

LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ ET L'ÉQUIVALENCE PHYSIQUE ENTRE L'ESPACE ET LE TEMPS

PAR O. COSTA DE BEAUREGARD
Maître de Recherches au C.N.R.S.

Il y a, pour le physicien, deux grands aspects de l'entité temps, l'un et l'autre d'une extrême richesse.

Sous l'un de ses aspects, déjà considéré à plusieurs reprises et de manière presque exclusive dans les chapitres précédents, le temps révèle une communauté de nature avec l'espace, et ceci par l'intermédiaire du mouvement. Chacun connaît l'affirmation fameuse d'Aristote : « le temps est le nombre du mouvement ». L'on peut dire que l'histoire de la grandeur physique temps à travers la mécanique, l'optique, l'électromagnétisme classique et — pour finir — la théorie de la relativité restreinte d'Einstein (1) n'est qu'un long commentaire de cette formule qu'aimait citer Emile Picard : « nous mesurons le temps au moyen du mouvement et le mouvement au moyen du temps ! (en terme moderne nous dirions le changement) ».

Pour les physiciens, l'aspect aristotélicien du temps c'est celui du temps grandeur physique mesurable, c'est-à-dire, du temps valablement défini comme additionnable à lui-même dans son domaine, la durée. Ceci s'opère essentiellement par le rattachement de la grandeur aux longueurs spatiales qui sont directement mesurables au moyen de lois physiques universelles, c'est-à-dire indépendantes des particularités de la matière intervenant

(1) Ces thèmes ont été développés en grand détail dans : *La notion de temps, équivalence avec l'espace*, Paris, Hermann, 1963.

dans l'application de la loi. La loi dynamique $F = m\gamma$ de Galilée-Newton est une loi universelle (1) qui réfère la grandeur physique temps aux trois grandeurs directement mesurables (à l'aide des règles, de dynamomètres ou de leviers) : espace, force, masse. Cette loi permet enfin de définir — de manière indirecte — le temps comme grandeur mesurable. Et les formules de changement de repère inertiel dites de Lorentz-Poincaré (qui furent écrites en réalité pour la première fois par Voigt en 1887) forment un groupe de formules universelles; **pour la première fois, elles rapportent directement la mesure du temps, à celle de l'espace, grâce à l'introduction de la constante universelle c , accomplissant ainsi, avec une pureté inespérée, la synthèse déjà espérée par Aristote.**

Le chronométrisme a suivi un progrès parallèle à celui accompli dans l'histoire des idées, dont on vient de voir le point de départ et le point d'arrivée. La loi dynamique de Galilée-Newton s'est incarnée dans les horloges et les chronomètres de Huyghens. C'est elle aussi qui est la clé de la lecture de la grande horloge céleste : la cinématique céleste de Képler, qui a relégué au musée celle d'Endoxe et celle de Ptolémée, implique la dynamique céleste de Galilée et de Newton. Et au point d'arrivée de la longue génération des chronomètres mécaniques et électromagnétiques, nous trouvons les tous nouveaux chronomètres à stabilisation moléculaire ou atomique, que nous montrerons être les réalisations idéales de l'horloge aristotélicienne.

Mais avant d'entrer dans le vif de ce problème du temps grandeur physique mesurable, il est impossible de ne pas évoquer brièvement tout un autre aspect de la grandeur physique temps, lui aussi très capitivant.

Que penserait-on d'une Thermodynamique qui, ayant découvert l'équivalence physique entre la chaleur et le travail, ne formulerait pas aussitôt un second principe destiné à sauver et, s'il se peut, à révéler la source profonde de ce qui fait l'irréductible originalité de la chaleur et à rendre compte d'expériences bien plus familières que celles démontrant sa communauté de nature avec le travail ? Bien avant de découvrir qu'il y a un coefficient universel de conversion du travail en chaleur, nous savons fort bien que la transformation monotherme de travail en chaleur est très aisée et la transformation réciproque impossible, et aussi que la chaleur coule spontanément des sources chaudes vers les sources froides.

(1) Voir note précédente.

