

Présentation des relativités restreintes et générales

INTRODUCTION

Théorie construite en deux étapes : la relativité restreinte (1905) et la relativité générale (1916)

« La théorie de la relativité restreinte n'est rien d'autre que la réunion non contradictoire des résultats de l'électrodynamique de Maxwell-Lorentz et de ceux de la mécanique classique » (Einstein, manuscrit 1920, cité in Paty, 77-78).

« La relativité a changé radicalement les notions d'espace et de temps considérés jusqu'en 1905, comme des catégories indépendantes. Or, c'est la combinaison de l'espace et du temps qui est la réalité. Dans le monde auquel la relativité nous a conduits, espace et temps sont physiquement liés » (p.3)

PREMIERE PARTIE, LA RELATIVITE RESTREINTE

En 1905, il y avait au moins vingt ans que les physiciens se heurtaient à de grandes difficultés théoriques. Ils devaient admettre l'existence d'un *Ether*, milieu subtil remplissant tout l'espace et servant de support matériel à l'espace absolu newtonien.

Quoique ce ne fut pas la mécanique newtonienne qui l'exigeât, mais l'électromagnétisme. Les ondes *e.m.* vibraient dans cet *ether*.

Cet *ether* demeurait insaisissable et les expériences pour l'exhiber furent négatives. Fitzgerald et Lorentz émirent des hypothèses adaptées aux phénomènes et sauvant l'éther et l'espace absolu : la contraction dans le sens du mouvement, l'accroissement de masse des corps en mouvement et la dilatation locale du temps. Lorentz et Poincaré proposent des équations de transformation d'un système de référence à un autre, en mvt rect. Unif. (MRU) sauvant les phénomènes de l'électromagnétisme.

Einstein va montrer que les coordonnées spatiales et temporelles sont physiquement liées ; cette liaison est exprimée mathématiquement par la transformation de Lorentz. Une constante universelle généralise cette solidarité temps-espace : la vitesse de la lumière dans le vide (c'est une *pseudo-vitesse*). L'éther devient inutile. Les difficultés connues furent levées.

- L'espace-temps de la RR.

« Le cadre newtonien de l'espace absolu forme une sorte de scène infinie à trois dimensions dans laquelle se déroulent au cours du temps absolu les phénomènes physiques, le physicien mesurant et théorisant le spectacle. Mais à la fin du XIX^e siècle, l'électromagnétisme posa aux scientifiques le problème de son adéquation aux postulats fondamentaux de Newton sur l'espace et le temps. En réponse à cette interrogation, il en résulta une remise en cause de ces principes mêmes par la théorie de la relativité.

En 1905, la relativité restreinte créa un nouveau cadre infini à quatre dimensions. L'espace en lui-même et le temps en lui-même s'évanouissent, et seule l'union des deux devient la nouvelle scène formant l'espace-temps. Ce cadre redoré devient alors un nouvel absolu, ce qui conduira par la suite à une rénovation du modèle par la théorie de la relativité générale. En fait cette dernière va aller beaucoup plus loin en réalisant une théorie du cadre lui-même, l'espace-temps riemannien, en relation très étroite avec son contenu matériel. » (JHMC, p. IX)

Ceci pose la question « quelle est la **vraie** géométrie de l'espace physique » ? Cette considération est importante pour saisir ce qui se passe avec la RR et surtout la RG.

Première remarque : la “ vérité ” n’est pas une catégorie sensée de la géométrie. Les jugements de vérités sur la géométrie sont des effets de l’habitude (qui s’explique par l’origine *empirique* du choix des axiomes géométriques), qui nous a habitués à concevoir la géométrie comme *convenant avec les sens*.

Exemple, qu’une droite “ passe par deux points ” est de nature définitionnelle en ce sens que dans toutes les géométries, on convient d’appeler droite une certaine ligne unique qui passe par deux points. (exemple de la géométrie sphérique, avec les *grands cercles*) Mais ce n’est qu’en géométrie euclidienne que cette ligne nous semble un objet réel préexistant. Dans toute autre géométrie, cette propriété caractéristique n’est pas un jugement d’adéquation avec un objet réel préexistant.

Ou encore, l’idée qu’un 3^{ème} point soit *aligné* avec deux car on le “ voit ” caché par les autres. (p.12-13), est la source empirique d’une des définitions possibles de la droite (celle de Platon), mais il y a bien d’autres déf. de la droite et en outre, cette propriété optique de la droite n’est valable que pour certaine géométrie.

Leibniz insistait beaucoup sur cette situation privilégiée en géométrie : domaine de l’axiomatique **et** domaine de l’expérience.

Seconde remarque : Dans les étapes qui conduisent de l’espace géométrique formel et axiomatique à l’espace physique, conformément à la dernière phrase citée, l’établissement d’une distance (fabriquer un espace métrique) est importante. Elle donne un rôle aux « corps rigides » ” (non déformés par modification de leur situation ; qui respectent les distances mesurées sur eux ou par eux). (p.13-14). Les jugements de vérité dans un espace métrique impliquent aussi le comportement des « corps rigides » qui ne changent de dimension en se déplaçant.

La métrique habituelle « euclidienne » est appuyée sur la distance issue des coordonnées cartésiennes. Description des coordonnées cartésiennes : c’est un système de trois plans perpendiculaires deux à deux et liés à un corps rigide (trois droites suffisent pour déterminer trois tels plans) et un système de “ baguettes rigides ” pour mesurer. (p.17-18)

Distance euclidienne en deux, trois, ou quatre dimensions. (voir H et C sur les intervalles, p. 65)

Autre exemple de distance dans un espace « cartésien » : $d(A,B) = \sup (|x-x'|, |y-y'|)$, les cercles sont des carrés.

Définition d’une distance dans un espace :

Une application de E^2 dans R^+ , t.q, pour tous A, B, C.

$$d(A,A) = 0$$

$$d(A,B) = d(B,A)$$

$$d(A,B) + d(B,C) \geq d(A,C)$$

Espace et temps dans la mécanique classique. Einstein :

« Si, sans trop me faire scrupule et sans entrer dans des explications détaillées, je définis la tâche de la Mécanique dans les termes suivants : *La Mécanique doit décrire comment les corps changent de lieu avec le temps*, je charge ma conscience de quelques péchés mortels contre le saint esprit de la clarté, et ces péchés doivent tout d’abord être dévoilés.

Il n’est pas clair ce qu’il faut ici entendre par « lieu » et « espace ». Supposons que, me trouvant devant la fenêtre d’un wagon d’un train en marche uniforme, je laisse tomber, sans lui imprimer une impulsion, une pierre sur le talus. Je vois alors (abstraction faite de l’influence exercée par la résistance de l’air) la pierre tomber en ligne droite. Mais un piéton qui observe le

méfait du sentier constate que la pierre dans sa chute décrit une parabole. Je demande maintenant : Les « lieux » que la pierre parcourt sont-ils « réellement » situés sur une droite ou sur une parabole ? Que signifie ici, en outre, mouvement dans « l'espace » ? La réponse, d'après les réflexions du chapitre précédent, s'entend d'elle-même. Laissons tout d'abord de côté le terme obscur « espace » par lequel — avouons-le honnêtement — nous ne pouvons absolument rien nous représenter. À sa place nous mettons « mouvement par rapport à un corps de référence pratiquement rigide ». Les lieux par rapport au corps de référence (wagon ou sol) ont déjà été définis d'une façon détaillée dans le chapitre précédent. En mettant à la place de « corps de référence » la notion de « système de coordonnées », qui est utile pour la description mathématique, nous pouvons dire : La pierre décrit, par rapport à un système de coordonnées rigidement lié au wagon, une droite, mais par rapport à un système de coordonnées rigidement lié au sol une parabole. Cet exemple montre clairement qu'il n'y a pas de trajectoire en soi, mais seulement une trajectoire par rapport à un corps de référence déterminé.

Une description *complète* du mouvement est réalisée seulement quand on indique comment le corps change de place *avec le temps*, c'est-à-dire qu'il faut indiquer pour chaque point de la trajectoire à quel moment le corps s'y trouve. Ces indications doivent être complétées par une définition du temps telle que ces valeurs du temps puissent, en vertu de cette définition, être considérées en principe comme des grandeurs observables (résultats de mesures). Nous satisfaisons dans notre cas à cette exigence — en restant sur le terrain de la Mécanique classique — de la manière suivante. Nous imaginons deux montres constituées exactement de la même façon, dont l'une est possédée par l'homme qui se trouve devant la fenêtre du wagon et l'autre par l'homme qui se trouve sur la voie. Chacun d'eux établit à quel endroit, par rapport à son corps de référence, se trouve justement la pierre quand sa montre indique un temps déterminé. Nous renonçons ici à tenir compte de l'inexactitude due à la propagation de la lumière avec une vitesse finie. Nous en parlerons, ainsi que d'une autre difficulté qui se présente ici, plus loin d'une façon détaillée. » (Einstein, *La relativité*, p. 19-20)

Il y a ici un point décisif : pour Einstein, une notion — ici le temps — ne devient grandeur physique qu'à partir du moment où une procédure précise et pratique existe pour la mesurer.

Remarque en passant : l'énoncé : « si on laisse tomber une pierre soumise à la seule force de la gravitation, elle décrit une ligne droite » n'est pas une « loi de la nature », ni même « une loi physique » : selon le repère de description, ce peut être une parabole. La trajectoire n'est pas une loi physique.

LE PRINCIPE DE RELATIVITE AVANT EINSTEIN

SYSTEME D'INERTIE

« Le mouvement d'un corps qui n'est soumis à l'action d'aucune force extérieure est appelé un *mouvement libre*. Lorsque le mouvement libre d'un corps s'effectue à vitesse constante par rapport à un référentiel, on dit que celui-ci est un *système de référence d'inertie* ou *galiléen*. Si un système de référence est d'inertie, alors tout autre référentiel se déplaçant d'un mouvement rectiligne à vitesse constante par rapport au premier est également un référentiel d'inertie (puisque tout mouvement libre y est également rectiligne uniforme). À un référentiel d'inertie donné correspond donc une infinité d'autres référentiels d'inertie.

- Discussion critique de la notion.

Un repère galiléen, ou système d'inertie est une horreur conceptuelle. Il faut imaginer un corps dans l'univers, soumis, ni à la gravitation, ni à aucun champ électromagnétique. Il faut alors imaginer un système de coordonnées tel que, dans ce système, le corps est en MRU. Bon, mais quelles sont les directions des axes de coordonnées ? Tout ceci est une pure fiction. Comment concevoir un corps sans aucune propriété gravitationnelle ni électromagnétique.

La solution est, soit la grande fiction newtonienne, soit l'empirisme qui nous offre des pseudos repères galiléens.

Ce qui est plus solide c'est l'idée de classes d'équivalence galiléenne :

$R \sim R'$ ssi R est en mru / R' .

L'accélération permet de distinguer les classes d'équivalence.

Autre tentative de définition : un repère galiléen est un repère dans lequel les lois de Newton sont valables. Tout ceci est « circulaire », puisque les lois de Newton, pour être énoncées, ont besoin du concept de mru et que le concept de mru ne vaut que relativement à un repère.

La question est donc : y a-t-il des repères dans lesquels les lois de Newton sont valables ?

Voir le site de discussion :

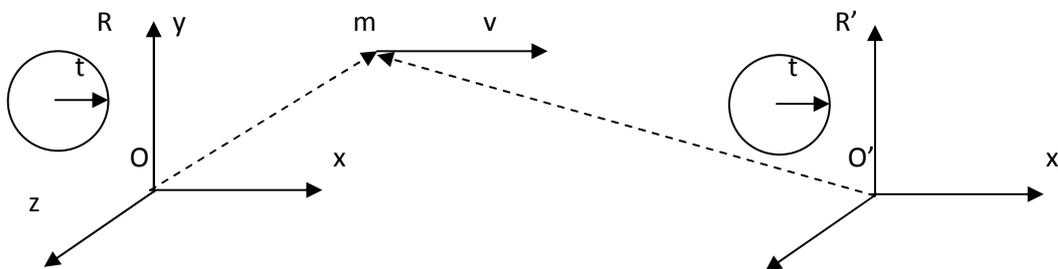
http://fr.wikipedia.org/wiki/Discussion:R%C3%A9f%C3%A9rentiel_galil%C3%A9en

Considérons deux référentiels d'inertie, R et R' , en translation relative uniforme l'un par rapport à l'autre, le mouvement s'effectuant parallèlement aux axes Ox et $O'x'$ (Fig. 1.1). Le terme *translation* désignera désormais un mouvement rectiligne.

Le référentiel R' se déplace à la vitesse V par rapport au référentiel R , dans le sens des x et x' positifs. De plus, on suppose que le point O' de R' est passé au temps $t = 0$ au point O .

Lorsque nous considérerons par la suite des référentiels R ou R' , sans autre précision, il s'agira de ceux de la figure 1.1, soumis aux conditions ci-dessus.

Temps absolu. En mécanique classique, on n'a pas besoin de préciser qu'une horloge est attachée à chaque système de coordonnées car on suppose, de manière implicite, qu'il existe une grande horloge universelle du temps. Quel que soit le référentiel utilisé, le temps est supposé s'écouler de manière identique en chaque point de l'espace et pour tous les référentiels. Ce fut Newton qui introduisit le *temps absolu* et universel ». (JHMC, p.2)



$$\begin{aligned} OO' &= v \cdot t & O'm &= O'O + Om \\ x & & x' &= x - vt \\ y & & y' &= y \\ z & & z' &= z \end{aligned}$$

Ceci forme la transformation de Galilée.

Principe de relativité restreinte (ou spéciale): " tous les systèmes d'inertie (ou encore systèmes de référence galiléens) sont équivalents pour la description du mouvement des corps ".

Un système d'inertie est un système dans lequel le principe d'inertie est respecté : " tous les corps qui ne sont soumis à aucune force sont, ou bien au repos ou bien animés d'un mouvement de translation rectiligne uniforme ".

Un repère galiléen n'est pas un repère où n'agit aucune force modifiant un mru, c'est un repère où, *s'il y a un mru, alors il se perpétue.*

Einstein écrit :

" On sait que la loi fondamentale de la mécanique de Galilée-Newton, connue sous le nom de loi de l'inertie, est exprimée dans les termes suivants : un corps suffisamment éloigné d'autres corps persiste dans son état de repos ou de mouvement rectiligne et uniforme " (*La relativité*, p.23)

" Ce n'est que pour les systèmes de coordonnées galiléens que les lois de Galilée-Newton sont valables " (Einstein, p. 24).

Les trois lois de Newton : (axiomes et lois du mouvement)

Première loi : « Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces imprimées ne le contraignent à changer son état.

Seconde loi : « Le changement du mouvement est proportionnel à la force motrice imprimée et se fait suivant la droite par laquelle cette force est imprimée » (c'est cette loi qui est en général traduite par $F = m \gamma$ (en réalité $F \Delta t = m \Delta v$)

Troisième loi : L'action est toujours égale et opposée à la réaction : c'est-à-dire que les actions mutuelles de deux corps sont toujours égales et dirigées en sens contraire. »

Avec l'exemple train-talus, nous avons la propriété suivante :

« si une masse m en mru par rapport à un système K , elle effectue aussi un mru relativement à K' , si ce dernier est en mru relativement à K . (cf. p.25-26) »

Si K est un système galiléen, tout système K' en mru par rapport à lui est un système galiléen ; « relativement à K' , les lois de la mécanique sont aussi vraies que par rapport à K » (E. 26)

« Les phénomènes de la nature se déroulent, relativement à K' , conformément aux mêmes lois générales que relativement à K . Nous appelons cet énoncé « principe de relativité » (dans le sens restreint) » (E.26)

Existe-t-il un système d'inertie ?

Un système parfaitement inertiel est difficile à réaliser ; l'accélération due à la rotation de la terre n'est pas sans effet. a). Le laboratoire associé à la terre sera une « bonne approximation », b). Le référentiel géocentrique (terre et trois axes vers des étoiles fixes) ; assez galiléen pour quelques jours. c). Le référentiel héliocentrique.

Ref. terre :

l'accélération due à la rotation diurne est de $0,034 \text{ m/s}^2$, qui explique en bonne partie la différence pour g entre le pôle et l'équateur.

L'accélération due à la révolution annuelle est 6.10^{-3} m/s^2 ; vraiment peu.

Voir les remarques du « cours de physique de Berkeley » sur ces divers repères.

En fait, il n'y a que des solides pseudo-isolés dans l'univers, mais c'est vraiment peu sensible.

Les hypothèses de base de la mécanique classique sont 4 selon le cours de Berkeley (p. 61)

l'espace est euclidien

il est isotrope : les propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace.

Les lois du mouvement de Newton sont valables dans un système inertiel.

La loi de la gravitation universelle s'applique.

- Etudier le concept de « force fictive » (voir Berkeley, p. 63-65).

Concept d'un véritable et parfait système de référence dans lequel aucune force n'est fictive (comme la force observée par l'observateur situé sur un manège qui regarde un spectateur). Newton a proposé un tel système : il est constitué de l'*Espace absolu* et du *temps absolu*.

« Le temps absolu vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle durée » (*Principes*, liv.I, scholie, p.10).

« L'espace absolu, sans relation aux choses extérieures, demeure toujours similaire et immobile » (*Principes*, liv.I, scholie, p.8).

Ce couple permet de définir le *mouvement absolu*, toutes les forces fictives y disparaissent et le principe d'inertie s'applique. Euler écrit : « l'espace absolu est le garant de la validité du principe d'inertie » (cité in Einstein, p.12). L'espace absolu newtonien n'est donc pas l'espace de la géométrie ; comme celui-ci, il est vide, homogène, isotrope, mais il a des actions sur les corps ; en effet, il est le cadre d'existence et d'action des forces réelles et donc des causes à l'œuvre dans le monde physique.

Les forces « réelles » sont définies par les physiciens comme les 4 interactions

La gravitation, 10^{38} fois plus faible que la forte.

L'interaction nucléaire forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques), $2,5 \cdot 10^{-5}$ m. La plus puissante.

L'interaction nucléaire faible (radioactivité, fusion nucléaire), 10^{-18} m. 10^{13} fois moins forte que la forte.

L'interaction électromagnétique, (lumière, électricité, magnétisme, chimie) 100 fois moins forte que la n°2)

Ainsi, la « force centrifuge » ne relève d'aucune de ces quatre là et elle est le modèle de force fictive, souvent appelée « force d'inertie ».

Une remarque assez valable :

Les forces **réelles** subies par un objet sont les forces exercées par un ou plusieurs autres objets. Il y a d'abord la force gravitationnelle (attractive) exercée par deux corps l'un sur l'autre. Par exemple, la terre exerce une force gravitationnelle sur les objets à sa surface, sur la lune, etc... Il y a aussi la force électrique entre deux objets chargés électriquement : ils s'attirent ou se repoussent. Il y a de plus la force magnétique comme par exemple la force exercée par le champ magnétique de la terre sur l'aiguille d'une boussole. Au niveau des atomes, il y a aussi deux autres forces: la force nucléaire et la force faible.

Dans la physique de Newton, il y a aussi les forces **fictives**. Mais ces forces ne sont pas des forces "réelles" comme celles décrites plus haut : les forces fictives sur un objet ne sont pas exercées par

d'autres objets. Elles sont un peu l'équivalent d'une illusion d'optique. Elles apparaissent lorsque l'observateur qui étudie un objet est lui-même en accélération par rapport au système des étoiles fixes. Par exemple, un astronaute qui se trouve dans une fusée qui accélère se sent repoussé sur son siège et a l'impression qu'une force agit sur lui pour le retenir sur son siège alors qu'en réalité il n'y a rien qui exerce une telle force sur l'astronaute. La force centrifuge fait partie de ce type de force dites fictives et apparaît lorsqu'on se trouve dans un système en rotation sur lui-même, comme par exemple dans la station spatiale du film "2001, Une odyssée de l'espace" de Stanley Kubrick. Ou encore dans Gravity, quand Georges Clooney est repoussé au loin.

