



HAL
open science

Théorie de la relativité et représentation relativiste, un débat entre idéalisme et réalisme

Geoffray Marzin

► **To cite this version:**

Geoffray Marzin. Théorie de la relativité et représentation relativiste, un débat entre idéalisme et réalisme. Philosophie. 2008. dumas-00334746

HAL Id: dumas-00334746

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00334746>

Submitted on 27 Oct 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MARZIN Geoffroy

Théorie de la relativité et représentation relativiste,
un débat entre idéalisme et réalisme.

Mémoire de Master 2 « Sciences humaines et sociales »

Mention : Philosophie

Spécialité : Philosophie et langages

Sous la direction de Max Kistler

Année universitaire 2007-2008



MARZIN Geoffroy

Théorie de la relativité et représentation relativiste,
un débat entre idéalisme et réalisme.

Mémoire de Master 2 « Sciences humaines et sociales »

Mention : Philosophie

Spécialité : Philosophie et langages

Sous la direction de Max Kistler

Année universitaire 2007-2008

TABLE DES MATIÈRES

1. THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE.....	16
1.1. CONTEXTE HISTORIQUE.....	16
1.1.1. <i>Le référentiel Galiléen (première partie)</i>	16
1.1.2. <i>Newton et la mécanique classique</i>	16
1.1.3. <i>Maxwell et l'éther</i>	16
1.1.4. <i>L'expérience de Michelson et Morley</i>	17
1.1.5. <i>Transformation de Lorentz</i>	17
1.1.6. <i>L'espace-temps de Minkowski</i>	18
1.2. FORMULATION SCIENTIFIQUE.....	18
1.2.1. <i>Le référentiel Galiléen (deuxième partie)</i>	18
1.2.2. <i>Loi de l'addition des vitesses et principe de relativité</i>	19
1.2.3. <i>Les concepts relativistes</i>	23
1.2.4. <i>Résultats généraux de la théorie</i>	24
2. INTRODUCTION AUX GÉOMÉTRIES NON EUCLIDIENNE	27
2.1. LES PRECEPTES D'EUCLIDE	27
2.1.1. <i>Les cinq postulats d'Euclide</i>	27
2.1.2. <i>La notion de postulat et d'axiome</i>	28
2.1.3. <i>La faiblesse du cinquième postulat</i>	29
2.2. NAISSANCE DES GEOMETRIES NON EUCLIDIENNES.....	30
2.2.1. <i>La géométrie hyperbolique de Lobatchevski</i>	30
2.2.2. <i>La géométrie sphérique de Riemann</i>	32
2.2.3. <i>Le triangle de Gauss</i>	33
3. LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE	34
3.1. INTRODUCTION.....	34
3.1.1. <i>Mécanique classique</i>	34
3.1.2. <i>Relativité restreinte</i>	35
3.1.3. <i>Un problème à résoudre</i>	36
3.2. THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE	36
3.2.1. <i>Explication conceptuelle</i>	36
3.2.2. <i>Expérience et relativité générale</i>	38
4. LE POINT DE VUE PHILOSOPHIQUE.....	42
4.1. LA CONCEPTION CLASSIQUE DE L'ESPACE ET DU TEMPS.....	42
4.1.1. <i>Espace et temps chez Newton</i>	42
4.1.2. <i>Le lien entre Kant et Newton</i>	43
4.1.3. <i>Espace et temps chez Kant</i>	43
4.2. LA TRADITION FACE À LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ	45
4.2.1. <i>Espace et temps ou continuum spatio-temporel</i>	45
4.2.2. <i>Espace et temps absolue ou relatif</i>	46
4.2.3. <i>Modèle géométrique, euclidien ou non euclidien</i>	46
4.3. PREMIÈRE CONCLUSION	47
5. LE PROBLÈME KANTIEN	49
5.1. LES RAISONS DE L'ÉCHEC KANTIEN FACE À LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ	49
5.1.1. <i>L'intuition kantienne</i>	49
5.1.2. <i>Le problème du synthétique a priori</i>	51
5.2. L'AVENIR DE LA PENSÉE KANTIENNE.....	53
5.2.1. <i>Le dépassement kantien</i>	53
5.2.2. <i>La transformation kantienne</i>	53
6. LES ARGUMENTS POSITIVISTES ET NÉO KANTIEN.....	54
6.1. LE POINT DE VUE D'HENRI POINCARÉ	54
6.1.1. <i>Présentation contextuelle de Poincaré</i>	54
6.1.2. <i>Remise en question de la géométrie euclidienne</i>	55

6.1.3. Pragmatique, géométrie et conventionalisme	56
6.2. LE POINT DE VUE DE RUDOLF CARNAP	58
6.2.1. Présentation contextuelle de Carnap	58
6.2.2. Le conventionalisme de Poincaré contre la relativité générale d'Einstein	58
6.2.3. Le choix d'une géométrie non euclidienne	59
6.3. LE POINT DE VUE DE ERNST CASSIRER.....	62
6.3.1. Présentation contextuelle de Cassirer.....	62
6.3.2. L'acceptation relativiste	63
6.3.3. La transformation idéaliste de Cassirer.....	64
7. ANALYSE DES DONNÉES COLLECTÉES	66
7.1. ANALYSE PAR LES FONDEMENTS DES MATHÉMATIQUES.....	66
7.1.1. Raison de la démarcation entre géométrie pure et géométrie expérimentale	66
7.1.2. Fondement de la géométrie	67
7.1.3. Conséquence sur les arguments positiviste et néo kantien.....	68
7.2. CE QUE L'ON PEUT DIRE DE LA GEOMETRIE NON EUCLIDIENNE DANS LA THEORIE DE LA RELATIVITE A LA VUE DES ANALYSES EFFECTUEES	69
7.2.1. La direction à prendre en ce qui concerne la conception réaliste de la théorie de la relativité.....	69
7.2.2. Ce qui va nous permettre de justifier ce choix	70
CONCLUSION.....	72
BIBLIOGRAPHIE.....	74
TABLES DES ANNEXES	80
TABLES DES PLANCHES	83

INTRODUCTION

MOTIVATION

En considérant la philosophie, il est possible de la définir de plusieurs façons. Mais partons de la définition la plus simple, la plus triviale. Voyons d'abord la philosophie comme la recherche de la sagesse, comme l'art de la posture du philosophe chez les anciens, la « philo sophia ». Maintenant, accordons nous sur le fait que l'acquisition de cette sagesse ne peut se faire sans une compréhension du monde qui nous entoure. C'est donc aussi cela la philosophie, avoir une réflexion sur le monde dans lequel nous vivons.

Chez les Anciens, la philosophie était la reine des activités, elle englobait toutes les autres, logique, mathématique, physique, politique, etc. De nos jours, ce n'est plus le cas, toutes ces activités sont séparées et ont gagné une certaine indépendance, mais on les classe encore en deux catégories, les sciences dites « molles », concernant les sciences humaines et sociales ainsi que les sciences dites « dures » regroupant les sciences physiques, les mathématiques, la biologie, etc. Malgré ces disparités, la philosophie a quand même gardé une certaine emprise sur ces activités qui n'ont a priori pas un lien évident dans la société d'aujourd'hui. De plus, il n'est pourtant ni trivial ni trop complexe d'avoir une réflexion philosophique sur ces sciences dites « dures », et plus particulièrement ici sur les sciences physiques.

En effet, les sciences physiques traitent du monde qui nous entourent et nous en fournissent des interprétations tirées d'un matériel empirique. Elles expriment le monde dans lequel nous nourrissons nos pensées et nos réflexions philosophiques. Ce monde exprimé par les sciences physiques représente le socle de notre existence et de notre expérience des choses. Il paraît donc important ou du moins intéressant de s'attarder sur les concepts que la science physique met à jour. De plus, de nombreux grands penseurs se sont, un jour inspirés de la conception scientifique pour y fonder leur philosophie, comme nous le verrons plus tard. Ainsi, ce n'est donc pas un hasard si encore aujourd'hui et malgré la disparité des disciplines la science physique est un centre d'intérêt non négligeable.

De grandes traditions philosophiques et scientifiques s'établissent très souvent ensemble. Une des grandes révolutions qu'a connue la science fut celle initiée par Newton. En effet, père de la science moderne, de la science qui part du fait empirique, il est aussi un fervent croyant dans la conception d'un univers infini et absolu. Et ce sont ses idées, ses conceptions qui vont servir de fondements aux deux siècles qui lui succédèrent. La conception newtonienne du monde a donc eu une influence quasi exclusive sur les penseurs, qu'ils soient des philosophes ou des scientifiques. De plus, un des grands philosophes du XVIIIe siècle s'est justement basé sur la conception newtonienne du monde, Kant, dont l'influence a été et reste aujourd'hui très importante. On a donc depuis Newton et Kant une tradition scientifique et philosophique se fondant notamment sur l'idée d'un univers absolu à trois dimensions et d'un temps absolu. En effet, pour Newton autant que pour Kant, cette conception est loin d'être un détail théorique.

Pour Newton, l'univers doit être absolu, dans le sens où l'espace est mathématique, indépendamment de la matière, mais aussi absolu car il est infini et éternel. Il en va de même pour le temps qui est lui aussi absolu. Mais bien plus qu'un outil scientifique, l'univers newtonien est un concept métaphysique, et c'est donc aussi pour cela qu'il est perçu comme absolu et infini. Comme le disait Newton, l'univers était pour lui le « sensorium dei » l'organe sensoriel de dieu, ce qui explique grandement ce choix théorique qui dépasse le cadre purement empirique des débats scientifiques.

Concernant Kant, l'univers absolu et infini est aussi une nécessité car pour lui, l'espace et le temps sont les conditions du possible. L'espace et le temps sont des concepts qui nous permettent de percevoir le monde, ils sont les conditions subjectives de la sensibilité. De ce fait l'espace et le temps sont absolus car ils sont la condition de notre sensibilité et sont donc des intuitions pures *a priori*.

Ce sont ces deux piliers de la pensée moderne qui fondent une tradition philosophique et scientifique qui va guider leurs contemporains pendant près de deux cent ans. Mais ce qui va mettre un terme à cela, c'est la théorie de la relativité d'Albert Einstein. En effet, cette théorie va modifier profondément la mécanique classique de Newton. Cela fait parti du progrès scientifique de réfuter des théories en en proposant de nouvelles mieux adaptées, c'est par ces étapes que la connaissance avance. Mais pourtant, il y a là quelque chose de plus, un changement théorique qui va influencer bien plus que de simple calcul. La cohésion de la tradition

kantienne et Newtonien, a donnée une telle force à ces conceptions que l'apparition d'une théorie qui voudrait remettre en cause tant d'absolu admis semblait être une véritable révolution scientifique bien sûr, mais aussi philosophique. Car la théorie de la relativité nous pose aussi des questions sur l'être des choses.

Il peut donc être intéressant de voir comment les philosophes de l'époque ont pu percevoir cette nouvelle théorie, et s'ils ont admis ou au contraire refusé les changements qu'on apporté celle-ci. N'oublions pas non plus que cette théorie a tout d'abord ébranlé le monde scientifique et que de par la portée de ses concepts, les scientifiques ont énormément parlé d'elle dans un contexte philosophique. C'est pourquoi il est aussi important de ne pas négliger leurs considérations.

C'est donc ainsi que je présenterai le cheminement qui m'a amené à faire le choix de mon sujet. La théorie de la relativité est une source de questionnement importante qui touche jusqu'au fondement même de l'univers. C'est en quelque sorte un moyen de faire de la métaphysique tout en ayant un matériau empirique sur lequel se raccrocher.

PROBLÉMATIQUE

Dans l'histoire des sciences, il y a eu des théories physiques qui ont connu plus de succès que d'autres. Dans le paysage scientifique du XXe siècles, la théorie qui révolutionna la physique et qui, encore aujourd'hui est une théorie qui fait couler beaucoup d'encre, la théorie de la relativité d' Albert Einstein.

Cette théorie n'est pas seulement une formule permettant l'obtention de résultat physique satisfaisant, mais elle est une complète révolution dans la manière de concevoir le monde. Cela, de nombreux philosophes l'ont bien compris, car ce n'est pas un hasard si tant de personnes s'y sont intéressées. Cette conception touche à l'essence même des choses. Elle se sépare en deux moments distincts chronologiquement. Dans un premier temps, la théorie de la relativité restreinte, qui expose le fait que les longueurs et les intervalles de temps entre les objets et événements physiques ne sont plus intrinsèques mais dépendent d'un certain référentiel dans lequel l'observateur se situe. Plus simplement, on dira que par rapport à un référentiel immobile, plus la vitesse d'un objet tend vers la vitesse de la

lumière plus les longueurs se contractent et les intervalles de temps se dilatent. Ceci implique donc qu'à partir d'une certaine vitesse des objets observés, il faut quitter repère galiléen traditionnel pour introduire un calcul relativiste afin d'obtenir des résultats viables. Dans un deuxième temps, la théorie de la relativité générale, qui se destine à une généralisation portant sur la cosmologie, permettant ainsi d'expliquer la gravitation par la déformation d'une nouvelle entité appelé espace-temps.

Ces transformations conséquentes ne sont pas passées inaperçues, notamment chez les philosophes qui sont partagés comme bien d'autres au sujet de cette conception, mais eux ne remettent pas en cause la validité des résultats obtenus grâce à cette nouvelle théorie. On peut distinguer deux courants de pensée concernant l'interprétation de la relativité. Le premier, constitué par le positivisme logique, directement lié au cercle de Vienne, qui voit dans la théorie de la relativité une théorie du réel extrêmement forte. En effet, pour les néo-positivistes, la relativité permet de dévoiler les phénomènes tels qu'ils sont vraiment, débarrassés de toute métaphysique et d'anthropomorphisme. Cette théorie leur permet de faire un pas en arrière et de prendre encore un peu plus de recul par rapport aux phénomènes physiques et ainsi d'en saisir toute leur réalité. Le second courant de pensée est constitué par les philosophes se réclamant de la tradition Kantienne de l'idéalisme critique, voyant ainsi à l'inverse la théorie de la relativité comme une manière de s'opposer au positivisme logique en montrant le fait que pour eux, la relativité supprime toute objectivité concernant les phénomènes physiques étudiés, privant ainsi aux empiristes toute possibilité de travailler et de construire une connaissance tirée de l'expérience de ces phénomènes.

