES
DE
MONTPELLIER



NOUVELLE SÉRIE
TOME 39
ANNÉE 2008

ISSN 1146-7282

Séance publique du 7 avril 2008

Einstein bouleverse notre conscience du temps et de l'espace

par Pierre LOUIS

I – Introduction : les notions communes d'espace et de temps

Si la notion courante de notre espace à 3 dimensions est assez claire, celle de temps l'est moins et nécessite quelques précisions.

Le temps considéré ici ne sera pas le temps psychologique, subjectif, celui qui dépend des émotions ressenties par la personne qui l'évalue. Le temps dont il est question sera le temps physique, celui des horloges, celui que l'on peut qualifier d'objectif, que l'on peut mesurer. Sur ce temps là, il y a unanimité, chacun admet la durée donnée par les horloges. Ce temps mesurable, irréversible, invariable par rapport à l'espace et identique pour tous les observateurs, c'est celui du sens commun admis par tous, celui qui nous paraît "évident". Celui dont Pascal écrit : "Qui le pourra définir ? Et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant de temps, sans qu'on le désigne davantage ?". Les neurosciences et la gestion mentale montrent que ces outils, le temps et l'espace, sont utilisés de manière différente suivant les individus pour appréhender le monde. Les uns sont plus à l'aise dans l'espace, les autres dans le temps, mais cela sans remettre en cause leurs caractéristiques admises par tous.

Je vais essayer de vous montrer, qu'en fait, ces données "évidentes" de notre conscience ont été profondément bouleversées par la théorie de la Relativité dont Einstein est le principal inventeur. Pour conduire cet exposé qui n'est absolument pas destiné à des spécialistes, j'utiliserai largement deux ouvrages de vulgarisation, l'un écrit par un astrophysicien⁽¹⁾, l'autre par un physicien⁽²⁾. Si, au terme de notre rencontre, vous souhaitez aller un peu plus loin dans la réflexion, je vous conseillerais de vous y reporter, ils sont clairs l'un et l'autre.

II – L'univers de Newton

Avant d'aborder l'apport de la Relativité aux notions de temps et d'espace, il est nécessaire de rappeler où en étaient les physiciens après les travaux de Newton qui datent de la fin du XVII^{ème} siècle.

Les idées actuelles sur les mouvements des corps remontent en effet à Galilée pour l'expérimentation (1638) et à Newton pour la formulation des lois (publication des "Principia mathematica" en 1687). Auparavant tout le monde croyait Aristote qui pensait que l'état naturel des corps était le repos, qu'ils ne se mettaient en mouvement que sous l'effet d'une force, et que si une force était deux fois plus grande, le mouvement en résultant serait deux fois plus rapide. La conséquence était que si un corps était deux fois plus lourd (attraction double par la terre), il devait tomber deux fois plus vite. Il est étonnant de penser qu'il a fallu attendre Galilée pour

que l'on cherche à vérifier cette affirmation d'Aristote. Chacun sait que les expériences de Galilée, réalisées avec des plans inclinés pour réduire les vitesses à mesurer afin de faciliter les expériences, montrèrent que la vitesse de tous les corps augmente de la même façon sous l'influence de l'attraction terrestre et donc que dans le vide tous les corps tombent à la même vitesse. Les idées d'Aristote étaient fausses.

Newton, à partir des expériences précédentes, établit les lois qui portent son nom.

1- L'effet d'une force est de modifier la vitesse d'un corps et non de le mettre en mouvement. Ceci implique qu'un corps sur lequel aucune force ne s'applique est soit immobile soit en mouvement rectiligne uniforme.

2- Si un corps est soumis à une force, c'est l'accélération de ce corps qui est proportionnelle à l'intensité de la force, c'est donc l'augmentation de la vitesse et non cette vitesse elle-même qui est proportionnelle à l'intensité de la force (3).

La grande différence entre la vision de Galilée, Newton et la vision aristotélicienne antérieure, c'est que pour Aristote l'état de repos était l'état privilégié, c'était l'état de tous les corps non soumis à une force. Il existait donc un état de repos absolu qui pouvait constituer une référence. Il pensait en particulier que la Terre était immobile. On sait bien actuellement que ce n'est pas le cas. Mais avec la première loi de Newton, la notion de repos absolu disparaît. Si deux corps A et B sont dans un mouvement rectiligne uniforme, l'un par rapport à l'autre, on peut tout aussi bien dire que le corps A est immobile et que le corps B se déplace suivant une vitesse constante par rapport à A ou bien que B ne bouge pas et que c'est A qui se déplace. Il n'y a pas de raison de privilégier un référentiel plutôt qu'un autre.

Appliquons ces conclusions à un exemple

Prenons un train qui se déplace à 150 km/h. Par rapport à la voie ferrée, imaginons un mouvement rectiligne uniforme. Vous pouvez aussi bien dire que le train se déplace à cette vitesse vers l'ouest ou que la voie ferrée se déplace à cette même vitesse vers l'est. Imaginons maintenant une partie de ping-pong à bord de ce train. Que la partie ait lieu dans le train en marche ou le long de la voie ferrée, le mouvement de la balle obéit toujours aux lois de Newton. Il n'y a donc aucun moyen de savoir si c'est la Terre ou le train qui se déplace. Que le train se déplace d'ailleurs à 90 km/h, à 150 km/h ou soit immobile, la partie de ping-pong se déroulera de la même façon.