Voir le seau de Newton : on peut avoir un repère où le seau est au repos mais où la surface de l'eau est déformée. Il y a une force fictive, le repère n'est pas inertiel. Cf. Berkeley, §64.

Remarque importante : vers 1900, ce n'est pas la mécanique qui exige un *espace ou repère* absolu, c'est l'électrodynamique qui a besoin de son milieu éthéré. Le choix newtonien n'est pas nécessaire pour la physique newtonienne.

LA TRANSFORMATION DE GALILEE :

Si on connaît un système d'inertie, on peut en déduire d'autres (en MRU par rapport au premier), à une vitesse v . Un événement associé à un corps ou un phénomène est un couple (position, instant) où il advient. Ce sont quatre coordonnées. Ceci forme la transformation de Galilée. (voir plus haut)

On peut donc affirmer selon la relativité que « les lois de la mécanique ont la même forme dans les deux systèmes de référence liés par une transformation de Galilée. »

Ce principe garantit la loi d'addition des vitesses. Si un corps est animé d'une vitesse w (de direction x) dans le premier système, il est animé d'une vitesse $w+v$ dans le second.

Le théorème de l'addition des vitesses d'après la Mécanique classique

« Supposons que le train dont nous avons déjà souvent parlé marche à une vitesse constante v et qu'un homme se déplace dans un des wagons dans le sens de sa longueur, c'est-à-dire dans le sens de la marche du train avec la vitesse w . Combien rapidement ou avec quelle vitesse W l'homme avance-t-il dans sa marche relativement au talus ? La seule réponse possible semble résulter de la réflexion suivante :

Si l'homme restait immobile pendant une seconde, il avancerait, relativement au talus, d'une longueur v égale à la vitesse du wagon. Mais en réalité il parcourt dans cette seconde, relativement au wagon et par conséquent aussi relativement au talus, la longueur w , qui est égale à la vitesse de sa marche. Il parcourt donc au total pendant cette seconde, relativement au talus, la longueur $W=v+w$.

Nous verrons plus tard que ce résultat, qui exprime le théorème de l'addition des vitesses de la Mécanique classique, ne peut pas être maintenu, que, par conséquent, la loi que nous venons d'écrire n'est pas tout à fait exacte. Pour le moment, cependant, nous voulons supposer qu'elle est vraie. » (Einstein, p.31-32)

Insistons donc : la théorie de Galilée-Newton est bien une théorie de la relativité (entre certains référentiels). Cette théorie de la relativité dit donc que le MRU est équivalent au repos, du point de vue de l'activité des forces (donc des causes d'éventuels changements dans les phénomènes). Soyons concrets, comme Galilée : un papillon vole dans un navire ; son vol est de même nature si je l'observe de la cabine du navire ou du rivage.

« Les papillons volent de la même manière dans le navire voguant sur les flots et à vitesse constante et dans le navire au repos à quai » (F. Balibar, *Philosophie 1*, p. 73).

Autres conséquences :

Dans R et R', on a $v = v' + V$ alors $\Delta v = \Delta v'$ et on sait que $\Delta t = \Delta t'$ (puisque $t = t'$)

Donc, $\gamma = \lim. \Delta v / \Delta t = \lim. \Delta v' / \Delta t' = \gamma'$ les accélérations sont les mêmes et, d'après la seconde loi de Newton :

$F = m\gamma = m'\gamma' = F'$ (à condition que la masse ne dépende pas de la vitesse).

Si la loi de Newton est vraie, les forces sont les mêmes dans R et dans R'.

On démontre facilement aussi la conservation de la quantité de mouvement lors d'un choc entre deux corps est vérifiée dans R' si elle l'est dans R. (Berkeley, 70-73).

Deux arguments a priori d'Einstein pour le principe de relativité

1- La mécanique classique marche magnifiquement pour les mouvements célestes, elle a « une part importante de vérité ». En mécanique classique, ce principe de relativité convenait très bien.

« Toutes les observations montrent l'existence d'un principe de relativité selon lequel toutes les lois de la mécanique sont identiques dans tous les référentiels d'inertie » (JHMC, p.2)

Comme le note Einstein,

« Tant qu'on était convaincu que tous les phénomènes de la nature peuvent être représentés à l'aide de la mécanique classique, on ne pouvait douter de la validité de ce principe » (Einstein, 26)

« Qu'un principe d'une si grande généralité soit valable avec une telle exactitude pour un ordre de phénomènes, mais en défaut pour un autre, ceci est *a priori* peu probable » (E. 27).

2- Le second est plus complexe. Si le P.R. n'est pas valide ; tous les repères en mru ne sont pas équivalents pour les lois de la physique (de la nature). Ces lois doivent être modifiées de l'un à l'autre de ces systèmes.

« On serait alors porté à croire que ces lois de la nature ne pourraient être formulées d'une manière particulièrement simple et naturelle que si, entre tous les systèmes de coordonnées galiléens, on choisissait comme corps de référence un d'entre eux (K_0)... Nous devrions considérer celui-ci, à cause des avantages qu'il représente comme étant « au repos absolu » (E.27).

Dans les autres repères, les lois de la nature seraient moins simples, en particulier, la vitesse (intensité et direction) jouerait un rôle *supplémentaire* dans les formules physiques (le principe d'inertie ne serait donc pas général ; cf. ma discussion sur l'équivalence PR/PI). Or, la terre est en révolution rapide avec changement de direction permanent : pourtant ni sa vitesse, ni sa direction variable n'ont eu la moindre influence sur l'examen et l'expression des lois physiques dans l'espace physique terrestre (ceci ne veut pas dire que ce mouvement n'intervient pas dans la physique terrestre, ceci veut dire qu'à un endroit terrestre donné, les lois sont toujours les mêmes pour les phénomènes mécaniques, les ressorts, les chutes, les percussions etc.). Considérons la terre à un date donnée de l'année ; sa vitesse relativement au repère (Soleil, étoiles fixes) est fixée ; on peut admettre localement en translation. Six mois plus tard, elle est en translation avec une vitesse de même direction, mais opposée. Aucune modification des lois n'a jamais été constatée.

« Ceci est un argument de grand poids en faveur du principe de relativité » (E.29).

Alors, qu'est-ce qui ne va pas ?

DEUX ANOMALIES PERSISTANTES

PREMIERE ENIGME. LA CRISE OPTIQUE ET LA 'MAUVAISE ADDITIVITE' DE C.

ETHER nécessaire

Depuis les travaux d'Augustin Fresnel (1788-1827), la théorie ondulatoire de la lumière s'est imposée. Elle est « un certain mode de vibration d'un fluide universel »

Depuis Fresnel et avec Maxwell, on a donc une théorie ondulatoire de la lumière. Le vieux débat Newton/Huygens semble définitivement tranché avec la défaite des positions émissionnistes, grâce en particulier aux explications des phénomènes périodiques (diffractions, interférences). Elle est un mode de vibration d'un milieu *luminifère*. Ce fluide universel est l'*éther lumineux*.

Une substance élastique devant imprégner tous les corps ainsi que le vide.

Maxwell –à la suite de Faraday- n'admet pas la transmission ou même la propagation d'un champ dans le vide. Il défend qu'un milieu matériel est nécessaire pour qu'une énergie se transmette d'une particule à l'autre.

Il écrit, en 1844 :

« Impression finale qui fait profondément réfléchir : les particules ne sont que des centres de forces ; la force ou les forces sont les éléments constitutifs de la matière : il n'y a donc pas, entre les particules, d'espace distinct de la matière ; elles se touchent ... elles sont matériellement pénétrables, probablement jusqu'à leur centre même » (*in* Taton, 223).

Attention. Certains physiciens demeurent partisans d'action à distance ; les phénomènes magnétiques, électriques (électromagnétiques et donc lumineux) se transmettent dans le vide, à distance. (Extension et maintien du modèle Newtonien, Laplacien et le paradigme d'Ampère, 1775-1836 ou Wilhelm Weber 1804-1891).

Les divers concepts d'Ether

a) Fresnel : l'Ether est un milieu matériel emplissant l'espace, à la fois rigide et élastique (pour la vibration transversale). C'est l'éther lumineux.

Selon cette première version « simple », cet éther devait constituer le *corps de référence* de la lumière. Les autres corps de référence étant en mouvement par rapport à lui. Remarque : pour la mécanique des corps matériels non électromagnétiques, l'éther était inutile (dans le sens qu'il n'avait pas de rôle physique) et l'espace absolu, une référence purement formelle.

« L'optique avait supposé qu'il y a dans le monde un état de mouvement qui se distingue de tous les autres, c'est-à-dire celui de l'éther lumineux. C'est à cet éther lumineux que devraient être rapportés tous les mouvements des objets corporels ; l'éther lumineux même apparaît comme une incarnation de la notion vide en soi de repos absolu » (Einstein, 1920, *in* Paty, n.1, p.93)

René Dugas note :

« Dans la conception de Fresnel, les ondes lumineuses ont pour support l'éther, milieu immatériel répandu dans le vide et traversant les corps matériels » (*Histoire de la mécanique*, p. 449)

b) Maxwell : il existe des phénomènes vibratoires divers, lumière, électricité, magnétisme avec des éthers adaptés à chaque. L'unification de ces phénomènes, par l'électromagnétisme s'accompagne

de l'unification de l'éther qui est le milieu commun de ces phénomènes qui sont des « états de l'éther ». (Paty 96)

Avec Faraday, Poisson, Maxwell (1831-1879). Synthèse des champs électriques et magnétiques puis optiques avec Maxwell-Hertz. Maxwell conçoit donc un *milieu porteur du champ électromagnétique*, avec des propriétés énergétiques, des tensions etc. Un *nouveau milieu* ? Il note ceci :

« Remplir l'espace 'un nouveau milieu toutes les fois que l'on doit expliquer un nouveau phénomène ne serait point un procédé bien philosophique. Au contraire, si étant arrivé par deux branches indépendantes de la science à l'hypothèse d'un milieu, les propriétés qu'il faut attribuer à ce milieu pour rendre compte des phénomènes électromagnétiques se trouvent être de la même nature que celles que nous devons attribuer à l'éther lumineux pour expliquer les phénomènes de la lumière, nos raisons physiques de croire à l'existence d'un pareil milieu se trouveront ainsi confirmées » (in Taton 3, p.185)

Remarque : renvoyer ici à Pascal contre l'éther de Descartes.

C'est l'éther électromagnétique.

c) Hertz défend un éther comme « l'espace vide doté de propriétés physiques semblables à celles de la matière pondérable...en particulier celle d'avoir une vitesse en chaque point » (Einstein, 1921, cité in Paty, 98)

Le concept d'Ether était si important que Herz écrivait, en 1889

« la pensée physique avait commencé par l'affirmation que tout ce qui est vient de l'eau et du feu et que, pour la physique actuelle, la question n'est pas très différente: tout ce qui est ne viendrait-il pas de l'éther ? » (Paty,95,n.4)

Voir le fichier, « Hertz, l'électromagnétisme » dans le Dossier « Physique » et doc. 8 du dossier.

d) Lorentz : il existe deux types de phénomènes dans l'univers : les champs électromagnétiques, qui sont des états de l'éther et des particules matérielles chargées qui se déplacent au sein de l'éther. L'éther est immobile.

Il existe des interactions entre les deux. (Gallison 257)

- Entraînement ou non :

« Sitôt l'hypothèse de l'éther admise, la question se pose de savoir quels sont les liens mécaniques qui unissent l'éther et la matière. Lorsque la matière se meut, l'éther prend-il part au mouvement ou se laisse-t-il seulement partiellement entraîner, ou bien l'éther est-il parfaitement immobile ? » (Einstein 1910, in Paty 97)

Entraînement total, thèse de Hertz et de Stokes. Ether en mouvement. Un rayon de lumière envoyé dans un courant d'eau, est entraîné par l'eau. L'expérience de Fizeau contredit cette thèse. L'éther de Hertz devient intenable.

Entraînement partiel de l'Ether, thèse de Fresnel, puis Fizeau.

Il faut admettre l'entraînement partiel des ondes lumineuses à l'intérieur d'un milieu réfringent ; vers 1820 il calcule même ce coefficient d'entraînement qui va être vérifié par l'expérience de Fizeau. Einstein rejette cette hypothèse parce qu'elle est « inutilement compliquée » (quoique conforme à

une belle expérience). Elle nécessite des suppositions arbitraires sur les relations entre l'éther et la matière en mouvement ».

Pas d'entraînement, Lorentz. C'est l'hypothèse la plus simple selon Einstein ; elle réduit le concept d'éther à une certaine dénomination du vide, où existent cependant des champs électromagnétiques générés par la matière. L'Ether de Lorentz n'a pas de propriétés dynamiques. Mais, elle privilégie un repère par rapport aux autres et n'est donc pas compatible avec la relativité.

« Maxwell se garde d'insister sur la structure de ce support et ses propriétés étranges étaient laissées dans l'ombre » (M.A. Tonnelat, *in* Taton 3, p.188)

- Les points importants

Exp. De Fizeau. Il faut éliminer la thèse de l'entraînement total.

Le principe est de faire circuler un fluide transportant de la lumière dans des directions opposées.

Remarque sur Fizeau (1819-1896) : il est déjà l'auteur de l'expérience dite cruciale en faveur de la théorie ondulatoire de la lumière (1849). La théorie émissionniste prévoit que la lumière va plus vite dans un milieu plus réfringent, la théorie ondulatoire prévoit l'inverse. Fizeau mesure la vitesse dans l'air et dans l'eau et trouve que $c_e \leq c_a$. Il écrit : « La conclusion de ce travail consiste à déclarer le système de l'émission incompatible avec la réalité des faits » (cité *in* Taton 3, p.179) (La critique est évidemment faisable de ceci).

Exp. De Michelson et Morley. Il faut détecter le « vent d'éther ».

« Les polémiques se concentrent sur le point suivant : il paraît légitime d'espérer que l'expérience va manifester au moins la plus indispensable des propriétés de l'éther : celle de constituer un milieu matériel qui baigne les corps en mouvement et dont la cinématique soit en accord avec les principes classiques. Les mouvements des corps matériels devraient produire des effets de « vent d'éther ». (M.A. Tonnelat, p.189)

Le principe est de comparer la vitesse de la lumière dans des directions perpendiculaires grâce à un *interféromètre* (s'il y a variation de vitesse de l'éther, et donc de la lumière, on peut faire apparaître des décalages de franges d'interférence). Près de 80 ans d'expérimentation : le résultat a toujours été négatif : « il est impossible de détecter un mouvement de la terre par rapport à l'éther » (E. p25).

Les deux expériences classiques décrites vont avoir en commun de montrer que la lumière n'obéit pas à la loi d'addition des vitesses Elle est une « constante universelle ». En un sens il n'est pas juste de la nommer « vitesse » (on préfère souvent *propagation*).

Ces expériences rendent aussi compte du caractère indétectable de l'éther.

On ne s'étonnera pas qu'Einstein, tôt (vers 1902 déjà) veuille rejeter l'éther de la physique : c'est une chose qui ne se mesure pas ; il n'a pas d'existence physique.

Einstein :

« L'hypothèse de l'éther forme une partie essentielle de l'image de l'univers qui se présente aux yeux des physiciens du siècle dernier » (Einstein, 1910, *in* Paty, p.92)

Description de ces deux expériences : JHMC, p.5-6

Présentation de ce qu'est une interférence d'onde et un interféromètre (bref comment elles s'additionnent).

- Expérience de Fizeau

« L'expérience réalisée par Hippolyte Fizeau, en 1851, partait de l'idée que si un milieu **réfringent** était en mouvement, on pouvait penser que l'éther lumineux serait entraîné par ce milieu. Comme la vitesse d'une flèche est entraînée par son cavalier et s'ajoute ou comme la vitesse de l'homme dans le train s'ajoute à celle du train.

Elle ne sera interprétée qu'avec les équations de la RR.

La vitesse de la lumière devait alors résulter de l'addition de la vitesse de la lumière dans l'éther et de celle de l'éther éventuellement entraîné. Afin de mettre en évidence un entraînement de l'éther, Fizeau étudia l'influence de la vitesse V d'un courant d'eau sur la vitesse de la lumière. Le principe de l'expérience est décrit par la figure 1.2. De l'eau remplit un tube coudé en verre dont les deux branches parallèles sont de même longueur. Deux rayons lumineux issus d'une même source ponctuelle S , donc en phase au départ, sont envoyés à l'aide d'une lame semi-transparente, à travers les deux branches du tube. Les trajets parcourus par les rayons sont de même longueur ; ils sont renvoyés par un miroir M , et ils viennent interférer en I en fin de parcours.

Lorsque l'eau est immobile, la vitesse de la lumière est égale à $c' = c/n$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide et n , l'indice de l'eau. A l'arrivée, on a un système de franges normales.

Si l'on suppose que l'éther lumineux est un milieu entraîné par le courant d'eau, la vitesse du rayon lumineux marqué par des flèches simples devrait être égale à $c/n + V$, et l'autre, marqué par des flèches doubles, à $c/n - V$. Les chemins optiques suivis par les deux rayons qui interfèrent sont donc différents, et l'on devrait observer un déplacement des franges d'interférence en fonction de la vitesse de l'eau.

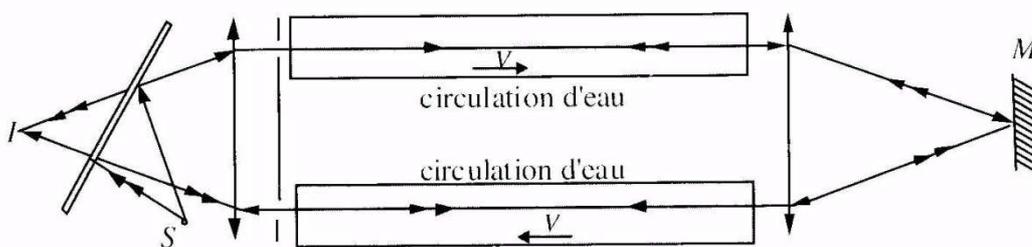


Figure 1.2

Fizeau observa bien un déplacement des franges d'interférence, mais les résultats expérimentaux montrèrent que la vitesse de la lumière dans un courant d'eau allant

dans un même sens que le rayon lumineux, est donnée par l'expression : $c'' = c/n + (1-1/n^2)V$,

L'éther n'est donc pas complètement entraîné par l'eau puisque la formule d'addition des vitesses de la relativité galiléenne n'est pas vérifiée. On ne peut pas non plus en conclure que l'éther est immobile. A l'époque, Fizeau conclut prudemment que la loi trouvée exprime simplement « le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps » sans faire d'hypothèse sur l'origine de ce changement. Ce sera seulement cinquante ans plus

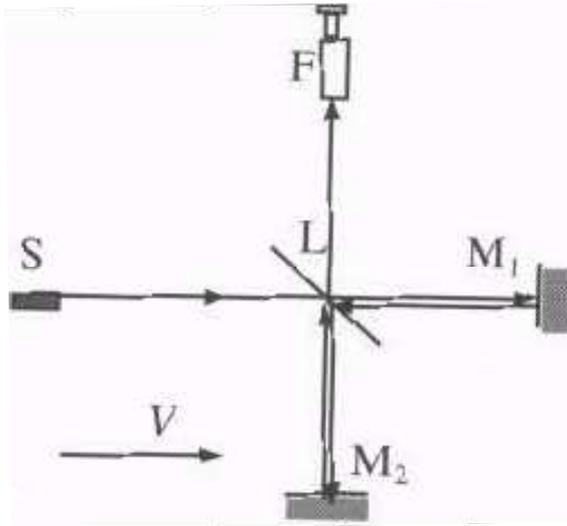
tard que la théorie de la relativité restreinte permettra d'apporter une justification à la formule expérimentale de Fizeau.