De ces deux courants divergent, on peut dégager un problème classique de l'épistémologie, avec d'un côté une conception réaliste de la théorie, qui voudrait que la relativité est une portée sur le réel, qu'elle décrirait fidèlement, nous rapportant ainsi un réalisme encore jamais atteint par les théories physiques précédentes. Tandis que d'un autre côté on observe une conception qui voit dans la relativité une preuve irréfutable de la subjectivité des phénomènes physiques et ainsi l'impossibilité d'en tirer quoique ce soit d'objectif, tout au plus la relativité permet d'obtenir des résultats plus précis dans certaines circonstances. De là, il est possible de se poser certaines questions concernant ce problème : la théorie de la relativité est-elle bien une théorie du réel ou bien est-elle juste un énième modèle mathématique certes fort efficace ?

Précisons maintenant les raisons de ce problème, en évoquant tout d'abord la démarche de la relativité des connaissances. Plusieurs faits entrent ici en jeu. Pour commencer, le premier acte d'Einstein dans la théorisation de la relativité, à savoir évacuer l'infini que l'on rencontrait dans l'univers Newtonien. A cela il faut ajouter un changement radical de type d'espace. On remplace ainsi l'univers Newtonien à trois dimensions avec son temps absolu par un concept d'espace-temps à quatre dimensions. De plus, on trouve l'introduction d'une idée phare de la théorie qui est la relativité du temps. Cette idée va très loin car elle implique qu'il n'y a pas de temps absolu préexistant à nos jugements. Pour résumer, voilà d'où on part, un univers infini constitué de l'espace à trois dimensions et d'un temps absolu. Et voilà où on arrive, un univers fini, constitué d'un tissu spatio-temporel à quatre dimensions qui n'a rien d'absolu bien au contraire. Il est flagrant de constater une vraie révolution au sens propre du terme, on a affaire ici à un véritable retournement de la perception de l'univers. La première chose que l'on est susceptible de constater concernant ce complet changement, c'est l'idée que la vision ainsi que la connaissance que nous avons de l'univers devient locale. Il paraît à présent bien difficile de parler d'une vision ou d'une connaissance universelle de l'univers.

On constate alors une perte de l'idée d'uniformité qu'avait les gens concernant l'univers. Cette idée d'uniformité de l'univers remonte à l'époque de Kant, car pour lui, une théorie pouvait être considérée comme vraie si elle s'inscrivait dans les formes transcendantales (*a priori*) de la subjectivité que sont l'espace et le temps, défini de manière Newtonienne comme espace infini à trois dimensions avec un temps absolu. Mais avec la relativité, cette conception kantienne est remise en question car l'univers lui-même est complètement transformé comme nous l'avons vu. On a donc ici un problème relatif à la connaissance, à savoir s'il est possible de valider une théorie et d'en tirer des enseignements dans un cadre, un repère, ayant perdu l'absolu qu'on lui prêtait auparavant.

De plus, en s'approchant un peu plus du problème, on peut observer que l'intuition si chère à Kant concernant les mathématiques joue ici un rôle important, et plus précisément concernant la géométrie. En effet, la géométrie est considérée comme vraie car elle est *a priori* et il est possible de la saisir par l'intuition. Et justement, un des grands principes de la théorie de la relativité est qu'elle envisage tout comme une géométrie. On vérifie cela sur deux échelles. La première constitue l'univers global, où il a été nécessaire de courber l'espace afin de fermer l'univers

dans le but d'évacuer la notion d'infini. Il est ici indispensable de faire intervenir une géométrisation de l'univers pour réaliser ce tour de force. La seconde échelle concerne un espace local, au environ des corps massifs, où l'on observe là aussi une déformation de l'espace-temps qui prend la forme d'une courbure causée par la masse des objets physiques où là aussi il est nécessaire d'introduire une notion de géométrisation de l'espace et du temps.

De là apparaît un nouveau problème, qui va se dévoiler autour du choix de cette géométrie. En effet, le concept de courbure de l'espace-temps et donc de cette géométrie nécessite un certain remaniement de la géométrie classique euclidienne. Il va donc y avoir un choix à faire, entre une géométrie euclidienne mal adaptée et une géométrie non-euclidienne rendant parfaitement compte du phénomène mais posant tout de même quelques problèmes que nous allons souligner. En effet, la géométrie non-euclidienne n'a pas été créée dans le cadre de la théorie de la relativité. Son origine est à chercher dans le monde des mathématiques où elle est considérée comme une pure abstraction, tout comme des systèmes à « n » dimension n'ayant bien entendu aucun rapport avec le monde physique que nous percevons. Voilà ce qui fait ici problème, le fait de choisir une géométrie considérée comme une pure abstraction mathématique afin de décrire le monde physique en tant que monde réel. Certaines personnes ayant travaillé sur le problème on choisi d'adopter une attitude conventionnaliste, comme par exemple Poincaré. En effet, celui-ci ne voyait aucun inconvénient à choisir l'une ou l'autre, du moment que l'on s'adapte correctement avec celle choisie. Si on voulait garder la géométrie classique, il suffisait alors d'en modifier les lois, ce qui compliquait considérablement les calculs, mais c'était dans ce cas le prix à payer pour conserver la géométrie euclidienne. Dans le cas où le choix se porterait sur la géométrie non-euclidienne, cela permettait de simplifier les calculs. Cependant, cela impliquait aussi le fait que l'idée même de notre perception de cette géométrie et de ses résultats soit entièrement transformée. Si on ajoute à cela le fait que les géométries non-euclidiennes n'ont jamais eu d'application concrète, le choix s'avère difficile.

C'est pourtant la géométrie non-euclidienne qui a été choisie afin de servir de base à la théorie de la relativité. Il était en effet plus aisé d'introduire l'idée de courbure de l'espace-temps. De plus, les confirmations expérimentales de la relativité ayant été réalisées postérieurement à celle-ci, il semblerait qu'Albert Einstein croyait vraiment en cette conception non-euclidienne de la géométrie et la

voyait comme bien plus qu'une abstraction mathématique. Maintenant que la géométrie non-euclidienne a été choisie, il est problématique de voir si oui ou non l'utilisation de cette géométrie à travers de la théorie de la relativité permet de rendre compte du réel. Et c'est ici que se situe le vrai problème. Utiliser la géométrie non-euclidienne afin de décrire le monde est un véritable dépassement de la philosophie kantienne et de son concept d'intuition. En effet, l'intuition ne peut rendre compte d'une géométrie non-euclidienne, notre intuition vit dans un monde euclidien, celui que nous percevons, elle ne peut donc pas passer outre le fait de notre conscience qui n'évolue que dans un univers euclidien. Il est donc ici question de s'éloigner encore un peu de l'anthropomorphisme scientifique afin de décrire un univers différent de notre sensibilité et de notre expérience directe. Nous nous accordons aujourd'hui pour concevoir la matière d'un point de vue discontinue alors que nous la percevons continue, serait-il maintenant le temps d'admettre une topologie cosmologique différente de celle que l'on perçoit ? L'intuition kantienne est-elle vraiment incompatible avec la géométrie non-euclidienne ? L'emploi de cette géométrie permet peut être un véritable dépassement de la pensée scientifique bien qu'elle puisse aussi bien être un leurre mathématique. On ne transforme plus la réalité en mathématique, avec la relativité, ce sont les mathématiques et plus précisément la géométrie que l'on transforme en réalité.

ÉTAT DE LA QUESTION

Concernant l'état de la question, bien que de nombreux philosophes aient discutés de la théorie de la relativité, peu d'ouvrages traitent directement de la réceptivité des philosophes face à cette théorie. Malgré cela, le philosophe Michel Paty s'y est intéressé. Il s'est arrêté sur un point particulièrement important qui divisa de façon caractéristique les philosophes, dans son ouvrage Einstein philosophe. Ce point important est le débat sur la décidabilité expérimentale de la nature de la géométrie. Car comme nous l'avons vu précédemment, il est crucial de comprendre que la relativité implique une géométrisation de l'univers qui transforma notre conception Newtonienne. On trouve dans son ouvrage un débat partant de la conception de Moritz Schlick confrontant la relativité au neo-kantisme et au

positivisme, les deux grandes théories d'interprétation de la relativité. Moritz Schlick s'engage vers l'empirisme, avec un rejet de l'apriorisme, pour lui, la géométrie est indissociable de la physique. Pour Schlick, ce que la relativité a apporté de plus important, c'est le fait que l'univers ne soit plus absolu, ce qui lui permet une critique du Kantisme bien qu'elle ne soit pas érigée en système. D'un autre point de vue, on trouve Ernst Cassirer qui lui, veut conserver le projet Kantien tout en le transformant. Il voit dans les géométries non-euclidiennes un acte de construction, ce qui revient à dire que la relativité a enlevé le dernier reste d'objectivité physique à l'espace. Et qu'il soit euclidien ou non-euclidien, l'espace relativiste n'est pas l'espace réel, il reste purement idéal et symbolique. Par conséquent, l'espace devient non intuitif. Cassirer envisage alors l'espace comme le fondement idéal de la construction de la connaissance de la réalité. La fonction *a priori* de l'espace sert alors à trouver des formulations qui peuvent rendre compte des relations physiques. C'est un pas en avant par rapport au kantisme puisque pour eux la géométrie euclidienne est la seule possible dans la nature car l'intuition ne peut rendre compte d'une géométrie différente. Face à la théorie de la relativité, le kantisme paraît intenable. Une fois cela dit, c'est Carnap qui intervient afin de marquer la différence qu'il est nécessaire d'effectuer entre géométrie physique et géométrie mathématique. La première est synthétique *a posteriori*, la seconde est *a priori*. Au-delà de ces deux voies interprétatives que sont le néo-kantisme et le positivisme, on trouve aussi dans l'ouvrage de Michel Paty une critique du conventionnalisme par Reichenbach. En effet, Poincaré avait évoqué l'idée que le choix de la géométrie concernant la relativité pouvait être une question de convention, comme nous l'avons vu précédemment, mais ici, Reichenbach nous montre qu'il y a une signification à choisir une géométrie plutôt qu'une autre. Pour Reichenbach, l'espace n'est pas subjectif, il est réel. En effet, si l'espace fermé d'Einstein est vrai, à savoir le fait que l'univers serait courbé dans son ensemble, formant ainsi un univers fermé sans frontière, alors il faudrait passer d'une grandeur finie à une grandeur infinie d'une géométrie à l'autre. De plus, en conservant une géométrie euclidienne, il est nécessaire d'ajouter des nouvelles forces afin de rendre compte des phénomènes comme la contraction des longueurs, alors que le choix de la géométrie non-euclidienne rend compte des phénomènes beaucoup plus simplement, ce qui d'après le principe du rasoir d'Occam est préférable. Enfin, on s'accorde à dire que l'expérience ne donne pas la géométrie à utiliser, un choix est nécessaire.

C'est donc le point clé qui relie le projet à cette idée, à savoir que si l'expérience ne peut donner une solution au problème du choix de la géométrie, alors il est important d'étudier les différentes réactions et interprétations des différents philosophes, car comme l'a montré Michel Paty, autant le positivisme que le neo-kantisme ont des réponses à apporter au problème du choix de la géométrie et toutes deux ne souffrent pas de failles apparentes et grossières prouvant ainsi que le problème est complexe. La synthèse de Michel Paty ouvre donc sur une recherche approfondie afin de mieux comprendre les différents points de vue des protagonistes de la théorie de la relativité. Car la question n'étant pas tranchée, peut être est-il possible d'y apporter certains éléments de réponse.

CE QU'ON POURRAIT APPORTER

Voyons maintenant ce qu'il est possible d'apporter au problème. Le fait est que comme nous l'avons vu, le choix de la géométrie ne peut être décidé grâce à l'expérience. D'un coté, on trouve les kantien et les néo-kantien pour qui la géométrie non-euclidienne ne peut en aucun cas rendre compte des phénomènes physiques car elle est une construction et ne peut être comprise par l'intuition kantienne. C'est justement là qu'il est intéressant de s'arrêter. Car l'intuition est-elle vraiment incapable de ne saisir qu'une géométrie euclidienne, doit-elle seulement intervenir dans la validité d'une théorie scientifique ? L'intuition peut elle être invoquée à elle seule pour mettre un terme à une conception telle que la théorie de la relativité ? La théorie de la relativité n'est elle pas justement un bouleversement si grand que l'intuition elle-même s'y perd. D'un autre coté se trouve les positivistes logiques, qui pensent que la position kantienne est intenable et qu'une reformation ne saurait suffire, pour eux l'espace et le temps possèdent un contenu objectif auquel seule l'expérience donne accès. C'est leur conception scientifique qui leur permet de voir dans l'espace non-euclidien une entité réelle. Il est sûrement possible en approfondissant la recherche dans les fondements des mathématiques de comprendre pourquoi l'idée d'un espace non-euclidien peut être possible malgré l'abstraction troublante qui semble accompagner cette géométrie. Ainsi, il serait possible de dégager des éléments de réponses qui pourraient nous faire s'engager

dans une voie plutôt qu'une autre. Bien sur, gageons que si le choix de la géométrie ne peut se faire par l'expérience, l'intuition kantienne pourrait jouer un rôle important et ce même à propos de la pensée positiviste. De plus, de nombreuses expériences scientifiques ont eu lieu depuis la création de la théorie de la relativité, elles pourraient peut être compléter le matériau empirique, nous aidant ainsi à mieux comprendre en quoi la géométrie non-euclidienne peut paraître aussi bien pratique qu'abstraite. En résumé, il ne serait plus question de savoir si oui ou non l'espace non-euclidien est réel, mais s'il est possible de construire une réponse logique à la possibilité de poser un modèle mathématique non intuitif comme interprétation du réel.

1. THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

1.1. Contexte historique

1.1.1. *Le référentiel Galiléen (première partie)*

De nombreuses théories sont à l'origine de la genèse de la relativité, en premier lieu, ce fut Galilée qui introduisit le principe de relativité. Galilée, qui après avoir établi que c'était bien la terre qui tournait autour du soleil se demanda ce qu'était un mouvement dans l'espace. Plus précisément, il se demanda s'il était possible de déduire l'existence du mouvement de la terre à partir de l'expérience sensible. Il en résulta l'idée qu'il est uniquement possible de déceler le mouvement d'un système relativement à un autre système. Il sera donc impossible de déterminer de manière absolue le mouvement d'un système. Prenons comme exemple la terre et le soleil, selon notre expérience sensible, il ne nous est pas possible de décider si c'est la terre qui tourne autour du soleil immobile ou bien l'inverse. Nous pouvons seulement affirmer que les deux astres sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Nous reviendrons plus en détail sur ce point capital ultérieurement.