L'absence d'immobilité absolue a une implication considérable : elle signifie qu'il est impossible de déterminer si deux événements qui se sont produits à des instants différents ont eu lieu au même endroit dans l'espace.

Reprenons notre exemple du train et pour la facilité du calcul, imaginons qu'il roule à 144 km/h et qu'un joueur lance la balle de ping-pong en l'air et qu'elle rebondit deux fois au même endroit à une seconde d'intervalle. Pour le joueur la distance entre les points de rebond est nulle. Par contre pour un observateur placé le long de la voie, il aura l'impression que les deux rebonds se sont effectués à 40 m l'un de l'autre (distance parcourue par le train en 1 seconde).

Newton nous a montré qu'aucun des deux observateurs ne peut se dire plus immobile que l'autre. Il n'y a aucune raison d'en privilégier un. Il n'y a pas d'espace absolu. Lorsque l'on parlera d'un espace, il faudra préciser dans l'espace de quel référentiel on se situe. Dans l'exemple précédent, ce pourrait être le référentiel du train, celui de la Terre, celui du système solaire, etc.

Dans l'univers d'Aristote ou dans celui de Newton, il y a, par contre, place pour un temps absolu. Tous deux croyaient possible de mesurer sans ambiguïté l'intervalle de temps entre deux évènements à la condition de disposer d'une bonne horloge. Dans l'exemple précédent, l'intervalle de temps serait le même entre les deux rebonds de la balle, que la mesure soit faite par le joueur ou par l'observateur extérieur au train.

En conclusion, les lois de Newton conduisent donc à la disparition d'un espace absolu mais admettent un temps absolu. Ce sont les caractéristiques de l'univers de Newton.

Nous allons voir maintenant qu'au XX^{ème} siècle des physiciens découvrirent que l'intervalle de temps entre les deux rebonds de la balle de ping-pong pourrait varier suivant les observateurs. En particulier si deux observateurs sont en mouvement relatif de grande vitesse (fraction importante de la vitesse de la lumière), les mesures qu'ils effectueront donneront, pour le même intervalle de temps, des valeurs très différentes. En plus ils ont découvert que le temps n'était pas totalement indépendant de l'espace.

Tout cela contredit notre expérience courante. On s'est effectivement aperçu que des notions qui font appel au bon sens permettent d'expliquer notre environnement lorsqu'il s'agit de corps se déplaçant relativement lentement, tels que train, avion et même planète. Par contre, notre vision du temps et de l'espace ne fonctionne plus du tout lorsqu'il s'agit de corps se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière. Ce sont ces questions que nous allons aborder maintenant.

III – L'univers de la Relativité restreinte

On sait depuis 1676 que la lumière voyage à une vitesse finie mais très élevée. C'est un astronome danois (Rohmer) qui l'a montré. Mais il fallut attendre 1865 pour disposer d'une théorie adéquate de la propagation de la lumière. C'est le physicien britannique Maxwell qui a unifié les théories partielles utilisées jusqu'alors pour décrire l'électricité et le magnétisme. Il montra que l'électricité et le magnétisme constituent deux aspects inséparables de la même force. Il l'appela force électromagnétique et ses équations prédisaient l'existence d'ondes électromagnétiques qui se propagent à une vitesse finie, à l'image des rides à la surface de l'eau. Lorsqu'il calcula cette vitesse, il s'aperçut qu'elle coïncidait exactement avec la vitesse de la lumière. Aujourd'hui on sait que la lumière est constituée des ondes de Maxwell dont les longueurs d'ondes se situent entre 400 et 800 nanomètres (1 nm = 10⁻⁹ mètre). Il en résulte donc que la lumière se propage à une vitesse déterminée (en fait 300 000 km/s), mais par rapport à quoi est déterminée cette vitesse, c'est la question qui s'est alors posée et qui a conduit à l'idée d'un "éther".

Existence d'un hypothétique éther

Il fallait concilier cette donnée, propagation à une vitesse déterminée de la lumière, avec l'univers de Newton dans lequel nous avons vu qu'il n'existait aucun espace immobile de référence. Il ne pouvait donc y avoir de définition absolue de la vitesse d'un corps. Pour le comprendre, reprenons l'exemple des joueurs de ping-pong dans un train. Notre train s'éloigne de l'observateur situé sur la voie à

140 km/h. J'envoie, dans le train, la balle à mon adversaire à une vitesse que j'estime à 10 km/h. La vitesse de la balle est pour l'observateur au sol de $140 + 10 = 150$ km/h. Quelle est alors la vitesse de la balle : 10 km/h ou 150 km/h ? Comment la définir, par rapport à la Terre ? Puisqu'il n'existe pas d'immobilité absolue comme l'a montré Newton, il n'y a pas de vitesse absolue. On peut lui donner n'importe quelle valeur suivant le référentiel choisi.

