

# Présentation de la relativité restreinte

Harold Erbin

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Les débuts de la mécanique</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Remise en question de la mécanique classique, et naissance de la relativité</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Autres conséquences</b>	<b>3</b>
4.1	Abandon de la simultanéité . . . . .	3
4.2	Dilatation des temps . . . . .	4
4.3	Contraction des longueurs . . . . .	5
4.4	Équivalence entre masse et énergie . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>6</b>

Ce texte est publié sous la licence libre

**Licence Art Libre :**

<http://artlibre.org/licence/lal/>

Version : 1<sup>er</sup> mars 2010

Site : <http://harold.e.free.fr/>

## 1 Introduction

Dans cet article je chercherai à donner quelques notions sur la relativité restreinte et les notions qui lui sont propres. J'ai essayé de réaliser cette présentation de sorte à ce qu'elle soit comprise sans posséder plus que des notions de base en mathématiques. Pour cette raison, certains phénomènes seront décrits uniquement par leurs effets et je n'exposerai pas leurs causes, car les calculs nécessaires à leur démonstration sont parfois lourds. Toutefois, si l'on s'interroge sur le pourquoi, la réponse est simple : tout découle uniquement du principe de relativité. Il s'agit d'un postulat, c'est à dire un énoncé créé par l'homme afin de déduire certaines choses. Ainsi, vous pourriez demander : « Mais est-ce que tout ceci est vrai ? » Je répondrai alors que la question n'est pas là, et citerai Louis de Broglie à ce propos :

« Cette hypothèse est la base de notre système ; elle vaut, comme toutes les hypothèses, ce que valent les conséquences qu'on peut en déduire. »

Ainsi, puisque les résultats de la théorie sont en excellent accord avec les expériences qui ont été menées, on peut affirmer que ce postulat présente un intérêt. Quant à savoir s'il représente réellement la réalité, cela relève de l'épistémologie.

## 2 Les débuts de la mécanique

Une théorie physique peut être exposée de plusieurs manières. Pour cette raison, elle n'aura de sens que si les résultats concordent quelle que soit la voie utilisée pour décrire le problème. Il s'agit du *principe de relativité*. Au moyen de transformations appropriées, il est possible de passer d'une description à une autre du mouvement.

La mécanique classique, dont les bases ont été posées au XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> par Galilée et Newton, a permis d'expliquer de nombreux phénomènes sans jamais être remise en question. Cette dernière suppose le temps comme étant absolu, c'est à dire que tout événement a lieu en même temps dans tous les référentiels<sup>1</sup>. La mécanique classique utilise la transformation de Galilée pour passer d'un référentiel à un autre : celle-ci mène à la loi de composition des vitesses galiléenne :

$$v = v' + V \tag{1}$$

où  $v$  est la vitesse d'un objet dans un premier référentiel,  $v'$  la vitesse de ce même objet dans un second référentiel, et  $V$  la vitesse entre les deux référentiels. Prenons un exemple : imaginons que quelqu'un conduise une voiture à 50 km/h, et qu'une autre voiture roule dans le même sens 30 km/h plus vite. Alors, tout le monde conclura que la vitesse de la seconde voiture sera de  $50 + 30 = 80$  km/h.

---

1. Un référentiel permet de repérer la position et l'instant d'un évènement au moyen de quatre grandeurs : trois symbolisant le lieu, et une le temps.

### 3 Remise en question de la mécanique classique, et naissance de la relativité

Toutefois, il est apparu à la fin du XIX<sup>e</sup> que la mécanique classique était incompatible avec la théorie de l'électromagnétisme<sup>2</sup> : différentes expériences (la plus connue étant celle de Michelson et Morley, réalisée en 1887) ont mis en évidence que la vitesse de la lumière, notée  $c$ <sup>3</sup>, était identique dans tous les référentiels, ce qui contredit de manière flagrante la loi (1) : prenons un photon<sup>4</sup> voyageant à la vitesse  $c$ , et un second photon voyageant  $c$  plus vite par rapport au premier. Alors, la formule (1) donnera une vitesse de  $c + c = 2c$  pour le deuxième photon, alors que nous devrions trouver encore  $c$  !

