



L'enseignement de la gravité einsteinienne : étude et réflexions

Mémoire

Shachar Boubilil

Maîtrise en didactique - avec mémoire
Maître ès arts (M.A.)

Québec, Canada

L'enseignement de la gravité einsteinienne : étude et réflexions

Mémoire

Shachar Boubilil

Sous la direction de :
Chantal Pouliot, directrice de recherche

Département d'études sur l'enseignement et l'apprentissage
Faculté des sciences de l'éducation

Québec, Canada

© Shachar Boubilil, 2019

Résumé

Depuis quelques années, le projet d'intégrer la physique einsteinienne dans le cursus scolaire soulève de l'intérêt grandissant dans la communauté des chercheurs en éducation en physique. D'après plusieurs chercheurs, pour mieux comprendre les sciences et les technologies d'aujourd'hui, les élèves ont besoin de connaissances de la physique moderne (Henriksen et al., 2014; Kaur, Blair, Moschilla, Stannard et Zadnik, 2017a). Pour Kaur et al. (2017), la visée éducative principale de l'enseignement des sciences est de faire apprendre aux élèves notre meilleure compréhension de l'univers afin de former les citoyens de demain (Kaur, Blair, Burman, et al., 2017).

Puisque le concept de la gravité einsteinienne est absent du curriculum scolaire québécois, cette recherche vise à établir un portrait des recherches menées depuis les dernières années au sujet de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique einsteinienne aux niveaux primaire et secondaire. Afin de répondre à cet objectif, la recherche utilise une approche provenant de la méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988a). Cette méthode a permis d'établir une liste des éléments à étudier. À partir de la recension des écrits et des arguments mobilisés par les tenants de l'enseignement de la physique einsteinienne, la recherche met en exergue les principaux enjeux de l'enseignement de la gravité einsteinienne et tente de comprendre et d'expliquer les avantages de son enseignement à l'école primaire et secondaire, exprimés par des chercheurs dans ce domaine.

Les résultats de cette étude permettent d'avoir une image sur la situation actuelle de l'enseignement de la gravité einsteinienne. Ils sont regroupés et présentés selon trois thèmes: étude épistémologique du concept et de l'histoire de son développement; implications du concept de la gravité einsteinienne sur le développement des technologies et de la physique moderne, sur la compréhension de l'univers et sur le développement de la pensée scientifique; résultats de l'étude des recherches menées sur l'enseignement du concept de la gravité.

Ce mémoire me permet de préparer une base théorique pour réaliser, dans mon projet doctoral, les trois autres étapes proposées par la méthodologie d'ingénierie didactique, soit l'élaboration, la réalisation et l'évaluation d'un dispositif d'enseignement du concept de gravité einsteinienne au 2e cycle du secondaire.

Mots clés : physique einsteinienne, enseignement de la gravité einsteinienne, approches et méthodes d'enseignement de la physique, développement de la pensée scientifique

Tables des matières

Résumé -----	ii
Tables des matières -----	iii
Liste des figures-----	vi
Liste des tableaux -----	vii
Remerciements-----	viii
Avant-propos-----	ix
Introduction -----	1
1. Problématique -----	3
1.1 Rôle de la gravité einsteinienne -----	3
1.2 État actuel de l'enseignement de la gravité einsteinienne -----	4
1.3 Objet de recherche -----	5
2. Méthodologie-----	7
2.1 Ingénierie didactique-----	7
2.2 Analyses préalables -----	7
2.2.1 Concept de la gravité einsteinienne-----	9
2.2.2 Implications des théories einsteiniennes -----	9
2.2.3 Étude des recherches menées sur l'enseignement de la gravité einsteinienne -----	9
3. Cadre conceptuel : la gravité -----	11
3.1 Une brève histoire du concept de gravité : de Galilée à Einstein -----	12
3.1.1 Quelques remarques -----	15
3.2 Physique einsteinienne -----	16
3.2.1 Relativité restreinte : les principes de base -----	18
3.2.1.1 Le mouvement inertiel et accéléré-----	19
3.2.1.2 Le mouvement absolu et le mouvement relatif -----	19
3.2.1.3 Les principes et postulats de la relativité restreinte -----	20
3.2.1.4 Le temps et les horloges lumineuses -----	20
3.2.1.5 La contraction des objets -----	22
3.2.1.6 La masse, la vitesse de la lumière, l'énergie et l'espace-----	23
3.2.1.7 L'espace-temps et les cônes de lumière -----	24
3.2.2 Relativité générale -----	26
3.2.2.1 La masse, l'accélération et la gravité-----	28
3.2.2.2 La géométrie de l'espace -----	29
3.2.2.3 La géométrie euclidienne -----	30
3.2.2.4 La géométrie courbe-----	30
3.2.2.5 Le tenseur -----	33
3.2.2.6 Le tenseur d'énergie impulsion -----	34
3.3 Les preuves expérimentales et les effets de la relativité générale -----	36
3.3.3.1 L'orbite de Mercure -----	36

3.3.3.2 La courbure de la lumière-----	37
3.3.3.3 Les lentilles gravitationnelles -----	38
3.3.3.4 Le géopositionnement par satellite -----	39
3.3.3.6 La constante cosmologique et le Big Bang-----	39
3.3.3.7 Les trous noirs-----	41
3.2.3.8 Les ondes gravitationnelles-----	42
3.4 Synthèse sur le concept-----	43
4. Implications des théories einsteiniennes -----	45
4.1 Avancés technologiques-----	45
4.2 Système cohérent des connaissances physiques -----	48
4.3 Théories d'Einstein et le développement de la pensée scientifique -----	51
4.3.1 La connaissance et le développement de la pensée scientifique -----	51
4.3.2 Le rôle de l'imagination dans le développement des idées scientifiques -----	54
4.3.3 Quelques réflexions sur les approches de l'enseignement-----	56
5. L'enseignement de la gravité einsteinienne -----	59
5.1 La Norvège-----	60
5.1.1 Objectifs visés -----	61
5.1.2 Effets sur les enseignants-----	62
5.1.3 Effets sur les élèves -----	62
5.2 L'Australie -----	63
5.2.1 Rapport aux concepts einsteiniens des jeunes -----	64
5.2.2 Rapport aux concepts einsteiniens des adolescents-----	66
5.2.3 Conclusions et suite-----	67
5.3 L'Allemagne -----	67
5.4 La Corée du Sud-----	70
5.4.1 Besoins des enseignants pour enseigner les concepts einsteiniens -----	71
5.4.2 Réflexions sur les idées relativistes dans les rapports de recherche-----	71
5.5 Sommaire-----	73
5.5.1 Synthèse des concepts étudiés -----	74
5.5.2 Modèle « Rubber sheet analogy » (RSA) -----	75
5.5.3 Changement de paradigme -----	79
Conclusion -----	82
Idées principales -----	83
Limites de cette recherche -----	85
Perspectives -----	86
Bibliographie -----	87
Annexes -----	99
Annexe 1. Affiche présentée au « General relativity as a challenge for physics education » (2019)-----	100
Annexe 2. Extrait du programme de primaire (MELS, 2009) -----	101

Annexe 3. Extrait du programme de secondaire (MELS, 2011) -----	102
Annexe 4. Extrait du programme de secondaire 5 (MELS, 2011) -----	104
Annexe 5. Schéma de la méthode de Gim (2016)-----	105
Annexe 6. Univers : science et technologie (p. 152) -----	106
Annexe 7. Quantum : physique (p. 327) -----	107

Liste des figures

Figure 1. Horloge de lumière, à partir de Norton (2007).....	21
Figure 2. Horloge de lumière en mouvement, à partir de Norton (2007)	21
Figure 3. Cône de lumière de Minkowski, à partir de Norton (2007).....	25
Figure 4. Chute des corps et la courbure de la lumière dans un ascenseur (fusée).....	27
Figure 5. Lignes parallèles dans le plan.....	31
Figure 6. Lignes parallèles dans un espace euclidien représentées sur des figures courbes.....	31
Figure 7. Lignes parallèles sur la sphère (Norton, 2007).....	32
Figure 8. Lignes parallèles sur une surface paraboloides hyperbolique.....	32
Figure 9. Lignes parallèles sur la sphère (convergentes).....	32
Figure 10. Distance euclidienne (théorème de Pythagore)	34
Figure 11. Tenseur d'énergie impulsion d'Einstein.....	35
Figure 12. Équations d'Einstein	35
Figure 13. Périhélie de Mercure.....	36
Figure 14. Image originale de l'éclipse tirée de Dyson, Eddington et Davidson (1919).....	37
Figure 15. Lentille gravitationnelle du LRG 3-757	38
Figure 16. Équations d'Einstein de la relativité générale et la constante cosmologique.....	40
Figure 17. Le trou noir Cygnus X-1 (Image de la NASA)	42
Figure 18. Schéma conceptuel de la gravité einsteinienne	50
Figure 19. Résultats et tableau retiré de Pitts et al. (2014)	65
Figure 20. Blocs modélisant la géométrie spatiale près d'un trou noir (Zahn et Kraus, 2014).....	68
Figure 21. Modèles de visualisation de la distorsion quadripolaire des ondes gravitationnelles (laboratoire sur la physique relativiste à l'Université de Hildesheim, Allemagne)(Kraus et Zahn, 2016).	69
Figure 22. Modèle RSA	76
Figure 23. Comparaison entre la compréhension de l'accélération gravitationnelle locale selon les approches de Newton (n = 21) et d'Einstein (n = 102) (Baldy, 2007).....	77

Liste des tableaux

Tableau 1. Exemple des propriétés des objets mathématiques dans la géométrie euclidienne	31
Tableau 2. Tableau comparatif des idées d'Einstein et leur interprétation par les chercheurs Kim et Lee (2018).....	72
Tableau 3. Tableau comparatif (liste de concepts de la physique einsteinienne)	74
Tableau 4. Tableau des forces et faiblesses du « rubber sheet analogy » (Kersting et Steier, 2017). .	78
Tableau 5. Comparaison des concepts-clés selon deux points de vue : Newton et Einstein (Blair, 2019)	79

Remerciements

J'aimerais remercier les personnes qui m'ont inspiré, encouragé et soutenu tout au long de ce mémoire.

Tout d'abord, je voudrais remercier ma directrice de recherche, professeure en didactique des sciences, Chantal Pouliot, de m'avoir accepté comme étudiant. Je suis très reconnaissant et j'aimerais la remercier pour avoir fait preuve d'une grande ouverture d'esprit, pour son soutien et pour sa disponibilité. Ses conseils et de nombreux commentaires m'ont permis d'améliorer considérablement mon mémoire.

Je remercie Richard Gagnon d'avoir pris le temps de me rencontrer. Ses commentaires m'ont permis d'approfondir ma réflexion au sujet de la structure du texte.

J'aimerais aussi remercier Sylvie Barma d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation.

Je voudrai aussi remercier le Centre de recherche et d'intervention sur la réussite scolaire (CRIRES) qui m'a attribué des fonds pour participer à un congrès en Allemagne.

Je tiens aussi à remercier les collègues et les professeurs de l'université Laval que j'ai rencontrés pour leur écoute et nos échanges intellectuels.

Enfin, je remercie mes parents qui m'ont encouragé tout au long de mes études.

Avant-propos

Ce mémoire a débuté par une recherche sur l'enseignement du concept de gravité au niveau secondaire. Il s'est rapidement transformé en une étude de l'enseignement de la théorie de la gravité d'Einstein dont la théorie de la relativité générale en est au cœur. Il est devenu évident qu'aujourd'hui il est impossible de comprendre le concept de gravité et plusieurs autres concepts de la physique moderne sans se référer aux concepts développés par Einstein. J'ai donc consacré ces deux dernières années à l'étude de la théorie de la gravité d'Einstein, qui n'est pas introduite dans nos écoles, à son rôle dans le développement de la physique moderne et enfin à la pertinence de son enseignement à l'école dans le cadre de l'enseignement de la physique. Ce détour, pour moi, était inévitable.

Pendant la première année, je me suis demandé si j'allais réussir à terminer ce mémoire. Mais, au fil du temps, j'ai réalisé que je n'étais pas totalement seul dans cette entreprise ambitieuse et qu'il y avait en fait d'autres chercheurs à travers le monde (pas si nombreux) qui s'intéressaient à l'enseignement des théories d'Einstein dans le milieu scolaire. Ces physiciens, chercheurs et éducateurs partageaient la vision selon laquelle l'éducation aux sciences doit contribuer à une meilleure compréhension de l'univers par l'élève et à la motivation des jeunes d'apprendre des concepts physiques actuels. De plus, la richesse conceptuelle des théories einsteiniennes, remplie d'analogies, permet aussi d'introduire l'élève à la beauté et à l'harmonie (ou chaos) de l'univers.

En 2018, à la fin de ma première année d'étude à la maîtrise, j'ai eu l'occasion de participer à la première école d'été *EinsteinPlus* au Québec, organisée par le « Perimeter Institute for Theoretical Physics ». Il s'agissait d'un cercle scientifique d'une semaine consacré à l'étude de la physique moderne. J'ai été inspiré par ce séminaire qui visait à promouvoir et à soutenir l'enseignement des sciences à travers plusieurs thèmes de la physique moderne tels que la physique quantique, la cosmologie et l'astronomie. C'était une occasion unique de collaborer avec des enseignants et chercheurs et de me familiariser avec de nouvelles manières de voir l'enseignement scientifique à l'école secondaire. Quelques mois plus tard, j'ai participé à une conférence internationale d'une semaine portant sur l'enseignement de la relativité générale « General relativity as a challenge for physics education » qui s'est tenue au Physikzentrum, à Bad Honnef en Allemagne. Cinquante physiciens et éducateurs de 12 pays, dont la majorité faisait partie de la bibliographie de mon mémoire, se sont réunis pour réfléchir et discuter sur la question suivante : Comment enseignons-nous les théories d'Einstein à l'école ?

Cette semaine intensive, constituée de présentations et d'échanges scientifiques, m'a permis de mieux comprendre la pertinence de l'enseignement des théories einsteiniennes à l'école et de constater que les questions que je pose dans mon mémoire intéressent aussi d'autres chercheurs. Le dernier jour du congrès, j'ai reçu le prix de la meilleure présentation par affiche (voir annexe 1), ce qui a réénergisé mon désir de terminer la rédaction de ce mémoire.

Introduction

La théorie de la gravité d'Einstein, vue comme la théorie de l'univers, est à la base du développement de la physique moderne (Smolin, 2019). Par l'intermédiaire de ses travaux, Einstein a remis en question des milliers d'années de connaissances scientifiques sur l'univers physique, y compris les théories de Newton et de Maxwell. Les travaux d'Einstein ont transformé notre conception de l'univers, mais aussi celle du monde dans lequel nous vivons. Ils ont aussi permis des développements technologiques tels que les panneaux solaires, le système mondial de positionnement (GPS), les détecteurs de trous noirs, les lasers et les appareils photos numériques.

Cela dit, la plupart des concepts de la physique einsteinienne sont rarement intégrés dans les programmes scolaires à travers le monde entier (Kaur et al., 2017a). Ils sont aussi absents du curriculum scolaire québécois.

Cette recherche vise à établir un portrait des recherches menées depuis les dernières années au sujet de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique einsteinienne aux niveaux primaire et secondaire. À partir d'une recension des écrits produits par des chercheurs dans ce domaine et des arguments mobilisés par les tenants de l'enseignement de la physique einsteinienne, je mets en exergue les principaux enjeux de l'enseignement de la gravité einsteinienne¹ et je tente de comprendre et d'expliquer les avantages de son enseignement à l'école primaire et secondaire.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres.

Dans le chapitre 1, *Problématique*, je présente les points de vue des chercheurs travaillant dans le domaine de l'enseignement de la gravité einsteinienne. Je décris leurs arguments quant au rôle que joue la gravité einsteinienne dans notre compréhension de l'univers, ainsi que dans le développement des technologies et de la physique moderne. Je termine ce chapitre par la présentation de mon objet de recherche et des questions principales s'y rattachant.

Dans le chapitre 2, *Méthodologie de recherche*, je décris la démarche entreprise dans cette recherche et la méthodologie employée, l'ingénierie didactique (Artigue, 1988). J'explique les étapes de cette méthodologie qui me permettent de répondre aux questions posées dans la recherche. Ces étapes font l'objet des chapitres 3, 4 et 5.

¹ L'expression « gravité einsteinienne » est utilisée dans ce mémoire au même titre que « théorie de la gravité », « gravitation universelle » ou « théorie de la relativité générale ».

Le chapitre 3, intitulé *Gravité einsteinienne*, met en évidence des travaux portant sur l'histoire du développement du concept de gravité. Il permet de contraster les visions newtonienne et einsteinienne de la gravité. Dans ce chapitre, je présente aussi les concepts-clés qui font partie de la gravité einsteinienne. Parce que ce cadre théorique permet de prendre connaissance des éléments constitutifs de la théorie de la gravité et de ses principes fondamentaux, il servira de base pour comprendre les objectifs et les résultats des recherches menées sur son enseignement, présentés dans le chapitre 5.

Dans le chapitre 4, je présente les implications des théories einsteiniennes sur notre compréhension de l'univers et des phénomènes physiques qui en font partie, sur le développement de la pensée scientifique ainsi que sur le développement de la physique moderne et des technologies d'aujourd'hui.

Dans le chapitre 5, *Enseignement de la gravité einsteinienne*, je trace un portrait des recherches contemporaines menées dans quatre pays (Norvège, Australie, Allemagne, et Corée du Sud) sur l'intégration de l'enseignement de la gravité einsteinienne dans le milieu scolaire. Je décris les objectifs des recherches, les concepts concernés, les démarches et les modèles utilisés pour l'enseignement ainsi que les résultats obtenus.

Ce mémoire se termine par une conclusion dans laquelle, d'une part, je reprends des éléments à retenir de chacun des chapitres et, d'autre part, je soulève de nouvelles questions provenant de mes réflexions relativement à l'enseignement de la gravité einsteinienne. J'aborde aussi les limites de cette recherche et j'identifie des pistes éventuelles de recherche.

1. Problématique

Dans ce chapitre, je décris le rôle de la gravité einsteinienne dans notre compréhension de la gravité et dans le développement des technologies et de la physique moderne. Je présente ensuite l'état actuel de l'enseignement de la gravité einsteinienne au Québec et à l'international et ainsi que les points de vue étayés dans les recherches menées sur l'intégration de la gravité einsteinienne à l'école. Je termine ce chapitre par la présentation de l'objet de ma recherche et des questions principales qui en découlent.

1.1 Rôle de la gravité einsteinienne en physique et dans notre compréhension de l'univers

La gravité einsteinienne ne fait pas partie des savoirs essentiels du programme de formation de l'école québécoise. Le concept de gravité y est présenté selon le cadre newtonien comme l'une des quatre forces fondamentales qui provoque l'attraction des corps (MELS, 2009, 2011b, 2011a, voir les annexes 2, 3, 4). Or, la théorie de la relativité générale d'Einstein envisage la gravité non pas comme une force, mais en tant que résultat de la déformation de l'espace-temps par des objets massifs. La gravité est alors vue comme la manifestation de la géométrie de l'univers où les relations entre l'espace, le temps et la gravité sont fusionnées dans le cadre de quatre dimensions appelé *espace-temps*. Cette description de la gravité n'efface pas les principes de la physique newtonienne, présents dans le curriculum scolaire, mais elle permet de mieux les expliquer². Par ailleurs, plusieurs notions de la mécanique newtonienne échouent lorsqu'on étudie les objets à très haute vitesse (la relativité restreinte), très lourds comme les univers ou les trous noirs (la relativité générale), très grands (la cosmologie relativiste) et très petits (la théorie quantique) (Norton, 2007).

Les travaux d'Einstein ont transformé notre conception de l'univers. La gravité einsteinienne offre des réponses au questionnement sur la causalité des règles de la nature physique qui régissent le monde. Elle permet de mieux saisir les relations entre les concepts fondamentaux en physiques tels que la gravité, l'énergie, le temps, la masse, l'espace, les champs, la lumière et l'accélération. Cette théorie est reconnue par la communauté scientifique comme étant la seule théorie valide expliquant

² Newton n'a pas réussi à expliquer la nature de la gravité (voir la section 3.1). De plus, les principes de la gravité newtonienne ne sont applicables qu'à des systèmes animés de mouvement rectilignes et uniformes. Ils ne s'appliquent pas et ne permettent pas de décrire plusieurs notions présentes dans la théorie de la gravité d'Einstein telles que la courbure de la lumière, l'équivalence entre la masse gravitationnelle et inertielle, le cadre de référence accéléré, la dilatation temporelle, la courbure de la géométrie de l'espace, les trous noirs, les lentilles gravitationnelles, les ondes gravitationnelles, etc.

le concept de gravité (Barrau et Grain, 2011a; Blair, Henriksen et Ellen Hendry, 2016; Kersting et Steier, 2018; Smolin, 2006).

La relativité est aussi à la base du développement de la physique moderne, songeons à la théorie des cordes, la gravité quantique, la physique nucléaire, la cosmologie relativiste, la physique quantique et la physique de l'état solide (Smolin, 2019).

La physique einsteinienne a permis le développement de technologies telles que les appareils photo numériques, l'énergie nucléaire, l'industrie de la télécommunication, les lasers, les panneaux solaires, le GPS et les détecteurs de trous noirs (Isaacson, 2007; Stannard, 2015).

1.2 État actuel de l'enseignement de la gravité einsteinienne

Dans les dernières années, la Corée du Sud, l'Allemagne, la Norvège et l'Écosse ont intégré l'enseignement de la gravité einsteinienne dans le programme scolaire au secondaire (Pitts, 2017). En 2019, après 7 ans de recherches sur l'enseignement de la gravité einsteinienne, le projet *Einstein-First* (en Australie) a reçu son approbation du ministère de l'Éducation pour intégrer les concepts einsteiniens dans le curriculum scolaire et évaluer une progression des apprentissages de la physique moderne au primaire et au secondaire. Le projet Einstein-First est un projet collaboratif entre sept pays, comprenant les États-Unis, la Norvège, l'Allemagne, l'Écosse, la Corée du Sud et la Chine (Blair, 2019). Il existe aussi des programmes d'enrichissement (*science outreach programs*) tels que *Einstein-first project* au *Gravity Centre* en Australie et *EinsteinPlus* et *ISSYP*³ à l'Institut Périphère de physique théorique à Waterloo (Ontario, Canada) qui introduisent des enseignants et des élèves à différents concepts de la physique moderne, notamment à la gravité einsteinienne.

Une recension des écrits (Blair, 2012c; Blair et al., 2016; Kaur, Blair, Moschilla et al., 2017a; Kaur, Blair, Moschilla, Stannard et Zadnik, 2017c; Kersting, Henriksen, Bøe et Angell, 2018; Pitts, Venville, Blair et Zadnik, 2014) m'a permis de constater que dans les dernières années, l'enseignement de la gravité einsteinienne et son insertion dans les programmes éducatifs constituent une préoccupation croissante dans le champ de l'enseignement des sciences.

³ International summer school for young physicists (ISSYP).

S'inscrivant souvent contre les points de vues exprimés par des enseignants, des directions des écoles et des conseillers pédagogiques⁴ (Blair, 2012a; Kaur, Blair, Burman, et al., 2017), les chercheurs ont persisté en développant des modèles et des outils d'enseignement, ainsi qu'en élaborant des situations d'enseignement/apprentissage variées et attrayantes pour apprendre la physique moderne.

Les résultats de ces recherches montrent que de nombreux élèves apprécient les expériences vécues qui leur permettent de mieux comprendre les phénomènes scientifiques et de faire des liens avec le fonctionnement et le développement des technologies actuelles. D'après David Blair (2019), responsable du projet *Einstein-first* au *Gravity Centre* (Australie), la question qu'on doit se poser n'est pas « doit-on ou pas enseigner la physique d'Einstein ? », mais « comment doit-on le faire ? ».

Les recherches que j'ai examinées et sur lesquelles je reviens au cinquième chapitre, partagent la vision selon laquelle l'enseignement des sciences doit contribuer à une meilleure compréhension de l'univers par l'élève, plutôt qu'à l'apprentissage de concepts en vigueur au 18^e siècle. Plusieurs chercheurs indiquent que les concepts de la gravité einsteinienne peuvent être enseignés à tous les niveaux scolaires (moyennant des adaptations en fonctions du niveau de formation des élèves). Ils soutiennent, notamment, qu'il est préférable d'enseigner les concepts de la physique einsteinienne en amont de ceux de la physique newtonienne (Baldy, 2007; Blair, 2012c; Pitts et al., 2014) entre autres parce que cela permet aux élèves de développer la capacité de mieux comprendre des phénomènes naturels et des développements technologiques contemporains plus tôt dans leur vie.

1.3 Objet de recherche

Depuis quelques années, le projet d'intégrer la physique einsteinienne dans les programmes scolaires soulève un intérêt grandissant dans la communauté des chercheurs dans le domaine de l'enseignement de la physique. D'après plusieurs d'entre eux, afin de mieux comprendre les sciences et les technologies d'aujourd'hui, les élèves ont besoin de connaissances de la physique moderne (Henriksen et al., 2014; Kaur, Blair, Moschilla, et al., 2017a). Pour Kaur et al. (2017), la visée éducative principale de l'enseignement des sciences est de familiariser les élèves avec notre meilleure compréhension de l'univers (Kaur, Blair, Burman et al., 2017).

⁴ Ces points de vue sont d'ailleurs répandus. En voici des exemples : « On ne peut pas apprendre les concepts d'Einstein sans d'abord comprendre la physique newtonienne », « C'est trop difficile », « Les concepts d'Einstein ne sont pas pertinents dans la vie quotidienne », « Les enfants ne peuvent pas apprendre la physique à l'école primaire ».

Puisque le concept de la gravité einsteinienne est absent du curriculum scolaire québécois, j'ai voulu en savoir plus sur ce sujet par l'intermédiaire de ce projet de recherche qui vise à établir un portrait des recherches menées depuis les dernières années au sujet de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique einsteinienne aux niveaux primaire et secondaire. La question générale de recherche prend la forme suivante : quel est l'état des réflexions et des travaux de recherche sur l'enseignement et l'apprentissage de la physique einsteinienne et, plus particulièrement, de la gravité einsteinienne? De cette question générale émergent les deux questions spécifiques suivantes :

- Quelles sont les modalités, tenants et aboutissants et résultats des recherches menées sur l'enseignement de la physique einsteinienne?
- Quelle est la pertinence de l'enseignement de la gravité einsteinienne et de la physique einsteinienne selon les chercheurs qui s'intéressent à la question?

2. Méthodologie

Dans ce chapitre, je présente la méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988a). Dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, je m'en tiens à sa première phase, dite des analyses préalables. J'ai effectué ce choix méthodologique en raison de mon projet de recherche à long terme qui consistera, au doctorat, à élaborer, réaliser et évaluer un dispositif d'enseignement du concept de gravité einsteinienne pour le deuxième cycle du secondaire. En d'autres mots, ce mémoire me permet de préparer une base théorique pour réaliser, dans le cadre de mon projet doctoral, les trois autres étapes proposées par la méthodologie d'ingénierie didactique.

2.1 Ingénierie didactique

La méthodologie d'ingénierie didactique a été développée dans les recherches menées en didactique des mathématiques au début des années quatre-vingt. Le terme « ingénierie » provient de la comparaison du travail de chercheur, qui conçoit un projet d'enseignement, avec le travail de l'ingénieur (Artigue, 1988a, p. 283). En effet, pour réaliser un projet de recherche portant sur l'élaboration, la réalisation et l'analyse des séquences didactiques, le chercheur s'appuie sur les connaissances théoriques et méthodologiques de son domaine. Pour Brousseau (2013), l'appellation *ingénierie didactique* peut prendre différents sens : méthodologie de recherche, démarche méthodologique pour concevoir les dispositifs d'enseignement ou dispositifs d'enseignement comprenant un ensemble des situations pour l'acquisition de concepts particuliers.

À titre de méthodologie de recherche, l'ingénierie didactique peut être décrite comme une démarche constituée des quatre étapes suivantes, mises en ordre chronologique (Artigue, 1988a) :

- analyses préalables;
- conception et l'analyse *a priori* des situations didactiques;
- expérimentation;
- analyse *a posteriori* et l'évaluation.

En ce qui concerne ma recherche, c'est à titre de démarche méthodologique que l'ingénierie didactique est employée (en me concentrant, dans ce mémoire, sur l'étape des analyses préalables).

2.2 Analyses préalables

Selon Artigue (1988), l'étape des analyses préalables est importante, car elle permet de préparer une base théorique nécessaire dans l'élaboration des séquences d'enseignement d'un concept particulier. Cette auteure souligne que les objets d'analyse peuvent varier et dépendent des objectifs visés par la

recherche (Artigue, 1988, p. 288). À titre d'exemple, Artigue décrit quelques éléments sur lesquels portent les analyses en vue de la conception d'une ingénierie de l'enseignement d'un concept particulier tout en prenant en compte des objectifs spécifiques de la recherche (Ibidem, p. 287-288) :

- l'analyse épistémologique des contenus visés par l'enseignement;
- l'analyse de l'enseignement et de ses effets;
- l'analyse des conceptions des élèves, des difficultés et obstacles qui marquent leur évolution;
- l'analyse du champ de contraintes dans lequel se situe la réalisation didactique.

Cette liste d'éléments donne des indications permettant d'orienter la recherche des informations afin d'atteindre l'objectif de recherche (qui est, ici, d'établir un portrait des recherches menées au sujet de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique einsteinienne) et de répondre aux questions spécifiques de recherche. Pour la recherche des informations sur le sujet d'étude (enseignement de la gravité einsteinienne) et afin de structurer mon mémoire, j'ai déterminé les éléments suivants sur lesquels j'ai porté une attention particulière:

- l'étude épistémologique⁵ du concept de la gravité et de l'histoire de son développement;
- la description des implications du concept de la gravité einsteinienne sur le développement des technologies et de la physique moderne, sur la compréhension sociale et scientifique de l'univers ainsi que sur le développement de la pensée scientifique;
- l'étude synthétique des recherches menées sur l'enseignement du concept de la gravité et la description
 - des objectifs;
 - des programmes scolaires dans lesquels le concept de la gravité s'inscrit;
 - des concepts qui font partie de l'enseignement de la gravité einsteinienne;
 - des conceptions des élèves, de certains des difficultés et des obstacles qui marquent leur évolution;
 - des démarches et des outils utilisés pour l'enseignement;
 - des résultats obtenus.

Les résultats de ces études sont présentés dans les chapitres 3, 4 et 5. Cela dit, je décris très brièvement les buts visés par chacun de ces chapitres.

⁵ C'est-à-dire une description des théories d'Einstein, des concepts qui en font partie et de leur développement.

2.2.1 Concept de la gravité einsteinienne

Dans le chapitre 3, je mets en évidence des travaux portant sur l'histoire du développement du concept de gravité. En particulier, je m'attarde aux concepts-clés qui font partie de la gravité einsteinienne. Ce chapitre, que j'intitule *Cadre théorique : la gravité*, permet de prendre connaissance des éléments constitutifs de la théorie de la gravité et de ses principes fondamentaux. Il permettra de mieux comprendre les diverses implications des travaux d'Einstein, présentés dans le chapitre 4, ainsi que les résultats d'étude des recherches menées sur l'enseignement de la gravité einsteinienne, explicités dans le chapitre 5. Pour le lecteur moins spécialisé dans le domaine, les contenus présentés dans ce chapitre permettent d'avoir une idée de ce qu'on entend par gravité einsteinienne.

2.2.2 Implications des théories einsteiniennes

La chapitre 4 met en exergue diverses implications des théories einsteiniennes. Cela permet d'établir des liens entre différents concepts de la physique einsteinienne et les avancées dans le développement à la fois des hautes technologies et de la physique moderne. Cette description met aussi en évidence les influences des théories d'Einstein sur le développement du processus de la pensée scientifique. J'aborde également le rôle de l'enseignement de la gravité einsteinienne à l'école. Par exemple, il peut permettre de mieux saisir les relations entre les concepts fondamentaux en physiques tels que la gravité, l'énergie, le temps, la masse, l'espace, les champs, la lumière et l'accélération. Ces éléments participent à la construction d'un système cohérent des connaissances en physique et à une meilleure compréhension de l'univers. À partir de différentes descriptions des éléments constitutifs du concept de gravité, j'élabore une carte conceptuelle où la gravité est vue comme un concept charnière reliant les différents éléments de la relativité d'Einstein. La représentation en mode hiérarchique partant du concept principal (la gravité) vers les autres concepts de la relativité d'Einstein permet de mieux comprendre les concepts-clés provenant de deux théories (restreinte et générale) ainsi que les liens entre ces concepts avec la gravité.

2.2.3 Étude des recherches menées sur l'enseignement de la gravité einsteinienne

Une recension des recherches menées sur l'enseignement de la gravité einsteinienne dans le milieu scolaire dans quatre pays m'a permis d'identifier leurs objectifs, les concepts enseignés, les démarches et les modèles utilisés pour leur enseignement ainsi que les résultats obtenus. Cette recension fût aussi une occasion de colliger des informations sur les conceptions des élèves et ainsi de mieux comprendre les obstacles qu'ils rencontrent dans l'apprentissage des concepts étudiés. Je termine le chapitre 5 par un tableau comparatif dans lequel on retrouve les concepts étudiés, le pays et

l'âge des élèves concernés. Cette présentation synthétique permet d'avoir un portrait de la situation actuelle de l'enseignement de la gravité einsteinienne à l'école à travers le monde.

3. Cadre conceptuel : la gravité

La gravité est un concept fondamental en physique. Les questions telles que « Pourquoi les objets tombent-ils sur la Terre ? Pourquoi sommes-nous collés à la Terre ? Pourquoi ne sent-on pas notre poids lors d'une chute libre ? » sont en lien avec ce concept. À cet égard, tout le monde fait l'expérience de la force de la gravité à chaque instant. Donner une réponse courte à la question « Qu'est-ce que la gravité ? » est évidemment difficile, voire impossible. Ceux qui tente une explication synthétique, finissent généralement par dire que la gravité est une « courbure de l'espace-temps » ou « une courbure de la géométrie de l'espace » (Einstein et Solovine, 1958). Une version plus longue de cette réponse consiste à décrire la gravité comme un système dans lequel l'espace-temps « dit » à la matière comment se déplacer et dans lequel la matière dit à l'espace-temps comment se courber⁶ (Misner, Thorne et Wheeler, 1973). Ces réponses n'ont de sens que pour ceux qui ont étudié les théories d'Einstein. En effet, depuis des centaines d'années, nous privilégions une vision newtonienne de la gravité, c'est-à-dire comme une force qui provoque l'attraction des corps. Dans cet ordre d'idées, c'est la gravité qui nous retient au sol. La théorie de la gravité d'Einstein présente la gravité non pas comme une force, mais en tant que partie fondamentale de la structure de l'univers, dans un espace-temps qui se courbe, se tord et s'ondule au fur et à mesure que les objets bougent, tournent et se déplacent (Blair et McNamara, 1997).

