

Communication de Monsieur Claude Kevers-Pascalis



Séance du 3 février 2006



La théorie de la relativité

Puisque la parution annuelle des «Mémoires» de notre Académie est l'un des moyens par lesquels nous réalisons le souhait de notre fondateur de compter parmi les acteurs de la promotion de la culture, sous tous ses aspects, il est conforme à notre vocation de faire en sorte que la «Théorie de la Relativité» ne soit pas absente de nos «Mémoires» de l'exercice 2005/2006, puisque l'année 2005 a marqué le centième anniversaire de la naissance de cette théorie. Il faut aussi rappeler que notre ancien confrère Henri Poincaré prit une part des plus actives à son élaboration.

Telle est la raison de la communication d'aujourd'hui, qui a été préparée dans un double but.

Le premier est de présenter en quoi consiste cette théorie. Pour quelle raison ? Parce que, nos «Mémoires» étant destinés à être lus, nous nous devons de fournir un éclairage sur les conclusions d'Einstein à des lecteurs exerçant ou ayant exercé d'autres disciplines que les disciplines scientifiques, ou ayant exercé des disciplines scientifiques ne faisant pas appel à ces conclusions, mais qui souhaiteraient obtenir cet éclairage, même si cela ne doit être que d'une manière modeste. Certes, les écrits sur la Théorie de la Relativité ne manquent pas, mais sa réputation de théorie extrêmement savante a pour effet d'effaroucher bien des gens, qui sont convaincus à priori, souvent à tort, qu'une initiation, même très partielle, est hors de leur portée. Or, s'il est vrai que la pensée d'Einstein appartient à un domaine scientifique de haut niveau et qu'elle débouche sur des conclusions qui s'écartent largement de ce que nous appelons le «sens

commun», il n'en est pas moins vrai que ce n'est pas une tâche insurmontable que de s'efforcer de présenter les démarches intellectuelles qui y conduisent, en des termes aussi simples et clairs que possible, susceptibles de satisfaire une légitime curiosité.

Einstein lui-même s'y est essayé, dès 1916, dans un ouvrage qui commence ainsi (je cite) : *«Ce petit livre a pour but de faire connaître, d'une manière aussi exacte que possible, la Théorie de la Relativité à ceux qui s'intéressent à elle, ... mais qui ne possèdent pas l'appareil mathématique de la physique théorique»*. Pourtant, malgré cette déclaration d'intention, il suffit de parcourir rapidement le livre pour se rendre compte qu'il s'y trouve des passages susceptibles de décourager un certain nombre de lecteurs.

En revanche, six ans plus tard, en 1922, a été publié un livre intitulé *«Initiation à la Théorie d'Einstein»*, écrit par le mathématicien français Gaston Moch, un polytechnicien, qui présente l'essentiel des cheminements de la pensée qui aboutissent aux conclusions relativistes, dans un langage qui n'a rien d'ésotérique et sans s'embarrasser de formules rébarbatives. Il faut citer aussi le grand physicien d'origine russe Georges Gamow, de l'Université de Washington, pour ses ouvrages de vulgarisation, ainsi que les écrits de l'astrophysicien Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge.

C'est en m'inspirant de ces lectures, et de quelques autres, que j'ai préparé l'exposé d'aujourd'hui, qui, je m'empresse de le dire, n'a nullement la prétention d'apprendre quoi que ce soit à certains de nos confrères scientifiques ici présents.

Quand j'ai annoncé tout à l'heure que le but de cette communication était double, c'est parce que la présentation de la théorie de la relativité ne peut que déboucher sur la constatation du caractère étrange de notre univers, étrangeté qui apparaît aussi à travers bien d'autres théories scientifiques élaborées dès le début du XX^{ème} siècle, en particulier la théorie des quanta.

En ce qui concerne plus particulièrement certains aspects de la théorie de la relativité, voici comment s'exprime Georges Gamow : *«Dès notre naissance, nous nous habituons au monde extérieur tel que le perçoivent nos cinq sens, ... et les notions fondamentales d'espace, de temps et de mouvement nous deviennent bientôt si familières, que nous sommes portés à croire que la conception du monde extérieur qui en découle est la seule possible. Toutefois, les développements de la science moderne nous conduisent à la certitude que cette base classique s'effondre complètement quand on l'applique à la description détaillée de phénomènes inaccessibles à notre observation quotidienne ... et qu'il est absolument nécessaire de **changer nos notions fondamentales d'espace, de temps et de mouvement**»*.

Quant à Gaston Moch, il exprime la même conclusion sous la forme suivante : «*Nous devons* », écrit-il, «*prendre notre parti d'une rupture avec le sens commun*».

(Avant d'entrer dans le vif du sujet, commençons, pour éviter tout malentendu, par préciser très rapidement ce que n'est pas la Théorie de la Relativité, comme d'ailleurs l'a fait Gaston Moch dans son ouvrage, où il déclare à juste titre que cela n'est pas sans importance, puisque le mot « relativité » est un mot du langage courant, dont l'emploi mal à propos risque de créer des confusions).

Ce que n'est pas la «théorie de la relativité»

C'est une vérité affreusement banale, que de dire que «tout est relatif», que «tout dépend du point de vue adopté», et, puisque nul homme n'est identique à un autre et que notre perception du monde est due à l'effet qu'il produit sur nos sens, beaucoup de nos connaissances ne sont que «relatives». Précisons donc immédiatement que, malgré cette «relativité» dont chacun de nous a conscience, **ce n'est pas là** que se situe la «Théorie de la Relativité». Elle ne se situe pas non plus, comme on pourrait le croire, dans le fait que l'exactitude des mesures que nous effectuons n'est que «relative», puisque leur précision dépend de la qualité des instruments dont nous usons, qualité qui est en constant progrès. Bien d'autres exemples pourraient être donnés, qui montrent que la «relativité» est partout, mais tous ces exemples **n'ont rien à voir avec la «Théorie» du même nom.**

Ce qu'est la «théorie de la relativité»

Pour fournir un premier éclairage sur le domaine où elle se situe, remarquons tout d'abord que, s'il est vrai que les qualités que nous attribuons aux idées ou aux choses varient selon l'observateur ou les circonstances de l'observation, il existe toutefois trois concepts fondamentaux auxquels tous les hommes ont toujours accordé un caractère **absolu** : ce sont «**l'espace**», «**le temps**» et «**la masse**».

