

Au Sujet de la Relativité

Des origines aux théories de gravitation quantiques.

Conférence de l'association *Arts Et Liens*¹ Éric Jullien

(eric.jullien@gmail.com)

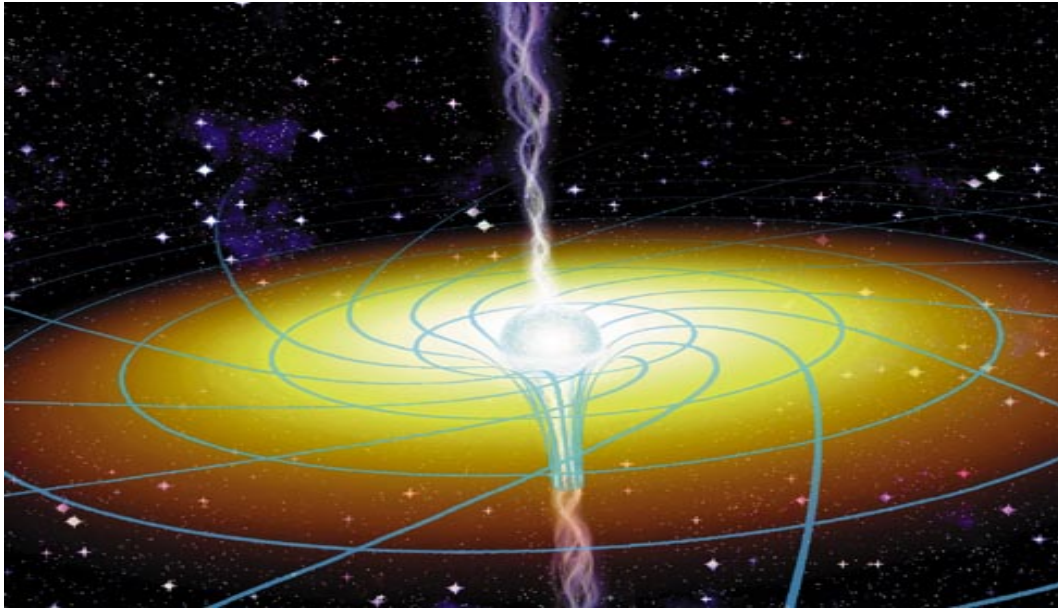


Figure 1: Représentation d'artiste de la déformation de l'espace-temps à proximité d'un trou noir en rotation. On remarquera que le trou noir entraîne dans sa rotation l'espace-temps lui-même. Les jets polaires sont formés par la matière qui échappe à l'anéantissement. Elle se trouve accélérée à une vitesse proche de celle de la lumière.

April 3, 2012

Résumé

Cette courte présentation introduit les concepts clés des *Relativité Restreinte* et *Relativité Générale* à destination du grand public. Elle se focalisera plus sur les aspects qualitatifs de la physique induits par ces théories que sur leurs aspects quantitatifs et mathématiques, même si, pour la culture, certaines équations seront présentes.

Mots-clés : Gravitation, Relativité Restreinte, Relativité Générale, Équation d'Einstein, Transformée de Lorentz, Dilatation du temps, Contraction des distances, Espace-Temps, Espace-Courbe, Constante Cosmologique, Modèles d'Univers.

¹site web : <http://lesartsetliens.free.fr>.

Abstract

This short demonstration introduces key concepts belonging to *Special Relativity* and *General Relativity*. It will focus more physical qualitative aspects induced by these theories than the quantitative and mathematical ones, albeit, for the sake of general knowledge, some equations will be presented anyway.

Keywords: Gravitation, Special Relativity, General Relativity, Einstein Equation, Lorentz Transformation, Time Dilation, Length Contraction, Space-Time, Curved-Space, Cosmological Constant, Universe Models.

Table des matières

Préambule	6
Introduction	6
1 Perspectives historiques	6
1.1 L'Univers de l'antiquité au Moyen-Âge.	6
1.1.1 L'antiquité.	6
1.1.2 Le Moyen-Âge.	7
1.2 Les évolutions de la Renaissance jusqu'au XX ^{ème} s.	7
1.2.1 L'héliocentrisme	7
1.2.2 Newton	9
1.2.3 L'électromagnétisme de Maxwell.	11
2 Les Relativités d'Einstein.	12
2.1 Relativité Restreinte.	12
2.1.1 Préambule.	12
2.1.2 Vitesse de la lumière invariante et transformé de Lorentz.	12
2.1.3 D'un Espace et un Temps vers plusieurs Espaces-Temps élastiques.	14
2.1.4 Loi de composition des vitesses.	16
2.1.5 Équivalence Masse - Énergie.	17
2.1.6 Preuves ?	18
2.2 Relativité Générale.	18
2.2.1 Préambule.	18
2.2.2 Pourquoi <i>généraliser</i> la <i>Relativité Restreinte</i> ?	19
2.2.3 La matière déforme l'espace-temps.	19
2.2.4 L'Équation d'Einstein.	21
2.2.5 Modèles d'Univers et constante cosmologique.	23
2.2.6 Modèles d'Univers dynamiques.	23
2.2.7 Preuves ?	26
2.3 La <i>Relativité Générale</i> , théorie ultime ?	27
Conclusion	29
Les propriétés communes <i>Relativité Restreinte</i> & <i>Relativité Générale</i>	29
Les propriétés spécifiques de la <i>Relativité Générale</i>	29
Bibliographie	31

Table des figures

1	Représentation d'artiste de la déformation de l'espace-temps à proximité d'un trou noir en rotation. On remarquera que le trou noir entraîne dans sa rotation l'espace-temps lui-même. Les jets polaires sont formés par la matière qui échappe à l'anéantissement. Elle se trouve accélérée à une vitesse proche de celle de la lumière.	1
2	Description de l'Univers géocentrique, époque de Pythagore, VI ^{ème} s. av. J. C. Tiré du cours de cosmologie de J-P Luminet, réf. [9], avec son aimable autorisation.	6
3	Description de l'Univers géocentrique, époque d'Aristote, IV ^{ème} s. av. J. C. Tiré du cours de cosmologie de J-P Luminet, réf. [9], avec son aimable autorisation.	7
4	Description de l'Univers géocentrique, époque d'Anaximandre, VI ^{ème} s. av. J. C. Tiré du cours de cosmologie de J-P Luminet, réf. [9], avec son aimable autorisation.	7
5	Représentation de Nikolaus Kopernickus.	8
6	Description de l'Univers héliocentrique, époque de Copernic, XVI ^{ème} s. ap. J. C.	8
7	Représentation de Galilée en 1636.	8
8	Représentation de Johannes Kepler en 1610.	8
9	Représentation d'Isaac Newton en 1689 par Godfrey Kneller	9
10	Mouvement de translation uniforme entre deux référentiels.	10
11	James Clerk Maxwell	11
12	Albert Einstein en 1905.	12
13	Hendrik Antoon Lorentz en 1916.	13
14	Henri Poincaré.	13
15	Mouvement de translation uniforme entre deux référentiels inertiels.	14
16	Dilatation du temps en fonction de $\beta = \frac{v}{c}$. Repris de [4].	15
17	Le cône de lumière centré sur un évènement.	16
18	La chute d'un objet vue par un observateur extérieur (à gauche), et vue par l'hôte de l'ascenseur (à droite). Extrait de [16].	19
19	Bernhard Riemann	19
20	Comparaison de la déformation de l'espace-temps en fonction de la masse de la planète ou de l'astre.	20
21	Déformation locale de l'espace-temps par la masse du Soleil et de la Terre.	20
22	Principe de la déviation des rayons lumineux. Il est important de remarquer que la déviation n'est pas similaire du tout à celle d'une lentille optique.	21
23	Déformation locale de l'espace-temps par la masse du Soleil et de la Terre, nous observons le mirage d'optique dû à la déformation de l'espace-temps par le Soleil.	22

24	Déformation locale de l'espace-temps par la masse du Soleil, qui modifie la géodésique de la lumière.	22
25	Aleksandr Fridman	23
26	Georges Lemaitre	23
27	Modèles d'univers de Friedmann-Lemaître, 1922.	24
28	Graphique de la loi de Hubble : plus une galaxie est éloignée, plus elle s'éloigne vite de nous. Tiré de [8].	25
29	L'expansion de l'Univers imagée par le gonflement d'un gâteau aux raisins. Tiré de [25].	26

Préambule

Cet exposé a lieu dans le cadre des conférences données par l'association culturelle *Arts Et Liens*².

Il a pour but de présenter succinctement les deux ou trois grandes idées des théories de la *Relativité Restreinte* et de la *Relativité Générale*.

Introduction

Les théories de la *Relativité Restreinte* et de la *Relativité Générale* étant très mathématiques et plutôt contre-intuitives par rapport à notre expérience de la vie courante, nous les aborderons essentiellement sur leurs aspects qualitatifs, en insistant sur les changements les plus importants qu'elles affectent sur notre représentation, notre compréhension, de l'univers.

Nous commencerons par rappeler, très succinctement, l'évolution de notre compréhension de l'univers, depuis les grecs, jusqu'au début du XX^{ème} siècle, c'est-à-dire jusqu'au moment de la naissance de ces théories, avant de voir comment celles-ci ont profondément modifié cette compréhension.

Nous terminerons par quelques spéculations sur les théories au-delà de la *Relativité Générale*.

1 Perspectives historiques

La compréhension de l'univers a évolué avec le temps. Cette section tentera de replacer dans leur contexte les (très) grandes étapes.

1.1 L'Univers de l'antiquité au Moyen-Âge.

1.1.1 L'antiquité.

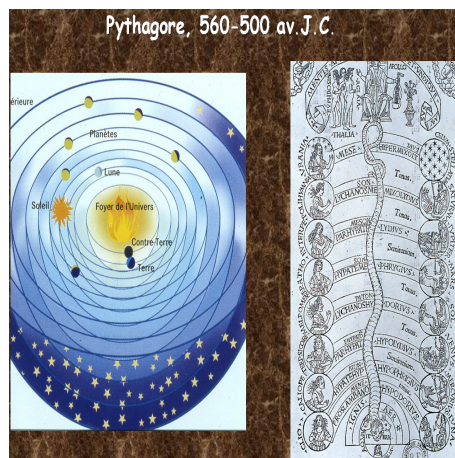


FIGURE 2 – Description de l'Univers géocentrique, époque de Pythagore, VI^{ème} s. av. J. C. Tiré du cours de cosmologie de J-P Luminet, réf. [9], avec son aimable autorisation.