Et on comprend fort bien les protestations d'un Bergson contre ce qu'il appelait si exactement la « spatialisation du temps » par la mécanique, par l'électromagnétisme et, finalement, par la théorie de la relativité. Le physicien, cela va sans dire, ne peut aucunement renoncer à cette idée à la fois si ancienne et si prodigieusement féconde de la spatialisation du temps. Seulement, après avoir examiné soigneusement tous les aspects de ce premier principe de la science du temps, il aura aussi l'obligation stricte de discuter non moins soigneusement ce que j'appellerais volontiers le second principe de la science du temps, cet aspect « bergsonien » d'irréductible originalité, d'irréversibilité, de devenir, qui répond à une expérience bien plus directe et vitale que celle de l'aspect aristotélécien. Tous le monde sait bien que l'on peut aller et venir dans l'espace, mais qu'on ne peut hélas ni retourner dans le passé, ni jeter des coups de sonde dans l'avenir.

Nous allons maintenant délibérément laisser de côté tout ce qui est de l'aspect bergsonien du temps, pour nous consacrer à l'étude de son aspect spatialisable ou aristotélécien, renvoyant le second aspect à un chapitre ultérieur.

*
*
*

Nous avons déjà dit comment la formule universelle $\mathcal{F} = m\gamma$ de la dynamique de Galilée-Newton, a, la première, fourni une authentique définition du temps comme grandeur physique mesurable. Il faut insister maintenant sur la connexion très intime qui s'est nouée entre le problème du temps, grandeur physique mesurable, et le principe de la relativité restreinte.

Ce que nous appelons aujourd'hui le principe de la relativité restreinte a été initialement découvert comme principe de relativité de la Dynamique. Très cachée aux yeux du simple bon sens (j'en appelle au témoignage des étudiants en mécanique générale) il s'est défini par opposition à deux principes antérieurs, l'un beaucoup plus strict et l'autre beaucoup plus large. D'une part, une sorte de sublimation de notre expérience ancestrale et enfantine de la « Terre ferme » voudrait poser en principe l'existence d'un repère absolu des espaces, mais, d'autre part, la cinématique classique — utilisant les motions de l'espace euclidien, des figures solides de cet espace et du temps universel — en vient aussitôt à récuser cette idée et à poser à sa place un principe du mouvement relatif, en vertu duquel tous les repères solides de l'espace, quels que soient leurs mou-

vements relatifs, tournants ou accélérés, conviennent équivalement à la description des mouvements.

Ces deux principes extrêmes, celui du repère absolu des espaces et celui du mouvement relatif sont, l'un et l'autre, beaucoup plus primitifs et plus naturels que le principe de relativité restreinte de la Dynamique. L'on ne devinerait pas d'emblée que l'expérience du pendule de Foucault permet la mise en évidence de la rotation terrestre et il est très remarquable que l'affaire Galilée représente en fait la première bataille livrée au nom du principe de relativité restreinte : fort traditionnellement, les adversaires de Galilée tenaient à la fois les deux principes extrêmes du repère absolu des espaces (la « terre ferme ») et du mouvement relatif (« que l'on peut dire aussi bien que le Soleil se meut par rapport au solide terrestre que le contraire »).

Quelle était donc l'intuition profonde de physicien qui autorisait Galilée à affirmer qu'il est plus vrai de dire que c'est la Terre qui se meut et qui tourne ? C'était, chez le législateur du principe de l'inertie, la référence implicite au mouvement inertial du centre de gravité du système solaire, lequel, en raison de l'énorme prépondérance de la masse du Soleil est pratiquement confondu avec le centre de cet astre. *Nous voyons aujourd'hui que Galilée annonçait Einstein*; et ne doutons pas que la découverte de l'espace-temps quadri-dimensionnel représente dans l'histoire de l'humanisme une date aussi importante que celle de la prise de conscience de la rotondité de la Terre et de l'héliocentrisme.

Dans une dernière digression, je voudrais poser la question de savoir ce que sont devenus les vieux principes du repère absolu des espaces et du mouvement relatif.