Les travaux d'Einstein ont remis en question des milliers d'années de connaissances scientifiques sur l'univers. On parle, dans la littérature, d'un changement de paradigme (Kuhn, 1970). Il s'agit d'une prise de distance avec l'idée de Newton sur la gravité et d'une vision différente, voire révolutionnaire (Barrau et Grain, 2011a), de l'univers. Einstein souligne que ce rejet de certaines conceptions sur l'espace, le temps et le mouvement, considérées fondamentales jusqu'à ce moment-là, n'était pas un « ... acte arbitraire, mais tout simplement un acte nécessité par des faits observés » (Einstein et Solovine, 1958, p. 169).

La complexité de ce sujet vient du fait que pour comprendre la théorie de la gravité einsteinienne, il faut comprendre la théorie de la relativité générale⁷ qui, à son tour, prend ses racines dans les principes développés dans la théorie de la relativité restreinte⁸. La définition de la gravité comme

⁶ Traduction libre de l'anglais : « spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve » (Misner et al., 1973).

⁷ C'est celle qu'on appelle la gravité einsteinienne.

⁸ On l'appelle souvent la théorie de la relativité ou la théorie de la relativité spéciale. Selon cette théorie, il n'y a pas de cadre de référence fixe dans l'univers, tout bouge par rapport à tout le reste.

une déformation de l'espace-temps implique de préciser ce que signifient, depuis Einstein, les expressions espace-temps, géométrie de l'espace, force, masse, énergie, déformation et ondulation.

Dans ce chapitre, je m'efforce d'expliquer les concepts-clés qui font partie de la gravité einsteinienne. On trouvera deux sections faisant état de travaux au sujet de la gravité einsteinienne. Dans la section 3.1, je décris le développement historique du concept de la gravité. La section 3.2 est consacrée à la description d'éléments constitutifs de la théorie de la gravité et de principes développés par les théories de la relativité restreinte et générale. Dans les deux sections, je présente brièvement des informations concernant les débats scientifiques relatifs aux idées d'Einstein et certains de leurs impacts sur le développement de la physique moderne.

Je souhaite que ce chapitre permette de prendre connaissance des théories d'Einstein et de leurs principes fondamentaux. Il permettra de mieux comprendre à la fois leurs implications (voir le chapitre 4) et la teneur des recherches menées sur leur enseignement de la gravité einsteinienne (voir le chapitre 5).

Il me faut préciser que le texte présenté dans ce chapitre (ainsi que dans les chapitres suivants) correspond à mes réflexions et interprétations influencées par les différentes lectures effectuées dans le cadre de ce mémoire.

3.1 Une brève histoire du concept de gravité : de Galilée à Einstein

En m'appuyant sur les écrits de physiciens, d'épistémologues et de philosophes (Bachelard, 1934; Barrau et Grain, 2011b; Blair, 2012a; Blair et McNamara, 1997; Einstein et Infeld, 1938; Givry, 2003; Koyré, 1966; Misner et al., 1973; Norton, 2007; Paty, 2004; Spagnou, 2017b, 2017a), je propose, dans cette section, un regard sur le développement du concept de la gravité en ne soulignant que des moments forts qui l'ont marquée. On verra comment l'observation du même phénomène physique, la chute libre des objets, et la réflexion sur la nature de ce phénomène ont amené Aristote, Galilée, Newton et Einstein à établir des lois distinctes.

Les observations des expérimentations sur la chute des objets ont amené **Aristote** (384 av. J.-C. - 322 av. J.-C.), le penseur grec, à formuler deux lois de la gravité, l'une décrivant le mouvement d'un corps donné dans des milieux différents et l'autre décrivant le mouvement de différents corps dans un milieu donné (Spagnou, 2017a). Selon ces lois,

- le repos est considéré comme l'état naturel de tous les objets;
- tout mouvement a une cause;
- la vitesse d'un corps en chute libre est proportionnelle à son poids;

- une force constante donne à un objet sa vitesse constante.

Au début du 17^e siècle, **Galilée** (Galileo Galilei) (1564-1642), un scientifique italien démontre que les deux lois d'Aristote sur la gravité, tenues pour vraies depuis 2000 ans, sont fausses (Spagnou, 2017b). Pour lui, Aristote avait suivi son intuition plutôt que d'effectuer des analyses approfondies d'observations (Spagnou, 2017b). Selon la loi universelle de la chute des corps de Galilée, la gravité agit sur tous les objets de la même façon. De plus, en absence de friction :

- deux corps de masses différentes toucheront le sol en même temps s'ils sont lâchés de la même hauteur sans vitesse initiale (les corps subiront alors une accélération constante);
- la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps écoulé.

Galilée conclut qu'en chute libre et en absence de friction, tous les corps tombent à la même vitesse, quelle que soit leur masse.

En étudiant le même phénomène (la chute des corps) et en s'appuyant sur les lois de Kepler⁹, Isaac Newton (1642-1727), un scientifique anglais, avance l'idée selon laquelle deux objets s'attirent mutuellement¹⁰ (attraction gravitationnelle). Dans cet ordre d'idées, il développe une théorie mathématique qui permet de décrire la gravitation universelle à partir d'une force d'attraction entre deux corps (Givry, 2003). Selon Newton, la force d'attraction tire les objets au sol. Afin de comprendre cet énoncé, qui considère la gravité comme une force invisible (les interactions à distance), on peut examiner deux cas présentés par Newton : un objet au repos et un objet en chute libre. Selon la première loi de mouvement de Newton, un objet au repos restera au repos à moins qu'une force n'agisse sur lui dans un espace étant absolu (on peut naturellement sentir une « force » tirer vers le bas quand on tient un objet lourd). Deuxièmement, on voit l'effet de la « force » quand on lâche une balle : elle se met en mouvement en accélérant vers le bas. L'analyse de ces deux cas a permis à Newton de parvenir à quantifier mathématiquement la force de la gravité : la force d'attraction entre deux corps dépend de leur masse et de la distance entre eux $F = G \left(\frac{m_1 m_2}{r^2} \right)$.

Pendant presque 300 ans, les théories de Newton (ses lois de la gravité universelle et du mouvement) ont dominé la pensée scientifique sur ce sujet (Blair, 2012b; Gamow, 1962; Misner et al., 1973; Smolin, 2006). Alexandre Koyré souligne que la théorie newtonienne était considérée comme « *la véritable image de l'univers et l'incarnation de la vérité scientifique* » (Koyré, 1966).

⁹ Par exemple, les observations astronomiques du mouvement de Saturne, de Venus, de Mars et de Jupiter par Tycho Brahe (1546-1601) ont permis à Kepler (1571-1630) d'établir des lois sur les trajectoires de ces objets célestes (Givry, 2003).

¹⁰ L'élaboration de cette loi est associée aux années 1665-1666, mais sa formulation apparaît seulement en 1687, lors de la publication des Principes mathématiques de la philosophie naturelle, les *Principia* (Paty, 2004).

Cependant, écrit cet auteur, chez Newton, les lois décrites n'étaient pas présentées comme « une vérité scientifique ». Newton n'a jamais admis l'attraction des masses comme une force physique et a déclaré, à maintes reprises, que c'était seulement une relation mathématique qui permet de la quantifier et qu'il est impossible pour lui de savoir si c'est la matière ou un Dieu qui agit à distance (Koyré, 1966).

C'est seulement au début du vingtième siècle qu'Albert Einstein (1879–1955), un scientifique allemand, propose que la gravité ne doit pas être perçue comme une force, mais plutôt comme une interaction engendrée par la déformation de la géométrie de l'espace-temps par les objets massifs qui s'y trouvent (*relativité générale*) (voir la section 3.2.2). Cette théorie, qui s'appelle aussi la *théorie de la gravité*, s'appuie sur les principes formulés par Einstein en 1905 dans le contexte de l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte (voir la section 3.2.1). Par exemple, en s'appuyant sur sa description de l'espace et du temps comme des grandeurs physiques intrinsèquement liées et relatives à l'état de mouvement (uniforme), sur une idée que le temps absolu n'existe pas, que l'espace-temps est incurvé et qu'il existe une relation entre la masse et l'énergie ($E = mc^2$), Einstein revoie le phénomène de la gravitation et décrit les sources du champ de gravitation en les liant à l'état de la matière, à la masse et à l'énergie (Paty, 2004). Einstein écrit « la théorie de la relativité est née de la nécessité, des contradictions graves et profondes que présentait l'ancienne théorie et auxquelles il ne paraissait pas y avoir d'issue. La force de la nouvelle théorie réside dans la logique et la simplicité avec lesquelles elle résout toutes ces difficultés, en se servant seulement d'un petit nombre de suppositions convaincantes » (Einstein et Infeld, 1938, p. 182).

Dès lors, la gravité est vue comme une manifestation de la géométrie de l'univers où l'espace, le temps et la gravité sont fusionnés dans le cadre de quatre dimensions appelé l'espace-temps. Voici, par exemple, comment Einstein explique les différences dans la description des concepts de masse et d'énergie :

La physique classique a introduit deux substances : la matière et l'énergie. La première était douée de poids, tandis que cette dernière en était privée. Dans la physique classique nous avons deux lois de conservation : une pour la matière et une pour l'énergie. Mais la physique moderne ne maintient pas cette conception de deux substances et de deux lois de conservation. Conformément à la théorie de la relativité, il n'y a pas de distinction essentielle entre la masse et l'énergie. L'énergie a une masse et la masse représente de l'énergie. Au lieu de deux lois de conservation, nous n'avons qu'une seule, celle de la masse-énergie. Cette nouvelle conception s'est révélée très féconde dans le développement ultérieur de la physique (Einstein et Infeld, 1938, p. 186).

Pour Bachelard (1934), le modèle de Newton représente « la première approximation de notre connaissance mécanique des phénomènes de la gravitation » alors que la relativité einsteinienne

« ...vient déformer des concepts primordiaux que l'on croyait à jamais immobiles ». Il écrit que les théories d'Einstein proposent « une connaissance plus poussée, plus fine, plus complète ...» (p. 9). En effet, l'application des théories d'Einstein aux objets étudiés par la physique moderne tels que les objets très rapides (les particules), très lourds (planètes, soleil, galaxies), très grands (trous noirs, super nova) ou très petits (les particules) donnent des résultats qui diffèrent beaucoup de ceux qui s'obtiennent à l'aide des lois de Newton¹¹ (Barrau et Grain, 2011a; Blair, 2012b; Norton, 2007).

À partir de cette description de l'histoire du développement du concept de la gravité, on peut voir que les lois formulées par ces quatre personnes (Aristote, Galilée, Newton et Einstein) reflètent la réalité de leurs époques. Cependant, avec le développement des sciences physiques, des mathématiques et de la philosophie des sciences, on peut constater que les idées de ces scientifiques sur la gravité s'inscrivent dans une certaine continuité. En cherchant à mieux comprendre les phénomènes naturels, ces penseurs mettent en question les théories existantes et créent de nouveaux modèles et de nouvelles lois, soit en se basant sur les théories existantes, soit en les rejetant.

La théorie de la gravité einsteinienne n'est pas une théorie complète. Ainsi que le mentionnent Blair (2012a) et Smolin (2006, 2019), il reste encore des phénomènes qu'Einstein et les chercheurs d'aujourd'hui ne peuvent expliquer. À titre d'exemple, mentionnons que de nombreux chercheurs dans le domaine de la physique moderne travaillent sur l'élaboration d'une théorie unificatrice des phénomènes de nature macro et micro de la gravité (Smolin, 2006). Cela dit, la gravité einsteinienne est présentement la seule théorie qui est utilisée pour comprendre la gravité dans notre univers (Barrau et Grain, 2011; Blair, Henriksen et Ellen Hendry, 2016).

3.1.1 Quelques remarques

Einstein et Newton, ont tenté d'expliquer la gravité comme une théorie de l'univers qui reflète les aspects de la théorie de la Création¹² et ont évoqué la présence d'une « l'intelligence supérieure » derrière la Création et la nature.

De nombreux écrits de Newton sont archivés et ouverts au public via le site Web de l'Université de Jérusalem. Newton était un homme religieux et pour expliquer ses idées sur la nature des phénomènes physiques, il s'est efforcé de trouver des réponses dans les textes religieux. Ses questionnements sur la création de l'univers l'avaient même mené à étudier l'hébreu afin de comprendre comment les *Écritures Hébraïques* abordent la nature des phénomènes (Faur et Cross, 1991).

¹¹ Si les effets relativistes n'étaient pas pris en compte, le repère de navigation basé sur le GPS serait faux après seulement 2 minutes et les erreurs dans les positions globales s'accumuleraient à un taux d'environ 10 kilomètres chaque jour.

¹² La « Création » au sens entendu par la religion judéo/chrétienne.

Pour sa part, Einstein a déclaré sa relation avec la religion de la façon suivante :

It was, of course, a lie what you read about my religious convictions, a lie which is being systematically repeated. I do not believe in a personal God and I have never denied this but have expressed it clearly. If something is in me which can be called religious then it is the unbounded admiration for the structure of the world so far as our science can reveal it. (Jarvis, 1981)

La religion pour Einstein était liée à l'harmonie de l'univers et à l'admiration pour la structure du monde dans la mesure où la science peut le révéler. En effet, les théories einsteiniennes, considérées comme théories de l'univers, sont fondées sur l'étude de relations entre plusieurs concepts physiques tels que l'énergie, le temps, la masse, la lumière et l'espace.

Dans la section suivante, je propose une description de quelques concepts-clés faisant partie de la « physique einsteinienne » (qui inclut la théorie de la gravité). Cette description sera accompagnée par une discussion scientifique sur leur apparition et sur les idées fondatrices qui permettent de mieux les comprendre. Les contenus de ce chapitre correspondent au premier élément de la liste à étudier (l'étude épistémologique du concept de la gravité), décrits dans la première phase de l'ingénierie didactique (voir le chapitre Méthodologie, section 2.2.1 « Les analyses préalables », p. 9).

3.2 Physique einsteinienne

L'expression « physique einsteinienne », réfère généralement à la relativité restreinte et générale, à la théorie des quanta et aux contributions de travaux d'Einstein dans d'autres domaines physiques¹³.

L'année 1905, avec la publication de quatre articles considérés par la communauté scientifique parmi les plus importants de la physique de cette époque, est associée à l'année « admirable » d'Einstein (Paty, 2004). Ces publications ont joué (et continuent de jouer) un grand rôle dans le développement de la physique moderne.

La première, publiée en mars, porte sur les propriétés du rayonnement électromagnétique. Elle établit les bases de la physique quantique en avançant l'idée que la lumière peut agir comme une onde et comme une particule (ou quanta¹⁴). La deuxième publication (mai 1905) influence le développement de la thermodynamique et de la physique atomique en soutenant que la matière est constituée d'atomes.

¹³ Tels que l'astrophysique, la physique quantique, la physique nucléaire, la physique de la matière condensée.

¹⁴ Paquets granulaires d'énergie discontinus, mieux connus sous le nom de photons.

Les deux autres articles rédigés par Einstein en 1905 concernent la gravité. Ils s'inscrivent au sein de la théorie de la relativité restreinte (que je détaille dans la section 3.2.1). L'article publié en juin s'intéresse à l'électrodynamique des corps en mouvement. Il propose une nouvelle théorie de l'espace et du temps en élaborant une nouvelle conception de la variabilité des durées temporelles, du caractère vide de l'espace, de la contraction des objets et de l'impossibilité de dépasser la vitesse de la lumière. Notamment, il met fin au concept de mouvement absolu. Dans la dernière publication (datée de septembre), Einstein établit une relation d'équivalence entre la masse et l'énergie ($E = mc^2$)¹⁵. Il ouvre la voie, dans cette foulée, au développement de la physique nucléaire (Paty, 2004).

Dans les sections suivantes, je m'attarderai aux théories de la relativité restreinte et générale.

On appelle la première théorie **la relativité restreinte** (ou spéciale), car elle ne s'applique qu'à des cas particuliers : des référentiels¹⁶ en mouvement constant et immuable¹⁷. Pour Einstein, il n'y a pas de cadre de référence fixe dans l'univers. Tout bouge par rapport à tout le reste. De plus, « les lois de la mécanique sont indépendantes de la vitesse absolue du système dans lequel elles s'exercent, aussi longtemps que cette vitesse reste constante » (Fabre et Einstein, 1921). Les fondements de la relativité restreinte sont à la base de la théorie de la relativité générale qu'on appelle la théorie de la gravité (ou la gravité einsteinienne), publiée par Einstein en 1915 (voir la section 3.2.2). Pour sa part, la théorie de la relativité générale s'applique aux cadres référentiels inertiels accélérés¹⁸. La gravité einsteinienne ou la relativité générale est considérée comme une théorie de la gravité qui règne sur notre compréhension de l'univers (Barrau et Grain, 2011a; Blair, 2012c; Deutch, 1997; Gamow, 1962). Il s'agit d'une théorie exigeant une compréhension approfondie de plusieurs concepts physiques et des relations qu'ils entretiennent. Aux fins de la réalisation de cette section de mon mémoire, je me suis référé à plusieurs ouvrages scientifiques (Einstein, 1905; Einstein, 1916b; Einstein et Infeld, 1938; Misner, Thorne, and Wheeler, 1973; McMahon and Alsing, 2005; Norton, 2007; Egdall, 2009; Spagnou, 2017a). Cependant, pour la description des concepts physiques, les ouvrages de Norton (2007) et de Barrau et Grain (2011) m'ont principalement servi de sources de références à l'égard des interprétations les plus courantes de la théorie de la relativité d'Einstein.

Les concepts qui seront présentés dans les prochaines pages sont essentiellement ceux qui sont abordés dans les recherches menées sur l'enseignement de la gravité einsteinienne. En effet, au

¹⁵ « [L]a matière est un réservoir d'énergie » dit Einstein (cité dans Paty, 2004).

¹⁶ Un point ou un objet par rapport auquel on repère une position ou un mouvement.

¹⁷ C'est moi qui souligne pour distinguer cet élément de celui de la théorie de la relativité générale (voir le second élément souligné un peu plus loin).

¹⁸ Notons que si on utilise les lois de la relativité générale et qu'on ignore la gravitation (i.e. qu'on suppose que la gravité est égale à zéro), on revient à la relativité restreinte (Einstein et Infeld, 1938).

cours de ma recension des recherches portant sur l'enseignement de la gravité einsteinienne, j'ai identifié les concepts faisant partie des programmes d'études en Corée du Sud, en Norvège, en Australie et en Allemagne. Comme la théorie de la relativité générale prend ces racines dans les principes développés dans la théorie de la relativité restreinte, je m'y attarde en premier lieu.

3.2.1 Relativité restreinte : les principes de base

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein est considérée comme l'une des plus grandes réalisations intellectuelles de l'histoire de la pensée humaine (Isaacson, 2007; Paty, 2004, 2007; Spagnou, 2017a). Elle prend ses racines dans le premier article écrit par Einstein paru en mars 1905, dans lequel la nature corpusculaire de la lumière est décrite. Einstein avance l'idée selon laquelle les ondes électromagnétiques de Maxwell¹⁹ ne suffisent pas pour décrire la lumière (Spagnou, 2017a). Einstein développe cette idée dans son troisième article « De l'électrodynamique des corps en mouvement », publié en juin 1905 dans la revue d'*Annalen der Physik*. Il démontre que l'électrodynamique de Maxwell appliquée aux corps en mouvement mène à une asymétrie incompatible avec l'expérience d'induction électrodynamique²⁰ et qu'en fait les lois physiques sont invariantes. De plus, Einstein décide d'omettre le concept d'éther²¹, décrit dans la théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell comme un milieu (appelé l'éther lumineux) dans lequel les ondes se propagent. La théorie de la relativité restreinte postule que la vitesse de la lumière dans le vide est toujours constante. Elle met de l'avant les concepts de dilatation du temps, de contraction de l'espace, d'addition des vitesses inhabituelles (qui se rapprochent de la vitesse de la lumière) et d'inexistence du concept physique de simultanéité. Cette théorie propose une nouvelle description de l'espace, du mouvement des corps et de leur relation au temps. Ce n'est que quelques années après la parution de l'article que cette théorie portera le nom « relativité restreinte ».

Dans ce qui suit, je décris très brièvement les principaux concepts qui structurent la théorie de la relativité restreinte afin d'avoir une description des principes élémentaires de la relativité qui seront réutilisés dans ma description de la théorie de la relativité générale (qui est vue comme la théorie de la gravité d'Einstein, sujet d'étude de mon mémoire).

¹⁹ James Clerk Maxwell (1831-1879) Physicien anglais connu pour son ensemble d'équations qui ont unifié l'électricité, le magnétisme et l'induction (Encyclopedia, 2008d).

²⁰ Au lecteur qui souhaiterait comprendre davantage cette phrase, je suggère la lecture de l'article d'Einstein sur la relativité (Einstein 1905). L'induction du courant électrique se produit quand un aimant se déplace dans une boucle conductrice qui est au repos.

²¹ L'« éther » était considéré par plusieurs scientifiques comme l'intermédiaire de la propagation de la lumière (Spagnou, 2017). Par contre, toutes les expériences produites par François Arago (1786-1853), Hippolyte Fizeau (1819-1896) et Albert Michelson (1852-1931) ont mené Einstein à postuler que l'état du mouvement des corps est indépendant des phénomènes électromagnétiques-optiques (Spagnou, 2017).

3.2.1.1 Le mouvement inertiel et accéléré

L'analyse du mouvement des objets est une préoccupation majeure dans la physique, car elle permet aux scientifiques de mieux prédire les phénomènes physiques de la nature. Selon les observations et les théorisations des scientifiques, le mouvement des objets dans l'univers peut prendre deux formes. D'une part, tout objet laissé dans l'espace à une vitesse particulière aura un mouvement inertiel. Par conséquent, le mouvement d'un objet maintiendra une vitesse uniforme en une trajectoire droite. Par exemple, dans un espace sans gravité, une fusée se déplaçant à une vitesse constante avec un mouvement rectiligne uniforme maintiendra son orientation et une vitesse fixe. Les corps ne peuvent donc pas eux-mêmes modifier leur état de mouvement. D'autre part, s'il y a un changement du mouvement d'un corps, il sera considéré comme accéléré et absolu²² dans la relativité restreinte. Plus loin dans ce chapitre, on verra que dans la relativité générale tout mouvement (inertiel et accéléré) est considéré comme relatif. Pour cela, la relativité générale utilise un espace-temps courbe, tandis que dans la relativité restreinte, l'espace-temps est toujours plat.

3.2.1.2 Le mouvement absolu et le mouvement relatif

Est-ce que le mouvement de la Terre est absolu ou toujours relatif à un autre objet ? Dans la relativité, la notion du mouvement absolu et du repos absolu (deux concepts introduits par Isaac Newton dans le *Principia Mathematica*²³) sont omis dans la description du positionnement et du mouvement des objets dans l'espace. Selon Einstein,

Des exemples similaires, tout comme l'essai infructueux de confirmer le mouvement de la Terre relativement au « médium de la lumière », nous amène à la supposition que non seulement en mécanique, mais aussi en électrodynamique, aucune propriété des faits observés ne correspond au concept de repos absolu; et que dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont vraies, les équations électrodynamiques et optiques équivalentes sont également vraies, comme il a été déjà montré par l'approximation au premier ordre des grandeurs (Einstein, 1905).

Décrire la position ou le mouvement requiert toujours un système de coordonnées qui est relatif à un point ou à un autre mouvement. On peut dire qu'un objet est plus rapide (lent ou au repos) seulement par rapport à l'état d'un autre objet. Rien n'est immobile, l'univers est vaste et tous les objets sont toujours en mouvement.

²² Le mouvement inertiel est relatif, mais l'accélération est absolue.

²³ Ces deux concepts sont enseignés à l'école secondaire selon la vision de Newton (états des mouvements). Dans le *Principia*, Newton écrit: « Absolute motion is the translation of a body from one absolute place into another; and relative motion, the translation from one relative place into another » (Newton, 2016).

Les principes de la théorie de la relativité restreinte ne sont mis en œuvre que pour les mouvements inertiels (elle n'étudie pas les mouvements accélérés). Dans la relativité restreinte, le seul mouvement qui est absolu est celui de l'accélération.

3.2.1.3 Les principes et postulats de la relativité restreinte

La relativité d'Einstein se base sur deux postulats principaux de la relativité restreinte, dont les implications s'étendent jusqu'à la relativité générale.

Le premier postulat stipule que toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels²⁴ :

- le mouvement absolu ne peut apparaître dans aucune loi de la physique;
- toutes les expériences sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels;
- aucune expérience ne peut révéler le mouvement absolu d'un observateur (Norton, 2007).

Le deuxième postulat porte sur la vitesse de la lumière (ou la propagation de la lumière) : la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels inertiels. Elle propage à une vitesse d'environ 300 000 kilomètres par seconde dans un vacuum. La vitesse diminue lorsqu'elle se présente dans un milieu plus dense. Selon Einstein, rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière.

3.2.1.4 Le temps et les horloges lumineuses

Les deux postulats de la relativité restreinte ont mené à des changements conceptuels de la physique en ce qui concerne la vitesse, le temps, la lumière, la masse et l'énergie. Par exemple, la mécanique newtonienne permet aux objets d'aller plus vite que la vitesse de la lumière, d'avoir une masse qui ne varie pas et d'avoir un temps absolu à toute référence.

Pour mieux comprendre les postulats d'Einstein et, éventuellement, la raison pour laquelle la gravité affecte les horloges, commençons par définir pourquoi une horloge lumineuse inertielle en mouvement fonctionne plus lentement qu'une horloge au repos.

²⁴ Un corps sur lequel ne s'exerce aucune force.

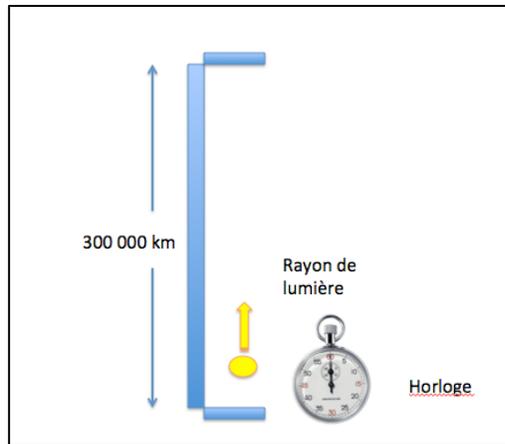


Figure 1. Horloge de lumière, à partir de Norton (2007)²⁵

Une horloge lumineuse (figure 1) est une horloge qui se compose d'une tige d'une longueur de 300 000 km dotée d'un miroir à chaque extrémité. Un signal lumineux ou un rayon de lumière est réfléchi sur les deux miroirs. Le rayon de lumière parcourt cette distance pour aller d'un miroir à l'autre. Comme la lumière se déplace à 300 000 km par seconde, il faut 2 secondes pour que la lumière fasse un aller-retour (Norton, 2007).

Einstein indique que si la tige (horloge lumineuse) avance à une vitesse qui se rapproche de la vitesse de la lumière, le temps de l'observateur²⁶ à l'intérieur de la tige ralentit en comparaison avec celui qui ne bouge pas avec la tige. Puisque la tige se déplace rapidement (à une vitesse proche de la vitesse de la lumière), l'observateur, qui ne bouge pas avec la tige, constatera que le rayon de lumière suit un parcours plus étendu et prend plus de temps pour faire un aller-retour.

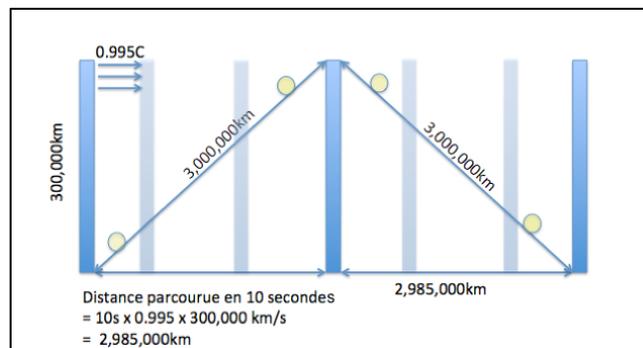


Figure 2. Horloge de lumière en mouvement, à partir de Norton (2007)

²⁵ Plusieurs images sont faites par moi. Lorsque cela n'est pas le cas, j'indique la référence d'emprunt.

²⁶ Il faut souligner que les observateurs dans ces expériences de pensées ne doivent pas nécessairement être des personnes. L'observateur est considéré comme un système de références.

Lorsque la tige maintient une vitesse de 99,5%²⁷ de la vitesse de la lumière, l'observateur en mouvement avec la tige observe que le rayon prend 2 secondes pour faire un aller-retour tandis que celui qui est au repos verra qu'un aller-retour prendra 20 secondes (voir figure 2). Cette dilatation du temps montre que l'horloge de l'observateur en mouvement par rapport à celui au repos est ralentie (Norton, 2007). Cela aura pour effet que toute horloge est ralentie lorsqu'elle est mise en mouvement²⁸.

3.2.1.5 La contraction des objets

Les principes de la relativité amènent aussi des changements aux formes physiques des objets. Selon les lois de la physique, le mouvement effectué parallèlement à la longueur de la tige fera en sorte que la taille de la tige sera contractée dans la direction de son mouvement. En mettant en mouvement à une vitesse de 99,5% de la vitesse de la lumière deux horloges lumineuses orientées perpendiculairement, on verra qu'elles fonctionnent au même rythme. L'orientation de l'horloge ne peut pas affecter sa vitesse. Toutes les directions dans l'espace sont physiquement équivalentes²⁹. L'argument de l'isotropie de l'espace ne fonctionne plus quand les deux directions des horloges sont intrinsèquement différentes, c'est-à-dire l'une est perpendiculaire à la direction du mouvement et l'autre est parallèle. Le principe de relativité exige qu'elles fonctionnent au même rythme. Dans le cas où les horloges fonctionnent à des vitesses différentes, on peut parler du mouvement absolu. Cette situation est impossible dans la relativité restreinte, car la relativité restreinte se préoccupe seulement des corps en mouvements inertiels. La contraction de la tige est la seule possibilité qui permet l'unisson des deux horloges lumineuses. Puisque le rayon de lumière fait aller-retour chaque 20 secondes, la tige rétrécit alors à 10% de la longueur d'origine (10% de 300000 km = 30 000 km). Ce phénomène de contraction des objets est appliqué à toute matière, lorsqu'elle est mise en mouvement (voir l'application de ce phénomène à partir de la formation des muons)³⁰.

²⁷ Le nombre 99.5% est donné à titre d'exemple de la vitesse qui se rapproche à la vitesse de la lumière.

²⁸ Par exemple, une horloge mécanique, une montre numérique, notre système métabolique, etc.

²⁹ On appelle ce phénomène l'isotropie de l'espace.

³⁰ Sur la Terre, on observe des muons (particules) qui sont produits par la désintégration de pions chargés. Les pions sont formés dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques des galaxies lointaines. Ils disparaissent après environ deux microsecondes. Paradoxalement, même en voyageant à la vitesse de la lumière, les muons ont besoin encore 50 microsecondes pour voyager de l'atmosphère à un détecteur au sol (Rindler et Salisbury, 2003). À 90% de la vitesse de la lumière, la vie du muon de 2 microsecondes devient environ 200 microsecondes. Cela donne au muon suffisamment de temps pour faire le voyage de 50 microsecondes vers le sol. Parce que les muons ont une grande énergie, l'effet de dilatation temporelle décrite par la relativité restreinte les rend observables à la surface de la Terre. (Voir https://www.youtube.com/watch?time_continue=265&v=91801Y1lsCg <https://www.youtube.com/watch?v=7eLYCpSpoDU>

3.2.1.6 La masse, la vitesse de la lumière, l'énergie et l'espace

La fameuse équation d'Einstein ($E = mc^2$) établit une relation entre l'énergie et la masse (l'énergie (E) est égale à la masse (m) fois la vitesse de la lumière (c) au carré). Cette formule va à l'encontre de la dynamique classique de Newton (selon laquelle les objets peuvent aller plus vite que la vitesse de la lumière). L'équation réfère aussi à l'idée que le rapport entre l'énergie et la masse est déterminé par une « constante » universelle. Hofstadter et Sander (2013) indiquent que même si cette formule a l'air très simple, elle est possiblement la plus puissante de l'histoire de la physique, car elle met en relation trois concepts fondamentaux (la masse, la lumière et l'énergie). Cette découverte scientifique est exprimée simplement par cinq symboles, mais il reste qu'il faut maîtriser des savoirs de différents domaines pour bien la comprendre. Einstein a démontré que les objets qui dégagent de l'énergie lumineuse perdent une quantité de masse. Selon lui, lorsqu'un objet refroidit, il perd aussi un peu de sa masse, car il transmet un peu de sa chaleur (loi thermodynamique) (Hofstadter et Sander, 2013).

Lorsque les systèmes interagissent, ils échangent de l'énergie³¹. La formule $E = mc^2$ exprime que la matière et l'énergie sont interchangeable; qu'il y a un continuum entre les deux. L'énergie peut se transformer en matière et la matière peut se transformer en énergie. Ce sont des aspects différents de la même chose.

En ce qui concerne la gravité dans la relativité, cette formule mène à l'idée que c'est aussi l'énergie qui la provoque, plutôt que seulement la masse (l'idée provenant de la gravitation newtonienne). Cela démontre que la deuxième loi de la mécanique de Newton ($F=ma$) n'était pas complète et doit être corrigée par l'omission de la conception de force (Rybczyk, 2016).