Voir la page 7 du site :

<http://expositions.obspm.fr/lumiere2005/images/dossierpedago/pedagopage7.pdf>

Expérience de Michelson et Morley

Dans l'expérience de Fizeau, la vitesse de la lumière est mesurée par rapport au référentiel que constitue le laboratoire, et non par rapport à l'éther. Or, si l'on voulait vraiment détecter l'éther, il fallait arriver à déceler un mouvement par rapport à l'éther lui-même. Pour cela, il faut que la source de lumière et l'observateur participent au mouvement étudié.



Puisqu'on supposait que l'éther était une substance imprégnant tout l'Univers, la Terre, dans son mouvement autour du Soleil devenait un vaisseau idéal se mouvant dans l'éther immobile. Certes la vitesse orbitale de la Terre, de l'ordre de $V = 30 \text{ km/s}$, est relativement faible par rapport à celle de la lumière, mais certaines techniques optiques atteignaient déjà à cette époque une très grande précision. On pouvait donc espérer montrer que la vitesse de la Terre allait s'ajouter à celle de la lumière, l'éther jouant le rôle d'un référentiel fixe

L'expérience de Michelson et Morley, réalisée en 1887, allait miner tous les espoirs. Dans cette expérience (Fig. 1.3), la lumière qui provient d'une source S est divisée en deux rayons par une lame semi-transparente L. Ces deux rayons cheminent perpendiculairement l'un à l'autre jusqu'aux miroirs M_1 et M_2 . Là, ils sont réfléchis et renvoyés sur la lame L, d'où ils partent réunis vers la lunette d'observation F, où ils interfèrent. Si les distances LM_1 et LM_2 sont égales, et si l'on place le bras de l'appareil portant le miroir M_1 dans la direction du mouvement terrestre sur son orbite autour du Soleil, les deux rayons devraient avoir des vitesses différentes, selon la loi galiléenne d'addition des vitesses. Le calcul de la différence entre les durées de parcours d'un même chemin, parallèle ou perpendiculaire au mouvement de la Terre, est cependant assez délicat car il faut tenir compte du déplacement des miroirs, dû à la translation de la Terre, durant le trajet de chaque rayon. On démontre ainsi que le phénomène optique d'interférences ne devrait pas être le même que si la Terre était immobile par rapport à l'éther.

(remarque : ne pas croire que l'aller-retour LM_1 et M_1L s'annulent, en temps de parcours et donc en vitesse moyenne).

Les interférences étant caractérisées par des bandes alternativement sombres et lumineuses, celles-ci devraient alors être déplacées d'une certaine distance. En tournant les bras de l'appareil de 90° , jusqu'à ce que le bras portant le miroir M_2 soit parallèle au mouvement de la Terre, les bandes d'interférences seraient déplacées d'une même distance mais dans l'autre sens. On a $\Delta p =$

$$\frac{2(D + D')}{\lambda \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right)$$

Pour une vitesse v de 30 km/s (celle de la terre), on trouverait $\Delta p = 0,4$ frange, ce qui est très significatif.

Or, on ne trouva pas la moindre trace du déplacement attendu. Par la suite, l'expérience fut répétée avec des perfectionnements raffinés. Rien n'y fit, aucun déplacement ne fut décelé.

Bon résumé de « ce qu'il faut en retenir » in Nottale, p. 37

Finalemment, l'expérience de Michelson et Morley contribua à démontrer que la vitesse de la lumière est dans le vide une constante, notée c , indépendante du mouvement de sa source. *Sa vitesse ne s'additionne pas à celle de sa source contrairement à ce qu'exigerait la relativité galiléenne.*

La conclusion surprenante à laquelle conduisit l'expérience de Michelson et Morley fut, parmi d'autres idées, à la base de la théorie de la relativité restreinte. Cependant, cette idée difficilement acceptable devait être testée à l'aide d'autres procédés expérimentaux, ce que firent de nombreux chercheurs au cours du XX^e siècle. Tous arrivèrent à la même conclusion pour des expériences réalisées à l'échelle du laboratoire : la vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de sa source.

Citons, par exemple, une expérience réalisée au CERN en 1964¹ avec une source de lumière à très grande vitesse. Des photons ont été produits lors de la désintégration de particules de très haute énergie, des pions neutres π^0 , qui avaient acquis une vitesse extrêmement proche de celle de la lumière, $V \approx 0,99975c$. La mesure de la vitesse des photons, émis par la source mobile à la vitesse V , a fourni une valeur égale à c avec une incertitude expérimentale estimée à ± 40 km/s, soit une erreur relative de l'ordre de 10^{-4} . » (JHMC, p.5-7)

La présentation (et le commentaire) de Mavrides est très bien. A lire (p.24-26)

Remarques : il est toujours difficile de lire les vulgarisations de physique. Ex. ici : « c indépendant de la source » ; ceci est convaincant en faveur de la constance de c , lorsqu'on réfléchit en modèle émissionniste (la flèche, le photon). Ce n'est pas convaincant lorsqu'on songe en terme d'onde ; en effet, la vitesse du son est aussi largement indépendante de la vitesse de la source. Cependant, lorsque la masse d'air est elle-même en mouvement, un observateur non entraîné par cette masse d'air observe bien une addition de vitesse de déplacement du son.

Pour la lumière, rien de tel. On n'a pas de milieu porteur. Au passage, ceci rend difficile de continuer à penser véritablement « onde » ; sans l'éther, c'est une vibration sans milieu vibrant ; disons que c'est un phénomène oscillatoire avec fréquence etc.

Sur ces points, dans son livre de vulg. Einstein est très évasif (voir le chap. 7).

Des hypothèses *ad-hoc*

L'interprétation de ce résultat donna lieu à une débauche d'imagination. George Fitzgerald imagina que tous les corps se contractent dans la direction de leur mouvement. Lorentz (1892) et Fitzgerald (1893) ont énoncé l'hypothèse suivante : afin de préserver sa théorie de l'éther. D'autres expériences suivirent pour vérifier l'hypothèse de Fitzgerald.

- Le rôle majeur de Poincaré

Voir la présentation in Nottale, p. 41 sq.

« tout corps en MRU avec une vitesse v subit une contraction dans la direction v , donnée par

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \text{ »}.$$

C'est très remarquable car ; si cette hypothèse est valide, alors, le déplacement prévu (par la théorie Maxwell/ether) des franges se réduit à zéro et on comprend que l'éther soit indétectable.

On proposa un programme de détection de cette rétraction ou contraction. Tentative (optiques) pour mettre cette contraction en évidence : échec.

Nouvelles hypothèses pour compléter la théorie : « augmentation de la masse avec la vitesse :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \text{ »}$$

Puis nouvelle hypothèse : « dilatation des durées des phénomènes par rapport à leur durée évaluées

dans l'éther », avec $t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \text{ »}$

Mavrides parle d'une « cascade de phénomènes compensateurs *ad hoc* » (p. 28)

Le bilan était donc le suivant :

« Il existe un éther. Mais il est indécélable parce que les corps en mouvement subissent une contraction de leur longueur. Cette contraction est elle-même indécélable à cause de l'augmentation de la masse avec la vitesse et de la diminution des durées dans un système en mouvement par rapport à l'éther. La transformation de Lorentz assure cette indétectabilité. H. Poincaré montre d'ailleurs que l'ensemble des phénomènes électromagnétiques demeurent invariants dans une transformation de Lorentz. On peut donc énoncer un principe de relativité restreinte pour cette catégorie de phénomènes « les lois de l'électromagnétisme ont la même forme dans deux systèmes de référence en MRU liés par la transformation de Lorentz ».

Poincaré a entamé son article de 1905 ainsi : « Il semble que cette impossibilité de mettre en évidence expérimentalement le mouvement absolu de la terre soit une loi générale de la nature ; nous sommes naturellement portés à admettre cette loi que nous appellerons le *Postulat de relativité* et à l'admettre sans restriction » (Paty, 49)

Le conflit entre mécanique et électromagnétisme est formellement en voie de résolution mais l'éther et aussi l'espace et le temps absolu sont en principe sauvegardés et les temps locaux des systèmes lorentziens en mouvement sont fictifs (ils sont moins réels que le vrai temps).

Comme le note JHMC, (p.X)

« Un aperçu historique de la relativité enrichit fortement l'esprit et montre également comment s'élaborent difficilement les théories scientifiques. On est également étonné en découvrant que les travaux de Poincaré sur la relativité restreinte sont peu connus contrairement à ceux d'Einstein. Cependant, avec un certain recul historique, la théorie relativiste est de plus en plus souvent considérée comme ayant Poincaré et Einstein pour cofondateurs. Les historiens des sciences ont encore en ce domaine quelques travaux novateurs à effectuer. »

SECONDE ENIGME : L'INDISCIPLINE DE L'ELECTROMAGNETISME

Le cadre général dominant (le programme) de la plupart des physiciens consiste à réduire l'ensemble des phénomènes physiques à des phénomènes électromagnétiques ; ce qu'on a appelé « l'image électromagnétique du monde » (In Paty, p.40) ; idée d'une réduction de la mécanique à l'électromagnétisme.

La loi de propagation de la lumière et tout l'électromagnétisme sont incompatibles avec le principe de relativité. L'addition des vitesses concernant la lumière ne semble pas s'y conformer (expériences d'Arago sur la réflexion et la réfraction de la lumière). J'y reviens un peu après.

« Il devint de plus en plus manifeste que la mécanique classique était une base insuffisante pour la description de tous les phénomènes physiques. Par là, la question se posa de la validité du principe de relativité, et il ne paraissait pas exclu que la réponse pourrait être négative » (E.26)

Maxwell (1831-1879) réussit une magnifique synthèse théorique de l'ensemble des phénomènes électromagnétiques en quatre équations essentielles (dites de champ). Il en déduit que la lumière est une onde électromagnétique (ce qui sera l'objet des expériences de Hertz) et unifie ainsi l'optique et l'électromagnétisme.

Or, deux des quatre équations de Maxwell ne restent pas invariantes par la transformation de Galilée.

Une charge électrique en mouvement crée un champ électromagnétique qui est l'état d'une onde ém en un point de l'espace. Toute particule environnante est soumise à deux forces F_e la force électrique et F_m et la force totale, force de Lorentz est donnée par $F = F_e + F_m$.

Si on fait des calculs étudiant ce qui advient à cette particule dans deux repères galiléens en mouvement, et en respectant l'addition des vitesses classique, on découvre que $F' = F - q.E.v^2/c^2$.

« La force de Lorentz n'obéit pas au principe de relativité galiléenne » (c'est insensé si $v \ll c$).

Un phénomène unique *selon les divers points de vue* (in Gallison)

Einstein commençait son article en affirmant qu'il existait une asymétrie dans l'interprétation orthodoxe de l'électrodynamique, une asymétrie absente des phénomènes naturels (g.11)

Si un aimant s'approche d'un conducteur immobile au sein de l'éther, il induit un courant que l'on ne peut distinguer de celui produit par un conducteur s'approchant d'un aimant au repos au sein de l'éther. C'était, selon Einstein, un phénomène unique. Or, la théorie orthodoxe (notamment de Maxwell) donnait deux explications différentes du phénomène selon que c'était l'un ou l'autre qui était au repos (détail g.12-13). Les causes différaient selon qu'on observait la scène du point de vue de l'aimant ou du point de vue du conducteur. (g.13)

Pour Einstein, il y a un phénomène : « l'aimant et le conducteur s'approchent, ce qui allume la lampe ».

Ceci ôtait le rôle particulier au référentiel « éther ».

« A la fin du XIX^e siècle, les physiciens s'interrogèrent donc sur l'absence de vérification du principe de relativité galiléenne par la théorie électromagnétique, ainsi que sur les mesures mettant en évidence la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels d'inertie. Il semblait difficile d'imaginer que les équations de Maxwell étaient fausses, mais pouvait-on admettre qu'elles ne soient pas de forme invariante vis-à-vis de la transformation de Galilée ?

Le postulat de relativité galiléenne ne devait-il pas être, sinon abandonné, tout au moins affiné et réadapté ? C'est ce qui allait être fait progressivement grâce aux travaux de Lorentz, Poincaré et Einstein. » (JHMC, p.13)

LA THEORIE D'EINSTEIN

Au début du siècle, telle est la situation :

a) Selon la mécanique, tous les systèmes galiléens sont équivalents pour la description du mouvement (équivalents du point de vue de l'activité des forces ; dans ces systèmes, les accélérations sont des absolus). La loi d'additivité des vitesses en découle.

b) En conséquence, la vitesse de la lumière est différente dans deux systèmes galiléens. Or,

c) L'expérience la plus sûre montre que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante c dans tous les systèmes galiléens ; elle est isotrope et indépendante de la vitesse de la source. La transformation de Lorentz assure cette constance et l'invariance des lois de l'électromagnétisme dans les systèmes galiléens.

b) et c) sont contradictoires. Einstein va montrer comment « en réalité, il n'y a aucune incompatibilité entre le principe de relativité et la loi de propagation de la lumière ». C'est l'article essentiel : « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », *Annalen der Physik*, 891-921, 1905.

Son œuvre va défendre ensemble les deux postulats suivants (donnés comme tels en 1905) :

a) Tous les systèmes galiléens (système d'inertie) sont équivalents pour la formulation des lois physiques (mécaniques aussi bien qu'électromagnétiques)

b) Dans le vide, la lumière a une vitesse constante, isotrope et indépendante de la vitesse de la source.

« Des exemples, ainsi que des expériences entreprises pour démontrer le mouvement de la Terre par rapport au « milieu où se propage la lumière », font naître la conjoncture que ce n'est pas seulement dans la mécanique qu'aucune propriété des phénomènes ne correspond à la notion de mouvement absolu, mais aussi dans l'électrodynamique » (Einstein, 2^d § de 1905, in Paty, 55).

Il va montrer que ceci est réalisable sous le régime général de la transformation de Lorentz.

Pour parvenir à cette formidable dissolution de la contradiction, il va réexaminer et modifier les concepts d'Espace et de temps et défendre la relativité des notions de simultanéité et de longueur. C'est par un réexamen des procédés de mesure que va s'effectuer cette critique.

En effet :

« La transformation de Galilée nous semble naturelle parce qu'elle est une transposition mathématique de notre perception immédiate. Il en est de même en ce qui concerne la loi d'addition des vitesses. Admettre que cette loi ne soit pas vérifiée par la lumière, mais conduite à la notion de vitesse limite, échappe à notre sensibilité car nous n'avons aucune expérience sensible des très grandes vitesses, de l'ordre de celle de la lumière. Seules la réflexion et la logique vont nous permettre d'explorer les propriétés de notre monde qui échappent à nos sens.

L'expérimentation vient contredire nos idées habituelles sur l'addition des vitesses. Or la vitesse est définie à partir du rapport entre deux intervalles, l'un d'espace, l'autre de temps. Ce sont donc *a priori* les propriétés de l'espace et du temps qui sont impliquées dans cette nouvelle loi de la nature. Les notions newtoniennes d'espace et de temps absolus vont devoir être remises en cause. » (JHMC, p.25)

Einstein, La relativité

« En présence de ce dilemme il paraît inévitable, ou bien d'abandonner le principe de relativité, ou bien la loi simple de la propagation de la lumière dans le vide. Le lecteur qui a suivi

attentivement notre exposé jusqu'à présent s'attendra certainement à ce que le principe de relativité, qui apparaît à l'esprit si naturel, si simple et presque inéluctable[^] soit maintenu, mais que la loi de la propagation de la lumière dans le vide soit remplacée par une autre plus compliquée, qui soit compatible avec le principe de relativité. Mais le développement de la physique théorique a montré que ce chemin n'était pas praticable. Les recherches théoriques extrêmement originales de H. A. Lorentz sur les phénomènes électrodynamiques et optiques présentés par les corps en mouvement montrèrent en effet que les expériences dans ce domaine conduisent nécessairement à une théorie des phénomènes électromagnétiques qui a comme conséquence inévitable la constance de la vitesse de la lumière dans le vide. C'est pourquoi les théoriciens de marque étaient plutôt portés à rejeter le principe de relativité, bien qu'on n'ait pu trouver aucune expérience qui la contredise.

Cette dernière phrase veut sans doute dire ceci : On aurait une expérience contradictoire avec le P.R. si on avait mis en évidence un repère privilégié des phénomènes, K_0 . Or les expériences Mich. Mor. Echouent à ceci. Donc, « on ne trouve pas d'expérience qui contredise absolument le P.R. ».

C'est ici qu'intervient la théorie de la relativité. Par une analyse des notions physiques de temps et d'espace, elle montra *qu'en réalité il n'y a aucune incompatibilité entre le principe de relativité et la loi de la propagation de la lumière* et que, tout au contraire, en maintenant fermement et systématiquement ces deux principes on arrive à une théorie logique qui est à l'abri de toute objection. Nous appelons cette théorie, pour la distinguer de la théorie plus générale que nous traiterons plus loin, «Théorie de la relativité restreinte », dont nous allons exposer les idées fondamentales. » (Einstein, p.35-36)

Dans l'article de 1905, Einstein annonce ceci :

« ...On peut arriver à construire une électrodynamique des corps en mouvement simple et exempte de contradictions. On verra que l'introduction d'un « éther lumineux » devient superflue par le fait que notre conception ne fait aucun usage d'un « espace absolu au repos », doué de propriétés particulières. » (Einstein, *in* Paty, 56)

Résumé du choix épistémologique :

« Nous venons de voir, au cours du premier chapitre, que les lois de la mécanique classique sont invariantes dans tous les référentiels d'inertie. Doit-il en être de même pour les lois de l'électromagnétisme ? Les phénomènes étudiés étant différents, il peut sembler que rien n'impose *a priori* une même propriété d'invariance, un principe de relativité.

Cependant une exigence fondamentale guide toute la pensée scientifique : le but de la science étant la découverte des lois de la nature, ces lois doivent être exprimées sous la forme la plus générale possible, valable pour tous et dans toutes les circonstances.

Remarquons que cette exigence d'universalité repose sur le postulat de l'existence de lois physiques, celles-ci étant supposées valides de tout temps et en tous lieux. Un Univers sans lois semble en effet difficilement concevable.

D'autre part, tous les énoncés des lois physiques portent sur des résultats de mesures et renvoient à ceux-ci. Mais dès l'instant où l'on veut effectuer des mesures, il faut utiliser un système de référence. Les grandeurs qui caractérisent l'état d'un système ne peuvent jamais être définies de manière absolue mais seulement relativement à un autre système. Elles n'ont pas d'existence par elles-mêmes mais seule la relation entre deux systèmes possède un sens physique.

Postuler qu'il existe des lois physiques c'est, de manière implicite, admettre qu'elles sont valides dans *tous* les systèmes de référence. C'est l'extension maximale du principe de relativité qu'Albert Einstein mettra en œuvre lorsqu'il posera les fondements de la relativité générale, en 1915.

La relativité restreinte, quant à elle, se borne à considérer le principe de relativité uniquement pour les référentiels d'inertie. C'est Henri Poincaré qui, en 1904, énonça clairement pour la première fois le¹ : [...] principe de la relativité, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme.

C'est une extension du principe de relativité non seulement à la théorie de l'électromagnétisme mais à toutes les théories physiques, tout en étant restreint aux référentiels d'inertie. Ce principe, postulant que la forme des lois doit être invariante dans tous les référentiels d'inertie, est également appelé *principe d'invariance* »

(JHMC, p.26-27)

Laurent Nottale estime lui aussi que « La relativité restreinte fut découverte indépendamment par Poincaré et Einstein, pratiquement à la même époque » (Nottale, p. 37)

Une question délicate : le postulat « *c* »

C UNE CONSTANTE A PRIORI ?

