

Ma réflexion sur la théorie de la relativité restreinte m'a conduit à proposer une nouvelle approche,¹ remettant en cause certains principes touchant à la masse et à l'énergie.

La présente note a d'abord pour but d'expliciter ma conception de ces deux notions, en regard notamment de l'opération de changement de référentiel galiléen.

Puis elle propose une explication physique du phénomène de désynchronisation des horloges constaté entre deux référentiels en mouvement relatif. Cette explication m'a été inspirée par le principe de Mach.

1. Notions de masse et d'énergie dans la Physique actuelle

La masse est une grandeur physique attachée intrinsèquement à un corps ; elle constitue l'une des caractéristiques des particules élémentaires.

La « masse pesante » intervient dans la définition de l'attraction gravitationnelle, la « masse inerte » dans le principe fondamental de la dynamique. En Mécanique newtonienne, ces deux masses sont déclarées égales, ce qui constitue le « principe d'équivalence ».

Parmi les propriétés de la masse figure le postulat que la masse d'un corps ne dépend pas du référentiel dans lequel le corps est considéré (« principe d'invariance de la masse »).

L'énergie cinétique (qui est l'énergie liée à la vitesse d'un corps dans un référentiel donné) est proportionnelle à la masse. Elle dépend du référentiel considéré.

En ce qui concerne l'énergie, la théorie de la relativité restreinte a apporté une modification majeure par rapport à la Mécanique newtonienne : un corps, même au repos, est doté d'une énergie propre qui représente l'énergie totale qui peut être libérée par la disparition complète de la matière constituant ce corps. Cette énergie est donnée par la relation d'Einstein :

$$E = m c^2$$

Dans cette relation, m représente la « masse relativiste » qui permet d'intégrer l'énergie cinétique :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

La masse au repos m_0 est toujours considérée comme invariante par changement de référentiel.² Notons que cela implique que l'énergie totale d'un corps est fonction du référentiel auquel on le rattache.

¹ Cf. note « Une autre approche de la relativité » Table des matières en annexe.

² En conséquence, il a été convenu de réserver le terme « masse » à la masse au repos. Compte tenu des propositions rappelées plus loin, il est dérogé à cette convention dans la note 1 ci-dessus.

2. Questions à propos des référentiels

Léon Brillouin s'est interrogé sur la notion de référentiel.³ Il explique, qu'à partir du moment où l'on réalise une expérience dans un référentiel [*frame of reference*], celui-ci ne peut pas être considéré comme un simple système de coordonnées [*set of coordinates*], en raison notamment de la nécessité de tenir compte du principe d'action et de réaction. Il conclut par ces mots :

«*Un référentiel n'est plus un cadre géométrique irréal ; c'est un laboratoire massif, construit sur un corps rigide d'une masse énorme, comparée aux masses en mouvement.* »

Au-delà de ce constat, on peut se poser la question suivante : si une expérience se déroule dans un référentiel donné, que penser de l'observation de cette expérience à partir d'un autre référentiel ?

Peut-on considérer tous les référentiels galiléens comme équivalents vis-à-vis d'une expérience, comme le fait la théorie de la relativité restreinte ? Ou bien doit-on admettre que, pour une expérience donnée, il existe un référentiel privilégié, dans lequel sont connues les énergies totales des corps entrant dans l'expérience et sont définies les actions modifiant ces énergies ?

D'autre part, si l'on fournit de l'énergie à un corps pour augmenter sa vitesse dans un référentiel donné, puis que l'on transfère ce corps dans un autre référentiel où sa vitesse est différente, que devient l'énergie cinétique acquise dans le premier référentiel (et partie intégrante de l'énergie totale) ?

Autre question : peut-on expliquer physiquement le phénomène de désynchronisation des horloges constaté entre deux référentiels en mouvement relatif ?

La nouvelle approche de la relativité aborde ces questions de façon différente de la Physique actuelle, comme cela va être exposé maintenant.