Or, à priori, le même raisonnement peut s'appliquer à la vitesse de la lumière. Donc par rapport à quel référentiel la vitesse de la lumière est-elle de 300 000 km/s ? Pour répondre à cette question, on a imaginé une substance que l'on a appelé "éther", présente partout, y compris dans le vide et ce serait par rapport à cet éther que la vitesse de la lumière aurait une valeur bien déterminée. Cette idée d'éther plaisait d'ailleurs aux physiciens car de même que le son se propage dans l'air, les vagues dans l'eau, la lumière se propagerait dans l'éther. Des observateurs différents verraient bien alors la lumière se déplacer à des vitesses différentes mais cette vitesse serait fixe par rapport à l'éther. Cet éther était très satisfaisant. Il restait à prouver son existence, c'est ce qu'une expérience a cherché à faire. Cette célèbre expérience, qui permit à Michelson d'obtenir le prix Nobel de physique, a été réalisée en 1887.

Expérience de Michelson et Morley

Conduite à Cleveland, aux USA, elle est connue sous le nom d'expérience de Michelson et Morley. Elle repose sur l'idée suivante : la lumière se propage dans l'éther à une vitesse bien déterminée. Si vous, observateur, vous vous déplacez également par rapport à l'éther vers une source lumineuse S, la vitesse de la lumière par rapport à vous sera la somme de la vitesse de la lumière dans l'éther et de votre vitesse de déplacement par rapport à l'éther. Si vous vous éloignez de la source, ce sera au contraire la différence des deux vitesses. L'idée est simple mais comme la vitesse de la lumière est beaucoup plus grande que toutes les vitesses auxquelles nous pouvons nous déplacer, la réalisation d'une telle mesure était très compliquée. Nos expérimentateurs ont alors pensé que puisque la Terre tourne autour du soleil à une vitesse de l'ordre de 30 km/s, leur laboratoire devait se déplacer à une vitesse relativement élevée par rapport à l'éther. Bien entendu, ils ne savaient pas comment l'éther se déplaçait par rapport au soleil ou si même il y avait un déplacement relatif. Mais, ils ont pensé qu'en répétant leurs mesures, très sensibles (par interférométrie), au cours de l'année, c'est-à-dire en des positions différentes par rapport au soleil, ils pourraient mettre en évidence leur mouvement par rapport à l'éther⁽⁴⁾. A leur grande surprise, ils trouvèrent que la vitesse de la lumière restait en tout temps et en tout lieu toujours la même. Après ce résultat surprenant mais qu'il fallait bien admettre, il y eut plusieurs tentatives pour sauver la théorie de l'éther. Mais aucun physicien ne réussit à faire une proposition satisfaisante.

C'est alors qu'un obscur employé du bureau de la propriété intellectuelle de Berne, Albert Einstein, dans un article devenu célèbre de 1905 fit remarquer que cette hypothèse de l'existence d'un éther devenait inutile si l'on voulait bien abandonner l'idée d'un "temps absolu".

Il serait bon de rappeler qu'avant 1905, il existait une base mathématique solide pour la Relativité restreinte due à Lorentz et à Henri Poincaré. En particulier, Poincaré, brillant mathématicien a eu des intuitions tout à fait remarquables mais n'a pas été jusqu'à supprimer nettement la notion d'éther. Einstein a largement bénéficié des outils mathématiques qu'il avait développés avec Lorentz. Ce ne sera pas du tout

le cas pour la Relativité générale où Einstein devra faire un effort considérable lui qui était davantage physicien que mathématicien pour conduire le développement mathématique de sa théorie. C'est la raison pour laquelle, alors que l'on peut lui contester la paternité exclusive pour la Relativité restreinte, nul ne la lui conteste pour la Relativité générale.

Le postulat de la Relativité restreinte.

Le postulat fondamental de la théorie de la Relativité restreinte⁽⁵⁾ peut être formulé ainsi : les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres quelle que soit leur vitesse de déplacement. Ceci était déjà admis dans l'univers de Newton comme nous l'avons vu pour les lois de la mécanique. Mais l'idée géniale d'Einstein a été sa généralisation à la théorie électromagnétique de Maxwell. Généralisation qui signifie que la théorie de Maxwell donnant à la vitesse de la lumière une valeur déterminée, tous les observateurs doivent également retrouver cette même valeur quelle que soit la vitesse à laquelle ils se rapprochent ou s'éloignent de la source. Non seulement cette idée simple satisfait les équations de Maxwell mais elle permet d'éliminer la nécessité d'un cadre de référence absolu, en particulier l'éther devient parfaitement inutile. Cet éther dont l'expérience de Michelson et Morley a montré qu'il est impossible d'en prouver l'existence n'a plus besoin d'être imaginé dans la théorie de la Relativité. C'est donc là un progrès considérable qu'elle apporte.

Disparition du temps absolu

Par contre, elle nous contraint à modifier profondément notre conception du temps. Pour préciser ce point, reprenons l'exemple des joueurs de ping-pong dans un train en marche.