Le facteur c^2 permet de mieux comprendre les finalités de l'utilisation de cette équation³². Puisque ce facteur représente un nombre très élevé ($8.98755179 \times 10^{16} \frac{m^2}{s^2}$), même une petite quantité de masse contient une énorme quantité d'énergie. Ce principe se reflète très bien dans le développement des technologies nucléaires. À la fin des années 1930, il est devenu évident que l'on pouvait obtenir une quantité inégalée d'énergie en séparant un atome d'uranium instable (Tucker, 2018). Dans une réaction de fission nucléaire, le noyau d'un atome d'uranium instable se divise en noyaux d'atomes de plus petite taille et libère des particules telles que les neutrons. Il s'avère que la

³¹ Par exemple, une voiture en mouvement a une certaine énergie de mouvement qui est convertie en énergie thermique dans les freins lorsque la voiture ralentit. Cette énergie provient de l'énergie chimique stockée dans le carburant à essence, qui à son tour était produite par l'énergie lumineuse de plantes qui sont devenues du pétrole (Norton, 2007).

³² Un gramme de matière (environ 20 gouttes d'eau) converti en énergie électrique peut donner 25 000 000 kilowattheures. Cela est suffisant pour alimenter une ampoule de 100 watts pendant 250 000 000 heures ou 28 500 ans (Norton, 2007).

masse totale de ces produits de désintégration est légèrement inférieure à la masse du noyau d'uranium au départ. Cette masse manquante a été convertie en énergie. Convertir même une petite partie de la masse en une autre forme, conduit à la libération d'une énorme quantité d'énergie par le principe de c^2 (facteur présent dans l'équation d'Einstein). C'est l'impact d'un neutron qui déclenche la fission d'un noyau de l'atome d'uranium. Chaque division d'un noyau libère des neutrons. Ces neutrons peuvent alors commencer la fission d'autres noyaux d'uranium, et les neutrons qui en résultent conduisent à la fission d'encore plus de noyaux d'uranium. Si rien ne limite ce processus, une réaction en chaîne incontrôlée produira une énorme quantité d'énergie, qui peut ainsi produire un phénomène violent tel que la bombe atomique³³ (Norton, 2007).

Plusieurs domaines de la physique moderne durant le 20^e siècle ont pris pour objet d'étude les réactions chimiques et les phénomènes de haute énergie à partir de l'équation $E = mc^2$ (Norton, 2007).

3.2.1.7 L'espace-temps et les cônes de lumière

Dans la théorie de la relativité d'Einstein, l'espace-temps permet d'unifier la géométrie de l'espace, la lumière, le mouvement, l'énergie, les événements lumineux et le temps. Le futur, le présent et le passé de l'espace-temps sont envisagés dans la relativité sous un angle différent de celui privilégié dans le paradigme newtonien.

Le concept d'espace-temps est d'abord apparu avec la relativité restreinte. Il a ensuite été mis en contribution par Hermann Minkowski en 1908 pour construire une représentation géométrique permettant d'analyser et de visualiser les effets relativistes (Semay et Silvestre-Brac, 2016). Dans la relativité restreinte, l'espace-temps est composé de quatre dimensions puisque le temps est ajouté à l'espace tridimensionnel. Selon Einstein, personne n'est capable de « voir » le monde en quatre dimensions, mais il est en effet possible de le « concevoir » par abstraction :

No man can visualize four dimensions, except mathematically ... I think in four dimensions, but only abstractly. The human mind can picture these dimensions no more than it can envisage electricity. Nevertheless, they are no less real than electro-magnetism, the force which controls our universe, within, and by which we have our being (Vioreck Sylvester, 1929).

Minkowski a simplifié le problème de visualisation en introduisant un espace bidimensionnel où l'explosion lumineuse est composée d'un cercle en expansion par rapport au temps, ce qui produit

³³ En 1905, Einstein ne s'attendait pas à ce genre d'application destructrice de son résultat purement théorique (Einstein et Solovine, 1958). La technologie nucléaire, avec ses pouvoirs destructifs, menace l'existence même de la civilisation et de notre écosphère (OECD, 2007).

des cônes lumineux. La structure des cônes de lumière est définie par la vitesse de la lumière qui ne peut pas être dépassée. Dans la relativité restreinte et générale, un cône de lumière est construit à partir du chemin d'un rayon lumineux qui émane d'un événement localisé à un seul point dans l'espace et à un seul moment dans le temps. L'espace-temps de Minkowski est plat, alors que celui de la relativité générale est courbé (voir la figure 3).

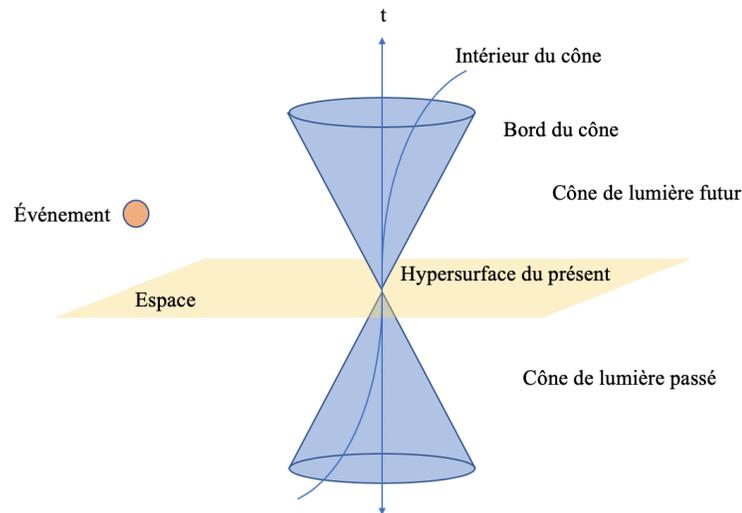


Figure 3. Cône de lumière de Minkowski, à partir de Norton (2007)

Dans cette image, la distribution des cônes de lumière dans l'espace permet de visualiser et de déduire la possibilité et l'impossibilité d'un phénomène dans la relativité restreinte (Rindler et Salisbury, 2003). Les cônes de lumière passés et futurs, un concept développé par les fondements de la relativité restreinte, permettent la démarcation entre les événements passés, les événements futurs et les événements qui sont inatteignables dans le passé et le futur (Einstein, 2012). Les événements peuvent être représentés par les points individuels d'un espace-temps à un moment donné où :

-La trajectoire d'un point se déplaçant moins vite que la vitesse de la lumière sera à l'**intérieur du cône**, ce qui est considérée comme un événement possible. (Les électrons, les protons et les neutrons auront une trajectoire à l'intérieur du cône);

-La trajectoire d'un élément se déplaçant à la vitesse de la lumière sera sur le **bord du cône**, ce qui est aussi considérée comme un événement possible. (Un signal lumineux ou un photon se trouvent à la surface du cône de lumière);

-La trajectoire à l'**extérieur du cône** de lumière correspond à celle d'un objet qui se déplace plus vite que la vitesse de la lumière. Cet événement est impossible, car d'après Einstein, on ne peut pas dépasser la vitesse de la lumière;

-L'hypersurface est un événement spatial instantané du présent de l'espace-temps. Dans le cas d'un espace-temps à quatre dimensions, cet espace sera tridimensionnel.

Cette représentation géométrique a permis de renforcer l'importance du concept *d'espace-temps* dans le développement de la relativité générale d'Einstein, que je présente dans la section suivante.

3.2.2 Relativité générale

La théorie de la relativité générale prend ses racines dans la théorie de la relativité restreinte. En s'appuyant sur la description de l'espace et du temps en tant que grandeurs physiques relatives à l'état de mouvement, sur l'idée que le temps absolu n'existe pas et sur le principe qu'il existe une relation entre la masse et l'énergie ($E = mc^2$), Einstein revoit le phénomène de la gravitation et décrit les sources du champ de gravitation (Paty, 2004).

Dans son article de 1907, il présente une synthèse des fondements de sa théorie de la relativité et son principe d'équivalence dans lequel il généralise les principes de la relativité au mouvement accéléré. Cet article théorise le décalage spectral gravitationnel de la lumière (appelé l'effet Einstein) (Spagnou, 2017a).

L'expérience de pensée a joué un rôle essentiel dans le développement de la théorie de la relativité générale. En effet, le principe d'équivalence de 1907 est considéré par Einstein comme la pensée la plus heureuse de sa vie. Il la décrit de la façon suivante :

Quand j'ai été assis sur une chaise au Bureau des Brevets, à Berne, en 1907, me vint l'idée la plus heureuse de ma vie : le champ gravitationnel n'a qu'une valeur relative, à la manière du champ électrique engendré par l'induction magnétoélectrique. Parce que pour un observateur tombant en chute libre du toit d'une maison, il n'existe – du moins dans son voisinage immédiat – aucun champ gravitationnel. Si d'ailleurs cet observateur laisse tomber des corps, ceux-ci restent par rapport à lui dans un état de repos ou de mouvement uniforme, et cela indépendamment de leur nature physique ou chimique (en ignorant bien sûr ici la résistance de l'air). Cet observateur a donc le droit de se considérer au repos (Einstein, 1920 cité dans Spagnou, 2017b).

Cette idée a été affinée par Einstein, en remplaçant l'homme en chute libre par celui enfermé dans un ascenseur qui se trouve dans un « vide »³⁴. L'accélération de l'ascenseur est nulle et l'homme à l'intérieur est dans un état d'apesanteur (sans poids). Il n'y aurait donc ni "haut" ni "bas". Si cette

³⁴ Le vide en astronomie correspond à un espace dont la densité de matière est extrêmement faible. Par exemple, cela correspond à un espace avec zéro gravité. Cet espace peut être observé entre les filaments galactiques reliant les superamas de galaxie, les plus grandes structures de l'univers. C'est le plus grand vide dans l'Univers (Lindner, Einasto, Einasto et Freudling, 1995).

personne lâche une balle, celle-ci flottera sans bouger. Imaginons que l'ascenseur commence à monter à une accélération constante³⁵ : Une force vers le sol de l'ascenseur sera ressentie. En lâchant une balle de nouveau, celle-ci finira par tomber au sol. L'accélération aura donc créé un champ de force influençant le parcours des objets à l'intérieur de l'ascenseur. Si l'accélération de l'ascenseur est de $9.8 \frac{m}{s^2}$, la balle aura la même accélération que la chute des corps près du sol sur Terre (voir la figure 4a).

En s'inspirant de la même expérience de pensée, Einstein remplace cette fois-ci la balle par un faisceau de lumière. Ce faisceau de lumière, allumé en face de lui, est pointillé au mur parallèlement au plancher de l'ascenseur. L'accélération de l'ascenseur courbe la propagation du faisceau lumineux et celui-ci atteindra le mur plus bas (voir la figure 4b). Ce phénomène illustre que le faisceau de lumière sera ainsi courbé sous l'influence d'un champ gravitationnel.

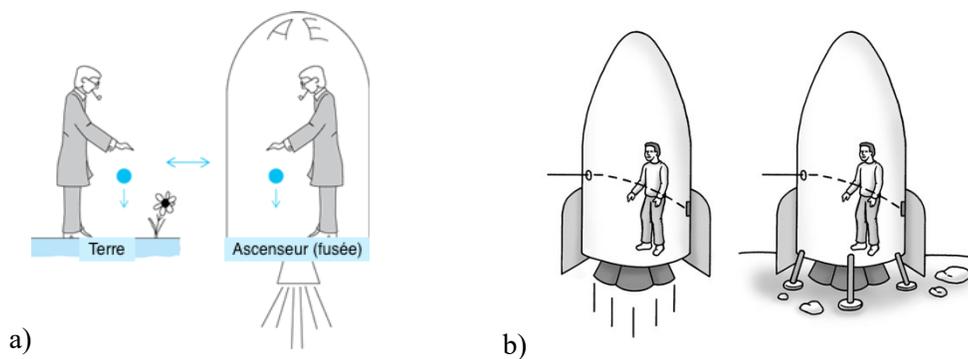


Figure 4. Chute des corps et la courbure de la lumière dans un ascenseur (fusée)^{36,37}

Cela dit, un observateur à l'extérieur de l'ascenseur verrait toutes ces expériences différemment. Il verrait que c'est l'ascenseur qui s'est déplacé pour frapper la balle par le bas. Pour lui, il n'y a aucune force qui agit sur la balle, donc pas de champ de gravitation à l'intérieur de l'ascenseur. Il verrait aussi que l'ascenseur se déplace et que la propagation de la lumière du faisceau lumineux se déplace en ligne droite comme dans un cadre inertiel. Pour lui, le mur de l'ascenseur monte, c'est pourquoi la lumière touche le mur plus bas (pour lui la lumière ne se courbe pas). Il peut être difficile de comprendre quel observateur a raison : l'observateur inertiel à l'extérieur de l'ascenseur ou l'observateur à l'intérieur? Avant l'élaboration de la théorie de la relativité générale d'Einstein, la communauté scientifique était d'avis que l'observateur inertiel positionnant à l'extérieur de l'ascenseur a

³⁵ S'il y a un moteur de propulsion d'une fusée, rattaché à l'ascenseur, et que celui-ci démarre, l'ascenseur accélérera.

³⁶ L'image prise à <https://thinkingscifi.files.wordpress.com/2012/07/loadbinary.gif>

³⁷ L'image prise à <https://www.dummies.com/education/science/physics/gravity-as-acceleration/>

raison et que l'interprétation de la personne dans l'ascenseur est erronée. Dans le cadre de la relativité générale, les deux observateurs ont raison si on considère leurs cadres de référence (Einstein, 1916b).

En ce qui concerne les lois de la physique, « être exposé » à un champ gravitationnel uniforme est équivalent à « être accéléré ». C'est ce qu'on appelle *le principe d'équivalence d'Einstein*. Il s'agit d'une généralisation de la relativité restreinte qui signifie que les lois de la physique sont les mêmes pour tous les référentiels inertiels³⁸. *Le principe d'équivalence* est alors considéré comme le point de départ de la célèbre théorie de la relativité générale.

Einstein avait prédit que ce n'est pas la vitesse de la lumière mais la vitesse du temps qui ralentit lorsqu'on descend dans un champ gravitationnel. La caractérisation du temps ralenti et la vitesse de la lumière sont utilisées pour comprendre la physique de la gravité. Le principe d'équivalence d'Einstein illustre que les horloges fonctionnent différemment à des sources de gravités différentes³⁹.

Cet effet gravitationnel sur la propagation de la lumière et la nature de la gravitation en lien avec son principe d'équivalence ont fait l'objet d'une publication en 1911 intitulée « Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes⁴⁰ » (Spagnou, 2018). En collaboration avec le mathématicien Marcel Grossmann, Einstein consacra les années 1913 à 1915 à l'élaboration des fondements mathématiques de la courbure de la géométrie (Norton, 2007).

Les deux phénomènes étayés précédemment (la dilatation du temps et la courbure des rayons lumineux) permettront le développement de la physique moderne.

3.2.2.1 La masse, l'accélération et la gravité

La « nature » de la relation de proportionnalité entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle est restée dans l'obscurité pendant presque trois siècles, c'est-à-dire jusqu'à l'apparition de la publication de la théorie de la relativité générale d'Einstein (Norton, 2007). L'une des raisons qui ont conduit Einstein au principe d'équivalence était la confusion qu'il ressentait quant aux deux définitions de masses d'Isaac Newton :

- La masse inertielle mesure la résistance qu'oppose le corps à toute accélération ou à toute modification de l'état de mouvement. On remarque que pour une même force appliquée, plus la masse inertielle est élevée moins l'accélération est grande. La masse inertielle tend à résister à l'accélération,

³⁸ Avec la relativité générale, on comprend que les lois de la physique sont les mêmes pour tous les cadres de référence, quel que soit leur mouvement relatif.

³⁹ Ce phénomène s'appelle la dilatation du temps gravitationnel.

⁴⁰ « Sur l'influence de la gravité sur la propagation de la lumière », traduction libre de l'allemand.

donc à la diminuer. Bref, on retrouve toujours la masse inertielle dans un contexte d'accélération, et sans qu'il soit question de gravitation. Dans ce contexte, la masse se décrit par la loi $F = ma$.

- La masse gravitationnelle est définie comme la force d'attraction gravitationnelle exercée sur les objets. Elle est décrite par la formule de la gravitation universelle de Newton, $F = G \left(\frac{m_1 m_2}{r^2} \right)$.

Les deux définitions de masse précitées sont très différentes. Les expériences de chutes des corps de Galilée ont démontré que les masses accélèrent au même rythme. Les objets de différentes masses inertielles peuvent tomber à la même vitesse dans un champ gravitationnel si la masse inertielle et la masse gravitationnelle sont en effet égales. Newton a été le premier à les déclarer égales, mais sans expliquer la raison de leur égalité (Einstein, 2012).

Einstein souligne qu'avant de pouvoir déclarer que deux choses sont égales, on doit démontrer une égalité dans la nature des deux concepts. Autrement dit, elles sont égales après que leur nature réelle soit trouvée égale (Einstein, 1916b). Son principe d'équivalence, décrit dans la section précédente, a démontré que l'accélération et la gravitation sont équivalentes; la masse associée à l'accélération et la masse associée à la gravitation sont naturellement équivalentes.

La lumière incurvée dans un champ gravitationnel a permis à Einstein d'affirmer que la masse d'un objet agit en effet sur l'espace et le temps dans lequel il existe. La présence de matière courbe l'espace-temps. Pour mieux comprendre cette partie de la théorie d'Einstein, il faut examiner de plus près la géométrie de l'espace.

3.2.2.2 La géométrie de l'espace

Les mathématiciens et les physiciens de nos jours étudient souvent des objets ou des espaces complexes qui dépassent les limites de notre façon de les représenter visuellement. Einstein s'est toujours demandé comment les mathématiques, « un produit de la pensée humaine et indépendante de toute expérience » (Einstein, 1921), pouvaient s'adapter très bien aux objets de la réalité. « La raison humaine serait-elle donc capable, sans avoir recours à l'expérience, de découvrir par la pensée seule les propriétés des objets réels ? » (Einstein, 1921). Les calculs et la géométrie, pour lui, étaient les outils pour étudier les objets réels. Il savait que « la géométrie axiomatique seule ne peut formuler aucun énoncé sur la manière d'être de cette espèce d'objets de la réalité que nous appellerons corps pratiquement rigides » (Einstein, 1921). Pour décrire les propriétés physiques de l'espace, la théorie de la relativité générale avait besoin de la géométrie courbe.

Dans la section suivante, je décris brièvement les différents types de géométries (euclidienne et courbe) et les équations mathématiques qui sont nécessaires pour expliquer la relativité générale.

3.2.2.3 La géométrie euclidienne

Les éléments d'Euclide, travail écrit par le mathématicien grec 300 ans av. J.-C, est le premier livre qui a présenté les mathématiques de façon systématisée sous forme d'axiome et de postulats. Ce travail était la référence pour la géométrie pendant deux millénaires⁴¹ (Norton, 2007). Pendant la période de développement de la géométrie, les nouvelles théories géométriques centrées sur l'étude des différents espaces se fondent le plus souvent sur la géométrie euclidienne. Plus tard elles se séparent et se constituent en branches indépendantes. D'autres géométries, ont été construites à partir d'une révision des notions ou des définitions de la géométrie euclidienne, comme par exemple les géométries de Lobachevskii et de Riemann qui vont à l'encontre du 5^e postulat d'Euclide sur les parallèles (Norton, 2007).

3.2.2.4 La géométrie courbe

Au milieu du 19^e siècle, avec les travaux de Gauss⁴², de Riemann⁴³ et de Lobachevskii, les mathématiciens et les physiciens ont commencé à considérer la géométrie sur des surfaces courbes, à étudier les propriétés des droites, des triangles tracés sur des sphères (ou des hyperboloïdes). Les géométries courbes ont joué un rôle fondamental dans la structure de la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Les lignes « droites » sur les surfaces courbes sont appelées *géodésiques*⁴⁴. Il s'agit d'un concept important dans la relativité générale, qui permet d'établir les distances de longueur minimale entre deux points dans les trajectoires des corps dans l'espace-temps sous l'effet de la gravitation. Selon Newton, un corps se déplace selon une trajectoire rectiligne (une droite). On peut représenter ces trajectoires dans la géométrie euclidienne plane (2D) et spatiale (3D) par des lignes parallèles.

⁴¹ Depuis 1482, il y a eu plus de mille éditions de ce volume (Norton, 2007).

⁴² Johann Carl Friedrich Gauss (1777 -1855) est un mathématicien allemand qui a innové dans de nombreux domaines des mathématiques et des sciences (Encyclopedia, 2008c).

⁴³ Bernhard Riemann (1826 -1866) est un mathématicien allemand dont les contributions ont été majeures en géométrie courbe (Encyclopedia, 2008a).

⁴⁴ De façon très générale, une ligne reliant le pôle nord et le pôle sud sur le globe représente une géodésique.

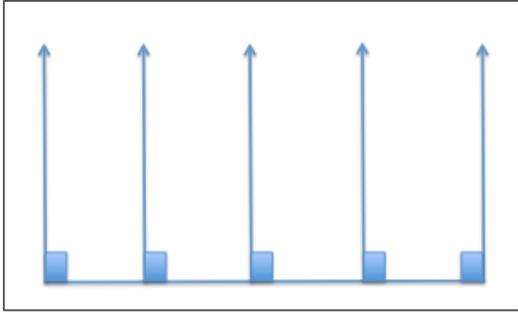


Figure 5. Lignes parallèles dans le plan

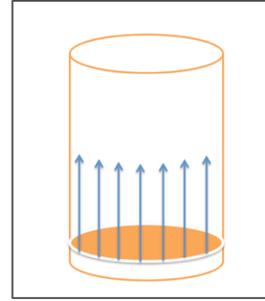


Figure 6. Lignes parallèles dans un espace euclidien représentées sur des figures courbes

Dans cette géométrie, les mêmes objets, dans les deux surfaces (2D et 3D), auront les mêmes caractéristiques (voir le tableau 1 ci-dessous).

Tableau 1. Exemple des propriétés des objets mathématiques dans la géométrie euclidienne

Objets mathématiques	Caractéristiques
Droites parallèles	La même distance entre les droites parallèles (longueur du segment perpendiculaire à ces droites)
Nombre de droites parallèles à une autre droite passant par un point donné	Une seule droite passant par un point donné qui est parallèle à une autre droite
Somme des angles intérieurs d'un triangle	180°
Mesure de la circonférence du cercle	$(C=2\pi r)$ ⁴⁵

Dans les géométries non-euclidiennes dites « courbes » (celle de Lobachevskii et de Riemann), le plus court chemin d'un point à un autre est un arc (voir la figure 7 ci-dessous). Sur cette sphère, on peut voir que les lignes parallèles (les longitudes), sont représentées par des arcs du cercle. Les longitudes sont perpendiculaires à la ligne de base d'une demi-sphère (l'équateur) et se rencontrent au pôle Nord.

⁴⁵ On trouve la mesure de la circonférence du cercle à partir de la découverte du rapport entre cette longueur et celle du diamètre, $C/D = \pi \approx 3,14$).



Figure 7. Lignes parallèles sur la sphère (Norton, 2007)

Dans un espace incurvé plus généralisé, la courbure change d'un endroit à l'autre⁴⁶. Pour mesurer les géodésiques dans les espaces courbes, on se réfère aux deux géométries courbes de Lobachevskii et de Riemann. Sur les deux figures ci-dessous, on peut voir que les lignes parallèles ou les géodésiques divergent (ou convergent). Plus la distance entre 2 points est grande (petite), plus l'espace est étendu (ou raccourci).

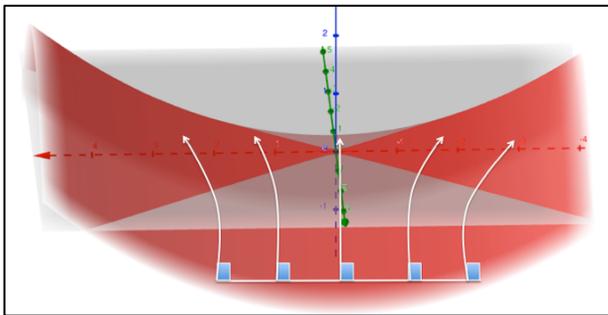


Figure 8. Lignes parallèles sur une surface paraboloid hyperbolique

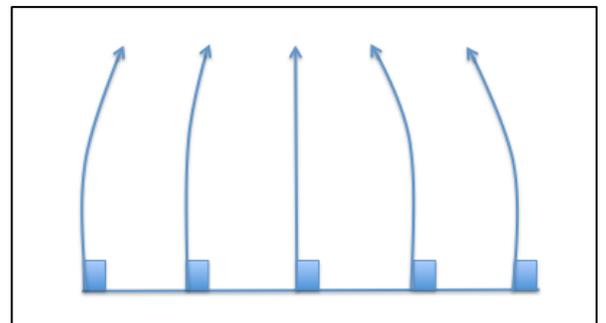


Figure 9. Lignes parallèles sur la sphère (convergentes)

Les caractéristiques des objets dans les deux géométries non-euclidiennes (relation entre les droites, nombre de droites parallèles passant par un point donné, somme des angles intérieurs du triangle, rapport entre la circonférence et le diamètre, etc.), sont différentes. La géométrie de Lobachevskii (géométrie hyperbolique) a une courbure négative⁴⁷ qui influencera les caractéristiques des objets. Dans cette géométrie, il existe une infinité de parallèles à une droite passant par un point donné, la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180° et le rapport entre la circonférence et le diamètre est plus grand que π . Tandis que la géométrie de Riemann (géométrie elliptique ou sur la

⁴⁶ C'est pourquoi les avions de l'hémisphère nord voyagent vers le Nord puis retournent vers le Sud pour arriver à une destination à la même latitude plutôt que de voyager à l'Est ou à l'Ouest. Les pilotes et les compagnies aériennes choisissent la plus courte distance entre les deux points pour économiser du temps et du carburant. Certaines routes géodésiques aériennes peuvent économiser jusqu'à mille kilomètres de distance.

⁴⁷ Un bel exemple de la courbure négative est la courbure de la surface d'une croustille « Pringel ».

sphère) a une courbure positive⁴⁸ et les objets mentionnés ci-haut possèdent les caractéristiques suivantes : il n'existe aucune droite passant par un point donné et parallèle à une droite donnée, la somme des angles intérieurs d'un triangle est supérieure à 180° et le rapport entre la circonférence et le diamètre est plus petite que π .

On peut observer l'application de ces principes à partir de la chute des objets et de leurs déviations au-dessus de la Terre. Par exemple, si on place verticalement, au-dessus de l'atmosphère terrestre, trois objets identiques séparés par une distance, et qu'on les laisse tomber, ils suivront leurs géodésiques vers le centre de la Terre. Les objets les plus proches de la Terre ressentiront une attraction gravitationnelle légèrement plus forte que les objets plus hauts. Par conséquent, ils accéléreront plus vite et la distance entre les objets augmentera. Cela démontre que la courbure est **négative** tout au long de la ligne verticale dans l'espace au-dessus de la Terre.

Si on place trois objets horizontalement le long d'une ligne Est-Ouest (ou Nord-Sud) avec la même distance de séparation, au-dessus de la Terre, ils tomberont le long de leurs géodésiques vers le centre de la Terre. Les objets ressentiront une attraction gravitationnelle identique tout au long de leurs chemins. Plus les objets se rapprochent de la Terre, plus la distance entre eux diminue (converge). Cela démontre que la courbure est **positive** tout au long de cette ligne horizontale dans l'espace au-dessus de la Terre. En additionnant les trois courbures (verticale, est-ouest, nord-sud), on obtient une courbure totale égale à zéro.

3.3.2.5 *Le tenseur*

Pour mesurer les distances et les angles sur les surfaces courbes et déterminer les géodésiques et la courbure à chaque lieu, on emploie le tenseur métrique⁴⁹. Le tenseur métrique généralise le théorème de Pythagore ($c^2 = a^2 + b^2$), où les coefficients sont ajoutés à la définition de distance euclidienne. Pour décrire un espace courbe généralisé, de n dimensions, Riemann introduit les trois étapes suivantes :

- Une métrique de l'espace est définie comme un outil mathématique qui permet de mesurer les distances.

⁴⁸ Un bel exemple de la courbure positive constante est la courbure d'une sphère.

⁴⁹ Le tenseur métrique est défini par le produit scalaire de deux vecteurs en chaque point d'un espace et peut se représenter par une matrice carrée. Dans la relativité générale, on peut le considérer comme une généralisation du potentiel gravitationnel de la gravitation newtonienne. Le tenseur métrique capture toute la structure géométrique et causale de l'espace-temps et est utilisé pour définir des notions telles que le temps, la distance, le volume, la courbure et l'angle ainsi que pour séparer le futur et le passé (Barrau et Grain, 2011a).

- La métrique de distance est utilisée pour trouver les géodésiques de l'espace (plus courte distance).
- Les géodésiques sont utilisées pour définir la courbure de cet espace.

Ces espaces sont géométriquement lisses, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de brusques changements géométriques. Si on agrandit une petite partie de cet espace incurvé, on peut la représenter par une surface plane, et voir comment se calcule la distance entre deux points ($ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2$).

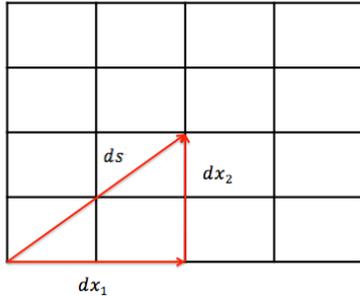


Figure 10. Distance euclidienne (théorème de Pythagore)

Le tenseur métrique permet de mesurer les distances entre deux points en additionnant toutes les petites distances le long du chemin courbe. C'est ce principe (appelé *transport-parallèle* des vecteurs) que Riemann a utilisé pour développer un tenseur permettant de calculer la relation entre les géométries autour de points le long d'une ligne courbe sur une surface. Ce tenseur caractérise la courbure de l'espace-temps et correspond à la différence locale de vecteurs. Einstein se réfère au tenseur de Riemann pour décrire les effets de marées (changements gravitationnels) et la densité d'énergie (changement de volume), qui font partie des équations du champ unifié d'Einstein et permettent d'établir une égalité entre l'espace-temps et la matière.

3.3.2.6 Le tenseur d'énergie impulsion

La physique newtonienne indique que la force de la gravité est créée par la masse, ou plus précisément, par la densité de masse (la quantité de masse par unité de volume). Dans la relativité générale, la densité d'énergie est utilisée en raison de l'équivalence entre la masse et l'énergie qui compte le mouvement ou l'énergie cinétique des masses. Autrement dit, en plus de calculer la densité masse-énergie du volume d'espace, il faut compter le flux⁵⁰ d'énergie à travers chaque surface du volume. Le tenseur d'énergie impulsion peut être représenté par une matrice 4x4 où chaque élément

⁵⁰ « Quantité d'une grandeur scalaire ou vectorielle qui traverse pendant une unité de temps une aire donnée » (Antidote, druide informatique).

indique le flux d'impulsion sur une surface. La première composante représente la densité d'énergie classique avec le temps qui est tenu constant. C'est la seule composante utilisée dans les équations de Newton. La première rangée du haut représente le flux d'énergie. La première colonne de gauche correspond à la densité de la μ ème composante d'impulsion.

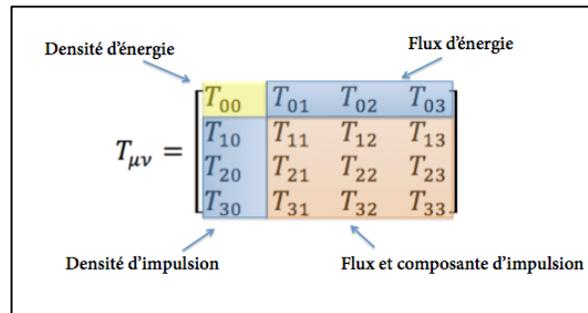


Figure 11. Tenseur d'énergie impulsion d'Einstein

Les autres composantes (en orange) sont des flux d'impulsion sur les surfaces, causés par la pression et les perturbations de chaque surface. Ce concept du tenseur d'énergie impulsion est utilisé par Einstein pour décrire le champ gravitationnel ($G_{\mu\nu}$), appelé tenseur d'Einstein.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Figure 12. Équations d'Einstein

L'équation ci-dessus représente une relation entre le tenseur d'Einstein qui décrit le volume de la courbure de l'espace-temps (partie gauche de l'équation) et le tenseur énergie-impulsion (partie droite de l'équation) qui représente le contenu de l'espace-temps (voire la densité d'énergie totale).

Le problème aux limites⁵¹ doit être utilisé pour prendre en considération les équations d'Einstein qui incluent les conditions des équations de Newton sur la gravité. Cela représente des espaces avec très peu de courbure. La constante utilisée est représentée par 8π fois la constante gravitationnelle de Newton (G) divisée par la vitesse de la lumière exposant quatre. Cette constante de valeur de $(2,06 \times 10^{-43} \frac{s^2}{mkg})$, démontre que l'intensité gravitationnelle sur terre est très faible. La formule du

⁵¹ Un problème aux limites est un système d'équations différentielles (aux dérivées partielles) ordinaires avec une solution et des valeurs dérivées spécifiées à plus d'un point (Gladwell, 2008).

tenseur d'Einstein, qui est assez courte, implique une démarche mathématique assez complexe de résolution de 40 équations⁵².

3.3.3 Les preuves expérimentales et les effets de la relativité générale

Dans ce qui suit, je présente différentes expériences qui ont permis de confirmer la validité de la relativité générale d'Einstein. Celles-ci permettent de mieux comprendre son rôle dans notre compréhension de l'univers.

3.3.3.1 L'orbite de Mercure

Les solutions d'Einstein pour le mouvement de Mercure sont considérées comme la première confirmation expérimentale de la théorie de la relativité générale. Pendant le demi-siècle précédant les travaux d'Einstein sur la relativité, les observations astronomiques de l'orbite elliptique de la planète Mercure autour du Soleil, effectuées par Leverrier (en 1859) et Newcomb (en 1895), ont divulgué que son orbite n'est pas fermée. De plus, son périhélie⁵³ change plus vite que celui des autres planètes d'une part parce qu'elle est la plus proche du Soleil et d'autre part parce qu'elle est la planète la moins massive de notre système solaire. L'écart de la précession (mouvement conique autour du Soleil) de Mercure était de 43 arc-secondes⁵⁴ par siècle en comparaison avec le résultat produit par les équations newtoniennes (Einstein, 2012).