Aussi croit-on exprimer une évidence en disant qu'une longueur **d'un mètre**, une durée **d'une heure**, une masse **d'un kilogramme**, apparaissent toujours comme étant **un mètre, une heure, un kilogramme**, quelles que soient les circonstances dans lesquelles on les mesure, et ce que nous appelons le «bon sens» nous dit qu'il serait impossible d'énoncer des lois physiques s'il n'en était pas ainsi.

Or la Théorie de la Relativité nous enseigne le contraire, à savoir que la **longueur**, la **durée** et la **masse** sont des notions **relatives** : elles dépendent de

l'état de mouvement de l'opérateur par rapport à l'objet de la mesure.

C'est **déroutant**, mais **c'est ainsi** !

En ce qui concerne la relativité des longueurs et des durées, Stephen Hawking, qui est l'un des plus grands astrophysiciens de notre époque, illustre cette conclusion en prenant l'exemple d'un vaisseau spatial qui passerait devant la terre à très grande vitesse et à l'intérieur duquel (je cite) « *une impulsion lumineuse émise à un bout de la cabine serait réfléchi à l'autre bout, cette lumière étant observée à la fois depuis la terre et à bord du vaisseau* ». Eh bien, écrit-il, « *en raison du mouvement du vaisseau, les observateurs ne seront d'accord ni sur la distance que la lumière aura franchie, ni sur la durée de ce trajet lumineux* ».

Je m'empresse d'ajouter que cette relativité des distances et des durées, ainsi que la relativité des masses, ne constituent que trois des facettes de la théorie, dont les autres seront présentées à leur tour.

Précisons aussi que, puisque, selon cette théorie, une longueur, une durée et une masse dépendent d'un état de mouvement, leur mesure dans divers états de mouvement fait apparaître des écarts, mais ces écarts sont absolument imperceptibles dans les conditions où se déroule notre vie courante. En revanche, ils deviennent tout à fait perceptibles et significatifs au point de ne pouvoir être négligés, quand les investigations des hommes de science portent sur des événements qui font intervenir des distances considérables, comme en astronomie, ou quand interviennent des vitesse extrêmes, par exemple celles de particules élémentaires se déplaçant à des vitesses voisines de celle de la lumière. Dans ces disciplines, l'intervention des raisonnements et des calculs résultant de la théorie de la relativité sont obligatoires pour expliquer comment les choses se déroulent, et, bien que ces raisonnements et ces calculs s'appliquent à des domaines aussi éloignés de nos préoccupations quotidiennes, cela nous concerne de plus près que ce que certains pourraient croire, puisque, par exemple, les découvertes concernant la structure intime de la matière ont abouti à la libération et à la domestication de l'énergie nucléaire, ce qui touche chacun de nous de la façon la plus concrète qui soit.

Bien entendu, la mise en évidence du caractère non absolu des concepts d'espace, de temps et de masse, qui était en contradiction totale avec le simple « bon sens », souleva bien des doutes et des protestations : elle constituait en effet une révolution mentale comparable à la révolution de Copernic, qui avait retiré au concept de « verticale » son caractère absolu pour lui substituer un caractère relatif, mais elle fut néanmoins le point de départ d'un véritable bouleversement de la pensée scientifique, en faisant apparaître **les lois de Galilée et de Newton** (considérées jusqu'alors comme des fondements incontestables de la science) comme **de simples cas particuliers de lois plus générales**.

Einstein mit des années à faire de la théorie de la relativité un ensemble complet, énonçant successivement deux théories : la première, celle de 1905, fut appelée «*Relativité particulière*» avant de prendre le nom de «**Relativité restreinte**», puis la seconde, achevée en 1916, prit le nom de «**Relativité Générale**». Il faut ici rappeler qu'au nom d'Einstein doit être associé celui d'Henri Poincaré, ainsi que celui du physicien néerlandais Lorentz, dont le nom a été donné aux formules mathématiques qui expriment la relativité du temps, de l'espace et de la masse, ce qui, d'ailleurs, suscite quelques débats sur la paternité de la théorie, mais je n'insiste pas sur ce point, car il est étranger à l'objet proprement dit de cet exposé.

La «relativité restreinte»

Puisque la nouvelle conception du monde affirme le caractère relatif de tout espace et toute durée sous l'effet d'un mouvement, il est bien légitime de se demander par quel **cheminement de pensée** et sur quelles **bases expérimentales** il a été possible d'aboutir à une conclusion aussi **étonnante**, aussi peu conforme à ce que nous appelons le sens commun

Eh bien, on peut donner une réponse à cette question à partir d'un exemple simple sur lequel s'appuient à la fois Gaston Moch et Georges Gamow : c'est l'exemple d'un observateur immobile à côté d'une voie de chemin de fer, qui regarde passer devant lui un train se déplaçant en ligne droite à une vitesse constante de, par exemple, 100 kms à l'heure, train dans le couloir duquel un voyageur se déplace à une vitesse qui, mesurée par rapport aux parois du couloir, est de, par exemple, 4 kms à l'heure.

Avant d'aller plus loin dans cet exemple, j'ouvre une parenthèse afin d'apporter une précision qui sera nécessaire pour exprimer de façon rigoureuse ce qui va se passer quand nous ferons intervenir d'autres mobiles que le voyageur, se déplaçant, eux aussi, dans le couloir du train. Cette parenthèse concerne une loi due à Galilée, qui s'exprime ainsi : «*Dans un système à l'état de mouvement uniforme*» (c'est à dire rectiligne et à vitesse constante), «*toute force imprime à un corps le même mouvement que si le système était à l'arrêt*». Tout voyageur peut le constater : si un train circule en ligne droite et à vitesse constante, tout ce qu'on y ressent et tout ce qui s'y passe est identique à ce qu'on y ressentirait et à ce qui s'y passerait si le train était à l'arrêt, de telle sorte que, si un voyageur se promène dans le couloir du train, sa vitesse et l'effort qu'il a à faire pour se déplacer ne sont nullement affectés par la vitesse de son train. Bien que ce soit une évidence puisque chacun peut en faire l'expérience, il fallait exprimer clairement cette évidence, car elle va intervenir dans la suite de cet exposé.