Notre train, comme plus haut, est supposé rouler à 144 km/h. L'un des joueurs lance la balle vers l'avant du train à une vitesse que nous supposons pour la facilité du calcul égale à 7,2 km/h. Cette vitesse sera de 151,2 km/h pour l'observateur resté sur la voie (144 dûs au train + 7,2 dûs à la balle). Imaginons que la balle rebondisse deux fois à une seconde d'intervalle, elle aura parcouru pour les joueurs dans le train 2 mètres et pour l'observateur au sol 42 mètres (40 dûs au déplacement du train + 2 dûs à celui de la balle). Jusque là tout va bien, notre bon sens est satisfait mais maintenant remplaçons la balle de ping-pong par un flash lumineux. Le même raisonnement nous montre que les observateurs ne s'accorderont pas sur la distance parcourue par la lumière et par suite comme la vitesse, c'est la distance divisée par le temps, ils ne s'accorderont pas sur la vitesse de la lumière. Ce qui est opposé au postulat d'Einstein qui nous affirme que la lumière à la même vitesse dans tous les référentiels. La seule façon de résoudre cette difficulté c'est de ne pas être d'accord sur la durée écoulée. En d'autres termes, la Relativité met fin au concept de temps absolu. L'intervalle de temps entre deux éclairs pour les voyageurs n'a pas la même durée que pour l'observateur au sol.

Chaque observateur possède donc, comme composante de son référentiel, sa propre mesure de temps, donnée par toute bonne horloge qu'il emporterait avec lui et des horloges identiques emportées par des observateurs ayant chacun leur référentiel, n'indiqueraient pas les mêmes résultats. Notre sens habituel du temps est choqué par cette conclusion et ce n'est pas fini.

Nous allons considérer maintenant un autre exemple des conséquences du postulat de la Relativité sur notre relation au temps. Nous revenons sur le quai d'une gare (6).

Un soir d'orage, la foudre frappe soudain les deux extrémités d'un wagon qui entre en gare. Antoine, qui attend sur le quai, voit la foudre frapper en même temps l'avant et l'arrière du wagon. Il sait qu'il a fallu une fraction de seconde pour que la lumière des éclairs lui parvienne, mais comme il était placé au coup de foudre exactement à la même distance des deux extrémités du wagon, ce délai a été le même pour les deux éclairs et il en conclut qu'ils ont frappé le wagon précisément au même instant. François, assis au milieu du wagon a eu très peur. L'émotion passée, il revit les événements. Il a vu la foudre frapper l'avant du wagon avant l'arrière. C'est conforme au fait que les lois de la physique s'appliquent à son "référentiel train", en effet puisque le mouvement du train le propulse vers l'avant, il va à la rencontre de la lumière qui a frappé l'avant, alors que la lumière de l'éclair qui a frappé l'arrière doit le rattraper. Il y a donc une toute petite fraction de différence. Nicolas, qui se trouvait dans un train allant en sens inverse de celui de François, a été témoin également de cet incident. Il se trouvait, à l'instant fatidique, également à égale distance des deux extrémités du wagon. Pour lui, la foudre a frappé l'arrière du wagon d'abord et l'avant après, ce qui s'explique par un raisonnement symétrique à celui appliqué à François. Qui a raison ? Einstein dit que tout le monde a raison. La perte de la rigidité du temps, de ce fameux temps absolu, entraîne la disparition des concepts de simultanéité, de passé, de présent et de futur universels. Pour Antoine la foudre a frappé en même temps les deux extrémités du wagon. Mais le "même temps" d'Antoine n'est pas le même temps que celui de François ou de Nicolas qui sont en mouvement. Alors qu'Antoine, s'il définit l'instant où la foudre frappe l'avant du wagon comme son "présent", voit l'arrière du wagon frapper dans le même "présent", François, lui, voit l'arrière frapper plus tard, c'est-à-dire dans le "futur" d'Antoine. Nicolas, par contre, voit la foudre frapper l'arrière du wagon plus tôt donc dans le "passé" d'Antoine.

On voit, sur cet exemple, que le mouvement dicte la séquence : passé, présent, futur. Il n'y a plus de présent universel. Le simple fait d'admettre la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels en mouvement les uns par rapport aux autres conduit à un bouleversement complet de la notion de temps. La vitesse de la lumière étant extrêmement grande par rapport à toutes les vitesses de nos déplacements terrestres, ce phénomène est inobservable dans notre vie courante. Pour le rendre sensible, prenons un exemple imaginaire classique "le voyageur de Langevin" (7) sur lequel nous allons revenir par la suite. Il est dans un vaisseau spatial filant à toute vitesse dans l'espace. En consultant la montre et le calendrier du bord il se pose la question : Que se passe-t-il maintenant sur Terre ? Sur "Terre", un observateur se pose la même question par rapport à lui en consultant également montre et calendrier et ceci à la même date. Et bien, les deux "maintenant" seront différents et cette différence est d'autant plus grande que les vitesses relatives sont plus élevées. Si le voyageur de Langevin est dans un avion, la différence des deux maintenant est négligeable. Par contre pour des "quasars" qui sont des objets lumineux aux confins de l'univers, s'éloignant à plus de 90 % de la vitesse de la lumière, l'écart des maintenant est considérable.