Le principe de relativité restreinte de la dynamique, dûment remanié par Lorentz, Poincaré, Einstein, est devenu un principe universel de la Physique; c'est lui qui a permis la découverte de l'espace-temps quadri-dimensionnel de Minkowski. Eh bien ! le vieux principe de mouvement relatif n'est pas mort définitivement pour autant, ou du moins, en mourant, il a laissé une place vacante et s'est nommé un successeur : le principe de relativité généralisé, *en vertu duquel tous les systèmes de coordonnées univoques de l'espace-temps conviennent équivalement à la description du mouvement.* Et quant au très primitif principe du repère absolu des espaces, qu'on a bien cru pendant quelque temps décidément remonté au ciel mythologique, lui aussi a fait sous une forme d'ailleurs entièrement renouvelée, sa réapparition en cosmologie, où l'on sait définir, à l'échelle

globale, un repère privilégié des espaces et un temps cosmique universel. Il va sans dire qu'après leurs violentes disputes des siècles passés les trois principes de relativité font aujourd'hui très bon ménage : preuve qu'il suffit souvent de bien s'expliquer à fond pour que la vérité, éventuellement contenue dans toute conviction, trouve sa forme adéquate.

* * *

C'est ici le principe de relativité restreinte d'Einstein qui nous intéresse au premier chef et il faut d'abord insister sur sa relation intime avec le principe d'inertie de Galilée.

Réduisons l'horloge dynamique à son schéma le plus épuré, celui du point matériel libre. Le principe d'inertie de Galilée stipule que le mouvement de ce point matériel est rectiligne et uniforme; nous avons donc ici une concrétisation très épurée de l'horloge aristotélicienne, où le temps et l'espace sont mis en relation très directe par l'intermédiaire du mouvement (« mouvement local » d'Aristote).

Il est très important de bien voir que la loi d'inertie de Galilée n'aurait strictement aucun sens si l'on ne considérait pas qu'elle recèle deux définitions :

1) Une définition de la famille équivalement privilégiée des repères galiléens de l'espace, qui sont tous en translation uniforme les uns par rapport aux autres.

2) Une définition de l'échelle galiléenne du temps. *En effet un mouvement ne saurait en général être rectiligne et uniforme à la fois ni :*

a) Dans deux repères solides de l'espace en translation accélérée ou en rotation l'un par rapport à l'autre;

b) Dans deux échelles de temps reliés par une fonction monotone quelconque.

Soit dit en passant, nous avons ici une très belle illustration de deux lois épistémologiques bien mises en lumière respectivement par Duhem et Poincaré : une découverte d'origine expérimentale (ici, la loi de l'inertie) n'impose pas, mais suggère et permet la formulation d'une loi, d'une hypothèse ou d'un principe. **Et tout postulat équivaut en fin de compte à un système de définitions.**

Ayant reconnu que la dynamique ignore complètement le soi-disant repère absolu des espaces, les classiques ont pensé demander à l'Optique de le leur découvrir. En effet, comme ils croyaient à l'existence d'un éther, support des vibrations lumineuses, l'idée venait d'elle-même d'identifier ce milieu matériel idéal au repère absolu des espaces. Nous voyons ainsi, dès l'origine de cette recherche, se nouer une alliance essentielle entre la cinématique et l'optique, ces deux sciences du mouvement sans matière. Alliance qui trouvera un dénouement inattendu et éclatant avec la théorie de la relativité restreinte et sa fille spirituelle, la Mécanique ondulatoire : une régence universelle de la science des ondes sur la cinématique et sur la dynamique elle-même.

L'attaque expérimentale de ce nouveau problème a été menée en deux temps : l'un, inauguré en 1818 par Arago, est celle des expériences du premier ordre infinitésimal en $\beta = v/c$; le second, inauguré en 1887 par Michelson et Morley, celle des expériences du second ordre en β . Dans les deux cas, la théorie a riposté au « résultat négatif » de l'expérience par une formule appropriée, non seulement bien meilleure mais qui s'est trouvée être une formule universelle, c'est-à-dire indépendante des spécifications particulières de la matière utilisée : formule dite de l'entraînement de l'éther de Fresnel en 1818; formule dite de la contraction des longueurs matérielles sous le vent d'éther de Fitzgerald et Lorentz, en 1895.