Cela étant dit, si nous voulons exprimer à quelle vitesse le voyageur du couloir du train se déplace par rapport à l'observateur immobile à côté de la voie, nous devons tenir compte du fait que ce voyageur va, par rapport à la voie, plus vite que son train : la vitesse de sa marche, sa vitesse propre, s'ajoute à celle du train, ce qui est conforme à une autre loi due à Galilée, qui est la loi d'addition des vitesses. Il en résulte que l'observateur immobile verra le voyageur du train se déplacer, par rapport à lui, à une vitesse de $100 + 4 = 104$ kms/h, ce qui constitue une évidence, si nous en croyons ce que nous appelons notre «bon sens»,

Eh bien, nous allons voir que cette **évidence** n'est qu'**apparente**, car elle va nous conduire vers des conclusions qui, **au lieu d'être évidentes**, vont au contraire **être tout à fait surprenantes** !

La loi de composition des vitesses prise en défaut .

En effet, poursuivons notre exemple.

S'il est légitime d'appliquer la loi d'addition des vitesses au voyageur qui circule dans le couloir de son train, rien ne s'oppose a priori à ce qu'on puisse l'appliquer à tout autre mobile : par exemple une balle de fusil projetée à 1 000 mètres par seconde, c'est à dire 3 600 kms./h. Dans ce cas, la loi de Galilée d'addition des vitesses nous autorise à dire que, par rapport à l'observateur immobile à côté de la voie, la balle du fusil est projetée à une vitesse qui est le total de la vitesse du train et de la vitesse de la balle à l'intérieur du train, qui est la même que s'il était à l'arrêt, conformément à l'autre loi de Galilée qui a fait l'objet de la parenthèse que j'ai ouverte il y a un instant. Nous pouvons donc déclarer que la balle du fusil se déplace, par rapport à l'observateur immobile, à une vitesse de $100 + 3\,600 = 3\,700$ kms/h.

Mais pourquoi nous arrêter là ? Rien, pour l'instant, ne semble s'opposer à répondre de la même façon si nous remplaçons notre train par un vaisseau spatial circulant à une vitesse considérable (comme l'a fait Stephen Hawking dans l'exemple cité tout à l'heure), et si nous choisissons (comme l'a fait Stephen Hawking), un grain de lumière, un «photon», comme mobile se déplaçant dans le vaisseau. Nous nous sentons donc autorisés à dire (comme dans le cas du train et du voyageur ou de la balle de fusil), que le grain de lumière circule, par rapport à un observateur terrestre immobile, à une vitesse qui est la somme de celle du vaisseau spatial et de la vitesse du photon à l'intérieur du vaisseau, vitesse qui, rappelons-le, est la même que si le vaisseau était à l'arrêt, c'est à dire, comme chacun sait, 300 000 kms / sec. L'addition de ces deux vitesses fournit donc un total supérieur à la vitesse de la lumière.

Or, malgré le caractère jugé légitime depuis Galilée, de l'addition des vitesses, ce qui vient d'être déclaré **est absolument faux**, car il a été démontré grâce à une expérience fameuse du physicien Michelson en 1887, que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions **quelle que soit la vitesse de sa source, avec laquelle elle ne s'additionne jamais** : elle constitue une **vitesse limite** qui, en aucun cas, **ne peut être dépassée**.

On constate donc que, quand le mobile considéré est un grain de lumière, la loi d'addition des vitesses, que nous croyions inattaquable, est **en contradiction** avec l'expérience de Michelson ! Que faut-il en conclure ?

Il faut en conclure, en toute logique, que, puisque le résultat fourni par l'addition des vitesses dans le cas d'un grain de lumière est faux, rien ne permet de supposer qu'il en soit autrement pour tout autre mobile circulant à l'intérieur du vaisseau spatial ou de notre train. Cela exige donc, si curieux que cela puisse paraître, que l'on retouche la règle suivant laquelle la résultante de deux vitesses de même direction et de même sens est égale à leur somme . Comment faire cette «retouche» ? Eh bien, puisque la valeur obtenue en additionnant deux vitesses est fausse par excès, leur résultante réelle ne peut être autre chose que leur somme affectée d'un coefficient réducteur : si on appelle «K» ce coefficient, la vitesse résultante de deux vitesses «V1» et «V2» n'est pas égale à «V1+V2», mais à «(V1+V2) x K», égalité dans laquelle «K» est inférieur à 1.

Ajoutons que le coefficient réducteur K intervient de manière d'autant plus importante que les deux vitesses à additionner sont plus grandes, comme le montre la valeur de ce coefficient en fonction de **V1** et de **V2** :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{V_1 \times V_2}{c^2}} \quad \text{(formule dans laquelle «c» = vitesse de la lumière)}$$

(formule empirique dite «transformation de Lorentz»)

Cette valeur montre que, si les deux vitesses sont faibles, on commet une erreur insignifiante quand on dit que leur résultante est égale à leur somme. En effet, puisque le carré de la vitesse de la lumière est gigantesque, le second terme du dénominateur de la fraction ci-dessus est pratiquement nul, donc le coefficient **K** est pratiquement égal à 1. En voici un exemple : si deux trains entrent en collision à la vitesse de 30 m/sec. (ce qui représente 108 kms/h.), leur vitesse de choc est inférieure à 60 m/sec mais l'écart n'est que de 10 millionnièmes de mms/sec. En revanche, aux très grandes vitesses, l'écart est considérable : deux vitesses de 200 000 kms/sec. donnent une résultante proche de 280 000, et deux vitesses de 300 000 kms/sec (vitesse de la lumière) ont une résultante de 300 000 kms/sec. C'est paradoxal, cela **échappe à notre entendement**, mais c'est ainsi.

Cela étant dit, voyons à présent quelle est la conséquence du fait que la résultante de deux vitesses est, pour un observateur extérieur au mouvement, inférieure à leur somme, car c'est cela qui va nous conduire vers **la relativité des longueurs et des temps**.