Einstein, s'appuyant sur les travaux de Lorentz et de Poincaré, proposa sa théorie de la relativité restreinte en 1905 afin de résoudre ces problèmes. Il mit en évidence le fait que la transformation de Galilée était erronée et devait être remplacée par la transformation de Lorentz. De cette dernière nous pouvons déduire une nouvelle loi de composition des vitesses :

$$v = \frac{v' + V}{1 + v'V/c^2} \quad (2)$$

en utilisant les mêmes notations que précédemment ; il est d'ailleurs remarquable d'y trouver la présence de la vitesse de la lumière. En utilisant cette nouvelle formule, on obtient le résultat correct pour l'addition de deux vitesses  $c$  :  $(c + c)/(1 + c^2/c^2) = 2c/2 = c$ .

Une autre conséquence intéressante de cette équation est qu'il est impossible de dépasser la vitesse de la lumière. La transformation de Lorentz mélange le temps et l'espace, et c'est pour cette raison qu'on ne considère plus un espace à trois dimensions, mais un espace-temps à quatre dimensions.

## 4 Autres conséquences

### 4.1 Abandon de la simultanéité

En relativité restreinte, il faut abandonner l'idée d'un temps absolu : deux événements simultanés dans un référentiel peuvent avoir lieu à des instants différents dans un autre. Pour illustrer ce phénomène, imaginons une petite rue. À chaque extrémité de celle-ci se trouve un enfant portant un ballon. Ils conviennent ensemble d'envoyer leur ballon (à la même vitesse) sur quiconque se trouvant exactement au milieu de la rue, avant de se sauver en vitesse. Poincaré arrive et s'installe tranquillement au milieu de la rue. Les enfants, le voyant, lancent leur ballon sur lui. Poincaré se lève et s'apprête à se lancer à la poursuite du plus proche. Pour se décider, il réfléchit et se dit : « lorsque j'ai reçu les ballons, j'attendais, immobile, exactement au milieu de la rue. Donc ils ont dû envoyer leur ballon en même temps puisque les deux m'ont touché en même temps. » Évidemment, le temps qu'il réfléchisse, les deux enfants ont eu le temps

---

2. Théorie étudiant les champs électrique et magnétique, ainsi que leurs interactions avec les objets possédant une charge électrique.

3. On a  $c = 300\,000$  km/s, ce qui est véritablement énorme : si un véhicule voyageait à cette vitesse, il pourrait faire plus de sept fois le tour de la Terre en une seconde.

4. Le photon est la particule "transportant" la lumière.

de s'enfuir. Dépité, il s'en va. Peu après, les deux enfants reviennent à leur poste. C'est alors qu'Einstein — bien décidé à garder la forme — passe dans cette rue en faisant son footing journalier. À l'instant où il passe au milieu de la rue, il reçoit les deux ballons dans la figure. À son tour, il réfléchit : « Puisque j'ai reçu les ballons alors que j'étais au milieu de la rue, et que ceux-ci n'ont pas une vitesse infinie, ils ont dû être envoyé avant que je ne sois au milieu de la rue, et donc l'enfant qui était dans mon dos était plus proche. Donc le ballon du second a eu une plus grande distance à parcourir, ce qui signifie que l'autre enfant a lancé le ballon avant le premier. Et il a donc pu s'enfuir avant. » Et c'est ainsi deux évènements qui sont simultanés pour une personne ne le sont pas forcément pour une autre.