Revenons au voyageur de Langevin. Admettons que ce voyageur ait un jumeau. Appelons “le Terrien” celui qui restera sur Terre et “le Voyageur”, l’aventurier qui part dans une puissante fusée qui le propulse à 87 % de la vitesse de la lumière dans l’espace (hypothèse irréalisable pratiquement, c’est une expérience de pensée, comme les aimait d’ailleurs beaucoup Einstein). Avant le départ de la fusée, les montres sont parfaitement synchronisées. “le Voyageur” part le 1er janvier 1998. Dix ans plus tard, il décidera de rentrer. Quand il va se poser sur Terre, son calendrier de bord indiquera 1er janvier 2008. Il va voir “le Terrien”, regarde le calendrier de la maison. Celui-ci indique 1er janvier 2018. “Le Terrien” a vieilli de 20 ans alors que “le Voyageur” n’a que 10 ans de plus. La différence d’âge est réelle. “Le Terrien” a plus de rides et de cheveux blancs que son jumeau. Certains pourraient penser qu’Einstein nous a donné une “fontaine de Jouvence”. Cette fontaine ne rajeunit pas mais ralentirait le passage qui reste inexorable du temps. Pour vieillir moins rapidement, il faudrait aller vite. C’est vrai et faux. C’est vrai, en ce sens que “le Voyageur” lorsqu’il revoit “le Terrien” a beaucoup moins vieilli physiologiquement que lui. Mais c’est faux, car en aucun cas, il n’augmentera sa durée de vie, celle pour laquelle son organisme était programmé. Il ne vivra pas plus longtemps.

Pendant son voyage qui pour lui a duré 10 ans, il aura fait ce qu’il pouvait faire en 10 ans et non en 20 ans, il aura vraiment vécu 10 ans. Son cœur aura battu ce qu’il doit battre en 10 ans. Quand il revient sur Terre, il a effectivement 10 ans de moins que “le Terrien” dans le temps terrestre, mais celui-ci a vraiment vécu deux fois plus que lui, il a vécu 20 ans avec toute la richesse de vie que cette durée a pu lui apporter. Si les deux jumeaux étaient programmés pour avoir une même longévité, “le Voyageur” mourra 10 ans après “le Terrien” mais ils auront en tout la même durée de vie. Ce décalage mis en évidence est dû au fait que “le Voyageur” est revenu terminer sa vie dans le repère terrestre, celui du “Terrien”. On peut comparer, comme certains l’ont fait, les 10 ans de décalage dû au changement de repère temporel comme une hibernation du “voyageur” (toute sa physiologie se serait arrêtée durant 10 ans). Ou, encore, ce qui est beaucoup plus correct, comprendre que “le Voyageur” est parti avec son échelle de temps, que celle-ci, quand il revient est en décalage avec celle du “Terrien”. Ensuite, puisqu’il n’y a plus de déplacement relatif entre eux, leurs deux échelles de temps redeviennent synchronisées.

En somme, en terme de science fiction, la Relativité ne permet pas d’approcher de la vie éternelle, elle se rapprocherait plutôt du voyage dans le futur mais pas dans son propre futur, “le Voyageur” ne saura jamais ce qui l’attendra ultérieurement lui-même. S’il peut aller dans le futur du “Terrien” son frère sédentaire, il ne pourra pas en revenir pour lui décrire par avance son avenir. Einstein ne nous permet pas de jouer à la “voyante”. En tout cas, Einstein ne nous permet absolument ni d’approcher du mythe de la vie éternelle, ni de la fontaine de jouvence.

Si vous voulez tenter ce voyage, malgré tout, ce sera très difficile. Avec les vitesses qui sont les nôtres, le ralentissement du temps est ridiculement faible. Si vous passez 50 ans à courir, vous n’aurez gagné qu’un cent millionième de seconde par rapport aux paresseux qui restent assis. Cet effort n’est pas payé du moins sous cet aspect. Je pense que vous gagnerez beaucoup plus en réelle durée de vie, cette fois, du fait des bienfaits de ce jogging sur votre système cardio-vasculaire que grâce à la Relativité. Si au lieu de faire du jogging, vous passez votre vie en avion, vous ne gagnerez pratiquement rien non plus. Les vitesses de notre vie quotidienne sont

tellement infimes par rapport à celle de la lumière que nous vivons tous au même temps, en aucun cas la Relativité ne pourra être une excuse pour être en retard à un rendez-vous. Nous avons tous le même présent.

Des incrédules pourraient alors mettre en doute toutes les conséquences de la Relativité. Ils pourraient souhaiter que des expériences réelles, mesurables, soient conduites et non pas qu'on leur expose uniquement des réflexions sur un voyageur de Langevin totalement illusoire et désincarné. Et bien, c'est ce qui a été fait en octobre 1971. Une vérification spectaculaire du paradoxe des jumeaux a été réalisée. Des horloges atomiques au césium ont été placées à bord d'avions à réaction et envoyées autour du monde, les unes vers l'ouest, les autres vers l'est. Leurs états ont été comparés à ceux d'horloges de référence restées à Washington à l'Observatoire Naval. Au total, le résultat mesuré a été parfaitement conforme à la théorie, aux erreurs expérimentales près. Les horloges volant vers l'ouest ainsi que celles volant vers l'est ont subi par rapport à celles restées au sol des décalages pour un tour du monde conformes à ce que l'on pouvait attendre d'après la théorie de la Relativité. L'explication relativiste correcte de cette expérience fait d'ailleurs intervenir la Relativité générale. En particulier la courbure de la trajectoire d'espace-temps de l'horloge liée à la Terre est moins forte que celle de l'horloge volant vers l'ouest et plus forte que celle de l'horloge volant vers l'est. Cette expérience a été totalement concluante. Il est logique d'admettre que les voyageurs accompagnant les horloges ont subi les mêmes vieillissements. Nous retrouvons bien là le paradoxe des jumeaux et cette fois vérifié dans le réel.