1.1.2. *Newton et la mécanique classique*

Par la suite, c'est Newton qui reprendra le flambeau en instaurant la mécanique dite classique en s'appuyant sur les travaux de Galilée. La mécanique classique remplira son rôle à merveille en rendant parfaitement compte du monde qui nous entoure, enfin presque. Car si la vie quotidienne de chacun semble se dérouler dans un cadre profondément Newtonien, l'avènement de certaines découvertes semblent rendre compte de quelques paradoxes menant à une croisée des chemins théoriques.

1.1.3. *Maxwell et l'éther*

Avec les découvertes de Maxwell dans le domaine de l'électromagnétisme, on peut désormais prédire l'existence d'une onde électromagnétique. On découvre ainsi qu'il est possible d'associer la lumière à une onde électromagnétique. Néanmoins,

pour Maxwell, si la lumière est une onde, il est impératif qu'elle dispose d'un milieu dans lequel se propager, à l'instar des autres types d'ondes électromagnétiques. Comme par exemple un milieu matériel déformable tel l'air pour le son. Il n'est à l'époque pas question qu'une onde puisse se propager dans le vide. Maxwell introduit donc la notion d'éther, référentiel absolu permettant la propagation des ondes électromagnétiques. Le problème résidait dans le fait que l'éther était incompatible avec la mécanique classique de Newton et le principe de relativité de Galilée. Ainsi il fallait choisir entre la référence absolue de Maxwell qu'était l'éther ou alors conserver le principe de relativité sachant qu'en abandonnant la conception de Maxwell, la mesure du temps dépendrait alors du référentiel dans lequel elle est établie.

1.1.4. L'expérience de Michelson et Morley

Afin de vérifier l'existence de l'éther, une expérience fut envisagée. Pour cela, Michelson réalisa un interféromètre ayant pour finalité de déterminer la vitesse de la terre par rapport à l'éther. Ils placèrent une source de lumière monochromatique devant un miroir semi argenté, les deux rayons résultants parcourent alors la même distance avant d'être réunis sur l'écran d'un télescope (voir annexe 1). La superposition de ces deux faisceaux forme alors des franges d'interférence. Si la terre se déplaçait par rapport à l'éther, les deux rayons lumineux ne devraient pas avoir la même vitesse et l'on devrait constater un déplacement significatif des franges. Or on n'observa aucun décalage dans les franges. Quand on réitéra l'expérience six mois plus tard, quand la vitesse de la terre avait changé de sens, on n'observa toujours aucun décalage. Michelson et Morley en conclurent que la vitesse de la terre par rapport à l'éther était donc nulle et que par conséquent le concept d'éther était fictif.

1.1.5. Transformation de Lorentz

Il n'y avait désormais aucun doute possible, il fallait adopter l'idée que le temps mais aussi les mesures de distance dépendent directement du référentiel utilisé. Ce que Lorentz comprit parfaitement. Il mit au point les transformations de Lorentz, qui permettent un changement de repères tant qu'ils restent en mouvement rectiligne uniforme (le détail sera fait ultérieurement). Ces transformations permettent

donc de relier les distances et les temps mesurés par un observateur à ceux mesurés par un autre observateur en mouvement par rapport au premier. Cela permet une explication très efficace du phénomène de contraction des longueurs et des durées.

1.1.6. *L'espace-temps de Minkowski*

Ayant maintenant compris l'importance du référentiel choisi, Minkowski va ensuite introduire l'idée d'espace-temps, c'est-à-dire l'idée que pour un référentiel donnée, on aura trois dimensions d'espace (x,y,z) plus une de temps car comme nous l'avons vu, le temps aussi dépend du référentiel choisi. On arrive donc à un système de coordonnées à quatre dimensions (x,y,z,t), les transformations de Lorentz permettant de mettre en relation un référentiel avec un autre.

Voilà très brièvement le contexte historique et scientifique qui a permis l'avènement de la théorie de la relativité. Intéressons nous maintenant directement à la théorie elle-même.

1.2. Formulation scientifique

1.2.1. *Le référentiel Galiléen (deuxième partie)*

Pour commencer, il nous faut définir avec plus de précisions la notion de repère Galiléen. On peut le définir comme « un système de coordonnées dont l'état de mouvement est tel que relativement à lui la loi de l'inertie reste valable »¹. C'est-à-dire que le repère Galiléen permet de conserver un type de mouvement rectiligne uniforme. Par exemple, si dans le cas de l'observation d'astre on choisissait de prendre comme référentiel rigide la terre alors chaque étoile effectuerait un mouvement circulaire, ce qui est en contradiction avec la loi de l'inertie. Ainsi « ce n'est que pour les systèmes de coordonnées galiléens que les lois de Galilée-Newton sont valables »².

¹ A. Einstein, *La relativité, première partie chapitre 4.*

² Idem.

1.2.2. Loi de l'addition des vitesses et principe de relativité

Rentrons maintenant dans le vif du sujet et voyons ici comment A. Einstein montre les limites de la mécanique classique à travers la loi de l'addition des vitesses. L'entière démonstration sera appuyée sur la première partie de l'ouvrage d'A. Einstein, *La relativité*. Nous reprendrons donc l'exemple d'un homme se situant dans un train et d'un autre homme se trouvant sur le quai de la gare. Le train et le quai de la gare constituant deux repères galiléens distincts se déplaçant l'un par rapport à l'autre d'un mouvement rectiligne uniforme. Prenons maintenant ce train, qui se déplace à une vitesse v , l'homme qui est à l'intérieur se déplace dans le sens de la marche à une vitesse w . Si nous nous posons la question de savoir avec quelle vitesse W l'homme dans le train se déplace par rapport au quai de la gare, alors la mécanique classique nous répondrait de suite que d'après la loi de l'addition des vitesses :

$$W = v + w.$$

Ainsi, cette simple formule représente le point de départ de la théorie de la relativité car nous allons montrer qu'elle ne peut être maintenue dans un cadre relativiste.

Nous allons voir qu'un problème survient lorsque l'on entreprend l'expérience suivante. Supposons que l'on place le quai de la gare dans le vide puis envoyons un rayon lumineux le long du quai ayant pour vitesse $c = 300\,000$ km/s dans la même direction que le train qui a lui une vitesse v très nettement inférieure. Si nous cherchons à savoir avec quelle vitesse W est la vitesse de la lumière par rapport au train, la mécanique classique nous apprendra donc que d'après le principe vu précédemment :

$$W = c - v.$$

Par conséquent, la vitesse de propagation du rayon lumineux relativement au train est plus petite que c . Ce résultat est donc incompatible avec le principe de relativité que nous avons exposé précédemment car « la loi de la propagation de la lumière dans le vide devrait, comme toute autre loi générale de la nature, être

la même ³» quel que soit le système de référence. Il semblerait donc logique de faire un choix et d'abandonner le principe de relativité ou le principe de propagation de la lumière. Néanmoins, chacun de ces deux principes semblent être inébranlables. Les découvertes en électrodynamique ayant définitivement fait accepter l'idée que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante et d'un autre côté, le principe de relativité semble lui aussi peu remis en cause. C'est donc ici que commencera la vie de la théorie de la relativité qui va montrer « qu'il n'y a aucune incompatibilité entre le principe de relativité et la loi de propagation de la lumière ⁴». La théorie prendra le nom de théorie spéciale de la relativité ou bien encore théorie de la relativité restreinte afin de la différencier de sa forme générale. La mécanique classique montre ici ses limites car si elle rend très bien compte des phénomènes de tous les jours, on voit qu'il en va autrement lorsque les vitesses mises en jeu sont beaucoup plus importantes. La mécanique classique se révèle être un cas particulier de la théorie de la relativité où les vitesses mises en jeu sont inférieures à trente pour cent à la vitesse de la lumière, considérée comme une vitesse limite. Il n'est donc plus question d'utiliser la loi d'addition des vitesses, qui sera remplacé par les transformations de Lorentz, permettant de passer d'un système à un autre. Il va donc être possible de résoudre notre problème et de déterminer W tout en conservant la loi de propagation de la lumière et le principe de relativité.

Prenons maintenant deux systèmes de coordonnées K et K' correspondant respectivement au talus et au train. Les valeurs correspondantes du même événement sont x, y, z, t et x', y', z', t' . La question est maintenant de savoir comment déterminer les valeurs de K' relativement aux valeurs de K données ? Le point important est de conserver la loi de propagation de la lumière pour K et K' . Voici donc comment les transformations de Lorentz permettent d'y répondre,

³ A. Einstein, *La relativité, première partie chapitre 7.*

⁴ A. Einstein, *La relativité, première partie chapitre 7.*

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Si nous comparons avec la loi d'addition des vitesses de la mécanique classique qui dit que,

$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t,$$

Il est possible de constater le rapport étroit entre la valeur des coordonnées et la constante c de la vitesse de la lumière. Ainsi, plus v tendra vers c et plus les valeurs de K' seront modifiées. Voyons maintenant si la loi de la propagation de la lumière est satisfaite aussi bien pour K que pour K' . Pour cela, supposons qu'on envoie un rayon lumineux le long de l'axe des x qui se propage conformément à l'équation

$$x = ct,$$

Et voyons ce qui en résulte pour le système K' . Il faut pour cela substituer dans les équations de Lorentz correspondantes la valeur x par ct .

$$x' = \frac{(c - v)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Il suffit ensuite de voir $\frac{x'}{t'}$:

$$\frac{\frac{(c-v)t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}{\left(\frac{1-\frac{v}{c}}{c}\right)t} = \frac{(c-v)t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \times \frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{\left(\frac{1-\frac{v}{c}}{c}\right)t} = \frac{(c-v)t}{\left(\frac{1-\frac{v}{c}}{c}\right)t} = \frac{c(c-v)t}{c\left(\frac{1-\frac{v}{c}}{c}\right)t} = \frac{c(c-v)t}{(c-v)t} = c$$

On peut donc en conclure que $x' = ct'$ et donc que la loi de propagation de la lumière est satisfaite dans les deux systèmes K et K'.

La démonstration est faite, ce qui nous permet de voir que la mécanique classique devient un cas particulier de la théorie de la relativité qui l'englobe désormais. En effet on constate que la mécanique classique devient le cas particulier

où le terme γ qui correspond au facteur de Lorentz (c'est-à-dire $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$) est considéré comme étant égale à 1, c'est-à-dire que l'on considère le rapport entre v^2 et c^2 comme non significatif et donc de valeur 1 car la vitesse rapporté à c est considéré comme trop faible. Ainsi, si $\gamma > 1$:

$$x' = \gamma(x - vt) = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \text{Mécanique relativiste.}$$

Si $\gamma = 1$ alors :

$$x' = \gamma(x - vt) = x - vt = \text{Mécanique classique.}$$

1.2.3. Les concepts relativistes

Ce qu'il faut bien retenir de cette théorie de la relativité restreinte sont les notions de contraction des longueurs et des durées. En effet la théorie de la relativité restreinte nous montre que si un train était accéléré à une vitesse proche de la lumière, un homme situé sur le quai de la gare percevrait le train bien plus court qu'il ne l'est si le train était immobile devant lui. De même, un homme accéléré à une vitesse proche de la lumière vieillirait plus lentement qu'un autre homme resté immobile. On peut aussi déclarer que la vitesse de la lumière agit comme une vitesse limite qu'un objet matériel ne peut atteindre ni dépasser. Atteindre la vitesse de la lumière reviendrait à arrêter le temps. La dépasser signifierait-il remonter le temps ? Pourquoi pas ! Illustrons ce propos en imaginant qu'un homme passe sa vie assis sur le quai de la gare, disons qu'il attend le retour de son ami parti pour un voyage dans l'univers à la vitesse folle de 290 000 km/s. Le début de l'attente de l'un correspond au départ de l'autre. Considérons que l'homme qui voyage est dans un référentiel où $t = 10$, c'est-à-dire qu'il s'est passé dix années entre son départ et son retour sur le quai de la gare. Quand à l'homme qui attend sur le quai de la gare le retour de son ami parti dans l'espace intersidérale

$$t' = \frac{10}{\sqrt{1 - \frac{290000^2}{300000^2}}} \approx 39$$

C'est-à-dire que pour lui il s'est écoulé trente neuf années avant que son ami n'arrive enfin sur le quai de la gare ! Il est ici très clair que plus on accélère et plus le temps ralentit par rapport à un système qu'on considère comme immobile. Il en va de même pour les longueurs mesurées. Malgré tout il est vrai qu'accélérer un objet matériel à une telle vitesse paraît irréalisable même si à notre époque il est courant d'accélérer des particules jusqu'à des vitesses rentrant largement dans un cadre relativiste. Mais il nous suffit de prendre un exemple plus concret pour avoir un aperçu de la théorie. Prenons par exemple un voyageur dans un avion le menant sur l'île de la Réunion, le voyageur se meut à une vitesse moyenne de 900 km/h et la durée du vol est égale à douze heures. La durée du trajet pour sa famille restée sur place va donc être :

$$t' = \frac{12}{\sqrt{1 - \frac{0.25^2}{300000^2}}} \approx 12.00000000000042$$

Ce qui nous donne 0.000000015 secondes de différence entre les deux référentiels, c'est-à-dire un décalage de 15 nanosecondes. Alors certes la comparaison en devient risible mais on voit bien ici pourquoi il a fallu attendre un certain temps pour parvenir à la théorisation du principe de relativité restreinte car le monde dans lequel nous vivons nous apparaît comme une mécanique newtonienne parfaite du fait des faibles vitesses auxquelles nous sommes confrontés la plupart du temps. Une des choses très importantes que l'on peut tirer de cela est que « les lois générales de la nature sont invariantes relativement à la transformation de Lorentz »⁵. En effet les lois générales de la nature ne peuvent être différentes selon que l'on intervienne sur des vitesses plus ou moins grandes et bien que la physique relativiste puisse être négligée en faveur de la mécanique classique lorsque les vitesses sont trop faibles, il est important d'en rendre compte d'une façon unifiée.

