

De la lecture du grand livre du monde

Réflexions d'un physicien
sur les enjeux de la Mécanique quantique
et de la Relativité

PAR

Olivier COSTA DE BEAUREGARD

*Directeur de Recherche au C.N.R.S. (Physique Théorique)
Institut Henri Poincaré*

Dieu Se révèle à travers deux Grands Livres : celui de l'Écriture Révélée, celui de l'Univers Déployé. Et ces deux livres ne peuvent qu'être compatibles — même si les aberrations des hommes en ont quelquefois fait douter.

Ni d'un côté ni de l'autre l'évidence n'est immédiate, loin de là. Le sens littéral ne livre pas l'esprit, car « la lettre tue, et l'esprit vivifie ». La soi-disant évidence des sens est trompeuse, et, d'un côté comme de l'autre, il faut s'en souvenir : « Quand l'eau courbe un bâton, ma raison le redresse » dit La Fontaine, bien informé de l'état de la physique d'alors, car Snell, Descartes, Fermat, Huygens poursuivaient, dans ces mêmes années, leurs travaux sur la réfraction optique.

D'un côté comme de l'autre, pour lire le Grand Livre, il faut une attention mûrie, beaucoup de doigté, et l'inspiration qui éclaire tout homme humble, sincère, diligent, s'il s'ouvre à elle.

L'évidence n'est donc nullement *a priori*, mais *a posteriori*. Elle

se dégage laborieusement, et l'on n'en voit jamais le bout. On va de surprise en surprise, et de clarté en clarté.

Ce qui vient d'être dit est très actuel, quoique pas nouveau du tout. Cela fut dit au cours de l'Affaire Galilée, et notamment par Galilée lui-même. La lecture de l'excellent Ouvrage Collectif « Galileo Galilei », dirigé par S.E. le Cardinal Poupard, et honoré d'une conclusion signée par le Pape Jean-Paul II, en porte témoignage.

Voyons cela d'un peu plus près. Je ne m'étendrai pas sur les problèmes d'exégèse de l'Écriture, et par exemple sur la question des « genres littéraires » : à chacun son métier. Je dirai simplement qu'il ne faut pas prendre le Chapitre I de la Genèse pour un résumé d'astrophysique ou de paléontologie.

Par contre je m'étendrai sur l'exégèse du « Grand Livre du Monde », un thème où Galilée fut aussi un précurseur, et que les débats du Procès ont contribué à clarifier.

*
* *

Une excellente façon d'aborder le sujet utilise les réflexions de Pierre Duhem dans son célèbre ouvrage « La Théorie Physique, Son Objet, Sa Structure » (publié chez Rivière en 1906 et 1913, et à nouveau chez Vrin en 1984) aux chapitres 4 et 6 de la Seconde Partie ; et celles aussi de Thomas Kuhn dans « La Structure des Révolutions Scientifiques, Traduction Française, Albin Michel, 1972 ».

Pour ces deux auteurs une « révolution scientifique » consiste dans le passage du « paradoxe » au « paradigme », du choc de la surprise à la routine de l'acceptation d'une nouvelle vue du monde.

Qu'est-ce d'abord qu'un « paradoxe » ? Au sens n° I des Dictionnaires, c'est « un énoncé surprenant mais peut-être vrai », tel que fut, par exemple, l'héliocentrisme de Copernic. Et qu'est-ce qu'un « paradigme », au sens popularisé par Thomas Kuhn ? C'est une nouvelle vue du monde, une Weltanschauung.

Or il arrive — et c'est cela une « révolution scientifique » — que, comme le dit excellemment Proust, « les paradoxes d'aujourd'hui sont les préjugés de demain ».

Comment bascule le paradigme ? C'est une péripétie shakespearienne « remplie de bruit et de fureur ». Chez le découvreur c'est un orage du Sinaï ; et, quand il redescend, porteur des tables de la nouvelle Loi, il est trouvé très dérangeant. Cependant, la force de la nouvelle évidence est irrésistible, et elle gagne à la manière d'une inondation. L'ancien paradigme n'est pas à proprement parler réfuté, mais dépassé. C'est un « passage des ténèbres à la lumière » ! La nouvelle évidence se dégage, et brille. Fondamentalement parlant elle relègue la précédente au musée, comme une ébauche intéressante à visiter, et, d'ailleurs, souvent encore utile dans certains secteurs de la technologie.

Comment bascule le paradigme ? Il faut relire à ce sujet Duhem et Kuhn.

Tout d'abord le noyau des experts, après discussions, se rallie, mais pas tout d'un bloc. Il est suivi avec retard, par l'intelligentsia avec force babillage. À la fin M. et M^{me} Tout-le-Monde se rallient « en traînant les pieds », au point qu'aujourd'hui encore il existe des « Partisans de la Terre Plate » ! Pourtant, il semble que, longtemps avant les terriens, les marins de l'Antiquité aient été familiers de l'idée d'une Terre Ronde, leurs lointaines navigations leur ayant révélé « des étoiles nouvelles ».

Sans aller si loin, le maçon rural, armé de son fil à plomb et de son niveau d'eau, a bien raison de « penser » les verticales comme parallèles ; mais il en va autrement, bien sûr, des constructeurs de longs aqueducs !

Aujourd'hui encore, en 1986, les conceptions des théories de la relativité et des quanta restent très marginales dans le public, et assez marginales dans l'intelligentsia. Pourtant, déjà des centaines de techniciens de l'électronique ou des accélérateurs de particules doivent les « sentir au bout de leurs doigts ».

Comment bascule le paradigme ? En Physique, (ma discipline) voici.

1. — Un fait, ou un groupe de faits « surprenant mais vrai » est dévoilé par une expérience (Arago, 1818 ; Michelson, 1887) ou bien par une « expérience pensée » (Galilée) ; ou bien un fait banal est dévoilé comme ayant une très grande portée (Sadi Carnot, Olbers).
2. — Une « recette mathématique » est proposée (Fresnel, 1818 ; Lorentz et Poincaré un peu avant 1905 ; Clausius, 1850) — recette éventuellement jugée, et parfois assez longtemps, « surprenante quoique très efficace ».
3. — Un discours interprétatif de la formule est proposé, l'habillant au plus près, et facilitant ainsi la poursuite de l'exploration (Einstein, 1905 ; Minkowski, 1908). Ce discours est trouvé, lui aussi, provoquant quoique difficile à réfuter.

*
* * *

Revoyons à cette lumière ce que furent l'élucidation du principe d'inertie de Galilée et celle du principe de relativité restreinte d'Einstein — deux principes étroitement reliés entre eux.

Dans la mécanique classique il y avait non pas un, mais deux principes de relativité.