La contraction des longueurs et la dilatation des durées

Nous venons de voir que, pour connaître la résultante réelle de deux vitesses, il faut remplacer leur somme par une valeur inférieure, ce qui peut être fait en la multipliant par un coefficient réducteur. Mais nous pouvons aussi le faire en remplaçant l'un des deux termes de l'addition par une valeur plus faible. Or, dans notre exemple du voyageur qui circule dans le couloir d'un train, il n'y a aucune raison de remplacer la vitesse du train par une autre, car l'observateur immobile à côté de la voie peut en vérifier l'exactitude par rapport à lui-même, en chronométrant le temps qu'il faut à ce train pour parcourir la distance entre deux points de repère quelconques choisis dans son propre environnement. Et c'est pourquoi c'est **au mobile** qui se déplace **à l'intérieur** du train (le voyageur, la balle de fusil ou n'importe quoi d'autre) que l'observateur extérieur au train va **attribuer une vitesse moindre** que celle qui est mesurée par un autre observateur se trouvant, lui, à l'intérieur de ce train.

Or, qu'est-ce que c'est qu'une vitesse ? Comme chacun sait, c'est le rapport entre une longueur et une durée. Donc, s'il y a divergence de vue sur une vitesse, il y a divergence de vue sur une longueur ou sur une durée, ou sur les deux à la fois, et, puisque, dans notre exemple, il y a, à l'intérieur du train, aux yeux de l'observateur extérieur au train, une **vitesse moindre** que celle qui est mesurée à l'intérieur du train, il y a, aux yeux de l'observateur extérieur, **une diminution de la longueur parcourue** ou **un allongement de la durée du parcours**, ou **les deux à la fois**, ce que la Théorie de la Relativité exprime comme ceci : *«Quand deux observateurs ne sont pas dans le même état de mouvement par rapport à un phénomène, ils en évaluent différemment les éléments mesurables : longueurs et temps»*, ou encore, comme l'écrit Gaston Moch (je cite) : *«Quand un corps est en mouvement par rapport à un autre, les longueurs s'y trouvent contractées et les durées y sont allongées»*.

Ainsi, comme cela a été dit dès le début des cet exposé, les longueurs et les durées sont des notions relatives : elles dépendent de **l'état de mouvement de l'objet de la mesure, par rapport à l'opérateur qui effectue cette mesure**, ou encore de l'état de mouvement du second par rapport au premier, ce qui revient au même, car tout mouvement est «relatif».

(Remarquons que, pour celui qui se trouve à l'intérieur du système en mouvement, il est impossible de vérifier cette assertion. En effet, considérons

par exemple la contraction des longueurs : puisque tous les objets y subissent le même sort, le mètre employé pour effectuer des mesures se trouve contracté dans la même proportion, de telle sorte qu'aucune mesure ne peut révéler une variation de longueur).

Malgré le caractère déroutant de tous ce qui précède, il ne s'agit nullement de «vues de l'esprit». A propos, par exemple, de la **dilatation des durées**, voici ce qu'écrivit le très grand savant Stephenb Hawking dans un de ses ouvrages : «*De nombreux exemples le confirment : par exemple, des horloges de précision embarquées à bord d'avions volant dans des directions opposées mesurent des temps différents*». Pratiquement, considérons deux avions qui partent du même point pour faire le tour de la terre en sens inverse l'un de l'autre et dans lesquels deux voyageurs ont réglé leurs montres au départ l'une sur l'autre avec la plus grande précision : quand les deux avions se croisent après avoir fait chacun la moitié de leur parcours en volant à la même vitesse, les deux montres devraient coïncider comme au départ, puisque les voyageurs ont parcouru la même distance. Eh bien non : l'une avance et l'autre retarde, et cela peut être constaté si l'on dispose d'un instrument de mesure du temps suffisamment précis ! Voici d'ailleurs, les phrases écrites par Stephen Hawking dans son livre très exactement reproduites ici mot pour mot :

«L'horloge embarquée à bord de l'avion volant vers l'ouest enregistre un temps différents de celui qu'enregistre l'horloge placée dans l'autre avion» et : **«Le temps s'écoule moins vite pour les passagers d'un de ces avions que pour ceux de l'autre avion»**

Quant à la **contraction des longueurs**, elle est exposée de façon humoristique par le savant Georges Gamow dans un livre qui a pour titre «M. Tomkins au pays des merveilles».

Il imagine un personnage, un certain monsieur Tomkins, qui est transporté dans un univers où la vitesse de la lumière est extrêmement faible. Il faut préciser ici que les phénomènes étranges que nous avons décrits sont imperceptibles à nos sens à cause de la très grande vitesse de la lumière, mais il n'en est pas ainsi pour M. Tomkins, qui se trouve dans un univers où la vitesse de la lumière est assez faible pour que ces phénomènes étranges lui soient perceptibles, à lui, de sorte qu'il lui arrive toutes sortes d'aventures cocasses. Par exemple, immobile sur un trottoir, il voit passer devant lui quelqu'un qui circule sur une bicyclette mesurant, quand elle est immobile, par exemple 1,70 m ; eh bien, quand elle passe devant lui, il la voit beaucoup plus courte, par exemple 30 ou 40 cms, selon la vitesse du cycliste ! Quant à celui-ci, qui, à l'arrêt, a la même corpulence que M. Tomkins, il lui apparaît tout plat, comme s'il était découpé dans une feuille de carton ! Ceci n'est pas l'œuvre d'un humoriste mais d'un très grand savant, qui sait manier l'humour pour se faire comprendre.

La contraction des longueurs et la dilatation des durées s'expliquent aussi à l'aide d'autres raisonnements, qui font intervenir l'apparition de points lumineux par rapport auxquels se déplacent des observateurs, et il faut savoir que ces raisonnements conduisent à des conclusions tout aussi inattendues que les précédentes :

- deux événements qui sont **simultanés** pour un observateur peuvent apparaître comme **successifs** aux yeux d'un autre observateur qui se déplace par rapport au premier
- **l'ordre** dans lequel se déroulent deux événements **successifs** pour un observateur peut apparaître comme **inversé** pour un autre,

Il en résulte que le concept de **simultanéité** est, lui aussi, **relatif**, ainsi que les notions de «**avant**» et de «**après**».