## 4.2 Dilatation des temps

La transformation de Lorentz conduit à un résultat surprenant : plus une horloge va vite, plus ses secondes durent longtemps. Il ne s'agit pas du mécanisme de l'horloge qui est déréglé par la vitesse, mais d'un réel effet physique : si nous embarquons sur un vaisseau spatial voyageant à une vitesse proche de la lumière, nous vieillirions moins vite que les personnes sur Terre. Toutefois, cela ne nous permet pas de réaliser plus de choses, car nous ne nous rendons pas compte nous-mêmes que nous vieillissons moins vite (il s'agit en fait d'un effet relatif à d'autres personnes). D'une certaine manière, on peut traduire cet effet par un ralentissement de nos actions et de tout ce qui voyage à notre vitesse<sup>5</sup>.

Le paradoxe des jumeaux de Langevin<sup>6</sup> constitue une expérience de pensée visant à mettre en scène cette dilatation des temps : deux jumeaux, que l'on appellera Einstein et Poincaré, vivent sur la Terre. L'un d'eux — Einstein — décide de voyager jusqu'à Alpha du Centaure (l'étoile la plus proche de la Terre), située à 4.2 années-lumière<sup>7</sup>, avant de revenir. Pour cela, il utilise un vaisseau spatial dont la vitesse est de moitié celle de la lumière. Son voyage durera donc presque 17 ans. Logiquement, son frère aura vieilli de cette même durée à son retour. Mais lui, de combien aura-t-il vieilli ? Un calcul approché donne comme valeur : 14 ans et demi. Il aurait pu vieillir encore moins s'il avait voyagé plus vite.

Dans le cycle d'Ender, écrit par Orson Scott Card, la dilatation du temps est utilisée pour expliquer la conquête de l'espace par les humains : elle rend possible les voyages spatiaux longs de plusieurs milliers d'années, puisque les voyageurs ne vieillissent que très peu. D'ailleurs, on notera que le paradoxe des deux jumeaux est illustré dans le livre deux : la sœur d'Ender, bien que née peu avant lui, est beaucoup plus âgée que lui lorsqu'elle le retrouve, car cette dernière a moins souvent voyagé que lui dans des vaisseaux.

Cet effet a été mis en évidence avec l'étude des muons (particule électrique) produits lors de l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre.

---

5. Il est bien sûr évident que nous arriverons plus vite à destination à cette vitesse, tout en ayant moins vieilli, si l'on compare à quelqu'un s'y rendant lentement. Toutefois, si le voyage dure quatre ans d'un point de vue extérieur, il durera moins longtemps pour nous, donc nous réaliserons moins de choses *pendant* le voyage.

6. Le pourquoi du paradoxe n'apparaît pas clairement ici, et je n'entrerai pas plus dans les détails, en dehors du fait que j'affirmerai que le paradoxe n'est qu'apparent lorsque l'on étudie correctement le problème.

7. Cela signifie qu'il faudrait 4.2 années pour l'atteindre en voyageant à la vitesse de la lumière

En théorie, les muons possèdent une durée de vie très courte — une fraction de seconde. Lorsqu'ils sont produits, leur vitesse est très élevée, mais ne devrait pas leur permettre de parcourir plus de quelques centaines de mètres : ainsi, selon la mécanique classique, il devrait être impossible de détecter des muons au niveau de la mer (car ils ont tous été désintégrés avant). Toutefois, les observations expérimentales contredisent la mécanique classique : la vitesse très grande des muons permet de ralentir leur désintégration, suffisamment pour qu'une grande quantité parvienne au niveau de la mer et soit détectée.

### 4.3 Contraction des longueurs

La relativité restreinte mène à une autre conclusion qui échappe au sens commun : plus un objet voyage vite, plus sa taille diminue pour un observateur qui ne bouge pas. On peut voir ce phénomène comme une autre conséquence de la relativité de la simultanéité.

Prenons une règle de un mètre, que l'on propulse à une vitesse d'un dixième de celle de la lumière. Une nouvelle mesure indiquera alors une longueur 99 cm. Si jamais nous stoppons la règle et mesurons une nouvelle fois, nous retrouverions un mètre. Ainsi, la longueur varie réellement en fonction de la vitesse, mais sans modifier la structure même de l'objet (puisque les "changements" disparaissent en diminuant la vitesse).