²<http://lesartsetliens.free.fr>

Les civilisations antiques voyaient l'univers statique avec une position prépondérante de la Terre (vision géocentrique) : Le soleil et les planètes identifiées tournaient autour de la terre. Au mieux cette dernière était déjà sphérique (comme dans la vision de Pythagore, 560-500 av. J. C., fig. 2, page 6, ou Aristote, 384-322 av. J. C., fig. 3, page 7) ou plate et entourée d'eau ou de feu (Anaximandre, VI^{ème} s. av. J. C., fig. 4, page 7).

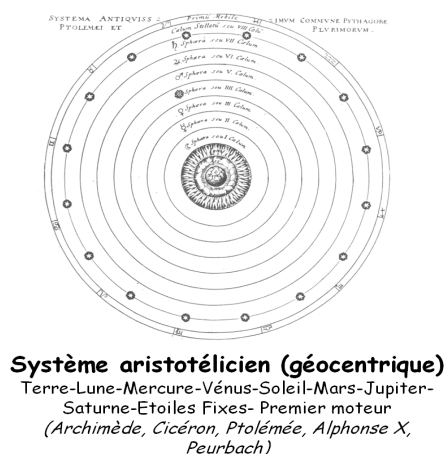


FIGURE 3 – Description de l'Univers géocentrique, époque d'Aristote, IV^{ème} s. av. J. C. Tiré du cours de cosmologie de J-P Luminet, réf. [9], avec son aimable autorisation.



FIGURE 4 – Description de l'Univers géocentrique, époque d'Anaximandre, VI^{ème} s. av. J. C. Tiré du cours de cosmologie de J-P Luminet, réf. [9], avec son aimable autorisation.

Le lecteur désireux d'approfondir le sujet, se reportera sur le 1^{er} document de cours du master d'Astronomie & astrophysique de l'Observatoire de Paris-Meudon, intitulé « Une petite histoire de la cosmologie » (cours donné par de Jean-Pierre Luminet, directeur de recherche à l'Observatoire de Paris-Meudon, voir référence [9])

1.1.2 Le Moyen-Âge.

Le Moyen-Âge redécouvre principalement les idées d'Aristote.

1.2 Les évolutions de la Renaissance jusqu'au XX^{ème}s.

1.2.1 L'héliocentrisme

Copernic³ fonde l'héliocentrisme⁴ Il place ainsi le soleil au centre de l'Univers. Le reste des planètes, gravitent autour de lui. Voir la figure 6, page 8.

³Chanoine, médecin et mathématicien, né en 1473 et mort en 1543, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Copernic.

⁴voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Héliocentrisme>.

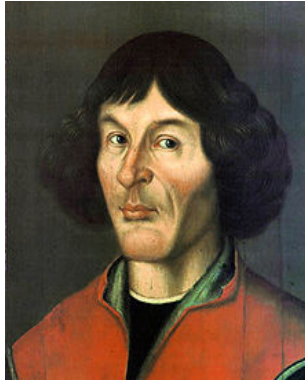


FIGURE 5 – Représentation de Nikolaus Kopernickus.



FIGURE 6 – Description de l'Univers héliocentrique, époque de Copernic, XVI^{ème} s. ap. J. C.

Par la suite, Galilée⁵ et Kepler⁶ confirmeront par leurs observations le principe héliocentrisme.

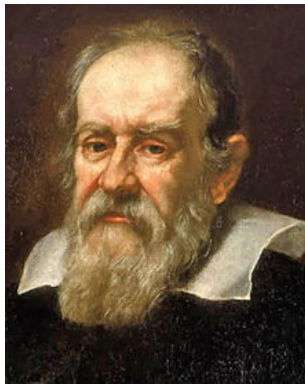


FIGURE 7 – Représentation de Galilée en 1636.



FIGURE 8 – Représentation de Johannes Kepler en 1610.

⁵Physicien et astronome, né en 1564, voir [http://fr.wikipedia.org/wiki/Galilée_\(savant\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Galilée_(savant)).

⁶Astronome, né en 1571 et mort en 1630, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler.

1.2.2 Newton

La Gravitation Universelle.

La légende dit que Isaac Newton⁷ eut l'idée des lois de l'attraction universelle en voyant tomber une pomme de son arbre. De là, il comprit que tout corps massif exerce une attraction sur les autres corps et réciproquement, ce qu'il décrivit avec la formule connue :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \frac{M_A M_B}{r_{AB}^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$$



FIGURE 9 – Représentation d'Isaac Newton en 1689 par Godfrey Kneller

où $\vec{u}_{A \rightarrow B}$ est le vecteur unité de la direction $A \rightarrow B$, G est la constante gravitationnelle, $G = 6,6710^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$.

Pour Newton, la gravitation est une force toujours attractive, créée par la matière.

Ainsi, de même que la Terre nous attire à elle, symétriquement, nous attirons la Terre vers nous. Mais comme nous n'avons pas la même masse que la Terre, notre effet sur la Terre est totalement négligeable. En effet, le mouvement d'un corps A , de masse M_A , est défini par l'équation de la dynamique du point (que nous devons encore à Newton) :

$$M_A \vec{\Gamma} = \sum_i \vec{F}_i$$

Où M_A est la masse du corps, $\vec{\Gamma}$ est l'accélération subie, $\sum_i \vec{F}_i$ est la somme des forces subies.

Dans le cas d'un système seulement composé de deux corps, A et B , le corps B exerce sur A la force $\vec{F}_{AB} = -G \frac{M_A M_B}{r_{AB}^2}$. Son équation de la dynamique de son mouvement s'écrit alors :

$$\begin{aligned} M_A \vec{\Gamma} &= \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_{A \rightarrow B} \\ &= -G \frac{M_A M_B}{r_{A \rightarrow B}^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} \\ \vec{\Gamma} &= -G \frac{M_B}{r_{AB}^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} \end{aligned}$$

C'était le premier pas vers une théorie cohérente de l'attraction.

Espace Absolu, Temps Absolu.

Newton a été également le premier à mener une réflexion sur l'espace et le

⁷Mathématicien, né en 1643, mort en 1727, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton.

temps. Pour lui il y avait équivalence entre différents repères cartésiens, mais que, *in fine*, tous évoluaient par rapport à un espace absolu inobservable et immuable.

De même, tous les référentiels de temps sont équivalents mais il existe un *temps absolu* à partir duquel, tous sont définis. En particulier nous pouvons mesurer le temps à partir d'une origine différente et selon une unité différente (par exemple compter en seconde depuis minuit plutôt que selon le schéma heures-minutes-secondes) mais le temps s'écoule de la même façon dans chaque référentiel. Il n'y a qu'un écoulement du temps, il n'y a qu'un seul temps ressenti de la même façon par tout un chacun.

Point important, pour définir positions, temps et vitesses nous devons définir au préalable des repères, des référentiels, d'espace et de temps.

Translations uniformes et changements de repères.

Des considérations précédentes, il vient que si nous voulons suivre un objet, nous pouvons choisir le référentiel le plus adapté, tout en étant capable de nous ramener à un autre référentiel.

Exemple : supposons deux référentiels (deux bateaux par exemple) $\mathcal{R}'$ et $\mathcal{R}$ qui se déplacent à vitesse constante v' et v par rapport à un référentiel $\mathcal{R}_0$ fixe (un phare par exemple).

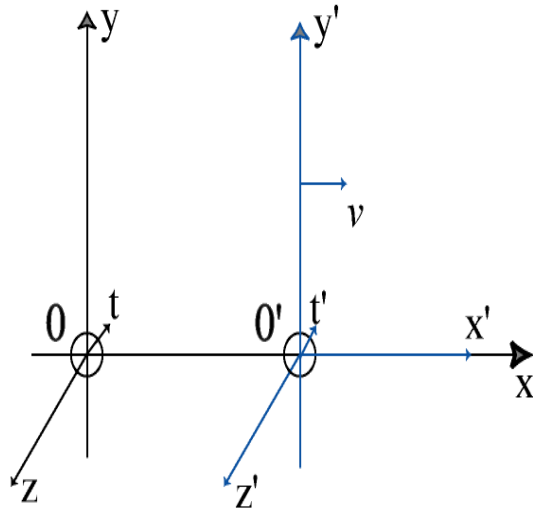


FIGURE 10 – Mouvement de translation uniforme entre deux référentiels.

La loi usuelle d'additivité des vitesses nous permet de connaître la vitesse relative $\Delta \vec{v}$ entre les deux bateaux :

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}' - \vec{v}$$

Si nous prenons une même origine d'espace et de temps pour les référentiels $\mathcal{R}'$, $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}_0$, alors, toute position x' et vitesse v' d'un point du premier bateau peuvent indifféremment être exprimés par rapport au référentiel du premier bateau (x', v', t') , de celui du deuxième bateau (x, v, t) ou de celui du phare (x_0, v_0, t_0) :

$$\begin{aligned}
&\text{Dans } \mathcal{R}_0 \begin{cases} x_0(t_0) = x(t) + v \cdot t = x'(t) + v' \cdot t \\ t' = t = t_0 \end{cases} \\
&\Leftrightarrow \text{dans } \mathcal{R} \begin{cases} x(t) = x'(t') + \Delta v \cdot t = x_0(t) - v \cdot t \\ t' = t = t_0 \\ \Delta v = v' - v \end{cases} \\
&\Leftrightarrow \text{dans } \mathcal{R}' \begin{cases} x'(t') = x(t) - \Delta v \cdot t = x_0(t) - v' \cdot t \\ t' = t = t_0 \\ \Delta v = v' - v \end{cases}
\end{aligned}$$

L'additivité des vitesses et les changements de coordonnées restent simples.

1.2.3 L'électromagnétisme de Maxwell.

James Clerk Maxwell⁸) a réalisé une synthèse harmonieuse des diverses lois expérimentales de son époque. Il a en particulier unifié l'électricité statique et le magnétisme en une seule théorie : l'électromagnétisme (voir [39]).



FIGURE 11 – James Clerk Maxwell

Sa théorie fait apparaître une vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, c , constante et indépendante de tout référentiel. C'est-à-dire que la valeur de cette vitesse n'est pas définie par rapport à un référentiel particulier, elle a la même valeur partout.