Il n'est pas indispensable ici d'exposer ces raisonnements, et qu'il me suffise de dire qu'ils sont tout aussi simples et logiques que les précédents.

Pour en terminer avec la relativité des longueurs, des durées, de la simultanéité et de l'ordre des événements, ajoutons que les variations qui en résultent sont, comme nous l'avons vu dans le cas de l'addition des vitesses, absolument insensibles quand on opère aux faibles vitesses que nous pouvons réaliser par les moyens dont nous disposons à notre échelle. Par exemple, dans le cas des longueurs, la valeur du coefficient réducteur intervient comme ceci :

$$\text{«longueur à la vitesse } \mathbf{V}\text{»} = \text{«longueur à vitesse nulle»} \times \text{la racine carrée de } 1 - \frac{\mathbf{V}^2}{\mathbf{c}^2}$$

formule dans laquelle «**C**» est la vitesse de la lumière, ce qui montre que, si la vitesse **V** est faible par rapport à celle de la lumière, qui est considérable, le coefficient réducteur est pratiquement égal à **1**, donc la contraction est indécélable.

De tels écarts ne sont vérifiables que quand on considère des vitesses très importantes, et c'est pourquoi, comme cela a déjà été dit, la Théorie de la Relativité s'applique dans des domaines comme l'astronomie, l'étude de la structure intime de la matière, ou encore lors des expériences réalisées à l'aide de puissants accélérateurs de particules.

Pour conclure sur **les conséquences** qui résultent des raisonnements qui ont été présentés, raisonnements qui sont à notre portée, constatons que, en revanche, ces conséquences - je les rappelle : **contraction des longueurs, dilatation des durées, inversion de l'ordre de succession de deux événements** - ont pour effet de heurter violemment ce que nous appelons le «**sens commun**», mais c'est ainsi !

Passons à présent à la relativité des masses

Le caractère relatif de toute masse, c'est à dire le fait que **la masse d'un objet varie en fonction de sa vitesse de déplacement**, résulte d'une démarche intellectuelle analogue à celle qui conduit à la relativité des longueurs et des durées.

On peut résumer cette démarche de la façon suivante :

- il n'échappe à personne que plus un corps est pesant plus il faut lui imposer une force importante pour le mouvoir, pour lui donner une accélération ; Newton a mis en évidence que le rapport entre la force et l'accélération est constant pour un corps donné, ce rapport étant une mesure de la masse du corps, de sorte que l'on peut dire que la propriété de la masse, c'est de résister à l'action d'une cause de mouvement (on dit aussi que la masse mesure l'«inertie» du corps en question)
- imaginons donc qu'un corps se déplace sous l'action d'une force et que cette force continue à s'exercer pendant le mouvement, ce qui aura pour effet d'augmenter constamment la vitesse du déplacement
- rien n'empêche notre bon sens de nous faire dire que, si la force d'entraînement de ce corps ne cesse de s'exercer, il finira par prendre une vitesse considérable, qui pourrait atteindre celle de la lumière, ou même, (pourquoi pas ?) la dépasser
- or, malgré l'apparente logique de cette conclusion, elle est **absurde**, puisqu'il a été démontré que la vitesse de la lumière est une limite qui, en aucun cas, ne peut être dépassée !

L'absurdité à laquelle nous aboutissons nous révèle que la description que nous avons donnée du mouvement de ce corps est très imparfaite : nous devons admettre que, s'il est vrai que sa vitesse continue à croître sous l'effet de la force qui l'entraîne, en revanche son accélération diminue jusqu'à devenir nulle, puisque sa vitesse doit obligatoirement se stabiliser quand elle atteint celle de la lumière. Le corps en question oppose donc une résistance de plus en plus grande au mouvement quand sa vitesse augmente, et puisque c'est sa masse qui s'oppose à tout effort tendant à le déplacer, il faut en conclure que **cette masse augmente avec la vitesse.**

Ainsi, la notion de masse, autant que celles d'espace et de durée, est une notion relative : toute masse augmente avec sa vitesse, d'une façon qui est, certes, imperceptible aux vitesses de notre vie courante, mais de façon de plus en plus importante, jusqu'à tendre vers l'infini quand le corps atteint la vitesse de la lumière, comme le montre la formule suivante :

«masse à la **vitesse V**» = «masse **au repos**» divisée par la racine carrée de $1 - \frac{V^2}{C^2}$

Pour en finir avec la variabilité des masses, voici comment se termine un texte écrit à ce sujet par Georges Gamow (je cite) : *«Les expériences permettent d'observer facilement cet effet de changement de masse sur des particules très rapides, par exemple sur la masse des électrons émis par des corps radioactifs à une vitesse égale à 99 % de celle de la lumière. Et les électrons qui existent dans les rayons cosmiques et qui se meuvent souvent à 99,98 % de la vitesse de la lumière, ont des masses 1 000 fois plus grandes. Avec de telles vitesses, la mécanique classique devient absolument inapplicable, et nous entrons dans le domaine de la pure théorie de la relativité».*

Comme dans le cas de la contraction des longueurs et de la dilatation des durées, la variabilité d'une masse sous l'effet d'un mouvement s'éloigne tellement de nos réactions instinctives, que nous sommes obligées, une fois de plus, de remplacer le mot «**comprendre**» par le mot «**accepter**».

La relativité généralisée

Au point où nous en sommes, il serait logique de présenter le principe d'équivalence de la matière et de l'énergie, qui s'exprime par la formule bien connue $E = M C^2$, mais je préfère garder ce sujet pour la fin, car il servira de trait d'union pour présenter la conclusion qui débouchera sur l'étrangeté de notre univers, comme je l'ai annoncé dans mon préambule.

Passons donc à la «Relativité Généralisée», sans nous y attarder, mais simplement afin de définir le sens de ce vocable et d'en présenter la conséquence la plus spectaculaire.