La manière qu'a Einstein de présenter la question de l'additivité des vitesses avec *c* est déroutante (p.33). Il donne comme *loi générale de la nature* que la lumière se déplace à *c*, dans le vide, quelle que soit la couleur, l'orientation de l'observateur et la vitesse de l'émetteur ! Revenant alors au (train-talus), il montre que selon le principe d'additivité (imposé par le principe de relativité), la vitesse de la lumière relativement au wagon doit être $c - v$. Ceci est incompatible avec le principe de relativité

« D'après ce principe, la loi de propagation de la lumière devrait, comme toute autre loi générale de la nature, être la même, soit qu'on choisisse le wagon, soit qu'on choisisse la voie ferrée comme corps de référence » (E. 35)

Déroutant car il prend comme « loi générale » en quelque sorte *a priori* la constance de *c*. Alors, évidemment, elle se heurte à l'additivité de vitesses *classique*. Comme si on savait et on s'attendait et on trouvait *normal* cette constance et qu'on était choqué de voir cette vérité en contradiction avec l'additivité.

Génériquement parlant, c'est bien plutôt parce qu'on a été assez stupéfait de découvrir que *c* était constante (astronome De Sitter qui montre que ça ne dépend pas de la vitesse d'émission de la lumière stellaire). Ceci signifie que la lumière n'a pas d'inertie, elle n'inclut pas la vitesse de son émetteur, comme la pierre du haut du mât « inclut » la vitesse du bateau (j'y reviens).

Plusieurs épistémologues et physiciens ont critiqué cet exposé ou même ce fondement à la R.R. et se sont prononcé contre « le postulat de *c* ». Dans JHMC, on a d'ailleurs cette remarque :

« Le postulat d'invariance de la vitesse de la lumière d'Einstein est à la fois inutile et surtout nuisible à la bonne compréhension et à l'acceptation des résultats concernant la relativité » (p.IX).

Jean-Marc Levy-Leblond développe une critique acérée de cette situation :

Pourtant, la démarche heuristique d'Einstein, toute couronnée de succès et justifiée historiquement qu'elle ait pu être, n'est guère satisfaisante sur le plan épistémologique. La principale critique que l'on peut lui adresser est d'établir ce que nous avons appelé une « super-loi » appelée à régir *tous* les phénomènes physiques en définissant leur cadre spatio-temporel commun à partir des propriétés d'un agent physique particulier : comment comprendre, dans une telle perspective que la relativité einsteinienne, fondée sur l'analyse de la seule propagation de la lumière, ait vocation à s'appliquer aux interactions nucléaires, de nature pourtant essentiellement différente- et y soit effectivement valide ? (*Aux contraires*, Gallimard, 1996)

Il a proposé une dérivation remarquable des transformations de Lorentz qui ne mobilise pas *a priori* la constance de c mais en fait une sorte de conséquence de la Relativité et d'une axiomatique de l'espace physique (en particulier de son caractère isotrope).

Vitesse de la lumière, Remarque de Galison (p.15-16)

Les expériences montraient que, *quelque soit la vitesse de la source lumineuse*, la lumière se déplace toujours à c . Elle n'obéit pas à l'addition des vitesses. Einstein en fait un second postulat.

attention ! arguments fins (15)

Si la lumière se résume à une vibration d'éther immobile, on peut admettre facilement que sa vitesse ne dépend pas de la source : comme l'onde sonore dans bien des cas. Une fois émise, elle va à vitesse constante dans l'air. Il pourrait en être ainsi de la lumière dans l'éther.

Mais ceci n'empêche que pour un observateur *en déplacement*, l'onde sonore n'a pas de vitesse constante. Donc, si un observateur est en déplacement dans l'éther, on devrait mesurer une variation de la mesure de vitesse de la lumière. (détail p.16)

Or, les expériences d'optique les plus précises n'avaient jamais réussi à détecter le moindre indice d'un tel déplacement au sein de l'éther.

Il y a contradiction entre les deux postulats.

LE TEMPS RELATIF

En pratique, ce temps absolu a été identifié par Newton avec le temps astronomique, celui qui se déduit du mouvement des corps du système solaire. Il n'y a là rien de logiquement nécessaire. Ce temps absolu est essentiellement indépendant des systèmes de référence ; c'est-à-dire qu'il insère un principe général selon lequel « deux événements simultanés dans un certain système de référence le sont dans n'importe quel système ». Si je dis que « le train arrive à sept heures, cela veut dire que le passage de la petite aiguille de ma montre à l'endroit marqué 7 et l'arrivée du train sont des événements simultanés » (art. 1905).

Or, si les événements sont très distants, il est moins simple de définir la simultanéité.

(Einstein, p.37-38)

« Je suppose que la foudre ait frappé la voie de notre chemin de fer en deux points A et B très distants l'un de l'autre, et j'affirme que ces deux éclairs ont été «simultanés». Si maintenant je vous demande, cher lecteur, si cette affirmation a un sens, vous me répondez avec conviction «Oui». Mais si j'insiste et vous prie de m'expliquer d'une façon plus précise le sens de cette affirmation, vous constatez après quelque réflexion que la réponse à cette question n'est pas si simple qu'elle paraît au premier abord.

Après quelque temps il vous viendra peut-être à l'esprit la réponse suivante : «Le sens de cette affirmation est clair en soi-même et n'a pas besoin d'autre éclaircissement ; certes, il me

faudrait réfléchir pendant un certain temps, si j'étais chargé d'établir par des observations, si dans le cas concret les deux événements sont simultanés ou non». Cette réponse ne me satisfait pas pour les raisons suivantes. Supposons qu'un météorologiste ait trouvé par des réflexions pénétrantes que la foudre doit toujours tomber simultanément aux points A et B ; il nous faudrait alors vérifier si ce résultat théorique correspond ou ne correspond pas à la réalité. Il en est de même pour toutes les affirmations physiques où la notion de «simultané» joue un rôle. Cette notion n'existe pour le physicien que s'il a trouvé la possibilité de vérifier, dans le cas concret, si elle est ou si elle n'est pas exacte. Nous avons donc besoin d'une définition telle de la simultanéité qu'elle nous donne une méthode au moyen de laquelle nous pouvons décider, dans le cas qui nous occupe, par des expériences, si les deux coups de foudre ont été simultanés ou non. Tant que cette exigence n'est pas satisfaite je suis comme physicien (et aussi comme non-physicien) victime d'une illusion, si je crois pouvoir attacher un sens à l'affirmation de la simultanéité. (Si vous ne m'accordez pas cela, cher lecteur, avec conviction, il est inutile de continuer.) »

Rappel d'Aristote et du temps comme « mesure du mouvement ». (Relire tout *Phys. IV, chap. 10*, « Car voici ce qu'est le temps: le nombre du mouvement selon l'antérieur et le postérieur » (219 b1).

L'objet devient physique quand il est mesuré. Le risque de réification.

Contre les concepts de choses *objectives* ou réifiées : la notion physique commence d'exister avec la mesure : la simultanéité et donc le temps commencent à exister physiquement à partir de leur mesure.

Cassirer :

« Il est clair que des concepts comme ceux de masse ou de force, d'atome ou d'éther, de potentiel magnétique ou électrique, ou même comme des concepts de pression ou de température, ne sont pas de simples concepts de choses, ni des reproductions de contenus concrets donnés dans la perception. Nous avons affaire, non pas à des reproductions de simples choses ou de sensations, mais à des propositions ou à des constructions qui sont destinées à transformer ce qui est purement sensible en quelque chose de mesurable et, seulement ainsi, en un « objet de la physique ». (p.36)

Comme l'expliquait Max Planck : « n'existe que ce qu'on peut mesurer ». (36)

La réalité du physicien s'impose ...comme un ensemble de symboles abstraits de la pensée qui servent à exprimer des rapports déterminés de grandeur et de mesures etc. (Cassirer 37 avec référence à Duhem p.37)

L'espace et le temps ne sont pas des concepts de choses mais de purs concepts de mesure. (37)

C'est un grand thème de l'épistémologie du XX^{ème} : l'objectivité est dans la relation entre des concepts hypothétiques, pas dans les choses en relation. Exemple, l'objet physique c'est $F = mg$; ça n'est pas m ou F , qui sont des choses conventionnelles.

Un risque constant de toute l'histoire de la physique a cependant été de « transformer ...ces instruments intellectuels de mesure qui sont à la pointe de leur époque, comme l'expression définitive de la réalité ontologique » (pas seulement pour la relativité, mais avant cela : force, masse, atome etc.) (38)

C'est vrai pour la matière comme pour l'énergie : systématiquement, on a eu tendance à passer « du concept logico-mathématique au concept ontologique ». (38)

Cassirer expose l'histoire de l'atome excellemment, en notant que « la fonction de l'atome, en tant qu'ultime unité de mesure, demeure inchangée » (39)

« L'atome se présente justement, non pas comme un minimum absolu de l'être, mais comme un minimum relatif de la mesure ». (40)

Il en va ainsi du lieu qui « n'est rien » comme chose pour la physique ;

Kepler sur le lieu : »omnis locatio mentis est opus « !! (41)

Le dispositif de pensée d'Einstein

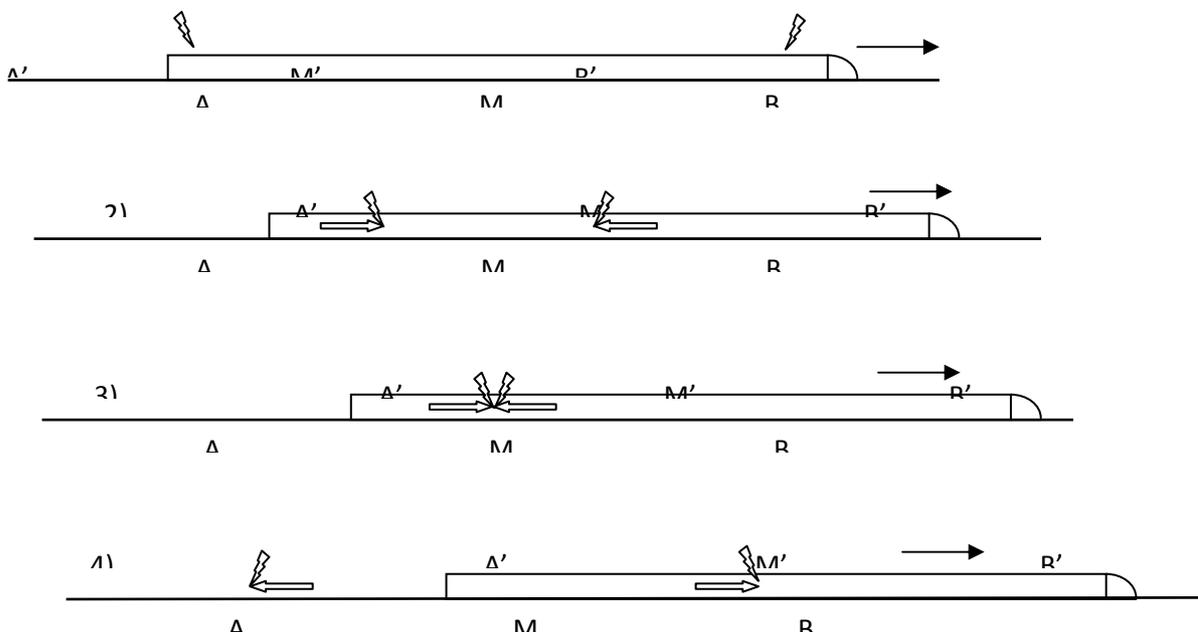
Un apport remarquable d'Einstein est de détourner la théorie nouvelle de cette « tendance réificatrice ».

Einstein prend l'exemple de la foudre qui tombe simultanément à deux endroits très éloignés A et B d'une voie ferrée. « On mesure la distance AB en ligne droite le long de la voie, et on installe au milieu M un observateur muni d'un appareil (par exemple deux miroirs à 45° permettant de voir A et B); si il voit les deux éclairs en même temps, ils sont simultanés » (*id.*)

Or, tous les signaux se propagent à une vitesse finie, les plus rapides sont lumineux, ou généralement électromagnétiques ; c'est à l'aide de tels signaux que l'on synchronisera les horloges d'un même système éloignées les unes des autres.

Si on considère un train allant de A vers B et dont le milieu M' coïncide avec M quand les éclairs se produisent ; l'observateur en M' ne reçoit pas les signaux en même temps, celui venant de B arrive avant. En effet, la constance de c relativement à l'émetteur ne signifie pas la constance du temps mis à parcourir des distances différentes : le temps de parcours de la lumière dépend évidemment du mouvement du récepteur : si il raccourcit la distance (émetteur-récepteur), il raccourcit aussi le temps de parcours lumineux. Ici donc, durant le temps que met la lumière à arriver à lui, M' aura bougé et BM' sera plus court que AM'. L'éclair arrivera « de B » avant d'arriver « de A ».

Il conclura que « l'éclair en B est avant l'éclair en A ». Ce qui est simultané pour le référentiel (M) ne l'est pas pour le référentiel M'.



- 1) La foudre tombe en A,B,A',B'
- 2) Le signal lumineux issu de B (ou B') atteint M' (avant d'atteindre M)
- 3) Les deux signaux atteignent M (qui les mesure donc *simultanés*).
- 4) Le signal issu de A atteint M'.

« La simultanéité a seulement une signification relative à un système d'inertie déterminé », l'ordre de succession des événements peut même être inversé selon les référentiels (un train allant de B vers A). « Des événements qui sont simultanés par rapport à la voie ferrée ne sont pas simultanés par rapport au train et inversement. Chaque corps de référence a son temps propre ; une indication de temps n'a de sens que si l'on indique le corps de référence auquel elle se rapporte » (Einstein, *relativité*, p.43)

Ici, une objection est possible : prenons une autre définition de la simultanéité : soient deux horloges de même fabrication et réglées de même ; deux événements sont simultanés ssi l'heure indiquée par les deux horloges est identique. Dans ce cas, l'observateur du train et du talus pourront lire l'un et l'autre le « compte-rendu d'expérience » selon lequel quand il y a eu les éclairs, les deux horloges indiquaient la même heure ; l'événement est simultané pour les deux observateurs.

Réponse à l'objection : où sont installées les horloges ? et si les horloges avaient été installées sur le train ? On les aurait disposées avant que le train ne démarre, au repos par rapport à R, de façon que la distance entre ces deux horloges du train soit la même qu'entre les horloges du talus. Est-on certain que lorsque le train est lancé à vitesse v , la distance entre les horloges est encore la même ? C'est avoir une idée *a priori* du caractère absolu de l'espace et de la distance. En fait, le train étant en marche, rien ne nous garantit que lorsque qu'une de ses horloges sera en face de A, l'autre sera en face de B.

Einstein n'hésite pas à affirmer que la notion de temps est propre à un référentiel donné et qu'il n'y a pas de temps universel et absolu. La transformation de Galilée est invalidée et la loi d'addition des vitesses qui en découlait ($w=w'+v$) doit être modifiée par une loi relativiste. Il a « simplement » abandonné toute idée préconçue du temps et l'a considéré comme une grandeur qui ne se manifeste que dans la mesure qu'on en fait.

« Par là, on arrive à une définition du temps en physique. Qu'on imagine, en des points d'un système de coordonnées, des horloges de même construction et réglées simultanément (au sens de transmission de signal lumineux). On entend alors par le « temps » d'un événement, l'indication de l'horloge immédiatement voisine de l'événement. A chaque événement est ainsi associée une valeur du temps qui est en principe observable » (*La relativité*, p.40)

Le temps est une grandeur mesurée par un certain type d'appareil, une certaine expérience, un certain genre de mouvement.

C'est là une sorte d'étincelle de la découverte d'une solution :

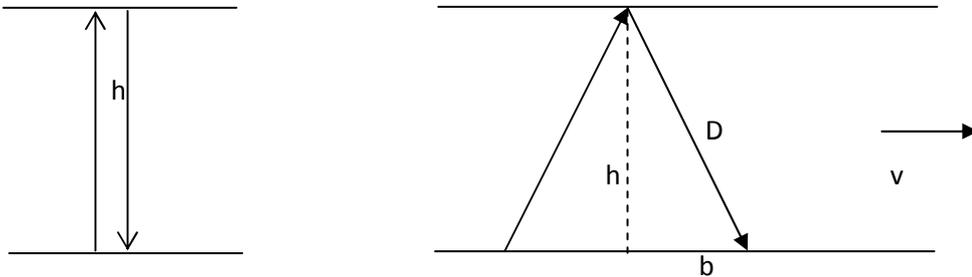
«après que j'eus eu cette inspiration, cela ne m'a pris que cinq semaines pour mettre au point ce qu'on appelle maintenant la théorie de la relativité restreinte » (Einstein, 1922, in Paty, 85)

Remarque : on a aujourd'hui des horloges atomiques dont la précision est de l'ordre de 10^{-13} s.

En 1913, autre présentation de la relativité temporelle, d'une remarquable simplicité. (p.341-43 Galison)

« Imaginez deux miroirs horizontaux et parallèles constituant une « horloge » ou chaque tic-tac est défini par le trajet d'un éclair lumineux d'un miroir à l'autre. Supposez maintenant que cette « horloge lumineuse » se déplace horizontalement vers la droite. Pour l'observateur immobile, l'oscillation verticale du rayon lumineux présente un motif en dents de scie. (remarque : en effet, en vertu du principe de relativité, le phénomène est le même si on considère que c'est l'observateur qui se déplace vers la gauche ; l'horloge lumineuse fonctionnera de même, d'un miroir à l'autre).

Vu par l'observateur, le trajet de l'horloge en mouvement apparaît plus long que l'horloge immobile. Or (second postulat de la RR), la vitesse c est la même pour tout référentiel : *même vitesse, distance supérieure, donc temps plus long*. L'observateur la mesure donc aussi à c le long des dents de scie ; le trajet est plus long et le tic-tac met plus de temps que pour une horloge immobile avec l'observateur. Superbe moyen de découverte de la formule temporelle de Lorentz :



$$h = c \cdot \Delta t \quad D = c \cdot \Delta t' \quad b = v \cdot \Delta t'$$

$$D^2 = b^2 + h^2 \quad \text{soit} \quad (c \cdot \Delta t')^2 = (v \cdot \Delta t')^2 + (c \cdot \Delta t)^2$$

d'où : $\Delta t' / \Delta t = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ceci est supérieur à 1. Donc, $\Delta t' > \Delta t$
 « Le temps propre est minimum »

Par exemple, une horloge en mouvement à une vitesse égale aux 4/5 de c apparaîtrait ralentie d'un facteur 5/3 par rapport à une semblable stationnaire.

LA LONGUEUR RELATIVISTE

Ceci entraîne de reconsidérer des notions admises comme absolues.

From Galison. Tout en découlera : les intervalles de temps dépendent de la simultanéité, les longueurs des objets en mouvements aussi, les vitesses de même et enfin l'énergie. (19 sq.) :
 « une fois démasquée la supercherie... »

« Si vous voulez connaître la longueur d'un autobus qui roule, il vous faut mesurer *en même temps* la position de l'avant et de l'arrière. Puisque la détermination de la longueur dépend des positions *simultanées* de l'avant et de l'arrière, la relativité de la simultanéité conduit à la relativité des longueurs (elle dépend de la situation de l'observateur). Mon système de coordonnées attribuera à une tige de un mètre se déplaçant par rapport à moi une longueur de moins d'un mètre. » (g.21)

Autrement dit : Soient deux étalons-mètres (deux règles) identiques avant le départ du train.

La règle-train se déplace à la vitesse du train.

L'observateur-talus veut comparer la longueur de la règle en mouvement avec la longueur de la sienne, en repos.

Il doit repérer les deux extrémités A et B de la règle-train à un même instant par rapport au talus.

Soient deux flashes simultanés ($t_A = t_B$) émis aux extrémités de la règle-train ; ils permettent de mesurer cette règle-train par l'observateur-talus.

Or, cette simultanéité sur le talus ne n'est pas pour l'observateur-train ($t'_A \neq t'_B$)

L'observateur train (au repos) a mesuré un temps plus court que celui qu'a mesuré l'observateur talus ($t'_A \geq t'_B$), le flash B est parvenu à lui avant le flash de A. Si l'on veut, l'observateur talus a mesuré un temps plus long.

