Complément

au chapitre “Newton rencontre Einstein”

(dans “Quand les grands les esprits se rencontrent”, Éditions La Presse, août 2026)

par Stéphane Durand

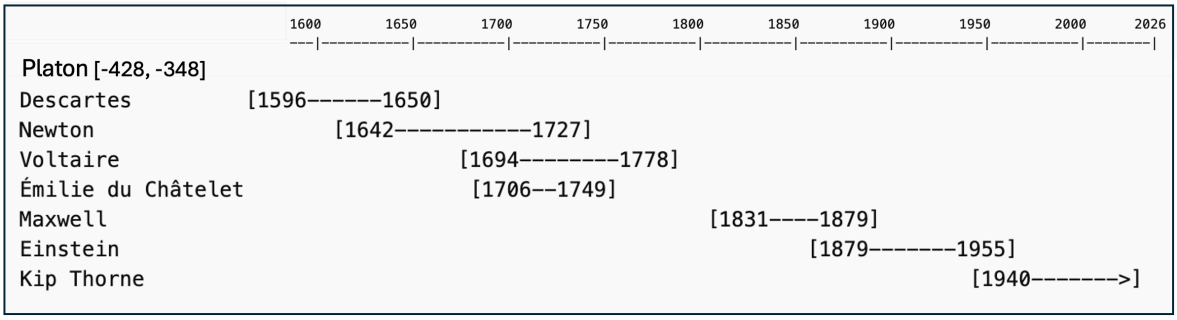
1. Les deux Relativités d'Einstein
2. Les protagonistes (mini-bio de chaque personnage)
3. Notes supplémentaires
4. Références (livres et vidéos), p. 8

* * *

Les deux Relativités d'Einstein

Relativité restreinte 1905	Relativité générale 1915
- concept d'espace-temps	- espace-temps déformé par la matière
- espace et temps relatifs	- gravitation = géométrie
- 4^{e} dimension	- trou noir
- ralentissement du temps par la vitesse	- ondes gravitationnelles
- saut dans le futur	- expansion de l'univers
- vitesse de la lumière infranchissable	- Big Bang
- $E = mc^2$	- univers parallèles (spéculatifs)

Protagonistes



Newton :
Oeuvre principale : Principia (1687)
Concepts : $F = ma$ et Loi universelle de la gravitation ($F = GMm/r^2$)
Unifie : Ciel et Terre
Explique : chute des corps, projectiles, marées, mouvements des corps célestes, etc
Prédit : existence de Neptune

Einstein :
Oeuvres principales : relativité restreinte (1905) et relativité générale (1915)
Concepts : espace-temps, 4^e dimension, $E = mc^2$, gravitation comme courbure de l'espace-temps.
Unifie : espace et temps ; matière et énergie
Prédit : ralentissement du temps, trous noirs, ondes gravitationnelles, expansion de l'univers

Maxwell :
Oeuvre : équations de Maxwell (1865)
Concept : champs (électrique et magnétique)
Unifie : électricité, magnétisme et lumière
Prédit : existence des ondes-radio et vitesse de la lumière absolue

Descartes :
Oeuvres : Discours de la méthode, Médiations métaphysiques (1641), etc
Concepts : lois de la nature et géométrie, doute hyperbolique, cogito (Je pense, donc je suis)
Prédit : le film La Matrice :-)

Voltaire :
Oeuvres : Candide, Dictionnaire philosophique, Lettres anglaises (1734), etc.
Concepts : l'esprit critique, la raison, la justice, la liberté de pensée, etc.
Passeur d'idées : très grand vulgarisateur dans plusieurs domaines.

Émilie du Châtelet :
Physicienne, savante et philosophe ; partenaire intellectuelle de Voltaire.
Grande traductrice et commentatrice de Newton.
Oeuvres : Institutions de physique, Lettre sur les “Éléments de la philosophie de Newton”, etc.
Concept : réflexion et discussion sur un concept préfigurant l'énergie

Platon :
Grand fondateur de la philosophie
Oeuvres : La République, Le Banquet (-380), etc.
Concepts : le monde des idées, distinction entre apparence et réalité, l'allégorie de la caverne, etc.