Le « *principe du mouvement relatif* » de la cinématique s'énonçait en termes d'une variable temporelle t et d'un espace euclidien tridimensionnel x, y, z , au sein duquel pouvaient se déplacer des figures indéformables qu'il est commode d'appeler « solides ». Le principe stipulait que deux tels solides quelconques, quels que puissent être leurs « mouvements relatifs », sont équivalamment valables comme « référentiels » pour la description des (autres) mouvements. Par exemple la place d'un village, et le manège qui tourne sur la place, seront considérés comme des « référentiels solides » également valables ; ou bien, le quai du métro, et la rame qui

accélère au démarrage, seront des « référentiels » également valables. Là-dessus s'est bâtie une élégante « cinématique classique, une extension naturelle de la géométrie euclidienne, avec ses notions de « centre instantané de rotation » et de « mouvement hélicoïdal tangent », qui conservent leur utilité technologique.

Le principe de relativité restreinte de Galilée a, lui, son origine dans la dynamique. Galilée postule — et c'est sa grande découverte en physique fondamentale — qu'un petit corps massif — idéalement un « point matériel » — libre de toute force appliquée est ou bien au repos, ou bien animé d'un mouvement rectiligne uniforme, ces deux énoncés étant déclarés équivalents.

De ce principe résultait la définition d'une échelle galiléenne du temps et d'un ensemble équivalement privilégié de repères solides de l'espace : les « repères galiléens ».

L'échelle galiléenne du temps — ce « temps universel » ou « absolu » que Newton va bientôt caractériser en une longue phrase solennelle — résulte de ceci : Si le principe d'inertie est vrai avec une certaine échelle t du temps, les seules transformations sur t préservant la loi sont les « transformations linéaires » ; autrement dit, l'échelle galiléenne du temps est définie à un changement d'origine près et à un facteur multiplicatif près.

D'autre part un peu d'algèbre montre que, si le principe d'inertie est vrai relativement à un certain repère solide de l'espace, il reste vrai relativement à, mais seulement relativement à, tout autre repère solide animé d'un mouvement rectiligne et uniforme relativement au précédent. Cette famille équivalement privilégiée est celle des « repères galiléens ».

Ainsi, le principe de relativité restreinte de Galilée — un corollaire inhérent à son principe d'inertie — définit bel et bien un mode de repérage, privilégié et universel, du temps et de l'espace.

L'année même où Galilée meurt Newton naît. Co-découvreur, avec Leibniz, du calcul différentiel et intégral, il pose la loi universelle (c'est à dire indépendante du corps d'épreuve) de la dynamique du point matériel : « l'accélération (la dérivée première de la

vitesse, c'est à dire la *dérivée seconde* de la position relativement au temps) est proportionnelle à la force appliquée et inversement proportionnelle à la masse ». Un peu d'algèbre montre que cette formule jouit des mêmes invariances que la loi d'inertie de Galilée : elle définit ainsi, elle aussi, une échelle universelle du temps et une famille équivalement privilégiée de « repères inertiels ». Chacun a pu constater, dans l'autobus, comment des « forces d'inertie » sont engendrées par un changement de la grandeur ou de la direction de la vitesse ; d'un changement par rapport à quoi ? Par rapport au *repère inertiel* dont le sol de la ville constitue une première approximation. Quant aux forces d'inertie engendrées par une rotation du repère, leur théorie, un peu plus subtile, est due à Coriolis (1836) ; Foucault, en 1851, dans sa fameuse expérience du Panthéon, a démontré leur existence en tant que liées à la rotation sur elle-même de la Terre ; en technologie elles sont utilisées dans les « gyrocompas ».

Il se trouve qu'un des temps forts du Procès de Galilée a justement consisté en une confrontation des deux principes de relativité : celui de la cinématique et celui de la dynamique. Le Tribunal, se réclamant du « *principe du mouvement relatif* », considérait que le solide terrestre et le solide de la voûte sidérale sont deux référentiels équivalement valides ; Galilée, quant à lui, se réclamait du nouveau *principe de relativité restreinte* en grommelant (dit-on) « *e pur si muove* » — « *si muove* » relativement au repère ayant son origine au centre du Soleil, et des axes perçant la voûte sidérale dans des directions fixes.

Quel dommage que le débat ne soit pas resté académique ! Bien sûr, ni Galilée, ni les juges, n'étaient en mesure de mieux préciser leurs intuitions respectives ; il faudra, pour que cela devienne possible, la venue de Newton, et même celle de ses illustres successeurs, Euler, Laplace, Lagrange et d'autres. N'importe, l'heure était solennelle. L'entrée en scène du *principe de relativité restreinte* annonçait, en termes voilés, la venue de Poincaré, Einstein, Minkowski : la *théorie de la relativité restreinte* et la *métrique de l'espace-temps*.

Ce sera là le second temps d'une « révolution scientifique ». Dans son premier temps, la révolution galiléo-newtonienne inaugurerait les trois siècles du règne de la « mécanique rationnelle », une magnifique construction conceptuelle entourée, comme une acropole, de tout le reste d'une ville, de toute une technologie. De cette technologie je ne retiendrai qu'un seul aspect : la *chronométrie classique*, avec ses horloges célestes — la Terre en rotation sur elle-même, où la Terre en circulation autour du Soleil — et ses horloges terrestres, dont Huygens a fondé la technologie.

Avant Galilée et Newton, le temps n'était pas une grandeur « mesurable » (au sens que ce mot a en physique). L'addition de deux durées n'était pas valablement définie. Par la formule $f = ma$ de Newton le temps est défini comme une *grandeur indirectement mesurable* par référence à trois grandeurs considérées comme « directement mesurables » : la masse m , la force f et l'espace impliqué dans l'expression de l'accélération $a = d^2r/dt^2$. Les trois siècles du règne de la mécanique rationnelle sont ainsi ceux de l'avènement et de l'empire du *temps newtonien*. La *révolution de l'heure exacte*, popularisée par les chronomètres de Huygens, n'a pas moins transformé le contexte social que l'imprimerie de Gutenberg.

Comment a finalement basculé le magnifique paradigme galiléo-newtonien ? D'où est venu le soupçon ? C'est une toute autre histoire qu'il me faut raconter maintenant, celle des trois siècles de tâtonnements de l'optique cinématique, d'où a émergé la révolution relativiste d'Einstein, en 1905.