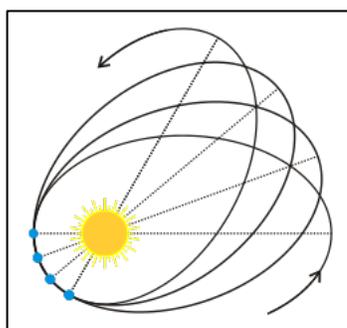


Figure 13. Périhélie de Mercure⁵⁵

Le 18 novembre 1915, sept jours après la publication de l'article sur la relativité générale, Einstein trouve une solution approximative au problème de la précession du périhélie de Mercure. Il emploie des coordonnées rectangulaires afin d'approximer le champ gravitationnel autour d'une

⁵² Les métriques des espace-temps incurvés élaborées par les physiciens portent en général leurs noms.

⁵³ Le périhélie est le point de la trajectoire elliptique qui est le plus proche du Soleil.

⁵⁴ L'arc seconde représente $\frac{1}{3600}$ degré.

⁵⁵ L'image provient de <https://www.astronomes.com/la-fin-des-etoiles-massives/verification-relativite>

masse sphérique symétrique non rotative et non chargée. Cependant, cette solution n'apparaît pas suffisante pour décrire l'espace-temps des masses tournant lentement comme la Terre, le Soleil et les planètes dans notre système solaire. Le 22 décembre 1915, Einstein reçoit une lettre de Karl Schwarzschild⁵⁶, qui propose une solution exacte à ses équations, en utilisant le système de coordonnées polaires. Cette proposition est maintenant connue sous l'appellation « métrique de Schwarzschild » (Einstein et Vankov, 2011).

3.3.3.2 La courbure de la lumière

La gravité a pour effet de courber le trajet de la lumière, surtout lorsque la lumière s'approche des objets célestes massifs tels que le Soleil. La courbure de la lumière peut donner l'impression qu'une étoile lointaine est plus éloignée du Soleil qu'elle ne l'est réellement. Pour Einstein, une éclipse permettrait de démontrer l'effet gravitationnel du Soleil sur la lumière des étoiles, parce que l'intensité lumineuse du Soleil a tendance à masquer les rayons lumineux qui viennent près de lui. Le 29 mai 1919, une éclipse solaire se produit et se profile contre les Hyades (amas d'étoiles) à proximité de notre système solaire (Brown et al., 1997). Deux expéditions furent organisées par la société as-

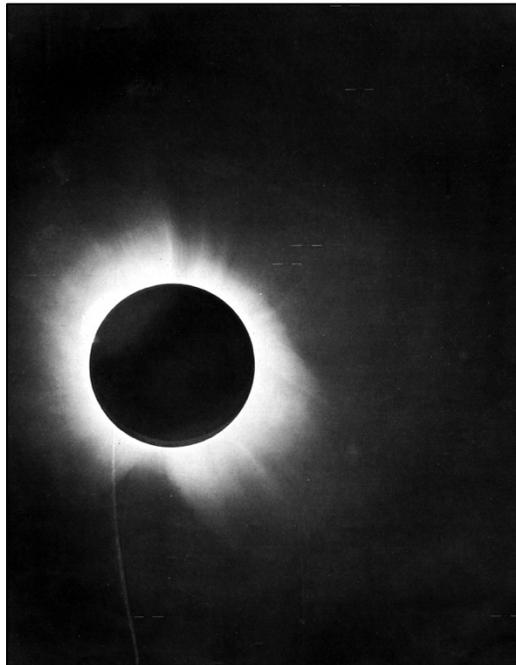


Figure 14. Image originale de l'éclipse tirée de Dyson, Eddington et Davidson (1919).

⁵⁶ Karl Schwarzschild (1873-1916) est un physicien allemand qui formule la première solution aux équations d'Einstein alors lorsqu'il est au front durant la première guerre mondiale (Einstein, 1916b).

tronomie royale de Londres afin d'observer les amas d'étoiles lors de cette éclipse. Les astrophysiciens Eddington, Cormmelin et Davidson se sont positionnés au large de la côte de l'île Principe (Afrique) et du Sobral (Brésil) et ont mesuré, en simultanément, le positionnement de la lumière des amas passant devant le Soleil au moment de l'éclipse. La figure 14 représente une photo de l'expédition astrophysique d'Eddington en Afrique pour vérifier la courbure de la lumière autour du soleil prédite par Albert Einstein. Les images obtenues ont été superposées à une image prise plus tôt durant l'année, ce qui a permis de repérer l'angle de déviation des rayons lumineux issus des amas d'étoiles qui passent à proximité du soleil. En d'autres mots, ce résultat a permis de confirmer les prédictions de la relativité générale (Einstein, 2012).

3.3.3.3 Les lentilles gravitationnelles

En 1936, Einstein a prédit que des *anneaux*⁵⁷ seraient produits lorsque deux galaxies sont presque parfaitement alignées, l'une derrière l'autre. Ce phénomène s'appelle *l'effet de lentille gravitationnelle* : les rayons lumineux provenant des galaxies lointaines sont déformés quand ces galaxies sont à proximité des galaxies super massives (amas de galaxies).

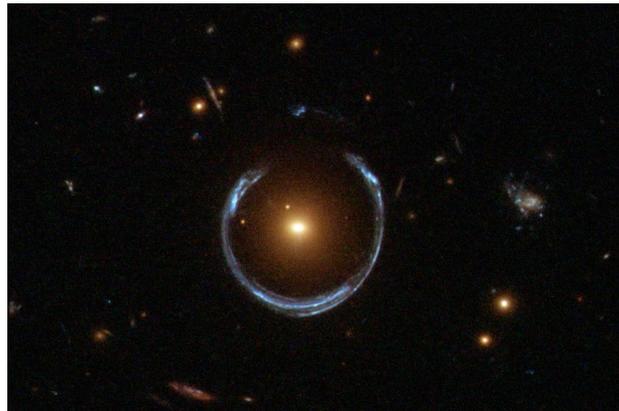


Figure 15. Lentille gravitationnelle du LRG 3-757

En 2007, une galaxie rouge lumineuse (LRG 3-757) a été découverte à l'aide du télescope Sloan Digital Sky Survey (SDSS)⁵⁸. L'image ci-dessus (figure 15) permet de constater que la gravité du LRG a déformé la lumière d'une galaxie bleue beaucoup plus éloignée, en formant des anneaux, tels qu'évoqués par Einstein. Des lentilles gravitationnelles permettent aux astronomes de déterminer la masse et la teneur en matière noire des lentilles de la galaxie de premier plan.

⁵⁷ Ces « anneaux » sont maintenant appelés *anneaux d'Einstein*.

⁵⁸ L'image ci-dessus est une image produite avec le *Wide Field Camera* du télescope spatial Hubble développé par la NASA. Source de l'image : <https://apod.nasa.gov/apod/ap111221.html>

3.3.3.4 Le géopositionnement par satellite

Les systèmes de GPS (géopositionnement par satellite ou Global Positioning System) prennent en considération les effets relativistes de la théorie de la relativité (restreinte et générale) d'Einstein. Le phénomène de la dilatation du temps, dû à la différence des vitesses des objets et de l'intensité des champs gravitationnels, doit être pris en considération par le GPS afin de faire des corrections temporelles nécessaires pour l'obtention des coordonnées d'un lieu avec un degré de précision élevé.

La configuration des GPS consiste en un réseau de 24 satellites en orbite autour de la Terre. Tous les satellites de la constellation GPS orbitent à une altitude d'environ 20 000 km du sol, à une vitesse orbitale d'approximativement 14 000 km / h. Chaque satellite transporte une horloge atomique dont la précision est de 1 nanoseconde (1 milliardième de seconde). Un récepteur GPS (dans un avion, dans un téléphone et dans une voiture) détermine sa position en comparant les signaux temporels qu'il reçoit des satellites GPS. La précision obtenue est remarquable : un simple récepteur GPS peut déterminer la position absolue à la surface de la Terre à moins de 5 à 10 mètres en quelques secondes seulement (Spagnou, 2017a).

Pour atteindre ce niveau de précision, le temps des horloges atomiques des satellites GPS doit être connu avec une précision de 20-30 nanosecondes. Cependant, comme les satellites sont constamment en mouvement par rapport aux observateurs sur la Terre, les effets prédits par la relativité restreinte et générale doivent être pris en compte pour atteindre une précision de 20-30 nanosecondes. D'après la relativité restreinte, les horloges atomiques dans les satellites en mouvement fonctionnent plus lentement par rapport aux horloges des observateurs au sol. De plus, elles devraient ralentir d'environ 7 microsecondes par jour par rapport aux horloges au sol. Ce ralentissement des horloges est dû à l'effet de dilatation du temps de leur mouvement relatif (Ashby, 2003). L'observateur au sol doit aussi prendre en considération la dilatation du temps gravitationnel due au fait que les horloges atomiques sont plus éloignées de la Terre que les horloges au sol. Les horloges des satellites gagneront plus de 45 000 nanosecondes par jour en raison de cet effet de relativité générale selon la métrique de Schwarzschild. La précision du système GPS est une preuve solide de la relativité restreinte et générale. Selon Butler (2015) et Teel (2015), l'effet de la relativité permet de conclure que les horloges atomiques des GPS auront un décroissement d'environ 38636 nanosecondes par jour. Ainsi, dans l'éventualité où la relativité d'Einstein serait ignorée, une erreur dans le positionnement pourrait atteindre jusqu'à 10km par jour (Norton, 2007).

3.3.3.6 La constante cosmologique et le Big Bang

Le « Big Bang » est un terme souvent employé pour désigner l'apparition de l'univers (Klein, 1999). L'expansion de l'univers (qui ramène à l'idée que l'univers a connu un instant zéro) a été

premièrement conçue dans le cadre de la relativité générale d'Einstein. En 1917, Einstein présente son premier modèle cosmologique relativiste. Afin de construire une solution décrivant un univers immuable et éternel, il introduit dans sa théorie de la gravitation un terme supplémentaire, compatible avec les principes de la relativité générale, la **constante cosmologique** (voir le paramètre encadré dans la formule suivante, la figure 16). Dans l'équation ci-dessous⁵⁹, les masses sont distribuées uniformément, l'état de l'espace est de courbure positive et la densité de matière reste constante au cours du temps (Bernardeau et Uzan, 2008).

$$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \Rightarrow G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

Figure 16. Équations d'Einstein de la relativité générale et la constante cosmologique

Friedmann⁶⁰ (en 1924) et Lemaître⁶¹ (en 1927, indépendamment de Friedmann) élaborent des solutions cosmologiques de la relativité générale en construisant un univers non-statique. Dans cet univers, l'espace devrait être en état d'expansion, par le fait que plus les galaxies sont lointaines, plus le spectre des galaxies observé sur la Terre sera décalé vers le rouge. Le modèle cosmologique de Friedmann-Lemaître représente un système mathématique pour un univers isotrope et homogène.

Cela signifie que l'Univers existe dans l'un des trois espaces suivants :

- S'il est plat, l'Univers s'étendra pour toujours à un rythme décroissant (Espace euclidien)
- S'il est sphérique, il est fermé et finira par s'effondrer (Espace sphérique)
- S'il est hyperbolique, il est ouvert et s'étendra pour toujours à un rythme croissant (Espace hyperbolique)

En 1924, en découvrant des céphéides (étoiles qui sont 4 à 15 fois plus massives que le Soleil) dans la nébuleuse d'Andromède, Edwin Hubble montre que les « nébuleuses spirales » sont en fait d'autres galaxies. Il remarque ensuite, avec Milton Humason, que plus une galaxie est lointaine, plus sa vitesse de fuite radiale est grande (Hawking, 1988a). Sa publication de 1929 montre que le décalage vers le rouge d'une galaxie est proportionnel à sa distance (Hubble, 1929). L'univers devait être selon

⁵⁹ Dans cette équation, Einstein relie la géométrie de l'espace-temps et son contenu en matière, où $\Lambda = 4\pi G\rho$ (la constante cosmologique) qui constitue une propriété intrinsèque de l'espace dans lequel G représente la constante de Newton et ρ , la densité d'énergie moyenne de la matière (Bernardeau et Uzan, 2008).

⁶⁰ Alexandre Friedman (1888-1925) est un physicien russe qui a développé l'un des premiers modèles cosmologiques.

⁶¹ Georges Henri Joseph Édouard Lemaître (1894-1966), un prêtre et un physicien français, qui a aussi développé l'un des premiers modèles cosmologiques.

lui en état d'expansion⁶². Les observations de Hubble étaient en accord avec les prédictions de Lemaitre de 1927 et de Friedman de 1924. Elles lui ont permis de calculer le taux d'expansion et *l'âge dynamique de l'Univers*⁶³ (Bernardeau et Uzan, 2008). Après la découverte de Hubble, Einstein retire la constante cosmologique de son équation puisqu'elle n'admet qu'un univers statique et immuable (Misner et al., 1973).

En 2012, le WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) de la NASA a permis d'estimer l'âge de l'univers à 13,772 milliards d'années (avec une incertitude de 59 millions d'années) (Bennett et al., 2013). Les conditions physiques des premiers instants qui ont suivi le Big Bang font l'objet de recherches internationales. Les chercheurs du CERN⁶⁴ (Le Conseil européen pour la recherche nucléaire), en utilisant un accélérateur appelé LHC⁶⁵ (Large Hadron Collider)(CERN, 2017), essaient de reproduire ces conditions.

3.3.3.7 Les trous noirs

Le trou noir⁶⁶ représente une « région de l'espace-temps dont rien, même pas la lumière, ne peut s'échapper, parce que la gravité y est trop forte » (Hawking, 1988b). Les trous noirs dans l'espace-temps se forment lorsque la matière s'effondre gravitationnellement sur elle-même⁶⁷. Selon Norton (2007), l'appellation « trou noir » est un peu problématique, car elle représente une image tridimensionnelle qui est en fait quadridimensionnelle. Il serait plus approprié, dit cet auteur, de parler de « boule noire » pour mieux conceptualiser la forme physique de cet objet céleste. Dans la relativité générale, on retrouve des singularités dans la structure de l'espace-temps qui, selon Barrau et Grain (2011), sont des points où la relativité générale s'effondre, puisque la courbure de l'espace-temps devient infinitésimale. Cela constitue l'une des conséquences les plus intéressantes de la relativité générale et amène à l'analyse de la structure et de l'impact d'un trou noir sur le cosmos (Hawking, 1988b)⁶⁸.

⁶² Les équations d'Einstein sans constante cosmologique résultent des solutions non-statiques et permettent alors à un espace dynamique d'exister (Einstein, 1916b).

⁶³ Par l'emploi de mesure indirecte, les études sur les supernovæ de type Ia ont donné une bonne description de la valeur de l'âge dynamique de l'univers (Hawking, 1988b).

⁶⁴ Il s'agit de la plus grande collaboration scientifique au monde, où on retrouve des milliers de scientifiques du monde entier y travaillent en vue de mieux comprendre les conditions physiques de hautes énergies.

⁶⁵ Le grand collisionneur de hadrons est considéré comme la machine la plus grande et la plus complexe au monde.

⁶⁶ Le terme « trou noir », paru dans les années 1960, est dû aux physiciens John Wheeler et Robert H. Dicke. Ce terme provient de l'analogie avec le *Trou Noir de Calcutta*, nom de la prison de l'ère du colonialisme britannique en Inde où les gens entraient mais ne sortaient jamais vivants (Herdeiro et Lemos, 2018).

⁶⁷ L'effondrement gravitationnel est défini comme la contraction des corps massifs sous l'effet de leur propre attraction gravitationnelle (Norton, 2007).

⁶⁸ Une belle illustration cinématographique d'un trou noir a été créée pour le film "Interstellar" en 2015 avec l'aide du physicien Kip Thorne. Ce trou noir, appelé Gargantua, a reçu une masse de 100 millions de Soleils et un taux de rotation

Plusieurs scientifiques reconnaissent la validité des trous noirs comme une part de la physique théorique et expérimentale⁶⁹. Cela n'a pas toujours été le cas, les théoriciens des décennies précédentes les ont considérés avec scepticisme⁷⁰. Aujourd'hui, le problème principal n'est pas de savoir si les trous noirs existent, mais de savoir dans quelle direction pointer les télescopes pour les observer. Ces objets célestes apparaissent soit comme des étoiles effondrées, soit comme des centres massifs de galaxies (voir la figure 17)⁷¹.

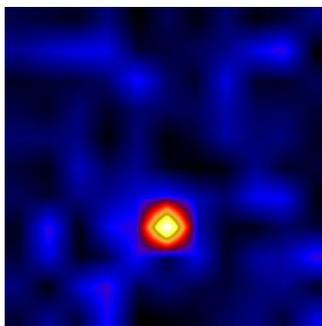


Figure 17. Le trou noir Cygnus X-1 (Image de la NASA)

3.2.3.8 Les ondes gravitationnelles

En 1916, en partant de l'idée qu'une charge électrique accélérée émet des ondes électromagnétiques, Albert Einstein formule qu'une masse pesante en mouvement accéléré émet des « ondes gravitationnelles » (Einstein, 1916a). Les solutions aux équations d'Einstein pour les ondes gravitationnelles ont démontré que les objets massifs en accélération⁷², se déplaçant à la vitesse de la lumière, créent des perturbations ondulatoires dans l'espace-temps. L'étude de ces ondulations permet d'obtenir des informations sur leurs origines cataclysmiques, ainsi que sur la gravité. Les scientifiques espèrent pouvoir détecter le rayonnement gravitationnel créé par le Big Bang.

En 1974, 20 ans après la mort d'Einstein, la découverte d'un pulsar binaire (deux étoiles extrêmement denses et lourdes en orbite l'une autour de l'autre) faite par deux astronomes, Russell Hulse

super élevé de 99,8% de la vitesse de la lumière. Avec cette vitesse de rotation, Gargantua est considéré comme un trou noir de type « Kerr » (Butler, 2015).

⁶⁹ En étudiant les trous noirs, plusieurs physiciens (Kerr, Schwarzschild, Reissner-Nordström, etc.) trouvent les solutions aux équations de la relativité générale. « Quand un trou noir tourne, mais est sans charge, on parle de trou noir de Kerr ; quand un trou noir ne tourne pas et est sans charge, on parle de trou noir de Schwarzschild ; quand un trou noir ne tourne pas, mais a une charge, il est décrit par la solution de Reissner-Nordström » (Sacco, 2017).

⁷⁰ Percy William Birgdmann, l'un des assistants d'Einstein, a postulé que de telles singularités avaient la possibilité de ruiner la solidité de la relativité générale (Norton, 2007).

⁷¹ Cette image radiographique de Cygnus X-1, qui est 33 fois plus massif que notre Soleil, a été prise par le « Balloon-Borne telescope » du projet HERO (High-Energy Replicated Optics) (Tremaine, 2002).

⁷² Tels que les étoiles à neutrons en orbite ou les trous noirs en orbite qui sont considérés comme les phénomènes les plus violents et les plus énergétiques de l'Univers.

et Joseph Taylor (à l'observatoire radio d'Arecibo à Puerto Rico), a permis de constater l'existence des ondes gravitationnelles (Damour, 2015; Hulse et Taylor, 1974). Le pulsar binaire, en tant que système physique violent, pourrait, selon la relativité générale, produire des ondes gravitationnelles. En se basant sur cette découverte, les astronomes (Hulse et Taylor) ont commencé à mesurer le changement de période de l'orbite des étoiles au fil du temps. Après huit ans d'observations, ils ont déterminé que si les étoiles produisent des ondes gravitationnelles, elles se rapprocheront les unes aux autres à un rythme équivalent à celui prévu par la relativité générale (car la production des ondes influencera la perte de l'énergie du système). Les observations de ce type de système par la synchronisation des émissions radio pulsars, menées pendant plus de 40 ans, et l'étude des phénomènes observés a permis aux astronomes d'affirmer l'existence des ondes gravitationnelles. Cependant, ces constats provenaient toujours des observations indirectes et d'analyses mathématiques des rayons électromagnétiques et non pas d'une observation directe de la déformation de l'espace.

Tout cela a changé le 14 septembre 2015 lorsque le LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) a détecté des ondes gravitationnelles générées par la collision de deux trous noirs, situés à une distance de près de 1,3 milliard d'années-lumière de la planète Terre (Abbott et al., 2016). Alors que les processus qui génèrent des ondes gravitationnelles peuvent être extrêmement violents et destructeurs, au moment où les ondes atteignent la Terre, elles perdent progressivement de l'intensité au cours de leur trajet et deviennent des milliards de fois moins intenses (Klein, 2016). Les instruments employés par le LIGO permettent de mesurer les variations de longueur (quantité d'oscillations spatio-temporelles) qui sont des milliers de fois inférieures à la taille d'un noyau d'atome. Les expériences menées au LIGO permettent de rendre compte de l'influence des théories einsteiniennes sur les pratiques scientifiques en physique actuelle.

3.4 Synthèse sur le concept

Celui ou celle qui veut mieux comprendre les développements technoscientifiques d'aujourd'hui bénéficie des connaissances issues de la physique moderne. La théorie de la gravité einsteinienne offre une explication à des questions simples, et en même temps fondamentales, telles que : Pour qu'elles raisons les objets tombent-ils? Pourquoi sommes-nous collés au sol? Pourquoi la Terre tourne-t-elle autour du Soleil et pourquoi la Lune demeure-t-elle en orbite autour de la Terre? La recherche de réponses à ces questions en classe ouvre les portes à l'apprentissage de plusieurs concepts de la physique tels que la masse, la gravité, l'accélération, le temps, la vitesse, l'énergie, la lumière et à l'établissement des relations entre eux. Les théories développées par Einstein sont donc cruciales pour comprendre le développement de la physique moderne et plusieurs des phénomènes

qui nous entourent. En effet, elles ont provoqué le progrès dans le développement de la physique moderne et ont permis l'émergence de nouvelles théories dans le domaine de la physique.

Le contenu de ce chapitre servira de base pour mieux comprendre les diverses implications de la gravité einsteinienne, présentées dans le chapitre suivant (chapitre 4), ainsi que des résultats d'étude des recherches menées sur leur enseignement, présentés dans le chapitre 5.

4. Implications des théories einsteiniennes

Dans ce chapitre, j'aborde les implications des théories einsteiniennes sur le développement des technologies, sur le développement du système cohérent de connaissances physiques et sur le développement de la pensée scientifique. Le contenu de ce chapitre correspond au second élément de la liste des éléments à étudier décrits dans la première phase de l'ingénierie didactique (voir le chapitre Méthodologie, section 2.2). Il me permettra de réfléchir sur la pertinence sociale, scientifique et éducative de l'enseignement des théories einsteiniennes.

4.1 Avancés technologiques

La société d'aujourd'hui est devenue beaucoup plus dépendante de la technologie qu'elle ne l'a jamais été en raison du développement rapide de la technologie informatique digitale (Milner-Bolotin et Johnson, 2017). Le numérique est omniprésent dans notre quotidien (Kaku, 2019⁷³). Les travaux d'Albert Einstein ont influencé le développement technologique du 20^e et 21^e siècle de façon importante et ont une empreinte sur notre compréhension de presque tout ce qui nous entoure. Dans cet ordre d'idées, Ed Gerck (2019) souligne que sans les principes de relativité restreinte, on ne pourrait pas décrire l'électromagnétisme et la lumière. Il serait par ailleurs difficile de concevoir la radio, la télé, les lasers et l'internet.

L'impact des théories d'Einstein sur le développement des sciences physiques (astrophysique, biophysique, physique théorique, physique de la matière condensée, etc.) a influencé le développement des technologies dans les domaines tels que la médecine, la sécurité nationale et la communication. La liste ci-dessus⁷⁴, ne présente que quelques implications importantes des théories einsteiniennes sur le développement des technologies d'aujourd'hui :

⁷³ Michio Kaku (né en 1947) est professeur de physique théorique (City College, New York, EU). Il est aussi auteur de plusieurs manuels sur la théorie des cordes et la théorie des champs quantiques. Il est largement connu en tant que vulgarisateur des sciences et de la physique. <https://www.youtube.com/watch?v=Qo9aUY17M58>

⁷⁴ Dans cette description des applications de travaux d'Einstein, je me réfère à Isaacson (2007) et Stannard (2015).

- L'électronique : transistors, diodes, mémoire vive, ordinateurs, téléphones portables, ACL⁷⁵, DEL⁷⁶, CCD⁷⁷, panneaux solaires;
- Les satellites : GPS (navigation terrestre et spatiale), industrie de la télécommunication;
- Les lasers : DVDs, CDs, Bluray, spectroscopie résonance magnétique, fluorescence rayons X, cristallographie aux rayons X, spectroscopie infrarouge, spectroscopie ultraviolet-visible;
- Les instrumentations scientifiques : IR, spectroscopie UV, microscope électronique;
- Les horloges ultras précises : horloge atomique à l'hydrogène, au césium et au rubidium, horloge à safran;
- La médecine : IRM, SQUID⁷⁸, TEP⁷⁹, rayons X nucléaires, microscopes électroniques;
- Les micro-ondes : radar.

Cardona (2005) affirme qu'Einstein n'est pas seulement le père de la théorie de la relativité générale et restreinte, mais aussi le père de la physique de la matière condensée et liquide. Dans l'article de 1907⁸⁰, Einstein décrit l'effet des vibrations du réseau (la chaleur spécifique) sur les propriétés thermodynamiques des cristaux. L'ampleur des implications de cette relation masse-énergie a provoqué les expérimentations et l'étude du comportement des atomes de différentes matières. Par conséquent, dit cet auteur, les théories de la relativité ont aussi influencé le développement des domaines tels que la chimie et la biologie.

Aujourd'hui, on peut voir jusqu'à quel point les théories d'Einstein interviennent dans le développement des technologies numériques et de la nanotechnologie. Par exemple, dans les vingt dernières années, l'étude des *métaux des terres rares*⁸¹ représente un énorme défi pour la physique

⁷⁵ Affichage à cristaux liquides ou LCD (liquid crystal display).

⁷⁶ Diode électroluminescente ou LED (light-emitting diode). Les DEL sont utilisés dans plusieurs applications liées à l'éclairage (signalisation routière, feux arrière de voitures, signalisation ferroviaire, éclairage invisible pour caméras de surveillance (dans l'infrarouge), éclairage urbain, etc.), à l'affichage et à la source de lumière quasi monochromatique (photocoupleur, transmission de signaux par fibre optique, télécommandes (LED infrarouges), cellules photoélectriques (LED infrarouges), faisceau laser pour les appareils de mesure, faisceau laser pour la lecture et la gravure des CD et DVD, etc.) Cette invention est due à Oleg Vladimirovich Losev (1903-1942) qui a utilisé la théorie quantique d'Einstein. Le processus d'émission de la diode électroluminescente, a d'abord été désigné par l'expression l'*effet photoélectrique inverse* par son inventeur (Zheludev, 2007).

⁷⁷ *Charged Coupled Device* ou un dispositif à transfert de charge. Le processus fondamental derrière les CCD emploie l'effet photoélectrique d'Einstein (la façon dont les signaux optiques sont convertis en signaux électriques) (Encyclopedia, 2005).

⁷⁸ Le SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) est un appareil qui sert à détecter les champs magnétiques très faibles (K' doah Range, Spencer et Kahn, 2004).

⁷⁹ La tomographie par émission de positons : Les scanners TEP et les diagnostics similaires utilisés dans les hôpitaux, utilisent les principes développés par la relativité restreinte. La TEP est utilisée dans les domaines de la neurologie (étude du cerveau), de la cardiologie (étude du cœur) et de l'oncologie (cancer) (Encyclopedia, 2006).

⁸⁰ « Planck's theory of radiation and the theory of the specific heat » (Einstein, 1907).

⁸¹ Ce sont 17 éléments qui possèdent des propriétés extraordinaires, telles que des formes exotiques de magnétisme et de supraconductivité. Ces métaux sont utilisés abondamment dans la fabrication des produits de haute technologie tels que les batteries de voitures électriques et hybrides ainsi que dans l'électronique (Strange, 1998).

théorique. Les éléments de *terres rares* sont des matériaux importants utilisés dans plusieurs des technologies modernes, en particulier dans les ordinateurs et dans les industries des semi-conducteurs et des super-conducteurs. Les techniques et les instruments de mesure permettant l'étude de ces éléments sont fondés sur les principes de la relativité d'Einstein (Strange, 1998).

Selon Milner-Bolotin et Johnson (2017), le développement technologique rapide et notre dépendance technologique au cours des dernières années présentent un réel défi pour le système éducatif et surtout pour notre société. Étienne Klein (2008) souligne que les connaissances scientifiques nécessaires pour comprendre le monde d'aujourd'hui sont l'une des composantes fondamentales de l'éducation des citoyens et en particulier de la formation des scientifiques, bien qu'elles « ne font pas partie du savoir commun » ou de la culture générale de la société. Quirion (2018) affirme que pour jouer un rôle actif dans ce monde où la science est omniprésente, les jeunes ont besoin d'une riche culture scientifique, car ce sont eux qui feront partie de la prochaine génération des chercheurs qui contribueront à apporter des solutions aux grands défis de société telles que les changements climatiques et la cybersécurité. « Il est donc important – et urgent ! – de stimuler l'intérêt des jeunes pour toutes les disciplines scientifiques, afin qu'ils puissent acquérir les habiletés requises pour s'adapter et contribuer à la société de demain » (Quirion, 2018).

La révolution scientifique⁸² occasionnée par les travaux d'Einstein a mené à un changement de paradigme et à une nouvelle conception de l'astronomie, de la lumière, du temps, de l'espace, de la géométrie et de plusieurs autres phénomènes physiques. Il n'est pas possible de parler des fondements de la physique moderne sans parler des théories d'Einstein. Les théories d'Einstein (la relativité, la physique quantique, par exemple) sont allées au-delà d'une simple vérification expérimentale (cette vision ne permet qu'un point de vue instrumental de la science). Elles ont atteint aussi le véritable but de la science, qui est de permettre une meilleure représentation de notre monde (Deutch, 1997). Comprendre les fondements des théories einsteiniennes (la relativité, la physique quantique, la matière condensée) est une étape révélatrice pour comprendre le développement de la technologie et des théories qui fondent notre compréhension de l'univers. Plusieurs scientifiques considèrent qu'accroître l'intérêt des jeunes pour les sciences doit se faire avec les théories einsteiniennes parce qu'ils sont incontournables dans la physique moderne. Pour eux, enseigner les théories qui représentent notre meilleure compréhension de l'univers, comme les théories d'Einstein, est essentiel au développement de la pensée scientifique, surtout quand elles sont employées dans diverses applications au quotidien.

⁸² Terme employé par plusieurs scientifiques (Kuhn, 1970; Norton, 2007; Popper, 1977; Smolin, 2006, 2019).

4.2 Système cohérent des connaissances physiques

Les théories d'Einstein remettent en question les concepts physiques établis jusqu'alors. Elles créent les fondements de la physique quantique (en avançant une idée que la lumière peut agir comme une onde et comme une particule) et de la thermodynamique moderne (en démontrant que la matière est constituée d'atomes). Elles mettent de l'avant le concept de l'énergie ($E = mc^2$), l'idée que le temps absolu n'existe pas, que l'espace-temps est incurvé et que la force gravitationnelle n'est que l'expression de la déformation de l'espace-temps. Einstein dit que

[1] l'influence de la théorie de la relativité dépasse de loin le problème dont elle est issue. Elle supprime les difficultés et les contradictions de la théorie des champs ; elle formule des lois mécaniques plus générales ; elle remplace deux lois de conservation par une ; elle modifie notre concept classique de temps absolu. Sa validité n'est pas limitée à un seul domaine de la physique ; elle forme un cadre général englobant tous les phénomènes de la nature (Einstein, 1942).

La gravité einsteinienne relie plusieurs concepts physiques et les explique en s'éloignant du cadre newtonien. Le cadre newtonien est une vision du monde qui ne change jamais, qui est toujours la même, quel que soit l'observateur. Elle ne tient pas compte de la relation de l'observateur avec le connu (Kincheloe, Steinberg et Tippins, 1999). La physique einsteinienne réside dans un changement de perspective de l'observateur. De plus, la perspective einsteinienne est un point de vue humain, dans lequel ce que perçoit une personne peut se distinguer de ce que perçoit une autre personne et dépend des conditions des observations (Kincheloe et al., 1999).

La gravité, en tant que force fondamentale, est considérée comme un élément essentiel permettant de mieux comprendre l'univers. À partir du questionnement sur la causalité des règles de la nature (forces fondamentales)⁸³ qui régissent le monde (voire la gravité), on peut traiter les concepts-clés qui font partie de l'ensemble de la structure de l'univers et aborder les principes fondamentaux physiques qui, selon Einstein, « représentent la simplicité, l'universalité et l'harmonie » (Einstein et Infeld, 1938).

En référant aux propos d'Einstein suivants « the object of all science, whether natural science or psychology, is to coordinate our experiences and to bring them into a logical system » (Einstein et Adams, 1923), je représente, par l'intermédiaire de la figure 18, le concept de la gravité en tant que concept charnière reliant les différents concepts de la relativité d'Einstein.

⁸³ Pourquoi les objets tombent? Pourquoi sommes-nous collés au sol? Etc.

Cette figure montre qu'en partant du concept fondamental (la gravité), on peut accéder à l'étude des autres concepts de la relativité d'Einstein provenant de deux théories (restreinte et générale). Sans diviser l'étude des théories einsteiniennes en deux études séparées (relativité restreinte et générale) et sans les présenter en ordre chronologique de leur apparition, on peut partir de l'étude de la gravité à ses réels effets en évitant cette tournure chronologique des événements dans le développement de la relativité.