Donc, l'observateur talus a mesuré une règle-train (en mouvement) plus courte que la sienne (au repos).

La mesure de longueur d'un objet en mouvement est plus courte que la mesure du même objet en repos.

On voit donc que le refus de concept *a priori*, transcendants, comme le temps, l'espace absolu, sont à la racine de la théorie nouvelle. C'est une attitude philosophique spécifique : existe comme concept physique ce qui est exhibé par un protocole expérimental de mesure (ici la synchronisation des horloges).

Einstein s'insurgeait de ce que la nouvelle physique (quantique) poussât trop loin sa propre obsession des procédures observables : « il ne faut pas répéter trop souvent les bonnes plaisanteries » (g.24)

La règle d'addition galiléenne des vitesses est remise en cause par la relativité du temps. La seconde pendant lequel le voyageur du train se déplace ne vaut pas une seconde pour l'observateur du talus et réciproquement et donc la vitesse de déplacement d'un objet pour l'un n'est pas la même que pour l'autre.

Bonne présentation de la longueur relativiste : « **la longueur propre est maximale** »

Si deux observateurs, dans le train et sur la voie se sont munis de règles identiques (1 mètre) et qu'ils veulent les mesurer lorsque le train est en marche ;

Une règle dans le train, un observateur train et un observateur talus.

L'observateur train est à la première extrémité A, l'observateur talus est juste en face (même niveau). A ce point P, Premier flash (sur le train et sur le talus). Perçu en même temps.

Quand la seconde extrémité arrive au point P, second flash. L'observateur train le reçoit après l'observateur talus. La mesure de la longueur de la règle est plus grande pour l'observateur train que pour l'observateur talus. La distance d'un même objet par l'observateur dans le même référentiel (objet au repos pour lui) est supérieure à la distance de cet objet par un observateur dans un référentiel en mru (objet en mouvement pour lui).

La longueur propre est supérieure aux longueurs mesurées par l'obs. en mouvement.

Ce n'est pas absolu ! Si on avait mis la règle sur le talus, le même raisonnement aurait donné une distance plus courte d'après l'observateur train.

Les longueurs sont elles aussi relatives au référentiel.

Ceci conforte la ruine de la loi classique d'addition des vitesses.

LA TRANSFORMATION DE LORENTZ

La contradiction du départ s'appuyait sur la conception d'un temps et d'un espace absolu (avec l'addition des vitesses).

« L'incompatibilité apparente entre la loi de propagation de la lumière et le principe de relativité dérivait d'un raisonnement qui empruntait à la mécanique classique deux hypothèses que rien ne justifie :

1° L'intervalle de temps qui sépare deux événements est indépendant de l'état de mouvement du corps de référence ;

2° La distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante de l'état de mouvement du corps de référence.

Si on rejette ces deux hypothèses, le dilemme disparaît parce que le théorème de l'addition des vitesses n'est plus valable. Nous voyons apparaître la possibilité de concilier la loi de propagation de la lumière dans le vide avec le principe de relativité » (E. 47)

Einstein se pose alors la question : y a-t-il une transformation des coordonnées de position et de temps, liant deux référentiels en MRU, qui sauvegarderait la vitesse constante de la lumière et l'équivalence des lois physiques dans les deux systèmes ?

Soit un repère K (x,y,z,t) et un autre repère en mru K'(x',y',z',t'). On doit être capable de connaître la situation spatio-temporelle d'un événement dans K lorsqu'on le connaît dans K' et réciproquement, en respectant ces contraintes.

A l'aide de considérations relativement simples qui postulent l'homogénéité de l'espace et du temps et un concept général de (distance entre deux événements, incluant temps et espace), Einstein arrive rapidement à la réponse : la transformation de Lorentz convient à la question posée.

En particulier, il part des exigences d'un rayon lumineux se déplaçant selon x, il vérifie : $x=ct$ ou $x-ct=0$; ce rayon doit respecter la loi de la lumière et donc vérifier $x'=ct'$, soit $x'-ct'=0$.

Une condition suffisante pour les points spatio-temporels relativement aux deux systèmes est la suivante :

$$(x'-ct') = \lambda (x-ct).$$

Si on considère un déplacement selon les x négatifs, on a une équation du type $(x'+ct') = \mu (x+ct)$.

Par addition et soustraction et en posant $a=(\lambda+\mu)/2$ et $b=(\lambda-\mu)/2$, on obtient :

$$x' = ax-bct$$

$$ct' = act - bx$$

Le problème devient de connaître a et b.

Voir la dérivation par Einstein comme annexe à son livre.

$$x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t-\frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{et l'inverse pour passer de } S' \text{ à } S.$$

Soit ici la *forme spéciale* de la transformation, avec les deux systèmes en translation selon l'axe des x et l'origine des temps également nulle quand O et O' coïncident.

Remarque : Quand v est petite par rapport à c, on retrouve la transformation de Galilée, et cette transformation n'a plus de sens pour $v > c$.

En 1905, « le travail d'Einstein a été vu comme une confirmation de la théorie de Lorentz, non comme une théorie concurrente ». (Paty, p. 176 et la suite jusqu'à 177).

LA TRANSFORMATION DE LORENTZ, D'UN SYSTEME A L'AUTRE

Stamatia Mavrides montre clairement les calculs de vérification suivants :

- La transformation de Lorentz respecte l'invariance de c par changement de repère.

On vérifie bien, par des considérations théoriques, que c est constante dans les deux systèmes. En effet, soit un rayon lumineux dans S , son déplacement est donné par $x=ct$

Remplaçons x par ct dans le second système ; on trouve que $x'=ct'$ cqfd.

- La rétraction des longueurs comme réciproque.

C'est un effet réciproque, observationnel de cette transformation : soit une règle de longueur $1m$ en repos dans un premier système S . Comment la mesure-t-on dans S' ?

La longueur propre est la longueur maximale mesurable. Toute mesure, en mouvement exprime une contraction de la longueur dans le sens du déplacement.

- La dilatation des durées ou le ralentissement des horloges mobiles.

De la même façon, soit un événement dont la durée dans le système S soit $1s$.

Quelle sera sa durée pour l'observateur lié au système S' ? S' est animé d'un MRU de vitesse v par rapport à S .

On a pu établir (cf. calcul feuille jointe) que sa durée sera mesurée $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

La durée propre est minimale, toute mesure, en mouvement exprime une dilatation de la durée.

Questions délicates : faut-il dire que les horloges mobiles « retardent » ? ou que le temps se dilate ? Il est plus juste de dire simplement que les temps propre et impropre sont des temps ou des durées mesurées dans des conditions différentes. Un peu comme on pouvait dire que la droite et la parabole n'étaient pas plus « vraies » l'une que l'autre.

Une mesure expérimentale : les muons. Ce sont des particules du bombardement cosmique de la terre. Ils naissent dans les couches supérieures de l'atmosphère. Un muon se désintègre selon une loi connue ; ils ont une *durée de vie propre* qu'on a calculée : $2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Leur vitesse est proche de celle de la lumière c . Leur parcours moyen devrait donc être de 660 m. Ils ne devraient pas atteindre la terre où ils sont cependant observés. C'est un phénomène relativiste. Si leur *durée propre* est de $2,2 \cdot 10^{-6}$ s, leur durée impropre, mesurée du référentiel terre est de $2,2 \cdot 10^{-5}$ s, soit dix fois plus ; il est donc *normal* qu'ils nous arrivent.

LONGUEURS PROPRE ET IMPROPRE

Les mêmes remarques fournissent une longueur propre, mesurée selon une règle fixée au référentiel où l'objet est au repos. Si on mesure cette longueur dans un référentiel en translation, on la trouve différente, avec cette fois : **Longueur propre est supérieure à toute longueur impropre.**

Il n'y a pas une « vraie » longueur d'un objet qui *diminue*. La taille de l'objet est une propriété de cet objet et, selon le principe de relativité, ne doit pas changer selon le repère, sinon, les lois de la nature ne seraient pas identiques (exemple d'un gaz dans un cube qui pourrait être liquéfié (JHMC 50)).

Considérons la règle : on en prend deux identiques, l'une dans R , l'autre dans R' ; la première sera mesurée inférieure par l'observateur R' , alors que la seconde sera mesurée inférieure par l'observateur R .

CINEMATIQUE RELATIVISTE

La loi de composition des vitesses est modifiée par rapport à la loi classique et on montre simplement que si un corps est animé d'une vitesse constante w' , parallèle à x dans un système S' , sa vitesse, relative à un système S en MRU de vitesse v ne sera pas $w = w' + v$ mais $w = \frac{w' + v}{1 + \frac{vw'}{c^2}}$

Dém. $x' = w't'$ et $x = wt$

$$\frac{w'}{w} = \frac{x'}{x} \cdot \frac{t}{t'} = \frac{1 - \frac{v}{w}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \frac{t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{t - \frac{v}{c^2}x} = \frac{1 - \frac{v}{w}}{1 - \frac{vw}{c^2}} \quad \text{d'où } w' = \frac{w - v}{1 - \frac{vw}{c^2}} \text{ et inversement } w = \frac{w' + v}{1 + \frac{vw'}{c^2}}$$

On observe que si w' ou $v = c$, alors, w est aussi égale à c . Par exemple, si deux particules lumineuses s'éloignent l'une de l'autre, leur vitesse relative est encore c (et non pas $2c$).

« Dans l'approche d'Einstein, la formule relativiste de composition des vitesses marque la réconciliation des deux principes posés dans l'introduction, et c'est elle qui sonne le glas de l'éther » (Paty, 63)

Il faut lire ici le passage d'Einstein, *La relativité*, p. 58-61, avec réinterprétation de l'expérience de Fizeau.

Remarque sur la vitesse limite : on voit que w est nécessairement inférieure à c (cf. Mavrides, p. 60)

Toutefois, c est maximale dans le vide, mais ralentie dans des milieux divers (c/n). Il est alors possible d'accélérer des particules qui vont plus vite que la lumière dans ce même milieu. (cf. Mavrides, p. 87)

- La question de la vitesse limite ; remarque supp.

La dérivation par Lévy-Leblond montre l'existence d'une vitesse limite maximale, ce qui découle nécessairement du principe de relativité. Or, en mécanique classique, on décrit l'interaction entre particules matérielles en fonction uniquement des coordonnées de ces particules. Exemple l'interaction gravifique newtonienne ne dépend que de la distance des masses. La force qu'exerce une particule ne dépend à chaque instant que de la position relative. Le changement de position est considéré comme ayant un effet instantané.

« On postule donc implicitement, en mécanique classique que les interactions se propagent à une vitesse infinie. Or l'expérience montre qu'il n'existe pas d'interaction instantanée ; la répercussion de tout changement de l'état d'un corps sur un autre situé à une certaine distance n'a lieu qu'après un certain temps. Les interactions à distance se propagent donc avec une certaine vitesse finie. C'est le cas, par exemple des interactions électromagnétiques qui se propagent dans le vide à la vitesse c . » (JHMC, 29)

On comprend bien que

« si les interactions se propagent toutes à une certaine vitesse finie, il doit exister une vitesse de propagation supérieure à toutes les autres dans un référentiel donné. Mais, selon le principe de relativité, cette vitesse maximale doit être identique dans tous les référentiels d'inertie puisque les phénomènes naturels doivent être indépendants de tout référentiel. Il en résulte finalement que la vitesse maximale de propagation des interactions doit être une constante universelle. » (id)

Jusqu'à présent la vitesse de la lumière est la vitesse limite expérimentée. Ce qui compte c'est l'existence nécessaire d'une vitesse-limite des interactions à distance. Ceci est aussi bien le cas des actions gravitationnelles.

ESPACE-TEMPS DE MINKOWSKI-POINCARÉ

Aspect mathématique (plus complexe). Soient deux événements $S_1 (t_1, x_1, y_1, z_1)$ et $S_2 (t_2, x_2, y_2, z_2)$ considérés dans un système S. On appelle intervalle entre ces deux événements la quantité qui intègre ensemble les variations de temps et d'espace $ic.dt, dx, dy$ et dz et la vitesse constante de la lumière. On la note $ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$ (c'est comme une distance sur un espace de dimension 4). On remarque que « $c.dt$ » a l'avantage de fournir une quantité homogène aux autres (des mètres par exemple)

Or, on montre qu'en changeant de repère d'observation des deux événements, cet intervalle est invariable ; $ds'^2 = ds^2$

Comme l'écrit Einstein, « C'est pourquoi, d'après la théorie de la relativité, le temps x_4 (en posant un changement de variable $x_4 = \sqrt{-1} ct$) s'introduit de la même façon que les coordonnées d'espace dans les lois de la nature » (cité p.49).

En posant $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$ et $x_4 = ict$,

On a « tout de qu'il faut » : des quadri vecteurs (x_1, x_2, x_3, x_4) avec leur norme et la propriété remarquable selon laquelle par changement de repère lorentzien, la norme est invariable.

Il y a une particularité : c'est que la « variable temps » est imaginaire (ict) et donc que la norme peut être négative.

A ceci près, on a un espace euclidien ; on dit qu'il est *improprement euclidien*.

Hermann Minkowski a pu énoncer lors du mémorable discours du 21 septembre 1908 :

« Désormais, l'espace en lui-même, et le temps en lui-même sont condamnés à s'évanouir comme de pures ombres, et seule une sorte d'union des deux conservera une réalité indépendante » (*id.*).

Selon les observateurs, l'espace est différent, le temps est différent, mais l'espace-temps est identique.

« Selon la théorie de la relativité restreinte, le continuum a quatre dimensions formé par l'union de l'espace et du temps retient le caractère absolu qui, selon la théorie précédente appartenait à la fois à l'espace et au temps séparément » (Einstein, *Essays in Science*, 1934).

Le cadre de la physique relativiste est un continuum d'espace-temps à quatre dimensions.

- Interprétation géométrique d'un changement de repère :

Notion de rotation, dans E^2 , dans E^3 , et en généralisant (hors de notre représentation), dans l'espace E^4 , la transformation de Lorentz est une rotation de E^4 .

Celle de Galilée est une translation.

E = M.C² OU DYNAMIQUE RELATIVISTE

Einstein aborde cette question dans un article publié quelque mois suivants « L'inertie d'un corps dépend-elle de sa capacité d'énergie ? ». Deux lois fondamentales de conservation dans la physique newtonienne

- conservation de la quantité de mouvement des particules avant et après un choc ; ou d'impulsion
- conservation de l'énergie cinétique, $\frac{1}{2} mv^2$.

Dans son livre de présentation, Einstein écrivait (mais en quelle année, ce n'est pas clair) :

« La comparaison directe de ce principe avec l'expérience échoue pour le moment parce que les variations de l'énergie E , que nous pouvons communiquer à un système, ne sont pas assez grandes pour rendre perceptibles le changement de la masse inerte du système. La quantité E/C^2 est trop petite en comparaison avec la masse m que possédait un corps avant d'avoir subi une variation d'énergie. C'est à cette circonstance que l'on doit attribuer le fait qu'on ait pu établir avec succès le principe de la conservation de la masse qui a une valeur propre » (Einstein, p. 70)

Remarque : les expériences sur la variation de masse des électrons, puis la bombe atomique ont changé le constat.

Dès 1905, il a le résultat décisif de l'équivalence « matière/énergie »

« La masse d'un corps est la mesure de sa capacité d'énergie ; si celle-ci subit un changement équivalent à E , la masse éprouve un changement dans le même sens équivalent à E/c^2 » (Einstein, in Hladik, 53)

Démarche :

1. Sauver le principe de conservation de l'impulsion.

Les mv^2 ne sont pas covariants. Il faut modifier l'impulsion conformément à Lorentz.

Il faut, pour sauver la conservation de la quantité de mouvement, en modifier le concept. Ce que fait Einstein en faisant dépendre la *masse* de la vitesse.

On a (comme chez Lorentz-Poincaré) : $m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

Cela lui donne un nouveau concept de masse relativiste qui dépend de la vitesse du corps :

On se souvient que « cascade de phénomènes compensateurs *ad hoc* » de Lorentz-Poincaré, la masse devait subir cette modification, pour rendre inobservable les dilatations et contractions.

Certains auteurs ne parlent pas de masse, mais de coefficient d'impulsion ou alors de masse relativiste.

2. Sauver le principe de conservation de l'énergie.

Einstein maintient un autre principe général, celui de « conservation de l'énergie » d'un système isolé. L'exigence de son invariance dans les transformations de Lorentz conduit à une nouvelle

expression de l'Énergie totale, formée de l'énergie cinétique (qui dépend de la vitesse) et de l'énergie potentielle (qui peut être de nature variée : gravité, électrique, chaleur etc.)

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = m \cdot c^2$$

Par ailleurs, un corps animé de vitesse v qui absorbe une énergie E_0 (rayonnement par exemple) éprouve un accroissement d'énergie égal à

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

L'énergie totale est alors la somme des deux précédentes, soit

$$\frac{\left(m_0 + \frac{E_0}{c^2}\right) c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Le corps a la même énergie qu'un corps de masse $\left(m_0 + \frac{E_0}{c^2}\right)$ animé d'une vitesse v .

Physiquement, du point de vue de la mesure, E_0/c^2 a les mêmes dimensions (est de même nature) que m . Les deux sont « du genre masse ».

Soit $m \cdot c^2$ est « du genre énergie ».

On peut dire : « Si un corps absorbe une énergie E_0 , sa masse inerte augmente de E_0/c^2 . La masse inerte d'un corps n'est pas constante mais varie avec la variation de son énergie.

Alors le principe de conservation de la masse d'un système s'identifie avec le principe de la conservation de l'énergie.

C'est l'énergie totale d'une particule de masse propre m_0 et de vitesse v .

Or si on développe E en fonction de la variable v , on trouve $E = m_0 \cdot c^2 + \frac{1}{2} m_0 \cdot v^2 + \frac{3}{8} m_0 \cdot v^4 / c^2 \dots$

« Quand v^2/c^2 est petit par rapport à 1, le troisième terme est toujours petit par rapport au second, le seul considéré dans la mécanique classique. Le premier terme ne dépend pas de la vitesse, il ne faut donc pas en tenir compte, quand il s'agit seulement de savoir comment l'énergie du point matériel dépend de la vitesse. » (Einstein, p.67)

Autrement dit, l'énergie relativiste est égale à l'énergie cinétique classique plus un terme constant $m_0 \cdot c^2$ qui est l'énergie interne de la particule. (qui, me semble-t-il remplace l'énergie potentielle classique). C'est un terme nouveau propre à la théorie de la relativité restreinte. Autrement dit, la masse d'une particule au repos ($v=0$) est un équivalent de son énergie : $m_0 = E/c^2$.

« La masse d'un corps est la mesure de son contenu en énergie » (Einstein 1905).

Remplacement de deux principes de conservation : celui de la masse et celui de l'énergie par un unique, la conservation de l'énergie-masse. (p. 67)

ELECTRODYNAMIQUE RELATIVISTE

La dissymétrie entre aimant et conducteur en mouvement disparaît lorsqu'on applique au système en mouvement la transformation de L. (cf. Paty, 64).

VERIFICATIONS EXPERIMENTALES DE LA RELATIVITE RESTREINTE

Depuis 1905, les arguments expérimentaux en faveur de cette théorie se sont accumulés. On a pu expliquer des expériences « négatives » comme celle de Michelson-Morley, l'aberration des étoiles, la variation de masse des électrons, le ralentissement des horloges mobiles (horloges à vibration atomiques), le « défaut de masse » des noyaux atomiques : on ne comprenait pas que la masse des noyaux fut inférieure à la somme des masses des nucléons qui le composent : ce défaut de masse correspond à l'énergie qu'il faut lui fournir pour le décomposer en ses éléments.

LES MUONS.