*
* *

Malgré la clarté des énoncés des deux principes de relativité, celui de la cinématique et celui de la dynamique, et leur parfaite opérationalité dans leurs domaines respectifs, la croyance en l'existence d'un repère absolu des espaces, d'un repère des « mouve-

ments réels » (peut-être une résurgence inconsciente de la nostalgie d'une « terra firma »), n'était pas morte. Un autre concept, celui d'un « éther » omniprésent dans l'espace, hérité des Grecs, défendu par Descartes, vint à la rescousse. On y vit le support des « ondes lumineuses » proposées par Huygens vers 1678. L'éther luminifère devint le prétendant au trône vacant du repère absolu des espaces ; et la longue traque du « vent d'éther » supposé souffler, comme un « vent debout », à l'encontre de tout mobile « se déplaçant dans l'éther » devint le leit-motiv de trois siècles de recherche en optique cinématique.

Cette histoire débute au XVII^e siècle, avec les deux théories, faciles à marier entre elles, du principe d'extremum de Fermat et de l'onde lumineuse de Huygens. L'un et l'autre déduisent, de leurs principes respectifs, les lois de la réflexion et de la réfraction de Snell et de Descartes. Fermat postule que la lumière se propageant d'un point A à un point B suit le trajet qui rend minimum (éventuellement maximum, comme Hamilton l'expliquera plus tard) le temps de parcours. Tous les automobilistes savent bien qu'on peut avoir intérêt à allonger kilométriquement un parcours sur une autoroute au détriment des routes secondaires, pour « gagner du temps ». C'est ce que fait, selon Fermat, la lumière, allongeant son parcours dans le milieu moins dense où elle va plus vite. Huygens, de son côté, voit la lumière essayant tous les chemins possibles, en avançant à la vitesse qui est la sienne dans un certain milieu, et se trouvant ainsi avancer sur un front qu'on appelle « l'onde enveloppe ». Au fond les deux principes n'en font qu'un, celui qu'on appelle, en géométrie, la théorie de la « congruence des normales » — la théorie des faisceaux de courbes admettant des faisceaux de surfaces qui les coupent orthogonalement. C'est ce qu'on peut appeler poétiquement (en paraphrasant légèrement Victor Hugo) la théorie des rayons et des ondes.

Cette théorie de Fermat et de Huygens affirme que la vitesse de la lumière dans un milieu est inversement proportionnelle à ce qu'on appelle « l'indice du milieu ». Newton, quant à lui, d'après

sa propre théorie de la lumière, affirmait le contraire. L'expérience, en 1851, aux mains de Fizeau, a tranché en faveur de Fermat et de Huygens. Cependant le point de vue de Newton avait des arguments en sa faveur, et tous ceux qui ont examiné de près cet épineux problème, à la lumière de la mécanique ondulatoire, savent que la solution en est finalement très subtile.

Donc, au XVII^e siècle, Fermat et Huygens lancent la recherche en optique cinématique, comme Galilée avait lancé la recherche en dynamique.

Comment évaluer la vitesse de la lumière dans le vide (ou, comme on pensait, « dans l'éther » omniprésent) ? Deux réponses des plus ingénieuses furent trouvées, l'une par Roemer, à Paris, en 1676, l'autre par Bradley, à Oxford, en 1728. Le difficile, à l'époque, était de disposer d'une vitesse de référence suffisamment grande pour que son rapport à la vitesse de la lumière ne soit pas ridiculement petit, et telle aussi qu'on puisse la référer aux étalons de longueur et de temps alors disponibles. La vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil fera l'affaire : elle est de l'ordre de 30 kilomètres par seconde. Et comme la vitesse de la lumière, c , sera trouvée de l'ordre de 300.000 kilomètres par seconde, le rapport en question est sensiblement $1/10.000$; ce n'est pas très grand, mais suffisamment pour des observateurs habiles. Et comment connaissait-on la vitesse v de la Terre sur son orbite ? Grâce à la connaissance des dimensions de l'écliptique, récemment obtenue par des procédés géodésiques : mesures d'un arc de méridien, et observations des passages de Vénus devant le disque solaire.

Les mesures de Roemer portaient sur le temps. Il avait remarqué qu'au cours d'une année les périodes d'occultation observée des satellites de Jupiter varient : elles allongent quand la Terre s'éloigne, et raccourcissent quand la Terre se rapproche de Jupiter. Roemer, très judicieusement, voit là une preuve que la vitesse de la lumière est finie, et un moyen de la mesurer. Utilisant la loi additive de composition des vitesses (qui est un *théorème* en cinématique classique) il trouve pour c , la vitesse de la lumière dans

le vide, une valeur qui est tout à fait du bon ordre de grandeur, ce qui le met au rang de ceux que distingue aujourd'hui un Prix Nobel.

Bradley, quant à lui, fait des mesures d'angles. Lui aussi compose additivement les vitesses, mais vectoriellement, les vitesses \vec{v} de la Terre et \vec{c} de la lumière étant sensiblement perpendiculaires entre elles. Il remarque qu'au cours de l'année les positions observées d'étoiles visées perpendiculairement à l'écliptique décrivent de petites ellipses, toutes égales entre elles, et semblables à celle de l'écliptique. Il « assigne la cause » du phénomène en déclarant que le rapport de similitude est $v/c = 1/10.000$. Lui aussi arrive au bon ordre de grandeur, et prend place à côté de Roemer.

Récemment le théoricien Yilmaz a soulevé une question intrigante. En 1728, Bradley — le — perspicace aurait-il pu tirer de son observation la théorie de la relativité d'Einstein ? Il faut remarquer d'abord que, dans les deux calculs, celui de Roemer et celui de Bradley, les vitesses réputées « absolues » de la Terre d'une part, de Jupiter ou de l'étoile d'autre part, s'éliminent. L'éther disparaît du calcul, ne laissant subsister que la *vitesse relative* entre la source et le récepteur. Il y a déjà là matière à réflexion pour un philosophe des sciences. Mais il y a plus.

Qu'arrive-t-il si l'on prend très au sérieux la théorie de l'orthogonalité des rayons et des ondes de Fermat et de Huygens ? Ce principe d'orthogonalité, si fécond, ne devrait-il pas être vrai dans *tous* les repères d'inertie ? Voilà une idée qui, si on la poursuit, va terriblement loin.

Dire que les rayons et les ondes sont mutuellement orthogonaux, c'est dire, aux termes de la théorie géométrique des enveloppes, que la vitesse des ondes est « isotrope », la même dans toutes les directions. Postuler que cette loi d'orthogonalité et d'isotropie serait la même dans *tous* les repères inertiels, c'est *ipso facto* abroger la loi classique de composition additive des vitesses. Incontestablement vraie à l'approximation des vitesses modérées, cette loi deviendrait donc très inexacte aux grandes vitesses ; elle prendrait

la forme limite qu'on vient de dire si l'une des vitesses en jeu était la vitesse de la lumière dans le vide, c . Or, tel est exactement le postulat duquel Einstein a tiré en 1905 sa « théorie de la relativité restreinte ».