Commençons par rappeler que tout ce que nous avons vu jusqu'ici est fondé sur l'existence d'un mouvement, mais que la relativité des longueurs et des durées ne prend en considération que les mouvements uniformes, c'est à dire rectilignes et à vitesse constante. Or, dans l'univers, il n'existe aucun mouvement réellement uniforme, il n'y existe que des mouvements non rectilignes et à vitesse variable, puisque la trajectoire de tout mobile est obligatoirement déviée sous l'influence de toute masse qui l'attire du fait de l'attraction universelle, attraction qui, en outre, modifie la vitesse de ce mobile. Certes, si un corps céleste passe très loin d'un autre, leur force d'attraction réciproque est extrêmement faible, mais, si proche qu'elle soit de zéro, elle n'en existe pas moins. Le mouvement uniforme n'est donc qu'une vue de l'esprit, au même titre que les figures parfaites de la géométrie.

Alors, dira-t-on, pourquoi la relativité restreinte fait-elle intervenir des mouvements uniformes ? La raison réside dans le fait que tout mouvement «varié», peut être considéré comme une suite de mouvements élémentaires,

qui sont uniformes en première approximation. Je précise que, quand on dit mouvement «élémentaire», cela ne sous-entend pas que ce mouvement se produise sur une distance que nous appelons «courte» : il peut s'agir d'une distance importante, compte tenu, bien entendu, du principe général selon lequel la notion d'«importance» d'une distance est une notion relative.

Ceci étant dit, il en résulte que, pour certains phénomènes, l'intervention des corrections qu'exige la relativité restreinte est parfaitement légitime, car on ne commet qu'une erreur négligeable quand on raisonne comme si le mobile étudié se déplaçait en ligne droite et à vitesse constante.

En revanche, quand un phénomène se produit dans des conditions qui interdisent d'assimiler un mouvement réel à un mouvement uniforme, on rencontre des difficultés devant lesquelles les procédés courants d'analyse sont en défaut, et les formules de transformation, dont nous avons vu un échantillon tout à l'heure, et qui avaient déjà un aspect quelque peu rébarbatif, font appel à des outils mathématiques d'un niveau extrêmement élevé, qui, évidemment, dépasse très largement le cadre du présent exposé.

Je n'en dirai donc pas davantage, et je vais me limiter à présenter la conclusion la plus importante qui a été tirée des réflexions et des calculs ayant pour objet d'expliquer ce qui se passe dans l'univers, compte tenu des mouvements «variés» qui s'y déroulent.

Cette conclusion, c'est que toute masse située en un lieu quelconque du cosmos exerce sur son environnement une action qui impose à cet environnement (appelé désormais l'«espace-temps», car les notions d'espace et de temps sont intimement liées), toute masse, disais-je, impose à son environnement une courbure qui, comme nous allons le voir dans un instant, explique l'attraction universelle.

Remarquons d'abord que, si la courbure d'une ligne ou d'une surface est une notion qui nous est familière, il n'en est pas de même de la courbure de l'espace, que nous avons du mal à nous représenter, mais dont on peut donner une image en disant que toute masse agit sur son environnement spatio-temporel comme une boule pesante agit sur un tapis élastique dans lequel elle s'enfonce en y creusant une cavité.

Cette image présente l'avantage de nous permettre de nous représenter la manière dont s'exerce l'attraction universelle.

En effet, si une bille roule sur le tapis que nous avons imaginé au voisinage de la boule qui y creuse une cavité, sa trajectoire se courbe à cause de la cambrure du tapis. Eh bien, il en est ainsi dans l'espace-temps : au voisinage d'une

masse, le chemin le plus court emprunté par un mobile pour aller d'un point à un autre est courbe, puisque l'espace est courbe, de même que le plus court chemin d'un point à un autre sur notre planète est courbe, parce qu'elle est sphérique. Il en résulte que tout mobile de l'espace qui circule dans l'environnement d'une masse se comporte comme la bille de l'exemple que nous avons donné : il se rapproche de cette masse comme si une force l'attirait vers elle, et il en est ainsi pour tout mobile quel qu'il soit, même un grain de lumière.

C'est selon ce mécanisme qu'agit ce qu'on appelle le «champ gravitationnel», et les mouvements qu'il engendre sont susceptibles de se compliquer à l'extrême, quand on songe qu'un mobile n'est jamais soumis à un seul champ de gravitation, puisqu'il est entouré de plusieurs masses, si lointaines qu'elles soient, de sorte que le mobile subit toujours plusieurs de ces actions, qui, écrit le mathématicien Gaston Moch de façon saisissante (je cite) : *«se combinent à chaque instant de la manière la plus capricieuse»*.

A ce sujet, il écrit aussi, de façon imagée, que les axes de référence, que l'on croyait rectilignes, de l'espace plat de Galilée et de Newton sont (je cite textuellement) comme *«des filaments se tordant en tous sens»*, et il cite Einstein lui-même, en écrivant : *«Einstein exprime cela d'une façon pittoresque en disant que nous n'avons plus devant nous des axes de référence, mais une preuve de référence»* !

Cette courbure de l'espace n'est pas une vue de l'esprit, elle est bel et bien confirmée par l'expérience. En effet, quand un astronome pointe sa lunette en direction du bord du soleil (lors d'une éclipse totale pour éviter l'éblouissement) il peut observer l'image virtuelle d'une étoile qui se trouve derrière le soleil, ce qui prouve que les photons qu'elle émet sont déviés sous l'effet de la cambrure imposée dans l'espace par la masse solaire.

Bien entendu, dans les régions de l'espace où cette action est extrêmement faible, c'est à dire des régions très éloignées de toute masse, les équations de la Relativité Générale (dont la géométrie non euclidienne de Riemann a constitué le cadre mathématique nécessaire) se réduisent d'elles-mêmes aux équations de la Relativité Restreinte, et les «erreurs» ainsi commises sont absolument négligeables.

Il est temps à présent de passer au principe d'équivalence de la matière et de l'énergie, qui servira de trait d'union entre ce qui précède et notre conclusion.