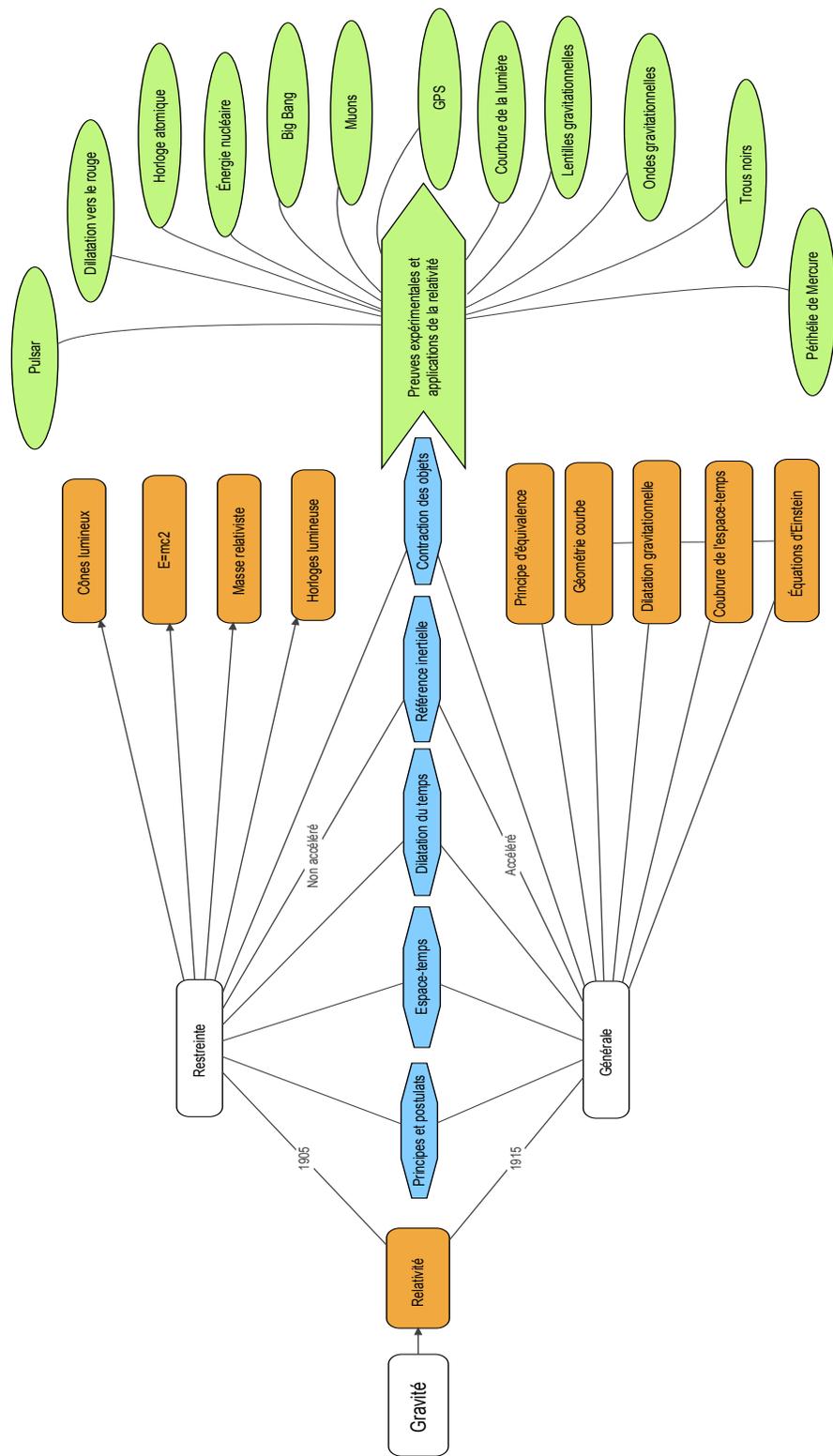


Figure 18. Schéma conceptuel de la gravité einsteinienne

Cette représentation permet d'observer synthétiquement une structure intégrale du corps des connaissances, de différents concepts-clés qui font partie de la relativité (restreinte et générale), ainsi que des liens entre eux. La carte conceptuelle fait aussi référence à des preuves expérimentales et aux applications des concepts einsteiniens. Cette carte conceptuelle n'est pas exhaustive, d'autres éléments peuvent y être ajoutés. Elle tient compte des concepts-clés abordés dans le chapitre 3.

4.3 Théories d'Einstein et le développement de la pensée scientifique

La question « Comment les connaissances physiques se construisent-elles ? » intéressent les chercheurs travaillant dans le domaine de didactique de la physique. Bien que le rôle de l'expérience et du raisonnement qui participent à la construction des connaissances est largement étudié dans les recherches menées dans ce domaine, il y a aussi des éléments qui sont peu explorés. Dans cette section, je mets de l'avant quelques réflexions sur le développement de la pensée scientifique dans l'apprentissage des concepts einsteiniens. Je tire profit des ouvrages sur les travaux d'Einstein afin de documenter les contextes dans lesquels les concepts einsteiniens ont été créés. J'aborde le doute, la créativité et l'imagination vus par plusieurs physiciens comme éléments nécessaires à la construction de concepts einsteiniens et au développement de la pensée scientifique.

4.3.1 La connaissance et le développement de la pensée scientifique

Plusieurs scientifiques se prononcent sur la nature provisoire des connaissances scientifiques (Bachelard, 1934; Feynman, 1988; Kuhn, 1970; Kuznetsov, 1960; Norton, 2007; Smolin, 2019). Soler (2009) décrit la physique et plus généralement la science comme une « forme de connaissance tenue pour vraie et fondée, mais pas pour universelle » (p.6). Bien que certaines connaissances scientifiques perdurent pendant une longue période, elles ne sont jamais absolues (Lederman et Lederman, 2004). Osborne, Simon et Collins (2003), expliquent ce phénomène d'incertitude des connaissances scientifiques par leur nature : elles sont intrinsèquement inférentielles, subjectives, créatives et culturelles.

La gravité d'Einstein n'est pas un système fermé de connaissances; nous n'en connaissons encore que très peu sur l'univers. De plus, les scientifiques s'appuient sur les principes développés afin de poser de nouvelles questions issues du développement de la physique d'aujourd'hui. Ils les mettent à l'épreuve dans les nouvelles situations et les questionnent. « We do research because we do not know the answer », dit Smolin (2019). L'esprit scientifique selon Bachelard (1934) est une réponse à une question. « S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit » (p.17). C'est à ce niveau, selon Bachelard, que l'esprit

scientifique se développe. Le doute et le questionnement jouent alors un rôle central dans le développement de l'esprit scientifique.

Le scientifique a une grande expérience avec l'ignorance, le doute et l'incertitude, et cette expérience est d'une importance considérable dans le développement de la science (Feynman, 1988). Feynman soutient que le fait de reconnaître l'ignorance et de laisser la place au doute est important pour faire progresser la science.

When a scientist doesn't know the answer to a problem, he is ignorant. When he has a hunch as to what the result is, he is uncertain. And when he is pretty darn sure of what the result is going to be, he is in some doubt. We have found it of paramount importance that in order to progress we must recognize the ignorance and leave room for doubt. Scientific knowledge is a body of statements of varying degrees of certainty—some most unsure, some nearly sure, none *absolutely* certain. (Feynman, 1955, p. 4)

Dans le même ordre d'idées, Kuznetsov (1960) souligne que le passage de l'ignorance à la connaissance correspond à une étape cruciale dans le développement des sciences et de l'histoire. Selon lui, le mot ignorance, du moins en partie, peut être utilisé intentionnellement d'une manière provocatrice en science. Ce physicien envisage ce type d'ignorance par l'absence de faits, de compréhension, de perspicacité ou de clarté au sujet de quelque chose. Pour lui, il ne s'agit pas d'un manque individuel d'information, mais de cas où les données n'existent pas ou encore, lorsqu'elles existent, ne peuvent pas être utilisées pour prédire un événement. D'après Kuznetsov (1960), c'est l'ignorance bien informée qui nous conduit à nous poser des questions.

Le développement conceptuel scientifique peut être traité en termes de «révolution» plutôt que d'«évolution» (Kuhn, 1970), c'est-à-dire comme un processus discontinu où les remises en question sont à la source de la production de nouvelles connaissances. De plus, le scientifique, selon Kuhn, est souvent confronté à des problèmes qu'il ne peut pas résoudre avec les modèles établis et, par conséquent, doit innover pour dépasser les connaissances acceptées. En plus de cela, Percy William Bridgman⁸⁴ souligne que le développement des théories d'Einstein permet de formuler un constat, quant à la nature des concepts scientifiques : une nouvelle expérience est toujours possible. Si nous ne sommes pas en mesure de l'intégrer dans notre système conceptuel, c'est peut-être en raison de fausses présomptions qui s'y cachent (Norton, 2007).

Einstein accordait une importance particulière à la créativité. Pour changer les paradigmes et remettre en question les théories existantes, il faut avoir un esprit scientifique non-conforme et aller

⁸⁴ Percy William Bridgman (1882-1961), un physicien expérimental, assistant d'Einstein et lauréat d'un prix Nobel.

parfois contre le bon sens. De même, la créativité exige, pour lui, un esprit de tolérance envers des idées qui peuvent paraître controversées (Kuznetsov, 1960).

John Norton, un philosophe en sciences physiques qui a beaucoup travaillé sur les théories d'Einstein, considère le bon sens comme un guide peu fiable de la vérité. Il indique que la théorie de la relativité est un bon exemple de cela. L'évolution de la science montre qu'il y a plusieurs cas où la science a révélé sa fragilité sur les idées de bon sens. Par exemple, Copernic a changé l'idée selon laquelle la Terre est au repos; il a déclaré que la Terre tourne à grande vitesse sur son axe dans le sens antihoraire. Selon Norton (2007), ces idées de bon sens sur notre monde physique connu par la population, en général, ne sont que la dernière étape de la réception des résultats de la recherche scientifique. C'est pourquoi, dit cet auteur, que ce bon sens d'aujourd'hui est la percée scientifique d'hier (Norton, 2007).

Selon John Norton, la relativité nous montre que même les meilleures théories physiques, comme celle de la mécanique classique de Newton, ne sont pas fiables. Il pose la question qu'on entend souvent dans le discours sur la pertinence d'enseigner les théories einsteiniennes : Pourquoi devrions-nous mettre autant d'importance sur les théories de la physique moderne, si les théories ne sont pas fiables? Selon Norton (2007), ne devrions-nous pas nous attendre à ce que les « Einsteins » du futur renversent toutes les théories existantes à ce jour? Pour ce chercheur, cet argument est « lamentable » parce qu'il repose sur de fausses prémisses. La théorie de la relativité n'a pas effacé toute la physique qui existait avant elle. Une grande partie de la mécanique classique est à ce jour intacte. Les révolutions scientifiques fournissent des ajustements et des précisions aux théories qui ont été développées antérieurement (par exemple, à la géométrie d'Euclide, à l'astronomie de Copernic et de Kepler, à la mécanique newtonienne, etc.). Le développement de la science repose toujours sur la recherche des faiblesses des théories existantes. Par conséquent, de meilleures théories seront développées par la communauté scientifique et finiront par être adoptées (Norton, 2007).

En cherchant à mieux comprendre la nature, les scientifiques mettent en question les théories existantes, puis créent de nouveaux modèles afin de mieux comprendre la réalité. Plusieurs expérimentations, réalisées par différents acteurs sont nécessaires pour examiner la viabilité de ces modèles afin de participer à la stabilisation et à la solidification de la réalité expérimentale (Soler, 2009). À ce jour, on utilise la théorie de la gravité d'Einstein dans plusieurs domaines, surtout en astrophysique et l'on continue d'élaborer de nouvelles lois et de découvrir des nouveaux phénomènes (comme, par exemple, la découverte expérimentale des ondes gravitationnelles prédites par Einstein). La relativité d'Einstein a maintenant plus de 100 ans. En dépit du fait qu'il y a eu des expériences expérimentales qui ont été faites sur le sujet, il y a encore plusieurs questions qui demeurent.

4.3.2 Le rôle de l'imagination dans le développement des idées scientifiques

La créativité et l'imagination sont au cœur du développement des sciences physiques (Sepper, 2009). Einstein déclare que « l'imagination est plus importante que la connaissance. La connaissance est limitée. L'imagination entoure le monde » (Viereck Sylvester, 1929, p. 117). Les théories d'Einstein ont d'énormes implications relativement à la façon dont on les emploie pour comprendre la réalité et, par conséquent, pour enseigner des concepts physiques (matière, énergie, temps, atomes, lumière).

Dans l'ensemble, les physiciens de l'époque croyaient volontiers que les concepts fondamentaux et les lois fondamentales de la physique ne constituent pas, au sens logique, des créations spontanées de l'esprit humain, mais plutôt qu'on peut les déduire des expériences par abstraction, donc, par une voie de logique. En fait, seulement la théorie de la relativité générale a clairement reconnu l'erreur de cette conception. Elle a prouvé qu'il était possible, en s'éloignant énormément du schéma newtonien, d'expliquer le monde expérimental et les faits, de façon plus cohérente et plus complète que le schéma newtonien ne le permettait. (Einstein et Solovine, 1958, p. 164)

Einstein a développé ses théories à l'aide de l'imagination, par l'utilisation des images et de l'« expérience de pensée ». Leur description en mots et à l'aide de formules était une étape secondaire (Pais, 1982). Einstein déclare aussi qu'aucun scientifique ne pense à partir d'équations pour arriver à la résolution de problèmes scientifiques (Einstein et Infeld, 1938, p. 312). À cet égard, en 1922, dans l'une des conférences lors d'une tournée effectuée au Japon, Albert Einstein a tenté de décrire le fonctionnement du cerveau lorsqu'on fait les mathématiques et la physique. En discutant de ses processus de pensée intuitifs, il a indiqué qu'il utilisait des images pour résoudre les problèmes et qu'ensuite, il trouvait des mots pour décrire les processus (Pais, 1982). Feynman (1988)⁸⁵ écrit que ses pensées ne se manifestaient pas sous forme de chiffres et de signes disposés de gauche à droite comme ils sont habituellement disposés sur papier, mais prenaient des couleurs.

En ce qui concerne notre sujet d'étude, l'imagination dans le développement de la théorie einsteinienne, ainsi que dans son apprentissage est centrale. Le grand défi de l'enseignement de la gravité einsteinienne, d'après Bachelard, est de savoir comment le processus d'apprentissage se déroule et se manifeste chez les élèves, car la compréhension des principes de cette théorie exige des abstractions audacieuses qui vont à l'encontre de la physique classique enseignée à l'école (Bachelard, 1934).

⁸⁵ Richard Philips Feynman (1918-1988) est un physicien américain connu pour ses travaux sur la formulation intégrale du chemin de la mécanique quantique, la théorie de l'électrodynamique quantique, la physique de la superfluidité de l'hélium et les quarks (Encyclopedia, 2008f).

Bien que les concepts einsteiniens aient une base empirique, ils réfèrent à l'imagination et à la créativité d'Einstein. Par exemple, les concepts d'énergie, de temps, de trous noirs, de force et plusieurs d'autres, qui font partie des théories relativistes, sont d'abord les produits de réflexion et d'imagination (expérience de pensée). La visualisation donc sera un outil important participant à la compréhension de concepts-clés et de relations entre ces concepts, ainsi qu'au développement de la créativité de l'élève.

Selon Russel⁸⁶ (1925), pour apprendre les concepts einsteiniens, « il faut changer l'image imaginative que nous avons du monde - une image qui nous a été transmise par des ancêtres lointains et qui a été apprise par chacun d'entre nous dès notre enfance⁸⁷ » (p.9). Russel mentionne qu'à l'âge adulte, il nous faut faire un certain effort de reconstruction imaginative (Russell, 1925). Cependant, ce même type de changement a été exigé à l'époque par Copernic, qui a enseigné que la Terre n'est pas statique et qu'elle fait un tour sur elle-même une fois par jour. En ce qui concerne cette connaissance de la Terre, aujourd'hui, nous n'avons aucune difficulté avec elle, car nous l'avons apprise dès le jeune âge. De ce fait, les idées d'Einstein sur la relativité, de même, sembleront plus accessibles aux générations qui grandissent avec elles (Russell, 1925).

Une analyse des études longitudinales à grande échelle, couvrant les 50 dernières années, faites par Hodgkiss, Gilligan, Tolmie, Thomas et Farran (2018), montre que la capacité spatiale à l'adolescence est en lien avec la réussite en sciences, technologie, ingénierie et en mathématiques (STEM). En s'appuyant sur les développements en neuroscience cognitive, Hodgkiss et al. (2018) ont mené une étude sur la relation entre différents aspects de la capacité spatiale et la réussite des enfants du primaire en sciences. Leur étude montre que les compétences spatiales de type extrinsèques – dynamiques (qui impliquent la transformation de la relation entre les objets, ou la relation entre les objets et les cadres de référence) peuvent soutenir l'apprentissage et le raisonnement dans des domaines de la science conceptuelle telle que l'astronomie et la mécanique.

Archambault et Venet (2007) présentent l'imagination en tant qu'un mode de pensée et une part de la pensée créatrice. En référant à la théorie de Vygotsky⁸⁸, les auteures indiquent que l'imagination est considérée comme une partie du fonctionnement de notre pensée. Il s'agit d'une fonction mentale supérieure, qui se construit progressivement en interaction avec d'autres fonctions mentales d'ordre intellectuel (mémoire, pensée verbale, etc.) grâce aux interactions sociales vécues dans un

⁸⁶ Bertrand Arthur William Russell (1872-1970) est un philosophe anglais, un mathématicien, un logicien, un épistémologue, un homme politique et lauréat d'un prix Nobel (Encyclopedia, 2008b).

⁸⁷ Traduction libre de l'anglais.

⁸⁸ Lev Vygostky (1896-1934) est un psychologue russe, connu pour l'élaboration de la psychologie du développement et de la théorie historico-culturelle du psychisme (Encyclopedia, 2008e).

environnement socioculturel. Ces auteurs écrivent qu'à l'adolescence, l'imagination se libère de sa dimension essentiellement concrète pour se rapprocher de la pensée abstraite. Les images mentales créées précédemment deviendront des outils au service de l'imagination qui sera plus orientée vers la production d'innovations scientifiques et techniques. L'imagination jouera un rôle important dans le développement individuel en général, et scientifique en particulier. Compte tenu de l'âge scolaire représentant un moment clé du développement selon Vygotsky, l'école a un rôle important à jouer afin de développer l'imagination chez l'élève.

4.3.3 Quelques réflexions sur les approches de l'enseignement

Les différents éléments présentés dans les sous-sections précédentes m'amènent à réfléchir aux approches de l'enseignement de la physique moderne.

Von Glasersfeld (2003) souligne qu'il y a une différence entre l'enseignement des mathématiques et de la physique. En mathématique, on met à contribution des règles conçues par des mathématiciens tandis qu'en physique on utilise des modèles pour une représentation de l'univers. Cet auteur précise que les modèles physiques tels que le modèle de l'atome de Bohr et la structure quadridimensionnelle de l'univers d'Einstein doivent être vus comme des modèles limités plutôt qu'une représentation complète de l'univers. Il est donc essentiel à l'enseignant d'établir clairement cette distinction (von Glasersfeld, 2003).

Etienne Klein⁸⁹ souligne que dans l'enseignement des théories einsteiniennes, il importe d'adopter une approche qui éclaire comment les démarches des scientifiques se déploient et produisent parfois de véritables chocs pour la pensée (Dautresme et Klein, 2015).

Einstein a fait valoir que la physique ne devrait pas être enseignée comme une batterie de concepts et de techniques que les élèves doivent mémoriser. L'enseignement, selon lui, doit être inspiré par sa conception de l'apprentissage et du développement des idées scientifiques où les élèves doivent être encouragés à contester les significations acceptées (Kincheloe et al., 1999).

Aurélien Barrau⁹⁰, dans ses cours de physique théorique, emploie une approche semblable au *constructivisme radical*⁹¹ : « Je suis là pour vous déranger, pour vous empêcher d'être tranquilles dans

⁸⁹ Etienne Klein est un physicien, philosophe, écrivain connu pour ses romans scientifiques et vidéos sur youtube.

⁹⁰ Aurélien Barrau est un physicien, philosophe, écrivain et activiste. Il est connu pour ses livres, son manuel sur la relativité générale, ses cours de physique sur youtube et sa recherche sur les astroparticules, les trous noirs et la cosmologie.

⁹¹ Le constructivisme radical, développé par Ernst von Glasersfeld, est une théorie de la connaissance dans laquelle la connaissance ne reflète pas une réalité ontologique « objective », mais concerne exclusivement la mise en ordre et l'organisation d'un monde constitué par notre expérience (Glasersfeld, 1989, p. 27). Pour von Glasersfeld, le constructivisme radical introduit une nouvelle relation, plus tangible, entre connaissance et réalité, relation qu'il appelle «viabilité» (von

vos charentaises de physicien, de biologiste, d'informaticien, de mathématicien et de chimiste » (Barrau, 2017b, 17min:50sec)⁹². L'exemple ci-dessus peut sembler trivial, mais il existe des débats sur le processus par lequel les élèves (et les étudiants) construisent de nouvelles connaissances en physique. Piaget nous dit que les élèves cherchent constamment à atteindre un équilibre interne entre leurs connaissances préconçues et leur propre expérience (Piaget, 1955). Le nouveau sens se construira chez l'élève lorsque son équilibre est ébranlé et la connaissance préalable est rejetée ou ignorée. Le constructivisme radical apporte une suggestion:

Before they begin to develop another way of thinking, they have to disequilibrate. We have to calculate to say and do things, to bring their attention to things that do not fit their realist explanations of their world, i.e., things that do not make sense to them... We cannot afford to let the risk of being written off deter us from our efforts to induce disequilibrium. Without disequilibrium, no change in understanding happens (Dykstra, 2007, p. 55).

Von Glasersfeld (2001) avance une autre hypothèse intéressante concernant le niveau et la source de motivation pour apprendre les sciences. Il souligne que la motivation pour apprendre dépend fortement de la confiance de l'apprenant en son potentiel d'apprentissage. Ceci est lié à la « zone de développement proximal » de Vygotsky, dans laquelle les apprenants sont mis au défi à proximité de leur niveau de développement actuel, mais légèrement au-dessus. En apprenant à mener à bien des tâches difficiles, les apprenants gagnent en confiance et en motivation pour se lancer dans des défis plus complexes (Vygotski et Jannel, 2018).

Selon Lederman et Lederman (2004), la recherche scientifique ne renvoie pas à une seule caractéristique expérimentale et peut prendre d'autres formes, telles que descriptive et corrélative. Cela va de même avec les propos de Vygotsky qui souligne l'importance de mettre en évidence les relations réciproques entre le langage et le développement de pensées abstraites. En utilisant par exemple les discussions et les tâches d'écriture comme outils cognitifs, les élèves peuvent « parler de physique » afin de mieux comprendre les concepts abstraits relativistes (Kersting et al., 2018; Kersting et Steier, 2017). L'analyse de la façon dont les étudiants en physique parlent de la gravité et de l'espace-temps permet de comprendre comment les apprenants adaptent leurs sensations corporelles aux modèles physiques et mathématiques de la gravité. Le processus d'enseignement en tant que communication linguistique doit changer la manière d'impliquer les étudiants dans la construction de leurs connaissances (von Glasersfeld, 1994, p. 22).

Glasersfeld, 1994, p. 22). Le processus d'enseignement en tant que communication linguistique, dit-il, doit changer la manière d'impliquer les étudiants dans la construction de leurs connaissances.

⁹² L'extrait de cette citation est à du cours tout public d'Aurélien Barrau.

En supposant que la compréhension des concepts abstraits repose sur des expériences incarnées, cela suggère que les formes langagières seront plus que des outils linguistiques : les analogies sont des caractéristiques fondamentales de la pensée et de l'esprit (Hofstadter, 2013). Selon Licato (2015), la capacité de raisonner analogiquement est un marqueur central de la cognition humaine. L'analogie implique la réorganisation et la création des connaissances structurelles, un type particulier de construction cognitive communément comprise comme résidant purement dans le domaine de la connaissance déclarative.

Comme on l'a vu dans cette section, le défi de l'enseignement de la physique einsteinienne nécessite l'emploi de modèles et d'analogies pour décrire la gravité einsteinienne. Une analogie peut bien fonctionner lorsqu'elle répond à son objectif, à savoir mettre en exergue des aspects d'un concept abstrait. Pour qu'une analogie réussisse à rendre compte des caractéristiques d'un concept, la représentation doit faire des liens avec les expériences sensorielles des apprenants (Hofstadter et Sander, 2013). En ce sens, il est important de réfléchir à des modèles permettant de saisir les concepts abstraits en termes d'autres domaines de l'expérience afin d'offrir aux élèves une possibilité de s'engager dans une science qui n'est pas « prête à l'emploi », mais un espace vivant dans lequel ils peuvent eux-mêmes s'engager (Clough, 2006). Enfin, puisque la compréhension des subtilités de la physique est un long processus, plusieurs chercheurs (voir entre autres Ford, 1989; Gafoor, 2010) soulignent qu'il est pertinent d'introduire les élèves à la démarche de « pensée expérimentale » (*thought experiment*) ou de « réflexion scientifique » à partir d'un jeune âge.

5. L'enseignement de la gravité einsteinienne

L'insertion de la physique moderne dans les programmes scolaires est un sujet qui préoccupe plusieurs chercheurs dans le domaine de l'éducation. Cependant, jusqu'à présent, peu de pays ont introduit ces théories dans les programmes d'études⁹³. Bien qu'on puisse constater un intérêt croissant⁹⁴ pour l'enseignement de la physique einsteinienne, les recherches menées sur l'enseignement sont relativement peu nombreuses (Kaur, Blair, Moschilla, Stannard et Zadnik, 2017b). Elles partagent la vision selon laquelle l'éducation aux sciences doit contribuer à une meilleure compréhension de l'univers par l'élève, plutôt qu'à l'apprentissage de concepts en vigueur au 18^e siècle. Plusieurs chercheurs affirment que la gravité einsteinienne peut être enseignée à tous les niveaux scolaires et qu'il est préférable de l'enseigner avant la physique newtonienne. Les résultats de ces recherches montrent que les élèves apprécient les expériences éducatives leur permettant de mieux comprendre les phénomènes scientifiques et de faire des liens avec le fonctionnement et le développement des technologies actuelles (Blair, 2019a; Boyle, 2019c, 2019b, 2019a; Foppoli, Choudhary, Blair et Kaur, 2018; Kaur, 2018; Kaur, Blair, Burman et al., 2017; Kaur, Blair, Moschilla et al., 2017c, 2017b, 2017a; Kersting et al., 2018; Pitts et al., 2014).

Récemment⁹⁵, une cinquantaine de professeurs-chercheurs et de physiciens se sont réunis, pour la première fois, lors d'un congrès axé sur l'enseignement de la relativité générale (*General Relativity as a Challenge for Physics Education*). Organisé par les chercheurs Ute Kraus et Corvin Zahn ainsi que par la Fondation Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, ce congrès d'une durée d'une semaine a eu lieu au Physikzentrum à Bad Honnef en Allemagne. L'événement visait à faciliter les échanges quant à l'enseignement de la physique einsteinienne aux niveaux primaire, secondaire et universitaire. Au fil des conversations, de nombreuses questions ont été soulevées autour de l'enseignement des théories einsteiniennes, dont voici les principales:

- Comment et à quel niveau scolaire peut-on enseigner les théories d'Einstein?
- Quelles sont les difficultés à enseigner la théorie de la gravité d'Einstein à des élèves de différents niveaux?
- Quelles théories, méthodes et modèles d'enseignement conviennent le mieux pour enseigner les notions de physique?

⁹³ Mentionnons qu'il existe aussi des programmes d'enrichissement (science outreach programs) tel que le Einstein-first project au Gravity Centre en Australie et EinsteinPlus à l'Institut Périmètre à Waterloo (Ontario, Canada) qui introduisent des enseignants et des élèves aux différents concepts de la physique moderne.

⁹⁴ Les dix dernières années, on retrouve plus d'articles publiées en lien avec l'enseignement de la relativité générale. Ce constat a aussi été évoqué durant la présentation Treagust (2019)

⁹⁵ Le congrès s'est déroulé du 18 au 24 février 2019.

- Comment faire de cet important corpus de connaissances une partie intégrante des programmes d'études?

On peut remarquer que ces questions portent sur les éléments auxquels je m'intéresse dans mon mémoire.

Dans les sections qui suivent, je présente des recherches menées sur l'intégration de l'enseignement de la gravité einsteinienne dans le milieu scolaire dans quatre pays pionniers (la Norvège, l'Australie et l'Allemagne, la Corée du Sud) (voir les sections 5.1-5.4). Il me semble pertinent de mentionner que les ressources examinées sont de nature différente (sitesweb, articles) et que le format des articles ainsi que leurs contenus diffèrent beaucoup. Dans les prochaines pages, je m'attarde aux informations relatives aux éléments déterminés dans la Méthodologie (voir la section 2.2) : les objectifs des recherches menées et les résultats obtenus, les concepts enseignés, les démarches et les modèles utilisés pour leur enseignement. Cette analyse des recherches est aussi une occasion de colliger des informations sur les conceptions des élèves et sur les obstacles qu'ils rencontrent dans le cadre de l'apprentissage de concepts physiques. Je termine ce chapitre par une synthèse d'informations : je présente un tableau comparatif qui juxtapose les concepts étudiés, les pays et l'âge des élèves concernés (la section 5.5).

Ce chapitre offre un portrait de la situation actuelle de l'enseignement de la gravité einsteinienne. Ce faisant, il apporte des éléments de réponses aux questions de recherche spécifiques suivants :

- Quelle est la pertinence de l'enseignement de la gravité einsteinienne et de la physique einsteinienne selon les chercheurs qui s'y attardent?
- Quelles sont les modalités, tenants et aboutissants des recherches menées sur l'enseignement de la physique einsteinienne?

5.1 La Norvège

Dans le but d'introduire des concepts de la physique quantique et de la relativité dans le cursus scolaire au deuxième cycle du secondaire (12^e et la 13^e années), une équipe de chercheurs de la Norvège a récemment⁹⁶ développé le projet *ReleQuant* (relativité et quantum). À l'étape préliminaire, les chercheurs de ce groupe ont constaté qu'il y a un manque de ressources d'apprentissage sur la relativité générale et adaptées aux élèves du secondaire. Le projet *ReleQuant* avait pour but de combler

⁹⁶ 2014-2017.

cette lacune en rendant compte de l'élaboration et de l'évaluation d'un environnement d'apprentissage en ligne et de la compréhension des concepts clés de la relativité générale par les élèves âgés de 18 et 19 ans.

L'analyse de recherches publiées (Kersting et al., 2018; Kersting et Steier, 2017, 2018) permet de faire ressortir les informations sur les contenus enseignés, les compétences des enseignants et leur appréciation. Ainsi, on retrouve les données portant sur les résultats quant à l'apprentissage des élèves selon l'approche basée sur une vision socioculturelle de l'apprentissage de la relativité générale et une approche historico-philosophique et sur leur motivation relativement à l'apprentissage de la physique moderne (Kersting et al., 2018).

Dans la section qui suit, je présente la recherche menée à partir de trois publications et des informations sur le projet publiées sur leur site web⁹⁷ (Kersting et al., 2018; Kersting et Steier, 2017, 2018).

5.1.1 Objectifs visés

Le projet de recherche a débuté en 2014 avec l'élaboration de modules sur la physique quantique. Au printemps 2017, les chercheurs ont testé le module portant sur la relativité générale. Les principaux objectifs visés par ce projet étaient les suivants :

- développement de ressources d'apprentissage numériques;
- recherche sur les processus d'apprentissage et la motivation des élèves en physique (afin d'étudier le fonctionnement des ressources d'apprentissage en salle de classe et de comprendre la motivation des élèves, leur compréhension conceptuelle et les processus d'apprentissage en physique moderne);
- recherche sur la manière dont la collaboration développe les compétences des groupes de praticiens impliqués : élèves, enseignants et chercheurs (afin de créer et d'explorer une communauté de pratique dans laquelle des professeurs de physique, des chercheurs en éducation scientifique et des formateurs d'enseignants travaillent ensemble sur le développement des ressources permettant de rendre l'enseignement de la physique varié et intéressant).

Pour atteindre ces objectifs, les stratégies suivantes ont été employées :

⁹⁷ Lien vers leur site web : <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/relequant/>

- donner une description qualitative de la relativité générale et des éléments qui constituent une rupture avec la physique classique;
- discuter la façon dont les différentes théories de la physique peuvent coexister, même si elles sont contradictoires ;
- donner des exemples de conflits scientifiques résolus, ainsi que des exemples de conflits scientifiques non résolu.

5.1.2 Effets sur les enseignants

D'après Kersting et al. (2018), le changement dans l'enseignement de concepts einsteiniens a comporté plusieurs défis pour les enseignants. L'orientation qualitative dans l'enseignement des nouveaux contenus disciplinaires était épistémologiquement très différente pour les enseignants par rapport à l'enseignement de la plupart des concepts physiques du programme d'études. Ils ont constaté, d'une part, qu'il fallait mettre de côté une longue tradition dans l'enseignement de la physique (comme pour l'électromagnétisme et la dynamique newtonienne) et, d'autre part, qu'il était difficile d'apprendre la physique moderne sans cette approche qualitative. De plus, les enseignants ont admis que leur préparation disciplinaire en lien avec la physique moderne est souvent plus faible qu'avec d'autres contenus disciplinaires en physique.

5.1.3 Effets sur les élèves

L'analyse des données provenant des travaux des élèves a permis d'obtenir un aperçu de leur compréhension des concepts einsteiniens tels que le principe d'équivalence, les phénomènes relativistes et la courbure de l'espace-temps. Les chercheurs soulignent plusieurs points positifs dont les suivants :

- Les élèves peuvent saisir qualitativement des idées centrales de la relativité générale sans l'emploi des mathématiques avancées en se basant sur des idées géométriques;
- Les expériences de pensée, les analogies et les visualisations de phénomènes relativistes favorisent la compréhension du contenu;
- La mise de l'accent sur la rupture entre la physique relativiste et la physique classique aide les élèves à surmonter leurs idées préconçues classiques;
- Lier les concepts abstraits à la vie quotidienne des élèves motive et favorise leur compréhension de la relativité générale;
- Les élèves sont généralement motivés par les sujets liés à la physique relativiste, tels que les trous noirs et l'espace-temps;

- La compréhension qualitative de la physique et la discussion en groupe facilite la compréhension de concepts physiques;
- Encourager les réflexions sur les perspectives historiques et philosophiques de la science (par exemple en présentant les physiciens et leurs diverses interprétations des phénomènes physiques) est bénéfique.