On vient de voir qu'en stricte logique cette démarche eut été parfaitement possible dès 1728 ! Cependant, psychologiquement parlant, la chose eût été « impensable ». Mettre en doute la loi additive de composition des vitesses, et du même coup les concepts de l'espace euclidien absolu et du temps universel (qui étaient à la base de la cinématique classique) eût été jugé sacrilège, voire démentiel. En outre, il n'était pas clair, à cette époque, que la vitesse de la lumière dans le vide est privilégiée entre toutes les vitesses. Après tout, le phénomène de l'aberration de Bradley s'observe aussi, par exemple, sur la pluie qui tombe ; les passagers d'une calèche lancée au grand galop pouvaient sans peine observer une chute « apparemment oblique » de la pluie. Alors, pourquoi vouloir rendre invariant le principe de Fermat et de Huygens pour une pluie de lumière plutôt que pour la pluie de gouttes d'eau ? Il y avait, à la vérité, une *très bonne* raison de privilégier absolument la vitesse c , et c'était précisément qu'on avait conféré au soi-disant « éther » le rôle privilégié d'un repère absolu des espaces. Des esprits aussi pénétrants que Fermat ou que Huygens auraient donc certainement pu argumenter comme il vient d'être dit. Mais, comme l'écrit Vigny, « le marbre des vieux temps jusqu'aux reins nous enchaîne — et tout homme énergique au dieu Terme est pareil ». En 1728 les temps n'étaient pas mûrs. Beaucoup de pluie, — de pluie de lumière — devait encore tomber avant l'éclosion du printemps.

*
* *

En 1818 Arago suivait de près les travaux de Fresnel qui, précédé de peu par Young, développait mathématiquement la théorie

ondulatoire de la lumière proposée par Huygens. Il exécuta, en cette année, la première en date de la longue série des expériences destinées à détecter le « vent d'éther ». À cette fin il reçut dans un prisme la lumière d'une étoile visée dans la direction du mouvement de la Terre autour du Soleil. Contrairement à son attente, il observa la même déviation que si la source eût été au repos dans le laboratoire. Avec une géniale facilité Fresnel aussitôt riposta par une formule *ad hoc* qui annulait l'effet du supposé vent d'éther « au premier ordre v/c » (c'est dit expressément). Cependant le « discours » n'habillait pas la formule « au plus près », car ce discours parlait d'un vent d'éther que la formule escamotait.

Soixante ans passèrent, riches de travaux de « science normale » (dans la terminologie de Kuhn) : multiples expériences de « détection du vent d'éther », toutes « négatives » ; travaux interférentiels de Fizeau et de Foucault, vérifiant notamment au laboratoire la « formule d'entraînement de l'éther » qu'avait proposée Fresnel, ainsi que la loi de Fermat et de Huygens concernant la vitesse de la lumière dans un milieu réfringent ; mesures de la vitesse de la lumière dans l'air sur un trajet aller-retour d'abord de l'ordre de 10 kilomètres (méthode de la roue dentée de Fizeau) puis de l'ordre de quelques mètres (méthode du miroir tournant de Foucault). En 1874 Potier produisit deux remarques du plus haut intérêt, que Fresnel aurait pu faire tout aussi bien en 1818...

La première, utilisant le principe d'extremum de Fermat, était que la formule de Fresnel escamote *tout* effet du vent d'éther au premier ordre en v/c , d'où, bien sûr, une forte motivation pour concevoir et effectuer une expérience sensible au second ordre, en v^2/c^2 . Ce sera l'œuvre de Michelson en 1887.

La seconde remarque était que la formule de Fresnel est en fait celle d'une *loi non additive de composition* de la vitesse de la lumière avec celle du corps réfringent.

Voilà une remarque d'une immense portée. Quelle est donc cette loi ? Un peu d'algèbre simple montre que cette loi n'est autre qu'une formule bien connue de trigonométrie hyperbolique : la loi

de composition de la fonction « Th (v/c) » Quand l'argument v/c croît continûment de $-\infty$ à $+\infty$, la fonction Th croît continûment de -1 à $+1$: elle projette, au sens des cartographes, l'intervalle infini de $-\infty$, $+\infty$ sur l'intervalle fini -1 , $+1$. Lévy-Leblond propose d'appeler (dans le contexte) Th (v/c) la « rapidité ». Ce que dit la formule de Fresnel est qu'il faut abroger la vieille loi d'addition des vitesses en faveur de la nouvelle loi d'addition des rapidités. La différence entre les deux lois n'apparaît qu'aux grandes valeurs de v/c , au-delà des phénomènes qu'avait étudiés la mécanique classique ; l'optique la révèle immédiatement.

C'est en 1928 seulement, dans son Cours d'Analyse de l'École Polytechnique, que Hadamard présente, en termes plus savants, l'argument que je viens de résumer, mais qui eût été parfaitement accessible aux mathématiques de Fresnel.

En 1973 Ramakrishnan franchit le dernier pas qui, suivant cette voie *très* directe, permet d'atteindre le sommet relativiste : il montre que la fonction qui cartographie fidèlement, au sens de la théorie des groupes, l'intervalle infini $-\infty$, $+\infty$ sur l'intervalle fini -1 , $+1$ est la fonction Th.

*
* * *

Cette voie très directe, inaugurée en 1818 par Fresnel, n'est donc pas celle qu'ont suivie les découvreurs Lorentz, Poincaré, Einstein. C'est par une autre démarche qu'a été élucidé le rôle crucial en cette affaire de la trigonométrie hyperbolique. L'expérience de Michelson procède de la première, et non de la seconde des deux remarques de Potier en 1874.

Donc Michelson décide de concevoir et d'effectuer une expérience sensible au second ordre, v^2/c^2 . Son montage est en somme une réalisation différentielle du montage (largement utilisé à partir de 1892) permettant de comparer (interférométriquement) un

étalon solide de longueur à une longueur d'onde optique stationnaire. Selon la classique loi additive de composition des vitesses, un « vent d'éther » devrait décaler le système des franges d'interférence.

Effectuée en 1887, à Cleveland, l'expérience de Michelson ne détecte aucun effet de vent d'éther. Aussitôt (comme autrefois Fresnel), Fitzgerald et Lorentz (indépendamment) ripostent par une formule *ad hoc* : une loi (universelle) de contraction des longueurs sous le vent d'éther. Mais l'histoire se répète : le discours n'habille pas « au plus près » la formule.

Là dessus Lorentz et Poincaré, qui correspondaient entre eux, établissent une recette mathématique taillée à la stricte mesure du fait : une nouvelle loi de changement des repères inertiels, ayant structure de groupe, telle que la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide, c , soit invariablement la même, et la même dans toutes les directions (ou isotrope).

