

Ascenseur d'Einstein : lignes d'univers, expérience de Michelson-Morley et paradoxe relativiste⁽¹⁾

par Mathieu ROUAUD

Lycée Melkior Garré - 97300 Cayenne

mathieu137@gmail.com

NOUS AVONS TOUS EN TÊTE la fameuse expérience de pensée d'Einstein dans l'ascenseur où nous observons la chute libre d'un corps puis la trajectoire d'un rayon lumineux. Ici, en plus de l'aspect qualitatif, nous menons les calculs exacts, et les équations des lignes d'univers sont données. Nous considérons un référentiel en translation rectiligne uniformément accéléré et nous montrons que les trajectoires des particules sont des demi-ellipses centrées sur l'horizon des événements. Le référentiel est non inertiel, l'espace-temps est plat, et les calculs sont réalisés dans le cadre de la relativité restreinte. Certaines conséquences expérimentales sont discutées, en particulier l'expérience avec l'interféromètre de Michelson accéléré est résolue, et une expérience où apparaît un nouveau paradoxe relativiste – une particule de matière semble aller plus vite que la lumière – est décrite. Les écarts, par rapport au cas classique, sont importants à grande échelle et au niveau de l'horizon, mais ils sont faibles dans l'ascenseur où l'intérêt est avant tout théorique. Les concepts de métrique, de vitesse coordonnée et d'horizon sont discutés, et une analogie avec le trou noir est faite.

INTRODUCTION

Nous imaginons une portion d'espace vide infiniment éloignée de toutes masses et une grande boîte, dans laquelle un observateur évolue en apesanteur. À l'aide d'un crochet et d'une corde, une force constante est exercée sur la boîte ainsi animée d'un mouvement de translation rectiligne uniformément accéléré. L'observateur expérimente alors une pesanteur artificielle (cf. figure 1). Nous allons étudier dans le

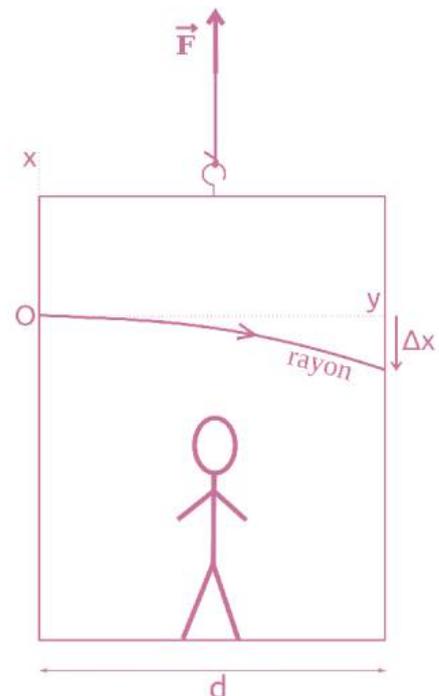


Figure 1 - L'expérience de pensée dans l'ascenseur d'Einstein.

(1) Publié en anglais dans *Physics*, 4(3), p. 892-911 le 11 août 2022, disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2624-8174/4/3/58>

Traduction en français le 16 avril 2023 par l'auteur.

référentiel de l'ascenseur le mouvement de la lumière, puis d'une particule massive, et, finalement, nous allons faire une comparaison avec la chute vers un trou noir lors d'un lâcher.

Dans le référentiel de la boîte, d'abord inertiel, un rayon lumineux se propage à la vitesse c selon une trajectoire rectiligne. Ensuite, la boîte est accélérée et un rayon, initialement perpendiculaire à la direction du mouvement, emprunte alors une trajectoire courbée. Citons Albert Einstein dans son livre *La relativité* [1] : «la trajectoire du même rayon de lumière, comme il est facile de le montrer, n'est plus une ligne droite».

Suite à la naissance de la relativité restreinte en 1905, l'expérience de pensée de l'ascenseur accéléré, proposée par Einstein dès 1908, a permis de filer l'analogie avec la gravité pour développer une intuition et guider la fondation de la *relativité générale*. Nouvelle théorie de la gravitation établie en 1915 qui supprime alors celle de Newton. Cette image a été utilisée pour illustrer le principe d'équivalence et prédire la déviation des rayons lumineux par un astre massif.