Cette vitesse sera par la suite identifiée à la vitesse de la lumière⁹ qui est une onde électromagnétique. On posera $c = 299792458$ m/s dans le vide.

De nombreuses mesures de la vitesse de la lumière ont été faites à diverses époques et lieux et toutes ont confirmé le caractère *fini* et *constant*¹⁰

Pour résoudre cette contradiction et par analogie avec la propagation du son dans l'air, les physiciens de la fin du XIX^{ème} siècle ont postulé l'existence d'une substance immobile de l'espace, l'éther, liée à l'espace absolu. Mais cela a été contredit par l'expérience de Michelson-Morley (voir référence [?]).

⁸Physicien, né en (1831 et mort en 1879, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell.

⁹Voir [52].

¹⁰La vitesse de la lumière est constante pour un même milieu, mais elle diffère entre deux milieux distincts. Par exemple la vitesse de la lumière n'est pas la même dans l'air, l'eau ou le vide...

2 Les Relativités d'Einstein.

Nous allons aborder dans cette section un survol de ce que sont les théories de la relativité imaginées par Albert Einstein au début du XX^{ème} siècle.

En effet, A. Einstein a d'abord inventé la théorie de la relativité en 1905, nommée *Relativité Restreinte* après l'invention de la *Relativité Générale*, qui se focalisait sur la lumière.

Il l'a par la suite « généralisée » en 1915 pour y inclure une nouvelle définition, un nouveau paradigme¹¹, de la gravitation.



FIGURE 12 – Albert Einstein en 1905.

2.1 Relativité Restreinte.

2.1.1 Préambule.

Dans la suite de cette section, nous ne ferons qu'effleurer la théorie de la *Relativité Restreinte*. Le lecteur désireux d'approfondir le sujet pourra lire avec profit les références disponibles sur le web :

- sur le principe d'équivalence : [36],
- sur l'espace de Minkowski : [24],
- sur les transformations de Lorentz : [49],
- sur la relativité restreinte : [41], [4],
- sur la dilatation du temps et la contraction des distances : [4]

Le lecteur désireux de mieux comprendre ce que sont l'espace, le temps (au sens classique) et l'espace-temps relativiste pourra lire l'excellent ouvrage de *Brian Greene*, « *La Magie du Cosmos* » (voir [5]).

2.1.2 Vitesse de la lumière invariante et transformé de Lorentz.

Einstein livre sa théorie de la relativité, ultérieurement nommée *Relativité Restreinte*¹² qu'il bâtit pour résoudre le problème de l'invariance de la célérité de la lumière quel que soit le référentiel dans lequel elle est mesurée.

Sa motivation intellectuelle était de savoir à quoi pourrait ressembler la vue d'un train d'onde électromagnétique (c'est-à-dire d'une onde de lumière) en

¹¹Un paradigme est une représentation du monde, une manière de voir les choses, un modèle cohérent de vision du monde qui repose sur une base définie. Extrait de Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradigme>.

¹²Les anglophones la nomme « *Special Relativity* ».

supposant qu'il puisse aller à la même vitesse que celui-ci. Verrait-il alors un train d'onde immobile? Un peu comme si on suivait une vague à la même vitesse que cette dernière. On pourra se référer à [3] pour avoir le contexte historique des motivations d'Einstein.

Il prend comme hypothèse que la vitesse de la lumière est non seulement constante quel que soit le référentiel dans lequel elle est mesurée, mais il suppose de plus que rien ne peut la dépasser, ni même l'attendre sauf les ondes électromagnétiques. Ce qui exclut toutes les particules massives.

Einstein s'appuie sur les travaux préliminaires d'Henri Poincaré¹³ et de Hendrik Antoon Lorentz¹⁴ concernant les transformations, dites de *Lorentz*¹⁵, qui laissent invariante la vitesse de la lumière lors de transformation entre deux référentiels inertiels¹⁶. Voir [49] pour plus de détails sur ces transformations.

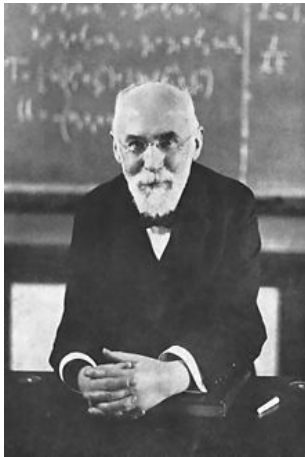


FIGURE 13 – Hendrik Antoon Lorentz en 1916.

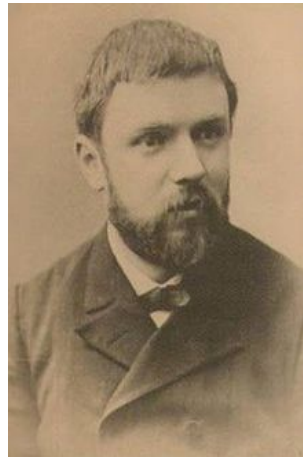


FIGURE 14 – Henri Poincaré.

Dans le cas de deux référentiels inertiels $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ en mouvement de translation uniforme l'un par rapport à l'autre à vitesse, v , constante selon l'axe des x , pour tout intervalle de temps Δt et d'espace Δx , nous obtenons les relations (voir [41] et/ou [4] pour plus de détails) :

¹³Mathématicien, physicien et philosophe, né en 1854, mort en 1912, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Poincaré et http://www.les-mathematiques.net/histoire/histoire_poin.php.

¹⁴Physicien, né en 1853 et mort en 1928, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Antoon_Lorentz.

¹⁵ Nom donné par Henri Poincaré en l'honneur De Hendrik Lorentz avec qui il correspondait.

¹⁶En physique, un référentiel galiléen, ou inertielle, est un référentiel dans lequel un objet isolé (sur lequel ne s'exerce aucune force ou sur lequel la résultante des forces est nulle) est en mouvement de translation rectiligne uniforme. Extrait de Wikipedia http://fr.wikipedia.org/wiki/Référentiel_inertiel

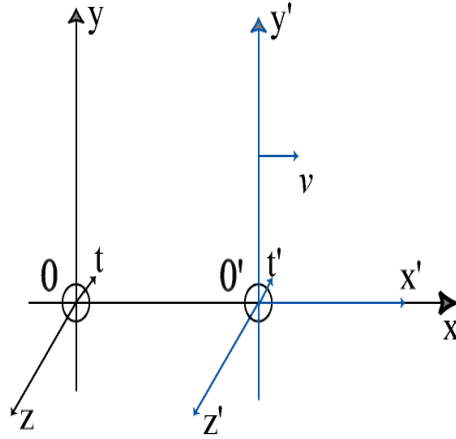


FIGURE 15 – Mouvement de translation uniforme entre deux référentiels inertiels.

Dans le cas relativiste :

$$(1) \quad \begin{cases} c\Delta t' = \gamma(c\Delta t - \beta\Delta x) \\ \Delta x' = \gamma(c\Delta x - c\Delta t) \\ \Delta y' = \Delta y \\ \Delta z' = \Delta z \end{cases}$$

Avec

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

À comparer avec le cas classique :

$$(2) \quad \begin{cases} \Delta t' = \Delta t \\ \Delta x' = \Delta x - v\Delta t \\ \Delta y' = \Delta y \\ \Delta z' = \Delta z \end{cases}$$

Les transformations d'un référentiel à un autre mélangent maintenant le **temps** et l'**espace**.

On remarquera que si v est petite comparée à c , nous retrouvons alors les transformations usuelles de la mécanique classique.

2.1.3 D'un Espace et un Temps vers plusieurs Espaces-Temps élastiques.

Pour Einstein, il n'y a plus *un temps absolu*, indépendant de l'espace, à partir duquel on peut mesurer son écoulement indépendamment de nos actions dans l'espace, ni *un espace absolu*, indépendant du temps, et immuable, mais au contraire il existe des **espace-temps**, propres à chaque constituants, chaque particule, où les quatre dimensions sont inextricablement et intimement liées.

L'espace et le temps euclidien est alors remplacé par un **espace-temps** de Minkowski¹⁷, voir [24].

De même qu'on ne peut se soustraire à une quelconque des dimensions d'espace, faire comme si la hauteur n'existait pas ou si elle était indépendante et sans relation avec les autres dimensions pour marcher dans le vide par exemple, on ne peut pas plus considérer le temps comme indépendant des autres dimensions et ne pas le prendre en compte dans nos interactions avec la géométrie de l'espace (comme lors des changements de référentiels). Il faut au contraire penser en terme d'**espace-temps**.

Avec le système 1, nous voyons que le temps de chaque constituant lui est propre puisqu'il dépendant de la vitesse de ce constituant. Il ne faut donc pas seulement raisonner en terme d'un **espace-temps**, mais de plusieurs **espaces-temps**, autant que de constituants, et ces **espaces-temps** sont *élastiques*.

Voir [5], pour une explication approfondit de l'espace, le temps et l'**espace-temps**.

Si nous accélérons un constituant, disons une particule, à une vitesse v très proche de celle de la lumière c , puis que nous la stabilisons à vitesse constante de manière à pouvoir calculer son changement de référentiel, alors γ tend vers l'infini, tout comme le temps propre du constituant : la particule « vieillira moins vite » que si elle était immobile.

β	Temps initial	Temps relatif	Rapport
0,5	1s	1,15 s	1,15
0,8	1s	1,66 s	1,66
0,86	1s	2s	2
0,995	1s	10s	10
0,997	1s	13s	13
0,999	1s	22s	22
0,9999	1s	1m 11s	71
0,99999999	1s	6h 12m	22320

FIGURE 16 – Dilatation du temps en fonction de $\beta = \frac{v}{c}$. Repris de [4].

Le temps apparent se calcule par rapport au temps propre par la formule :

$$(3) \quad \Delta t = \gamma \Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Delta t'$$

$$(4) \quad \Leftrightarrow \Delta t' = \frac{1}{\gamma} \Delta t = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \Delta t$$

Dans le cas limite des *photons* qui, ayant une masse nulle, se déplacent à la vitesse de la lumière, un intervalle de temps $\Delta t'$ mesuré dans leur référentiel propre $\mathcal{R}'$ vaudra 0 : pour un *photon*, $v = c$, et en se servant de l'éq. 4, nous avons $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = 0$. Le *photon*, c'est-à-dire une particule de lumière ne vieillit pas.

¹⁷Du physicien Hermann Minkowski, 1864 - 1909, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski.