À l'approximation des petites valeurs de v/c les formules de Lorentz-Poincaré reviennent coïncider avec celles de Galilée et de Newton. Ce qu'il y a en elles d'essentiellement nouveau est qu'elles transforment non seulement le temps en espace *mais aussi l'espace en temps*. Selon ces formules un repère inertiel est un repère non seulement de l'espace, *mais aussi* du temps. À chaque repère inertiel est attaché un *temps propre*.

Poincaré remarque en 1906 que ces formules ne font que travestir des formules de trigonométrie hyperbolique exprimant une « rotation hyperbolique » dans le plan (x, ct) . Il propose en conséquence le concept d'un espace-temps pseudo-euclidien à 4 dimensions, destiné à remplacer à la fois l'espace tridimensionnel d'Euclide et la variable t notant le temps de Newton. Selon cette interprétation géométrique, un repère d'inertie est un repère spatio-temporel, un « tétrapode cartésien », repérant tout *instant-point* x, y, z, ct . Quant aux formules de changement de repère d'inertie, généralisant celles de Galilée-Newton, elles expriment une *rotation du tétrapode* (une rotation « circulaire » ordinaire en ce qui con-

cerne les variables d'espace x, y, z , une « rotation hyperbolique », s'agissant des couples de coordonnées (x, ct) ; (y, ct) ; (z, ct) .

Ipsa facto l'ancien « principe du mouvement relatif » est abrogé ; le principe de relativité de la cinématique vient coïncider avec celui de la dynamique, lequel reçoit une expression réformée ; ensemble, ils constituent le *principe de relativité restreinte* au sens de Lorentz, Poincaré et Einstein ; les repères inertiels s'appellent désormais « lorentziens » plutôt que « galiléens », pour nous rappeler que désormais ce sont des repères non seulement de l'espace mais aussi du temps.

Dans le Procès qui opposait Galilée à ses juges c'est donc Galilée qui finalement triomphe : le « bon » principe de relativité est celui de la dynamique, dans une expression d'ailleurs réformée.

Ainsi, peu avant 1905, Lorentz et Poincaré, porteurs des tables de la Nouvelle Loi, descendaient de leur Sinaï. Mais, faute d'avoir eu foi entière en la parole écrite, ce ne sont pas eux pourtant qui entrèrent dans la Terre Promise. Ce fut le jeune Einstein. De la coupe aux lèvres quel était le hiatus ? C'est Einstein qui le dit, et voici : « Nous conférerons au principe de la relativité le statut d'un postulat et introduirons un second postulat en apparence (mais seulement en apparence) incompatible avec le précédent, savoir que la lumière est propagée dans l'espace vide à une vitesse bien définie, c ». On ne saurait plus explicitement abroger la loi additive de composition des vitesses !

Autrement dit, les variables x, y, z et ct figurant dans les formules de Lorentz-Poincaré notent l'espace et le temps tels que nous les mesurons, les percevons *et les vivons*. Ils sont *relatifs* au repère utilisé, mais *ensemble* notent un absolu : l'*instant-point*.

La vitesse de la lumière, *invariante* et *isotrope*, est promue au rang de constante universelle, de *coefficient d'équivalence* entre l'espace et le temps rendus en principe *mesurables avec la même unité*. Le temps est ainsi rendu *mesurable par référence directe à l'espace*. Cependant, parce qu'en fait la précision est meilleure en

chronométrie qu'en métrologie, l'étalon fondamental sera celui du temps.

Marquons ici une pause pour un petit temps de réflexion.

*
* * *

Que dit l'expérience de Michelson ? Qu'il y a (ce fut une totale surprise) *équivalence inconditionnelle* entre un étalon solide de longueur et cet autre étalon des longueurs qu'est une onde optique stationnaire. Aujourd'hui, c'est le résultat contraire qui surprendrait car, aux termes de la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie, un corps solide est « une onde matérielle stationnaire » d'ailleurs fort complexe. Il est donc tout naturel qu'une onde matérielle et qu'une onde optique stationnaires aient le même comportement cinématique.

Ainsi, le résultat dit « négatif » (« nul » serait plus exact) de l'expérience de Michelson légitime la substitution de l'étalon optique à l'étalon matériel des longueurs — par exemple, sous la forme de la longueur d'onde d'une radiation d'origine atomique. La précision y gagnera beaucoup. Et, de plus, ce sera la Nature elle-même qui tirera autant de copies conformes de l'étalon qu'on voudra, sous la forme d'atomes identiques d'une espèce donnée.

En chronométrie, d'autre part, il y a tout lieu d'en faire autant. Selon la mécanique ondulatoire le mouvement inertiel d'un point matériel est lié à la propagation d'une onde plane monochromatique, et il est donc tout indiqué de substituer aux anciens étalons du temps — « l'année-sidérale », le « jour solaire moyen » — un étalon hertzien matérialisé par la période d'une radiation atomique ou moléculaire.

Ainsi, des deux côtés — métrologique comme chronométrique — la passation des pouvoirs de la mécanique à l'optique se fait sans douleur.

Mais prises ensemble, les deux mutations font une révolution.

puisque le résultat de Michelson permet de n'avoir qu'un seul étalon pour les longueurs et pour les temps. Cette situation est légalisée depuis 1983, année où la Dix-Septième Conférence des Poids et Mesures décide : « le mètre est la distance parcourue par la lumière en $(1/299\,792\,458)$ seconde ».

Les *attendus* de la décision méritent d'être notés : « Considérant que la définition actuelle [du mètre] ne permet pas une réalisation suffisamment précise pour tous les besoins — Que les progrès réalisés dans la mesure des fréquences et des longueurs d'onde ont abouti à des déterminations concordantes de la vitesse de la lumière dont l'exactitude est limitée principalement par la réalisation [actuelle] du mètre — Qu'une nouvelle définition du mètre a été envisagée sous diverses formes qui ont toutes pour objet de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte, égale à [celle recommandée par la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures, en 1975] — Décide : La définition du mètre en vigueur depuis 1960 est abrogée [en faveur de la précédente définition].

Toutes ces récentes mesures de c , mentionnées dans l'attendu, consistaient en une paire de mesures, l'une de longueur d'onde et l'autre de période, d'une même radiation d'origine atomique ou moléculaire — ou plus précisément, pour des raisons pratiques, en le rattachement mutuel de deux telles mesures par un procédé « hétérodyne » de soustraction de fréquences, connu depuis longtemps en technologie hertzienne.

Expérience de Michelson, métrologie optique, chronométrie hertzienne, mesures de c , voilà donc quatre techniques imbriquées au point que ce ne sont guère que quatre aspects d'une même technique. Et la leçon de cette technique, c'est l'équivalence universelle, dans le rapport c , d'une longueur et d'un temps.