D'une manière plus générale, nous pouvons dire que la Relativité est une des théories physiques les mieux établies. Cette dilatation du temps a été vérifiée maintes fois, en particulier dans les accélérateurs de particules élémentaires : celles-ci vivent beaucoup plus longtemps pour l'observateur quand elles sont accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière.

La théorie de la Relativité ne se contente pas de perturber le temps, elle perturbe également profondément notre conception de l'espace. En effet, Einstein a montré qu'il fallait admettre que le temps n'est ni complètement séparé ni indépendant de l'espace mais qu'il est couplé à lui au sein de ce que l'on appelle l'espace-temps. En effet, la dilatation du temps s'accompagne nécessairement d'une contraction de l'espace. Jim, resté à Terre, ne verra pas seulement le temps de son jumeau se dilater, il verra également l'espace de celui-ci se rétrécir. C'est la même quantité qui allonge le temps et comprime l'espace. Si Jules parcourt l'espace à 87 % de la vitesse de la lumière, Jim vieillit deux fois plus vite mais voit un vaisseau spatial et un Jules réduits de moitié. L'espace qui se rétrécit se transforme en un temps qui s'allonge. C'est une règle générale Le taux de conversion est d'ailleurs fourni par la Relativité. Il est identique pour le temps et l'espace. Si les durées sont allongées dans un certain rapport, les longueurs sont rétrécies dans le même rapport.

Ces conceptions étaient si nouvelles qu'il a fallu des années pour que la Relativité soit universellement acceptée. Le caractère révolutionnaire de cette théorie a d'ailleurs nécessité de la part d'Einstein une confiance absolue dans son propre raisonnement pour en assumer toutes les conséquences, y compris celles qui paraissent les plus extravagantes.

IV – L'univers de la Relativité générale

La Relativité restreinte dont nous venons de parler, qui parvient à expliquer ce qui se produit lorsque des corps se déplacent à des vitesses proches de la vitesse de la lumière demeurerait incompatible avec la théorie de Newton sur la gravitation. En effet, Newton avait montré que les corps s'attirent les uns les autres selon une force qui dépend de la distance qui les sépare à l'instant considéré. Ce qui signifie que si l'on déplace un corps, la force exercée sur les autres sera immédiatement modifiée. Par exemple, si le Soleil disparaissait d'un coup, il faudrait 8 minutes avant que la Terre ne sombre dans l'obscurité (temps que la lumière du Soleil met pour nous parvenir) mais la loi de Newton nous dit que la Terre cesserait immédiatement de subir l'attraction du Soleil et sortirait de son orbite. L'effet gravitationnel de la disparition du Soleil nous aurait donc atteint à une vitesse infinie et non à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière, ce qui est incompatible avec ce que voulait la Relativité restreinte. Il y avait donc incompatibilité entre cette dernière et la théorie de la gravitation de Newton. Einstein a cherché à résoudre cette incompatibilité en vain.

Devant son échec, il a proposé une théorie plus révolutionnaire encore en 1915, que l'on a appelée la Relativité générale. Théorie dont je ne dirai rien ici, sinon que la gravitation n'est pas considérée comme une force comparable aux autres. La présence de matière donc de masses donc de forces gravitationnelles déformerait l'espace, ce qui donne une spécificité très particulière à la gravitation. Par exemple, si le soleil disparaissait brutalement, il s'ensuivrait une déformation de l'espace qui se propagerait à la vitesse de la lumière. Donc la Terre sombrerait dans l'obscurité en même temps qu'elle sortirait de son orbite, contrairement à ce que pensait Newton.

Nous avons vu que la vitesse déforme le temps et l'espace, nous voyons maintenant que la gravité le fait également. La Relativité générale dit que le temps s'écoule plus lentement en présence d'un champ gravitationnel et cela d'autant plus que le champ est plus fort. Cette prédiction a été vérifiée en 1962 à l'aide de deux horloges très précises installées respectivement au sommet et au pied d'un château d'eau. On constata que l'horloge du bas, plus proche de la Terre donc placée dans un champ gravitationnel plus intense, avançait plus lentement, en parfaite concordance avec la Relativité générale. La différence est infime mais mesurable. Et depuis l'avènement des systèmes de navigation d'une grande précision (G.P.S., bientôt Galiléo), fondés sur des signaux émis par des satellites, cette différence de vitesse des horloges à différentes altitudes est d'une importance considérable. Si l'on n'en tenait pas compte, on aboutirait à des erreurs de plusieurs kilomètres sur les positionnements. En outre, à partir de 1960 et de manière toujours plus précise jusqu'à nos jours, la Relativité a connu d'impressionnantes confirmations expérimentales, rendues possibles par la conquête de l'espace. L'espace est, en effet, le lieu des grandes vitesses et des masses importantes. Il est donc le champ d'application privilégié de la Relativité, tant restreinte que générale. Ce qui n'est pas le cas, bien sûr, de notre environnement habituel. Il faut indiquer qu'Einstein, lui-même, a démontré

que la physique classique était une première approximation de la Relativité tout à fait utilisable dans notre univers quotidien. Nous pouvons donc être rassurés et continuer à vivre avec nos schémas de pensée classiques dans la vie courante.