De même, les distances sembleront plus courtes dans le référentiel en mouvement (elles le sont réellement).

$$(5) \quad \Delta x' = \frac{1}{\gamma} \Delta x = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \Delta x$$

Il n'y a plus de présent unique parmi l'ensemble des constituants de l'**espace-temps**, il y a *des présents*, autant que de constituants.

Nous représentons généralement ces **espaces-temps** propres à chaque particule, par un cône de lumière (voir fig.17, page 16) qui représente l'ensemble des trajectoires causales possibles, toutes les autres sont interdites, voir [20].

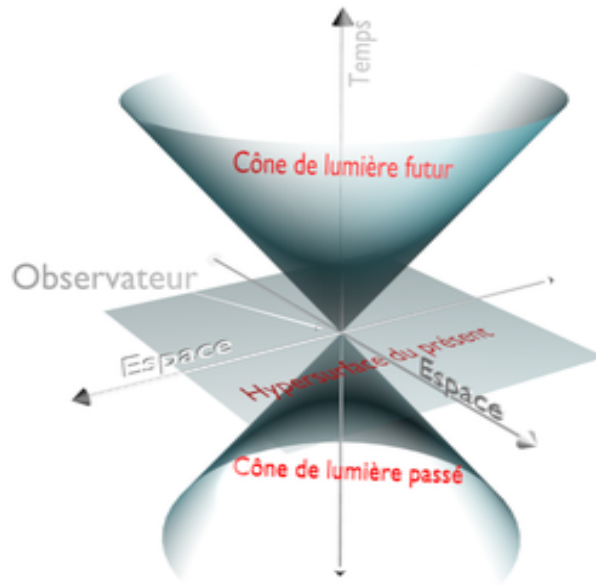


FIGURE 17 – Le cône de lumière centré sur un évènement.

2.1.4 Loi de composition des vitesses.

Ici encore, la *Relativité Restreinte* modifie la loi d'additivité des vitesses en mécanique classique par une loi relativiste :

Soient $\vec{v}_s$, la vitesse relativiste d'un vaisseau spatial définie par rapport à la Terre, et $\vec{v}_m$, la vitesse relativiste d'un missile tiré par le vaisseau. v_m étant définie par rapport au référentiel du vaisseau.

Quelle est la vitesse v'_m du missile exprimée par rapport à la Terre ?

En mécanique classique, on aurait simplement $v'_m = v_s + v_m$ Mais en mécanique relativiste, l'additivité des vitesses devient¹⁸ :

$$(6) \quad v'_m = \frac{(v_s + v_m)}{\left(1 + \frac{v_s \cdot v_m}{c^2}\right)}$$

¹⁸Voir [18].

2.1.5 Équivalence Masse - Énergie.

Enfin, dans le cadre de la *Relativité Restreinte*, Einstein postule l'équivalence de la masse et de l'énergie (quelle que soit sa forme). En fait toute forme d'énergie (thermique, masse, cinétique, contraction, pression ...) est équivalente et elle peut se transformer de l'une à l'autre.

C'est la célèbre formule :

$$(7) \quad E = mc^2$$

$$(8) \quad E = \gamma mc^2$$

En particulier, dans le centre de masse¹⁹ d'une particule, toute son énergie est sous forme de masse.

La première équation traduit que même au repos, une particule contient de l'énergie, sous forme de sa propre masse, tandis que la seconde explique que plus la particule est rapide, proche de c , plus son énergie sera élevée, y compris dans le référentiel où elle est au repos.

De même qu'en mécanique classique, l'énergie totale d'un système est égale à la somme de ses énergies cinétique et potentielle, nous avons un équivalent relativiste :

$$(9) \quad E = T + V = \frac{1}{2}mv^2 + V \quad \text{classique}$$

$$(10) \quad E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \text{relativiste}$$

$$(11) \quad \Leftrightarrow E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

$$(12) \quad \Leftrightarrow E = \gamma(mc^2)$$

Où E est l'énergie totale du système, T son énergie cinétique, V son énergie potentielle, m , la masse *au repos* du système et p est l'*impulsion*, ou encore appelée *quantité de mouvement*²⁰ du constituant, dont l'équivalent classique est $p = mv$, enfin, c c'est la vitesse de la lumière.

Dans le cas d'un *photon*, c'est-à-dire d'une particule de lumière dénuée de masse, son énergie est simplement donnée par son énergie cinétique qui est liée à sa fréquence :

$$(13) \quad E = pc = h\nu$$

Où h est la constante de *Planck*²¹ et ν est la fréquence du photon.

Le photons²² n'ayant pas de masse, ou, de manière équivalente, n'ayant pas de référentiel où il puisse être au repos, il se déplace toujours à la vitesse de la lumière.

¹⁹référentiel où la particule est au repos, c'est-à-dire le référentiel où la particule a une vitesse nulle.

²⁰voir [37].

²¹Voir [22].

²²et d'une manière générale toutes les particules dénuées de masse, comme l'hypothétique graviton, onde-particule messagère de la gravitation en théorie quantique des champs, voir [29].

On comprend alors facilement pourquoi, physiquement, une particule massive ne peut atteindre et encore moins dépasser la vitesse de la lumière : augmenter la vitesse de la particule revient à lui augmenter son énergie totale, donc sa masse équivalente (cf. éq. 12). Il faut alors encore plus d'énergie pour encore l'accélérer et ainsi de suite... Virtuellement, puisque c'est physiquement impossible, il faudrait une énergie *infinie* pour accélérer une particule massive à la vitesse de la lumière !

2.1.6 Preuves ?

La théorie est esthétique, mais fonctionne-t-elle ?

En pratique oui, tous les jours les effets relativistes sont démontrés, avec une excellente précision, dans les accélérateurs de particules, où de nombreuses particules comme les μ^- ²³ vivent plusieurs secondes alors que leur temps de vie, au repos est de quelques μs seulement. Mais c'est valable pour toutes les particules.

Ces mêmes μ^- peuvent également provenir de l'espace et arriver sur Terre où ils sont détectés. C'est parce qu'ils ont une vitesse relativiste, qu'ils vivent suffisamment longtemps pour traverser de grandes distances avant de se désintégrer.

L'énergie nucléaire utilise directement la relation 12 : la fission nucléaire « casse » des noyaux lourds en plusieurs sous-produits, dont la somme des masses est inférieure à la masse du noyau initial. La masse manquante sert à créer de l'énergie thermique qui sera convertie ensuite en énergie électrique.

Enfin, toujours en physique des particules, des particules très massives sont créées en collisionnant des particules plus légères mais accélérées à des vitesses relativistes via la loi sur l'énergie du centre de masse, voir équation (8). De manière très imagée, c'est un peu comme si on envoyait se collisionner deux fraises à vitesse relativiste, qu'elles produisent une pastèque (grâce à l'équation 8), qui elle-même se désintégrerait ensuite en une multitude de fruits de plus petits poids (des fraises, abricots, pommes...).

2.2 Relativité Générale.

2.2.1 Préambule.

Ici plus encore que dans la section sur la *Relativité Restreinte*, nous ne ferons vraiment qu'effleurer le sujet.

Pour aller plus loin, le lecteur pourra aller sur les sites web, donnés en références : [40], [38], et le très complet [1] (qui regroupe *Relativité Restreinte* et *Relativité Générale*). Les plus courageux pourront accéder aux cours de *Relativité Générale* [15], celui de Jean-Pierre Luminet (voir [9], [10] et [11])

²³ *muons*, particules chargées négativement, comme l'électron, de la deuxième famille léptonique, ce sont des sortes de gros électrons, 260 fois plus massifs et qui de ce fait sont instables avec une durée de vie de quelques μs . Voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Muon>.

2.2.2 Pourquoi généraliser la *Relativité Restreinte* ?

La *Relativité Restreinte* a apporté une meilleure compréhension de l'espace et du temps, devenus un *espace-temps*, cependant cette théorie souffrait d'une grosse lacune : elle ne fonctionne que dans des référentiels inertiels, c'est-à-dire non accélérés.

Or, nous baignons dans un champ gravitationnel produit par la Terre et les astres proches. Nous ne sommes donc pas dans un référentiel inertiel (sinon nous quitterions le sol et la Terre au moindre mouvement de pied sur le sol).

Einstein réalise, par une expérience de pensée, qu'il y a équivalence entre subir l'attraction gravitationnelle et être uniformément accéléré.

Par exemple, si nous supposons être dans un ascenseur situé dans l'espace et hermétiquement clos. Nous ne pourrions discerner si la force que nous ressentons et qui nous attire vers le plancher est due à la gravitation ou à l'accélération que produit l'ascenseur, voir le schéma sur la fig. 18, voir [16] pour plus de détails sur cette expérience de pensée.

Il élabore alors une généralisation de la théorie de la *Relativité Restreinte*, en se basant sur les travaux de Bernhard Riemann²⁴ (voir une de ses représentations sur la fig. 19) sur la géométrie différentielle et en particulier ses travaux en géométrie non-euclidienne²⁵, voir [27].

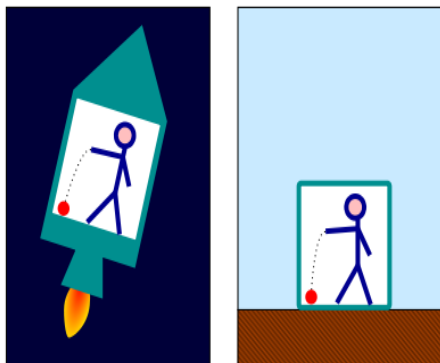


FIGURE 18 – La chute d'un objet vue par un observateur extérieur (à gauche), et vue par l'hôte de l'ascenseur

(à droite). Extrait de [16].



FIGURE 19 – Bernhard Riemann

2.2.3 La matière déforme l'espace-temps.

Ainsi pour Einstein, et à la différence de Newton, la gravitation est due à la déformation de l'**espace-temps** par la masse de ses constituants et non à une force intrinsèque de la matière issue de la masse.

On peut « visualiser » cette déformation par l'image de billes d'acier se déplaçant sur une toile en résille. Les billes, massives, vont déformer la toile, la creusant, et donc modifier ses propriétés locales. Voir fig. 21.

²⁴Mathématicien, né en 1826, mort en 1866, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Bernhard_Riemann.