Equivalence de la matière et de l'énergie

Bien que le concept d'«énergie» ne recèle guère de mystère pour qui que ce soit, il n'est pas inutile d'en rappeler la définition en physique, que l'encyclopédie Larousse désigne comme étant «*l'aptitude à effectuer un travail*». C'est en partant d'une formulation très voisine, qui est «*la capacité de fournir un travail*» que l'excellent vulgarisateur qu'est Gaston Moch met en évidence, pour les non initiés, que tout corps matériel recèle une énergie, en s'appuyant sur l'exemple très simple suivant : quand on effectue le travail qui consiste à soulever un objet «*cet objet*», écrit-il, (je le cite) «*emmagasine ce travail, puisqu'il reste constamment capable de le restituer*», comme chacun sait, en reprenant sa position initiale si on lui rend la liberté. «*En conséquence*», poursuit Gaston Moch, «*il possède une capacité de travail, donc il possède une énergie, appelée énergie potentielle quand il est immobile, et énergie cinétique quand il est en mouvement*». Et il conclut : «*Depuis Newton jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, on ne connaissait l'énergie que sous les formes mécaniques qui viennent d'être citées, mais nous connaissons aujourd'hui quantité de phénomènes qui peuvent être transformés en énergie cinétique et qui ne sont donc que diverses formes d'énergie potentielle*», entre autres : la chaleur, l'énergie chimique, l'énergie lumineuse. L'exemple le plus simple est celui de la chaleur : puisqu'elle peut, en transformant l'eau en vapeur, engendrer le travail qui consiste à déplacer un piston à l'intérieur d'un cylindre, elle possède une «capacité de travail», c'est à dire ce que nous appelons une «énergie».

Tout corps recèle de l'énergie, d'une part à cause de sa nature même, par exemple l'énergie chimique de ses constituants et l'énergie de cohésion de ses noyaux atomiques, d'autre part à cause de son état de mouvement ou encore à cause de contraintes qui lui imposent une certaine position. Ces formes d'énergie sont interchangeableables entre elles, de même que sont interchangeableables l'énergie et la masse : chauffer un corps, ou l'éclairer, c'est augmenter son énergie, donc sa masse et cette conclusion a constitué, à l'époque où elle a été formulée, une nouveauté absolument capitale. En effet, jusqu'alors, on répartissait tout ce qui constitue l'univers en d'une part la matière, que l'on peut voir, que l'on peut toucher, et d'autre part l'énergie, élément impondérable qui se manifeste sous de multiples aspects. Eh bien, la cloison étanche entre ces deux entités a été renversée : il n'existe pas dans l'univers deux entités distinctes, mais une substance unique qui se manifeste sous divers aspects transmutables entre eux, et ce que nous appelons «*la matière*» n'est pas autre chose qu'un nouvel aspect de l'«*énergie*», son aspect d'extrême condensation à l'état potentiel.

Il résulte de ce qui précède que, plus la masse d'un corps est importante, plus l'énergie qu'il recèle est importante, et il appartenait à Einstein de mettre

en évidence la valeur du coefficient de proportionnalité qui relie la masse et l'énergie, qui n'est autre que la carré de la vitesse de la lumière, ce qui s'exprime par la formule $E = M c^2$ qui montre qu'une masse, même infime, recèle une énergie colossale : un kilogramme d'une substance quelconque équivaut à 25 milliards de kilowatt heures, énergie que l'excellent vulgarisateur français Pierre Rousseau traduit de façon imagée en écrivant que cela représente «*autant d'énergie disponible que dans une montagne de trois millions de tonnes de charbon*».

Il est temps à présent de conclure

Nous avons vu que la Théorie de la Relativité débouche sur des constatations qui mettent notre bon sens à la torture : variation des longueurs, des durées et des masses, fragilité du concept de simultanéité, inversion de l'ordre d'événements successifs, interdiction d'additionner des vitesses, équivalence de la matière et de l'énergie, courbure cosmique !

Aussi ne faut-il pas s'étonner du scepticisme qui a accueilli les nouvelles idées, scepticisme relaté par Stephen Hawking dans les termes suivants (je le cite) : «*Tout en emportant la conviction de nombreux penseurs, cette théorie suscita une vive opposition, car elle venait de pourfendre des dogmes majeurs de la science du XIX^{ème} siècle*» ... «*Ce malaise persista tout au long des années 1920 et 1930*» et, «*même de nos jours, on continue à m'écrire 2 ou 3 fois par semaine pour me dire qu'Einstein s'est trompé. Néanmoins, la Théorie de la Relativité est aujourd'hui totalement acceptée par la communauté scientifique, les applications pratiques de ses prédictions ayant pu être vérifiées à d'innombrables reprises*».

A cet égard, un important exemple est celui de l'explication des mouvements de la planète Mercure. En effet, quand on applique à cette planète les calculs qui s'appuient sur la théorie de la gravité de Newton, le résultat n'est pas conforme aux observations. En revanche, tout s'explique quand on utilise la théorie de la relativité, ce qui a constitué l'un de ses premiers grands succès. Et cela, malgré l'étrangeté de ses conclusions, qui nous conduisent à «*prendre notre parti d'une rupture avec le sens commun*», comme l'écrit Gaston Moch.

Il faut ajouter que cette «*rupture avec le sens commun*» ne s'impose pas uniquement à cause du portrait de **l'univers à grande échelle** que nous présente la Théorie de la Relativité, mais aussi à cause de tout ce qui résulte des recherches de la science moderne dans le domaine de **l'infiniment petit**.

Par exemple, les distances entre les noyaux des atomes et leurs électrons étant, à leur échelle, considérables, et l'espace qui les sépare ne contenant, par définition, que du vide, il s'avère que tout ce que nous voyons, tout ce que nous touchons, est constitué principalement de vide, si paradoxal que cela puisse paraître.

Et ce vide lui-même n'est-il pas bien étrange ?

En effet, en son sein se propagent des forces qui assurent l'équilibre de l'univers en agissant sur les éléments infiniment petits qui constituent tout ce qui nous entoure, éléments dont les comportements, qui sont décrits par la théorie des quanta, suscitent encore bien des interrogations et des hypothèses, mais dont on sait qu'ils recèlent une énergie considérable, tout cela dans un espace où règnent en maîtres l'incertitude et l'aléatoire !