1.2.4. Résultats généraux de la théorie

Comme nous l'avons énoncé précédemment, les lois générales de la nature doivent être les mêmes pour chaque référentiel utilisé. Ainsi, un des résultats importants de la théorie de la relativité concerne les principes de conservation de la masse et de conservation de l'énergie. Chacun de ses principes était considéré comme strictement indépendant. La théorie de la relativité restreinte a permis de les réunir en un seul et même principe. C'est d'ailleurs le versant le plus connu de la relativité puisqu'il est incarné par la célèbre formule :

$$E = mc^2$$

⁵ A. Einstein, *La relativité, première partie chapitre 14.*

Mais voyons maintenant ce qu'elle signifie. Pour la mécanique classique, l'énergie cinétique s'exprimait par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2.$$

En mécanique relativiste, elle devient :

$$E_c = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Si l'on considère un corps se mouvant à une vitesse v , qui absorbe une quantité d'énergie E_0 alors l'énergie cherché du corps est égale à

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Mais on peut aussi l'écrire de cette façon :

$$\frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

C'est-à-dire qu'un corps de masse $m + \frac{E_0}{c^2}$ animé de la vitesse v voit sa masse augmenter de $\frac{E_0}{c^2}$ s'il absorbe une énergie E_0 . On peut donc conclure de cela que la masse et l'énergie sont en fait extrêmement liées. En effet, la masse inerte d'un corps peut donc être directement assimilée comme la mesure de son énergie. Le principe de conservation de la masse et le principe de conservation de l'énergie sont donc identiques. C'est pour cela qu'on note $E = mc^2$, car cette formule correspond en fait à la simple conversion de la masse en énergie. On en déduit donc que la masse

au repos correspond en fait à l'énergie de masse. Nous verrons ensuite en quoi cette simple équation fut le symbole d'un enjeu historique marquant.

Un autre résultat important que donne la relativité restreinte est la relation très intime qu'elle entretient avec la constante c correspondant à la vitesse de la lumière dans le vide. De par sa propriété d'être une vitesse limite comme nous l'avons vu précédemment, elle permet d'amener la conviction qu'il n'y aurait pas d'interaction à distance directe et instantanée du type loi de la gravitation de Newton. Les résultats obtenus par les actions électromagnétiques à distance par une vitesse finie permirent de dire que « L'action à distance avec une vitesse de propagation infinie serait remplacée par une action à distance avec la vitesse de la lumière »⁶. Nous reviendrons ultérieurement sur ce point capital lorsque nous aborderons la théorie de la relativité générale.

⁶ A. Einstein, *La relativité, première partie chapitre 15*.

2. INTRODUCTION AUX GÉOMÉTRIES NON EUCLIDIENNE

2.1. Les préceptes d'Euclide

2.1.1. Les cinq postulats d'Euclide

Les *Eléments* d'Euclide est un ouvrage de référence, on y trouve les fondements de la géométrie euclidienne. Géométrie qui encore aujourd'hui est une référence puisqu'elle est couramment utilisée dans tous les domaines, que ce soit à l'école comme par un architecte ou bien encore un physicien spécialiste en optique, etc. La géométrie euclidienne est une référence depuis maintenant plus de deux mille ans. Voilà ce qui explique l'importance de cet ouvrage. Ce qui nous intéresse ici est de connaître quels sont les postulats qui fondent la géométrie d'Euclide. Ces axiomes sont au nombre de cinq et s'énoncent ainsi :

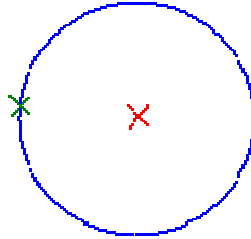
1. Par deux points distincts, il passe une droite et une seule.



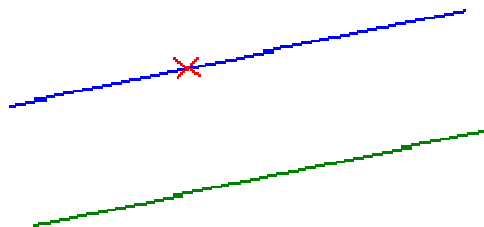
2. Tout segment est prolongeable en une droite.



- Deux points distincts étant donnés, il passe un cercle et un seul de centre le premier point et passant par le second.



- Tous les angles droits sont égaux entre eux.
- Si deux lignes sont sécantes avec une troisième de telle façon que la somme des angles intérieurs d'un côté est inférieure à deux angles droits, alors ces deux lignes sont forcément sécantes de ce côté.
Une autre façon de l'exprimer dit que par un point extérieur à une droite, il passe une droite et une seule parallèle à la droite donnée.



2.1.2. La notion de postulat et d'axiome

Le postulat est un principe qu'on ne démontre pas, sans pour autant dire qu'on ne s'y essayera pas plus tard. C'est donc un principe non démontré (mais pas indémontrable) que l'on accepte afin de construire un système déductif. On doit ici faire la différence avec l'axiome qui est lui considéré comme un élément fondamental

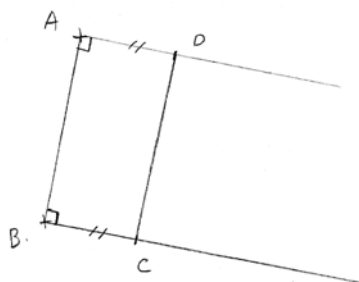
qui ne sera pas démontré. Ainsi, on a longtemps considéré les quatre premiers principes d'Euclide comme des axiomes et le cinquième comme un postulat.

Le postulat est considéré comme évident car intuitivement non contestable. Il est une marque du bon sens et paraît si évident que s'il n'est pas encore démontré, il le sera bientôt ou bien même possède un tel assentiment qu'il est dispensé de démonstration. L'axiome, dans un premier temps constitue une vérité première sur laquelle peut reposer d'autre connaissance mais il est depuis Hilbert une base construite servant la cohérence d'un système. On peut donc dire que les quatre premiers principes d'Euclide sont les fondements cohérents du système de la géométrie euclidienne et que de ce fait ils sont des axiomes. Le cinquième principe est lui considéré comme un postulat démontrable d'une évidence certaine. C'est pourquoi on lui donna le nom de postulat d'Euclide.

2.1.3. La faiblesse du cinquième postulat

Ce postulat d'Euclide, aussi évident qu'il paraît être résiste à toutes les tentatives de démonstration. Le problème est pourtant bien là, les quatre axiomes étant maintenant acceptés il est dans la préoccupation de nombreuses personnes de démontrer ce fameux cinquième postulat. L'idée germe alors de tenter une démonstration par l'absurde en supposant la fausseté du cinquième postulat. Ainsi, Saccheri proposa ceci :

Dans le plan, à partir de deux points distincts A et B, on construit les demi-droites (AD) et (BC) perpendiculaires à (AB), dans le même demi-plan, de telle sorte que $AD=BC$.

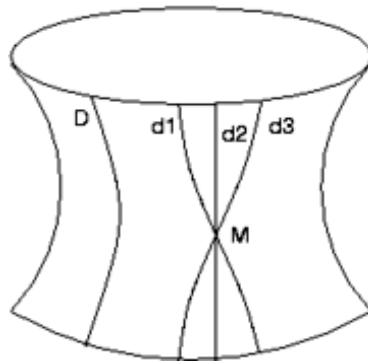


Dans la géométrie d'Euclide, on peut montrer que dans le quadrilatère (ABCD) les angles en C et D sont égaux. Mais seul le cinquième axiome d'Euclide permet de dire que ces angles sont droits (et que le quadrilatère est un parallélogramme). Si on réfute cet axiome la somme des angles en C et D est-elle supérieure ou inférieure à l'angle plat ? (L'égalité à l'angle plat équivalent au cinquième axiome d'Euclide). Il démontre que l'hypothèse de la supériorité à l'angle plat conduit à une contradiction. Reste l'hypothèse d'une somme inférieure à l'angle plat. Saccheri développe ses raisonnements à partir de cette hypothèse, sans rencontrer de contradiction. Ainsi, il va sans le savoir rendre compte de la géométrie hyperbolique. Voilà le moment charnière de l'histoire des géométries non euclidiennes car c'est par cette démonstration ratée que le postulat d'Euclide va être rendu si fragile qu'il ne s'en remettra pas. En effet, la porte est maintenant grande ouverte à ceux qui auront l'audace de prétendre que ce cinquième postulat est en réalité un axiome et qui de part cette nature (et grâce à Hilbert) ne demande qu'à être modifié afin de créer d'autres systèmes cohérents comme les géométries non euclidiennes.

2.2. Naissance des géométries non euclidiennes

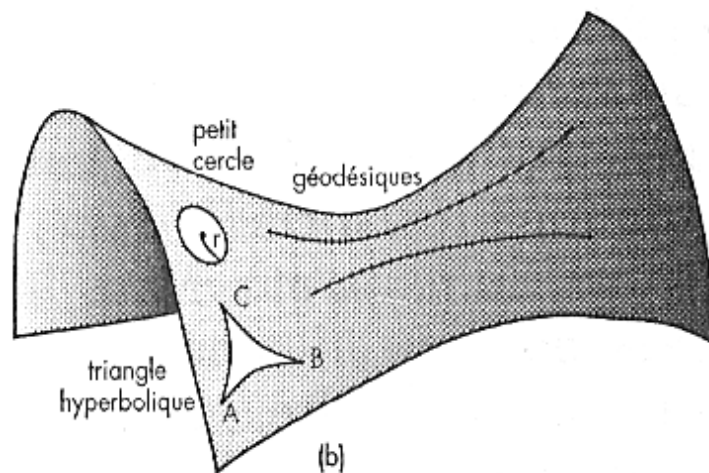
2.2.1. La géométrie hyperbolique de Lobatchevski

En 1829, Nicolaï Lobatchevski formule la géométrie non euclidienne dite hyperbolique. Pour ce faire, il modifie le postulat d'Euclide et envisage une géométrie où la somme des angles du triangle est inférieure à l'angle plat. Cette idée peut aussi s'exprimer en disant qu'il envisage l'existence d'une infinité de droites parallèles à une autre droite passant par un point. Lobatchevski ne modifie que le cinquième axiome et conserve tous les autres. Cette interprétation de la géométrie se représente par une courbure négative de l'espace, illustré ci-dessous.



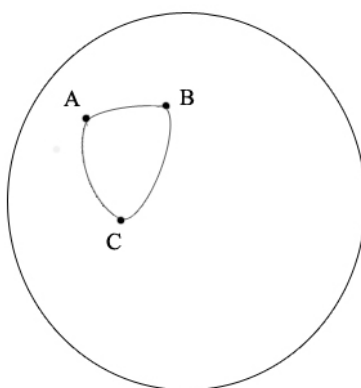
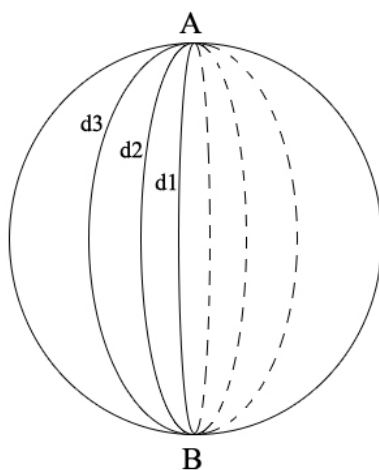
Sur cette illustration est représenté l'espace hyperbolique ainsi que la négation du postulat d'Euclide. En effet, si l'on considère la droite D et le point M, on constate qu'il est possible de faire passer une infinité de droite (exemplifié ici par d1, d2 et d3) parallèle à la droite D et passant par M. Rappelons ici que deux droites sont dites parallèles si elles ne se coupent jamais or c'est ici le cas, même si ce schéma n'est qu'une coupe de l'espace hyperbolique.

Le schéma suivant nous montre une interprétation de la somme des angles du triangle dans l'espace hyperbolique. On constate ici que la somme de ces angles est bien inférieure à l'angle plat. Le schéma nous montre aussi le passage de la ligne droite à la géodésique car dans un espace courbé, c'est la géodésique qui devient le plus court chemin entre deux points.



2.2.2. La géométrie sphérique de Riemann

Riemann envisage une géométrie qui à l'inverse de Lobatchevski considère la somme des angles du triangle comme étant supérieure à l'angle plat. Cependant on observe qu'il n'y a aucune droite parallèle à une autre passant par un point. En plus de réfuter le postulat d'Euclide, il va aussi réfuter le premier axiome en montrant qu'il peut y avoir une infinité de droites passant par deux points. L'espace ainsi obtenu est représenté comme une sorte de sphère et a donc une courbure positive (voir schémas ci-dessous).



Sur la surface d'une sphère, si l'on trace deux droites, elles sont forcément sécantes, il n'y a donc aucune droite parallèle dans l'espace sphérique. Par contre, si l'on prend deux points situés aux pôles opposés, on constate qu'une infinité de droites passent par ces deux points.

La curiosité de l'espace sphérique est qu'il constitue un espace illimité mais fini, point important qui aura une influence sur les modèles de topologie cosmique bien plus tard.

2.2.3. *Le triangle de Gauss*

Carl Friedrich Gauss découvra la géométrie hyperbolique quelques années avant Lobatchevski. Pourtant il ne voulut pas publier ses travaux par peur des réactions négatives et autres moqueries que cela lui aurait rapporté. Il décida cependant de construire une expérience visant à calculer les angles d'un triangle constitué de trois sommets montagneux dont le côté le plus long mesure cent kilomètres. Cette expérience avait pour but de mesurer la courbure de l'espace au voisinage de la terre. Le résultat obtenu était que la somme des angles du triangle était égale à $179^{\circ} 59' 59,32''$. Il en conclut donc qu'avec les erreurs de mesures, la courbure de l'espace au voisinage de la terre était nulle, ce qui ne le dissuada naturellement pas de rendre public ses recherches.

Au delà de cette anecdote, il y a là un fait important, à savoir que les géométries non euclidiennes n'ont pas eu un succès renversant car si dans le meilleur des cas elles étaient acceptées, elles ne restaient que de pure abstraction mathématique. Au pire elles n'étaient considérées comme de simples jeux mathématiques issus de la folle libération qu'a lancée l'axiomatique de Hilbert.