Le défaut épistémologiquement rédhibitoire du discours enrobant l'une et l'autre formule étant de n'introduire le « vent d'éther » que pour l'escamoter du résultat final : on affirmait à la fois l'existence de l'éther et l'impossibilité absolue de le dévoiler expérimentalement. A cette situation éminemment désagréable, il fallait à la fois un remède épistémologique et un remède technique.

Le remède épistémologique, vers lequel s'orientaient notamment Mascart et Poincaré, était d'affirmer que le principe de relativité de la Dynamique — affirmant l'équivalence privilégiée des repères galiléens — est le principe universel de relativité de la physique. Ceci impliquerait le rejet explicite des deux notions solidaires de l'éther et du repère absolu des espaces, toutes deux condamnées en tant que « métaphysiques ».

Le remède technique était un appel à la théorie mathématique des groupes, qui implique la théorie de la Relativité restreinte. C'est ce que fit Poincaré sur la base de l'expérience du second ordre, obtenant ainsi la forme définitive des formules antérieurement proposées par Lorentz, et même déjà par Voigt en 1887. Mais il est très intéressant de voir que

l'expérience du premier ordre de 1818 aurait suffi, elle aussi, avec un appel à la théorie des groupes (dont l'origine remonte à 1830) à établir la théorie de la Relativité restreinte (Abelé et Malvaux). *Ainsi, lorsqu'on dit qu'il y a au premier ordre et compte tenu de la formule d'entraînement de Fresnel, équivalence entre les théories classiques et relativistes de l'optique cinématique, ceci n'est vrai que si l'on ignore la théorie des groupes, puisque c'est cette dernière qui établit (même au premier ordre en $\beta = v/c$) le privilège de la théorie de la Relativité.*

Montrons maintenant comment le « résultat négatif » de l'expérience de Michelson et Morley autorise à faire de la vitesse de la lumière, une constante par définition universelle.

Si l'expérience de Michelson-Morley n'avait pas donné un résultat négatif, toute évaluation du mètre étalon en termes de longueurs d'onde optiques stationnaires devrait être accompagnée d'une détermination de la direction et de la grandeur du « vent d'éther ». En somme, l'interféromètre de Michelson représente un montage différentiel de l'appareil de cette comparaison métrologique puisque l'expérience de Michelson montre que le nombre d'ondes optique stationnaires portées par une règle matérielle donnée est indépendant de l'orientation de la règle. Voyons les précisions comparées de l'expérience différentielle et de l'expérience directe. La réalisation la plus précise de l'expérience de Michelson-Morley (Joss 1930) aurait permis de déceler un vent d'éther de 1,5 km/s; alors que la précision relative (10^{-8}) expériences métrologiques, ne permettrait que de déceler un vent d'éther d'environ 50 km/s. Il y a donc, malgré tout, une importante marge de sécurité entre l'expérience directe et l'expérience différentielle, beaucoup plus fine.

Mais le temps est aujourd'hui bien loin du choc psychologique causé par le résultat négatif de Michelson : depuis l'avènement de la Mécanique ondulatoire, c'est au contraire un résultat positif qui semblerait incompréhensible. **Un corps solide en effet, doit être considéré comme une onde matérielle stationnaire (d'ailleurs fort complexe) et il est certain que les équations d'onde de toutes les particules matérielles, y compris les photons, sont cinématiquement solidaires : toutes sont donc invariantes par le groupe de Lorentz-Poincaré.** L'idée de mettre en évidence un soi-disant « vent d'éther » par une dissociation des comportements cinématiques d'un corps solide et d'une onde optique stationnaire est devenue presque inconvenable.

Mais si, comme on vient de le dire, l'expérience de Michelson établit le droit inconditionnel que l'on a de prendre la longueur d'onde d'une

radiation bien définie comme étalon des longueurs, il est d'autre part toujours permis de prendre la période d'une radiation bien définie comme étalon des temps. Poser cette double définition revient à faire de c une constante absolue, puisque l'étalon des temps est alors rapporté à celui des longueurs et ce de manière universelle.