Néanmoins, il ne faut pas que le cheminement historique de la théorie nous cache un point essentiel : la déviation d'un rayon lumineux dans l'ascenseur accéléré s'explique pleinement dans le cadre de la relativité restreinte. En effet, dans le référentiel accéléré de l'ascenseur, l'espace-temps reste plat, nul champ de gravitation ici, et la déviation des rayons lumineux se comprend par un raisonnement purement cinématique.

Selon le second postulat d'Einstein, la vitesse de la lumière dans le vide est constante et égale à c dans tous les référentiels d'inertie. Une conséquence logique de ce postulat : dans un référentiel non inertiel, la vitesse de la lumière dans le vide, peut, *a priori*, être différente de c ⁽²⁾. Une autre propriété : une particule libre suit une trajectoire rectiligne et uniforme dans un référentiel inertiel. Par conséquent, une particule libre peut suivre une trajectoire courbée dans un référentiel non inertiel. Comme nous allons le montrer, c'est justement ce qui se passe ici pour le rayon lumineux.

1. RÉFÉRENTIEL UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ

1.1. Système de coordonnées

Nous voulons décrire la physique du point de vue de l'observateur avec une accélération propre constante. Un référentiel est une entité physique, auquel nous associons un système de coordonnées pour s'y repérer. Nous commençons en utilisant la descrip-

(2) Il reste, bien sûr, qu'un objet ne peut en aucun cas dépasser la vitesse de la lumière dans le vide, et que la vitesse de la lumière pour un observateur minkowskien local est toujours égale à c .

aller trop haut sur le diagramme. On trouve :

$$T'_{AC} = 2L \sqrt{1+L^2} \quad \text{et} \quad T'_{ABC} = L \left(\sqrt{1+L^2/4} + \sqrt{1+L^2/4(3+L^2)^2} \right),$$

ainsi, pour faire court, à l'aide de la symétrie de la figure 20,

$$\Delta T = 2c/a_p \tau = 2(\operatorname{arcsinh} T'_{ABC} - \operatorname{arcsinh} T'_{AC}),$$

et nous obtenons l'équation (17).

De toute façon, quel que soit l'observateur, la physique est la même. Dans tous les cas, pour obtenir la relativité restreinte non inertielle, il faut ajouter deux principes à la relativité restreinte inertielle, l'hypothèse de l'horloge – deux horloges à la même vitesse, quelle que soit leur accélération, subissent la même dilatation du temps – et le *principe d'équivalence* – pour tout événement de l'espace-temps, il existe, localement, un référentiel inertielle coïncidant.

CONCLUSION

Les calculs, présentés ici, restent relativement simples et utilisent les concepts de métrique, de vitesse coordonnée et d'horizon, lesquels sont en partie réutilisés en relativité générale. Dans le même temps, ce cas d'école aide à éviter de nombreuses confusions en relativité. Pousser la relativité restreinte dans ses dernières limites non inertielle, où un cadre minkowskien sous-jacent global perdure, permet de tracer un chemin continu depuis la relativité inertielle vers la relativité générale. Aussi, la vision théorique de l'ascenseur d'Einstein est élargie avec les équations des lignes d'univers généralisées à trois dimensions spatiales, et, espérons qu'un jour de nouveaux tests expérimentaux de la relativité restreinte non inertielle seront réalisables.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] A. Einstein, *La relativité*, 1916 en allemand. Il a été publié en anglais et en français en 1920.