D'après Kersting et al. (2018), les animations et les simulations des phénomènes physiques ont aidé les élèves à relever des défis de compréhension. Ils ont aussi permis d'illustrer comment les connaissances scientifiques sont négociées et développées en tant que produit humain. Pour appuyer le développement conceptuel des élèves, des exemples de l'histoire de la physique accompagnés par des réflexions philosophiques et épistémologiques sur la physique contemporaine ont été insérés dans les séquences d'enseignement. Cela a permis de montrer comment la relativité d'Einstein rompt avec la physique newtonienne. Plusieurs exemples et applications de la physique moderne ont tenu compte de l'environnement quotidien des élèves, ce qui a suscité leur intérêt envers l'apprentissage de la physique.

Les résultats de recherche ont permis aux chercheurs de formuler de nouvelles questions et de revoir les séquences d'enseignement en vue d'apporter des améliorations quant aux moyens permettant de favoriser les échanges entre les élèves. Après quelques rondes d'expérimentations, le programme sur la physique quantique a été relancé en octobre 2016 et le programme sur la relativité générale en janvier 2018.

5.2 L'Australie

Le projet *Einstein-First* en Australie est aussi à l'avant-garde de l'enseignement des concepts einsteiniens dans les écoles. Ce projet a été créé dans le but d'améliorer l'enseignement des STEM (science, technology, engineering and mathematics) et d'introduire les élèves de 8 à 16 ans aux concepts de la physique einsteinienne, incluant la gravité. Opéré par l'*Australian International Gravitational Observatory* (AIGO) au *Gravity Discovery Centre* (GDC) à Perth sous la direction de David Blair⁹⁸, ce projet a permis la collaboration entre plusieurs chercheurs du monde entier.

Dans la section qui suit, je m'attarde à deux recherches menées dans le cadre de ce projet. La première a été réalisée auprès d'élèves de niveau primaire (Pitts et al., 2014) et l'autre, avec des élèves du secondaire (Kaur et al. 2017a).

⁹⁸ David G. Blair est un physicien australien qui travaille sur les méthodes de détection d'ondes gravitationnelles. Il est aussi directeur du *Australian International Gravitational Research Centre* (AIGRC) et du projet *Einstein-First*.

5.2.1 Rapport aux concepts einsteiniens des jeunes

La recherche exploratoire de Pitts et al. (2014) avait pour but d'étudier l'impact d'un programme d'enrichissement basé sur certains concepts de la physique einsteinienne. Elle s'attardait aussi aux niveaux de connaissances scientifiques atteints par des élèves de la sixième année du primaire et à leurs attitudes envers la science.

Les trois principales questions de recherche étaient les suivantes :

- Quel impact a le programme d'enrichissement sur la compréhension des concepts de base de la physique einsteinienne, y compris la géométrie de l'espace courbe et la gravité?
- Quelles sont les attitudes des élèves de sixième année vis-à-vis du programme d'enrichissement sur la physique d'Einstein?
- Est-il possible d'enseigner la physique einsteinienne à de jeunes élèves?

Le programme d'enrichissement proposé dans le cadre de l'enseignement primaire (6e année) est constitué des éléments suivants :

- Six cours de sciences donnés par deux professeurs de physique (David Blair and Marjan Zadnik) de l'Université Western Australia;
- Une visite au « Gravity Discovery Centre » (un centre scientifique en Australie);
- Une participation à une pièce de théâtre;
- Une exposition sur l'histoire et le développement d'idées liées à l'espace, au temps et à la gravité einsteinienne.

Un questionnaire d'attitude et d'aptitude a été proposé au début et à la fin du programme (pré-test et post-test) à 26 élèves qui ont participé à l'étude. Les résultats de la recherche montrent une amélioration mesurable (et statistiquement significative) dans la compréhension de différents aspects de la physique einsteinienne (voir la figure 19).

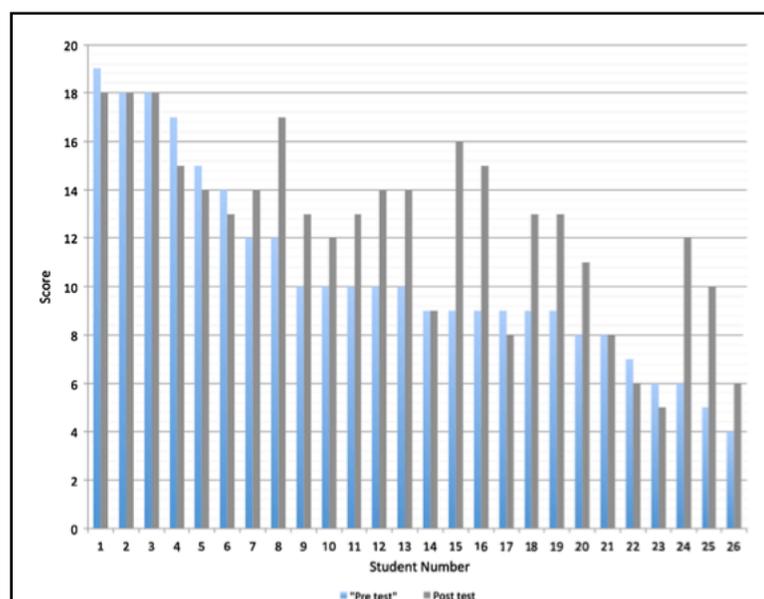


Figure 19. Résultats et tableau retiré de Pitts et al. (2014)

L'analyse de données présentées à la figure 19 montre qu'au cours de la période du programme d'enrichissement, 15 des 26 élèves ont amélioré leurs résultats, 4 élèves ont eu les mêmes résultats et les résultats de 7 élèves ont diminué. Les chercheurs soulignent que la baisse de notes est seulement d'un ou de deux points, mais que les améliorations dans la majorité des cas sont de trois ou de quatre points. L'analyse de la formulation des questions moins réussies a permis de constater qu'elles n'étaient pas assez nuancées pour capter tout changement dans la compréhension des élèves.

Quant aux attitudes envers l'apprentissage des concepts physiques⁹⁹, 18 des 26 élèves ont donné des réponses très positives quant à leur expérience.

À la question « *Vous sentez-vous trop jeunes pour comprendre les idées d'Einstein?* », 14 élèves ont répondu «non», 5 ont répondu « oui » et 7 n'ont pas répondu.

Les auteurs indiquent aussi que plusieurs facteurs n'ont pas été pris en considération entre autres les compétences des élèves à comprendre des idées abstraites. En effet, le but principal des activités proposées dans le programme d'enrichissement était d'intéresser les élèves à la physique moderne et aux théories d'Einstein. L'utilisation d'analogies, de métaphores et de différents modèles physiques en tant qu'outils d'enseignement a été très bénéfique selon Pitts et al. (2014) et a aidé les élèves à mieux comprendre les concepts.

⁹⁹ À partir de la question « Était-il intéressant d'apprendre à connaître l'espace, le temps et la gravité? »

5.2.2 Rapport aux concepts einsteiniens des adolescents

La recherche exploratoire de Kaur, Blair, Moschilla et al. (2017) a été menée auprès d'élèves de neuvième année d'une école secondaire (secondaire 3). La recherche avait les mêmes objectifs que dans la recherche de Pitts et al. (2014). Le déroulement était aussi semblable. Mais cette fois-ci, les élèves ont participé à un programme d'enrichissement d'une durée de 10 semaines se composant de 10 activités de manière séquentielle. Comme dans la recherche de Pitts et al., (2014), un questionnaire d'attitude et d'aptitude a été distribué à 57 élèves au début et à la fin du programme d'enrichissement (pré-test et post-test) avec les questions suivantes :

1. Les lignes parallèles peuvent-elles se rencontrer?
2. La somme des angles d'un triangle peut-elle être différente de 180 degrés?
3. Que signifie le terme « Lumière »?
4. L'espace a-t-il une forme? (Encercler Oui ou Non). Comment pourriez-vous mesurer la forme de l'espace?
5. Vous pesez un objet sur une balance hypersensible. Ensuite, vous chauffez cet objet. Est-ce que la mesure de la masse sera différente?
6. Comment pourriez-vous expliquer qu'une règle est droite?
7. En l'absence de la résistance d'air (comme dans un énorme réservoir vide ou sur la lune) si nous laissons tomber un marteau et une plume, quel objet touchera le sol en premier?
8. Énumérer les noms d'au moins quatre types de rayonnement électromagnétique.
9. Une personne affirme sur Facebook qu'il a construit un microscope extrêmement précis de sorte que la position exacte d'un atome peut être mesurée. Cette affirmation vous semble-t-elle plausible?

Les résultats des élèves au premier questionnaire (pré-test) étaient très faibles : moins de 10% des élèves ont obtenu plus que 50%. Quant au second questionnaire (post-test), la majorité des élèves ayant les scores initiaux les plus faibles ont obtenu des résultats aussi élevés que les élèves ayant les scores les plus élevés au premier test. Dans le cadre de cette étude, 53 des 57 élèves de la neuvième année ont obtenu à la fin du programme un résultat de plus de 80%. Il est intéressant de mentionner que les garçons ont démontré un intérêt plus élevé que les filles envers la physique tout au long du programme, tandis que l'intérêt des filles a eu un accroissement beaucoup plus élevé que chez les garçons (il s'est amélioré de 50% à 80%). Les chercheurs ont aussi remarqué que les enseignants de l'école secondaire, qui accompagnaient les élèves dans le programme, étaient également très motivés par les activités scientifiques offertes. Selon Kaur, Blair, Moschilla et al. (2017), ces résultats montrent des améliorations significatives dans la compréhension des élèves de différents aspects de la physique einsteinienne.

5.2.3 Conclusions et suite

Après 7 ans de recherches sur l'enseignement de la gravité einsteinienne et sur le comportement des élèves (de 8 ans à 16 ans) et des enseignants, les chercheurs de ce groupe constatent qu'il est possible et bénéfique d'enseigner les concepts de la physique moderne à des jeunes élèves selon le paradigme einsteinien de l'espace, du temps, de la matière, de la lumière et de la gravité (Kaur, Blair, Burman, et al., 2017). Ils concluent que :

- Les élèves acceptent facilement les concepts einsteiniens ;
- Les élèves veulent apprendre les concepts einsteiniens;
- Les élèves sont motivés par le programme d'études de la physique einsteinienne;
- Les enseignants sont aussi très motivés (même ceux qui ont peu d'expérience en physique);
- Les filles s'améliorent plus que les garçons aux cours des activités;
- Les appréciations des parents sont très positives.

À la suite de la réalisation de ce projet, une autre recherche a été élaborée pour tester et évaluer une progression dans l'apprentissage de la physique moderne au primaire et au secondaire¹⁰⁰. D'après David Blair (2019), « We've already proved that kids love Einstein's physics and are keen to learn it. Now we can work on creating a full school curriculum that teaches children about the nature of space, time and gravity right from year three all the way through their schooling » (p.1). Il s'agit d'un projet de collaboration entre sept pays, comprenant les États-Unis, la Norvège, l'Allemagne, l'Écosse, la Corée du Sud et la Chine. Les recherches seront menées dans 24 écoles et seront examinées par un panel composé de membres d'organisations professionnelles et d'autorités responsables du programme. Les ressources d'apprentissage seront largement diffusées, en vue de promouvoir l'introduction de la science einsteinienne à l'école dans plusieurs pays.

5.3 L'Allemagne

En Allemagne, les concepts liés à la gravité einsteinienne ont été introduits dans les programmes scolaires de la 9^e à la 13^e années dans trois provinces : Brême, Rhénanie-du-Nord-Westphalie, Sarre et Saxe.

Les concepts enseignés varient d'une province à l'autre, mais les éléments suivants de la gravité einsteinienne sont présents dans chaque province :

¹⁰⁰ <http://www.news.uwa.edu.au/2019031911282/research/uwa-awarded-898560-teach-einsteins-physics-schools>

- Concepts de base de la relativité générale : dilatation gravitationnelle, principe d'équivalence et mesure du temps (décrire qualitativement), gravitation, mesure du temps et courbure de l'espace (illustrer au moyen de modèles et de graphiques), trous noirs.
- Références à la relativité générale comme théorie de la gravitation et à son importance pour l'astrophysique et la cosmologie;
- Essais expérimentaux (précession du périhélie de Mercure, déviation de la lumière près du soleil, décalage gravitationnel vers le rouge).

Quelques chercheurs sous la direction de Ute Kraus et de Corvin Zahn (Institut für Physik à l'université de Hildesheim) ont collaboré au développement des modèles de visualisation permettant aux élèves de mieux comprendre la relativité d'Einstein et, en particulier, les éléments de la gravité einsteinienne.

Dans l'article de Zahn et Kraus (2014), on retrouve des modèles sectoriels (sector models) qui transforment la géométrie spatiale tridimensionnelle en 2D et permettent de visualiser la décomposition de l'espace tridimensionnel en manipulant des polyèdres adjacents (voir la figure 20).

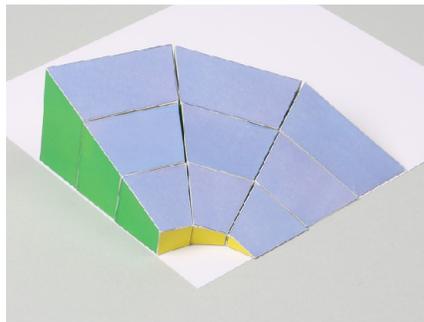


Figure 20. Blocs modélisant la géométrie spatiale près d'un trou noir (Zahn et Kraus, 2014)

Pour un ensemble de polyèdres, l'espace construit représente un espace incurvé positivement, négativement ou complexe. Lorsque l'on essaie de relier les polyèdres ensemble dans un espace « plat » tridimensionnel, il y a des chevauchements et des espaces non remplis. Cette représentation géodésique, même si elle est approximative, permet de mieux visualiser la géométrie de la courbure de l'espace et de mieux comprendre le concept de l'espace-temps. Par exemple, l'emploi des modèles sectoriels, par la subdivision des blocs (géométrie euclidienne) et par le calcul de Regge¹⁰¹, permet

¹⁰¹ Le calcul de Regge, introduit par le physicien théoricien Tullio Regge en 1961, est un formalisme mathématique qui produit des approximations simplistes de l'espace-temps de la relativité générale qui proviennent des solutions à l'équation d'Einstein (Zahn et Kraus, 2014)

de représenter l'espace courbe afin d'introduire la relativité générale. Les polyèdres s'agencent parfaitement les uns aux autres, ce qui reflète le fait que l'espace incurvé est plat localement. Une ligne droite sur l'un des polyèdres (un morceau d'une géodésique) peut toujours être poursuivie en ligne droite sur un polyèdre adjacent. Ainsi, à l'instar de la visualisation géométrique, une géodésique, en passant d'un polyèdre adjacent à l'autre, peut se poursuivre dans l'ensemble de la région de l'espace représenté¹⁰².

Dans l'article de 2016, Kraus et Zahn présentent une variété de démonstrations sur la distorsion quadripolaire des ondes gravitationnelles (voir par exemple la figure 21). Dans le cas présenté, les particules d'essai (avec quelques particules colorées pour faciliter l'identification) sont disposées dans des motifs carrés. La séquence de distorsions peut être représentée sous forme d'images instantanées (figure 21a). Des versions transparentes de ces images sur plexiglas peuvent être disposées en séquence pour montrer la nature ondulatoire de l'effet (figure 21b). Enfin, en recréant le motif de points sur un tissu élastique et en demandant aux élèves de tirer et de relâcher le tissu d'une manière coordonnée, l'évolution temporelle de la distorsion peut être recréée (figure 21c).

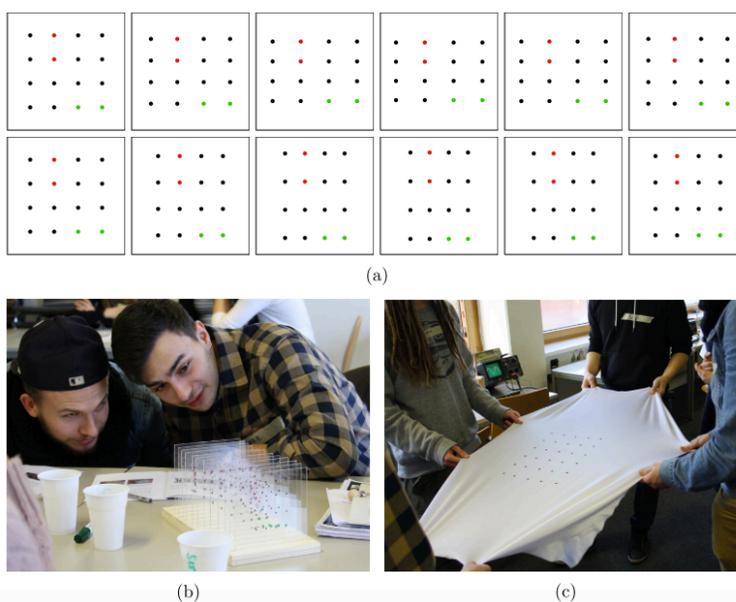


Figure 21. *Modèles de visualisation de la distorsion quadripolaire des ondes gravitationnelles (laboratoire sur la physique relativiste à l'Université de Hildesheim, Allemagne)(Kraus et Zahn, 2016).*

Zahn et Kraus (2014) soulignent que l'une des difficultés de compréhension de la relativité einsteinienne est liée au fait que la théorie va à contresens de notre manière de visualiser. En d'autres

¹⁰² Dans le cas de la courbure de l'espace-temps, ces chercheurs emploient une démonstration de la déflexion de la lumière sur un morceau de papier.

mots, on ne voit pas les effets relativistes directement. Dans l'élaboration des séquences d'enseignement, ce groupe de chercheurs a investi beaucoup d'efforts dans le choix des modèles permettant les simulations.

On peut constater que les publications de recherches menées par ce groupe (Kraus et Zahn, 2016; Zahn et Kraus, 2014, 2018b, 2018a) sont plus centrées sur la présentation des divers moyens didactiques développés (images, simulations, capsules vidéo, modules sur la réalité virtuelle) permettant de mieux visualiser différents phénomènes décrits par la théorie de la relativité d'Einstein : vols relativistes à grande vitesse, effondrements gravitationnels, objets compacts et certaines conditions extrêmes.

5.4 La Corée du Sud

Bien que la Corée du Sud soit considérée comme un pays pionnier dans l'intégration de la physique einsteinienne dans le curriculum scolaire (Blair et al., 2016), les publications sur les recherches menées sont peu nombreuses. L'accès aux informations en ligne est aussi très limité, la majorité des informations étant en coréen. Parmi les quatre textes publiés sur l'enseignement de la relativité (Gim, 2016; Im, Yoon et Cha, 2016; Kim et Lee, 2016, 2018), deux textes (Gim, 2016¹⁰³; Im et al., 2016¹⁰⁴) portent sur la formation des enseignants à l'enseignement des concepts de la relativité restreinte. Dans ce qui suit, je présente les informations tirées de deux autres articles (Kim et Lee, 2016, 2018), qui sont plus en lien avec mon sujet de recherche (enseignement de la relativité et de la gravité einsteinienne).

¹⁰³ Gim (2016) présente les résultats d'analyse des contenus sur la relativité restreinte de deux manuels scolaires sud-coréens de physique au secondaire. Il constate que la présentation des concepts de la relativité restreinte dans ces manuels est trop formelle (énumération des faits et des formules) sans référence aux aspects historiques et philosophiques. Gim souligne que cette manière de présenter les contenus est largement influencée par l'ouvrage de Raymond Serway sur la physique moderne et exige une simple mémorisation des concepts sans provoquer une curiosité chez l'élève et sans faire appel à la démarche d'investigation par des méthodes scientifiques, à la pensée critique et au développement du raisonnement scientifique. Pour améliorer la compréhension des élèves des concepts physiques, Gim a développé un modèle en six étapes permettant d'étudier le concept scientifique, de développer le raisonnement et de rendre compte des aspects historiques et philosophiques du développement de la physique. Dans son article, cet auteur montre l'emploi de ce modèle sur l'une des notions de la relativité restreinte (la vie du muon) (voir l'annexe 5).

¹⁰⁴ L'article de Im et al. (2016) est très général, même s'il porte sur les éléments de la planification des leçons pour l'enseignement de la relativité générale (lentille gravitationnelle, principe d'équivalence, etc.) et sur les activités permettant de mettre en jeu le raisonnement abductif afin de développer la pensée scientifique dans des démonstrations des phénomènes physiques.

5.4.1 Besoins des enseignants pour enseigner les concepts einsteiniens

La recherche de Kim et Lee¹⁰⁵, menée en 2016 (Kim et Lee, 2016), visait la conception des moyens appropriés pour introduire les enseignants aux concepts de la relativité générale et à son enseignement. Les chercheurs ont constaté que les enseignants éprouvent des difficultés à comprendre et à enseigner la relativité générale. À partir de ce constat, Kim et Lee ont mené une étude exploratoire avec deux groupes d'étudiants : 9 futurs enseignants de physique (dans le cadre du cours *Materials and methods in teaching physics*) et 14 étudiants à la maîtrise en physique (dont 8 sont aussi enseignants du secondaire, dans le cadre du cours *Modern Physics Education*).

Dans le premier groupe, les étudiants devaient lire le chapitre 3 du livre « *The Evolution of Physics* » (Einstein et Infeld, 1938). Après la lecture, les chercheurs ont résumé les principaux concepts provenant de ce chapitre et ont organisé une discussion sur ce qui était nouveau pour les étudiants et ce qui restait flou. Quelques semaines plus tard, deux étudiants ont été interviewés.

Dans le second groupe, les chercheurs ont débuté par l'introduction de la théorie de la relativité générale et ont proposé de lire le même livre « *The Evolution of Physics* » (Einstein & Infeld, 1938). Les étudiants devaient produire les rapports hebdomadaires en répondant aux trois questions suivantes : Qu'avez-vous appris cette semaine? Qu'est-ce qui n'est pas encore clair? Quelle partie du livre vous a aidé à comprendre la relativité?

L'analyse des données (provenant de discussions et d'entrevues dans le groupe 1, ainsi que des rapports hebdomadaires rédigés par les participants du groupe 2) a permis aux chercheurs d'identifier ce dont les enseignants ont le plus besoin et d'évaluer leur compréhension globale de la relativité. Ils constatent des changements significatifs chez les enseignants dans leur compréhension des principes fondamentaux de la relativité. De plus, ils soulignent que les enseignants ont besoin d'une vue d'ensemble pour comprendre la théorie plutôt que de ses détails et d'expressions mathématiques.

5.4.2 Réflexions sur les idées relativistes dans les rapports de recherche

En 2018, Kim et Lee ont publié un article dont l'objectif principal est de rendre compte de l'analyse de 15 articles¹⁰⁶ portant sur les recherches menées dans le domaine de l'enseignement de la relativité restreinte en Corée du sud. Les chercheurs se sont inspirés de propos d'Einstein provenant de l'ouvrage « *Évolution des idées en physique* » (Einstein et Infeld, 1938) et ont comparé les principales idées ressortis de ce livre avec celles mentionnées dans les articles.

¹⁰⁵ Deux professeurs à l'Université nationale de Séoul.

¹⁰⁶ Les articles ne sont pas accessibles sur les sites de revues parce qu'ils sont écrits en coréen.

La recherche s'articulait à trois questions principales : pourquoi enseigner la relativité restreinte? Quelles connaissances liées à la relativité restreinte doit-on enseigner ? Comment enseigner la relativité restreinte? Les résultats de l'analyse des articles ont été classifiés selon ces trois questions (voir la première et la troisième colonne du tableau 2). De plus, les résultats de l'analyse ont aussi été classifiés selon les trois critères issus du livre d'Einstein afin d'évaluer la perspective éducative de l'apprentissage et de l'enseignement de la relativité restreinte: (1) valeur éducative en termes des objectifs de l'enseignement, (2) type de connaissance et (3) approche d'enseignement (voir le tableau 2).

Tableau 2. Tableau comparatif des idées d'Einstein et leur interprétation par les chercheurs Kim et Lee (2018¹⁰⁷)

Questions	Les idées d'Einstein sur l'apprentissage de la physique et la relativité (Einstein et Infeld, 1938)	Les propos des chercheurs provenant de 15 articles
Objectif (Pourquoi enseigner la relativité restreinte?)	Valeur intrinsèque - Apprécier la tentative de l'esprit humain de comprendre la nature. - Comprendre une nouvelle vision physique et philosophique. - Comprendre les principes fondamentaux qui représentent la simplicité, l'universalité et l'harmonie.	Valeur instrumentale - Faire apprendre des nouveaux concepts scientifiques expliquant les phénomènes physiques. - Satisfaire à la curiosité des étudiants quant aux nouvelles applications technologiques. - Améliorer les connaissances scientifiques des élèves afin qu'ils deviennent des citoyens d'une société démocratique capable d'utiliser la pensée scientifique.
Connaissances (Quelles connaissances liées à la relativité restreinte doit-on enseigner)	Connaissance intégrale : traitement de l'ensemble de la structure et du flux global en se concentrant sur les concepts clés - Point de vue sur le monde physique et ses principes fondamentaux - Vue globale de la relativité	Connaissances fragmentaires : propositions, concepts et faits partiels : Relativité de la simultanéité, dilatation temporelle, contraction de la longueur, transformation de Lorentz, équivalence de masse et d'énergie.
Approche pédagogique (Comment enseigner la relativité restreinte?)	Approche herméneutique/communicative - Moyens d'amener les étudiants à participer au processus d'unification/généralisation de la théorie au sein de la structure globale. - Façons d'enseigner aux élèves à comprendre la nature de la science qui n'est pas terminée, mais qui se poursuit, comme une enquête sur le fonctionnement de la nature.	Approche partielle/fonctionnelle - Moyens de familiariser les élèves avec les concepts et les contenus (complets ou partiels) liés à la relativité sans contexte global (moyens de mieux comprendre, outils et méthodes d'enseignement, etc.) - Façons d'enseigner aux élèves à penser que la science est un ensemble de connaissances complètes.

¹⁰⁷ Traduction libre de l'anglais.

Les auteurs de cette étude constatent que plusieurs textes présentent un point de vue qui va à l'encontre des idées d'Einstein sur l'apprentissage de la physique et de la relativité restreinte. Pour le premier critère (objectif), 3 articles sur 15 exposent des valeurs instrumentales de l'enseignement de la relativité restreinte. Quant au deuxième critère (connaissances), plusieurs textes soulignent qu'il faut changer le point de vue sur le monde physique et sur l'univers. Dans la plupart des articles, l'accent est mis sur la connaissance fragmentaire des contenus sans offrir un contexte global de son enseignement. Les informations recueillies pour le troisième critère (approche pédagogique) montrent que 13 des 15 articles relèvent d'approches partielles et fonctionnelles de l'enseignement de la relativité restreinte. Ces approches visent plus une compréhension « complète et quantitative » des concepts de la relativité restreinte, sans les introduire dans le contexte général de la physique et de ses principes essentiels (par exemple en visant une compréhension plus qualitative dans l'étude du concept de l'espace-temps en présentant le passage de la cosmologie newtonienne à la cosmologie moderne).

Kim et Lee (2018) rapportent que la relativité restreinte est enseignée à école depuis les années 1960 et que les méthodes d'enseignement relèvent de cette époque. Avec la révision des programmes scolaires en 2010, la théorie de la relativité générale a été intégrée dans le programme national d'enseignement des sciences. Cette révision des programmes a aussi apporté des changements sur les manières d'enseignement des concepts physiques, en intégrant une compréhension qualitative. Les auteurs soulignent que l'enseignement de la relativité a d'importantes implications éducatives non seulement en termes d'apprentissage de nouveaux concepts physiques, mais aussi en vue de susciter des perspectives scientifiques. Par ailleurs, ils constatent que l'intérêt d'enseigner cette matière ne cesse de croître, tant en Corée qu'à l'étranger.

5.5 Sommaire

Des organisations telles qu'*Einstein-first* en Australie, *ReleQuant* en Norvège et Institut für Physik à l'université de Hildesheim en Allemagne sont des plus actives dans le domaine de l'enseignement de la physique einsteinienne. Elles jouent un rôle important dans le développement de ressources d'apprentissage pour introduire les élèves à la physique moderne. Pour conclure ce chapitre portant sur l'enseignement des concepts einsteiniens, je présente dans la section 5.5.1 un tableau-synthèse dans lequel les concepts enseignés dans les programmes de quatre pays sont mis en évidence (Australie, Norvège, Allemagne et Corée). Dans la section 5.5.2, je présente des informations portant sur l'emploi du modèle de démonstration le plus populaire pour introduire les élèves au concept de

l'espace einsteinien. Enfin, dans la section 5.5.3, j'aborde les enjeux du changement de paradigme de l'enseignement de la physique.

5.5.1 Synthèse des concepts étudiés

L'étude de travaux menés par les quatre groupes de recherche mentionnés dans ce chapitre, ainsi que de différents programmes scolaires, permet de synthétiser les informations sur les concepts étudiés et l'âge des élèves concernés (voir le tableau 3).

Tableau 3. Tableau comparatif (liste de concepts de la physique einsteinienne)

Concepts de la physique d'Einstein	Australie (8-16 ans)	Norvège (17-18 ans)	Allemagne (15-17 ans)	Corée de sud (16-18 ans)
Relativité restreinte : principes de base		✓	✓	✓
Mouvement inertiel et accéléré		✓	✓	✓
Mouvement absolu et mouvement relatif		✓	✓	✓
Dilatation du temps	✓	✓	✓	✓
Contraction des objets	✓	✓	✓	✓
$E=mc^2$	✓	✓	✓	✓
Principe d'équivalence : équivalence entre la masse gravitationnelle et inertielle	✓	✓	✓	✓
Géométrie courbe	✓	✓	✓	✓
Géodésique	✓	✓	✓	✓
Courbure de l'espace	✓	✓	✓	✓
Courbure de la lumière	✓	✓	✓	✓
Dilatation gravitationnelle	✓	✓	✓	✓
Trous noirs	✓	✓	✓	✓
Ondes gravitationnelles	✓	✓	✓	✓
Espace-temps	✓		✓	✓
Lentille gravitationnelles	✓		✓	✓
Équation d'Einstein	✓			✓
Tenseur	✓			✓
GPS	✓	✓		
Périhélie de Mercure			✓	

Expérience Pound Rebka : décalage spectral		✓		
Expansion de l'univers, constante cosmologique, Big Bang			✓	
Philosophie et la relativité		✓		✓
Horloges lumineuses				✓

Ce tableau montre que le premier pas dans le développement des séquences d'enseignement de la physique einsteinienne est déjà fait. On peut constater que certains concepts font partie des programmes dans plusieurs pays (dilatation du temps, contraction des objets, $E=mc^2$, principe d'équivalence : équivalence entre la masse gravitationnelle et inertielle, géodésique, courbure de l'espace, courbure de la lumière dilatation gravitationnelle, ondes gravitationnelles, trous noirs). C'est d'ailleurs sur la base de cette liste de concepts que j'en ai fait la description au chapitre 3.

5.5.2 Modèle « Rubber sheet analogy » (RSA)

On sait que l'emploi des modèles dans l'enseignement de la physique occupe une place importante, car ils permettent d'illustrer des concepts et des phénomènes physiques. Les travaux du groupe de chercheurs allemands (Kraus et Zahn, 2016; Zahn et Kraus, 2014, 2018b, 2018a) montrent comment l'emploi de modèles permet de mieux visualiser différents phénomènes décrits par la théorie de la relativité d'Einstein et d'engager l'élève dans l'exploration des phénomènes et dans la construction des connaissances. Les questions que l'enseignant pose lors de la démonstration peuvent orienter l'observation de l'élève, l'exploration du concept et sa compréhension. Dans cette section, je présente la description du modèle « Rubber sheet analogy » (RSA)¹⁰⁸ qui est le plus utilisé pour décrire la gravité einsteinienne et les résultats de quelques recherches menées sur sa mise en œuvre en contexte scolaire.

¹⁰⁸ On peut trouver d'autres noms donnés à ce modèle : tissu élastique, oreiller, trampoline.

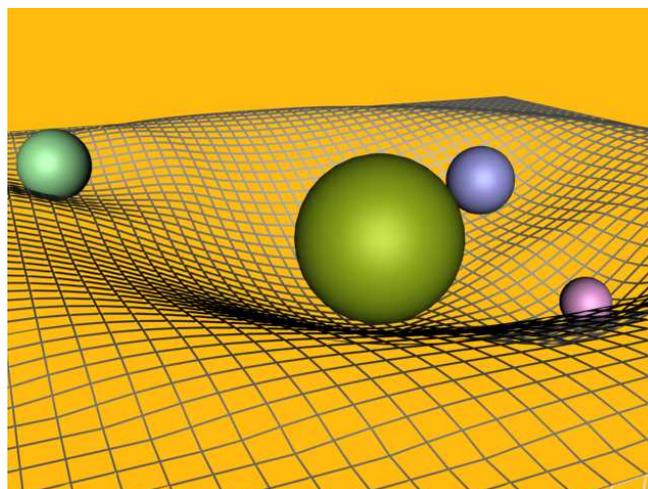


Figure 22. Modèle RSA ¹⁰⁹

Le modèle RSA permet de visualiser la courbure de l'espace-temps, les géodésiques, les trajectoires des corps et de constater que le mouvement des corps est déterminé par la configuration de l'espace-temps. Ce modèle présente l'espace à l'aide d'un tissu élastique et les corps célestes (étoiles ou planètes) à l'aide des boules de tailles et de masses différentes. En posant la plus grosse boule sur le tissu, on peut observer qu'elle s'enfonce dans le tissu en le déformant. Pour observer ce qui se passe lorsqu'un corps plus petit passe à proximité de l'étoile (ou d'une planète), on pose sur le tissu des petites billes. D'abord, on observe que les trajectoires de petites billes représentent des lignes droites. Cependant, en s'approchant d'une grande boule, leurs trajectoires se courbent en prenant une forme elliptique et elles pénètrent dans la dépression. Ce n'est pas donc la force qui les attire, leurs mouvements sont influencés par la courbure du tissu.