Les géométries ainsi créées n'entraînent aucune contradiction et sont aussi cohérentes que leur homologue euclidien et bien que tous les théorèmes soient extrêmement différents de la géométrie euclidienne ils n'en sont pas moins logiques.

3. LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

3.1. Introduction

3.1.1. Mécanique classique

Avant de continuer, il est indispensable d'introduire la notion de théorie gravitationnelle car c'est par ce biais que la théorie de la relativité générale va se formaliser. Une théorie gravitationnelle vise à expliquer et à formaliser les interactions mettant en jeu la force de gravité. Force attractive bien connue qui fait tomber les pommes sur la tête de Newton tout comme elle fait tourner notre planète autour du soleil etc.

Rappelons que dans le cadre de la mécanique classique, l'espace et rigide et la géométrie est euclidienne. Afin d'expliquer le mouvement des planètes, il est nécessaire de définir une force qui empêche les planètes d'aller en ligne droite et qui permet d'expliquer leur trajectoires elliptiques autour du soleil par exemple. Cette force qu'on appellera gravité est une force attractive représentée et pensée en terme de champs gravitationnels.

Le champ gravitationnel atteint son intensité maximum au niveau du centre du corps massif et il décroît avec la distance. La formalisation de cette théorie reste simple et efficace pour un la majorité des cas.

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

$\vec{F}_{A \rightarrow B}$ est la force exercé entre A et B.

G est la constante gravitationnelle.

M_A et M_B sont respectivement la masse de A et de B.

AB est la distance entre A et B.

Le résultat est un vecteur force.

Avec ce formalisme, il est possible de rendre compte et de prévoir les orbites des planètes comme la chute des pommes.

Enfin, c'est une théorie que l'on a tous étudiée lors de notre scolarité et dont nous avons bien intégrés les représentations. Néanmoins, pour la suite de notre propos, il est fondamental de souligner deux points concernant cette théorie de la gravitation Newtonienne. Premièrement, la force de gravité doit agir instantanément. Deuxièmement, les corps qui se meuvent sous la seule influence d'un champ de gravitation subissent une accélération qui ne dépend aucunement de la matière ni de l'état physique du corps. Ce qui énoncé d'une manière exemplifiée revient à dire que sous la seule influence du champ de gravitation terrestre, une bille de plomb tombe à la même vitesse qu'une plume. Ainsi, dans un champ gravitationnel, ni la matière ni l'état physique du corps n'a d'influence sur son accélération. On peut aisément vérifier cela en réalisant une expérience très simple qui consiste à placer la bille de plomb et la plume dans un tube à essai de grande taille et d'y faire le vide d'air avec une pompe. Il suffit ensuite de tenir verticalement le tube et de le retourner brusquement afin de constater que la bille de plomb comme la plume subissent une accélération égale dans le champ gravitationnel terrestre. Ce dernier point reste une énigme pour la mécanique classique qui ne l'interprète pas. Voyons maintenant ce que va apporter la relativité restreinte.

3.1.2. Relativité restreinte

Il y a ici deux points très importants que nous avons déjà montrés précédemment. Premièrement le fait que la vitesse de la lumière joue le rôle d'une vitesse limite. Cela signifie qu'il est impossible de trouver une interaction à distance instantanée. C'est-à-dire qu'une interaction à distance comme la gravité ne peut être instantanée étant donné la limite que constitue la célérité. Une interaction ne peut donc dépasser la vitesse de la lumière et puisque celle-ci est finie, il n'est pas concevable qu'il existe une interaction à distance dont la vitesse soit infinie.

Deuxièmement, la relativité restreinte nous apprend que la masse et l'énergie sont une seule et même chose. Il est possible de voir ça autrement. Dans un champ gravitationnel, la mécanique classique a bien compris que la masse pesante était égale à la masse inerte, mais c'est la théorie de la relativité qui va

l'interpréter en premier, en nous montrant que la masse pesante et la masse inerte sont la même qualité d'un corps qui se manifeste différemment suivant les circonstances.

3.1.3. *Un problème à résoudre*

Nous avons maintenant d'un côté la conception classique de la gravité et de l'autre les problèmes et les apports décrits par la théorie de la relativité restreinte. En effet, la relativité restreinte, si elle permet d'apporter la notion d'équivalence entre masse inerte et masse pesante pose aussi le problème de l'action à distance à vitesse finie, ce qui est en contradiction avec la théorie classique de la gravité. Il est donc nécessaire d'envisager une théorie qui puisse rendre compte de tout cela. Malheureusement la théorie de la relativité restreinte ne suffit pas à elle seule à construire une théorie gravitationnelle satisfaisante. Car comme la mécanique classique, elle ne peut rendre compte que des mouvements uniformes (sans accélération). Il est donc indispensable d'expliquer tous les types de mouvements avec une seule et même loi et permettre de concilier interactions à distance instantanées et constante de la lumière. La relativité restreinte va donc devenir un cas particulier de la théorie générale de la relativité.

3.2. Théorie de la relativité générale

3.2.1. *Explication conceptuelle*

L'acte fondamental de la théorie de la relativité générale est une géométrisation de l'espace. La gravitation ne va être ici envisagée non comme une force, comme c'était le cas pour la mécanique classique Newtonienne, mais comme une manifestation locale de la géométrie non euclidienne de l'espace-temps. Pour cela, il est indispensable d'adopter une géométrie non euclidienne capable de se courber tout en conservant les quatre dimensions de l'espace temps. Ainsi, c'est la masse des corps elle-même qui déformerait l'espace-temps. L'espace temps serait ainsi courbé sous l'effet de la matière. Il n'est donc plus nécessaire de faire appel à une force, les trajectoires des corps se déplaçant dans l'univers nous apparaissent comme décrivant des trajectoires courbes comme l'orbite d'une planète autour d'une étoile, comme si une force attirait ce corps vers un objet plus massif. Mais si l'on se

réfère à la relativité générale, le corps en orbite autour de l'étoile n'est pas attiré, il suit simplement la trajectoire créée par la déformation infligée par l'étoile sur l'espace temps. Cette trajectoire nous apparaît comme courbe, mais elle n'est en fait que la trajectoire la plus courte dans un espace non euclidien, c'est-à-dire une géodésique. On peut se représenter l'espace temps comme un tissu élastique se déformant sous l'influence de la matière. La gravité n'est donc plus qu'une manifestation locale de la courbure de l'espace temps (voir planche 1). L'image **1A** représente un univers euclidien plat et les images **1B**, **1C** et **1D** représentent un univers relativiste où la matière courbe l'espace temps, nous obligeant ainsi à utiliser les géométries non euclidiennes.

Ainsi, on obtient une théorie gravitationnelle instantanée mais non à distance. Elle est instantanée car elle d'après la théorie, il n'y a aucun intermédiaire, la gravité n'est pas transmise comme le magnétisme par exemple qui agit à distance mais non instantanément puisque l'interaction ne peut pas aller plus vite que la vitesse limite de la lumière. La gravitation Einsteinienne n'est plus une force d'attraction, ce n'est plus une force du tout. Les corps subissant les effets de la gravité suivent simplement les déformations causées par les objets massifs sur l'espace temps. Exactement comme si l'on traçait une droite avec un stylo sur une sphère, le stylo trace une droite, mais l'espace de cet objet est courbé puisque c'est une sphère. Au final la droite nous apparaît comme une courbe, mais le stylo a tracé une droite. Il en est de même pour une météorite qui est déviée par le champ gravitationnel d'une étoile, la météorite ne fait que suivre une droite dans un espace courbe, elle se contente de suivre les déformations causées par les corps massifs.

Cette conception permet aussi d'expliquer pourquoi l'accélération est la même pour tous les objets, car quelque soit la masse de l'objet, la déformation est la même pour tout le monde et la masse des objets subissant la déformation n'a strictement aucune influence sur cela.

Un autre point très important de cette théorie est que comme nous l'avons dit, tous les objets sont influencés de la même façon, qu'ils soient gros comme une planète ou bien petit comme une particule. Et justement, il est très intéressant de prendre en compte ce fait quand on considère le photon, autrement dit la lumière. Car même si d'après la théorie de la relativité restreinte, le photon ne peut avoir de

masse⁷ il est tout de même forcé d'épouser les reliefs de l'espace temps. Nous verrons ensuite pourquoi ce fait reste très important (voir planche **2**, image **2A**).

Enfin, le dernier point important concerne le temps. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, le temps et l'espace sont désormais deux entités qu'on ne peut plus séparer. Ainsi, si l'espace se déforme alors le temps lui aussi doit subir une déformation. A proximité d'un corps massif, là où la densité de matière est très forte, l'espace va donc se courber, mais plus on se rapprochera du centre du corps massif est plus le temps va ralentir. Attention, il est ici comme pour la relativité restreinte question de référentiel. C'est-à-dire que le temps au centre d'un corps massif s'écoule plus lentement par rapport à un référentiel où l'espace temps ne subirait aucune déformation par exemple. Rappelons le encore une fois, la notion d'espace et de temps absolu sont obsolètes, seul l'espace relatif et le temps relatif sont maintenant viables.

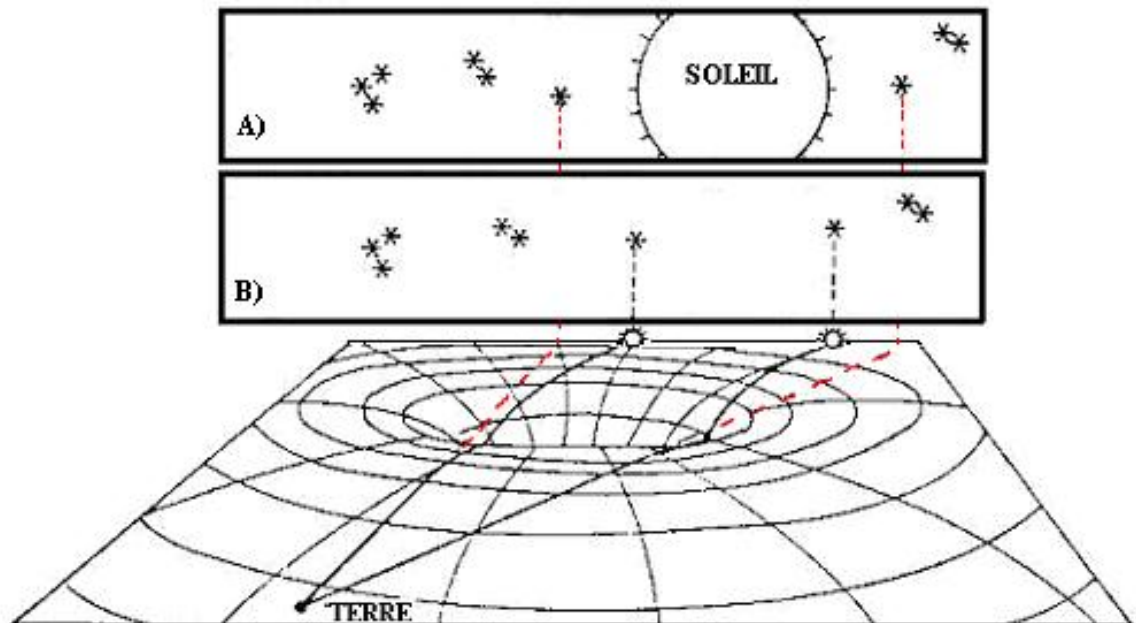
Voyons maintenant comment cette théorie qui sur le papier semble si excentrique et abstraite a pu être confirmée par l'expérience.

3.2.2. *Expérience et relativité générale*

Une des premières expériences réalisées partait du fait que si la théorie était exact, au voisinage d'un corps massif les rayons de lumière devaient être déviés. Pour vérifier cela, un protocole expérimental à été crée durant l'éclipse totale de soleil de 1919. En effet il était nécessaire d'attendre une éclipse totale du soleil car le but était d'observer un décalage dans le positionnement d'étoiles lorsque le soleil était aligné avec l'observateur et les étoiles. Mais pour observer ce décalage, il est impératif que le soleil soit aligné, il faut donc observer des étoiles qui sont derrière le soleil et cela est impossible quand le soleil brille. C'est pourquoi il fallait attendre une éclipse totale de soleil. Ainsi, il suffisait de mesurer la distance entre deux étoiles pendant l'alignement et hors alignement avec le soleil et ainsi voir si un décalage apparaissait.

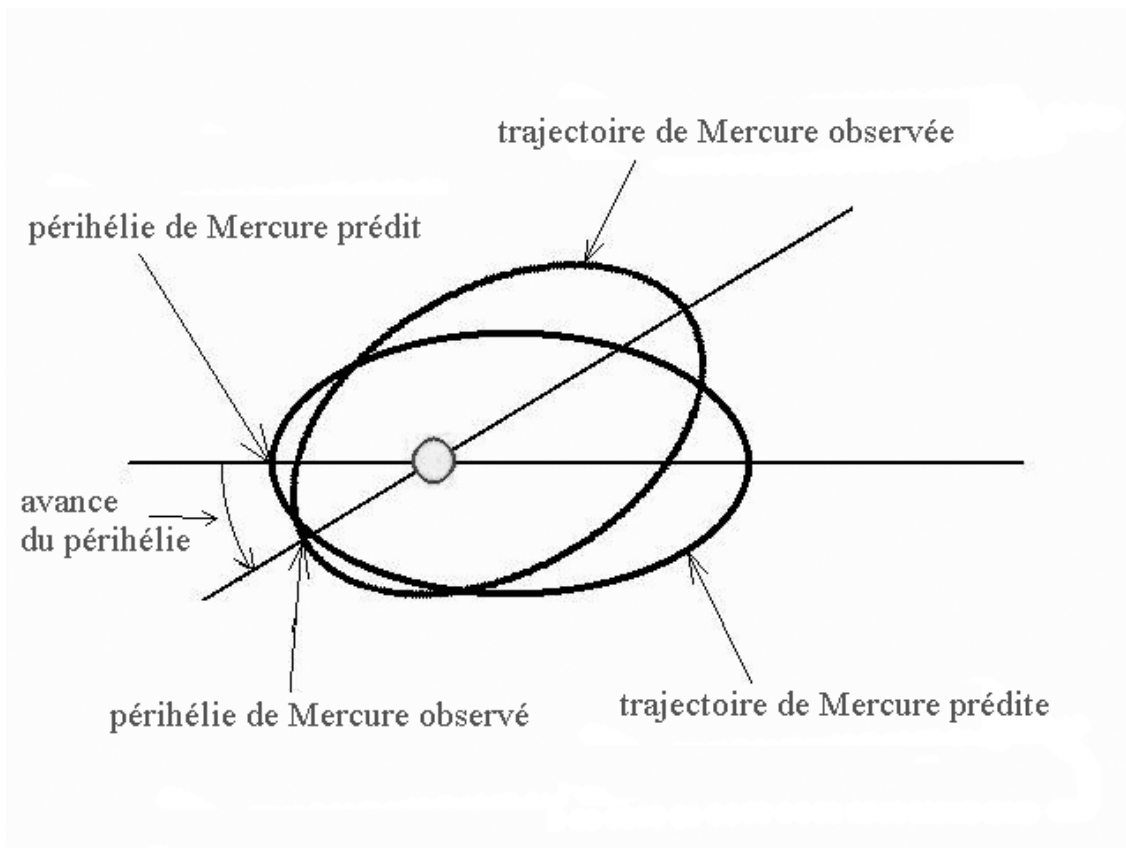
⁷ Si l'on considère que la vitesse de la lumière est une vitesse limite, si l'on donne une masse au photon, cela engendre le fait qu'il devrait avoir une énergie infinie, ce qui n'est pas vrai, puisque l'énergie d'un photon est aisément quantifiable.