Une mesure expérimentale : les muons. Ce sont des particules du bombardement cosmique de la terre. Ils naissent dans les couches supérieures de l'atmosphère. Un muon se désintègre selon une loi connue ; ils ont une *durée de vie propre* qu'on a calculée : $2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Leur vitesse est proche de celle de la lumière c . Leur parcours moyen devrait donc être de 660 m. Ils ne devraient pas atteindre la terre où ils sont cependant observés. C'est un phénomène relativiste. Si leur *durée propre* est de $2,2 \cdot 10^{-6}$ s, leur durée impropre, mesurée du référentiel terre est de $2,2 \cdot 10^{-5}$ s, soit dix fois plus ; il est donc *normal* qu'ils nous arrivent.

RETOUR SUR LA TRIADE DE LA RELATIVITE

Paty souligne l'importance du trio qui réalise la théorisation nouvelle. En 1904 et 1905, trois articles essentiels sont publiés : Lorentz, 27 mai 1904 « Phénomènes électromagnétiques dans un système en mouvement à une vitesse quelconque, plus petite que la lumière » ; Poincaré, 23 juillet 1905 « Sur la dynamique de l'électron »; Einstein, second semestre 1905. Poincaré a lu Lorentz, qui connaît les travaux de Poincaré ; Einstein n'a pas lu les deux autres ; il est plutôt un outsider dans le milieu.

Les points communs entre ces trois articles sont considérables : « ils sont orientés vers la formulation du principe de relativité »,

« cette triade possède en commun les formules de transformation de coordonnées pour passer d'un système d'inertie à un autre – les équations de Lorentz-, les formules de variation de masse de l'électron avec la vitesse et des lois de transformation presque semblables des grandeurs électromagnétiques » (Paty, p.43-44)

Comment Poincaré exprime le principe de relativité, (en y associant Lorentz)

« Si on peut, sans qu'aucun des phénomènes apparents soit modifié, imprimer à tout le système une translation commune, c'est que les équations d'un milieu électromagnétique ne sont pas altérées par certaines transformations, que nous appellerons *Transformations de Lorentz* ; deux systèmes, l'un immobile, l'autre en translation, deviennent ainsi l'image exacte l'un de l'autre » (Poincaré, 1905, in Paty, 47).

On est donc bien proche de la relativité einsteinienne (du point de vue des formules, on y est). Cependant, le mouvement, ou plutôt le repos absolu est une réalité physique pour Lorentz et Poincaré.

« Il apparaît, écrit Lorentz, que de cette façon les équations [...] sont les mêmes pour les deux systèmes, la différence étant seulement que pour le système sans translation, ces symboles indiquent le moment, les coordonnées et le temps vrais, tandis que leur signification est différente pour le système en mouvement » (Lorentz, id., n.2)

Les contractions et le temps du phénomène en mouvements sont des fictions utiles, voire nécessaires.

Poincaré donne une forme générale à la transformation de Lorentz et il obtient la loi de transformation des vitesses (comme Einstein) et une équivalence générale des phénomènes électromagnétiques.

POINCARÉ ET LA SIMULTANÉITÉ. FROM GALISON.

Dès 1898, dans la *Revue de métaphysique et de morale*, Poincaré publie un article « La mesure du temps ». Il soutient que la simultanéité n'est qu'une convention (et donc le temps), choisie pour sa commodité. Elle n'est pas donnée par intuition commune, mais doit être *définie*. Il soutenait qu'en faisant de la simultanéité un concept procédural, il faudrait prendre en compte le temps de transmission de tout signal temporel transmis par télégraphe (33)

Détail p.37

On ne sait si Einstein l'a lu.

Lorentz, Poincaré et le « temps vrai (t_{vrai}) » (48)

Il parlait de temps vrai quand on est dans le système immobile de l'éther où les équations de champs étaient valables (elles ne l'étaient plus si on se déplaçait).

Supposons qu'un objet, disons un bloc de métal, se déplace par rapport à l'éther immobile (autrement dit traverse l'éther) et que les équations de Maxwell donnent une description détaillée des champs électrique et magnétique qui entourent le métal. Comment la physique décrirait-elle ce qui se passe dans un système de référence se déplaçant avec le métal ? (la mécanique dispose de la transformation de Galilée pour faire ce genre de chose). Tout se passerait comme si les lois de la physique se compliquaient énormément ... Mais Lorentz découvrit qu'il pouvait simplifier les équations, les rendre aussi simples que si on se trouvait dans le système de l'éther, à condition de donner une nouvelle définition aux champs (magnétique et électrique) et à la variable temporelle. Pour définir l'instant d'un événement d'après l'endroit où l'événement survenait, Lorentz parlait de *temps local* (t_{local}) ... Le temps local de Lorentz n'était qu'une fiction mathématique permettant de simplifier une équation. Là était le point essentiel. (49)

Poincaré, dans une seconde étude parue en 1900 étendait t_{local} de Lorentz à la physique des systèmes de référence parfaitement réels en mouvement (autrement dit non mathématiques) (50). Poincaré essaye de minimiser la différence de sa conception avec Lorentz (les historiens mettent souvent dans le même sac). Il identifie son « temps apparent » au temps mathématique de L.

Mais le concept avait évolué : dans les mains de Poincaré, le temps local perdait son statut imaginaire et devenait le temps que les observateurs d'un système de référence en mouvement verraient indiqué à leur montre en y apportant pour correction le ralentissement ou l'accélération attribuable au vent d'éther (50).

Poincaré franchit un pas supplémentaire en 1905-1906. Il reprend les résultats de Lorentz en rectifiant la définition du temps local afin d'établir une correspondance mathématique exacte entre les (descriptions dans des) systèmes de références en mouvement et des systèmes immobiles... Le principe de relativité restait valable même si Poincaré s'obstinait à opposer le « temps apparent » au « temps véritable ».

Einstein fera un pas de plus. Pour lui, dès 1901, l'éther n'existait pas ; il y avait des champs et des particules réels, et les seuls temps véritables étaient ceux que les horloges indiquaient (54).

En outre, Poincaré montre la décisive invariance de ds^2 et imagine la quatrième coordonnée (de l'espace-temps) avec $x_4 = ct \cdot \sqrt{-1}$; Minkowski reprendra, dans son article de 1908, le formalisme de Poincaré. Tout ceci est surprenant de proximité avec Einstein ; Poincaré ne remet cependant pas en cause l'espace et le temps absolu ; « seulement » la possibilité de mettre en évidence un quelconque déplacement par rapport à eux.

A ce sujet, remarquons que la R.R. ne réfute pas absolument l'éther, mais elle le rend inutile et rend compte du fait qu'il soit indétectable.

RETOUR SUR L'ARTICLE D'EINSTEIN

Le début est célèbre et surprenant :

« On sait que l'électrodynamique de Maxwell, telle qu'elle est conçue aujourd'hui conduit, quand elle est appliquée à des corps en mouvement, à des asymétries qui ne semblent pas être inhérentes aux phénomènes » (in Paty, 54).

En effet, la théorie donne des explications physiques différentes de l'action d'un aimant sur un courant dans un conducteur selon que c'est l'aimant ou le conducteur qui sont considérés au repos ; alors que l'effet physique net est identique dans les deux cas. C'est la théorie, l'explication, comme la

forme du phénomène qui est livrée comme différente. (cf. le texte remarquable d'Einstein, cité in Paty, p.78-79, qui décrit cette situation).

Cette dissymétrie est un point d'appui pris par Einstein pour mettre en doute la théorie ou certains de ses concepts (doute esthétique ?, épistémologique ? technique ?).

« Cette idée que deux cas essentiellement différents soient en jeu m'étais insupportable. La différence entre les deux, j'en avais la conviction, ne pouvait être qu'une différence dans le choix du point de vue, et non une différence réelle » (Einstein 1920, in Paty, 79).

En tout cas, la revendication d'Einstein est la suivante : l'induction électromagnétique doit respecter le principe de relativité du mouvement.

On a un changement de schéma par rapport aux deux autres auteurs : (cf. détail Paty, p.57)

Lorentz, Poincaré Phénomènes → Transformations de L. → Principe de relativité

Einstein Principe de relativité → Transformations de L. → Phénomènes

L'ETHER INUTILE, SELON EINSTEIN (P.74-76)

Une seconde classe de faits, à laquelle nous faisons allusion ici, se rattache à la question de savoir si dans les expériences faites sur la Terre se révèle le mouvement de celle-ci à travers l'Univers^ Nous avons déjà fait remarquer au chapitre 5 que tous les efforts dans ce sens ont abouti à un résultat négatif. Avant la construction de la Théorie de la relativité, il était difficile à la Science d'expliquer ce résultat négatif. L'état des choses était le suivant. Les préjugés invétérés sur le temps et l'espace ne permettaient aucun doute que pour le passage d'un système de référence à un autre c'est la transformation de Galilée qui compte. En supposant que les équations de **Maxwell-Lorentz** sont valables pour un système de référence **K**, on trouve qu'elles ne sont pas valables pour un système de référence **K'** animé d'un mouvement uniforme par rapport à **K**, si l'on admet qu'entre les coordonnées de **K** et de **K'** existent les relations de la transformation de Galilée. Il semble donc que de tous les systèmes de coordonnées **galiléens** l'un d'eux (**K**), animé d'un mouvement particulier, se distingue physiquement de tous les autres. On interprétait ce résultat physiquement en regardant **K** comme immobile par rapport à un **éther** hypothétique qui propagerait la lumière. Par contre, tous les systèmes de coordonnées **K'**, qui sont en mouvement par rapport à **K**, devaient être en mouvement par rapport à l'éther. C'est à ce mouvement **K'** relativement à l'éther ("vent d'éther" relativement à **K'**) qu'on attribuait les lois plus compliquées qu'on supposait être valables relativement à **K'**. On était donc forcé d'admettre un tel vent d'éther relativement à la Terre, et les physiciens se sont pendant longtemps efforcés de le mettre en évidence.

Pour y parvenir, **Michelson** avait trouvé une méthode qui paraissait être décisive. Qu'on imagine deux miroirs disposés sur un corps rigide et tournant l'un vers l'autre leurs surfaces réfléchissantes. Un rayon lumineux a besoin d'un temps bien déterminé pour aller d'un miroir à l'autre et de revenir, si tout ce système est immobile par rapport à l'éther. Mais on trouve (par le calcul) pour cet événement un temps un peu différent **T'** quand le corps et les miroirs sont en mouvement par rapport à l'éther. Bien plus, le calcul montre que, pour une vitesse donnée **v** par rapport à l'éther, ce temps **T'** est différent suivant que le corps se meut perpendiculairement aux plans des miroirs ou parallèlement à ces plans. Bien que la différence ainsi calculée entre ces deux durées de temps soit extrêmement petite, l'expérience d'interférence faite par Michelson et **Morley** aurait dû la mettre clairement en évidence. Mais cette expérience donna un résultat négatif et jeta les physiciens dans un grand embarras. Pour tirer la théorie de cet état fâcheux, **Lorentz** et Fitzgerald supposèrent que le mouvement du corps par rapport à l'éther produit en lui un raccourcissement dans la direction de son mouvement, qui fait précisément disparaître la différence de temps en question. Une comparaison avec les réflexions du chapitre 12 montre que ce moyen était aussi le bon au point de

vue de la Théorie de la relativité. Mais l'interprétation de la situation par la Théorie de la relativité est incomparablement plus satisfaisante. D'après elle il n'existe pas de système de coordonnées privilégié qui donne lieu à introduire l'idée de l'éther, ni, par conséquent, de vent d'éther, ni d'expérience pour le mettre en évidence. La contraction des corps en mouvement suit ici, sans hypothèses spéciales, des deux principes fondamentaux. Ce qui compte dans cette contraction, ce n'est pas le mouvement en soi auquel nous ne pouvons attacher aucun sens, mais le mouvement par rapport au corps de référence choisi dans chaque cas particulier. C'est ainsi que le système de miroirs de Michelson et Morley n'est pas raccourci pour un système de référence en mouvement avec la Terre, mais bien pour un système de référence qui est au repos par rapport au soleil.

SECONDE PARTIE, LA RELATIVITE GENERALE

L'essentiel de la RR. était donc que le principe de relativité est respecté : « les lois de la nature s'expriment identiquement dans tel ou tel repère obtenu par une transformation lorentzienne ». Comme l'eut dit Galilée : « le mouvement n'y est rien ».

La clef de ceci étant dans la reconnaissance d'une constante universelle qui exprime la propagation des phénomènes électromagnétiques et optique, une quasi-vitesse, notée c , indépendante de la source.

Le grand article de la RG est de 1916 : « Les fondements de la théorie de la relativité générale », *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, in *Annalen der Physik*.

Lire et photocopier l'excellente introduction d'Einstein, in Einstein (Payot, p.83-87)

Trois idées essentielles vont servir de guide dans les 10 ans d'élaboration qui suivent ; plus précisément, entre 1907 et 1915 :

- a) équivalence entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle.
- b) fin du privilège accordé aux référentiels galiléens (en MRU)
- c) abandon de la géométrie euclidienne de l'espace-temps.

Elles aboutiront à l'établissement du principe de relativité générale selon lequel « tous les référentiels, quel que soit leur état de mouvement, sont équivalents pour la description des lois de la nature ».

A) LA GRAVITE, OBSTACLE PERSISTANT

La marche vers la Relativité générale sera largement une réflexion sur la nature de la gravité.

« En 1907, j'écrivis un article sur la théorie de la relativité quand je pris conscience que tous les phénomènes de la nature pouvaient être décrit à l'aide de la relativité, excepté la gravitation. Je ressentis un profond désir de comprendre la raison qui se tenait derrière ce fait. Ce qui était insatisfaisant à mes yeux était le fait que, malgré la beauté de la relation entre l'énergie et l'inertie, il n'y avait aucune relation entre l'inertie et le poids. J'eus l'intuition que cette relation resterait inexplicable au moyen de la relativité restreinte » (In Biez., p.98).

Une particularité « extrêmement remarquable du champ de gravité » : « il ne dépend aucunement de la matière ni de l'état physique du corps ». (cf. p. 91.)

Argument 1. La masse newtonienne a deux sources distinctes de définition. Ici une force pourra être évaluée, par exemple, par sa capacité à tendre une corde ou un ressort.

Inertie : un corps isolé **conserve son état de mouvement** RU. Pour le modifier, une force doit agir. Cette force est proportionnelle à la *masse inerte* du corps. ($F = m_i \gamma$). γ représente la modification de mouvement.

Gravité : dans le champ de gravité terrestre, un corps en chute libre est **attiré par la terre** selon une force proportionnelle à sa masse grave (ou pesante). Cette force représente aussi la modification de mouvement (son accélération). ($F = k.m_g$)

Il n'y a aucune raison que ces deux phénomènes soient corrélés. *A priori*, ces deux phénomènes sont indépendants, n'ont aucunement la même nature.

Newton a pris conscience (avec trouble) que la masse, dans les deux voies, était équivalente, c'est-à-dire que toute variation de la masse inertielle correspondait à une même variation de la masse gravitationnelle.

Comment ? C'était une conséquence inévitable de la loi galiléenne « tous les corps tombent de la même manière ».

En effet, les deux relations précédentes donnent : $m_g/m_i = \gamma/k$.

Dire que les corps tombent de même manière, c'est dire que les « deux masses » sont équivalentes.

Cette prise de conscience s'appuyait sur des expérimentations soignées et simples mettant en jeu, en même temps masse gravitationnelle et inertielle : l'étude des oscillations d'un pendule met en jeu le rapport des deux ; Newton constata que ce rapport était quasiment constant.

Si la masse des objets n'influence pas leur accélération, le mouvement du pendule, qu'il soit constitué de bois ou de plomb, doit uniquement dépendre de la longueur du fil qui le soutient (et de la valeur de l'accélération de la pesanteur au lieu où se fait l'expérience)[23].

Newton établit que pour une longueur de fil identique, le pendule en bois et celui composé de plomb restaient synchrones. La période T du pendule n'était pas fonction de la quantité de matière qu'il contenait. De manière générale, les oscillations du pendule sont fonction de la racine carrée du rayon de la planète :

Il y avait bien une égalité (à 1 pour 1000 près) entre la masse inertielle d'un corps et la masse gravitationnelle qui répondait à l'action de la pesanteur. Cette amusante observation fut bien souvent répétée. Des expériences plus sophistiquées furent réalisées au XIX^{ème} siècle, dont la plus précise fut celle du baron Roland von Eötvös avec une balance de torsion munie de deux masses différentes. Il s'agit des expériences dites "de zéro".

Mieux dit par Einstein (p. 91)

Selon Newton : Force = masse inerte x accélération

Mais aussi , si la force est créée par la gravité

Force = masse gravitationnelle x intensité du champ de gravitation

Donc accélération = (masse inerte)/(masse gravitationnelle) x (intensité du champ)

Or, depuis Galilée, on sait que accélération est la même pour tous les corps, donc le rapport (masse inerte)/(masse gravitationnelle) est le même pour tous les corps ; aux unités près, c'est la même chose.

Photocopier le texte de Newton dans le petit Balibar-Gallimard, (p. 56)

D'autres catégories de comportement de corps de « même masse » n'ont aucune corrélation avec celle-ci : la conductivité, les propriétés optiques, le comportement thermique etc. Seul l'effet de champ gravitationnel est indépendant du type de corps qui y est plongé (comme l'avait montré Galilée, tous les corps tombent de la même manière).

Voir les informations et arguments donnés par M.A. Tonnelat sur l'identité des deux masses, p.257-258.

Ceci demeurera très étrange tant que l'inertie et la gravitation n'auront pas été en quelque sorte « unifiées » par Einstein. Comme l'écrit Einstein, la physique avait « enregistré ce fait » mais ne l'avait pas interprété. Il va énoncer que l'inertie et la gravité sont équivalentes, sont « une même chose » vue différemment.

« La même qualité d'un corps se manifeste suivant les circonstances, comme « inertie » ou comme « poids » (Einstein, p. 92)

Argument 2.

Scène :

L'ascenseur cosmique. (chapitre 20, p. 93 sq.). Très important. Un observateur est dans un espace sans source de gravité (pas de matière à l'horizon) ; il « flotte » dans son ascenseur.

Un lieu spatial isolé.

Un « laboratoire cosmique galiléen ». Pas de pesanteur (il est en apesanteur).

Un être quelconque tire celui-ci selon une force constante dans une direction constante.

L'ascenseur est en mvt uniformément accéléré.

Que pense l'observateur-boîte ? (p.94)

Il est dans la même situation que nous sur terre, bien pressé vers le sol. S'il lâche une pierre, elle « tombe » selon un mouvement uniformément accéléré par rapport à l'observateur. Il en conclut qu'il est dans un champ de gravitation constant, accélérant tous les corps de la même manière (logique puisque c'est le mouvement du laboratoire, et non la variété du corps lui-même qui détermine la « trajectoire observable »).

Il poursuit ses études en accrochant la pierre au plafond par une corde qui se tend.

Pour lui, la tension de la corde est l'exacte réaction au « poids » de la pierre (à la force gravitationnelle). Cette force est déterminée par la masse gravitationnelle de la pierre. Tout se passe exactement comme si il y avait une attraction gravitationnelle dirigée vers le plancher et comme si son ascenseur était immobile dans ce champ de gravitation. C'est une manifestation de la *masse pesante*.

Un autre observateur, extérieur étudie la chose.

La tension de la corde ne s'explique pas du tout par un « champ de gravitation », mais par la résistance de la pierre à modifier son état de mouvement. La force transmise correspond exactement à cette accélération. C'est une manifestation de la *masse inerte*.

C'est donc la même chose, de deux points de vue distincts (tel est le *Principe d'équivalence*): soit un ascenseur immobile dans un champ de gravitation ; soit un ascenseur accéléré dans un champ nul.

La masse inertielle et la masse gravitationnelle sont identiques. Du moins, la distinction entre les deux masses est affaire de point de vue, elle n'existe que selon les différences de point de vue : gravitation et inertie sont deux mots pour désigner une même chose.