Ainsi, la nouvelle ère de la chronométrie (et de la métrologie) légalisée en 1983 est issue tout droit de la révolution relativiste de 1905. Le temps est déclaré « mesurable » (additionnable à lui-même) en raison de son rattachement *direct et universel* à l'espace.

La sentence du vieil Aristote « nous mesurons le mouvement

au moyen du temps et le temps au moyen du mouvement » est accomplie grâce au mouvement de la lumière, le mouvement entre tous privilégié parce qu'il représente un cas limite.

*
* *

Le paradigme où s'accomplit le « paradoxe » relativiste c'est, mathématiquement, l'espace-temps de Poincaré, largement exploité par Minkowski en 1908. Quant au discours habillant au plus près le formalisme, c'est Einstein qui l'a promulgué dans la phrase plus haut citée — le coup de trompette qui fit tomber la muraille rencontrée sur le chemin de la Terre Promise.

Trois siècles de la traversée d'un désert jalonné de quelques oasis — Bradley, Arago, Fresnel, Potier, Fitzgerald et Lorentz ; la vue, puis la conquête de la Terre Promise — Lorentz encore, Poincaré, Einstein, Minkowski — c'est l'histoire de la découverte que sous les oasis il y avait une grande nappe souterraine.

L'éther luminifère était renvoyé au royaume des chimères, mais l'espace-temps, avec sa métrique, s'imposait comme le bon paradigme. Ce n'est pas seulement l'idée d'adjoindre la variable t , ou ct , aux trois variables x , y , z , qui constitue la découverte relativiste, c'est celle que l'espace-temps a une métrique pseudo-euclidienne, notée sous la forme d'un « théorème de Pythagore généralisé »

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.$$

*
* *

La fécondité de ce paradigme est prodigieuse. Toute la physique s'en sert, de l'atome à l'étoile, de la particule élémentaire à la cosmologie. Je ne m'étendrai pas là dessus, me bornant à un unique exemple.

Soient deux automobiles neuves identiques quittant Perpignan

et se rendant à Dunkerque, l'une au plus court, l'autre suivant les Pyrénées, l'Atlantique et la Manche. Ainsi, l'une parcourt environ 1.000 km, l'autre environ 1.500 km. À l'arrivée, toutes choses égales d'ailleurs, les usures des deux voitures sont dans le même rapport que leurs kilométrages.

Et voici l'analogie dans l'espace-temps.

Deux jumeaux vrais ont vécu côte à côte jusqu'au jour où l'un décide de rester sur Terre, et l'autre de faire un *grand* tour en vaisseau spatial. Ce dernier subit de fortes accélérations, c'est à dire qu'il suit une trajectoire très courbée ; l'autre décrit une trajectoire peu courbée ; pour simplifier, nous la supposons droite. Les montres-bracelets des deux ci-devant jumeaux leur tiennent lieu de compteurs kilométriques. Dans l'espace-temps, pour des trajectoires « du genre temps » (c'est le cas ici) la corde est *plus longue* que l'arc — à cause du signe « moins » devant le carré c^2t^2). Ainsi, ayant vécu disons un an de son temps propre au sein de sa thébaïde accélérée, le voyageur trouve à son retour son ex-jumeau avec déjà un pied dans la tombe. Faut-il dire que le voyageur a « gagné » cette différence de temps ? Cela dépend du sens attribué aux mots. Disons que le phénomène est le même que s'il avait été mis en hibernation pendant quelque temps. La marmotte qui hiberne ne *vit* pas *plus* de jours. Simplement, elle se met en vacances pour sauter directement de l'automne au printemps.

Sornettes que tout cela diront d'aucuns (et même des gens par ailleurs instruits). Pourtant l'expérience a été faite, de manière parfaitement concluante.

En 1971 les physiciens Hafele et Keating ont embarqué dans deux avions long-courriers, volant de Washington à Washington l'un vers le soleil levant, l'autre vers le soleil couchant, des « chronomètres hertziens » mesurant le temps au millionième de millionième près. Du fait de la rotation de la Terre la trajectoire de l'avion volant vers l'ouest, qui « arrête le soleil », est dans l'espace-temps beaucoup plus droite que celle de l'avion volant vers l'est. Toutes corrections idoines effectuées, le décalage temporel calculé

était de l'ordre de 300 milliardièmes de seconde, pour des durées de vol de l'ordre de 50 heures. Il a été *parfaitement* vérifié.

Le point à noter est que si les deux pilotes étaient au départ des jumeaux vrais rasés de frais, et si l'on pouvait mesurer la longueur des poils de barbe à 10^{-12} près, le même phénomène eût été observé.

Incidemment la consommation de carburant peut aussi, en principe, servir d'horloge, et aussi de mètre pour évaluer la distance parcourue. Il suit de ce qu'on vient de dire que les deux équipages n'attribuent pas (en toute rigueur) la même longueur au parallèle de Washington. Encore un « paradoxe » relativiste, fort bien vérifié par de nombreuses expériences.

*
* *
*

Passons à un autre sujet. Une autre grande théorie physique naquit à l'aube du XX^e siècle : la théorie des quanta inventée par Max Planck.

Une enceinte vide portée à une température T n'est à la vérité pas vide : elle est remplie de « rayonnement thermique » à la température T , un système d'ondes électromagnétiques stationnaires étudié, théoriquement et expérimentalement, par les physiciens allemands Kirchhoff, Boltzmann, Stefan, Wien. La thermodynamique, qu'avaient formalisée Carnot, Clausius, Thomson, en avait livré les principales lois, sauf une : celle de la répartition de l'énergie suivant les diverses fréquences. C'est le problème que résolut magistralement Planck par un argument de mécanique statistique. Il postula que l'énergie lumineuse est émise ou absorbée par « quanta » valant $W = h \nu$, ν notant la fréquence d'une onde, et h une nouvelle constante universelle ayant dimension d'action (une énergie multipliée par un temps, ou une impulsion multipliée par une longueur). Curieusement, il n'alla pas jusqu'à postuler l'existence du « grain de lumière » correspondant, le photon — ce que

fit plus tard Einstein, en 1905 et 1913. En 1924 Louis de Broglie compléta ce « dualisme onde-corpuscule » en associant une « onde matérielle » à chaque type de corpuscule. D'après les formules d'Einstein et de Louis de Broglie, il y a proportionnalité universelle, dans le rapport h , entre les quadrivaleurs impulsion-énergie de la particule et fréquence spatio-temporelle de l'onde. De superbes expériences mirent en évidence l'existence du photon (Compton) et celle de l'onde matérielle, (Davisson-Germer). La mécanique ondulatoire de Louis de Broglie interpréta en termes de résonance ondulatoire les règles de quantification de Planck et de Bohr.