Nous avons, ici à nouveau, une belle illustration des lois épistémologiques de Duhem et Poincaré déjà citées : le résultat négatif de Michelson n'impose pas, mais permet et suggère de faire de c une constante absolue par définition, un coefficient d'équivalence physique entre les espaces et les temps. L'antique définition aristotélicienne du temps trouve ainsi, avec la reconnaissance d'un étalon absolu des vitesses, son accomplissement ultime.

Aujourd'hui la mesure de période moléculaire ou atomique commence à entrer dans la pratique des laboratoires et on annonce d'emblée des précisions relatives, vraiment fantastiques, de 10^{-10} , 10^{-11} , voire 10^{-12} . Cette dernière précision serait même suffisante pour mettre en évidence l'effet de relativité générale sur la marche des horloges en comparant par radio la marche de deux horloges situées l'une à la surface terrestre et l'autre dans un ballon planant à 20 000 mètres. Une expérience basée sur l'effet relativiste dit « Mossbauer » a même permis la vérification de l'effet d'Einstein sur une dénivellation dépassant pas quelques mètres.

Je voudrais maintenant faire observer que la théorie de la Relativité restreinte n'est pas dépendante des seules lois de l'optique comme l'ont cru quelque temps les spécialistes de la mécanique rationnelle, un peu vexés de recevoir de l'optique des leçons de cinématique. Depuis Louis de Broglie, la dynamique elle-même s'est explicitement soumise à la science des ondes et elle a pris ainsi sur l'optique et sur l'électromagnétisme la revanche inespérée de les annexer comme un cas particulier : celui de la mécanique ondulatoire du photon.

Tout cela se passe donc, après de multiples péripéties, comme à la fin d'un roman rose : électromagnétisme et dynamique scellent une intime alliance sous le signe de l'équation de Gordon qui généralise celle de d'Alembert et qui est, comme elle, essentiellement invariante relativiste.

Par rapport au groupe classique de Galilée-Newton, la nouveauté essentielle du groupe de Lorentz-Poincaré est de transformer non seulement les coordonnées d'espace, comme autrefois, mais aussi celle de temps (avec le « coefficient d'équivalence » qu'on a défini précédemment). A chaque repère galiléen sera donc attaché dorénavant un temps propre

de Lorentz. Ceci justifie la substitution du vocable de repère lorentzien à celui de repère galiléen.

Minkowski a donné une magnifique interprétation des repères lorentziens : si l'on complète un trièdre lorentzien en ajoutant un quatrième axe sur lequel on porte le temps multiplié par c , et si l'on impose aux changements d'axes de respecter l'invariance du carré de l'intervalle spatio-temporel :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

l'on définit un espace-temps quadri-dimensionnel, et l'on montre que les repères lorentziens ne sont autres que les repères orthogonaux et d'égaux longueurs (dits encore cartésiens) de cet espace-temps pseudo-euclidien. Du coup, la loi de l'équivalence privilégiée des repères lorentziens, c'est-à-dire le principe de la relativité restreinte, reçoit une interprétation géométrique idéalement claire, puisqu'elle vient coïncider avec la loi d'équivalence privilégiée des repères cartésiens si bien connus dans les espaces sans courbure à n dimensions. N'en doutons point, **il y a là la découverte de l'une des plus grandes lois de la Nature.**

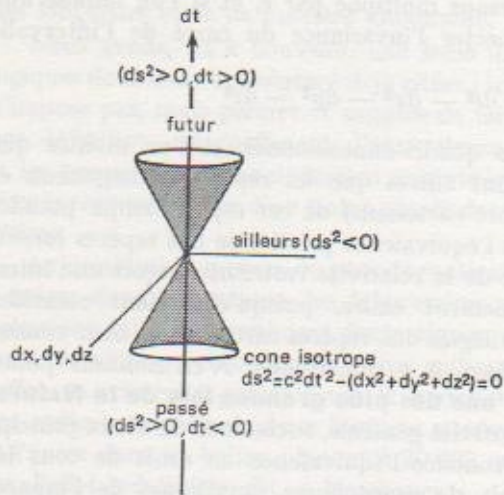
Quant au principe de Relativité générale, successeur du vieux principe du mouvement relatif, il prononce l'équivalence de droit de tous les systèmes valablement définis de coordonnées curvilignes de l'espace-temps. De ce côté aussi, tout est bien clair. Naturellement, si la nécessité survient d'avoir à renoncer à l'espace-temps plat, c'est le principe de relativité générale qui passe au premier plan, le principe de la relativité restreinte n'ayant plus alors qu'une signification locale ou comme approximation au voisinage d'un point. C'est ce qui arrive en théorie einsteinienne de la gravitation.