²⁵ou espaces courbes

L'image n'est pas tout à fait correcte, car elle représente une toile, espace en deux dimensions, visualisée à l'extérieur, c'est-à-dire dans un espace à trois dimensions. Alors que dans le cas de l'espace-temps, c'est un espace à quatre dimensions qui n'est pas contenu dans un espace de dimension plus grande, l'univers²⁶ n'a pas de bords²⁷.

Plus l'astre sera dense et massif, et plus il « s'enfoncera » dans la toile de l'espace-temps, plus il « creusera » un trou, comme dans le cas des étoiles à neutrons²⁸, ou le cas extrême des trous noirs²⁹ qui, virtuellement creuseront la toile de l'espace-temps à l'infini. Voir fig. 20. Voir [13] pour un des explications détaillées sur l'origine des trous noirs, l'évolution des étoiles, mais aussi [6], ou encore [50] sur *Wikipedia*.

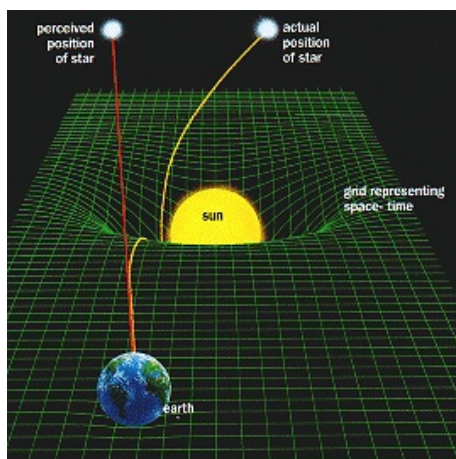


FIGURE 20 – Comparaison de la déformation de l'espace-temps en fonction de la masse de la planète ou de l'astre.

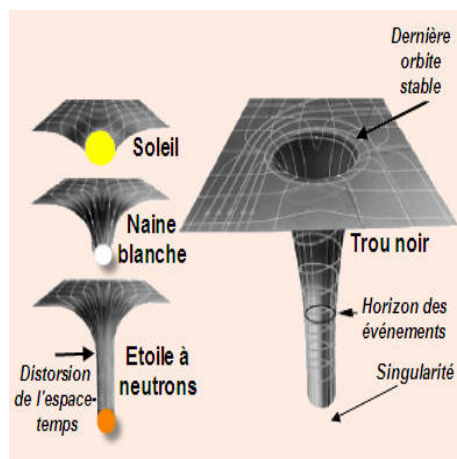


FIGURE 21 – Déformation locale de l'espace-temps par la masse du Soleil et de la Terre.

C'est parce que les constituants³⁰, ont une masse³¹ qu'ils déforment l'espace-temps, lequel en retour, par sa déformation de topologie locale, va induire des

²⁶du moins si on exclut les théories multivers, ou univers-multiples (voir Wikipédia en anglais [32]) et d'omnivers (voir Wikipédia, toujours en anglais, [33]).

²⁷mais il peut être fermé! Exemple : une sphère a un volume fermé, celui contenu à l'intérieur de son rayon, mais elle n'a pas de bord : on peut parcourir la surface de la sphère toujours dans la même direction sans jamais atteindre une limite. On repassera éventuellement au même points plusieurs fois, voir [12].

²⁸une étoile à neutron est une étoile massive, environ 1,4 masse du Soleil, « effondrée » sur elle-même à la fin de sa vie, lorsqu'ayant épuisé son carburant nucléaire, elle ne peut plus lutter contre la gravitation. Son rayon est alors de l'ordre de 10 km de rayon. Voir [13], ou [47] sur Wikipédia.

²⁹Un trou noir est une étoile de masse supérieure à 40 masses solaires, qui comme pour les étoiles à neutrons, va s'effondrer en fin de vie, après avoir épuisé son carburant nucléaire. Mais sa masse résiduelle étant supérieure à une limite de 3 masses solaires, la gravitation continuera de s'exercer sur les constituants de l'étoile, devenue étoile à neutrons, cette dernière continuera à s'effondrer à l'infini. Voir [13], [7] et Wikipédia [50].

³⁰essentiellement les étoiles et leurs « produits », comme les étoiles à neutrons et les trous noirs, car les autres astres, planètes, astéroïdes, comètes... ne sont pas assez massifs pour avoir une action sur l'espace-temps.

³¹D'où vient la masse? la physique des particules explique la création de la masse par l'interaction des champs quantiques de particules avec un champ de Higgs, sorte de généralisation du champ électromagnétique, qui a une valeur non nulle dans l'espace. Plus les particules interagissent avec le champ de Higgs et plus la particule est massive, et réciproquement. Voir [19] et [17].

changements de trajectoires des particules. Ces changements de trajectoires vont à leur tour modifier la répartition de masse dans l'espace-temps, créant une nouvelle modification de topologie, qui induit un nouveau changement de trajectoire, qui ...

Plus exactement, c'est la densité de l'astre qui provoque la déformation de l'espace-temps. On dit que la matière *courbe* l'espace-temps. Une étoile à neutrons ou un trou noir déformeront plus l'espace-temps qu'une étoile de deux masses solaires, car ils concentrent toute leur masse dans un volume très faible, soit un rayon de l'ordre de 10 km pour l'étoile à neutron contre un rayon d'environ 1,4 million de km pour le Soleil.

Application concrète : les lentilles gravitationnelles.

Nous avons vu que des rayons lumineux passant très près d'un astre auront leur trajectoire modifiée par la déformation de l'espace-temps causée par cet astre. Les physiciens utilisent cette propriété comme une loupe pour sonder l'espace lointain, voir fig.22 :

Ils utilisent la déformation de l'espace-temps causée par la masse d'une galaxie située entre la galaxie lointaine à étudier et nous, pour « augmenter » le nombre de photons reçus de la galaxie lointaine, ce qui a pour conséquence d'augmenter la précision des détails observés.

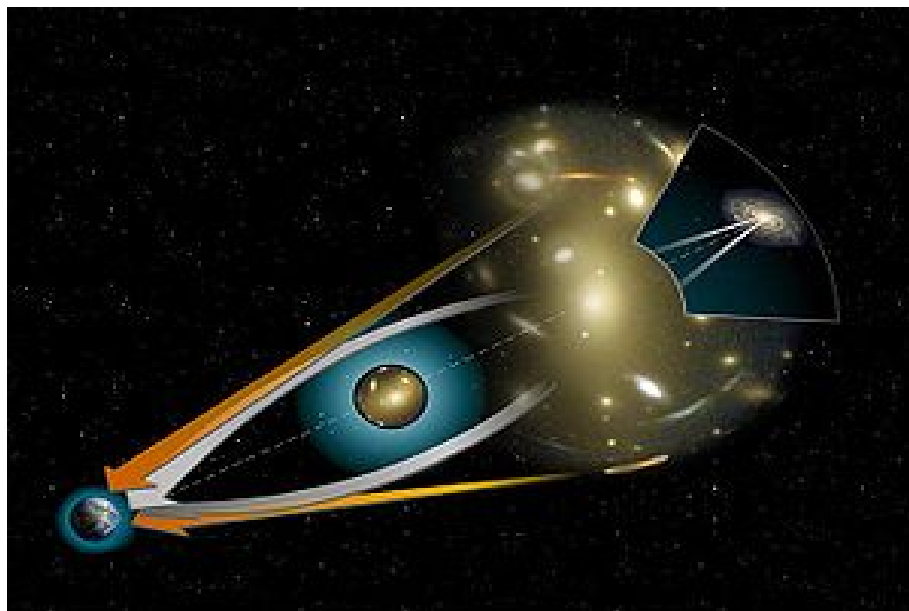


FIGURE 22 – Principe de la déviation des rayons lumineux. Il est important de remarquer que la déviation n'est pas similaire du tout à celle d'une lentille optique.

2.2.4 L'Équation d'Einstein.

Par soucis d'exhaustivité, nous allons aborder les aspects les plus mathématiques que nous nous contenterons de survoler.

L'équation d'Einstein s'écrit :

$$(14) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Où, R est la courbure scalaire³², $R_{\mu\nu}$ est le tenseur³³ de Ricci³⁴, $T_{\mu\nu}$ est le tenseur d'énergie-impulsion³⁵, $g_{\mu\nu}$ est le tenseur métrique³⁶ solution des équations d'Einstein. μ et ν sont les indices numérotés de 0 (le temps) à 3 (les 3 dimensions d'espaces).

Pour en comprendre le sens, nous citerons l'article [40] de Wikipédia sur la *Relativité Générale* :

L'équation d'Einstein est l'expression mathématique de la Relativité Générale et plus généralement de toute la physique de la gravitation.

Sa forme générale signifie :

Une mesure de la courbure moyenne de l'espace-temps = une mesure de la densité d'énergie

Dans un tel espace-temps *courbe*, les lignes de plus court chemin entre deux points ne sont plus des droites, comme en espace euclidien, mais des **géodésiques**³⁷, c'est-à-dire des « lignes droites » dans un espace courbe.

Exemple : les méridiens de la Terre, qui rejoignent les pôles Nord et Sud, sont des « lignes droites courbées » car elles suivent la surface de la Terre.

Ainsi, une particule, par exemple un photon³⁸, qui traverserait l'**espace-temps** « en ligne droite », suivrait en réalité des **géodésiques**, comme illustré sur les fig. 23 et 24.

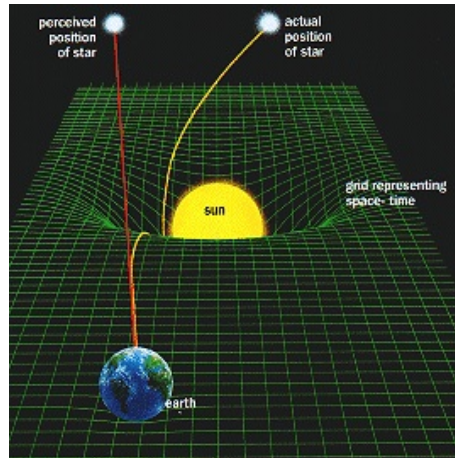


FIGURE 23 – Déformation locale de l'espace-temps par la masse du Soleil et de la Terre, nous observons le mirage d'optique dû à la déformation de

l'espace-temps par le Soleil.