Ce dualisme onde-corpuscule était un peu le mariage de la carpe et du lapin, du continu et du discontinu. En ce genre d'affaires, le concept de probabilité est un intermédiaire attitré, ce dont s'avisa Born en 1926. Born postula que l'intensité de l'onde, au sens classique, est la *probabilité* de manifestation du corpuscule. Mais comme on sait, par l'acoustique et l'optique classiques, que dans les phénomènes « purs », où il y a cohérence des phases, ce ne sont pas les intensités, mais les *amplitudes* qui s'ajoutent, produisant les phénomènes d'interférence (spatiale) et de battement (temporel), Born révolutionna ainsi, sans trop crier gare, le calcul des probabilités ! En cette même année 1926 Jordan systématisa toute l'affaire, remplaçant les lois classiques d'addition des probabilités partielles et de multiplication des probabilités indépendantes par des lois analogues portant sur des *amplitudes*. C'était une « révolution scientifique » ! Je vais essayer de la résumer.

Le calcul des probabilités est né de la discussion des jeux de hasard par Cardano (un joueur invétéré) au XVI^e siècle, par Pascal (à cette époque, un « mondain ») et Fermat au XVII^e siècle.

Mais c'est surtout à Laplace — un grand nom du calcul des probabilités — que je vais me référer.

Suivant Bayes, Laplace, en 1774, introduit le concept de la *probabilité conditionnelle* liant deux occurrences aléatoires A et B et la postule *réversible*, ce que je note

$$(A|B) = (B|A)$$

signifiant que la « probabilité conditionnelle intrinsèque » de A si B égale celle de B si A. Il s'ensuit que si A succède à B (ce qui n'est pas obligatoire, quoique fréquent) la probabilité conditionnelle est réversible : elle ne distingue pas entre futur et passé.

Pourtant *en fait* il semble y avoir dissymétrie entre passé et futur : un jeu de cartes « en ordre » est dérangé par une suite de battages ; et personne ne compte sur une suite de battages pour mettre à point nommé le jeu en ordre !

Laplace résout formellement ce problème en introduisant les probabilités *a priori* $|A)$ de A et $(B|$ de B, et écrit la probabilité jointe de A et B sous la forme

$$|A) \cdot (B| \equiv |A) (A|B) (B| = |A|B) (B| = |A) (A|B|.$$

Disons plutôt que c'est moi qui ai récemment introduit ces notations très condensées. Laplace emploie l'équivalent des deux dernières expressions, où $|A|B)$ et $(A|B|$ notent les « probabilités conditionnelles extrinsèques » de A si B et de B si A, *en général non égales entre elles*.

Laplace formalise l'irréversibilité statistique en notant que

$$|A|B) = (A|B| \text{ si et seulement si } |A) = (B|.$$

Un siècle plus tard Boltzmann, dans le contexte plus étroit de la mécanique statistique, produit en d'autres termes la même théorie de l'irréversibilité. Il répond ainsi à une objection de Loschmidt.

En bref, il y a *réversibilité de droit* de la probabilité conditionnelle, mais une possible *irréversibilité de fait*, exprimable en termes d'une *inégalité entre les probabilités a priori* de A et de B.

J'ai dit que les deux occurrences A et B ne se suivent pas nécessairement dans le temps. Aux termes de la théorie de la relativité la séparation entre A et B peut être soit « du genre temps », soit « du genre espace » :

$$c^2t^2 > x^2 + y^2 + z^2, \text{ ou } c^2t^2 < x^2 + y^2 + z^2.$$

De plus il convient très souvent d'exprimer une probabilité conditionnelle $(A|C)$ avec une sommation sur des états intermédiaires B , suivant

$$(A|C) = \sum (A|B) (B|C).$$

Un exemple illustrera ce propos.

Dans un Parc National on peut s'interroger sur la probabilité jointe $|A) \cdot (C|$, ou sur la probabilité conditionnelle (intrinsèque) $(A|C)$, qu'il y ait en A le mâle et en C la femelle d'un couple d'ours, la séparation AC pouvant être soit du genre espace (disons que A et C sont simultanés) ou du genre temps futur (A avant C) ou du genre temps passé (A après C). *Couplage* signifie *interaction* ; par exemple les deux ours peuvent se rencontrer en un lieu « réel mais caché » B . Il convient alors de sommer sur les *possibilités* C , en employant la précédente formule.

Il est tout à fait indifférent que, dans l'espace-temps, le zigzag ABC ait la forme V , ou \wedge , ou $<$, (ou disons C). C'est ce que j'appellerai *l'invariance topologique* de la précédente formule. La sommation sur B est *intermédiaire* au sens *algébrique* évident sur la formule, sans *aucune* référence à la coordonnée temps.

Les précédentes formules schématisent, en termes de géométrie spatio-temporelle, l'algèbre des probabilités conditionnelles de Laplace. Ainsi, et *contrairement à un préjugé très répandu*, la géométrie spatio-temporelle n'est *pas* liée à une métaphysique déterministe, puisqu'on vient de voir qu'elle s'accorde *parfaitement* avec un schème probabiliste. Il y aura lieu de commenter ce fait un peu plus loin.

Voyons maintenant en quoi consiste la révolution du « calcul ondulatoire des probabilités » de Born et de Jordan.

Ils utilisent une *amplitude conditionnelle* « complexe » (avec une partie réelle et une partie imaginaire), dotée de la *symétrie hermitienne*

$$\langle A|C \rangle = \langle C|A \rangle^*$$

(où l'étoile note le passage au complexe conjugué).

Ensuite ils utilisent une suite de formules exactement parallèles aux précédentes, soit

$$|A\rangle\langle B| = |A\rangle\langle A|B\rangle\langle B| = |A|B\rangle\langle B| = |A\rangle\langle A|B|,$$

et $\langle A|C\rangle = S \langle A|B\rangle \langle B|C\rangle,$

en remplaçant partout le mot *probabilité* par le mot *amplitude*. Mais *parallélisme* ne veut pas dire ici *superposabilité*, parce que leur *probabilité conditionnelle* $\langle A|B\rangle$ est liée à leur *amplitude conditionnelle* $\langle A|B\rangle$ suivant

$$(A|B) = |\langle A|B\rangle|^2.$$

Le carré du second membre contient des « termes carrés » et des « termes rectangles ». Les premiers, s'ils étaient seuls, redonneraient les lois du calcul classique des probabilités. *Mais il y a les termes rectangles*, qui sont du type interférence ou battement optique, et qui entraînent les mille et un paradoxes de la mécanique quantique, admirablement bien vérifiés par l'expérience. Ce phénomène s'appelle *non-séparabilité* ou *non-localité* quantique, suivant qu'on le pense en termes algébriques ou géométriques. Il s'ensuit que les termes intermédiaires B sur lesquels porte la somme S ne peuvent plus être dits (ni pensés) « réels cachés », mais doivent être dits (et pensés) *virtuels*.