L'ensemble de la théorie de la Relativité restreinte, pour en rester à elle, représente une application systématique aux diverses branches de la physique (à la seule exception de la gravitation) du principe de l'équivalence physique entre espace et temps. C'est aujourd'hui l'une des théories les mieux vérifiées par un nombre d'expériences incroyablement variées et souvent extrêmement précises. L'on peut considérer la loi de la transformation réciproque de l'espace en temps par changement de repère avec le coefficient d'équivalence c et la notion de l'espace temps quadri-dimensionnel comme établies de manière extrêmement solide.

Cependant quelque chose distingue malgré tout la grandeur temps des longueurs spatiales et il y a pour le temps une loi d'irréversibilité sans équivalent du côté de l'espace.

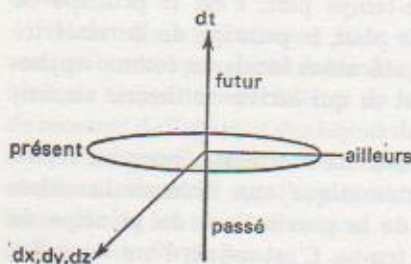
Eh bien, la théorie de la relativité rend parfaitement compte en son langage de ceci.

D'abord le fait que, dans l'espace temps, les droites de longueur nulle, telles qu'on ait par conséquent $ds^2 = 0$, sont réelles, permet de classer en



L'espace-temps est partagé en trois régions par le cône « isotrope » $ds^2 = 0$ (lieu des points dont la « distance » à l'origine est nulle, c'est-à-dire ensemble des trajectoires des messages de vitesse c); *ailleurs* est le lieu des points que l'on ne peut atteindre à partir de 0 par aucun messager

$$(dx^2 + dy^2 + dz^2 > c^2 dt^2).$$



Remarquons que si on étend le cas où c serait infini (espace-temps de Galilée Newton), *ailleurs* se réduit au *présent*. On peut communiquer avec tout point pourvu que l'on admette pouvoir disposer d'un messager infiniment véloce.

La distinction entre espace-temps (ce dernier avec sa flèche inversible) subsiste cependant encore.

FIG. 1

trois catégories les vecteurs de l'espace-temps : ceux tels que $ds^2 > 0$ dits « du genre espace », pointent dans l'extérieur du cône isotrope (cône aux génératrices de longueur nulle, d'équation $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = 0$) dit région « ailleurs » ceux tels que $ds^2 > 0$, dits « du genre » temps, pointent dans l'intérieur du cône isotrope, qui comprend évidemment deux régions, respectivement appelées « futur » et « passé ».

La distinction entre futur et passé (tous deux susceptibles d'être atteints par des messages de vitesse inférieure à c : $dx^2 + dy^2 + dz^2 < c^2 dt^2 \Leftrightarrow ds^2 > 0$) ne dépend pas du repère lorentzien choisi. Plus exactement si on postule que les quatre coordonnées sont réelles et que le groupe des changements de repère lorentzien est continu, on en déduit que le signe de la quatrième composante des vecteurs du genre temps (c'est-à-dire ceux du futur et ceux du passé) est conservé.

Si donc la théorie de la relativité démontre l'existence d'une communauté de nature entre l'espace et le temps, elle n'en maintient pas moins une distinction catégorique entre les deux entités que symbolise et explicite un signe — dans l'expression du ds^2 , et par voie de conséquence, dans une distinction fort nette entre les directions d'espace et de temps, cette dernière restant même pourvue de sa flèche classique passé-futur.

La différence fondamentale entre l'espace-temps de Galilée-Newton et celui d'Einstein-Minkowski est que le premier était coupé en deux par un hyper-plan horizontal commun à tous les observateurs, le « temps universel », tandis que le second est coupé en 3 par chaque observateur sans qu'il soit dorénavant possible de définir un temps universel.