Voilà un schéma de l'expérience et le résultat obtenu.



Sur le premier plan on peut voir la terre ainsi que les deux étoiles qui vont servir de repère. On peut aussi observer la déformation causée par le soleil sur l'espace temps, on peut voir comment le soleil courbe l'espace temps. Sur la partie supérieure du schéma on peut observer les résultats obtenus lors des mesures. On s'aperçoit ainsi qu'il y a bel et bien un décalage dans le positionnement des étoiles. Notre perception nous indique que la lumière se propage en ligne droite et la science aussi. Ce qui est vrai, la lumière voyage en ligne droite, mais comme le soleil courbe l'espace temps, la lumière suit une trajectoire géodésique. Mais pour notre cerveau, seule la ligne droite est interprétable, c'est pourquoi nous sommes sujet à une sorte d'illusion d'optique, comme nous le montre les pointillés sur le schéma. La théorie de la relativité avait parfaitement prédit ces décalages de positionnement et cette expérience fut un grand pas en avant vers la reconnaissance de la théorie.

Une autre épreuve fut franchie concernant le périhélie de mercure. En effet, un phénomène que la mécanique newtonienne ne pouvait expliquer était la lente rotation du périhélie de mercure. C'est donc la relativité générale qui permet de prédire avec exactitude cette lente rotation.



On peut voir sur le schéma ci-dessus que l'axe de rotation (le périhélie) de mercure ne se trouve pas à l'endroit prédit par la mécanique newtonienne. En effet, sous l'influence de la déformation engendrée par le soleil et en considérant le fait que mercure est la planète la plus proche du soleil et donc qu'elle en subit le plus les perturbations, le périhélie est en rotation. Mais mercure est la seule planète sur laquelle cette rotation est quantifiable, justement parce qu'elle est la plus proche du soleil. Ainsi, la relativité générale a permis de comprendre et de prédire correctement ce phénomène et nous a appris que toutes les planètes subissent cette rotation du périhélie même si seule mercure nous permet de l'observer.

Plus récemment un autre phénomène a pu être expliqué grâce à la théorie de la relativité générale. En effet, en observant l'univers à l'aide de télescope, il arrive parfois de tomber sur des structures aux qualités optiques très étranges. En voici deux exemples (voir planche 3). L'image 3A est un exemple très célèbre, la croix

d'Einstein. Au centre de la croix se trouve une galaxie, et donc de ce fait un corps massif par excellence. La galaxie va donc causer une courbure de l'espace temps importante. Comme nous l'avons vu précédemment, la lumière est affectée par cette déformation et n'a pas d'autre choix que d'en suivre la courbure. Si par un concours de circonstances il arrive que l'alignement entre l'observateur, le corps massif et un autre corps se situant derrière le corps massif, on puisse observer cet autre corps pourtant caché et donc inobservable. Sur l'image **3A**, on peut donc observer un quasar se situant derrière la galaxie lentille. Les quatre branches de la croix sont en fait le même quasar. Ce mirage gravitationnel est donc une manifestation optique de la relativité générale. Une autre manifestation de ces lentilles gravitationnelles est l'image **3B**, où l'on peut observer un amas de galaxies au premier plan formant une lentille gravitationnelle ayant pour effet de rendre visible des galaxies lointaines se situant derrière l'amas sous forme d'arc de cercle. Ainsi, les rayons lumineux de ces galaxies sont déformés et étirés à l'extrême jusqu'à former des arcs de cercle.

Enfin, tous ces exemples nous montre les différentes manifestations de la déformation de l'espace temps, mais ils ne soulignent que l'aspect spatial. On peut aussi trouver des manifestations temporelles de la relativité générale comme par exemple l'expérience des horloges. L'expérience consistait à placer deux horloges, l'une au sommet d'une tour et l'autre en bas de la tour et de mesurer les écarts de temps potentiel. Après, il suffit de comparer ces résultats avec les calculs effectués sur les bases de la théorie de la relativité. Ainsi, il est possible de vérifier que l'écart de temps entre les deux horloges correspond bien aux prévisions qui veulent que le temps doit ralentir au centre d'un corps massif (horloge en bas de la tour) par rapport à sa périphérie (horloge en haut de la tour). D'où l'hypothèse que le temps puisse être arrêté dans un trou noir puisque que sa courbure est infini.

Nous avons maintenant fini en ce qui concerne les descriptions scientifiques, ce qui va nous permettre de passer à des questions plus philosophiques.

4. LE POINT DE VUE PHILOSOPHIQUE

4.1. La conception classique de l'espace et du temps

4.1.1. Espace et temps chez Newton

Il est primordial de s'intéresser à la conception Newtonienne de l'espace et du temps car il est la référence encore aujourd'hui dans les manuels scolaire. Newton a donné naissance la physique classique. Les fondements de la physique moderne viennent de cet homme, ce qui explique pourquoi ses conceptions font autorité encore aujourd'hui.

Newton concevait l'espace comme infini et absolu car il croyait en l'existence d'un mouvement absolu. Il lui fallait donc crée un cadre de référence ultime des mouvements. Cependant, si l'on ne juge pas nécessaire d'introduire un mouvement absolu, alors l'espace absolu devient contingent. Le temps pour Newton est lui aussi absolu, deux horloges donnent le même temps quelque soit leur mouvement, leur emplacement etc. Mais ses arguments scientifiques ne sont pas vraiment convaincants dans la mesure où cet espace et ce temps absolu ne sont pas nécessaires. Il faut en effet chercher ailleurs pour mieux comprendre les raisons de cette conception. Pour illustrer cela, voici deux extraits choisis.

« And these things being rightly dispatched, does it not appear from phaenomena that there is a being incorporeal, living, intelligent, omnipresent, who in infinite space, as it were in his sensory, sees the things themselves intimately, and thoroughly perceives them and comprehends them wholly by their immediate presence to himself ». Newton, Optics, Query 28.

« It is the dominion of a spiritual being which constitutes God: a true, supreme, or imaginary dominion makes a true, supreme, or imaginary God. And from true dominion it follows that the true God is a living, intelligent, and powerful being; and, from his other perfections, that he is supreme or most perfect. He is eternal and infinite; omnipotent and omniscient; that is, his duration reaches from eternity to eternity; its presence from infinity to infinity; he governs all things and knows all things that are or can be done. He is not eternity and infinity, but eternal and infinite; he is not duration or space, but he endures and is present. He endures for ever and is everywhere present; and by existing always and everywhere, he constitutes duration and space ». Newton, Scholie générale de la seconde édition, Principia Mathematica, 1713.

Dans ces deux extraits, Newton évoque ses conceptions métaphysiques. On peut voir que sa vision théologique joue un rôle capital quand à la définition de l'espace et du temps. En effet, l'espace joue ici le rôle d'un « Sensorium Deï », l'organe sensoriel de Dieu. Ainsi, l'espace et le temps étant intimement relié à Dieu, ils ne peuvent être qu'absolu et infini. Dieu ne pouvant être autrement. Pour Newton, l'espace est euclidien, il est donc plat, infini et absolu. Le choix de la géométrie est ici un choix par défaut puisque la géométrie euclidienne est la seule connue à cette époque. Peut être pourrait on argumenter que Dieu ne pourrait faire de géométrie tordue ou courbée, mais il n'en n'est pas question ici.

Voilà donc le premier acte de ce qui va devenir la conception classique de l'espace et du temps. Le deuxième, qui va achever cette conception est Kant, que nous allons étudier maintenant.

4.1.2. Le lien entre Kant et Newton

Kant et Newton sont fortement liés, la première raison de cela est que Kant, dans la critique de la raison pure s'inspire de la physique Newtonienne. En un sens, Kant traduit en termes philosophiques la physique de Newton. Bien sur, il serait indispensable de montrer cela par des faits, ce que je ne vais pas faire. Le but est ici uniquement de suggérer ce type de lien puisque je ne vais pas le prouver.

Mais un fait indéniable joue en ma faveur pour faire le lien. En effet, si Newton est le père de la conception classique de l'espace et du temps dans la science, Kant est lui le père de cette conception en ce qui concerne la philosophie. Et justement, leur conception est très proche, même si l'approche est différente.

4.1.3. Espace et temps chez Kant

Avant de commencer, nous allons prendre quelques lignes pour clarifier le vocabulaire kantien que nous allons utiliser. Commençons par les jugements analytiques et synthétiques. Un jugement analytique est un jugement par identité, c'est un jugement explicatif où le prédicat B est contenu dans le sujet A. Rien n'est ajouté au concept du sujet et seule une décomposition par analyse permet d'atteindre une connaissance. Pour le jugement synthétique, il est indispensable

d'ajouter quelque chose au concept du sujet qui n'aurait pas pu être tiré d'une analyse du concept. Ensuite vient la distinction entre la notion d'*a priori* et d'*a posteriori*. Une connaissance *a priori* est une connaissance indépendante de l'expérience et une connaissance *a posteriori* est une connaissance de type empirique faisant appel à l'expérience. Enfin, une connaissance de type pure correspond à une connaissance antérieure à toute expérience possible, comme une connaissance innée par exemple.

Nous allons nous pencher maintenant sur la conception kantienne de l'espace et du temps. Chez Kant, les notions d'espace et de temps sont totalement distinctes, nous allons donc les étudier séparément.

Tout d'abord, nous allons aborder l'espace qui pour Kant ne peut être un concept empirique. Kant pense que pour intuitionner les objets, il est nécessaire d'avoir au préalable une représentation de l'espace. L'espace est donc une représentation *a priori* qui est à la base de toutes les intuitions du sens externe, c'est-à-dire de tout ce qui se trouve en dehors de nous. De plus il est impossible de concevoir une représentation du sens externe sans espace bien qu'il soit possible d'imaginer un espace sans objet. Ceci amène Kant au fait que l'espace est alors la condition de possibilité des phénomènes.

L'espace est donc une intuition pure *a priori*. La première raison en est son unique représentation. D'après Kant, on ne peut se représenter qu'un seul espace, un espace de type euclidien à trois dimensions. La seconde raison s'appuie sur la géométrie. En effet, Kant détermine le savoir géométrique comme synthétique *a priori*, et pour qu'une telle connaissance soit possible, il est indispensable qu'une intuition (ici celle de l'espace) en soit l'origine. Car si l'on considère l'espace comme un concept, alors on ne peut en tirer aucune connaissance synthétique car on ne peut tirer quelque chose au delà du concept. Il faut que cette intuition soit *a priori* car précédent toute perception d'un objet et aussi pure car apodictique. En résumé, « l'espace n'est rien d'autre que simplement la forme de tous les phénomènes des sens externes... »⁸.

Concernant le temps, Kant nous dit qu'il est lui aussi une représentation *a priori*. Il est ainsi la condition de possibilité de toutes les intuitions du sens interne. En effet, le temps ne peut être un concept empirique et doit intervenir comme fondement

⁸ E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK, III, 55, b.

en tant que représentation *a priori*. Le temps est donc une forme pure de l'intuition sensible. Cette représentation nous permet de distinguer ce qui arrive dans le même temps et ce qui arrive dans des temps différents, respectivement le simultané et le successif. Le temps est donc irréversible et le même pour tous, il a donc un certain attribut d'absolu car il doit être le même pour tout le monde bien que Kant lui refuse toute *réalité absolue*. Car pour Kant, «Il (le temps) n'est pas attaché aux objets eux-mêmes, mais seulement au sujet qui les intuitionne »⁹.

4.2. La tradition face à la théorie de la relativité

4.2.1. Espace et temps ou continuum spatio-temporel

Pour la tradition (A partir de ce point, nous emploierons simplement le terme tradition pour désigner la pensée philosophico scientifique du cadre Newton Kant.), l'espace et le temps sont deux choses différentes et totalement indépendantes. Le premier conflit entre la tradition et la théorie de la relativité tient donc dans le fait que l'espace et le temps sont deux choses intimement liés. En effet, comme nous l'avons déjà vu, l'espace et le temps dans la théorie de la relativité sont deux entités faisant partie du continuum spatio-temporel et sont donc complètement dépendantes l'une de l'autre. La déformation de l'espace causée par la matière entraîne nécessairement une déformation proportionnelle du temps. La matière déforme aussi bien le temps que l'espace car même si espace et temps sont pour nous deux concepts bien distincts, ils font partis d'une seule et même structure. Il est donc impossible de séparer espace et temps dans la théorie de la relativité. Cette conception change radicalement de la position traditionnelle où l'espace et le temps sont deux choses totalement isolés face à l'intuition et à la science. Il est maintenant nécessaire d'envisager l'espace non comme une seule et même chose mais comme deux entités faisant partie d'une structure dont il est impossible de les séparer.

⁹ E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK, IV, 40.