Est-il facile de généraliser le principe de relativité ?

- Non pour deux raisons.
- La première tient aux difficultés mathématiques que génère pareil programme. La seconde à la résistance qu'offre notre expérience. Le bateau galiléen s'appuyait sur nos sensations ; l'ascenseur d'Einstein ne peut pas. En effet, quand il est « testable », il devient le bus qui freine (fin chap. 18) : « Mais si le mouvement du wagon...pas valable » (p.86-87)

Il est difficile de penser que quand on est dans un bus qui freine brutalement, les lois de la nature sont les mêmes que quand il est à l'arrêt.

L'objection va être réfutée par la célèbre expérience de pensée de *l'ascenseur cosmique*.

Einstein dit que l'argument du bus qui freine est réfuté. (cf. p.97) : « Nous comprenons maintenant pourquoi... »

Voir cette présentation chez Mavrides (p. 98-100). Les pages 102-104 ne sont pas mal.

Toutefois, les conditions de cette équivalence ne sont pas globales ; on ne peut réaliser un repère accéléré qui « remplace » le champ gravitationnel terrestre (radial). Ce « principe d'équivalence » est local. C'est une caractéristique essentielle de la R.G.

Le principe d'équivalence énonce donc « Un champ de gravitation est localement équivalent à un champ d'accélération ».

Pour la relativité restreinte, nous nous trouvons dans une situation où le champ de gravitation est nul ; c'est un cas *dégénéré*.

Vitesse- accélération.

Remarque importante de M.A.Tonnellat : avec la RR., c'est la vitesse qui était « relative » selon les repères ; avec la RG, c'est l'accélération (citer, p. 266)

L'idée générale est donc de soutenir que toute accélération ne traduit pas de « mouvement en soi », mais l'influence d'un champ. Il fait « l'hypothèse de la totale équivalence physique entre le champ de gravitation et une accélération correspondante du système de référence » (1907, in Paty, 196) : « Si quelqu'un tombe en chute libre, il ne sentira pas son propre poids » (*id*).

La RR devient un cas particulier de la RG : quand le champ gravitationnel ou d'accélération est nul. (attention, cela ne veut pas dire qu'il ne peut y avoir, dans le repère de force gravitationnelle ou accélératrices, cela veut dire que le système lui-même, dans son entier n'est pas déterminé par son immersion, ou son mariage avec un champ d'accélération).

- La notion de champ de gravitation

Citer la perplexité de Newton face à la *nature* de la gravité :

Lettre Révérend Richard Bentley datée de 1693 (Correspondance, vol. III, p. 253)

« Il est inconcevable que la matière inanimée et brute puisse, sans la médiation de quelque chose qui n'est pas matériel, agir sur, ou affecter une autre matière, sans contact mutuel, comme doit être le cas si la gravitation est, au sens d'Epicure, essentielle et inhérente à la matière. Et c'est une des raisons pour lesquelles je n'ai pas voulu que l'on m'attribue l'idée d'une gravité innée. Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière en sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, au travers le vide[...]c'est pour moi une si grande absurdité, qu'à mon avis, aucun homme tant soit peu compétent en matière de philosophie ne pourra jamais tomber dans cette erreur. La gravité doit être causée par un agent agissant constamment selon certaines lois, mais que cet agent soit matériel ou immatériel est une question que j'ai laissée à l'examen de mes lecteurs”

Citer le chapitre d'Einstein « Le champ de gravitation » (p. 89-90)

« Par une étude plus précise des phénomènes électromagnétiques on est arrivé à la conception qu'il n'existe pas d'action directe à distance. Si un aimant attire un morceau de fer, on ne doit pas se contenter de la conception que l'aimant agit directement sur le fer à travers l'espace vide qui les sépare, mais il faut imaginer, d'après Faraday, que l'aimant produit toujours dans l'espace qui l'entoure quelque chose de physiquement réel qu'on désigne sous le nom de champ magnétique. Ce champ agit à son tour sur le morceau de fer de telle sorte que celui-ci tend à se mouvoir vers l'aimant » (Einstein, Payot, p. 89)

Lire la suite jusqu'à ...gravitation ».

« Localement », un repère accéléré est équivalent à un système « libre » ou galiléen, plongé dans un champ gravitationnel convenable.

« Le problème de la Relativité générale est d'édifier, sur ces idées fondamentales une théorie consistante » (Einstein 1954, in Paty, p.198).

Une magnifique idée de vérification de ceci lui est fournie par la lumière : son rayonnement est modifié par un champ de gravitation (déplacement vers le rouge) ; il prévoit que la lumière doit donc être affectée par la gravitation : la masse énorme d'une étoile, le soleil par exemple, doit dévier la lumière. « En particulier ... amoindri l'impact » (in Biez, p.101).

B) CRITIQUE DU PRIVILEGE ACCORDE AUX REPERES INERTIELS. LA CRITIQUE D'UN ESPACE-CADRE.

Il est évident qu'un rôle absolument privilégié est reconnu, dans la physique classique comme dans la relativité R., aux mouvements inertiels (MRU), pour lesquels aucune force extérieure n'agit, qui ne subissent aucune accélération les uns par rapport aux autres. Si un système est accéléré par rapport à un autre (quelque soit l'accélération qu'il subisse), les phénomènes ne pourront plus être exprimés par les mêmes lois : des forces ou causes seront à l'œuvre dans l'un qui ne le seront pas dans l'autre.

Voici qui ne satisfait pas Einstein.

1914, exposé à l'Académie de Prusse :

« La Relativité a reçu des confirmations substantielles...Mais d'un autre côté, cette théorie n'est pas entièrement satisfaisante d'un point de vue théorique parce que le principe de relativité restreinte favorise le mouvement uniforme. S'il est vrai qu'aucune signification absolue, d'un point de vue physique, ne peut être attribuée au mouvement uniforme, la question se pose

tout naturellement de savoir si cet énoncé ne doit pas être étendu aux mouvements non uniformes » (Paty, p.201)

Le *Times*, 1919 : « Qu'est-ce que la nature a à faire avec les systèmes de coordonnées et leur état de mouvement, quand c'est nous qui les avons introduits ? [...]s'il est nécessaire, pour décrire la nature, d'utiliser un système de coordonnées que nous introduisons arbitrairement, alors le choix de son état de mouvement ne devrait pas subir la moindre limitation ; les lois devraient être absolument indépendantes de ce choix » (in Paty, p.189)

Autre expression :

Aussi bien en mécanique classique qu'en RR on distingue entre les corps de référence K relativement auxquels les lois de la nature sont valables, et les corps de référence K' relativement auxquels les lois de la nature ne sont pas valables. Mais aucun homme qui pense logiquement ne peut se contenter de cet état de chose [...] Quelle est la raison de cette préférence ? » (Einstein, Payot, 99-100)

Ceci mériterait un examen approfondi : Einstein est mal à l'aise avec la RR car il n'accepte pas un aspect fondamental de l'espace-temps qu'il a conçu : cet espace-temps détermine les phénomènes matériels et énergétiques ; **mais en retour** ceux-ci n'ont aucun effet sur l'espace-temps. Einstein le dit, le redit, suit là-dessus Mach. L'indifférence de l'espace-temps à la réalité physique matière-énergie est non compatible avec une théorie de la connaissance consistante. On pourra lire le chapitre de Paty (p.198-211)

« L'espace-temps quadridimensionnel créé en assemblant l'espace et le temps, qui, considérés individuellement n'ont plus rien d'absolus, était devenu à son tour un nouvel absolu ». La mise en cause de la notion même d'un cadre absolu de la physique est largement due, chez Einstein, aux thèses dues à Ernst Mach (1838-1916) qui avait beaucoup argumenté pour soutenir qu'un tel cadre spatio-temporel absolu ne pouvait avoir de sens en physique. Il ne pouvait s'agir que d'un cadre vide, d'une entité abstraite de toute réalité substantielle.

L'espace-temps absolu de la RR « produit des effets physiques, sans être influencé lui-même par les conditions physiques » (*id.*, p.202) ; ceci n'est pas acceptable pour Einstein.

Le système inertiel, en tant que tel « détermine dans tous les cas le comportement inertiel des corps, sans être influencé par eux » : cette causalité unilatérale est « inacceptable, du point de vue de la connaissance », dit Einstein (In Paty, p.202) ; un peu comme le *centre du monde* d'Aristote déterminait la situation des corps et leur comportement, sans être affecté par eux. Cette analogie vise à remettre en cause le privilège des systèmes d'inertie.

Il faut, à l'inverse considérer l'univers comme un champ : « les propriétés de l'espace-temps qui déterminent l'inertie doivent être considérées comme des propriétés de champ, de manière analogue au champ électromagnétique » (*id.*, p.203)

Pour dire vite, la métrique de chaque point est définie par le potentiel gravitationnel en ce point : « le comportement géométrique des corps et le mouvement des horloges dépendent des champs de gravitation, qui sont eux-mêmes produits par la matière ». (Paty, 190)

C'est donc un débat très ancien et très riche qui est là réactivé à cette étape : quelle est la nature de la relation entre le lieu des phénomènes et la substance des phénomènes ? Est-ce un espace-substantialisé ou est-ce un espace-condition de la substance ? Aristote versus atomistes, Descartes versus Newton etc.

C'est un point de vue fondamental de physicien, presque a priori, qui le range du côté de l'espace associé essentiellement aux choses. C'est ce qui lui permet de se mettre en route vers la générale.

Deux étapes expérimentalo-théoriques

Première étape. La déformation des règles rigides qui tournent : elles changent Pi .

Deuxième étape. La déformation du rayon de lumière par la masse du soleil.

Très tôt, en 1907. Soit un rayon de lumière placé dans un repère accéléré ; il y a un « décalage vers le rouge » de sa longueur d'onde dont rendent compte le comportement des équations de Maxwell (je rappelle que ces équations rendent compte de « zéro changement » dans un référentiel galiléen). Autrement dit, un « papillon optique ne vole pas de la même manière ». Les transformations de Lorentz ne laissent pas invariant un phénomène optique, dans un référentiel accéléré.

Dans un champ de gravitation, le rayon ne se propage plus en ligne droite. Dans un champ de gravitation, les rayons lumineux se propagent en décrivant des trajectoires généralement courbes.

La loi souvent mentionnée de la constance de la vitesse de la lumière dans le vide ne peut pas prétendre à une validité illimitée. En effet, une courbure des rayons lumineux ne peut se produire que si la vitesse de propagation de la lumière varie avec le lieu. La RR ne peut prétendre à un domaine de validité illimité. (Einstein, 105)

C'est le plus beau sort d'une théorie physique que d'ouvrir la voie à une théorie plus vaste dans laquelle elle continue à vivre comme cas particulier. (id. 106)

Déjà, en 1907, Einstein montre que les équations de Maxwell gardent la même forme si on remplace, dans le système accéléré Σ , la vitesse, qui vaut c , par $c(1 + \Phi/c^2)$; avec Φ dépendant de l'accélération. On juge de l'audace intellectuelle pour Einstein qui a fait de c une constante universelle. On peut donc « sauver » l'invariance du phénomène par transformation des coordonnées.

c) UNE AUTRE GEOMETRIE

Photocopier les pages 59-65 de Balibar-Gallimard. Sur l'union espace-matière.

Le dernier pas important vers la RG fut « de se rendre compte de l'impossibilité de généraliser le principe de relativité aux mouvements accélérés sans abandonner la géométrie euclidienne » (Paty, 204).

L'exemple du disque plat en rotation autour de son centre. On met une horloge h_1 en son centre et une autre h_2 à sa périphérie. Un observateur est lié à un repère immobile qui « englobe ce disque tournant. Il voit le centre et donc h_1 immobile, alors que h_2 est en mouvement (à chaque petit moment, on assimile à un mru tangentiel) ; pour l'observateur, h_2 est mobile, elle va plus lentement. Quelle est la situation pour l'observateur fixé sur le disque. Ce disque est au repos pour lui, or, les horloges ne marchent pas à la même vitesse. Voici qui ne convient pas avec la RR. Il faut soutenir que, dans des champs gravitationnels, le fonctionnement des horloges est modifié.

Le comportement des règles rigides par contraction de Lorentz quand on les considère soumises à des mouvements circulaires : selon les calculs, elles devaient être déformées, courbées pour l'observateur extérieur, ce qui devait être l'effet de forces physiques : il n'était plus rigide, mais élastique : alors, les lois de la nature n'étaient pas les mêmes, rigide ici, élastique là ; le principe de relativité ne s'appliquait pas à ces mouvements.

Exemple canonique : un repère galiléen, dedans un disque en rot. Autour de son centre. Un observateur lié à R, a une règle de longueur propre unité. Disque au repos, il mesure le rayon R et la circonférence C (l'unité est très petite par rapport au rayon), le rapport des deux est 2π .

Le disque tourne, en chaque instant, on assimile V à un mru. L'observateur mesure le rayon avec sa règle, elle ne subit pas de transformation de sa *longueur*, donc, encore R ; en revanche la mesure selon la circonférence a pour effet que la longueur diminue ; il faut « plus » de réglettes unité » pour mesurer C, autrement dit, il trouve C supérieure ; le rapport C/R est supérieur à 2π . Les propriétés euclidiennes ne sont pas respectées.

Lire ici absolument, Einstein p.112-113

Retenons ceci : la géométrie de la théorie newtonienne de l'espace absolu est une géométrie euclidienne de dimension trois, associé à une droite euclidienne. Dans une transformation de Galilée, les normes sont conservées.

La géométrie de la R.R. est une géométrie quasi euclidienne à quatre dimensions, celle de l'espace-temps de Minkowski, avec une forme quadratique (non définie positive), qui en détermine les invariants (dans une transformation de Lorentz, ds^2 est invariant).

La RG. Change du tout au tout : on a une équivalence des repères, dans un « univers de champs de gravitation ».

C'est une théorie générale du « champ de gravitation » qu'est l'univers, un champ qui se forme et se déforme avec l'énergie-matière qui s'y trouve ; il conclut à l'existence *d'ondes de gravitation*, (idée qu'avait déjà avancé Poincaré qui les nommaient *ondes gravifiques*).

Lire ici le passage de Mavrides sur Champ de gravitation et relativité restreinte, p.103.

IDEE FONDAMENTALE :

D'une part les corps ont une tendance naturelle à persévérer dans leur état de mouvement ou de repos : c'est l'inertie. La cause qui peut modifier cet état, en créant une accélération est caractéristique d'une propriété du corps : de sa masse d'inertie. Cet état de mouvement et des forces en action sont « naturellement » exprimé dans les géodésiques de l'espace euclidien (Newton) ou de l'espace-temps quasi-euclidien (Einstein).

D'autre part, les corps s'attirent en vertu de la gravité, action à distance qui –toute chose égale par ailleurs est caractéristique du corps ; la force d'attraction, due à la gravité est proportionnelle à sa « masse gravitationnelle » ou pondérale. Le coefficient de proportionnalité est indépendant du corps et ne dépend que de l'espace où « ça se passe ».

Il se trouve que les deux masses sont équivalentes dans tous les phénomènes ; aucune doctrine, ni Newton, ni la RR ne rendent compte de cette identité de concept, qui n'a rien de nécessaire *a priori*.

Le cœur de la RG d'Einstein est de dissoudre la distinction entre inertie et gravité : l'une comme l'autre ne font que représenter la tendance immédiate -de nature physique et de mode géométrique- des corps à « tomber », ou plutôt à « suivre les géodésiques » de l'espace où ils se trouvent. La solution, mathématiquement complexe consistait à abandonner le concept d'espace, conçu comme un contenant neutre, mais de renouer avec l'espace-matière, l'espace comme coexistence des corps, comme constitué et déterminé par leur présence : il n'y a pas d'espace sans la matière et les champs qu'elle détermine. On a souvent employé l'image du filet déformé, courbé par une balle ; les géodésiques se trouvent ainsi constitués par les lignes de cette géométrie et par la présence des corps ou plutôt des champs. En effet, la géométrie locale de cet espace est aussi bien déterminée par des activités ou des phénomènes électromagnétiques et lumineux que classiquement matériels et mécaniques.

Ces points de convergence des géodésiques sont des attracteurs de matière (comme le décrit sommairement la théorie de la gravitation newtonienne ou de la RR dans le cas de géodésiques « droits ») et ils sont aussi et conjointement des déterminations de l'inertie : inertie et gravitation sont la même chose ; elles disent comment se fait la circulation de la matière dans cet univers-champ. L'univers est une coexistence de champs gravitationnels ; il n'y a plus de vide ; l'espace est constitué de lieux attracteurs, de lignes de champ (de gravité et/ou électromagnétiques). Ceci est génial. « Tomber », c'est suivre les géodésiques et naturellement le mouvement spontané n'y est pas uniforme : c'est « être attiré » et aussi « persévérer dans son état ». « Le mouvement d'un point matériel est, dans cette description, non uniforme et courbe (sa loi est donnée par l'équation de la ligne géodésique), et peut donc être interprété comme mouvement dans un champ de gravitation » (Paty, p.226)

En particulier, la RR assure la relativité de l'inertie elle-même qui dépend de l'état du champ où on considère le phénomène.

Ainsi, le voyageur secoué violemment par le ralentissement brusque du train peut raisonner autrement qu'en concluant au « ralentissement du wagon ».

« Personne ne l'oblige d'attribuer cette secousse à une accélération « réelle » du wagon. Il pourrait aussi interpréter ce qu'il vient d'éprouver de la manière suivante : « Mon corps de référence (le wagon) est au repos de façon permanente. Mais, pendant la période de serrage des freins il règne, par rapport à lui, un champ de gravitation dirigé en avant et variable avec le temps. Sous l'influence de ce dernier, le talus, ainsi que la terre se déplacent d'un mouvement non uniforme de telle sorte que leur vitesse originelle, dirigée en arrière, décroît constamment. C'est aussi ce champ de gravitation qui est cause de la secousse de l'observateur » (Einstein, payot, 97-98)

Sans doute, dans ce cas, ce second raisonnement est un peu exotique, mais pour d'autres phénomènes, il est hautement performant.

On imagine bien que les transformations de coordonnées sont bien plus complexes que celles de Lorentz ; elles font appel à la géométrie différentielle et aux espaces courbes de Riemann (une géométrie non euclidienne). Il a été possible à Einstein de mettre au point des formules de déplacement qui laissent les équations invariantes. « Ainsi, en RG, la matière impose à l'univers de se courber, et cela de manière à satisfaire les équations d'Einstein. Dans cet univers courbé, toute particule d'épreuve est « libre » : elle décrit une géodésique de cet univers » (Mavridès, p.116).

« La théorie de la RG supprime l'indépendance de l'espace-temps par rapport à la matière et au champ. Sans champ, il n'y a pas d'espace, pas même topologique » (Paty, 226, n.6).

CONSEQUENCES COSMOLOGIQUES

La négation de l'inertie absolue, par rapport à l'espace (ou à l'espace-temps) a pour conséquence nécessaire que l'inertie (relative) est une notion dépendante des autres corps massifs de l'univers. Très tôt, Einstein se convainc (en particulier pour des raisons mathématiques ; les équations de la RG ne satisfont pas aux conditions limites d'un univers infini) que l'univers de la RG ne peut qu'être « refermé sur lui-même ». La cosmologie relativiste offre un univers ayant des frontières. « Du point de vue de la théorie de la connaissance, il est plus satisfaisant que les propriétés mécaniques de l'espace soient complètement déterminées par la matière, et tel est le cas seulement pour un univers fermé » (Einstein, 1921, in Paty p.217)

A NOUVEAU L'ETHER

« J'étais d'avis, en 1905, qu'on ne devait plus du tout parler d'éther en physique, mais ce jugement était trop radical ... et la RG oblige à le réviser » (E. 1920)

« Nier l'éther signifie en dernière instance que l'espace vide ne possède aucune propriété physique...or les faits fondamentaux de la mécanique indiquent le contraire » (Paty, p.220). L'espace vide n'est ni homogène, ni isotrope mais représenté par les potentiels de gravitations ; cela écarte l'idée que l'espace serait vide. « Un espace vide, c'est-à-dire un espace sans champ, n'existe pas » (Einstein, 1954, Paty, p.226, n.6).