3. Bases de la nouvelle approche de la relativité

Ma nouvelle approche de la relativité a été motivée par le constat que la dilatation des durées, prévu par la théorie de la relativité restreinte, conduit à une contradiction : si l'on considère deux référentiels galiléens Σ et Σ' (en mouvement rectiligne et uniforme à la vitesse u par rapport à Σ), l'expérience de mise en mouvement d'une horloge à la vitesse u à partir du référentiel Σ permet d'affirmer que le temps s'écoule plus lentement dans Σ' que dans Σ , mais l'affirmation opposée peut être faite en considérant la mise en mouvement d'une horloge à la vitesse $-u$ à partir de Σ' .⁴

3.1. En renonçant à la déformation de l'espace et du temps, peut-on proposer une alternative à la théorie de la relativité restreinte tout en conservant le principe de relativité et la loi relativiste de composition des vitesses, qui semblent validés par l'expérience ?

³ L. Brillouin « *Relativity reexamined* » Academic Press, Inc. 1970 (réimprimé par Amazon)

⁴ Expérience du paradoxe des horloges. Cf. note « *Une autre approche de la relativité* » paragraphe 2.3.4. On peut aussi se référer au livre d'Herbert Dingle « *Science at the Crossroads* » 1972 (réédité par GogLiB)

Une hypothèse simple consiste à considérer que le temps s'écoule de façon universelle (ce qui veut dire qu'on n'observe pas de dilatation des durées), mais que la synchronisation des horloges dans chaque référentiel ne conduit pas au temps absolu de la Mécanique newtonienne en raison de l'existence d'une vitesse limite. D'autre part on considère l'espace comme absolu (il n'y a pas de contraction des longueurs entre référentiels).

Mais, si on renonce à l'hypothèse d'une déformation de l'espace et du temps d'un référentiel mobile par rapport à un référentiel supposé fixe, comment expliquer le retard des horloges en mouvement ou l'augmentation de la durée de vie des muons atmosphériques par rapport à celle des muons au repos, phénomènes vérifiés expérimentalement ?

3.2. La réponse proposée conduit, en cas de changement de référentiel, à remplacer l'invariance de la masse au repos par l'invariance de l'énergie totale.

Si, après mise en mouvement, les horloges retardent et la durée de vie des muons augmente, c'est parce que leur énergie a augmenté.⁵ L'énergie cinétique ne peut pas être gommée par un changement de référentiel ; elle est emportée par un corps que l'on a mis en mouvement et reste présente dans un autre référentiel où le corps est au repos. Cela veut dire que, dans ce deuxième référentiel l'énergie au repos _ et donc la masse au repos – du corps ont augmenté.

L'invariance de l'énergie totale doit se comprendre de la façon suivante : si, dans le référentiel Σ , la masse au repos d'un corps est égale à m_0 , dans le référentiel Σ' se déplaçant à la vitesse u par rapport à Σ , on doit attribuer à ce corps la masse au repos :

$$m'_0 = \gamma m_0 \quad (1)$$

avec :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-u^2/c^2}}$$

Ceci est valable pour écrire dans Σ' les lois de la physique décrivant l'expérience qui se déroule dans Σ . En revanche, si on transfère dans Σ' un corps au repos dans Σ , de masse au repos connue m_0 , toute expérience dans Σ' utilisant ce corps devra lui attribuer une masse au repos :

$$m'_1 = m_0/\gamma$$

Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 5 de la note.

On vérifie ⁶ que l'hypothèse (1) est cohérente avec les équations de changement de coordonnées suivantes :

$$x' = \gamma^2 (x - ut) \quad (2)$$

$$t' = \gamma^2 (t - ux/c^2)$$

⁵ La note « *Retard des horloges atomiques* » propose une analyse explicative. D'autres types d'horloges pourraient ne pas être affectées par un changement d'énergie.

⁶ Cf. note « *Une autre approche de la relativité* » paragraphe 3.2.2.

Ces équations diffèrent des formules de Lorentz par le coefficient γ^2 (au lieu de γ). **Ce coefficient traduit l'absence de dilatation de l'espace et du temps :**

$$\Delta x' = \Delta x \text{ si } \Delta t' = 0 \text{ et } \Delta t' = \Delta t \text{ si } \Delta x' = 0$$

Les équations inverses s'écrivent :

$$\begin{aligned} x &= x' + ut' \\ t &= t' + ux'/c^2 \end{aligned} \quad (3)$$

La correspondance entre référentiels n'est plus biunivoque.