Kip Thorne :
Expert en relativité générale et trou noir
Réalisation : détection d'ondes gravitationnelles (prix Nobel 2017)
Conseiller scientifique du film Interstellaire
Prédit : voyages temporels plausibles via trou de ver

Notes supplémentaires

• Absolu versus relatif.
Tout n'est pas relatif en relativité. D'ailleurs Einstein n'aimait pas ce nom qu'on avait donné à sa théorie, car le plus fondamental dans sa théorie est ce qui est absolu : l'espace-temps et l'invariance de la vitesse de la lumière.

• Matière et antimatière.
Contrairement à une réaction nucléaire usuelle, comme la fusion ou la fission, qui est efficace à moins de 1 %, une réaction matière-antimatière est efficace à 100 %. C'est-à-dire que toute la masse en présence est transformée en énergie pure.

• Anachronisme. Il y a un anachronisme dans le texte lorsque Einstein mentionne le concept d'énergie à Newton, car à l'époque de Newton ce concept n'était pas encore vraiment développé. Un ancêtre de ce concept, appelé “force vive”, était utilisé par Leibniz mais pas par Newton. En particulier, après la mort de Newton, Émilie du Châtelet a joué un rôle important dans la défense de ce concept de force vive, très proche de celui d'énergie cinétique.

• L'année miraculeuse de Newton. L'année 1905 fut l'année miraculeuse d'Einstein, mais l'année 1666 fut celle de Newton. En fait, pendant 18 mois, en 1965-66, Newton s'est retiré à la campagne à cause de la peste qui sévissait à Londres. Durant cette période, alors âgé de 23-24 ans, il a révolutionné les mathématiques et la physique. Il a développé le calcul différentiel et intégral, compris la nature de la lumière, initié ses lois du mouvement et une partie de sa théorie de la gravitation universelle.

• Unification. Newton a unifié la Terre et le Ciel, puis Maxwell a unifié l'électricité, le magnétisme et la lumière. Par la suite, avec sa relativité restreinte, Einstein a unifié l'espace et le temps (via le concept d'espace-temps), puis la matière et l'énergie (via $E = mc^2$). Et ensuite, avec sa relativité générale, il a unifié la matière-énergie avec l'espace-temps : la matière-énergie déforme l'espace-temps, et les déformations de l'espace-temps dictent le mouvement de la matière énergie.

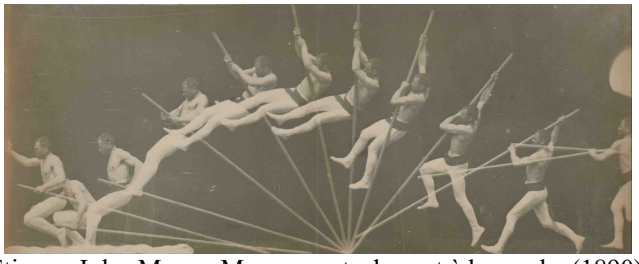
• Le paradoxe des jumeaux. Rigoureusement parlant, ce qui produit un décalage temporel entre deux personnes n'est pas la vitesse, mais l'accélération. En effet, une simple vitesse relative entre deux personnes est une situation symétrique : chacune peut considérer que c'est l'autre qui est en mouvement. De plus, pour pouvoir comparer le vieillissement de deux personnes, il faut que l'une des deux revienne à son point de départ, subissant par conséquent une accélération, soit parce qu'elle effectue un changement de direction pour faire un aller-retour, soit parce qu'elle voyage en orbite autour de la Terre (avec une accélération centripète). La vitesse joue un jour crucial pour l'importance du décalage temporel, mais il faut qu'il y ait aussi au moins une accélération en jeu. La façon la plus simple d'analyser la situation est de comparer la longueur des lignes d'univers dans l'espace-temps : plus la ligne est longue, plus la durée du temps propre écoulée est courte.