### 4.4 Équivalence entre masse et énergie

Les équations de la relativité restreinte conduisent à une équivalence entre la masse et l'énergie à travers la célèbre formule

$$E = mc^2 \tag{3}$$

où  $E$  est l'énergie et  $m$  la masse d'un objet. Remarquons une nouvelle fois la présence de la vitesse de la lumière. Cette formule relie deux quantités qui étaient totalement indépendantes dans la mécanique newtonienne. Cette équation permet d'avoir une idée de la raison pour laquelle il est impossible de dépasser  $c$  : lorsque la vitesse augmente, l'énergie (cinétique) augmente<sup>8</sup>. Mais cette énergie est "convertie" en masse puisque les deux sont équivalentes. L'objet s'alourdisant, il devient plus difficile à accélérer, et donc sa vitesse augmente de moins en moins. Finalement, lorsque sa vitesse se rapproche de  $c$ , sa "masse" tend vers l'infini, ce qui rend impossible une accélération plus grande<sup>9</sup>.

Ainsi, une masse de 1 kg correspond à une énergie de  $9 \times 10^{16}$  J : il s'agit de mille fois l'énergie libérée par la bombe nucléaire de Hiroshima.

L'énergie produite dans les centrales nucléaires (à fission de nos jours, et à fusion dans l'avenir) provient de cette conversion entre masse et énergie. Prenons l'exemple de la fusion nucléaire : elle consiste à prendre un atome très lourd et à le briser en plusieurs atomes plus légers. On s'aperçoit que la somme des masses des atomes produits est inférieure à la masse de l'atome de départ. Comme la masse ne peut pas disparaître<sup>10</sup>, elle est forcément transformée en autre chose : de l'énergie.

---

8. L'énergie et la vitesse — ainsi que la température — sont trois grandeurs profondément reliées entre elles.

9. Ce paragraphe comporte de nombreuses approximations qu'il faudra m'excuser, mais sans elles le sujet serait bien plus difficile à comprendre pour des non-physiciens.

10. « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. » — Lavoisier.

## 5 Conclusion

Mais pourquoi, me direz-vous, n'observe-t-on pas tous ces effets dans la vie de tous les jours ? Et pourquoi puis-je utiliser la formule (1) pour trouver la vitesse des autres voitures, si cette loi est censée être fausse ?

En fait, la mécanique classique constitue une approximation de la mécanique relativiste : elle est valable dès que les vitesses des objets étudiés est très faible devant celle de la lumière. D'ailleurs, la mécanique classique est toujours énormément utilisée, car les erreurs introduites lorsque la vitesse est faible sont négligeables. Si on reprend l'exemple avec les voitures de la section 2, la formule (2) indique que la seconde voiture roule à 79.999 999 999 999 89 km/h, ce qui est très proche de 80 km/h.

Toutefois, la théorie de la relativité restreinte possède de nombreuses applications : par exemple, sans elle, aucun GPS ne pourrait fonctionner car il est nécessaire de prendre en compte les effets relativistes quand ils calculent les positions. Mais elle est utilisée dans de nombreux domaines et il ne paraît pas envisageable de s'en passer aujourd'hui.

Finalement, malgré son nom, la relativité ne saurait se résumer à l'expression « tout est relatif » — bien que les temps et longueurs changent en fonction de l'observateur —, puisqu'il s'agit avant tout d'une théorie unificatrice, visant à expliquer d'une manière universelle tous les phénomènes observés. Ainsi, comme nous l'avons vu au départ, l'électromagnétisme, qui était complètement séparé des lois de la mécanique, a pu être uni avec cette dernière en une seule théorie grâce à la relativité : bien plus que la mécanique newtonienne, la relativité met en avant l'invariance des lois de la physique en imposant une nouvelle vision de l'espace et du temps <sup>11</sup>.

---

11. J.M. Lévy-Leblond suggère d'ailleurs que le terme « chronogéométrie » aurait été adapté pour désigner cette théorie.