3.3. Les référentiels ne sont donc plus équivalents. Pour une expérience donnée, il faut admettre que le référentiel dans lequel se déroule l'expérience est privilégié.

Le fait de mener l'expérience dans ce référentiel implique que l'on y connaît l'énergie au repos des corps qui entrent en jeu. Dans tout autre référentiel, pour décrire l'expérience, on doit utiliser des énergies au repos cohérentes avec celles du référentiel de base.

Dans le référentiel de l'expérience Σ , l'énergie totale des corps est l'énergie physique réelle (nous dirons « vraie ») à tout moment. En revanche, dans un autre référentiel Σ' , si on peut considérer comme « vraie » l'énergie au repos, l'application de la relation $E' = m' c^2$ conduit à des énergies « apparentes » différentes des énergies « vraies » calculées dans Σ .

Peut-être doit-on voir là une limite du principe de relativité : les lois de la Physique s'expriment de manière identique dans tous les référentiels inertiels à condition d'accepter que certaines grandeurs ayant un caractère absolu (comme l'énergie totale) puissent prendre des valeurs « apparentes » différentes d'un référentiel à l'autre.

3.4. Enfin, la nouvelle approche proposée s'appuie sur une conception différente de la notion d'événement.

Une expérience peut être regardée comme une succession d'événements, un événement étant un fait qui se produit en un point et à un instant donnés. Le référentiel privilégié de l'expérience se distingue-t-il aussi des autres en ce qui concerne la notion d'événement ?

Supposons que tous les référentiels galiléens soient rattachés entre eux par la définition d'un instant origine du temps commun lorsque les origines des repères spatiaux sont confondues.

Avec l'hypothèse d'universalité de l'écoulement du temps (pas de dilatation), tout événement est caractérisé par la durée T , qui le sépare de l'instant origine commun.

Nous dirons qu'un événement est « produit » dans un référentiel Σ si le temps(date) affiché par l'horloge du point auquel il est rattaché est identique à cette durée. Cela est bien sûr le cas pour les événements correspondants à une expérience dans Σ .⁷ Dans les autres référentiels, l'événement est

⁷ Dans le référentiel de l'expérience, par définition de la synchronisation, la durée donnée par toute horloge du référentiel représente la durée réellement écoulée.

perçu à un temps (date) différent de T' (sauf s'il est perçu au point origine du référentiel), en raison de la désynchronisation des horloges entre référentiels.⁸

Dans la Mécanique newtonienne, il n'y a pas de distinction entre événement « produit » ou « perçu » puisque le temps est absolu.

Dans la théorie de la relativité restreinte, on ne fait pas non plus cette distinction, ce qui conduit à un changement de coordonnées biunivoque : on suppose que la conjonction des deux points de coordonnées x dans Σ et x' dans Σ' constitue un même événement « produit » simultanément dans les deux référentiels.⁹

C'est là que la contradiction trouve sa source : si le temps n'est pas absolu, un événement ne peut pas être considéré comme « produit » dans tous les référentiels, exception faite de l'événement servant à définir l'instant origine commun.

3.5. On peut résumer comme suit les différences entre la théorie de la relativité restreinte et notre nouvelle approche :

- La théorie de la relativité restreinte postule que tous les référentiels galiléens sont équivalents vis-à-vis des événements et des expériences ; ce choix est cohérent avec le principe d'invariance de la masse au repos par changement de référentiel. Il implique une déformation de l'espace et du temps entre référentiels en mouvement relatif.
- La nouvelle approche proposée considère qu'un événement ou une expérience sont nécessairement rattachés à un référentiel privilégié ; ce choix implique de remplacer l'invariance de la masse au repos par celle de l'énergie totale (einsteinienne) lorsqu'on transfère un corps d'un référentiel à un autre. D'autre part, il n'y a plus de déformation de l'espace et du temps.

Dans la théorie de la relativité restreinte on peut considérer que la relativité est poussée à son extension maximale (!). De mon point de vue, la dilatation des durées qui en résulte conduit à une contradiction. Et le caractère physique absolu de l'énergie totale n'est pas pris en compte.

3.6. Notre nouvelle approche de la relativité s'est avérée fructueuse pour traiter la gravitation par une approche énergétique en lieu et place de la relativité générale.