• **Vitesse de la lumière.** Le fait que la vitesse de la lumière constitue une limite infranchissable ne relève pas d'une contrainte technologique, mais d'une propriété fondamentale de la structure même de l'espace-temps. Ainsi, dans un accélérateur, plus une particule gagne en vitesse, plus son inertie augmente, de sorte qu'il faut lui fournir des quantités d'énergie toujours plus grandes pour accroître, même légèrement, sa vitesse. À mesure qu'elle se rapproche de la vitesse de la lumière, l'énergie requise tend vers l'infini, ce qui rend l'atteinte de cette vitesse impossible. Plus fondamentalement encore, dépasser la vitesse de la lumière entraînerait des inversions de causalité – autrement dit, des effets pourraient précéder leurs causes – ce qui introduirait des incohérences profondes dans le fonctionnement de l'univers.

• **Plus rapide que la lumière.** En relativité générale, l'expansion de l'espace peut être plus rapide que la vitesse de la lumière. Ainsi, certaines galaxies très lointaines s'éloignent de nous à une vitesse supérieure à celle de la lumière, comme le prévoit la loi de Hubble. Il ne s'agit toutefois pas d'une vitesse au sens usuel du terme, c'est-à-dire d'un déplacement local à travers l'espace, mais d'un éloignement dû à l'étirement même de l'espace dans le cadre de l'expansion cosmique. En revanche, localement, aucune particule ni aucune information ne peut dépasser la vitesse de la lumière.

• **Système GPS.** Pour déterminer sa position, notre récepteur GPS évalue simultanément sa distance par rapport à plusieurs satellites en orbite autour de la Terre, puis en déduit sa localisation par recoupement géométrique. Pour calculer ces distances, il doit connaître avec une très grande précision l'instant d'émission et l'instant de réception des signaux radio envoyés par les satellites. Comme les ondes-radio se propagent à la vitesse de la lumière, une erreur de quelques dizaines de millionièmes de seconde dans le calcul de leur temps de parcours produit une erreur de positionnement de plusieurs kilomètres. C'est pourquoi il faut absolument corriger le décalage temporel relativiste de 39 microsecondes par jour. Plus précisément, le temps dans les satellites retarde de 7 millionièmes de seconde par jour dû à la vitesse des satellites, tandis qu'il avance de 46 millionièmes de seconde par jour dû au champ gravitationnel moins intense à l'altitude de leur orbite. L'effet net est donc de 39 millionièmes de seconde d'avance par jour.

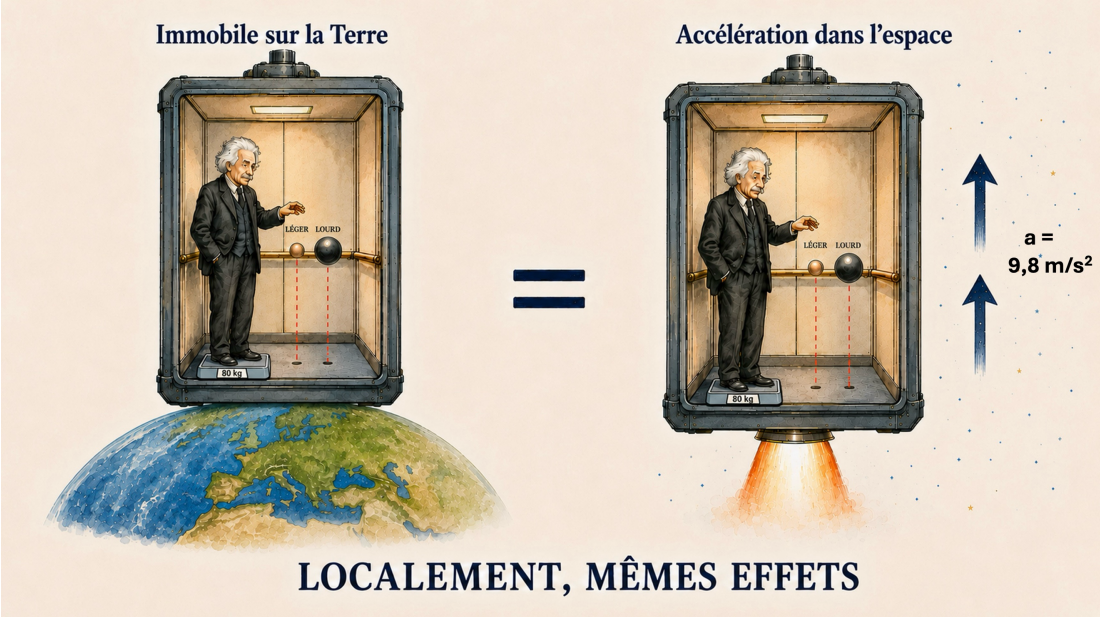
• **Dimension temporelle.** Il faut bien faire la différence entre une silhouette en deux dimensions qui se déplace dans son propre plan, comme sur la photo ci-dessous, et la notion d'espace-temps. Dans ce dernier cas, la dimension temporelle est perpendiculaire aux dimensions d'espace, et donc les images des silhouettes s'empilent pour former un volume à trois dimensions, comme on l'a vu. À l'inverse, dans l'image ci-dessous, tout demeure confiné dans le même plan à deux dimensions ; l'image n'a pas d'épaisseur, c'est-à-dire pas de longueur temporelle.