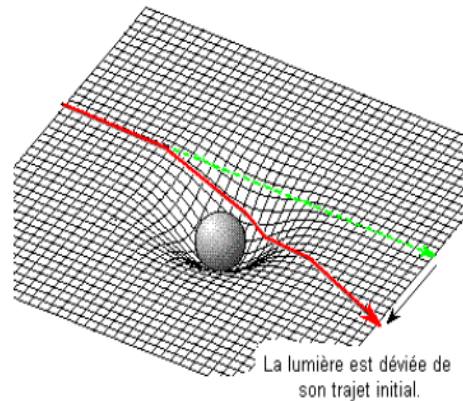


FIGURE 24 – Déformation locale de l'espace-temps par la masse du Soleil, qui modifie la géodésique de la lumière.

³²Voir [23].

³³Voir [42].

³⁴Voir [43].

³⁵Voir [2].

³⁶Voir [44].

³⁷Voir [26].

³⁸Le photon est la particule duale de l'onde électromagnétique, c'est-à-dire la lumière, voir [34].

2.2.5 Modèles d'Univers et constante cosmologique.

Il est possible d'utiliser la *Relativité Générale* à l'échelle de l'univers. En particulier, Einstein est le premier à publier un modèle cosmologique « stable, immuable » car Einstein ne pouvait imaginer que l'Univers puisse avoir eu un commencement et/ou avoir une fin.

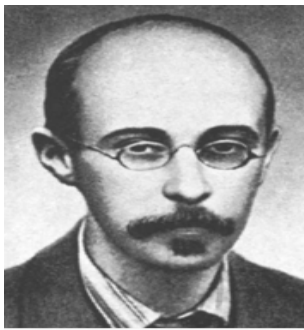
Il se rend compte très tôt que la *Relativité Générale* admet des solutions où l'Univers évolue. Pour annihiler cette possibilité, Einstein introduit la constante cosmologique³⁹ notée Λ , dont la valeur est fixée précisément pour empêcher son modèle d'univers d'évolution. Son équation devient alors :

$$(15) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Le but de cette constante est d'empêcher l'univers de croître.

2.2.6 Modèles d'Univers dynamiques.

En 1922, Alexander Friedmann⁴⁰ et Georges Lemaître⁴¹ propose un modèle d'univers dynamique, avec une origine et éventuellement une fin (voir [31]).



A. Friedmann

FIGURE 25 – Aleksandr Fridman



FIGURE 26 – Georges Lemaitre

En effet l'évolution à très long terme de l'univers dépend de son rayon de courbure, noté K , voir la fig. 27.

Ce type de modèle a servi de base aux modèles cosmologiques actuels, comme le *modèle cosmologique standard*⁴².

³⁹Voir [21].

⁴⁰Physicien et mathématicien, né en 1888, mort en 1925, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Alexander_Friedmann.

⁴¹Chanoine, astronome et physicien, né en 1894 et mort en 1966, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Georges_Lemaître.

⁴²Voir [30].

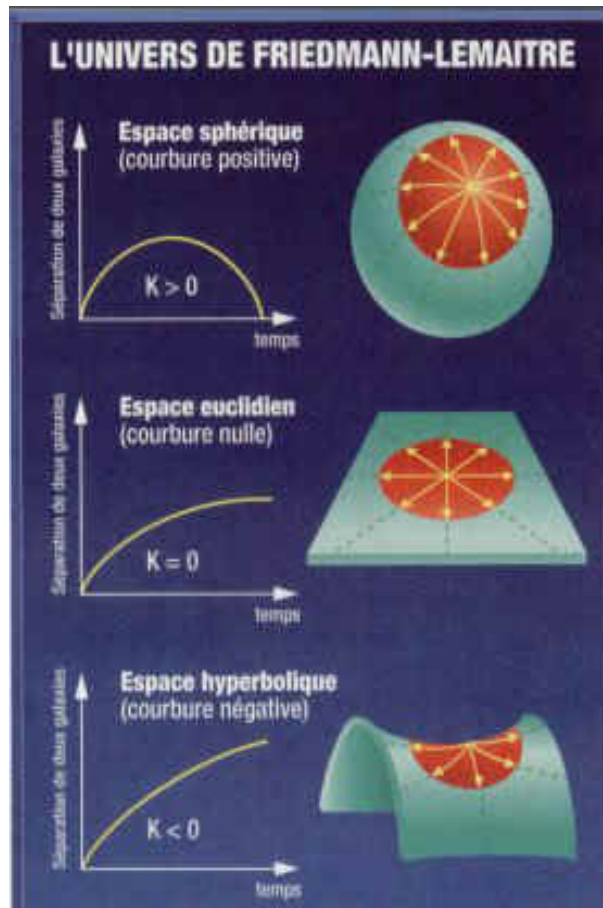


FIGURE 27 – Modèles d'univers de Friedmann-Lemaître, 1922.

Fig. du haut : modèles à courbure positive, telle l'hyper-sphère à quatre dimensions, où la somme des angles d'un triangle est supérieure à 180 degrés. Si l'espace est sphérique, l'Univers est spatialement fini et temporellement "fermé" : après la phase actuelle d'expansion il se contractera et son histoire s'achèvera par l'opposé d'un Big Bang nommé Big Crunch

Fig. du milieu : modèle euclidien, où la courbure est nulle et où la somme des angles de tout triangle est égale à 180 degrés. Si l'Univers est euclidien, il est temporellement "ouvert" : son expansion se poursuivra éternellement. Cependant on ne sait plus, dans ce cas, si l'espace est fini ou infini, car la question de la finitude ou de l'infinitude de l'espace relève non plus de la relativité générale, mais de la topologie.

Fig. du bas : modèles à courbure négative, telle une nappe plissée où chaque point serait analogue à une selle de cheval, La somme des angles d'un triangle est inférieure à 180 degrés. Si l'Univers est hyperbolique, il est temporellement "ouvert" : son expansion se poursuivra éternellement. Cependant on ne sait plus, dans ce cas, si l'espace est fini ou infini.

En 1925, Edwin Hubble⁴³ constate que plus une galaxie est loin de nous,

⁴³Astronome né en 1889, mort en 1953, voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble

plus elle s'éloigne de nous à grande vitesse les galaxies s'éloignent de nous (voir fig. 29). L'Univers est donc en expansion !

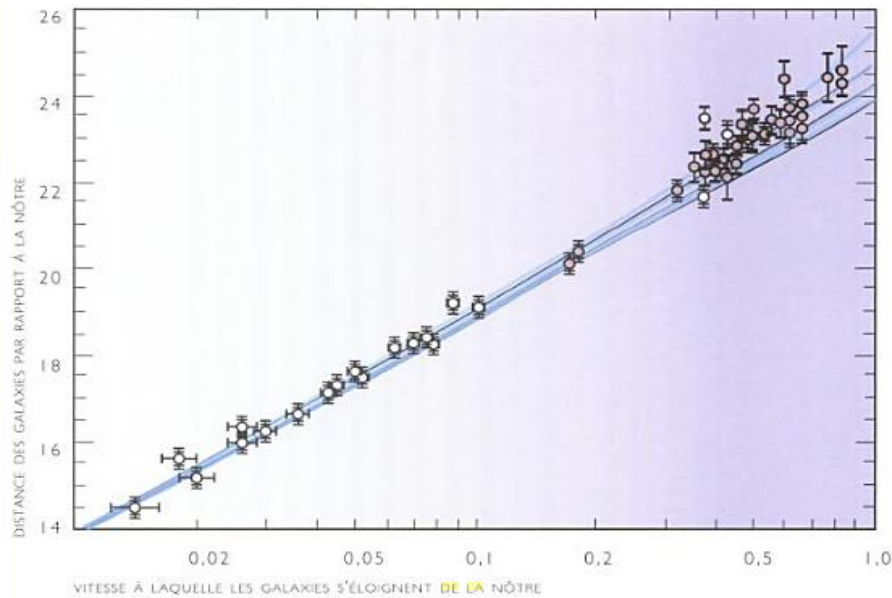


FIGURE 28 – Graphique de la loi de Hubble : plus une galaxie est éloignée, plus elle s'éloigne vite de nous. Tiré de [8].

En effet, par principe de symétrie⁴⁴, nous sommes en droit de penser que ce que nous observons, ce produit partout dans l'Univers en même temps. Si toutes les galaxies semblent toutes s'éloigner les unes des autres, c'est que globalement l'espace-temps grandit. Les galaxies ne s'éloignent pas réellement, c'est l'espace-temps qui se dilate, un peu comme un gâteau aux raisins qui gonfle en cuisant. Les raisins ne se déplacent pas à proprement parler dans le gâteau, mais la pâte qui se trouve entre eux, gonfle, prend plus de volume, et *in fine* les raisins nous donnent l'impression de s'être déplacés.

Hubble.

⁴⁴Nous n'avons aucune raison de penser que nous jouissions d'une position privilégiée dans l'univers, ce qui est confirmé puisque nous sommes dans un système solaire ordinaire, situé dans l'un des bras d'une galaxie spirale ordinaire parmi tant d'autres...

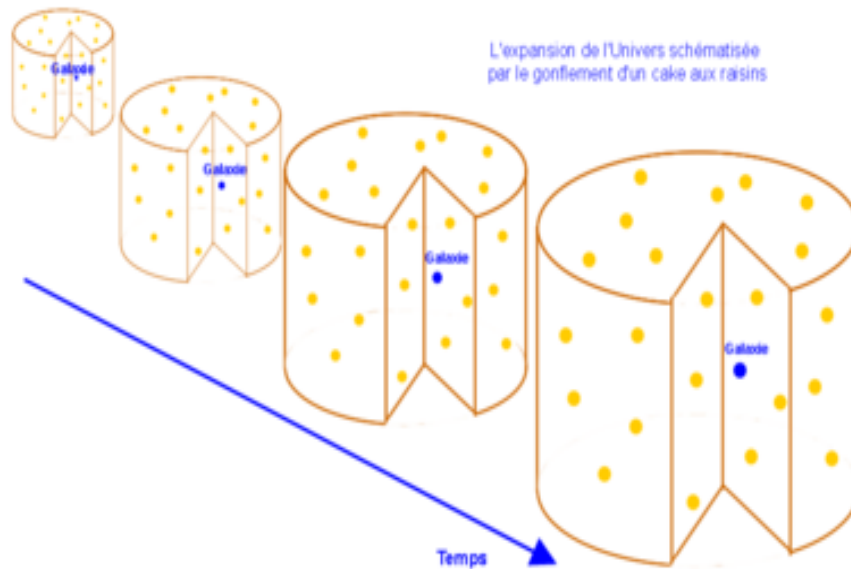


FIGURE 29 – L’expansion de l’Univers imagée par le gonflement d’un gâteau aux raisins. Tiré de [25].