V – Quelques remarques

Arrivé à ce stade, je me tournerai vers les philosophes et leur demanderai si ce que nous venons de voir ne conforterait pas la vision de Kant sur le temps et l'espace. Pour lui, si je l'ai bien compris, l'espace et le temps ressentis (c'est-à-dire un espace à 3 dimensions, un temps irréversible, invariable par rapport à l'espace et identique pour tous les observateurs) seraient des constructions inhérentes à notre esprit. Elles constitueraient le seul cadre dans lequel nous puissions percevoir et concevoir l'univers extérieur. Or Einstein nous montre que le monde des phénomènes que nous appréhendons ne peut s'interpréter en conservant ces cadres simplistes qu'exige notre esprit. A fortiori donc, ces "données immédiates de notre conscience" pour reprendre une expression de Bergson que sont le temps et l'espace de notre sens commun ne représentent qu'une vision subjective, à la mesure de l'esprit humain, du réel. Le temps et l'espace de la Relativité ne sont vraisemblablement, à leur tour, qu'une approche plus riche de ce qui dans le monde "réel" correspond à ces notions. Elles n'ont nullement la prétention de correspondre au "réel" lui-même mais elles en sont probablement une meilleure approche.

Cette idée que le temps et l'espace de la Relativité seraient une meilleure approche du réel a été combattue notamment par Bergson dans son livre de 1922 "durée et simultanéité", beaucoup critiqué. Il faut admettre que ce n'est pas par ses réflexions sur la Relativité que ce grand philosophe a le mieux exprimé sa puissance de réflexion, en particulier son argumentation ne manque pas parfois d'étonner, notamment lorsqu'il écrit : "le repos absolu, chassé par l'entendement, est rétabli par l'imagination" ou bien "les temps de la Relativité restreinte sont définis de manière à être tous, sauf un seul, des temps où l'on n'est pas" ou encore "la pluralité des temps de la Relativité restreinte est invérifiable en droit". On peut d'ailleurs se demander ce que vient faire une vérification en droit, là où l'on doit simplement demander que la vérification soit assurée par l'expérience. Lors d'une séance animée à la Société Française de Philosophie en avril 1922, un vif débat a précisément opposé Bergson et Einstein sur la question du temps absolu. Ce dernier a clos le dialogue comme suit : "Il n'y a donc pas un temps des philosophes ; il n'y a qu'un temps psychologique, différent du temps du physicien". Sans doute Einstein, volontairement ou non, était-il légèrement provocateur en utilisant le terme "psychologique" pour qualifier le temps conceptualisé par les philosophes, il forçait le trait pour indiquer que d'un point de vue scientifique il n'y a pas de temps absolu.

A aucun moment, d'ailleurs, Einstein jusqu'en 1925 n'a prétendu faire de la métaphysique, il est strictement resté dans le domaine de la théorie physique. C'est seulement par la suite et dans le domaine de la Physique quantique qu'il aura une approche métaphysique qui le conduira à la phrase célèbre : "Dieu ne joue pas aux dés". Cette fois-ci d'ailleurs c'est lui qui aura tort.

J'insisterai, quelque peu, pour terminer, à la suite de Trinh Xuan Thuan sur la notion d'écoulement du temps, à la lumière de la Relativité. Nous nous représentons le temps comme l'eau d'une rivière qui coule, éloignant les flots du passé et

apportant les vagues du futur. Nous accordons au temps une analogie spatiale et c'est cette projection du temps dans l'espace qui nous donne la sensation du passé, du présent et du futur. Cette distinction entre passé, présent, futur règle notre vie, mais pour nous, seul le présent existe "maintenant". Lui seul a une réalité palpable. Pourtant cette notion de passage du temps, de son mouvement, s'adapte mal au langage de la Relativité. Cette sensation que seul le présent existe, que lui seul est réel, est difficilement compatible avec la destruction du temps rigide et universel. Le passé et le futur doivent être aussi réels que le présent puisque nous avons vu, avec Einstein, que le présent d'une personne peut être le passé d'une autre et le futur d'une troisième. Donc le passé, le présent, le futur sont des distinctions qui n'ont plus de valeur absolue mais seulement relative par rapport à un observateur situé dans un référentiel donné (8). Le temps pourrait être représenté par une ligne droite. Les présents des divers observateurs se situeraient en des points différents, c'est à dire en des états différents du monde, notre conscience introduisant les notions de passé, présent, futur. Cette idée de visualiser les divers présents par des points sur une droite permet de montrer leur décalage mais a un inconvénient. Il ne faudrait pas que cette représentation laisse penser que la chronologie des événements est établie de manière absolue. On peut dire que: pour tel observateur, tel incident intervient avant tel autre, mais pour un autre observateur, la chronologie sera différente. Nous l'avons d'ailleurs montré, plus haut, avec l'exemple des deux éclairs vus par trois observateurs en déplacement relatif. Cette chronologie variable pose des questions délicates sur ce qui est cause et ce qui est conséquence dans l'étude des événements. C'est encore là un problème soulevé par la Relativité et non des moindres qui bouscule notre "bon sens". Nous voyons donc qu'à la fois les notions de durée, de simultanéité et de chronologie sont remises en cause par la Relativité. Cela donne quelque peu le vertige.