Étienne-Jules Marey. Mouvements du saut à la perche (1890)

• **Citation :** Comme indiqué dans le chapitre, la citation d'Einstein sur les dangers de l'énergie nucléaire mentionnée dans le texte est incertaine. En voici cependant une authentique sur les conséquences d'une guerre moderne : « Je ne sais pas avec quelles armes la Troisième Guerre mondiale sera menée, mais je le sais pour la Quatrième : ce sera avec des bâtons et des pierres. »

• **L'ascenseur d'Einstein.** “La pensée la plus heureuse de sa vie” concerne une réflexion en deux parties : premièrement, prendre conscience que lorsqu'on chute, on ne sent pas la force de gravité ; deuxièmement, prendre conscience qu'on peut reproduire la gravité avec une accélération. C'est la célèbre expérience de l'ascenseur d'Einstein : dans un ascenseur spatial loin de tout corps céleste, et accélérant à un taux de 9,8 m/s^2, nous serions plaqués sur le plancher de l'ascenseur exactement comme si nous étions à la surface de la Terre. Par conséquent, nous ne pourrions faire la différence (localement) entre cette accélération ressentie et la gravité terrestre. C'est le fameux *principe d'équivalence* d'Einstein. Et en raisonnant dans l'ascenseur, il devient évident que tous les objets, quelles que soient leur constitution et leur masse, tombent de la même façon vers le plancher, incluant la lumière. Pour mieux comprendre cet argument et ses conséquences, voir ce schéma :

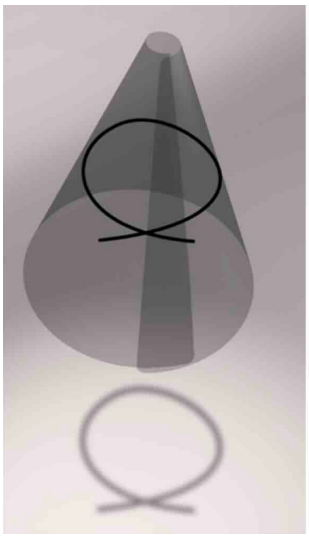


Dans les deux situations, Einstein ressent exactement le même poids apparent, comme l’indique le pèse-personne. Dans la cabine de droite, s’il lâche simultanément deux boules de masses différentes, initialement immobiles par rapport à lui, celles-ci poursuivent leur mouvement inertiel tandis que le plancher, accéléré vers le haut, vient à leur rencontre. Le plancher rejoint donc les deux boules au même instant : du point de vue d’Einstein, elles se rapprochent du plancher avec la même accélération, indépendamment de leur masse. Par conséquent, dans la situation de gauche, les deux boules vont aussi accélérer de la même façon et toucher le plancher en même temps. Voilà la magie du principe d'équivalence !

Pour rendre l'explication plus simple, on peut aussi imaginer que la fusée commence à accélérer au moment où Einstein lâche les deux boules. *Suite* →

(*Note pour les lecteurs et lectrices perspicaces* : la même chose serait vraie pour la lumière. Si un rayon lumineux était tiré horizontalement à la hauteur de départ des deux boules : dans la situation de droite, le plancher le rejoindrait en même temps que les deux boules. Par conséquent, dans la situation de gauche (en imaginant cette fois que le champ de gravité est uniforme vers le bas), la lumière serait déviée vers le bas au même rythme que la chute des deux boules et elle toucherait le plancher en même temps que les deux boules.)