Quelques recherches ont été menées sur l'emploi de cette analogie afin d'introduire les élèves au concept de la gravité einsteinienne (Baldy, 2007; Kaur, 2018; Kersting et Steier, 2017; Watkins, 2014). Par exemple, l'efficacité de l'emploi de ce modèle a été évaluée dans la recherche menée en France par Baldy (2007). Deux approches d'enseignement de la gravité ont été utilisées dans deux groupes différents. Dans un groupe, ce concept a été présenté selon le modèle de Newton comme l'attraction gravitationnelle. Dans un autre groupe, l'enseignement a débuté par la théorie de Newton et s'est poursuivi par l'approche d'Einstein. Les résultats de cette recherche montrent que l'attraction généralisée (une conception estudiantine qui confirme qu'il y a une attraction ressentie sur la Terre et sur la Lune et plus généralement à tout endroit dans l'espace où on retrouve des masses) a été employée par les élèves du groupe qui ont seulement étudié la théorie de Newton. L'auteure observe une

¹⁰⁹ Source de l'image : <https://web2.ph.utexas.edu/~coker2/gravity.jpg>

augmentation de 38 % sur la conception de l'attraction généralisée chez les élèves qui ont étudié les théories d'Einstein.

Selon Baldy, la démonstration à l'aide du modèle RSA a aussi permis d'observer un impact de la masse d'une planète sur la magnitude de g (accélération des masses en présence de la gravité) et de comprendre la façon dont g varie selon la planète considérée.

L'auteur rapporte que, dans le groupe qui a été familiarisé avec l'approche d'Einstein, moins d'élèves ont confondu le « g » de gramme et le « g » de l'accélération gravitationnelle locale. Ainsi, plusieurs d'entre eux ont expliqué les variations de g en termes de corps célestes ou d'altitude. Aussi, plus de 22% d'élèves ont explicitement utilisé la théorie de la déformation de l'espace-temps pour répondre aux questions liées à la gravité (voir la figure 23).

Answer	Newton approach (%)	Einstein approach (%)
$g = \text{gram, or other entity (answer to the question "What does the symbol } g \text{ stand for in the formula } W = mg\text{?}")}$	25	1.6
$g = \text{local gravitational acceleration (answer to the question "What does the symbol } g \text{ stand for in the formula } W = mg\text{?")}$	62	86.6
Local gravitational acceleration differs for different celestial bodies	21	85
Local gravitational acceleration changes with altitude	4	43
Explicit use of the space-time deformation theory	–	22

Figure 23. Comparaison entre la compréhension de l'accélération gravitationnelle locale selon les approches de Newton ($n = 21$) et d'Einstein ($n = 102$) (Baldy, 2007).

Les chercheurs Farr, Schelbert et Trouille (2012) soulignent que l'emploi de ce modèle est favorable (et plus intuitif en comparaison avec le modèle de Newton) pour comprendre la gravité. Selon ces auteurs, ce modèle permet de se rapprocher des conceptions préalables des élèves, parce qu'ils peuvent prédire le mouvement des objets lâchés sur le tissu élastique.

Bien que ce modèle soit très attrayant et représente la source des mouvements des plus petits corps, Possel (2017) et Kersting et Steier (2018) signalent que l'emploi seul de ce modèle analogique peut créer des obstacles à la compréhension. Selon Possel (2017), l'approche pédagogique employée par Baldy (2007) ne permet pas d'aborder des questions au-delà de la gravité newtonienne et de distinguer les cadres théoriques einsteinien et newtonien. Cet auteur suggère que la démonstration à l'aide de ce modèle doit être accompagnée par une discussion et une réflexion sur ses limites. Parmi les faiblesses qu'il constate dans l'emploi de ce modèle, les principales sont les suivantes :

- Le modèle crée une confusion quant au double rôle joué par la gravité (gravité terrestre qui pointe vers le sol et les petites billes qui sont attirées vers la plus grande boule);
- L'apprenant peut douter de la courbure de l'espace-temps, car c'est uniquement l'espace (tissu) qui est déformé;
- Le modèle crée une confusion « dimensionnelle » (les boules sont tridimensionnelles alors que le tissu représente un plan à deux dimensions);
- Le frottement est « irréaliste » dans le mouvement des boules et des billes sur le tissu (la friction entre le tissu et les boules montre que les boules perdent très rapidement leur énergie et finissent par « spiraler » rapidement à l'intérieur du creux).

Dans l'étude menée auprès des élèves de onzième et douzième année (Kersting et Steier, 2017), on trouve une liste des forces et des faiblesses dans l'utilisation de ce modèle (voir le Tableau 4).

Tableau 4. Tableau des forces et faiblesses du « rubber sheet analogy » (Kersting et Steier, 2017¹¹⁰).

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Représentation dynamique de l'espace-temps - L'espace-temps est influencé par des objets - L'espace-temps modifie le mouvement des objets - La gravité présente une nature universelle : l'espace-temps répond universellement selon le poids des objets (plus un objet est massif, plus la distorsion créée est grande) - Les phénomènes gravitationnels n'impliquent aucune action « mystérieuse » à la distance - La gravité représente la géométrie de l'espace (ce qui fournit un mécanisme pour analogiquement comprendre la production de gravité) - Un modèle simple et intuitif - Le modèle offre une large possibilité explicative (il est adapté pour montrer les mouvements orbitaux, l'espace courbe et les trajectoires des photons) 	<ul style="list-style-type: none"> - L'aspect quadridimensionnel de l'espace-temps n'est pas apparent - La dimension temporelle de l'espace-temps est ignorée - La caractéristique intrinsèque de la courbure de l'espace-temps est occultée (ce modèle cache une dimension invisible dans laquelle la courbure de l'espace-temps s'incurve) - Il masque la courbure autour d'objets massifs et se représente symétriquement dans toutes les dimensions - Il emploie la force de gravité pour expliquer la déformation de tissu flexible

Malgré les faiblesses du « rubber sheet analogy », Kersting et Steier (2017) soulignent son rôle favorable dans la compréhension du phénomène de la gravité. Ils précisent notamment que son emploi doit être accompagné par un questionnaire approprié afin de comprendre son fonctionnement.

¹¹⁰ Traduction libre de l'anglais.

Despite some inherent conceptual flaws, the RSA (rubber sheet analogy) has the potential to serve as a good metaphor. Teaching GR can be successful if approaches build on students' understanding of the limited nature of scientific models, communicate explicitly target and source domain and strengths and weaknesses of the RSA, and point out the disagreement between students' experiential understanding of gravity and the reliance of the RSA on exactly this experiential understanding to explain gravity in more abstract terms (Kersting et Steier, 2017).

Connaître les avantages et les limites de ce modèle¹¹¹ est important en vue d'organiser l'apprentissage des élèves. Cela permet de préparer les interventions appropriées afin de négocier les obstacles que les élèves peuvent rencontrer.

5.5.3 Changement de paradigme

Pour conclure cette section, il me semble opportun de référer aux propos de David Blair et de David Treagust (2019) tenus au congrès international *General Relativity as a Challenge for Physics Education* (Bad Honnef, Allemagne, 18 février, 2019).

Lors de sa conférence, Blair a résumé les différences principales des visions newtonienne et einsteinienne des mêmes concepts (gravité, masse, poids, énergie, accélération, lumière, etc.)

Tableau 5. Comparaison des concepts-clés selon deux points de vue : Newton et Einstein (Blair, 2019)

L'école aujourd'hui	Compréhension moderne
Espace euclidien rigide	Espace flexible et incurvé
Le temps est absolu	L'espace-temps est relatif
La lumière est une onde Les particules sont toujours des sphères de petite taille	La lumière peut être une onde et une particule
L'énergie est sans masse	$E=mc^2$
Déterminisme newtonien, tout est absolu	Incertitude quantique
Gravité : force instantanée	Gravité : courbure spatio-temporelle, vitesse c

¹¹¹ Voir la présentation de ce modèle dans les deux manuels québécois (l'annexe 6 et 7). Chaque manuel consacre une page pour faire une brève référence à Einstein et à sa théorie. Cependant, l'un (Bélanger, Chatel et St-André, 2005) débute la présentation par le concept de la relativité. Tandis que l'autre (Bensaada, Ouellette et Pépin, 2010) présente d'abord l'attraction gravitationnelle. D'un côté, on peut apprécier l'initiative des auteurs d'inclure le concept de la gravité einsteinienne dans leurs manuels. De l'autre côté, cela peut créer une confusion sur l'existence de deux gravités différentes : newtonienne et einsteinienne. Pourtant, il s'agit de la même gravité, mais décrite selon deux visions différentes. Il est par ailleurs évident que l'élève ne peut pas comprendre le phénomène présenté sur chacune de ces pages par la seule lecture et l'observation des images.

Les données de la deuxième colonne représentent les savoirs de la physique moderne. Les recherches que nous avons examinées partagent la vision selon laquelle l'éducation aux sciences doit contribuer à une meilleure compréhension de l'univers par l'élève¹¹². L'introduction de la physique einsteinienne dans les programmes scolaires dans ces quatre pays a nécessité des changements au niveau de la formation des enseignants. Treagust (2019) souligne quelques contraintes relevées chez les enseignants, les directeurs d'écoles, les didacticiens et les ministres d'éducation liées à l'insertion des théories einsteiniennes dans le milieu scolaire :

- Un manque de confiance quant à l'emploi de nouvelles méthodes et à l'enseignement de nouveaux contenus;
- Le sentiment de peur quant aux connaissances nécessaires pour enseigner de nouveaux contenus;

¹¹² Si on s'attarde au programme de formation de l'école québécoise au primaire (MELS, 2009) (voir l'annexe 2), le concept de gravité est abordé dans deux sections (L'univers matériel et La Terre et l'espace). Dans le chapitre « L'univers matériel », deux savoirs portant sur la gravité sont décrits : « distinguer la masse (quantité de matière) d'un objet de son poids (force de gravité exercée sur une masse) » (Matière, f.) et « Décrire l'effet de l'attraction gravitationnelle » (Forces et mouvements, 3a). Cependant, la distinction entre la masse et le poids (savoir visé au cycle 2) ne peut pas être établie sans parler de l'attraction gravitationnelle (savoir visé au 3e cycle). Selon Baldy et Aubert (2005), « [l]es notions de poids, de masse et d'intensité de la pesanteur ne peuvent avoir de sens que si elles sont rattachées au champ conceptuel des phénomènes physiques qu'elles modélisent, notamment au phénomène de la chute des corps. »

Dans le chapitre « La Terre et l'espace », dans la section « Forces et mouvements », il est écrit que l'élève doit être en mesure de « Décrire le rythme des marées (hausse et baisse du niveau de la mer) » au 3e cycle. Cependant, ce concept est intrinsèquement lié à la gravité (qui est absente dans cette section) et à l'effet qu'elle engendre sur la variabilité des marées. Les sections « Systèmes et interaction » et « Système solaire », qui font partie du même chapitre, présentent des concepts liés à des caractéristiques des objets de notre système solaire et à la description des mouvements des étoiles, des planètes et des satellites. Cependant, le concept de la gravité qui est considérée comme étant une des forces fondamentales de l'univers n'est pas présenté. Ce n'est qu'à l'échelle des planètes, de la Lune et du Soleil que la gravité permet de nous faire comprendre la force qui façonne l'univers. La gravité provoque les mouvements des planètes, des étoiles et des galaxies et c'est pourquoi la Lune tourne autour de la Terre, la Terre tourne autour du Soleil et le système solaire tourne autour de la galaxie. Puisque la gravité porte aussi un impact important sur la forme des objets massifs, cela permettra d'expliquer aux élèves pourquoi la Terre, le Soleil et la Lune sont « ronds ».

Quant aux savoirs visés par le programme des sciences au secondaire (MELS, 2011b), les concepts qui sont en lien avec la gravité se présentent dans les deux chapitres suivants: l'univers matériel et la Terre et espace (voir l'annexe 3). D'un côté, on peut observer la progression dans les apprentissages selon les années de l'enseignement secondaire. D'un autre côté, l'absence de concepts tels que la masse inertielle, le principe d'équivalence, le temps, la vitesse, ne permet pas d'établir les liens entre les concepts présents. Quelles sont les conséquences engendrées, par exemple, par l'absence du concept de la masse inertielle sur la compréhension de l'élève du concept de la masse? La masse inertielle est une résistance d'un objet à la mise en mouvement ou au changement de vitesse. Pour mettre un objet en mouvement, il faut appliquer une force. Plus la masse d'un objet est grande, plus la force doit être grande. Ce principe est employé largement dans le domaine de la dynamique. Son absence peut engendrer des difficultés chez l'élève par le fait que seule la masse gravitationnelle sera employée pour définir le concept de masse et cette confusion risque de « voir remplacer le concept de masse inertielle par les frottements, car ils s'opposent tous les deux au mouvement » (Givry, 2003). Pour les distinguer, il faut introduire le principe d'équivalence. Parallèlement, dit cet auteur, les effets d'une force de frottement, qui ralentissent ou empêchent le mouvement d'un corps, pourraient expliquer la résistance au mouvement.

Deuxièmement, définir la gravitation comme une force d'attraction mutuelle qui s'exerce entre les corps à partir d'une chute libre, cette définition ne permet pas de comprendre pourquoi les objets accélèrent. Par ailleurs, les résultats de la recherche de Baldy (2007), montrent que l'observation de l'interaction à distance des objets ne permet pas aux élèves de comprendre la force d'attraction gravitationnelle.

- Une crainte que les élèves ne puissent pas prendre le contrôle de leur propre apprentissage;
- Une préoccupation d'enseigner davantage les concepts présents dans les examens du ministère;
- Le manque de matériel et d'outils pour enseigner de nouveaux concepts;
- Le manque de savoir dans l'utilisation des approches favorisant l'apprentissage actif et la compréhension qualitative de la physique moderne (discussion en groupes, ateliers d'écriture, réflexions sur les perspectives historiques et philosophiques de la science, etc.)

D'après Treagust (2019), la mise en œuvre d'un tel changement de paradigme dans l'enseignement de la physique est un défi à tous les niveaux scolaires. En effet, elle exige beaucoup de temps de recherche, de conception et d'analyse pour permettre aux milieux scolaires de mieux comprendre les avantages d'apprendre ces contenus.

Conclusion

Au tout début de mes études à la maîtrise, j'ai lu plusieurs articles portant sur l'enseignement et l'apprentissage du concept de gravité à l'école secondaire. Mes lectures m'ont mené à trois constats. Premièrement, il est impossible de comprendre le concept de gravité sans mobiliser les concepts développés par Einstein (relativité restreinte et générale). Deuxièmement, la théorie de la gravité d'Einstein est absente du curriculum scolaire québécois (quoique présente dans quelques manuels scolaires). Enfin, quatre pays ont récemment intégré l'enseignement de la gravité einsteinienne dans le programme scolaire au secondaire (la Corée du Sud, l'Allemagne, la Norvège et l'Écosse). En 2019, la gravité einsteinienne fera partie du curriculum scolaire au primaire et au secondaire en Australie.

Ces constats m'ont permis de formuler la question principale de ma recherche : quel est l'état des réflexions et des travaux de recherche sur l'enseignement et l'apprentissage de la physique einsteinienne et, plus particulièrement, de la gravité einsteinienne?

Pour répondre à cette question, j'ai effectué une recherche documentaire dans le but d'élaborer un portrait des études réalisées dans les dernières années au sujet de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique einsteinienne aux niveaux primaire et secondaire. Afin d'orienter la réalisation de ma recherche et de structurer la présentation des informations recueillies, je me suis référé à la première phase de la méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988), dite des analyses préalables. Cette première étape de l'ingénierie didactique permet d'amorcer l'analyse et éventuellement la conception et la réalisation de séquences d'enseignement (ce que je vise à réaliser dans ma recherche doctorale à partir de l'automne 2019).

Pour atteindre l'objectif de recherche et constituer une image claire de la situation actuelle, j'ai consulté plusieurs types de ressources: ouvrages scientifiques, articles scientifiques, sites web, articles journalistiques, essais et mémoires, films, documentaires, émissions de radio, entrevues, conférences vidéo, documents archivés, etc. Cette recherche d'informations était nécessaire pour mieux comprendre le rôle du concept de gravité einsteinienne dans le développement de la physique moderne et dans les réflexions et les travaux qui s'arriment à son enseignement aux niveaux primaire et secondaire. Dans ce qui suit, j'effectue un bref retour sur ce que je retiens de principaux constats auxquels je suis parvenu dans le cadre de ce mémoire.

Idées principales

Les recherches menées depuis les dernières années illustrent que l'enseignement de la gravité einsteinienne et son insertion dans les programmes éducatifs constituent une préoccupation croissante dans le champ de l'enseignement des sciences. Les résultats de ces recherches montrent que les élèves apprécient les expériences parce qu'elles leur permettent de mieux comprendre les phénomènes scientifiques et de faire des liens avec le fonctionnement et le développement des technologies actuelles.

Développement des sciences et des hautes technologies

Les travaux d'Albert Einstein ont beaucoup influencé le développement des sciences physiques au 20^e et au 21^e siècle (astrophysique, biophysique, physique théorique, physique de la matière condensée, gravité quantique, physique nucléaire, cosmologie relativiste, physique quantique). Ils ont permis le développement des technologies dans les domaines tels que la médecine, la sécurité nationale et la communication. Le GPS, l'internet, la télévision et la radio ne sont que des rappels quotidiens de la théorie de la relativité d'Einstein, aussi bien restreinte que générale.

Buts visés par l'enseignement de sciences

Les recherches menées sur l'enseignement de la physique einsteinienne partagent la vision selon laquelle l'éducation aux sciences doit contribuer à une meilleure compréhension de l'univers par l'élève. De l'avis des chercheurs, pour mieux comprendre les sciences et les technologies d'aujourd'hui, les élèves ont besoin de connaissances issues de la physique moderne.

Système cohérent des connaissances

En particulier, l'apprentissage de la gravité einsteinienne permet de se questionner sur la causalité des phénomènes de la nature physique et de mieux saisir les relations entre les concepts fondamentaux en physiques (gravité, masse, énergie, temps, accélération, lumière, géométrie de l'espace). Par conséquent, il constitue une opportunité de mieux comprendre l'univers et le monde dans lequel nous vivons. Cela correspond, selon Couture (2002), à la visée principale de l'éducation scientifique : donner aux élèves des clés essentielles leur permettant de répondre à des questions scientifiques et techniques dans le cadre de leur vie quotidienne.

Les connaissances physiques ne sont pas universelles

Même si certaines connaissances scientifiques restent durables pendant une longue période, elles ne sont jamais absolues et universelles. Le développement de la science repose entre autres sur la recherche d'ajustements à des théories existantes (par exemple, à la géométrie d'Euclide, à l'astronomie de Copernic et de Kepler, à la mécanique newtonienne, etc.). Selon Norton (2007), la plupart

des théories développées par la communauté scientifique finiront par être remplacées par de nouvelles théories. La gravité d'Einstein n'est pas non plus un système de connaissances universelles. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, elle est la seule théorie utilisée dans le monde physique pour comprendre la gravité.

Approches d'enseignement de la physique einsteinienne

D'après David Blair (2019), la question qui préoccupe les chercheurs dans le domaine de l'enseignement de la physique moderne n'est pas celle d'enseigner la physique einsteinienne ou de ne pas l'enseigner, mais plus tôt de chercher comment l'enseigner. Il ressort de ce mémoire que l'enseignement de la physique en général et des théories einsteiniennes en particulier doit mettre de l'avant des méthodes d'apprentissage actif. Plusieurs approches favorisent la compréhension qualitative de la physique moderne : expériences de pensée, analogies et visualisations de phénomènes relativistes, discussion en groupe sur la coexistence des différentes théories contradictoires, ateliers d'écriture, réflexions sur les perspectives historiques et philosophiques de la science, présentation des exemples de conflits scientifiques résolus, ainsi que des exemples de conflits scientifiques non résolus. À partir de l'enseignement de la gravité einsteinienne, les élèves seront introduits à des théories qui permettent de mieux comprendre l'univers et la nature parfois imaginative de la connaissance scientifique. Il ressort de ce mémoire qu'il est possible d'enseigner la relativité d'Einstein sans avoir recours à des mathématiques complexes en utilisant des approches plus « qualitatives » (voir le chapitre 3).

Âge d'enseignement

Les auteurs des recherches soutiennent l'idée selon laquelle les éléments de la gravité einsteinienne gagnent à être enseignés à tous les niveaux scolaires (moyennant des adaptations pédagogiques en fonction de l'âge des élèves). Selon eux, pour faire progresser les élèves dans la conceptualisation des phénomènes physiques, il importe de les introduire à la démarche de « pensée expérimentale » à partir d'un jeune âge. Plusieurs chercheurs soulignent qu'il est préférable d'enseigner les concepts de la physique einsteinienne en amont de ceux de la physique newtonienne parce que cela permet aux élèves de mieux comprendre des phénomènes naturels.

Par ailleurs, la culture médiatique chez les jeunes est influencée par plusieurs notions einsteiniennes (l'on songe au voyage dans le temps, à la vitesse de la lumière, à l'expansion de l'univers, aux années-lumière, aux multivers qu'on retrouve dans les films de science-fiction, des bandes dessinées et des séries animées.)

Pourquoi la théorie d'Einstein ne fait-elle pas partie du curriculum?

L'analyse de la littérature sur ce sujet a permis de cerner quelques raisons qui permettent d'expliquer cette situation. La première est en lien avec l'enseignement des nouvelles théories : la crainte d'aborder des théories révolutionnaires et complexes en physique, le manque de ressources d'enseignement, le manque de temps alloué à l'enseignement des sciences et la peur de ne pas être en mesure de donner des réponses concrètes aux jeunes. La deuxième concerne une vision stable du monde physique qui provoque le refus d'accepter les nouvelles idées. D'après Russel (1925), l'apprentissage des concepts einsteiniens exige des changements dans notre imagination qui sont difficiles à l'âge d'adulte. La troisième est due aux difficultés d'intégrer des nouvelles idées dans le cursus scolaire. Par ailleurs, il semble que la réussite de l'intégration dépend grandement des qualités personnelles des gens. David Blair (*Einstein-first* en Australie)¹¹³, Magdalena Kersting (*ReleQuant* en Norvège) et Ute Kraus et Corvin Zahn (Institut für Physik à l'université de Hildesheim en Allemagne), sont des chercheurs passionnés qui se dédient au rayonnement de leurs idées. Ils ont développé des projets, des approches et des modèles pour permettre aux élèves de mieux comprendre la relativité d'Einstein et en particulier les éléments de la gravité einsteinienne.

Limites de cette recherche

Les limites de cette étude découlent de choix théoriques ou méthodologiques que j'ai effectués. J'ai par exemple lu certains ouvrages plutôt que d'autres et employé la démarche de méthodologie de l'ingénierie didactique plutôt qu'une autre approche. D'autres limites proviennent de mon bagage intellectuel de jeune chercheur et de mon expérience assez limitée de la pratique de l'enseignement. Enfin, il y a aussi celles dues au temps somme toute assez court alloué à la rédaction de ce mémoire.

La recherche des informations sur le sujet de l'enseignement de la gravité einsteinienne m'a permis de constater que le nombre de recherches menées sur ce sujet est relativement limité. Les informations recueillies sont de nature différente et les contenus présentés diffèrent beaucoup (compte tenu des objectifs visés par les auteurs et selon les exigences des revues). En m'appuyant sur les éléments déterminés dans ma méthodologie, j'ai colligé des informations portant sur les objectifs des

¹¹³ J'ai l'honneur de connaître ces personnes. Dès l'automne 2019, je ferai partie du projet d'intégration des théories einsteiniennes dans les programmes de l'enseignement à l'école primaire et secondaire en Australie, dans le cadre des études au doctorat (au *Physics, Mathematics and Computing* et *Graduate School of Education* à *University of Western Australia*).

recherches menées et les résultats obtenus, les concepts enseignés, les démarches et les modèles utilisés pour leur enseignement, les conceptions des élèves et quelques obstacles qu'ils rencontrent dans l'apprentissage des concepts étudiés.

Perspectives

Sur le plan théorique, cette recherche permet de donner des pistes de réflexions et d'idées aux enseignants et aux chercheurs qui s'intéressent au sujet de l'enseignement des théories einsteiniennes. Ces pistes de réflexion peuvent porter en particulier sur les éléments suivants :

- Les approches et les méthodes d'enseignement des concepts particuliers;
- La conception de modèle permettant la meilleure visualisation des phénomènes;
- La réalisation de séquences d'enseignement et la description de difficultés rencontrées par l'enseignant et par les élèves;
- Les approches de formations des enseignants.

En ce qui me concerne, l'étude et les réflexions sur l'enseignement de la gravité einsteinienne ne se terminent pas avec ce mémoire. Pour moi, cette étape constitue un point de départ théorique et méthodologique pour mener plus loin une réflexion didactique sur les contenus et les méthodes d'enseignement de ce concept.

Bibliographie

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., ... Zweizig, J. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 1-16. doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102
- Archambault, A. et Venet, M. (2007). Le développement de l'imagination selon Piaget et Vygotsky : d'un acte spontané à une activité consciente. *Revue des sciences de l'éducation*, 33(November), 5-24. Repéré à <https://doi.org/10.7202/016186ar>
- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherche en didactique des mathématiques*, 9(3), 281-308.
- Ashby, N. (2003). Relativity in the Global Positioning System Imprint. *Living Reviews in Relativity*, 6, 1-42. doi:10.1063/1.1485583
- Bachelard, G. (1934). *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Bibliothèque des textes philosophiques.
- Baldy, E. (2007). A new educational perspective for teaching gravity. *International journal of science education*, 29(14), 1767-1788. doi:10.1080/09500690601083367
- Baldy, E. et Aubert, F. (2005). Etude de l'apprentissage du phénomène physique de la chute des corps en classe de 3e française. *Didaskalia*, 109-131.
- Barrau, A. (2017a). *Au-delà de la relativité générale : Aurélien Barrau et Laurent Sacco au Centre Pompidou - YouTube*. Repéré à https://www.youtube.com/watch?v=kS_PU3MFPPA&t=1582s
- Barrau, A. (2017b). L'Univers (Partie 11/11). Cours « tout public » Aurélien Barrau. Un multivers ? - YouTube. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=C8dNVkBHeNc>
- Barrau, A. et Grain, J. (2011a). *Relativité générale, cours et exercices corrigés*. Dunod.
- Barrau, A. et Grain, J. (2011b). *Relativité générale*. Dunod.
- Bennett, C. L., Larson, D., Weiland, J. L., Jarosik, N., Hinshaw, G., Odegard, N., ... Wright, E. L. (2013). Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Final maps and results. *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 208(2), 1-177. doi:10.1088/0067-0049/208/2/20
- Bernardeau, F. et Uzan, J.-P. (2008). La Constante Cosmologique. *Images de la physique*, 8-13. Repéré à <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2008/03-Bernardeau.pdf>

- Blair, D. (2012a). Explainer: gravity. Repéré à <https://theconversation.com/explainer-gravity-5256>
- Blair, D. (2012b). Testing the theory: taking Einstein to primary schools. Repéré à <https://theconversation.com/testing-the-theory-taking-einstein-to-primary-schools-9710>
- Blair, D. (2012c). Testing the theory: taking Einstein to primary schools. *The Conversation*, 2-5. Repéré à <http://theconversation.com/testing-the-theory-taking-einstein-to-primary-schools-9710>
- Blair, D. (2019a). *Einsteinian relativity: A challenge for school education. Presentation at the general relativity as a challenge for physics education.*
- Blair, D. (2019b). UWA awarded \$898,560 to teach Einstein's physics in school, University News. *The University of Western Australia*. Repéré à <http://www.news.uwa.edu.au/2019031911282/research/uwa-awarded-898560-teach-einsteins-physics-schools>
- Blair, D., Henriksen, K. et Ellen Hendry, M. (2016). Why don't we teach Einstein's theories in school? Repéré 1 mars 2018, à <https://theconversation.com/why-dont-we-teach-einsteins-theories-in-school-69991>
- Blair, D. et McNamara, G. (1997). *Ripples on a cosmic sea: the search for gravitational waves*. Basic Books.
- Boyle, J. (2019a). Teaching gravitational waves in the lower secondary school. Part I. A teaching module. *Physics Education*, 54(2), 025005. doi:10.1088/1361-6552/aaf779
- Boyle, J. (2019b). Teaching gravitational waves in the lower secondary school. Part II. A model for a STEM enrichment programme. *Physics Education*. IOP Publishing. doi:10.1088/1361-6552/aaf779
- Boyle, J. (2019c). Teaching gravitational waves in the lower secondary school. Part III. Monitoring the effect of a STEM intervention on students' attitude, self-efficacy and achievement. *Physics Education*, 54(2), 025007. doi:10.1088/1361-6552/aaf771
- Brousseau, G. (2013). Introduction à l'Ingénierie Didactique. *Laboratoire Cultures, Education, Sociétés (LACES), Université Bordeaux 2.*, 1-12. doi:10.3917/eres.colle.2008.01.0091
- Brown, A. G. A., Perryman, M. A. C., Kovalevsky, J., Robichon, N., Turon, C. et Mermilliod, J. C. (1997). The Hyades: Distance, structure and dynamics. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 120(402)*, 681-686. doi:10.1038/472426a

- Butler, D. (2015). *How Fast Is It-General Relativity II-Effects*. Repéré à <http://howfarawayisit.com/wp-content/uploads/2015/12/General-Relativity-II-Effects.pdf>
- Cardona, M. (2005). Albert Einstein as the father of solid state physics. *ArXiv e-prints*, (August), 1-26. Repéré à <http://arxiv.org/abs/physics/0508237>
- CERN. (2017). *LHC Guide*. Repéré à <https://cds.cern.ch/record/2255762>
- Clough, M. P. (2006). Learners' responses to the demands of conceptual change: Considerations for effective nature of science instruction. *Science and Education*, 15(5), 463-494. doi:10.1007/s11191-005-4846-7
- Damour, T. (2015). 1974: The discovery of the first binary pulsar. *Classical and Quantum Gravity*, 32(12), 1-18. doi:10.1088/0264-9381/32/12/124009
- Dautresme, I. et Klein, E. (2015). Étienne Klein : « L'enseignement, c'est du corps à corps ». *Educpros*. Repéré à <https://www.letudiant.fr/educpros/entretiens/etienne-klein.html>
- Deutch, D. (1997). *The fabric of reality*. Penguin books.
- Dykstra, D. I. (2007). The Challenge of Understanding Radical Constructivism. *Constructivist Foundations*, 2(2-3), 50-57.
- Dyson, F. W., Eddington, A. S. et C. Davidson. (1919). A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, (2), 291-333.
- Egdall, M. (2009). Teaching general relativity to the layperson. *The physics teacher*, 47(8), 522-527. doi:10.1119/1.3246471
- Einstein, A. (1905). De l'électrodynamique des corps en mouvement. *Annalen der Physik*.
- Einstein, A. (1907). Planck's theory of radiation and the theory of the specific heat. *Annalen der Physik*, 22(180). Repéré à <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/228>
- Einstein, A. (1916a). Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, 688-696. Repéré à http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW./1916/1916SPAW.....688E.pdf
- Einstein, A. (1916b). *Relativity: The Special and General Theory*. Methuen & Co Ltd.
- Einstein, A. (1921). *La Géométrie et l'Expérience*. Gauthier-Villars. Repéré à

https://fr.wikisource.org/wiki/La_Géométrie_et_l'Expérience

Einstein, A. (2012). *La théorie de la relativité restreinte et générale*. Dunod.

Einstein, A. et Adams, E. P. (1923). *The Meaning of Relativity, four lectures delivered at Princeton University, May, 1921*. Princeton university press. Repéré à www.gutenberg.org/ebooks/36276

Einstein, A. et Infeld, L. (1938). *Evolution of physics: the growth of ideas from early concepts to relativity and quanta*. New York : Simon & Schuster.

Einstein, A. et Vankov, A. A. (2011). Einstein's Paper : “ Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from General Relativity Theory ”. *IPPE*. Repéré à <https://web.archive.org/web/20120904220236/http://www.gsjournal.net/old/eeuro/vankov.pdf>

Einstein et Solovine, M. (1958). *Comment je vois le monde*. Flammarion.

Encyclopedia. (2005). Charge-coupled Device. Repéré à <https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/computers-and-electrical-engineering/computers-and-computing/charge-coupled-device>

Encyclopedia. (2006). Positron Emission Tomography (PET) Unit. Repéré à <https://www.encyclopedia.com/medicine/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/positron-emission-tomography-pet-unit>

Encyclopedia. (2008a). Bernhard Riemann. Repéré à <https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/mathematics-biographies/bernhard-riemann>

Encyclopedia. (2008b). Bertrand Arthur William Russell. Repéré à <https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/mathematics-biographies/bertrand-arthur-william-russell>

Encyclopedia. (2008c). Carl Friedrich Gauss. Repéré à <https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/mathematics-biographies/carl-friedrich-gauss>

Encyclopedia. (2008d). James Clerk Maxwell. Repéré à <https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/physics-biographies/james-clerk-maxwell>

Encyclopedia. (2008e). Lev Semenovich Vygotsky. Repéré à

<https://www.encyclopedia.com/people/medicine/psychology-and-psychiatry-biographies/lev-semenovich-vygotsky>

Encyclopedia. (2008f). Richard Phillips Feynman. Repéré à

<https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/physics-biographies/richard-phillips-feynman>

Fabre, L. et Einstein, A. (1921). *Les theories d'einstein*. Paris : PAYOT & Cie.

Farr, B., Schelbert, G. et Trouille, L. (2012). Gravitational-wave Science in the High School Classroom, 1-18. doi:10.1119/1.4738365

Faur, B. et Cross, J. (1991). Newton, Maimonides, and esoteric knowledge. *Cross Currents*, 40(4), 15-18. Repéré à http://moreshetsepharad.org/media/Newton_Mathematics_and_Esoteric_Knowledge.pdf

Feynman, R. (1955). *The Value of Science. address to the National Academy of Sciences*. doi:10.4324/9780203404928_chapter_12

Feynman, R. (1988). *What do you care what other people think?: further adventures of a curious character*. Penguin Adult.

Foppoli, A., Choudhary, R., Blair, D. et Kaur, T. (2018). Public and Teacher Response to Einsteinian Physics in Schools. *arXiv Physics Education*. doi:arXiv:1806.10776v1

Ford, K. W. (1989). Guest Comment: Is physics difficult? *American Journal of Physics*, 57(10), 871-872. doi:10.1119/1.15837

Gafoor, K. A. (2010). Strategies for Facilitating Conceptual Change in School Physics. *Innovations and Researches in Education*, 3(1), 34-42.

Gamow, G. (1962). *Gravity: classic and modern views*. Garden City, N.Y : Anchor Books, 1962.