4.2.2. Espace et temps absolue ou relatif

Le second point de conflit concerne le caractère absolu ou relatif de l'espace et du temps. Pour la tradition, l'espace et le temps sont deux choses absolues, par le caractère divin pour Newton autant que pour l'idéalité transcendantal de Kant. Dire que l'espace et le temps sont absolus, c'est dire qu'ils sont les mêmes pour tous en tout endroit et qu'ils ne subissent aucun changement selon l'observateur, et ce même si pour Kant ils n'ont pas de réalité absolue en dehors d'un être percevant. La tradition peut donc se distinguer par cet attribut d'absolue. Pour la théorie de la relativité, l'espace et le temps sont au contraire relatifs. L'espace et le temps ne sont plus universels, ils deviennent locaux. L'espace et le temps ne peuvent donc plus qu'être appréhender de façon locale, car chaque endroit de l'univers voit sa densité de matière variée, ainsi chaque endroit voit ses caractéristiques de temps et d'espace varié selon cette densité de matière. Il n'est donc plus possible de parler d'espace et de temps de manière universelle absolue tout simplement parce qu'ils ne le sont plus. Il suffit de garder en mémoire que le simple fait de se déplacer a une influence sur le temps par rapport à quelqu'un qui est immobile.

4.2.3. Modèle géométrique, euclidien ou non euclidien

Il est un point important qui est que la compréhension de l'espace et la représentation que l'on s'en fait dépend de beaucoup de la géométrie qu'on utilise pour en rendre compte. La tradition se base sur un modèle de géométrie euclidienne. Mais il est important de préciser que cela ne dépend pas d'un choix. En effet, à l'époque, seule la géométrie euclidienne existait. Cela explique pourquoi la conception de l'espace repose sur la compréhension de cette géométrie qu'on croyait unique. Voilà pourquoi l'espace est considéré comme absolu, infini ou encore plat. La tradition applique les attributs de la géométrie euclidienne qui fait référence depuis très longtemps, pour ainsi dire une « éternité » si l'on veut soulever le fait que la géométrie euclidienne est considérée comme une vérité fondamentale à l'époque. Il en est autrement de la géométrie non euclidienne pour la théorie de la relativité, où un choix de modèle géométrique a vraiment eut lieu. C'est-à-dire qu'on a choisit un modèle plutôt qu'un autre pour qu'il corresponde à la théorie. Ainsi, pour la théorie de la relativité, il a été nécessaire d'avoir recours à une géométrie différente afin de rendre compte de la complexité d'un espace courbé par la matière. C'est pourquoi un

modèle géométrique non euclidien a été choisi. Le choix d'un modèle géométrique plutôt qu'un autre peut paraître anodin, mais il est ici capital. C'est peut être même ce point qui soulève le plus de problèmes, surtout lorsque l'on confronte ces résultats à la conception kantienne.

4.3. Première conclusion

Nous avons jusqu'ici simplement posé les bases du problème, à savoir les divergences flagrantes qui existent entre la conception traditionnelle de Kant et Newton et celle de la théorie de la relativité. Malgré cela, il est déjà possible de tirer une chose très importante de cela. Pour le comprendre, il faut se rendre compte que la théorie de la relativité est âgée d'une centaine d'années et qu'elle fait autorité dans le monde scientifique même si les théories unificatrices¹⁰ sont en route. La théorie de la relativité n'est pas juste une théorie mathématique étrange comme l'on pensait certains à ses débuts, c'est une théorie très productive et cela sans prendre position ni même aborder le débat entre idéalisme et réalisme. La théorie de la relativité est utilisée aussi bien dans les accélérateurs de particules que dans les appareils de radiothérapie pour soigner le cancer que pour expliquer des choses comme les trous noirs ou bien même être à l'origine de la théorie du Big Bang. Pour être plus direct, il est fondamental de noter que la théorie de la relativité est un succès comparable à la mécanique newtonienne de l'époque. Et c'est pourquoi la théorie est devenue le nouveau standard. Pourtant, il est intéressant de constater que le monde occidental reste profondément kantien. Mais comme nous l'avons montré, si la pensée kantienne est en osmose avec les conceptions newtoniennes, elle paraît incompatible avec les conceptions relativistes. Nous nous attarderons sur ce point ultérieurement. Car bien que la théorie de la relativité soit devenue la conception standard dans le monde scientifique, il est encore extrêmement rare de rencontrer des gens qui soient au courant de ces conceptions. Et cela paradoxalement alors que tous ou presque ont déjà entendu parlé de la relativité, sans jamais avoir eu plus de connaissances de la théorie. Chacun a déjà entendu parler de la relativité mais elle reste pour beaucoup une théorie scientifique hors de portée qui traite de choses sans influence sur la vie de tous les jours ; ce qui n'est pas faux puisque l'on utilise la

mécanique relativiste lorsque l'on traite des vitesses qui n'ont rien d'habituelles pour la vie de tous les jours. A cela s'ajoute le fait que le monde occidental est profondément kantien et cela sans même la volonté précise de l'être. Chacun porte les conceptions kantienne sans s'en rendre compte. On pourrait parler ici de tropisme kantien. La pensée kantienne est profondément ancrée en nous et n'est même plus consciente. Nous sommes kantien, qu'on le veuille ou non et il faut avoir la volonté de s'extirper du carcan kantien pour y parvenir. Justement, la théorie de la relativité est une occasion d'en sortir. Cependant, le philosophe qui devrait être le plus à même de tirer parti à la fois des découvertes scientifiques et de l'évolution de la pensée semble restée dans le carcan kantien. La science, par la théorie de la relativité nous offre un moyen d'évoluer, de nous ouvrir vers un après Kant, et cela est une chance et cela sans prendre part pour un réalisme de la relativité. Il est simplement important que les philosophes (au moins) s'intéressent aux conceptions scientifiques nouvelles comme ici la théorie de la relativité afin de confronter des écoles de pensées, ce qui pourrait permettre d'évoluer. Ceci nous amène donc au fait que dans l'époque dans laquelle nous vivons, il est primordial de comprendre que la science joue un rôle très important et qu'il est préjudiciable en tant que philosophe de l'ignorer. Voilà la première conclusion qu'avait pour but ce mémoire. C'est pourquoi nous allons voir maintenant plus en détails cette incompatibilité qui semble exister entre la tradition et la théorie de la relativité afin de voir si la position kantienne peut et doit être dépassée ou si au contraire elle a encore sa place.

¹⁰ Théories ayant pour but d'unifier la mécanique quantique à la théorie de la relativité, c'est-à-dire unifier les lois du monde atomique avec celles du monde macroscopique.

5. LE PROBLEME KANTIEN

5.1. Les raisons de l'échec kantien face à la théorie de la relativité

5.1.1. L'intuition kantienne

Pour mieux comprendre la conception kantienne et les problèmes qui en résultent si on la confronte à la théorie de la relativité, il est important de comprendre le but de Kant dans la *critique de la raison pur*. Car sa conception de l'espace et du temps ainsi que sa vision de la géométrie est en fait dirigée par un but précis. Ainsi, la finalité de Kant est de faire de la métaphysique une science et non une simple activité dogmatique et futile. Car pour Kant, certaines choses doivent être tenu pour vrai comme par exemple « Dieu existe¹¹ ». Cependant, il est impossible de fonder empiriquement cette proposition. Mais d'un autre côté, il est impossible de la fonder à l'aide d'un jugement analytique car la simple manipulation du concept ne permet pas de fonder la proposition « Dieu existe ». Il est ainsi nécessaire de faire appel à un jugement synthétique qui sont normalement réservés à ce qui touche au sensible et aux phénomènes car ils peuvent être fondés empiriquement, ce qui n'est pas le cas de notre proposition. De là, Kant va créer le jugement synthétique *a priori*, qui va lui permettre de fonder des choses en dehors de l'expérience et ainsi rendre la métaphysique capable de traiter des jugements synthétiques en dehors de l'expérience, comme par exemple la notion de Dieu, de liberté, etc. Ce qui permet de constituer la métaphysique comme science, puisque synthétique, tout en restant *a priori*, c'est-à-dire indépendante de l'expérience. Après cela, Kant pose la question fondamentale, « Comment des jugements synthétiques *a priori* sont-ils possibles ? »¹². Il est en effet inévitable de répondre à cette question puisqu'elle tient tout l'édifice de la métaphysique en tant que science.

Pour répondre à cette question, Kant va justement faire appel à la géométrie, le point qui nous intéresse le plus ici. En effet, Kant va justifier la possibilité des jugements synthétiques *a priori* en nous montrant que la géométrie est une science qui est justement basée sur des jugements synthétiques *a priori*. Pour Kant, la géométrie contient des vérités simples qui ne peuvent être fondées empiriquement,

¹¹ *Les philosophes et la science*, Chap. VII.

exactement comme l'existence de Dieu. Ainsi, « l'intuition pure de l'espace fonde la possibilité de la géométrie »¹³. Il en va de même pour l'arithmétique qui est fondé par l'intuition pure du temps. Les mathématiques sont donc d'après Kant, les exemples les plus éclatants d'une science fondée sur des jugements synthétiques *a priori*. Ainsi on pourrait reprendre l'exemple du théorème de la somme des angles du triangle. Si l'on veut retrouver ce théorème uniquement à partir du concept de triangle et ainsi procéder de manière analytique, tous les efforts du monde seront vains, il est impossible de retrouver le théorème à partir du concept de triangle et ce même si vous le triturait dans tous les sens. Il est donc nécessaire d'utiliser la manière synthétique pour retrouver le théorème. Pourtant dit Kant, que vous traciez ce triangle sur une feuille ou que vous l'imaginiez dans votre tête, le théorème ne dépend aucunement d'une expérience. Donc, que le triangle soit tracé dans l'intuition pure ou dans l'intuition empirique, il reste *a priori*.

L'intuition kantienne regroupe ainsi l'intuition *a priori* et l'intuition empirique. Mais seule l'intuition *a priori* est source de certitude et d'absolue universalité. Au contraire, l'intuition empirique ne peut nous fournir que des propositions expérimentales et donc dépourvu de nécessité. Kant nous le dit ici en prenant l'exemple de la géométrie encore une fois, ce qui va grandement nous aider par la suite.

« Dans la mesure où les propositions de la géométrie sont connues synthétiquement *a priori* et avec une certitude apodictique, je demande : d'où tirez-vous de telles propositions, et sur quoi s'appuie notre entendement pour parvenir à de semblables vérités absolument nécessaires et universellement valides ? Il n'est pas d'autre voie que d'y arriver par des concepts ou par des intuitions, mais qui, dans les deux cas, soient données ou bien *a priori* ou bien *a posteriori*. Le dernier cas de figure, à savoir des concepts empiriques, en même temps que se sur quoi ils se fondent, l'intuition empirique, ne peut fournir nul autre proposition synthétique que celle qui est simplement empirique, c'est-à-dire constitue une proposition expérimentale : en conséquence, elle ne peut jamais contenir de nécessité et d'absolue universalité, lesquelles sont pourtant la caractéristique de toutes les propositions de la géométrie. »¹⁴

¹² E. Kant, *Critique de la raison pure*, B19.

¹³ *Les philosophes et la science*, Chap. VII.

¹⁴ E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK, III, 68.

Cet extrait montre bien ce que nous avons expliqué précédemment mais il montre en plus très clairement la croyance très forte de Kant envers une géométrie parfaitement certaine, nécessaire et absolument universel.

5.1.2. Le problème du synthétique a priori

Nous allons maintenant voir plus précisément pourquoi la notion de synthétique *a priori* pose autant de problème dans la confrontation entre Kant et la théorie de la relativité. Comme nous l'avons vu, la notion de synthétique *a priori* est introduite pour constituer la métaphysique en tant que science et elle est justifiée par le fait que ce type de jugement existe déjà pour la géométrie par exemple. Géométrie qui comme nous l'avons vu dernièrement est certaine, nécessaire et absolument universelle selon les termes de Kant lui-même. Mais par quoi est fondée la notion de synthétique a priori pour la géométrie ou bien même l'arithmétique ? Sur quoi est fondée cette certitude absolue envers les mathématiques ? Cette notion est fondée sur l'intuition pure de l'espace et du temps qui sont les formes *a priori* de la sensibilité. Nous avons donc cette intuition pure de l'espace et du temps qui ont respectivement les attributs de la géométrie euclidienne et du temps absolu. Ces intuitions pures fondent la géométrie et l'arithmétique, qui sont d'après Kant des vérités nécessaires et absolues.

Pourtant, deux événements postérieurs à Kant vont bouleverser cette notion du synthétique *a priori*. Le premier est la création des géométries non euclidiennes car elles montrent que la géométrie d'Euclide n'est pas la seule et unique géométrie possible comme on l'a pensé assez souvent. En effet, si plusieurs géométries sont possibles, comment affirmer avec autant de certitude que celle d'Euclide est la bonne et ainsi affirmer comme Kant que la géométrie de son temps, donc d'Euclide doit être certaine, nécessaire et absolument universelle ? Pourquoi celle-ci plutôt qu'une autre ? Pour Kant, il était certain que faire cette association espace géométrie était évidente, mais à partir du moment où l'on peut choisir entre plusieurs géométries, il est nettement plus hasardeux de se prononcer sur l'absolue nécessité d'une plutôt que d'une autre. Cependant, l'histoire est du côté de Kant puisque les géométries non euclidiennes ont été considérées comme de simples abstractions mathématiques pendant très longtemps, ne laissant ainsi toujours aucun doute sur la vérité qu'était la géométrie euclidienne. Le second événement est l'utilisation de ces

géométries non euclidienne dans un modèle décrivant le monde réel et non plus des mondes mathématiques. Ceci par Albert Einstein avec la théorie de la relativité générale. De ce fait, il est impossible après cela d'ignorer le questionnement sur l'absolue nécessité et l'universalité de la géométrie euclidienne dans la pensée kantienne et donc comme nous l'avons montré dans le monde occidentale. Car si la géométrie euclidienne perd ses attributs de nécessité, de vérité et d'universalité, c'est tout le système kantien de la *critique de la raison pure* qui s'effondre. On voit bien ici que Kant s'appuie sur la géométrie pour montrer que le synthétique *a priori* est possible. Mais c'est ainsi donc son principal argument en faveur de sa conception de l'espace comme intuition pure et condition de possibilité des phénomènes du sens externe. Dire que la géométrie qu'il utilise n'est pas universelle et absolue, c'est condamner le synthétique *a priori* comme sa conception de l'espace comme intuition pure. Kant fait une erreur en basant son système sur la géométrie. C'est-à-dire en faisant correspondre son système à la géométrie. Encore une fois, il est difficile de le blâmer pour cela étant donné qu'il n'avait aucune raison de penser que la géométrie euclidienne n'était pas la seule et unique géométrie. On voit bien qu'Einstein agit à l'inverse, en faisant correspondre la géométrie à son système, ce qui ne garantit en rien la validité de la théorie mais permet d'évacuer le genre de problème que l'on rencontre avec Kant. La théorie de la relativité permet de nous montrer une alternative à la pensée kantienne basée sur des faits scientifiques comme nous l'avons vu avec les expériences réalisées pour la vérifier. Mais plus que ça, la théorie de la relativité a fait naître de nombreuses autres théories toutes aussi fécondes, comme la théorie du Big Bang ou bien même expliquer la formation des trous noirs. Tout cela pour dire que la théorie de la relativité apporte des données sensibles crédibles.