Je terminerai ces quelques remarques par une citation de Gaston Bachelard, extraite de "l'intuition de l'instant", qui rétablit le seul nouvel absolu possible après la Relativité : "Ce que la pensée d'Einstein frappe de Relativité, c'est le laps de temps, c'est la "longueur" du temps. [...] La Relativité du laps de temps pour des systèmes en mouvement est désormais une donnée scientifique. [...] Mais voici maintenant ce qui mérite d'être remarqué : l'instant, bien précisé, reste, dans la doctrine d'Einstein, un absolu. Pour lui donner cette valeur d'absolu, il suffit de considérer l'instant dans son état synthétique, comme un point de l'espace-temps. Autrement dit, il faut prendre le présent comme une synthèse appuyée à la fois sur l'espace et le temps". Bachelard a bien exprimé dans ce texte que la Relativité impose de penser le présent comme irréductiblement local et pluriel. Local, bien sûr, puisqu'il dépend de la localisation de l'observateur et pluriel puisqu'il y aura autant de présents différents que d'observateurs en déplacement relatif. Mais chaque observateur n'aura qu'un présent bien défini et qu'il ne vivra qu'une fois. C'est là le bouleversement essentiel pour notre esprit concernant l'espace et le temps.

VI – Conclusion

La Physique classique espérait atteindre une vision cohérente, que notre esprit pourrait se représenter, de la réalité du monde. Avec la physique du XX^{ème} siècle (Relativité, Physique quantique), la question se pose différemment. Celle-ci prédit les résultats des expériences mais peut-elle atteindre le réel lui-même ou est-elle

condamnée à n'en saisir qu'un aspect limité ? Et quand bien même atteindrait elle le réel, notre esprit incapable de "voir" un espace et un temps qui s'interpénètrent ne pourrait que manipuler des abstractions mathématiques. Peut-être finalement est-ce cela l'essence du réel pour l'homme. Un réel que nous ne pouvons atteindre en soi mais que nous appréhendons en le construisant au moyen d'approches de plus en plus sophistiquées. Y-a-t-il d'ailleurs un réel en soi ou n'y a-t-il que des réels construits par l'homme correspondants à des visions à des époques données. Ce qui signifie évidemment la fin du dogmatisme scientifique. La physique du XX^{ème} siècle l'a tué. Mais les physiciens ne désarment jamais. Après la Relativité et la Physique quantique, c'est vers l'unification de ces deux théories que les travaux se sont orientés. Einstein le premier s'est lancé dans cette voie, sans succès. D'autres suivent, des idées apparaissent, aucune n'a encore abouti.

Stephen Hawking a pu écrire dans ce sens "La Relativité générale est une théorie splendide, en accord avec toutes les observations réalisées à présent. Il se peut qu'elle doive être modifiée dans l'infiniment petit, qu'elle ne soit qu'une approximation dans un certain domaine d'une théorie plus fondamentale, la théorie des cordes, par exemple". L'avenir de la physique, on le voit, est largement ouvert mais ce qui est certain c'est que l'espace et le temps de notre "sens commun" ne permettent plus d'expliquer le monde qui nous entoure et ne constituent a fortiori en aucun cas sa réalité. J'espère avoir pu vous en persuader. Je laisse le soin aux métaphysiciens de prolonger cette réflexion.

NOTES

- (1) Trinh Xuan Thuan : La mélodie secrète
- (2) Stephen Hawking : Une belle histoire du temps
- (3) La combinaison de cette deuxième loi et de la loi de la gravitation, due également à Newton, permet de comprendre pourquoi tous les corps tombent à la même vitesse dans le vide.
- (4) En fait, Michelson et Morley mirent au point une expérience qui comparait la vitesse de la lumière dans la direction du mouvement de la terre à travers l'éther à celle mesurée dans la direction perpendiculaire à ce mouvement.
- (5) Nom donné à cette théorie. La présentation donnée ici est reprise de Stephen Hawking.
- (6) Cet exemple est emprunté à Trinh Xuan Thuan
- (7) Ce nom a été donné car ce raisonnement est précisément dû au physicien français Paul Langevin en 1911.
- (8) Un physicien, Etienne Klein, écrit dans "Conversation avec le Sphinx" en 1995, "Continuer à considérer que seuls les évènements présents existent obligerait à penser que des évènements lointains, certes, mais actuels, et donc existants, n'existent plus ou pas encore, pour quelqu'un d'autre en déplacement par rapport à nous. Que devient dans ce contexte le statut propre du temps ?"