Einstein est alors forcé de retirer sa constante, il admettra alors que son introduction « *a été la plus grosse erreur de sa vie* ».

Plus récemment, nous avons découvert que l’Univers non seulement grandit, mais qu’il accélère sa croissance de plus en plus vite, nécessitant de réintroduire une constante cosmologique, répulsive cette fois, assimilée à l’énergie du vide. Cette accélération est totalement négligeable à « *courte* » distance (comme la taille du système solaire, ou même de la galaxie), mais elle est additive sur les fantastiques distances qui sépare les galaxies et ainsi, à grande distance, elle accélère fortement la croissance de l’Univers.

Les dernières mesures de densité de l’Univers semblent indiquer que nous serions dans un univers de rayon de courbure légèrement supérieure à 1, donc dans un univers de type « *selle de cheval* » qui continuera à croître à l’infini.

2.2.7 Preuves ?

Là encore, quelles preuves avons-nous que cette nouvelle théorie est plus pertinente, plus explicative que ce que nous avions avant ?

La précession du périhélie de Mercure : Comme toutes les planètes du système solaire, Mercure a une lente précession⁴⁵ de son périhélie⁴⁶, mais contrairement aux autres planètes, elle n’est pas constante. La précession observée est en avance par rapports aux valeurs obtenues en mécanique classique. Einstein a pu calculer une valeur concordante avec les observations grâce à la *Relativité Générale* dès 1915⁴⁷.

⁴⁵rotation de son axe, voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Précession>.

⁴⁶Point de son orbite la plus proche du soleil, voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Périhélie>.

⁴⁷Voir [http://fr.wikipedia.org/wiki/Mercure_\(planète\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mercure_(planète)).

Le soleil courbe la trajectoire de la lumière : Jusqu'à la *Relativité Générale*, la lumière n'ayant pas de masse, elle ne pouvait être attirée par de la matière. Sa trajectoire devrait alors toujours être en ligne droite. Dans le cadre de la *Relativité Générale*, la masse⁴⁸ déforme l'espace-temps qui modifie les géodésiques. La lumière peut ainsi être déviée, sa trajectoire modifiée, par des astres denses (et suffisamment massifs, comme le soleil). Einstein calcula en 1915 la déviation de la lumière par le soleil qui fut confirmée en 1919 par Eddington lors d'une éclipse⁴⁹.

Nous avons vu également que les physiciens utilisent cette propriété comme « *lentille* » pour sonder l'univers lointain, voir la section 2.2.3.

La gravitation doit ralentir le temps mesuré par une horloge :

Les horloges atomiques du système GPS nécessitent une correction pour compenser l'effet de la gravité Terrestre.

Évolution de l'Univers : Comme expliqué dans la section précédente, la *Relativité Générale* permet de modéliser l'Univers et son évolution, en particulier l'expansion de l'Univers avec la « *fuite* » constatée des galaxies.

2.3 La *Relativité Générale*, théorie ultime ?

Forte de tous ces succès, la *Relativité Générale* est-elle la théorie ultime ? Non. Elle est en contradiction totale avec le formalisme des théories quantiques des champs⁵⁰. En résumé, le formalisme mathématique étant peut-être encore pire que celui de la *Relativité Générale*, ces théories reposent sur le fait que la matière et l'énergie sont quantifiées, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent varier que par incréments, elles ne sont pas continues (même si la taille de ces incréments peuvent être infinitésimales). Il y a une dualité onde-particule⁵¹. Enfin il faut abandonner les notions de positions et de vitesses, mais raisonner à la place en probabilité de présence et probabilité d'impulsion. On ne peut du reste mesurer avec autant de précision que souhaité et la position et la vitesse d'une même particule en même temps, la relation d'incertitude d'Heisenberg l'en empêche⁵². De plus, en théorie des champs, l'échange d'information se fait via l'échange de particules messagères, les bosons, particules absentes de la *Relativité Générale*. Les théories quantiques des champs interviennent dans le cadre de l'infiniment petit. Bien qu'encore plus étranges pour le sens commun que les théories de la relativité, ces théories quantiques se sont montrées redoutablement précises et capables de prédire de nouvelles particules ou de nouvelles propriétés bien longtemps avant qu'elles ne soient découvertes expérimentalement. Avec la *Relativité Générale*, elles forment un des deux piliers actuels de la physique moderne.

⁴⁸ Et plus généralement toute forme d'énergie puisque l'énergie est équivalent à de la masse et réciproquement.

⁴⁹ Voir <http://www.astrosurf.com/luxorion/relativite-generale-ex2.htm>.

⁵⁰ Voir [46].

⁵¹ Chaque particule est également une onde et réciproquement.

⁵² Voir [35].

La *Relativité Générale*, elle, repose sur la continuité de l'espace-temps et de l'ensemble de ses constituants. La *Relativité Générale* n'est pas prévue pour intégrer un quelconque formalisme quantique, Einstein n'y croyait pas.

À la limite, ça pourrait ne pas être (trop) gênant. Les physiciens utiliseraient la *Relativité Générale* s'ils s'intéressaient à des problèmes qui ont trait à l'Univers et ils utiliseraient les théories quantiques des champs dans les problèmes de particules.

Sauf qu'il existe (au moins) deux cas limites qui nécessitent les deux en même temps :

- les trous noirs : le trou noir s'effondrant sur lui-même à l'infini, il va atteindre une taille où les effets quantiques ne sont plus négligeables, mais en même temps, il sera tellement massif et dense qu'il va énormément courber son espace-temps environnant et la *Relativité Générale* devra s'appliquer. . .
- l'origine de l'univers : les modèles cosmologiques imaginent un univers extrêmement dense et chaud et extrêmement petit. Là aussi nous avons besoin d'une description nécessitant à la fois la *Relativité Générale* et les champs quantiques.

De gros efforts sont actuellement faits pour tenter d'unifier ces deux théories. Les théories les plus avancées actuellement sont :

- les théories des super-cordes⁵³ : elles nécessitent un espace-temps à 10 dimensions (11 pour la M-théorie) et modélisent toutes les particules par des vibrations de « cordes » d'une taille de l'ordre de la longueur de Planck⁵⁴, soit environ 10^{-33} m. Ces théories sont basées sur un formalisme quantique et tentent d'y retrouver non seulement une description cohérente de l'ensemble des autres théories quantiques actuellement « prouvées » mais aussi d'y inclure la gravitation.
- la théorie de la gravitation quantique à boucle⁵⁵ : elle tente de quantifier la gravitation pour ultérieurement y inclure les théories quantiques. Le temps et l'espace deviennent alors discontinus, ce ne sont même plus à proprement parler du temps et de l'espace mais des morceaux, on parle de nœuds et de liens, qui assemblés ou regroupés ensemble forment l'espace-temps. Un peu comme le regroupement de très (très, très...) nombreuses molécules d'eau forme, vu de loin, un lac, alors qu'elles ne sont pas des « morceaux de lac ».

Pour le moment, ces théories ne sont pas suffisamment abouties pour pouvoir faire des prédictions qui soient mesurables par nos instruments.

Enfin, la *Relativité Générale* ne dit rien sur la topologie⁵⁶ de l'espace-temps. L'univers pourrait très bien être bien plus petit que ce que l'on croit en voir.

⁵³Voir [45].

⁵⁴Voir [51].

⁵⁵*LQG* pour *Loop Quantum Gravity* en anglais, voir [28].

⁵⁶Étude de la forme et des déformations d'un espace, au sens mathématique, voir [48] pour sa définition générale et [14] pour son application à la cosmologie.

En particulier nous pourrions avoir de nombreuses images d'un même astre lointain, voir [12] pour de bien plus amples descriptions.

L'évolution future de l'Univers dépend de son rayon de courbure mais également de sa topologie.

Conclusion

Le survol des relativités restreinte et générale touche à sa fin. En dehors des détails mathématiques, quels sens physique doit-on retenir de ces deux théories ?

Les propriétés communes *Relativité Restreinte* & *Relativité Générale*

La vitesse de la lumière est constante et infranchissable : quelque soit le référentiel dans lequel elle est mesurée, elle aura toujours la même vitesse (si même milieu) et elle ne pourra pas être dépassée. Vouloir augmenter la vitesse d'une particule ne serait-ce que jusqu'à la vitesse de la lumière *équivalut à lui donner une énergie infinie*. Ce qui est physiquement impossible.

L'espace et le temps sont remplacés par un *espace-temps* : les notions d'espace et de temps absolus et commun à tous disparaissent pour laisser la place à un *espace-temps* relatif, qui peut être différent entre les différents constituants de l'univers en fonction de leur vitesse relative. Il n'y a plus de passé / présent / futur communs... le passé d'un constituant peut être le futur d'un autre. Si la vitesse est relativiste, le temps se dilate, l'espace se contracte.

Équivalence masse - énergie : Augmenter l'énergie (quelle que soit sa forme : cinétique, thermique...) d'une particule équivalut à lui augmenter sa masse apparente. Inversement on peut utiliser la masse issue de particules pour créer de l'énergie (comme dans le cas de la fusion nucléaire).

La *Relativité Restreinte* est un cas limite particulier de la *Relativité Générale* : La *Relativité Restreinte* est un cas particulier, limite, de la *Relativité Générale* qui serait dépourvue de masse. L'espace-temps de Minkowski est alors plat et le reste. Il n'y a pas d'énergie du vide pour courber l'espace.

***Relativité Restreinte* et *Relativité Générale* sont incompatibles avec les théories des champs :** elles ne sont donc pas ultimes, il manque une théorie qui engloberait les théories relativistes et quantiques. Les candidates sont les théories des super-cordes et celle de la gravitation quantique à boucle.

Les propriétés spécifiques de la *Relativité Générale*

L'espace-temps est courbé par la densité de masse locale : Une étoile déforme localement son espace environnant. L'espace-temps locale n'étant plus *plat*, les trajectoires de particules ne sont plus des lignes droites mais des géodésiques. La lumière est donc déviée par une densité de masse suffisamment grande telle qu'une étoile et, a fortiori une étoile à neutron ou un trou noir.