L'espace de la RG c'est l'éther gravifique. On se trouve en fait avec deux doctrines de champ : les champs électromagnétiques et les champs de gravitation. Il y a donc deux réalités sans connexion logique, l'éther gravifique (l'espace) et le champ électromagnétique (la matière). L'étude de leur relation sera l'affaire de la *théorie unifiée*.

REMARQUES SUR LES MATHÉMATIQUES ET LA RG.

« Einstein découvre que le formalisme possède un rôle réellement heuristique : il devient l'outil indispensable, non pas seulement de l'expression des grandeurs physiques – ce qu'il fut toujours à travers leur mathématisation- mais de la découverte même des lois qui passe par leur formalisation » (Paty, p.222)

L'affaire est délicate :

Nous avons Einstein et son *principe de covariance* ou *principe d'équivalence* : c'est un principe de nature physique qui énonce la façon d'être de la nature : « Tous les systèmes de référence, quel que soit leur état de mouvement, doivent être équivalents pour l'expression des lois physiques » (in Mavrides, p.100).

Nous avons une impossibilité de suivre ce principe dans le cas des systèmes accélérés, et avec des formalismes déployés dans l'espace quasi-euclidien de Minkowski (de la RR) : les lois changent dans cet espace.

Il existe –déjà– une théorie mathématique abstraite qui permettrait de résoudre la question : quelle doit-être la structure (la forme et les concepts) de l'espace-temps pour que le principe de covariance soit respecté ?

C'est la question qu'Einstein pose à Marcel Grassmann. La réponse est précise : la géométrie riemannienne, le calcul tensoriel et le calcul différentiel absolu de Levi-Civita « permettent de donner une forme invariante aux équations de la physique » (Paty, 222).

Ceci fait dire à Einstein que « Les mathématiciens ont donc résolu depuis longtemps déjà les problèmes formels auxquels conduit le postulat de relativité générale » (Einstein, 1917, in Paty, p.223)

A partir de là, la spéculation est possible :

Est-ce la mathématique qui est la RG ou alors Einstein est-il dans le vrai en disant que « La forme mathématique de la théorie est seulement un instrument, et l'essentiel est de suivre de manière consistante le fil de quelques principes simples auxquels l'expérience physique nous a conduits » (*id.* p.223).

Il disait aussi, en 1933 : « La construction purement mathématique permet de découvrir les concepts et les principes qui les relient entre eux, et ceux-ci nous livrent la clé de la compréhension des phénomènes naturels [dans ce sens] c'est dans la mathématique que se trouve le principe véritablement créateur » (Einstein, cité in Paty, p.227)

N.B. Paty développe les rapports entre Elie Cartan et Albert Einstein (modèle de relations entre math et physique), *cf.*, p.229 *sq.*

LES GEOMETRIES NON EUCLIDIENNES ET L'ESPACE PHYSIQUE

On a beaucoup dit que la RG était une théorie mathématique. Ce n'était pas l'avis d'Einstein qui, d'une certaine manière, pensait que les auteurs des g.n.e. avaient élaboré une théorie de l'espace en quelque sorte *matériel*. En 1918, il écrit à Michele Besso : « La contribution de Gauss est d'avoir formulé les lois de l'emplacement de petites barres rigides sur une surface donnée. Son ds correspond à la petite barre rigide ; sans cette représentation concrète, tout le raisonnement serait demeuré impossible. La généralisation à un espace à n dimensions, réalisée par Riemann est certainement un acte purement spéculatif, mais elle repose, elle aussi sur la conception gaussienne de la réglette-étalon. En oubliant l'origine terrestre du ds^2 , ses successeurs n'ont certainement pas accompli un progrès » (in Paty, p.236)

Bien sûr, accompagnant cette discussion sur l'abstraction ou la réification de la théorie, un autre débat se renouvelle : l'espace est-il indépendant des corps qu'il renferme, ou ceux-ci le constituent-ils ? « Jusqu'alors écrit Hermann Weyl, tous les géomètres et les philosophes avaient considérés que les propriétés métriques de l'espace appartenaient à l'espace lui-même, indépendamment de la matière qu'il contient » (*id.*)

Le débat mobilise en particulier Ernst Mach, Henri Poincaré, Helmholtz, Einstein... (*cf.* Paty, p. 247 *sq.*)

La question est celle du rapport entre un espace de sensations, ou de conscience psychologique et un espace conceptuel et formel, notamment inauguré par les coordonnées cartésiennes. C'est évidemment un « problème kantien » qui est rediscuté.

MACH

« l'espace physiologique est très différent de l'espace métrique qui est conceptuel [...] Les chercheurs modernes sont portés à considérer l'espace comme un concept et en outre comme un concept dérivé de l'expérience » (p.248)

Ce n'est donc pas, pour Mach, une pure intuition *a priori* kantienne. Sa distinction des concepts est intéressante : « les faits doivent être soigneusement distingués des constructions intellectuelles (ou concepts) qu'ils ont suggérées. Les concepts doivent être compatibles avec l'observation et, de plus, être logiquement en accord les uns avec les autres. Ces deux conditions peuvent être remplies de plus d'une manière, d'où l'existence de plusieurs systèmes de géométrie » (p.248).

Ses analyses sur l'apprentissage physiologique de l'espace et des corps l'amène à penser que les propositions géométriques sont de même nature que les physiques : « la connaissance de ce que la somme des angles d'un triangle est égale à une quantité déterminée, nommément à deux droits, a été obtenue par l'expérience, d'une manière qui n'est pas différente de la loi du levier ou de la loi des gaz de Boyle et Mariotte » (p. 248-9). « Les chercheurs sont progressivement menés par leur échec à la prise de conscience de ce que la base véritable de la géométrie est l'expérience ».

POINCARÉ

On peut concevoir des mondes dans lesquels des géométries non-euclidiennes s'imposeraient à la pensée, comme fruit de la sensibilité : il élabore la fiction des êtres plats sur une sphère. Peut-être d'ailleurs est-ce le cas de notre monde à une échelle adéquate. Cette possibilité de concevoir de tels systèmes géométriques disqualifie les axiomes de la géométrie *en tant que formes a priori*. Ce ne sont, ni des jusap, ni des faits expérimentaux : ce sont des conventions. Attention, ces conventions ne sont pas arbitraires, mais guidées : « ce choix, parmi toutes les conventions possibles, est guidé par des faits expérimentaux ». « La question de savoir si la géométrie euclidienne est vraie n'a aucun sens [...] Une géométrie ne peut pas être plus vraie qu'une autre ; elle peut seulement être plus commode » (*La science et l'hypothèse*). C'est la raison pour laquelle, nous choisissons la géométrie euclidienne, comme plus accommodée à nos sens.

Concevons qu'il y a deux sortes d'espace auquel nous avons à faire : l'espace géométrique dans lequel ou par lequel sont conceptualisables les corps et l'espace représentatif qui est *constitué* par nos sensations des corps, par la collaboration de nos sens à nous les *présenter* et nous les *représenter*. Cet espace représentatif est le fruit de nos sens particuliers, il est « une image de l'espace géométrique » : « aucune de nos sensations, isolée, n'aurait pu nous conduire à l'idée de l'espace, nous y sommes amenés seulement en étudiant les lois suivant lesquelles ces sensations se succèdent » (*id.* p.83). Ainsi, on retiendra cette leçon de Poincaré : la géométrie tient sa genèse dans l'expérience et la sensation, mais elle n'en est Citations du cours sur la relativité

LA RG : UNE AUTRE GEOMETRIE.

M.A. Tonnelat : page d'introduction sur la variété non euclidienne.

« Dès 1913, Einstein pensait qu'une équivalence entre les forces de gravitation et les forces d'inertie devait entraîner une modification de la géométrie. Il était ainsi amené à postuler l'existence d'un univers non euclidien » (MAT, 266)

La loi de gravitation doit rester la même dans tous les systèmes. C'est le principe d'invariance auquel tient Einstein. Alors, dit (MAT 267) « Si on fait de l'invariance un principe fondamental, la loi de gravitation (ancienne) devra être modifiée pour que sa forme reste la même dans n'importe quel système (de Galilée ?). Cette loi va se présenter comme une relation entre les grandeurs qui caractérisent un univers non euclidien. Nous verrons qu'elle ne fait intervenir que la courbure d'espace-temps. Elle remplace le champ de gravitation par la donnée des lignes d'univers des différents points matériels, c'est-à-dire par les géodésiques de l'espace-temps considéré. » (MAT 268)

Il faut photocopier et lire jusqu'à « ...coordonnées ».

A partir des « petites barres » employées pour mesurer les distances sur le disque tournant. L'audace d'Einstein est de maintenir le cap et de maintenir le principe d'équivalence : ces barres sont dans des champs de force mais leur apparente différence de comportement ne tient pas au mouvement relatif des référentiels mais aux espace-temps dans lesquels ils évoluent : ces espaces-temps se modifient avec la présence de matière, ils ne sont pas des contenants objectifs et absolus. Ils leur faut une autre géométrie, une géométrie qui se plie au champ de gravitation.

« Dans les champs de gravitation, il n'existe rien comme des corps rigides ayant des propriétés euclidiennes et on doit laisser cette géométrie pour utiliser des corps de références géométriques de nature différente, non rigides » (Paty, p .206).

Einstein parle souvent du *mollusque*.

« A cause du caractère « local » du principe d'équivalence, en présence de gravitation on ne peut repérer tout l'espace au moyen d'un seul système ayant les propriétés d'un système d'inertie : on ne peut repérer qu'une petite région à l'aide d'un système lorentzien, la région voisine étant repérée à l'aide d'un autre système lorentzien » (Mavrides, 101)

Il travaille les mathématiques qui expriment ce genre d'espace courbé en chaque point avec Marcel Grossmann.*

Einstein admet qu'un bon espace est l'espace riemanien quadridimensionnel. Il ne diffère d'un euclidien que par la présence d'une courbure en chaque point. (l'esp. Euclidien a une courbure nulle) (MAT, 279).

Des conditions et hypothèses posées par Einstein sur le champ et la matière conduisent à une série de **dix équations différentielles** décrivant le champ gravitationnel, sa cinématique, sa structure et les comportements de la matière-énergie. Elles permettent (avec une certaine liberté de choix des systèmes de références) de calculer les « potentiels de gravitation » en chaque « point » de l'espace-temps.

En particulier, ce résultat fondamental :

« Les trajectoires d'une particule neutre soumise au champ de gravitation sont les géodésiques de l'espace de Riemann » (p. 282)

Lire la suite (p. 283). Les particules (sous gravité sont en fait des particules libres inertielles).

Lire et photocopier aussi le passage, p. 294.

Identité entre...sans objet ».

Exemple du calcul du champ de gravitation créé au voisinage d'une masse possédant une symétrie sphérique. (p.309-313).

C'est un cas célèbre et essentiel. La solution a été mise au point par Schwarzschild (1916).

Le calcul, fait sous diverses hypothèses physiques, conduit à découvrir quels sont les ds^2 des géodésiques ; à connaître la courbure, la structure de l'espace riemanien aux environs de cette masse à symétrie sphérique. Dans notre cas, la sorte de *dépression*.

MAT calcule aussi le champ créé par une particule chargée, à symétrie sphérique.

Calcul du géodésique résultant de la présence d'une masse « sphérique » (le soleil). La solution est une bonne approximation des trajectoires de la mécanique céleste. Calcul du périhélie de Mercure. (voir p. 317)

UN ESPACE DE RIEMANN (1826-1866)

Notion de courbure.

Une ligne droite a une courbure nulle. Un arc de cercle a une courbure donnée par $1/R$. Une ligne peut changer de courbure continuellement. En chaque point on peut définir une courbure (grâce au cercle tangent). C'est un espace courbe de dimension 1.

Un plan a une courbure nulle. Une sphère a une courbure donnée par $1/R^2$. Un ellipsoïde a une courbure composée selon deux cercles tangents, du genre $1/a.b$. Une surface courbe peut avoir une courbure négative (pseudo sphère). En chaque point, une valeur de la courbure.

A partir de la dimension 3, on a un problème de représentation. Les deux premiers cas étaient simples car on pouvait imaginer la ligne ou la surface courbée « dans » un espace tridimensionnel. Pour penser la courbure d'un espace tridimensionnel, il faut le concevoir (sinon le représenter) « dans un quadr ». Mais une extension des algorithmes de courbure est tout-à-fait possible dans un espace de dimension 3. Comme la distance ou la norme d'un vecteur dans R^4 .

Bref, on peut parfaitement concevoir des espaces de dimension 4 avec une courbure en chaque point.

Les espaces euclidiens ont des courbures nulles partout.

Repérage et géodésique sur un espace courbe.

Restons sur une surface non euclidienne. On peut choisir deux familles de courbes non concourantes qui serviront de repère pour chaque point, la famille U et la famille V. (Voir schéma Hladik, p. 85). Les paramètres (u,v) d'un point sont les coordonnées de Gauss.

On doit pouvoir exprimer la distance ds entre deux points voisins M (u, v) et M'(u+du, v+dv)

Gauss a montré que $ds^2 = g_{11}.du^2 + g_{12}.du.dv + g_{12}.dv.du + g_{22}.dv^2$.

Les g_{ij} dépendent de M (de ses coordonnées et de la courbure en M). Ces fonctions constituent ce que l'on appelle le *tenseur* de l'espace à deux dimensions.

ds^2 est la *métrique* de l'espace. Il s'agit d'une généralisation du théorème de Pythagore (valable chez Euclide) où l'affaire est particulièrement simple avec $ds^2 = du^2 + dv^2$.

Si nos deux points sont éloignés, il faut calculer (par intégration) le chemin pour aller de l'un à l'autre. Le plus petit de ces chemins définit la courbe *géodésique* de notre espace.

Une **géodésique** est la généralisation de la notion de "ligne droite" aux "espaces courbes". La définition de la géodésique dépend du type d'"espace courbe". Dans le cas où cet espace dispose

d'une métrique, alors la géodésique se définit effectivement comme, localement, le chemin le plus court entre deux points de l'espace.

Ce sont les trajectoires d'un point matériel se déplaçant sur la surface et soumis à la seule réaction normale ; sans cause de modification de leur trajectoire. (Inertielle en quelque sorte).

Les géodésiques euclidiennes sont les lignes droites, les géodésiques sur une sphère sont les grands cercles, les géodésiques d'un cylindre sont les hélices tracées sur ce cylindre etc.

Pour disposer de l'espace-temps de la relativité générale, il « suffit » de concevoir ces mêmes notions en dimension 4. (évidemment les représentations sont impossibles ou simplifiées, projetées).

Les calculs sont plus complexes car un point a quatre coordonnées (u,v,w,x) et la métrique a 16 paramètres g_{ij} . Compte tenu du fait que le tenseur est symétrique ($g_{ij} = g_{ji}$), il n'y en a « plus que » 10).

Ces dix composantes décrivent complètement l'espace-temps, soit encore le champ de gravitation. Ce sont les dix équations de la RG.

Le principe de relativité générale peut alors s'énoncer ainsi :

« Tous les systèmes de coordonnées de Gauss sont équivalents pour la formulation des lois de la nature ».

Pour passer d'un système à l'autre, il faut des formules de transformations des g_{ij} en g'_{ij} .

IDENTIFICATION GEOMETRIE-DYNAMIQUE

Einstein a identifié les composantes géométriques du tenseur (les g_{ij}) à des caractéristiques du champ de gravité généré par la matière. Dès lors, ces g_{ij} sont en même temps les caractéristiques géométriques et physiques du lieu. La géométrie livre les caractéristiques physiques.

Il y a donc un grand dépassement du point de départ de la RG : on était parti de l'identification « champ d'accélération-inertie » avec « champ de gravité » ; maintenant on unifie ces deux-là avec les « champs des composantes géométriques ».

Le champ de gravitation créé par une masse quelconque est variable d'un point à un autre de l'espace.

Les pages 114-116 de Mavrides sont OK.

L'inertie et la gravité ne font que manifester la tendance immédiate –de nature physique et de mode d'expression géométrique- à « tomber » ou plutôt à « suivre les géodésiques » de l'espace-temps où ils se trouvent. Une objection est de dire : « oui mais les corps ont un mouvement accéléré » donc avec causalité qui change son état.

Ceci serait valable dans un espace où le temps serait indépendant de l'espace. Dans un espace-temps, c'est l'intervalle d'espace-temps qui est minimal, naturel et inertiel. Cet intervalle d'espace-temps dépend de la géométrie locale. Il peut apparaître temporellement plus ou moins long selon l'observateur. Ainsi une trajectoire « accélérée » pour un galiléen est-elle un géodésique « pseudo inertiel » dans l'espace-temps convenable dont la géométrie est déterminée par le champ gravitationnel.

LA RG ET LA LUMIERE

Expérience de Sagnac :

La vitesse de la lumière n'est pas constante et indépendante du repère d'observation ou de l'émetteur. Elle est affectée par les accélérations (et donc par l'inertie qui est équivalente).

MAT décrit le géodésique correspondant à un rayon lumineux dans un champ créé par une masse « sphérique » (p. 319). Condition particulière, c'est un géodésique de longueur nulle ($ds = 0$, comme on a vu). La solution fait apparaître une déviation du rayon (par rapport à la ligne droite de nos observations et de nos calculs euclidiens).

- Décalage vers le rouge

Très tôt, en 1907. Soit un rayon de lumière placé dans un repère accéléré ; il y a un « décalage vers le rouge » de sa longueur d'onde dont rendent compte le comportement des équations de Maxwell (je rappelle que ces équations rendent compte de « zéro changement » dans un référentiel galiléen). Autrement dit, un « papillon optique ne vole pas de la même manière ». Les transformations de Lorentz ne laissent pas invariant un phénomène optique, dans un référentiel accéléré.

- Déviation par la gravité.

Dans un champ de gravitation, le rayon ne se propage plus en ligne droite. Dans un champ de gravitation, les rayons lumineux se propagent en décrivant des trajectoires généralement courbes.

- Modification de c

Déjà, en 1907, Einstein montre que les équations de Maxwell gardent la même forme si on remplace, dans le système accéléré Σ , la vitesse, qui vaut c , par $c(1 + \Phi/c^2)$; avec Φ dépendant de l'accélération. On juge de l'audace intellectuelle pour Einstein qui a fait de c une constante universelle. On peut donc « sauver » l'invariance du phénomène par transformation des coordonnées.

La loi souvent mentionnée de la constance de la vitesse de la lumière dans le vide ne peut pas prétendre à une validité illimitée. En effet, une courbure des rayons lumineux ne peut se produire que si la vitesse de propagation de la lumière varie avec le lieu. La RR ne peut prétendre à un domaine de validité illimité. (Einstein, 105)

C'est le plus beau sort d'une théorie physique que d'ouvrir la voie à une théorie plus vaste dans laquelle elle continue à vivre comme cas particulier. (id. 106)

« D'après la RG, la vitesse de la lumière dépend toujours des coordonnées, s'il existe un champ de gravitation » (Payot, p. 131)

LA DIFFERENCE ENTRE LE CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ET LE CHAMP DE GRAVITATION

Bonne page de MAT sur les tentatives « unitaires » gravitation-optique. Photocopier p.326 et 327.

Page 298 de MAT. Si j'ai bien compris :

Le cem n'exige pas de modifier la métrique. Soit une particule chargée, dans un cem. Les équations de ce champ total peuvent être –en principe– séparées du champ propre créé par la particule. (pas clair)

Au contraire, on ne peut séparer rigoureusement le champ de gravitation agissant sur une particule déterminée du champ total produit par un ensemble de particules.

MAT y revient dans sa très bonne conclusion, p. 323-324.