• **Cône, ombre et géodésiques :** L'explication profonde de la relativité générale est que les planètes suivent des “lignes droites” dans l'espace courbe déformé par le Soleil – et que cela conduit à des orbites circulaires. Comment est-ce possible ? Voici une nouvelle métaphore. On trace une droite sur une feuille transparente. On courbe la feuille pour former un cône. Puis on l'éclaire par le dessus. L'ombre est alors une trajectoire courbe. Pour des êtres plats vivant dans le monde des ombres (possédant un cerveau ne permettant de percevoir que deux dimensions), il est impossible de visualiser cette déformation de l'espace dans la 3e dimension.[1]



Voir l'animation de 20 secondes :
https://youtu.be/GHW6GqA-jzE

• **Ondes gravitationnelles.** Si le soleil était déplacé dans l'espace, la nouvelle déformation de l'espace-temps autour de lui se propagerait à la vitesse de la lumière. De façon similaire, lorsque deux trous noirs sont en rotation l'un autour de l'autre, les déformations de l'espace sont dynamiques et se propagent à la vitesse de la lumière. Voir une mini-animation ici :

https://youtu.be/H_-nwJRo1zM

[1] En réalité, la situation est plus complexe parce c'est l'espace-temps, et non seulement l'espace, qui est déformé par la présence de matière. De plus, à strictement parler, on n'a pas besoin d'introduire de dimensions supplémentaires pour représenter ces déformations : c'est un aspect extrêmement abstrait de la relativité générale de réussir à décrire les courbures de façon intrinsèque.

Références

Un livre très visuel :

• Stéphane Durand, “Comprendre Einstein en animant soi-même l'espace-temps”, 3e édition, Belin/Pour la Science, Paris, 2014.
https://www.amazon.fr/gp/product/2701192846/ref=dbs_a_def_rwt_bibl_vppi_i0

Vidéos de S. Durand :

• L'espace-temps :

https://youtu.be/A9anmvxw3cA?si=KbWlE0Mvqem51lNO

• La gravité comme déformation de l'espace-temps :

https://youtu.be/g3X-Y_-uZas?si=YWtmr74y7DIZ1_4O

• Vidéos sur l'espace-temps (plus anciennes mais plus complètes) qui expliquent plus rigoureusement les deux effets relativistes que sont la dilatation du temps et la contraction des longueurs. Les rotations dans l'espace espace-temps sont expliquées en détail dans la vidéo no 3 :

1. La ralentissement du temps et la contraction des longueurs

https://youtu.be/7Oz1jXfBylo

2. Le temps comme 4e dimension et le concept d'espace-temps

https://youtu.be/mL1H-Psxf3U

3. L'explication des effets relativistes à l'aide de l'espace-temps

https://youtu.be/iES6NByoddo

4. Pourquoi les effets sont-ils inversés dans nos animations ?

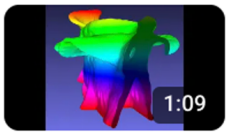
https://youtu.be/KaTWw7a6TyQ

Le trou noir comme une rivière :

Une explication technique de l'idée de trou noir comme une rivière, mais jamais présentée comme je le fais, c'est-à-dire comme courant d'eau tombant dans un puits circulaire.

• The river model of black holes, Andrew J. S. Hamilton et Jason P. Lisle, Am. J. Phys. 76, 519–532 (2008).

Les 4 mini-vidéo du chapitre



Complément au livre - 1. L'espace-temps de la danseuse

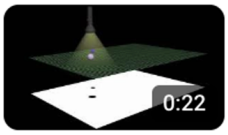
Ajouter une description

Complément au livre - 2. Le trou noir

Ajouter une description

Complément au livre - 3. La gravitation comme déformation de l'espace-temps

Ajouter une description



Complément au livre - 4. La métaphore de l'ombre

Ajouter une description

Vidéo 1 : https://youtu.be/MXcOGPsv_5o

Vidéo 2 : https://youtu.be/qFSTJWIiHE0

Vidéo 3 : https://youtu.be/kDpykS53H2E

Vidéo 4 : https://youtu.be/NQkjOmt_glY