Ceci étant, le problème *analogue* à celui du couple d'ours s'appelle corrélation d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) si le zigzag ABC a la forme V , corrélation EPR inverse s'il a la forme \wedge , « dragon nébuleux de Wheeler » s'il a la forme C .

Le « dragon nébuleux » est un « système quantique » évoluant entre sa préparation $|A\rangle$ et sa mesure $|C\rangle$. Seule la « queue » du dragon qu'on tient en $|A\rangle$, et sa bouche qui mord en $|C\rangle$, sont « dans » notre espace-temps empirique. « Entre » $|A\rangle$ et $|C\rangle$ il n'y a qu'un « dragon nébuleux » sur lequel on ne peut rien savoir et ne doit rien penser — si ce n'est qu'il est une « somme d'états virtuels ».

Un discours semblable vaut pour les corrélations EPR. Dans la

corrélation directe, portant sur deux mesures $|A\rangle$ et $|C\rangle$ issues d'une origine commune en B, il y a deux bouches qui mordent, l'une en $|A\rangle$ et l'autre en $|C\rangle$, mais en B rien de plus qu'un « dragon nébuleux ». Dans la corrélation inverse, où deux préparations $|A\rangle$ et $|C\rangle$ convergent sur une mesure finale B, il y deux queues tenues l'une en $|A\rangle$ et l'autre en $|C\rangle$, mais en B rien qu'un « dragon nébuleux ».

C'est cela le « paradoxe EPR ». Il a fait couler beaucoup d'encre. Mon interprétation en est basée sur le concept d'une *causalité non fléchée*, purement et simplement identifiée à celui d'une *amplitude conditionnelle*.

*
* * *

L'invariance relativiste des lois physiques s'exprime, avons-nous vu, comme l'invariance des figurations géométriques quadridimensionnelles sous les rotations du tétrapode des axes cartésiens.

Dans l'espace tridimensionnel ordinaire une rotation du tripode cartésien ne permet pas d'échanger la droite et la gauche ; pour cela il faut une symétrie-miroir, le retournement d'un ou de trois axes du tripode. Semblablement, dans l'espace-temps, les rotations du tétrapode ne permettent ni l'échange droite-gauche, ni le retournement du temps ; il faut pour cela un retournement des axes d'espace, noté P, et un retournement de l'axe du temps, noté T.

Pour cette raison les rotations du tétrapode, appelées aussi *transformations de Lorentz stricto sensu*, sont dites « orthochirales » et « orthochrones ». Elles préservent les lois d'irréversibilité macroscopiques (croissance de l'entropie ou de la probabilité, divergence des ondes, causalité « retardée »). Mais l'objection qu'avait faite Loschmidt à Boltzmann a mis en évidence que l'irréversibilité macroscopique est, comme on dit, « de fait et non pas de droit » : à la *microréversibilité de droit* s'oppose jusqu'à un certain point une *irréversibilité macroscopique de fait*. Par là s'impose

l'idée que, sous « l'invariance macrorelativiste » précédemment définie, existe une « invariance microrelativiste » incluant, en plus des rotations du tétrapode, ses retournements P T . Toutefois la vérité est un peu plus subtile.

Une *réflexion forte du tétrapode*, notée $\Pi\Theta$, a deux effets : le retournement des évolutions physiques à la Loschmidt, impliquant l'échange des émissions et des absorptions et celui des préparations et des mesures ; on le note P T et l'appelle « inversion covariante du mouvement. Mais la réflexion $\Pi\Theta$ a aussi un autre effet : elle retourne les flèches des quadrivecteurs, et, de ce fait, en raison de l'interprétation du couple particule-antiparticule due à Dirac et à Feynman, elle échange les particules et les antiparticules, une opération notée C . Au total

$$\Pi\Theta = C P T = 1,$$

le 1 final exprimant le *postulat* de l'invariance des lois microphysiques sous les rotations et les retournements du tétrapode.

L'expérience montre que les lois microphysiques sont bel et bien $\Pi\Theta$ ou CPT — invariantes.

Une petite fable rendra cette conceptualisation moins abstruse.

Soit un film de cinéma montrant une voiture française (direction à gauche) entrant dans un garage en marche avant. Retourné recto-verso (opération P) le même film montre une voiture anglaise (direction à droite) entrant dans un garage en marche avant. Défilé à rebours (opération T) le film montre une voiture française sortant d'un garage en marche arrière. Retourné recto-verso et défilé à rebours (opération P T) le film montre une voiture anglaise sortant d'un garage en marche arrière.

Convenons d'appeler *particule* une voiture (française ou anglaise) en marche avant et *antiparticule associée* une voiture (anglaise ou française) en marche arrière ; appelons aussi *absorption* l'entrée dans, et *émission* la sortie du garage. On voit que l'opération PT entraîne l'opération C , ce qu'on peut noter $CPT = 1$,

et qu'elle échange l'émission d'une particule avec l'absorption d'une antiparticule (ou vice-versa).

Dans le jargon relativiste on peut dire que le film imprimé est en quelque sorte un objet spatio-temporel dont il existe diverses images, dites « relatives » au référentiel choisi. En particulier les opérations PT (inversion covariante du mouvement) et C (échange particule - antiparticule) ne sont, selon l'invariance microrelativiste, que *deux images relatives d'un même processus*.

Il y a là un bel exemple de *géométrisation de la physique* — un leit-motiv en théorie de la relativité.

Je terminerai là-dessus mon tour d'horizon des paradigmes relativiste et quantique.

*
* *
*

En conclusion, l'on peut dire que le paradigme, extrêmement cohérent, et très bien vérifié expérimentalement, de la mécanique quantique relativiste, est le fruit d'une « révolution copernicienne ».

Espace et temps conjoints, causalité non fléchée, non-séparabilité ou non-localité quantiques, télégraphie spatio-temporelle dont les « canaux » sont des ondes et dont la cybernétique est « ondulatoire », voilà une brève énumération qui n'épuise pas (loin s'en faut) le contenu du paradigme.

On est au seuil d'un Nouveau Monde, à la luxuriance de Forêt Tropicale, dont l'exploration ne cesse de provoquer des surprises et de susciter l'émerveillement. C'est un fantastique « Paradis Terrestre », qui réfère à son Créateur dans un sentiment de respectueux émerveillement.