Le décalage gravitationnel des horloges est interprété comme une conséquence de la variation d'énergie au repos de celles-ci en fonction de leur distance à la source gravitationnelle.¹⁰ Cette hypothèse nous a permis de formuler des lois en restant dans le cadre de la dynamique sans déformation de l'espace et du temps.

⁸ Voir le chapitre 4. Ci-après.

⁹ Voir l'analyse complète de la conjonction entre les points de coordonnées x et x' dans la note « Une autre approche de la relativité » paragraphe 2.4.2.

¹⁰ Cf. note « Une autre approche de la relativité » chapitre 5.

Puis nous avons introduit un modèle de champ gravitationnel permettant de justifier ces lois, de retrouver le principe fondamental de la dynamique et de rattacher le concept de dualité onde-particule aux caractéristiques de renouvellement du champ.¹¹

4. Explication de la désynchronisation des horloges

La désynchronisation des horloges entre deux référentiels en mouvement relatif se traduit par le fait, qu'à un même instant dans un des référentiels, les observateurs voient une image déformée de l'autre référentiel puisque les horloges de ce dernier marquent des temps différents dépendant de leur position :

$$\begin{aligned} \text{D'après les équations (3):} \quad & \text{à l'Instant } t \text{ dans } \Sigma : & [x, t] \rightarrow [x' = x - ut', t' = t - ux'/c^2] \\ & \text{à l'Instant } t' \text{ dans } \Sigma' : & [x', t'] \rightarrow [x_1 = x' + ut_1, t_1 = t' + ux_1/c^2] \end{aligned}$$

Nous avons vu que, si l'on se place dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte, $[x', t']$ redonne $[x, t]$ en raison de l'effet de la déformation de l'espace et du temps qui s'ajoute à celui de la désynchronisation.

La désynchronisation des horloges est liée à l'existence d'une vitesse limite.¹² Celle-ci est la vitesse de déplacement de l'énergie c : vitesse des ondes gravitationnelles¹³ ou des ondes électromagnétiques, qui est identique dans tous les référentiels.

A partir de là, comment expliquer physiquement le phénomène de désynchronisation ?

Dans un référentiel galiléen, l'opération de synchronisation des horloges s'appuie sur le fait que, par définition d'un tel référentiel, deux expériences identiques, décalées par translation et rotation dans l'espace, se déroulent avec les mêmes durées. Inversement, on pourrait dire que c'est le fait de synchroniser les horloges de façon à attribuer la même durée aux expériences qui rend le référentiel galiléen.

On sait qu'Ernst Mach a émis l'hypothèse que l'inertie des objets matériels serait induite par l'ensemble des autres masses présentes dans l'univers.

En conséquence de cette hypothèse, les référentiels galiléens, considérés, ainsi que nous l'avons vu, comme des « cadres de référence » massifs, paraissent en quelque sorte « en équilibre » avec le reste de l'univers, c'est-à-dire immobiles par rapport au cadre que constitue l'ensemble des masses de cet univers.¹⁴

¹¹ Cf. note « *Champ gravitationnel, Principe Fondamental de la dynamique et Mécanique quantique* »
Table des matières en annexe.

¹² Cf. note « *Une autre approche de la relativité* » paragraphe 2.3.

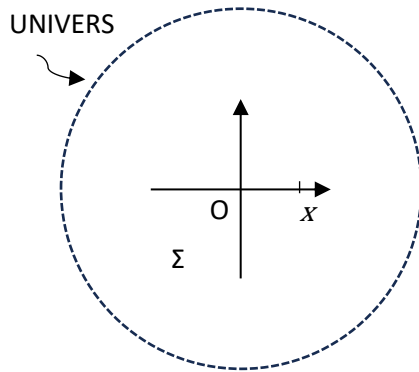
¹³Au sens défini dans la note :

« *Champ gravitationnel, Principe Fondamental de la dynamique et Mécanique quantique* » paragraphe 1.1.3.