Pour terminer, je voudrais dire quelques mots du problème, si souvent mal compris, du « boulet de Langevin ». C'est avec ce problème que Bergson s'est trouvé aux prises en un certain passage de son livre *Durée et simultanéité*, et au sujet duquel ce pénétrant analyste de la durée a pourtant commis une monumentale bévue.

Bergson emprunte à Einstein l'exemple de deux horloges H et H' , mécaniquement identiques, dont l'une reste constamment dans un même repère lorentzien, L_0 et dont l'autre est d'abord dans un repère lorentzien L_1 animé de la vitesse v par rapport à L_0 , et ensuite dans un autre repère lorentzien L_2 animé de la vitesse $-v$ par rapport à L_0 . Les deux horloges sont supposées se rencontrer initialement et finalement. Or, on démontre que l'intervalle de temps séparant les deux rencontres n'est pas trouvé le même par les deux horloges : H' , qui a sauté d'un repère lorentzien dans un autre (subissant ainsi une accélération infinie en un certain instant de sa durée) marque un intervalle de temps plus petit que H qui n'a pas quitté un même repère lorentzien. Remplacez l'accélération brutale par une accélération progressive et vous avez le phénomène du moindre vieillissement de Langevin : une cure de jouvence relativement à la communauté, obtenue par séquestration dans une thébaïde accélérée. C'est ainsi qu'on peut concevoir un astronaute allant faire un tour à grande vitesse dans le système solaire, passant, mettons, deux ans

de son âge dans l'astronef et retombant sur Terre au milieu de ses petits-enfants ! Je m'empresse de dire que pour obtenir un pareil décalage en si peu de temps, le malheureux astronaute devrait subir des accélérations vraiment terrifiantes.

Tableau de correspondance des deux figures

Espace euclidien	Espace-temps quadridimensionnel
$d^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$	$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$
courbe (trajectoire) spatiale	trajectoire dans l'espace-temps
abscisse curviligne le long de la trajectoire k	temps (propre) T_p
kilométrage	temps (sur le bracelet-montre du voyageur)