L'Univers évolue : Einstein, puis Friedmann & Lemaître se sont servis de la *Relativité Générale* pour concevoir des modèles d'univers statique (Einstein), ou dynamiques (Friedmann & Lemaître), dont l'évolution dépend de son rayon de courbure : si ce rayon est strictement nul, nous sommes dans un univers de type euclidien, s'il est négatif, nous sommes dans un univers type « selle de cheval », s'il est positif, nous sommes dans un univers de type « sphérique ».

La topologie de l'Univers influe sur son futur : la topologie de l'univers n'est pas incluse dans la *Relativité Générale*, c'est une donnée externe mais qui peut avoir des conséquences sur son futur.

La constante cosmologique semble bien présente : mais à la différence d'Einstein qui l'avait introduite pour rendre immuable l'univers, le sens physique moderne de cette constante serait l'énergie du vide qui tend l'univers à croître à l'infini.

Références

- [1] Commission de cosmologie de la Société Astronomique de France. Introduction à la Relativité Générale. <http://www-cosmosaf.iap.fr/RG-presentation-hypertexte-site.htm>, Avril 2002. [Online ; accessed 31-March-2012]. 18
- [2] CoursGratuits.Net. Tenseur Énergie-Impulsion. <http://physique.coursgratuits.net/relativite-generale/tenseur-d-energie-impulsion.php>. [Online ; accessed 31-March-2012]. 22
- [3] Damour, Thibault. *Si Einstein m'était conté*. Le Cherche-Midi, 2005. 13
- [4] Gérard Villemin. Relativité. <http://villemin.gerard.free.fr/Science/Relatif.htm>. site personnel, [Online ; accessed 31-March-2012]. 4, 12, 13, 15
- [5] Green, Brian. *La Magie du Cosmos*. Robert Laffont, 1999. 12, 15
- [6] Hawking, Stephen. *Une Brève Histoire du Temps : Du Big Bang aux trous noirs*. Flammarion, 1989. 20
- [7] Hawking, Stephen. *Trous Noirs et Bébés Univers*. Sciences. Odile Jacob, 2000. 20
- [8] Hawking, Stephen. *L'Univers dans une Coquille de Noix*. Sciences. Odile Jacob, 2002. 5, 25
- [9] Luminet, Jean-Pierre. Cours de Cosmologie 1 - Petite histoire de la cosmologie. volume 1 of *Master « Astronomie & Astrophysique » de l'Observatoire de Paris-Meudon*. Observatoire de Paris, Universités Paris VI, Paris VII et Paris XI, Laboratoire Univers et Théories (LUTH). <http://luth.obspm.fr/~luminet/courscosmo1.pps>, [Online ; accessed 31-March-2012]. 4, 6, 7, 18
- [10] Luminet, Jean-Pierre. Cours de Cosmologie 2 - Les bases de la cosmologie relativiste. volume 2 of *Cours de Cosmologie du Master « Astronomie & Astrophysique » de l'Observatoire de Paris-Meudon*. Observatoire de Paris, Universités Paris VI, Paris VII et Paris XI, Laboratoire Univers et Théories (LUTH). <http://luth.obspm.fr/~luminet/courscosmo2.pps>, [Online ; accessed 31-March-2012]. 18
- [11] Luminet, Jean-Pierre. Cours de Cosmologie 3 - Géométrie et topologie de l'Univers. volume 3 of *Cours de Cosmologie du Master « Astronomie & Astrophysique » de l'Observatoire de Paris-Meudon*. Observatoire de Paris, Universités Paris VI, Paris VII et Paris XI, Laboratoire Univers et Théories (LUTH). <http://luth.obspm.fr/~luminet/courscosmo3.pps>, [Online ; accessed 31-March-2012]. 18
- [12] Luminet, Jean-Pierre. *L'Univers Chiffonné*. Le temps des Sciences. Fayard, 2005. 20, 29

- [13] Luminet, Jean-Pierre. *Le Destin de l'Univers, Trous noirs et énergie sombre*. Le temps des Sciences. Fayard, 2010. 20
- [14] Pythacli. Cosmologie - Big Bang - Topologie. <http://pythacli.chez-alice.fr/univers/histoirecosmologie.html>. [Online ; accessed 31-March-2012]. 28
- [15] Éricourgoulhon. Relativité générale. Master « *Astronomie & Astrophysique* » de l'Observatoire de Paris-Meudon. Observatoire de Paris, Universités Paris VI, Paris VII et Paris XI, Laboratoire Univers et Théories (LUTH), 2011-2012. <http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/fr/master/relatM2.pdf>, [Online ; accessed 31-March-2012]. 18
- [16] Wikipedia.org. Ascenseur d'Einstein. http://fr.wikipedia.org/wiki/Ascenseur_d'Einstein. [Online ; accessed 31-March-2012]. 4, 19
- [17] Wikipedia.org. Boson de Higgs. http://fr.wikipedia.org/wiki/Boson_de_Higgs. [Online ; accessed 31-March-2012]. 20
- [18] Wikipedia.org. Calculs relativistes. http://fr.wikipedia.org/wiki/Calculs_relativistes. [Online ; accessed 31-March-2012]. 16
- [19] Wikipedia.org. Champ de Higgs électrofaible. http://http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_de_Higgs_électrofaible. [Online ; accessed 31-March-2012]. 20
- [20] Wikipedia.org. Cône de Lumière. http://fr.wikipedia.org/wiki/Cône_de_lumière. [Online ; accessed 31-March-2012]. 16
- [21] Wikipedia.org. Constante Cosmologique. http://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_Cosmologique. [Online ; accessed 31-March-2012]. 23
- [22] Wikipedia.org. Constante de Planck. http://http://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck. [Online ; accessed 31-March-2012]. 17
- [23] Wikipedia.org. Courbure scalaire. http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbure_scalaire. [Online ; accessed 31-March-2012]. 22
- [24] Wikipedia.org. Espace de Minkowski. http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace_de_Minkowski. [Online ; accessed 31-March-2012]. 12, 15
- [25] Wikipedia.org. Expansion de l'Univers. http://fr.wikipedia.org/wiki/Expansion_de_'l'Univers. [Online ; accessed 31-March-2012]. 5, 26
- [26] Wikipedia.org. Géodésique. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Géodésique>. [Online ; accessed 31-March-2012]. 22
- [27] Wikipedia.org. Géométrie non euclidienne. http://fr.wikipedia.org/wiki/Géométrie_non_euclidienne. [Online ; accessed 31-March-2012]. 19

- [28] Wikipedia.org. Gravitation quantique à boucles. http://http://fr.wikipedia.org/wiki/Gravitation_quantique_à_boucles. [Online; accessed 31-March-2012]. 28
- [29] Wikipedia.org. Graviton. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Graviton>. [Online; accessed 31-March-2012]. 17
- [30] Wikipedia.org. Modèle standard de la cosmologie. http://fr.wikipedia.org/wiki/Modèle_standard_de_la_cosmologie. [Online; accessed 31-March-2012]. 23
- [31] Wikipedia.org. Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker. http://fr.wikipedia.org/wiki/Métrique_de_Friedmann\discretionary{-}{L}{L}Lemaître\discretionary{-}{R}{R}Robertson\discretionary{-}{W}{W}Walker. [Online; accessed 31-March-2012]. 23
- [32] Wikipedia.org. Multiverse. <http://en.wikipedia.org/wiki/Multiverse>. en anglais, [Online; accessed 31-March-2012]. 20
- [33] Wikipedia.org. Omniverse. <http://en.wikipedia.org/wiki/Omniverse>. en anglais, [Online; accessed 31-March-2012]. 20
- [34] Wikipedia.org. Photon. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photon>. [Online; accessed 31-March-2012]. 22
- [35] Wikipedia.org. Principe d'incertitude. http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d'incertitude. [Online; accessed 31-March-2012]. 27
- [36] Wikipedia.org. Principe d'Équivalence. http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d'Équivalence. [Online; accessed 31-March-2012]. 12
- [37] Wikipedia.org. Quantité de Mouvement. http://fr.wikipedia.org/wiki/Quantité_de_mouvement. [Online; accessed 31-March-2012]. 17
- [38] Wikipedia.org. Équation d'Einstein. http://fr.wikipedia.org/wiki/Équation_d'Einstein. [Online; accessed 31-March-2012]. 18
- [39] Wikipedia.org. Équations de Maxwell. http://fr.wikipedia.org/wiki/Équations_de_Maxwell. [Online; accessed 31-March-2012]. 11
- [40] Wikipedia.org. Relativité Générale. http://fr.wikipedia.org/wiki/Relativité_Générale. [Online; accessed 31-March-2012]. 18, 22
- [41] Wikipedia.org. Relativité Restreinte. http://fr.wikipedia.org/wiki/Relativité_restreinte. [Online; accessed 31-March-2012]. 12, 13
- [42] Wikipedia.org. Tenseur. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tenseur>. [Online; accessed 31-March-2012]. 22
- [43] Wikipedia.org. Tenseur de Ricci. http://fr.wikipedia.org/wiki/Tenseur_de_Ricci. [Online; accessed 31-March-2012]. 22
- [44] Wikipedia.org. Tenseur Métrique. http://fr.wikipedia.org/wiki/Tenseur_métrique. [Online; accessed 31-March-2012]. 22

- [45] Wikipedia.org. Théorie des supercordes. http://http://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_des_supercordes. [Online; accessed 31-March-2012]. 28
- [46] Wikipedia.org. Théorie quantique des champs. http://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_quantique_des_champs. [Online; accessed 31-March-2012]. 27
- [47] Wikipedia.org. Étoile à Neutrons. http://fr.wikipedia.org/wiki/Étoile_à_neutrons. [Online; accessed 31-March-2012]. 20
- [48] Wikipedia.org. Topologie. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Topologie>. [Online; accessed 31-March-2012]. 28
- [49] Wikipedia.org. Transformation de Lorentz. http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformation_de_Lorentz. [Online; accessed 31-March-2012]. 12, 13
- [50] Wikipedia.org. Trou Noir. http://fr.wikipedia.org/wiki/Trou_noir. [Online; accessed 31-March-2012]. 20
- [51] Wikipedia.org. Unités de Planck. http://http://fr.wikipedia.org/wiki/Unités_de_Planck. [Online; accessed 31-March-2012]. 28
- [52] Wikipedia.org. Vitesse de la lumière. http://fr.wikipedia.org/wiki/Vitesse_de_la_lumière. [Online; accessed 31-March-2012]. 11