¹⁴ L'article de Wikipédia consacré au « *Principe de Mach* » recense l'énoncé suivant pour ce principe : [les référentiels inertiels locaux sont affectés par le mouvement cosmique et la distribution de la matière.](#)
Julian Barbour et Herbert Pfister (éd.), "*Mach's principle : from Newton's bucket to quantum gravity*" (actes de la conférence tenue à Tübingen en juill. 1993), Boston, Bâle et Berlin, Birkhäuser, coll. « Einstein studies » (n° 6), août 1995, 1^{re} éd.

Se pose alors la question suivante : comment deux référentiels galiléens en mouvement relatif peuvent-ils satisfaire tous les deux cette condition ?

La réponse que nous donnons est la suivante : cela n'est admissible que si le temps ne peut pas être considéré comme absolu ; on doit observer un décalage du temps d'un référentiel à l'autre.



Dans un référentiel galiléen l'interaction avec les masses de l'univers se traduit par des échanges d'énergie à la vitesse c (par l'intermédiaire des ondes de rafraîchissement des champs).

Pour un point d'abscisse x , la transmission des interactions selon l'axe Ox est décalée d'une durée $T = x/c$ par rapport à l'origine O du référentiel.

Considérons maintenant les référentiels Σ , supposé fixe, et Σ' en mouvement à la vitesse u selon l'axe Ox .

Si le temps était absolu, le décalage de la transmission selon Ox' dans Σ' serait modifié dans Σ de la valeur : $\Delta T' = uT'/c = ux'/c^2$

Puisque Σ' est galiléen, cette variation du décalage doit être compensée par une désynchronisation des horloges de Σ' par rapport à Σ .

On retrouve bien la relation : $t' = t - ux'/c^2$

Ce résultat reste vrai si l'on considère une interaction selon une direction quelconque. Si l'on désigne par α l'angle de cette direction par rapport à Ox' , le décalage s'écrit :

$$\Delta T' = u (x' \cos\alpha / c) (u / c \cos\alpha) = ux'/c^2$$

5. Questions restant posées par la nouvelle approche

5.1. Quelle forme prend l'énergie cinétique acquise par un corps ?

La question ne se pose pas en Mécanique newtonienne ou dans le cadre de la relativité restreinte puisque l'énergie cinétique y est considérée uniquement comme une énergie apparente dépendant du référentiel.

Dans la nouvelle approche proposée, nous avons vu que l'énergie cinétique, qui fait partie de l'énergie totale, n'est pas perdue lorsqu'on transfère un corps d'un référentiel à un autre. Mais le partage entre énergie au repos et énergie cinétique est modifié.

Dans un référentiel donné, une variation de l'énergie cinétique_ et donc de l'énergie totale _ se traduit par une variation du rayon limite du champ gravitationnel.

Quel en est l'implication au niveau des particules élémentaires ?

5.2. En route pour la Physique des particules de masse inconnue ?

Lorsqu'une particule est prise en charge dans un référentiel, la masse au repos qu'on doit lui attribuer est fonction de son passé, qui a conduit à lui donner une certaine énergie totale. Deux particules identiques ayant vécu une histoire différente n'ont pas nécessairement la même masse au repos.

Cela ouvre la porte à de nombreuses interrogations, concernant par exemple les spectres d'émission des particules ou les bilans de masse dans les expériences.

Et quelles pourraient être les conséquences pour le modèle standard des particules élémentaires :

ANNEXES / Tables des matières des notes :

- Une autre approche de la relativité
- Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique

Une autre approche de la relativité

1. Introduction et résumé	2
2. Référentiels galiléens et changement de référentiel	5
2.1. Rappel des propriétés des référentiels galiléens	5
2.2. Synchronisation des horloges	5
2.3. Changement de référentiel dans la théorie de la relativité restreinte	6
2.3.1. <i>Prise en compte de la désynchronisation</i>	6
2.3.2. <i>Existence d'une vitesse limite</i>	7
2.3.3. <i>Formules de Lorentz</i>	8
2.3.4. <i>Dilatation ou contraction de l'espace et du temps</i>	9
2.4. Analyse alternative à celle de la relativité restreinte.....	10
2.4.1. <i>Principes</i>	10
2.4.2. <i>Nouvelles équations de changement de coordonnées</i>	11
3. Approche relativiste à partir de l'équivalence entre masse et énergie	14
3.1. Relation entre les énergies calculées dans deux référentiels galiléens	14
3.2. Choix d'un invariant pour l'énergie	16
3.2.1. <i>Invariance de la masse au repos de toute particule</i>	16
3.2.2. <i>Conservation de l'énergie totale par changement de référentiel</i>	17
3.3. Conséquences de l'invariance de l'énergie totale	19
3.3.1. <i>Influence de l'énergie sur le rythme des horloges</i>	19
3.3.2. <i>Conception de l'espace et du temps</i>	20
3.3.3. <i>Référentiel privilégié, vitesse vraie et énergie vraie</i>	21
4. Prise en compte des phénomènes lumineux	22
4.1. Vitesse et fréquence des ondes électromagnétiques	22
4.1.1. <i>Vitesse de la lumière comme vitesse limite</i>	22
4.1.2. <i>Universalité de la vitesse de la lumière</i>	22
4.1.3. <i>Effet Doppler</i>	23
4.1.4. <i>Interprétation du décalage spectral de sources éloignées</i>	24
4.2. Energie associée à une onde électromagnétique	24
4.2.1. <i>Energie d'un photon</i>	24
4.2.2. <i>Puissance d'une onde électromagnétique</i>	26
5. Gravitation	27
5.1. Formulation des lois de la gravitation	27
5.1.1. <i>Lois en champ gravitationnel faible</i>	27
5.1.2. <i>Principes retenus</i>	31
5.1.3. <i>Cas des photons. Décalage spectral gravitationnel</i>	32
5.1.4. <i>Cas de l'action du seul champ de gravitation. Théorème des moments cinétiques</i>	34
5.2. Calcul de l'avance du périhélie de Mercure.....	35
5.3. Courbure des rayons lumineux	37
5.4. Expérience de Pound et Rebka (effet spectral gravitationnel)	38
5.5. Effet Shapiro	40
5.6. Comparaison avec la théorie de la relativité générale.....	42

Champ gravitationnel, Principe fondamental de la dynamique et Mécanique quantique

1. Propriétés du champ gravitationnel	3
1.1. Principes.....	3
1.1.1. <i>Nouvelle approche de la relativité</i>	<i>3</i>
1.1.2. <i>Principe d'interaction gravitationnelle.....</i>	<i>3</i>
1.1.3. <i>Rafrâichissement du champ gravitationnel</i>	<i>4</i>
1.2. Modèle de champ gravitationnel.....	4
1.2.1. <i>Rappel du modèle newtonien.....</i>	<i>4</i>
1.2.2. <i>Nouveau modèle de champ.....</i>	<i>7</i>
1.3. Mécanisme de rafraîchissement du champ gravitationnel	9
1.3.1. <i>Emission et réception d'énergie</i>	<i>9</i>
1.3.2. <i>Sources en interaction : échange d'énergie entre sources et champ.....</i>	<i>10</i>
1.3.3. <i>Photons dans un champ gravitationnel</i>	<i>11</i>
2. Champ gravitationnel et Principe fondamental de la dynamique	12
2.1. Equation fondamentale de la dynamique.....	12
2.2. Etablissement de l'équation fondamentale de la dynamique à partir du champ	12
2.3. Partage de l'énergie potentielle dans notre approche de la gravitation.....	14
3. Champ gravitationnel et Mécanique quantique.....	15
3.1. Comportement ondulatoire.....	15
3.1.1. <i>Hypothèse de Louis de Broglie</i>	<i>15</i>
3.1.2. <i>Théorie de la double solution et onde pilote.....</i>	<i>16</i>
3.2. Caractéristiques des ondes gravitationnelles	16
3.2.1. <i>Quantum d'énergie gravitationnelle.....</i>	<i>16</i>
3.2.2. <i>Source en mouvement.....</i>	<i>18</i>
3.2.3. <i>Energie déplacée</i>	<i>19</i>
3.3. Onde gravitationnelle résultante en tant qu'onde pilote.....	20
3.3.1. <i>Trajectoire de la particule</i>	<i>20</i>
3.3.2. <i>Interférence.....</i>	<i>22</i>
3.3.3. <i>Equation différentielle de propagation</i>	<i>22</i>
3.3.4. <i>Limite du comportement ondulatoire</i>	<i>24</i>