Une description aussi **insolite** de ce qui constitue notre univers, ainsi que l'explication la plus récente du mécanisme de son origine (la théorie du «big-bang»), ont fait écrire par John Wheeler (le savant américain qui a donné leur nom aux «trous noirs»), la phrase suivante : **«*Tout ce que nous connaissons trouve son origine dans un océan infini d'énergie qui a l'apparence du néant*»**.

Quant à notre apparition au sein de cet univers étrange, elle ne tient qu'à un fil, si l'on se rapporte à une phrase écrite par Stephen Hawking à propos de l'expansion de l'univers, qui a été mise en évidence par Edwin Hubble dans les années 1930. Voici cette phrase, que je cite textuellement : *«Si, une seconde après le Big-Bang», écrit-il, «le taux d'expansion de l'univers avait été plus petit de un pour cent millions de milliards, l'univers se serait recontracté bien avant d'avoir atteint sa taille actuelle* », ce qui signifie que, dans ce cas, nous ne serions pas réunis ici aujourd'hui pour parler de lui, et il en est de même de la valeur extraordinairement précise de bien d'autres chiffres appelés «constantes cosmologiques».

Je n'insiste pas sur ces étrangetés et je termine par cette phrase du philosophe Jean Guitton : *« Chaque année apporte une moisson de remaniements sur ces lignes frontalières qui bornent notre réalité : l'infiniment petit et l'infiniment grand. La théorie quantique et la cosmologie font reculer toujours plus loin les bornes du savoir jusqu'à frôler l'énigme fondamentale qui fait face à l'esprit humain »*.

Puisque nous abordons ici la frontière entre la science et la philosophie, ce qui n'était pas le sujet d'aujourd'hui, je m'arrête là et je vous remercie de votre attention.

Discussion

Le Président Guerrier de Dumast remercie le conférencier et s'avoue quelque peu embarrassé pour faire un commentaire ; il a cependant constaté avec satisfaction que la manière condensée avec laquelle a été présentée ce sujet complexe va permettre un échange de vues entre nos confrères. Il a noté aussi que la relativité nous déstabilise dans la mesure où ce qui nous paraît évident n'est qu'une apparence. Il y a là une rupture avec le sens commun, mais nous nous efforçons de vivre avec le sens commun.

Le Président donne alors la parole à la salle et plusieurs confrères apportent des éclaircissements et posent des questions.

Monsieur Rivail remercie Monsieur Kevers-Pascalis de son effort de pédagogie et enchaîne sur le commentaire suivant : la mécanique quantique est aussi affectée par la relativité, comme l'a montré Paul Dirac. Les conséquences sont multiples. Le spin de l'électron et, par conséquent, le magnétisme, est un phénomène à la fois quantique et relativiste. De même, les éléments lourds voient leurs propriétés fortement marquées par les corrections relativistes car des électrons se meuvent dans le champ d'un noyau très fortement chargé et sont animés de vitesses très élevées. Par exemple, l'or serait blanc et beaucoup plus oxydable que le cuivre.

Monsieur Mainard précise que la relativité a été construite entre 1905 et 1910, à partir de l'article fondateur d'Einstein, par un ensemble de scientifiques de langue allemande. Par son rôle d'initiateur et de pilote de l'entreprise, Einstein mérite le titre de «*père de la relativité*», mais la contribution de Poincaré à cette œuvre n'en a pas moins été essentielle et présente un double aspect : par son ouvrage *Science et hypothèse* et par son article *Festschrift Lorentz*, Poincaré a aidé Einstein à formuler sa conception opérationnelle du temps à réaliser l'importance du principe de relativité. A travers Minkowski, il a fourni ensuite plusieurs éléments de la théorie : Groupes de Lorentz et Quadrivecteurs. On peut d'ailleurs noter que les ouvrages de référence publiés en Allemagne dans les années vingt, reconnaissent de façon tout à fait correcte cette double contribution à travers les articles de Pauli, Kottler et Thirring. Par ailleurs, on peut vérifier la théorie de la relativité en faisant des mesures dans deux avions circulant dans des directions opposées.

Madame Durivaux-Leyris : Einstein jouait du violon et disait que la physique nucléaire était plus facile à comprendre que la physique du violon.

Le Professeur Larcen demande quelles sont les priorités des découvertes respectives de Michelson, Lorentz, Poincaré, Minkowski et Einstein ? N'y

a-t-il pas un paradoxe de faire une découverte sans expérimentation ? Je sais bien qu'il s'agit de physique théorique mais c'est assez contraire à la méthode expérimentale chère aux biologistes.

Monsieur Kevers-Pascalis rappelle qu'effectivement les démarches de l'esprit qu'il a exposées au sujet de la loi d'addition des vitesses et de la relativité des longueurs et des durées, illustrent bien la réflexion du Professeur Larcane et il en donne un autre exemple : celui de la relativité des masses. Il ajoute que Lorentz fut le premier à avoir émis l'hypothèse de la contraction des longueurs et que l'intervention de Poincaré, dans l'élaboration de la théorie, s'est située en particulier dans le domaine de la relativité des durées à l'occasion des problèmes posés à cette époque par la nécessité d'harmoniser les instruments de mesure du temps dans le monde.

Monsieur Le Tacon remercie Monsieur Kevers-Pascalis de la clarté de son exposé qui nous a permis de comprendre l'essentiel de cette théorie complexe. Ce qui est extraordinaire, c'est la manière dont Einstein a élaboré ces théories de la relativité restreinte puis généralisée. Einstein n'était pas un expérimentateur. Il a élaboré ses théories qui ont bouleversé la physique et le monde uniquement par le raisonnement. Il est probablement le cerveau le plus puissant que l'humanité ait jamais produit.

Madame Créhange : Je voudrais reprendre la distinction faite par Monsieur Larcane sur expérimentation et imagination. L'état de la science repose sur un modèle de l'univers. Dans la méthode expérimentale, on reste à priori à l'intérieur de ce modèle et on cherche à le connaître de mieux en mieux. Ce sont les échecs qui obligent à avoir recours à l'imagination pour faire évoluer le modèle. D'autres scientifiques pratiquent plutôt la méthode inductive : ils utilisent leur imagination pour « chatouiller » les limites du modèle ... avec la volonté de le faire évoluer.