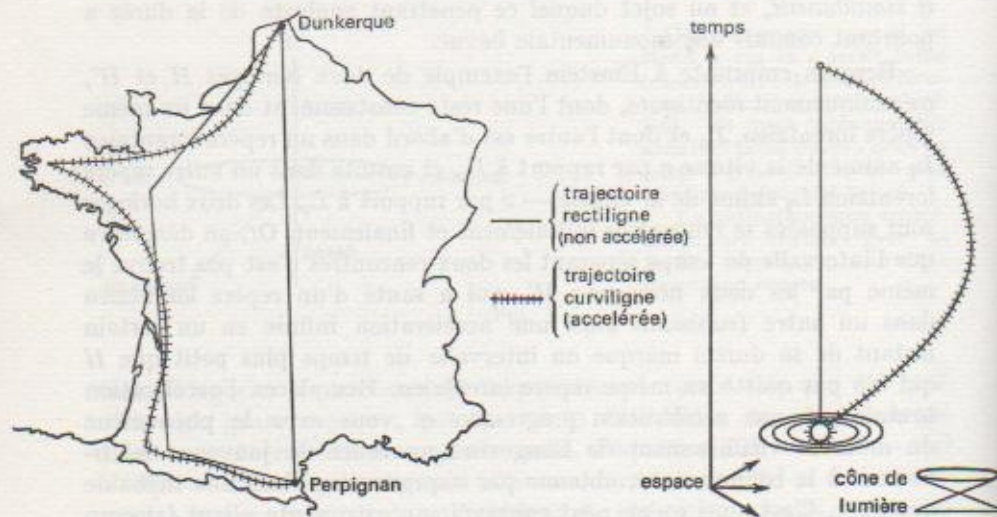


FIG. 2

Transposons ceci dans l'espace ordinaire : deux autos identiques H et H' quittent Dunkerque avec 0 kilomètre à leurs compteurs, et vont à Perpignan, l'une H par la route directe, l'autre H' en suivant la côte Atlantique et les Pyrénées. Quand elles se retrouvent à Perpignan, la première a vieilli de 1 000 km à son compteur, et la deuxième de peut-être 3 000 km. C'est là le phénomène du « voyageur de Langevin » appelé « paradoxe des jumeaux » dans les pays de langue anglaise; à ceci près qu'à cause du signe dans le ds^2 relativiste la corde est plus longue que l'arc pour les trajectoires du genre temps : c'est celui des jumeaux qui a fait un voyage en astronef, subissant des accélérations, qui se retrouve le plus jeune quand il rejoint son frère resté sur terre.

Mais retournons aux deux horloges de Bergson : Bergson conteste l'affirmation d'Einstein parce que, dit-il « c'est aussi bien horloge H' qui reste immobile et l'horloge H qui d'abord s'éloigne et ensuite revient ». On voit l'erreur; Bergson méconnaît le caractère absolu des accélérations, il raisonne avec un cinématique admettant le vieux principe du mouvement relatif, que la dynamique classique et la cinématique nouvelle — pour une fois d'accord entre elles — rejettent pour mettre à la place le principe de Relativité restreinte.

Dans l'espace-temps, tout devient très clair. L'horloge H décrit une droite du genre temps et l'horloge H' une ligne brisée coupant deux fois la droite H . Or, la ligne brisée est plus courte que la ligne droite, du fait des signes — dans le ds^2 (dans l'espace euclidien naturellement, ce serait le contraire).

Pour conclure, je dirai que le xx^e siècle est le siècle de l'espace-temps, et que cette découverte représente, pour l'humanisme, un seuil aussi caractéristique que celui de l'héliocentrisme.

La Mécanique ondulatoire avec sa constante h et la relativité généralisée avec sa constante X , sont deux grandes synthèses qui extrapolent la relativité restreinte l'une vers l'infiniment petit et l'autre vers l'infiniment grand. Il existe même un très bel argument d'Einstein et Bohr ⁽¹⁾

(1) Argument basé sur la 4^e relation d'indétermination de Heisenberg et au fond très apparenté à l'argument d'équivalence entre inertie et gravitation d'Einstein (1911). Einstein avait cru mettre en défaut la 4^e relation d'indétermination entre temps et énergie du corpuscule (en vertu de l'équivalence entre énergie et masse de la relativité restreinte : on peut peser l'émetteur d'un corpuscule avant et après l'émission). Mais alors il faut tenir compte de l'erreur de lecture de la balance, de la 3^e relation d'indétermination relative à la direction verticale et à la variation de l'étalon des temps liée aux déplacements suivants la verticale. Le calcul redonne ainsi exactement la 4^e relation d'indétermination. Il apparaît donc là une relation essentielle entre relativité restreinte, mécanique ondulatoire et relativité générale.

prouvant la nécessité logique d'une future synthèse entre relativité générale et mécanique ondulatoire.

Quoi qu'il en soit, de l'atome à la nébuleuse, toute question de physique fondamentale se traite aujourd'hui en langage quadri-dimensionnel. Bon gré, mal gré, les autres disciplines de l'humanisme vont être obligées d'emboîter le pas et ceci changera la perspective de bien des problèmes.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- H. MINKOWSKY, in LORENTZ, EINSTEIN, MINKOWSKI. — *Das Relativitätsprinzip*, Teubner, Leipzig, 1922.
- R.P. FEYNMAN. — "The Theory of Positrons" et "Space - Time approach so Quantum Electrodynamics", *Physical Review*, 76, 1949, p. 749 et p. 769.
- J.L. SYNGE. — *Relativity, the Special Theory*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1956.
- G. CASANOVA. — *Relativité restreinte*, Belin, Paris, 1961.
- O. COSTA DE BEAUREGARD. — *La notion de temps, équivalence avec l'espace*, Hermann, Paris, 1963.
- O. COSTA DE BEAUREGARD. — *Précis de relativité restreinte*, Dunod, Paris, 1964.
- O. COSTA DE BEAUREGARD. — *Précis de mécanique quantique relativiste*, Dunod, Paris, 1967.