Gerk, E. (2019). The Einstein Phenomenon and « fake news », (April).

Gim, J. (2016). Special Theory of Relativity in South Korean High School Textbooks and New Teaching Guidelines. *Science and Education*, 25(5-6), 575-610. doi:10.1007/s11191-016-9840-8

Givry, D. (2003). Le concept de masse en physique : quelques pistes à propos des conceptions et des obstacles. *Didaskalia*, 22, 41-67.

Gladwell, I. (2008). Boundary value problem. *Scholarpedia*, 3(1), 2853. doi:10.4249/scholarpedia.2853

- Glaserfeld, E. Von. (1989). Cognition, Construction of Knowledge, and Teaching. *Univie*, 80(1), 1-15.
- Hawking, S. (1988a). *A Brief History of Time*. Bantam books.
- Hawking, S. (1988b). *Brève histoire du temps*. Flammarion.
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T. et Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678. Repéré à <http://stacks.iop.org/0031-9120/49/i=6/a=678>
- Herdeiro, C. A. R. et Lemos, J. P. S. (2018). The black hole fifty years after: Genesis of the name. *ArXiv e-prints*. Repéré à <http://arxiv.org/abs/1811.06587>
- Hodgkiss, A., Gilligan, K. A., Tolmie, A. K., Thomas, M. S. C. et Farran, E. K. (2018). Spatial cognition and science achievement: The contribution of intrinsic and extrinsic spatial skills from 7 to 11 years. *British Journal of Educational Psychology*, 88(4), 675-697. doi:10.1111/bjep.12211
- Hofstadter, D. (2013). Toute pensée est analogie - Le Point. Repéré 26 août 2018, à http://www.lepoint.fr/culture/hofstadter-toute-pensee-est-analogie-07-03-2013-1690811_3.php
- Hofstadter, D. et Sander, E. (2013). *Surfaces and Essences: Analogy as the Fuel and Fire of Thinking*. Basic Books.
- Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3), 168-173. doi:10.1073/pnas.15.3.168
- Hulse, R. A. et Taylor, H. J. (1974). Discovery of a Pulsar in a Close Binary System. *The Astrophysical Journal*, 195, L51-L53. doi:10.1086/181708
- Im, S., Yoon, H. G. et Cha, J. (2016). Pre-service science teacher education system in South Korea: Prospects and challenges. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(7), 1863-1880. doi:10.12973/eurasia.2016.1533a
- Isaacson, W. (2007). *Einstein, his life and universe* (vol. 52). Simon & Schuster.
- Jarvis, W. H. (1981). Albert Einstein – The Human Side. *Physics Bulletin*, 32(11), 365. Repéré à <http://stacks.iop.org/0031-9112/32/i=11/a=029>
- K' doah Range, S., Spencer, J. et Kahn, B. (2004). Gravity probe B: Investigating Einstein's spacetime with gyroscopes. *National Aeronautics and Space Administration*. Repéré à

http://einstein.stanford.edu/content/education/GP-B_T-Guide4-2008.pdf

Kaur, T. (2018). Einsteinian Physics : Challenging the Paradigm for Teaching High School Science.

Kaur, T., Blair, D., Burman, R., Gower, G., Mitchell, D., Moschilla, J., ... Zadnik, M. (2017).

Teaching the Einsteinian gravity paradigm. *arXiv Physics Education*. Repéré à

<https://arxiv.org/abs/1703.00164>

Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W. et Zadnik, M. (2017a). Teaching einsteinian physics at schools: Part 1, models and analogies for relativity. *Physics Education*, 52(6), aa83e4.

doi:10.1088/1361-6552/aa83e4

Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W. et Zadnik, M. (2017b). Teaching Einsteinian physics at schools: part 2, models and analogies for quantum physics. *Physics Education*, 52(6).

doi:10.1088/1361-6552/aa83e4

Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W. et Zadnik, M. (2017c). Teaching einsteinian physics at schools: Part 3, review of research outcomes. *Physics Education*, 52(6), aa83dd.

doi:10.1088/1361-6552/aa83dd

Kersting, M., Henriksen, E. K., Bøe, M. V. et Angell, C. (2018). General relativity in upper secondary school: design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction. *Physical Review Physics Education Research*, 14.

doi:10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010130

Kersting, M. et Steier, R. (2017). Gravity, imagination and embodied conceptions of spacetime.

European Science Education Research Association, 1-3.

Kersting, M. et Steier, R. (2018). Understanding Curved Spacetime: The Role of the Rubber Sheet Analogy in Learning General Relativity. *Science and Education*, 27(7-8), 593-623.

doi:10.1007/s11191-018-9997-4

Kim, H. et Lee, G. (2016). Development of a general relativity class for physics teachers: A framework of relativity as a big picture, 1-3.

Kim, H. et Lee, G. (2018). Reflection and Outlook on Special Relativity Education from the Perspective of Einstein: Focusing on Research Papers Published in Korea. *Journal of the Korean Physical Society*, 73(4), 422-435. doi:10.3938/jkps.73.422

Kincheloe, J. L., Steinberg, S. R. et Tippins, D. J. (1999). Einstein and the purposes of schooling purposes of schooling (vol. 111, p. 49-75).

- Klein, E. (1999). Qu'est le Big Bang devenu ? *Express, B I O*.
- Klein, E. (2008). Les jeunes et la science, *Tome 409*, 173-181. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-etudes-2008-9-page-17>
- Klein, E. (2016). La découverte des ondes gravitationnelles, « la plus heureuse idée d'Einstein ». Repéré 2 avril 2019, à https://www.lemonde.fr/idees/article/2016/02/16/la-plus-heureuse-idee-d-albert-einstein_4865924_3232.html
- Koyré, A. (1966). Newtonian studies. *Journal of the Franklin Institute*, 282(6), 404-405. doi:10.1016/0016-0032(66)90051-2
- Kraus, U. et Zahn, C. (2016). Gravitational Waves : Models and Experiments on Waveforms , Effects and Detection, 1-8.
- Kuhn, T. (1970). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- Kuznetsov, B. (1960). *Einstein*. New Delhi : People's publishing house.
- Lederman, N. G. et Lederman, J. S. (2004). Revising instruction to teach nature of science: modifying activities to enhance student understanding of science: modifying activities to enhance student understanding of science. *The Science Teacher*, 71(9), 36-39.
- Licato, J. (2015). *Analogical Constructivism : the Emergence of Reasoning Through Analogy and Action*. Rensselaer Polytechnic Institute.
- Lindner, U., Einasto, J., Einasto, M. et Freudling, W. (1995). The structure of supervoids -1: Void Hierarchy in the Northern Local Supervoid. *Astronomy and Astrophysics*, 12.
- McMahon, D. et Alsing, P. M. (2005). *Relativity demystified*. McGraw-Hill Education. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=RqFn-T8MbYC>
- MELS. (2009). Progression des apprentissages: Science et technologie (primaire). Repéré à http://www1.education.gouv.qc.ca/progressionPrimaire/science/pdf/sciTech_sectionCom.pdf
- MELS. (2011a). Progression des apprentissages au secondaire, (Physique, Programme optionnel de 5e secondaire). Repéré à http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/dpse/formation_jeunes/progrApprSec_Physique_fr.pdf
- MELS. (2011b). Progression des apprentissages au secondaire. Repéré à http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/dpse/formation_jeunes/progrApprSec_ST_PFG_fr-2011-11-24.pdf

- Milner-Bolotin, M. et Johnson, S. (2017). Physics outreach. *La physique au Canada*, 73(3), 121-126.
- Misner, C. W., Thorne, K. S. et Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman.
- Newton, I. (2016). *The Principia: The Authoritative Translation and Guide: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=EQLWCgAAQBAJ>
- Norton, J. D. (2007). *Einstein for everyone*. Nullarbor Press. Nullarbor Press. Repéré à http://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/
- OECD. (2007). *Risks and Benefits of Nuclear Energy*. Nuclear Energy Agency.
- Osborne, J., Simon, S. et Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079. doi:10.1080/0950069032000032199
- Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: the science and the life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- Paty, M. (2004). L'année admirable. *Pour la Science (Edition)*, 26-33.
- Paty, M. (2007). La religion cosmique d'Einstein. Repéré à <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00167288>
- Piaget, J. (1955). Les structures mathématiques et les structures opératoires de l'intelligence. *L'Enseignement des Mathématiques*, 11-33.
- Pitts, M. (2017). *Awakening students' minds to Einstein, Gravity and the Solar System A study of outreach centre effectiveness*. The University of Western Australia.
- Pitts, M., Venville, G., Blair, D. et Zadnik, M. (2014). An exploratory study to investigate the Impact of an enrichment program on aspects of einsteinian physics on year 6 students. *Research in Science Education*, 44(3), 363-388. doi:10.1007/s11165-013-9386-6
- Popper, K. R. (1977). Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge. *Systematic Zoology*, 26(3), 363. doi:10.2307/2412688
- Possel, M. (2017). Relatively complicated? Using models to teach general relativity at different levels. *arXiv Physics Education*, 1-97.
- Quirion, R. (2018). Opinion: Stimuler la curiosité scientifique - La Presse+. *Lapresse*. Repéré à http://plus.lapresse.ca/screens/d21684d5-d73a-4147-b2c6-77db58ca5192__7C__0.html

- Rindler, W. et Salisbury, D. (2003). Relativity: Special, General, and Cosmological. *American Journal of Physics*, 71, 1085. doi:10.1119/1.1622355
- Russell, B. (1925). ABC of Relativity. *ABC of Relativity*. doi:10.4324/9780203875476
- Ryan, D. P. (1987). *Einstein and the Humanities*. Greenwood Press.
- Rybczyk, J. A. (2016). Relationship of $E = mc^2$ to $F = ma$ and Gravity. Repéré 29 mai 2018, à [http://www.mrelativity.net/RelationshipEmc2toFmaandGravity/Relationship of E = mc2 to F = ma and Gravity.htm](http://www.mrelativity.net/RelationshipEmc2toFmaandGravity/Relationship%20of%20E%20=%20mc2%20to%20F%20=%20ma%20and%20Gravity.htm)
- Semay, C. et Silvestre-Brac, B. (2016). *Relativité restreinte: bases et applications*.
- Sepper, D. L. (2009). Goethe , Newton , and the Imagination of Modern Science. *Revue internationale de philosophie*, 261-277.
- Smolin, L. (2006). *The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science and what comes next* (vol. 33). New York : Houghton Mifflin Company.
- Smolin, L. (2019). *Einstein's Unfinished Revolution: Lee Smolin public lecture webcast - Inside The Perimeter*. Repéré à <https://insidetheperimeter.ca/einsteins-unfinished-revolution-lee-smolin-public-lecture-webcast/>
- Soler, L. (2009). *Introduction à l'épistémologie*. Ellipses.
- Spagnou, P. (2017a). Einstein et la révolution relativiste.
- Spagnou, P. (2017b). Le principe d'équivalence et l'effet Einstein. *Bibnum Revues*. Repéré à <http://bibnum.revues.org/845%0AÉditeur>
- Spagnou, P. (2018). Einstein et l'article incompris de 1911. *Bibnum OpenEdition Journals*. Repéré à <http://journals.openedition.org/bibnum/1072%0ACe>
- Stannard, W. (2015). *The Einstein-first project as part of the second expert educators group meeting in western Australia*. Perth. Repéré à <https://www.facebook.com/Einstein.First/videos/1581031402186046/?v=1581031402186046>
- Strange, P. (1998). *Relativistic quantum mechanics: with applications in condensed matter and atomic physics*. Cambridge University Press.
- Teel, J. (2015). Planet Analog - Thank you Albert Einstein for GPS. Repéré à https://www.planetanalog.com/author.asp?section_id=3314&doc_id=563953
- Treagust, D. (2019). Time for changing paradigms in science and in education. Presentation at the

- general relativity as a challenge for physics education. Bad Honnef.
- Tremaine, S. et al. (2002). The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A., (2), 2943-2948. doi:10.1086/340434
- Tucker, W. (2018). Understanding $E = mc^2$ - Fusion 4 Freedom. Repéré à <http://fusion4freedom.com/understanding-e-mc2/>
- Viereck Sylvester, G. (1929, 26 octobre). What life means to Einstein, an interview. *The Saturday evening post*, p. 110-117. New York.
- von Glasersfeld, E. (1994). Pourquoi le constructivisme doit-il être radical? *Revue des sciences de l'éducation*, 20(1), 21. doi:10.7202/031698ar
- von Glasersfeld, E. (2003). Review of “ Beyond constructivism ”. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 35(6), 1-8.
- Von Glasersfeld, E. (2001). Radical Constructivism and Teaching What is the Purpose of Education? *French in Perspectives*, 31(2), 1-12.
- Vygotski, L. et Janel, R. (2018). Lev-Sémionovitch Vygotski , Leçons de psychologie. *Leçons de psychologie*.
- Watkins, T. R. (2014). *Gravity & einstein: assessing the rubber sheet analogy in undergraduate conceptual physics*. Boise State University.
- Zahn, C. et Kraus, U. (2014). Sector models - A toolkit for teaching general relativity: I. Curved spaces and spacetimes. *European Journal of Physics*, 35(5), 1-18. doi:10.1088/0143-0807/35/5/055020
- Zahn, C. et Kraus, U. (2018a). Sector models—A toolkit for teaching general relativity: III. Spacetime geodesics. doi:10.1088/0143-0807/35/5/055020
- Zahn, C. et Kraus, U. (2018b). Sector models - A toolkit for teaching general relativity: II. Geodesics. doi:10.1088/0143-0807/35/5/055020
- Zheludev, N. (2007). The life and times of the LED — a 100-year history. *Nature Photonics*, 1, 189. Repéré à <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.34>

Annexes

Annexe 1. Affiche présentée au « General relativity as a challenge for physics education » (2019)



Research objectives

- Acquire a better understanding of the advantages of teaching the concepts of Einstein's theory of gravity (ETG) in upper primary, secondary & CEGEP schools.
- Analyse content and methods for teaching ETG.

WHY?

- In the province of Quebec, like elsewhere in Canada, the number of students majoring in physics is in decline. Checkley (2010) and Groleau (2011) suggests that there is a lack of interest that may be related to misconceptions of what physics is.
- Einstein's general relativity has revolutionized physics.
- Students could develop their imagination, level of abstraction and inductive logic (Kersting & Steier, 2017; Norton, 2018; Pitts, Venville, Blair, & Zadnik, 2014; Valentzas & Halkia, 2013).
- Through ETG, students will appreciate the mysteries of the universe and the imaginative nature of scientific knowledge.
- It is possible to teach Einstein's general and special relativity without the use of complex mathematics, thus providing a cutting-edge education (Kaur, Blair, Moschilla, Stannard, & Zadnik, 2017; Kersting & Steier, 2017).

- Teaching ETG allows students to better understand Newtonian physics (Baldy, 2007).
- ETG is not part of the Quebec curriculum and is rarely introduced in our CEGEPs (12 grade & 1st-year university).

My hypotheses:

- Teaching Einstein's theory of gravity (ETG) as an introduction to modern physics, allows students to better understand relations between many physical notions taught in school.
- Students are ready to learn ETG considering that their entertainment life is filled with it, i.e. Science fiction cartoons, movies, books, documentaries, comics, and more.

Methodological framework

Didactic engineering phases by Artigue (1988)



- Epistemological analysis of content
- Analysis of teaching practices
- Analysis of students' conceptions, difficulties and obstacles
- Analysis of what can and cannot be taught

WHAT?

The theoretical framework will highlight:

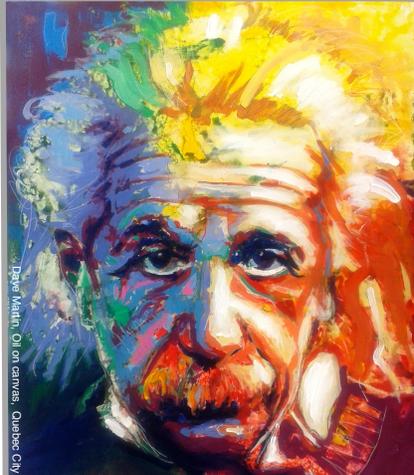
- Epistemological work, analysis of theories and the history and development related to the concept of gravity
- Ramifications of this new paradigm (Kuhn, 1970) on the development of physics (Barrau, 2017; Einstein and Solovine, 1958; Kuhn, 1970; McMahon and Alsing, 2005; Misner, Thorne and Wheeler, 1973; Norton, 2007; Strong, 1966)

WHO & WHEN?

- Einstein-First Project for school students from Year 4 to Year 12 in Western Australia (Kaur, Blair, Moschilla, Stannard, & Zadnik, 2017a)
- ReleQuant project (online resources) for Norwegian upper secondary physics students (18-19 years old) (Kersting, Henriksen, Bøe, & Angell, 2018; Kersting & Steier, 2018)
- Perimeter Institute for theoretical physics (Canada) provides educational online resources intended for Senior Highschool students (Grade 11-12)

Currently, few researchers are working on this topic leaving us with many open questions:

- How and at what level Einstein's theories can be taught?
- What are the difficulties in teaching Einstein's theory of gravity to students of different levels?
- What teaching theories, methods and models are to be adapted?
- How to make this important body of knowledge an integral part of the curricula?



About

- Special relativity:** Inertial vs accelerated motion, absolute and relative motion, the principles and postulates (speed of light, physical laws in inertial frames), time, a new dimension, time dilation, twin paradox, time travel, contraction of objects, space-time.
- General relativity:** Principle of equivalence, mass, geometry of space, Euclidean and non-Euclidean geometry, geodesic, tensors, Riemannian geometry, Mercury's orbit, curvature of light, gravitational dilation, GPS systems, Pound and Rebka experiment, Lense-Thirring effect, black holes, gravitational waves, Big Bang.

"Ofentimes the difference between success and failure isn't knowing what, why or how to do it, it's understanding who to do it with and when." A. E.

For Teachers in Quebec

The first *Cercle scientifique* - EinsteinPlus, in collaboration with the was held in 2018. 13 participants took part Perimeter Institute of Theoretical Physics outreach programs in this one-week summer seminar, which was designed for francophone teachers.



HOW?

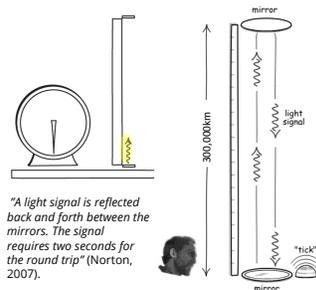
The didactic framework analyses:

- "conceptual change" theory (de Vecchi and Giordan, 1989)
- theory of didactic situations (Brousseau, 1998)
- theory of conceptual fields (Vergnaud, 1990)

This didactic framework helps to understand, explain, describe, predict and explore the "conceptual change" of students.

Epistemological approaches

- Socio-constructivism:** Using Vygotsky's (1983) "zone of proximal development" through communication, where knowledge is socially based, will allow for effective for learning.
- Analogical Constructivism:** The ability to reason analogically is a central marker of human cognition (Licato, 2015). Categorization by analogy is the motor of thinking at all levels. It is not logic that shapes our thoughts; it is analogies (Hofstadter, 2013).
- Radical Constructivism:** The four-dimensional structure of Einstein's universes is be viewed as model and not as complete representation of the real world. Teachers need make this distinction clear. *"The scientific view of science as the source of Truth about reality is no less dangerous than any religious fundamentalism"* (Von Glasersfeld, 2003).



Example of a model: A Light Clock is a useful visual tool for conceptually understanding Einstein's postulates, time dilation, contraction of objects, reference frames and gravitational dilation.

Annexe 2. Extrait du programme de primaire (MELS, 2009)

(Liste des savoirs qui sont en lien avec la gravité)			
L'univers matériel			
A. Matière	1^e cycle	2^e cycle	3^e cycle
f. Distinguer la masse (quantité de matière) d'un objet de son poids (force de gravité exercée sur une masse)		*	
C. Forces et mouvements	1^e cycle	2^e cycle	3^e cycle
3. Attraction gravitationnelle sur l'objet			
a. Décrire l'effet de l'attraction gravitationnelle sur un objet (ex. chute libre)			*
La Terre et l'espace			
C. Forces et mouvements	1^e cycle	2^e cycle	3^e cycle
1. Rotation de la Terre			
a. Associer le cycle du jour et de la nuit à la rotation de la Terre		*	
2. Marées			
a. Décrire le rythme des marées (hausse et baisse du niveau de la mer)			*
D. Systèmes et interaction	1^e cycle	2^e cycle	3^e cycle
1. Lumière et ombre			
a. Décrire l'influence de la position apparente du Soleil sur la longueur des ombres.	*		
2. Systèmes et interaction			
a. Associer le Soleil à une étoile, la Terre à une planète et la Lune à un satellite	*		
b. Décrire les mouvements de rotation et de révolution de la Terre et de la Lune		*	
c. Illustrer les phases du cycle lunaire (pleine lune, nouvelle lune, premier et dernier quartiers)		*	
d. Illustrer la formation des éclipses (lunaire, solaire)		*	
3. Système solaire			
a. Reconnaître les principaux constituants du système solaire (Soleil, planètes, satellites naturels)			*
b. Décrire des caractéristiques des principaux corps du système solaire (ex : composition, taille, orbite, température)			*

Annexe 3. Extrait du programme de secondaire (MELS, 2011)

(Liste des savoirs qui sont en lien avec la gravité)					
L'univers matériel					
B. Transformations	1^e	2^e	3^e	4^e	4^e
5. Transformations de l'énergie	ST		ST		STE
h. Relation entre la masse et le poids					
i. Décrire qualitativement la relation entre la masse et le poids					*
ii. Appliquer la relation mathématique entre la masse et le poids ($F = mg$)					*
i. Relation entre l'énergie potentielle, la masse, l'accélération et le déplacement					
i. Décrire qualitativement la relation entre l'énergie potentielle d'un corps, sa masse, l'accélération gravitationnelle et son déplacement					*
ii. Appliquer la relation mathématique entre l'énergie potentielle, la masse, l'accélération gravitationnelle et le déplacement ($E_p = mgh$)					*
La Terre et l'espace					
C. Phénomènes astronomiques	1^e	2^e	3^e	4^e	4^e
1. Notions d'astronomie	ST		ST		STE
a. Gravitation universelle					
i. Définir la gravitation comme étant une force d'attraction mutuelle qui s'exerce entre les corps	→	*			
b. Système Terre-Lune					
i. Décrire le phénomène des marées à l'aide de l'effet gravitationnel du système Terre-Lune			*		
c. Lumière					

i.	Définir la lumière comme étant une forme d'énergie rayonnante	→	*			
ii.	Décrire des propriétés de la lumière : propagation en ligne droite, réflexion diffuse par des surfaces	→	*			
iii.	Expliquer divers phénomènes à l'aide des propriétés de la lumière (cycle du jour et de la nuit, saisons, phases de la Lune, éclipse)	→	*			
3. L'univers		ST		ST		STE
a. Échelle de l'univers						
i. Unité astronomique						
-	Définir l'unité astronomique comme étant une unité de longueur correspondant à la distance moyenne de la Terre au Soleil				*	
ii. Année-lumière						
-	Définir l'année-lumière comme étant une unité de longueur correspondant à la distance parcourue par la lumière en une année terrestre				*	
iii. Situation de la Terre dans l'univers						
-	Comparer les distances relatives de divers corps célestes (ex. : étoiles, nébuleuses, galaxies)				*	

Annexe 4. Extrait du programme de secondaire 5 (MELS, 2011)

Cours optionnel de physique (liste des savoirs qui sont en lien avec la gravité)	
Dynamique	
	5 ^e
1. Accélération gravitationnelle	
a. Comparer les valeurs moyennes de l'accélération gravitationnelle terrestre et lunaire ($9,8 \frac{m}{s^2}$ sur Terre, $1,6 \frac{m}{s^2}$ sur la Lune)	*
2. Force gravitationnelle	
a. Associer la chute libre d'un corps à l'effet de la force gravitationnelle	*
b. Associer la force gravitationnelle d'un corps à son poids	*
Transformation de l'énergie	
1. Énergie mécanique	
b. Appliquer les relations mathématiques associées à l'énergie cinétique, aux types d'énergie potentielle (gravitationnelle, élastique), au travail et à la chaleur	*

Annexe 5. Schéma de la méthode de Gim (2016)

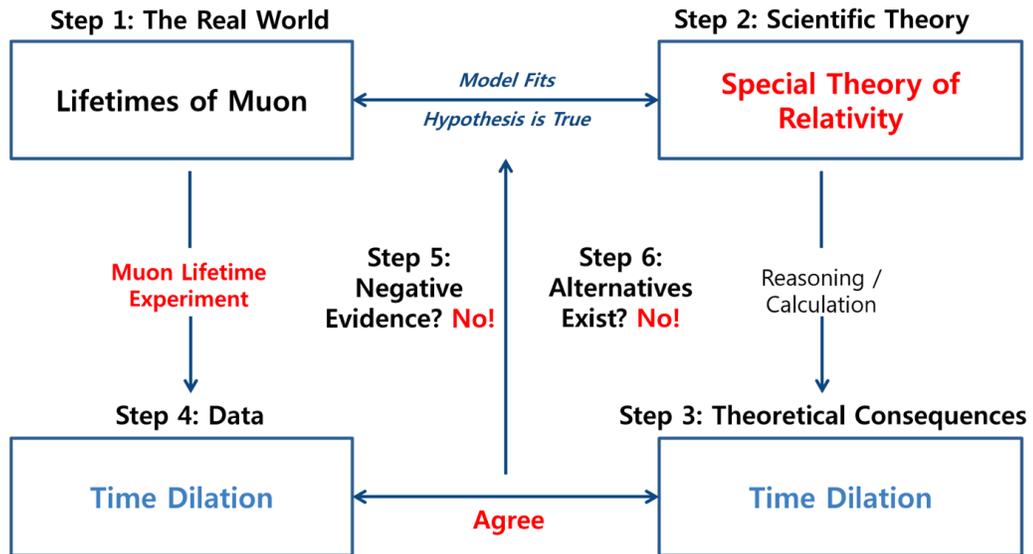


Fig. 5 Confirmation of the STR by the muon lifetime experiment

Schéma du raisonnement pour confirmer la validité de la RR à partir de la durée de vie d'un muon

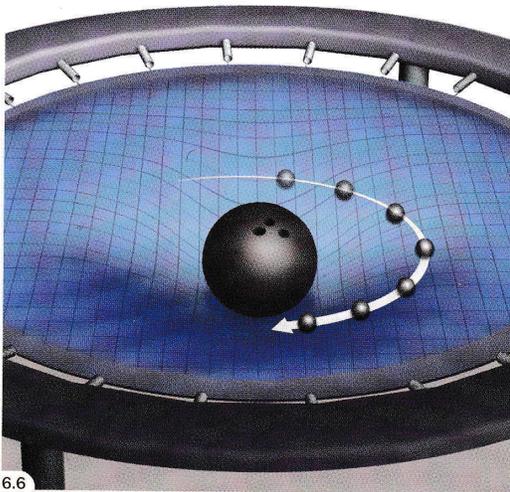
Annexe 6. Univers : science et technologie (p. 152)

ET LA RELATIVITÉ ?

Les travaux de Newton sur la gravitation universelle étaient remarquables. Avec cette théorie, certains phénomènes de l'espace restaient cependant inexpliqués.

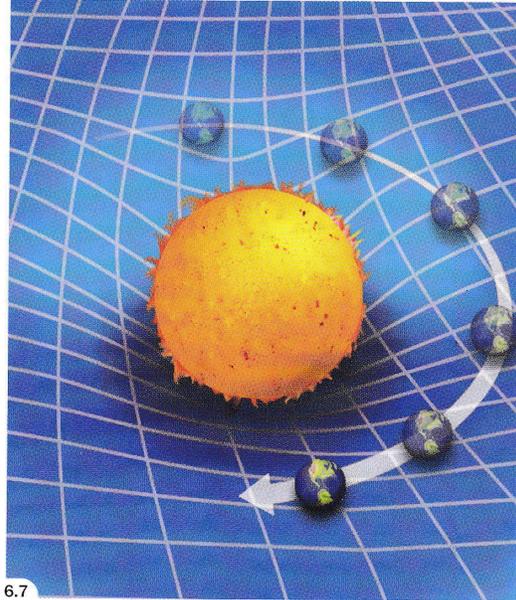
En 1916, Albert Einstein vient jeter un éclairage nouveau sur ces phénomènes inexpliqués. Il énonce la théorie de la relativité générale. D'après cette théorie, nous devons voir le monde d'une façon un peu différente. Habituellement, nous considérons que l'espace a trois dimensions : tout objet a une longueur, une largeur et une hauteur. Einstein, lui, propose un Univers à quatre dimensions. La quatrième dimension, c'est le temps. Et la gravité est une courbure de l'espace-temps !

Les amateurs de science-fiction ont déjà une certaine idée de ce que peut être l'espace-temps. Il n'est toutefois pas facile de s'imaginer un tel concept. Voici une représentation qui devrait rendre le tout un peu plus clair.



6.6

On dépose une boule de quilles au centre d'un trampoline. La toile du trampoline se creuse sous la masse de la boule. Si on lance une petite bille sur le pourtour du « trou » créé par la boule, la bille effectue un mouvement circulaire autour du trou.



6.7

Imaginez que la boule de quilles représentée dans l'illustration 6.6 est le Soleil. De la même façon que la boule de quilles déforme la toile du trampoline, le Soleil déforme l'espace-temps qui l'entoure. La Terre fait comme la petite bille : elle tourne autour du « trou » créé par le Soleil. Scientifiquement, on dit qu'elle suit la courbure de l'espace-temps.

Même s'il n'est pas parfait, ce modèle montre que la Terre n'est pas vraiment « attirée » par le Soleil. Elle suit plutôt la courbure de l'espace-temps créée par le Soleil.

Compte tenu de ce nouveau modèle, qu'advient-il du modèle de la gravitation de Newton ? Même s'il n'est peut-être pas tout à fait exact, on l'utilise quand même pour les calculs de la vie de tous les jours. Pour prédire le comportement d'une pomme qui tombe d'un arbre, par exemple, on fait des calculs basés sur le modèle de Newton. Pour expliquer des phénomènes qui mettent en cause une gravité très intense, comme les trous noirs, il est cependant plus exact d'utiliser la théorie de la relativité d'Einstein.

La petite histoire de...

L'attraction gravitationnelle

Dans son livre intitulé *La physique*, le philosophe grec Aristote (384 à 322 av. J.-C.) affirme que les objets tombent pour rejoindre leur « lieu naturel », la Terre, mais il n'établit aucun lien entre ce qui se passe sur Terre et dans le ciel. Selon lui, la Lune tourne autour de notre planète parce que c'est dans la nature des mouvements cosmiques d'être circulaires, et non pas à cause d'une attraction quelconque.

Plusieurs savants ont postulé par la suite l'existence d'une force d'attraction entre les corps célestes, mais sans apporter d'arguments convaincants. Johannes Kepler (1571-1630), un astronome allemand, a remarqué qu'une marée haute se produisait dans la partie de la Terre située face à la Lune et a considéré qu'elle était l'effet d'une attraction (sa théorie est incomplète, car il y a aussi une marée haute du côté opposé de la Terre). Robert Hooke, un scientifique anglais (1635-1703), a supposé que le Soleil exerçait une force d'attraction de nature magnétique sur les planètes. Par ailleurs, bien qu'il ait proposé que l'attraction est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance ($F \propto \frac{1}{r^2}$), il n'a pas pu le prouver.

C'est Newton, grâce à son calcul infinitésimal, qui en a fourni la preuve, en s'appuyant sur les travaux de Tycho Brahe et de Kepler. Tycho Brahe (1546-1601), un astronome danois, a mis au point des instruments très précis pour déterminer la position des planètes et des étoiles. Aidé de sa sœur Sophie, il a accumulé des

données d'observation durant plusieurs décennies. Kepler a utilisé les données de Brahe pour découvrir que les orbites planétaires sont des ellipses.

Newton a démontré théoriquement que l'existence d'une force d'attraction proportionnelle à l'inverse du carré de la distance se traduit par l'existence d'orbites elliptiques. Sa théorie montre aussi que c'est la même force qui fait chuter les objets à la surface de la Terre et qui garde la Lune en orbite autour de la Terre (voir la figure 16). Newton a formulé sa théorie de l'attraction gravitationnelle dans une équation devenue célèbre et appelée loi de la gravitation universelle (voir **La loi de la gravitation universelle**, à la page 267) :

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

La relativité générale, proposée par Albert Einstein en 1915, abandonne le concept de force et propose une nouvelle vision de la gravitation. Selon cette théorie, une masse courbe l'espace autour d'elle et cette courbure influence le mouvement d'un autre corps qui se trouve dans le voisinage. Ainsi, la Lune tourne autour de la Terre parce qu'elle suit le chemin le plus court dans un espace courbe (voir la figure 17).

À notre échelle, la relativité fournit les mêmes résultats que la mécanique newtonienne. Elle décrit toutefois des effets inconnus auparavant, comme l'existence des trous noirs ou la courbure de la lumière près d'un corps très massif.

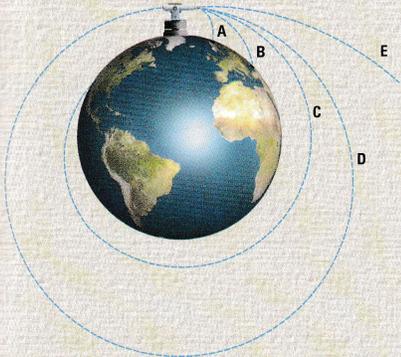


Figure 16 Selon la théorie de Newton, la force qui ramène un boulet de canon au sol est la même que celle qui retient la Lune autour de la Terre. Si le boulet est projeté avec une vitesse suffisamment grande, il peut être mis en orbite autour de la Terre.

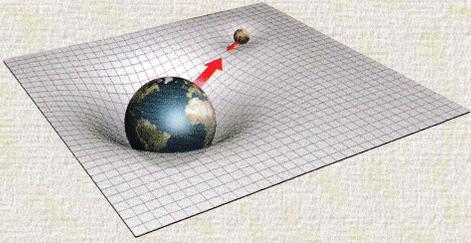


Figure 17 Selon la théorie de la relativité générale, la gravitation n'est pas une force d'attraction, mais un effet de la déformation de l'espace-temps due à la masse des objets qui l'occupent.

CHAPITRE 14 Les lois de Newton 319