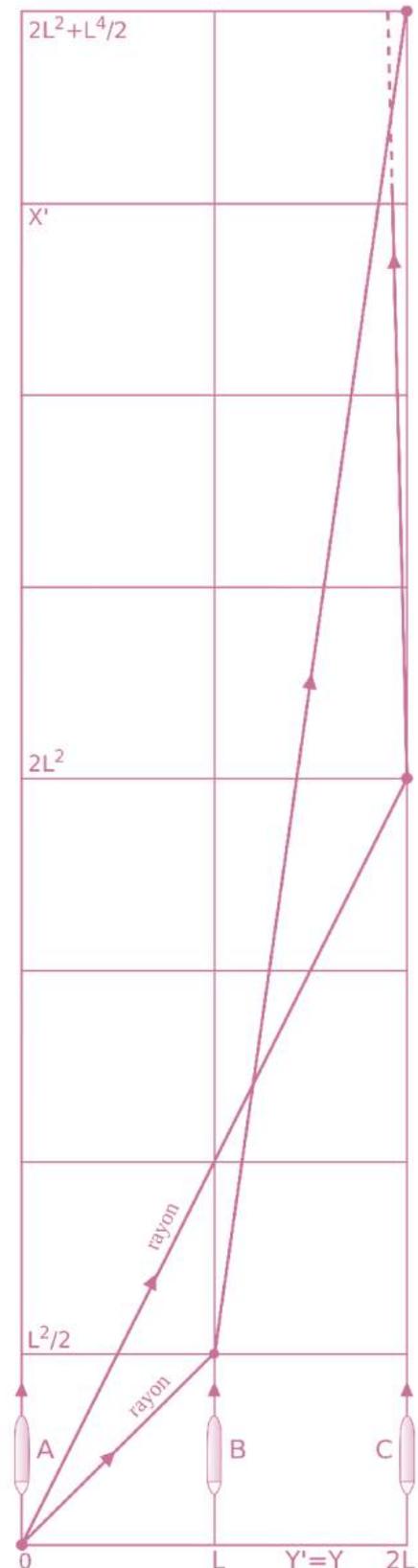


Figure 21 - Point de vue inertiel.

Nous vous invitons à voir également :

- ◆ Quelques conséquences du principe de la relativité générale ;
- ◆ Les coordonnées de Gauss.

- [2] E.A. Desloge and R.J. Philpott, “Uniformly accelerated reference frames in special relativity”, *Am. J. Phys.*, vol. 55 (3), p. 252-261, 1987.
- [3] C. Møller, *The Theory of Relativity*, Oxford, 1st edition, 1952.
- [4] W. Rindler, *Relativity: Special, General, and Cosmological*, Oxford University Press, 2nde édition, 2006 (cf. pages 71 et 282 (exercice 12.7)).
- [5] L. Landau and E. Lifchitz, *Théorie des champs*, Ellipses, juin 1994 (cf. paragraphes *Distances et intervalles de temps* et *Référentiel synchrone*).
- [6] E.A. Desloge, “Spatial geometry in a uniformly accelerating reference frame”, *Am. J. Phys.*, vol. 57 (7), p. 598-602, July 1989.
- [7] C. Semay et B. Silvestre-Brac, *Relativité restreinte : bases et applications*, Dunod, 2^e édition, 2005.
- [8] M. Rouaud, *Relativité restreinte : approche géométrique*, septembre 2020 (cf. pages 157, 167, 243 et 387), livre consulté le 25 octobre 2023 : <http://www.voyagepourproxima.fr/relat.pdf>
- [9] M. Born, “Die Theorie des starren Elektrons in der Kinematik des Relativitätsprinzips” [The theory of the rigid electron in the kinematics of the principle of relativity], *Ann. d. Phys.*, vol. 335 (11), p. 1-56, 1909.
- [10] J. D. Hamilton, “The uniformly accelerated reference frame”, *Am. J. Phys.*, vol. 46 (1), p. 83-89, January 1978.
- [11] A. Spallicci and P. Ritter, “A fully relativistic radial fall”, *Int. J. of Geom. Meth. in Mod. Phys.*, vol. 11, n° 10, July 2014.
- [12] E.A. Desloge, “Nonequivalence of a uniformly accelerating reference frame and a frame at rest in a uniform gravitational field”, *Am. J. Phys.*, vol. 57 (12), p. 1121-1125, December 1989.
- [13] G. Muñoz and P. Jones, “The equivalence principle, uniformly accelerated reference frames, and the uniform gravitational field”, *Am. J. Phys.*, vol. 78 (4), p. 377-383, April 2010.
- [14] S.I. Blinnikov, L.B. Okun and M.I. Vysotsky, “Critical velocities $c/\sqrt{3}$ and $c/\sqrt{2}$ in the general theory of relativity”, *Physics-Usppekhi*, vol. 46, n° 10, p. 1099-1103, October 2003.
- [15] P. Tournenc, *Relativité et gravitation*, Armand Colin, 1992 (cf. p. 185).

- [16] C.W. Misner, K.S. Thorne and J.A. Wheeler, *Gravitation*, San Francisco : W.H. Freeman & Co., 1973, (cf. p. 848).
- [17] R.v.B. Rucker, *Geometry, Relativity and the Fourth Dimension*, Dover Publications, Inc: New York, NY, USA, 1977.
- [18] C. Geuting, «Relativité de l'espace-temps, effets gravitationnels», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 107, n° 952, p. 279-299, mars 2013.



Mathieu ROUAUD

Chercheur indépendant

Professeur agrégé de physique-chimie

Lycée Melkior Garré

Cayenne (Guyane)