La pensée kantienne semble être dépassée par la théorie de la relativité et il est maintenant impossible d'ignorer ces problèmes de géométrie et du synthétique *a priori*. Nous allons donc maintenant voir que certaines personnes se sont intéressées à ces problèmes et ce dans les deux voies. Vers le dépassement kantien avec le cercle de Vienne et vers une transformation du kantisme par les néo kantien.

5.2. L'avenir de la pensée kantienne

5.2.1. Le dépassement kantien

Dans les années vingt, un regroupement de philosophes des sciences, de scientifiques et de logiciens se forme autour de Moritz Schlick. Ce groupe que l'on appelle le cercle de Vienne, très influencé par l'empirisme de Ernst Mach partage certaines conceptions philosophiques et tous se réclament du positivisme logique. Ils proposent ainsi une philosophie comme explication des propositions scientifiques par l'analyse logique. Ils mettent l'accent sur le fait que la philosophie ne doit pas être utilisée comme la métaphysique qui est pour eux vide de sens. Une conception scientifique du monde est pour eux incompatible avec la métaphysique. Ainsi, les propositions du type « Dieu existe » ne doivent être considérées que comme des sentiments exprimés sur la vie et en aucun cas un sujet de recherche philosophique. Pour les membres du cercle de Vienne, la perception des sens est à la base de la connaissance. La logique occupe une place importante car elle permet d'éliminer les faux problèmes et les non-sens posés par la métaphysique ou bien le langage ordinaire.

Comme on peut s'en douter, la conception réaliste des membres du cercle de Vienne ne va pas aller dans le sens de Kant et du synthétique *a priori*. Cela va d'ailleurs être une cible de choix pour nombre d'entre eux. Il est clair que pour eux et bien que Kant est pour but de montrer comment faire pour rendre la métaphysique moins obscure et plus scientifique, il est encore trop évident que le synthétique *a priori* rentre dans la catégorie métaphysique et n'a donc aucun sens pour eux. Il va donc pour eux être question de dépasser la métaphysique et le non sens qu'elle propage. Pour cela, l'analyse logique appliquée au synthétique *a priori* ou bien encore à la conception kantienne de la géométrie va être employée. De plus, Einstein étant plus ou moins lié au cercle de Vienne, les membres sont bien au fait de la théorie de relativité et sont influencés par la conception réaliste du système non euclidien de la relativité générale.

5.2.2. La transformation kantienne

Nous l'avons dit précédemment, l'influence de la pensée kantienne est énorme et de nombreux philosophes suivent les traces de Kant. Pourtant, comme

nous l'avons montré, la science a fait des progrès considérables durant le vingtième siècle. Malheureusement pour les disciples de Kant, ces progrès ne vont pas vraiment dans le sens de la pensée kantienne et un grand nombre de ces avancées scientifiques sont incompatibles avec la pensée kantienne. Cependant, loin d'abandonner les conceptions de Kant, les néo-kantiens veulent maintenir le projet kantien car ils sont profondément marqués par l'idéalisme et ne sont pas prêts à abandonner les questions de la métaphysique. Ainsi, les néo-kantiens veulent conserver les questions de la critique de la raison pure, « Que puis-je savoir ? Que puis-je espérer ? Que puis-je faire ? »

Le seul moyen de maintenir le projet kantien est de le transformer afin qu'il puisse passer les épreuves de la science moderne. Parmi les néo kantiens, c'est Ernst Cassirer qui va étudier de près les questions qui nous intéressent en confrontant directement son influence kantienne avec la théorie de la relativité d'Albert Einstein.

6. LES ARGUMENTS POSITIVISTES ET NÉO KANTIEN

6.1. Le point de vue d'Henri Poincaré

6.1.1. Présentation contextuelle de Poincaré

Henri Poincaré est un mathématicien et physicien français né en 1854 et mort en 1912. Il consacra la fin de sa vie à la philosophie des sciences. Evitons de relancer le débat entre Poincaré et Einstein sur la paternité de la relativité mais rappelons quand même qu'il a travaillé sur les mêmes champs d'investigation qu'Albert Einstein. Centrons nous sur ce qui nous intéresse ici, la géométrie. Ainsi, Poincaré s'est intéressé aux conceptions de la géométrie puisqu'il a connaissance des géométries non euclidiennes, il est enclin à se poser des questions très importantes sur le sujet. A savoir s'il est possible de décider entre plusieurs géométries pour décrire le monde et si oui comment? La première étape est de se demander s'il est certain que la géométrie que nous utilisons pour décrire le monde, c'est-à-dire la géométrie euclidienne est vraie.

6.1.2. Remise en question de la géométrie euclidienne

Pour commencer, Poincaré va faire une analyse des axiomes de la géométrie afin de voir si l'on peut considérer ces axiomes des jugements synthétiques *a priori* ou comme des faits expérimentaux.

S'il on veut considérer les axiomes de la géométrie comme des jugements synthétiques *a priori*, c'est-à-dire comme Kant l'entend, il faut donc que ces axiomes pré existent en nous dit Poincaré. De plus, si l'on considère les axiomes de la géométrie comme étant synthétiques *a priori*, il est alors hors de question de les remettre en cause, seule l'absolue nécessité, universalité et vérité de ces jugements sont acceptables. C'est-à-dire que ces axiomes seraient tellement certains qu'il serait impossible pour nous de construire quoique ce soit qui puisse en différer. Uniquement par le fait que si ces axiomes sont synthétiques *a priori* et donc vrai, absolue et universelle, notre condition humaine ne nous permettrait même pas d'imaginer d'autres axiomes que ce de la géométrie euclidienne. Poincaré le dit ici avec « « Il (les axiomes de la géométrie) s'imposerait alors à nous avec une telle force, que nous ne pourrions concevoir la proposition contraire ni bâtir sur elle un édifice théorique. »¹⁵. Ce que veut dire ici Poincaré est le fait que si les axiomes de la géométrie étaient des jugements synthétiques *a priori*, il aurait été impossible pour l'homme de remettre en question ces axiomes et de construire des géométries non euclidiennes ayant des axiomes géométriques si différents de ceux de la géométrie d'Euclide. Hors, les géométries non euclidiennes existent bel et bien et sont donc la preuve d'après Poincaré, que les axiomes de la géométrie ne peuvent être des jugements synthétiques *a priori*.

Ensuite, Poincaré va se demander si les axiomes de la géométrie peuvent être considérés comme des vérités expérimentales. Poincaré entend donc par là que les axiomes de la géométrie nous viendraient de l'expérience, c'est-à-dire la perception répétée de figures et de règles simples que l'on aurait intégrer si parfaitement qu'ils en seraient devenus des axiomes pour notre science de la géométrie. Pour Poincaré, cela n'est pas possible, car en réalité nous n'expérimentons pas sur des figures idéales. L'expérience porte uniquement sur des objets matériels et de ce fait, la géométrie devrait emprunter à l'expérience les propriétés des corps solides, avec toutes les imperfections qu'on leurs connaît. Car il

¹⁵ H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*.

n'existe pas de solides rigoureusement invariables. Donc, « Si la géométrie était une science expérimentale, elle ne serait pas une science exacte »¹⁶. Hors comme l'on considère la géométrie comme une science exacte, Poincaré refuse de croire que les axiomes de la géométrie nous viennent de l'expérience et qu'ils soient en fait des vérités expérimentales.

Ainsi, Poincaré arrive à la conclusion que savoir si notre géométrie euclidienne est plus vraie que les autres n'a pas de sens, car une géométrie ne peut être plus fausse ou plus vraie qu'une autre. Pour Poincaré une géométrie est plus commode ou moins commode qu'une autre. C'est une histoire de convention, et « C'est ainsi que les postulats peuvent rester rigoureusement vrais quand même les lois expérimentales qui ont déterminé leur adoption ne sont qu'approximatives. »¹⁷. Cependant et à partir de là, il est clair que pour Poincaré, la conception kantienne est obsolète car comme nous l'avons dit, la question de la vérité de la géométrie n'a pour lui plus de sens car aucune ne lui paraît être certaine. On pourrait donc s'arrêter là en ce qui concerne Poincaré, mais il est intéressant de voir comment il va permettre le choix entre les différentes géométries.

6.1.3. Pragmatique, géométrie et conventionalisme

Comme nous l'avons vu, la géométrie chez Poincaré n'est pas une question de certitude mais bien de convention, une géométrie n'est pas vraie ou fausse, elle est juste plus ou moins commode. Cependant, en expliquant comment choisir entre les différentes géométries, Poincaré va nous apprendre des choses qui seront importantes par la suite. La première chose que tient à faire Poincaré est de marquer la différence qu'il y a entre l'espace géométrique et l'espace de la représentation. L'espace géométrique a certains attributs qui sont le fait qu'il soit continu, infini, homogène¹⁸, isotrope¹⁹ et qu'il ait trois dimensions.

L'espace représentatif est quand à lui bien différent. Premièrement l'espace visuel, qui est l'image formée sur la rétine. Cet espace est bien continu mais il ne contient que deux dimensions car la rétine joue le rôle d'un écran mais elle n'a que deux dimensions. De plus, l'espace visuel n'est pas homogène, car il a un cadre

¹⁶ H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*.

¹⁷ Idem.

¹⁸ Tous les points sont identiques entre eux

¹⁹ Même comportement dans chaque direction

limité par la surface de la rétine. Ainsi, chaque point joue un rôle précis et il est impossible de dire qu'un point au centre de la rétine joue le même rôle qu'un autre en périphérie. Poincaré évoque aussi le fait qu'en plus de l'espace visuel, l'espace représentatif est aussi constitué d'un espace tactile et moteur. L'espace moteur par exemple, contient autant de dimension que nous avons de muscle. Le point important est donc celui-ci, nous ne nous représentons pas les objets dans l'espace géométrique car ces deux espaces sont différents. Quand nous faisons de la géométrie, nous raisonnons sur ces objets comme s'ils étaient dans l'espace géométrique.

Ensuite Poincaré se demande s'il est possible de faire un choix qui soit donné par l'expérience, mais comme il le dit très bien, « Connaître la hauteur du mât, cela ne suffit pas pour calculer l'âge du capitaine. »²⁰. Ainsi, L'expérience ne nous fait connaître que les rapports des corps entre eux et non les rapports entre les corps et l'espace. L'expérience ne peut donc pas nous permettre de faire un choix, mais elle peut par contre nous guider. Le choix entre une géométrie plutôt qu'une autre doit être un choix à visée pragmatique. En se laissant ainsi guider par l'expérience, Poincaré penche vers une géométrie euclidienne car elle est pour lui la géométrie la plus commode. Elle est pour lui la plus simple et celle qui correspond le mieux à notre vision du monde.

Finalement, voilà la conclusion de Poincaré, la géométrie n'est pas une affaire de vrai et de faux, elle est simplement un choix que l'on doit faire pour décrire le monde. Mais son choix pragmatique envers la géométrie euclidienne n'est pourtant pas celui qu'Einstein aura retenu pour la relativité générale. Ainsi, c'est une géométrie non euclidienne qui aujourd'hui permet la description la plus acceptée dans le monde scientifique.

²⁰ H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*.

6.2. Le point de vue de Rudolf Carnap

6.2.1. *Presentation contextuelle de Carnap*

Carnap est un philosophe des sciences Allemand né en 1891 et mort en 1970. Carnap faisait parti intégrant du cercle de Vienne et se réclame donc de l'empirisme logique. Il s'intéresse particulièrement à la logique et la science physique. Il a, au même titre que Reichenbach une connaissance approfondie de la physique moderne. Il consacra d'ailleurs sa thèse sur la place de la géométrie dans les sciences physiques. Il pense donc que cette question est très importante et il va donc être intéressant de voir les arguments qu'il apporte concernant notre sujet. Il va ici utiliser l'analyse logique, comme nous l'avons dit auparavant au sujet de la méthode du cercle de Vienne, pour montrer l'aspect obsolète de la conception kantienne.

6.2.2. *Le conventionalisme de Poincaré contre la relativité générale d'Einstein*

Carnap part de la conception conventionnaliste de Poincaré. Il en conclut donc que les scientifiques préféreront toujours la géométrie euclidienne car elle est plus commode. Poincaré écrivit cela très peu de temps avant qu'Einstein publie la théorie de la relativité générale en 1915. Voilà comment Carnap interprète cette idée. Il reprend pour cela une illustration d'Helmholtz qui voulait montrer que le choix de la géométrie est bien une question empirique. Il faut ainsi imaginer un monde à deux dimensions où tout y est plat, les êtres comme les choses. Cependant, ce monde n'est pas un plan mais une gigantesque sphère. Ceci pour dire que comme une fourmie sur la terre, il est impossible aux êtres de ce monde de percevoir la courbure de leur monde. La question est maintenant de savoir si ces êtres peuvent grâce à l'expérience déterminer s'ils se trouvent sur un plan, une sphère ou encore une pseudo sphère. Helmholtz pense qu'il possible de déterminer la courbure de l'espace en mesurant les angles d'un immense triangle, comme l'a déjà montrer Gauss. S'ils obtiennent un résultat supérieur à l'angle plat alors ils pourront en conclure qu'ils habitent la surface d'une sphère. Pour nous qui vivons dans un monde à trois dimensions, il nous est évident que la surface de ce monde est courbe. Il est donc

aussi possible de dire que notre monde à trois dimensions est courbé dans un espace à quatre dimensions. Deux options s'offrent au physicien de notre monde plat. Il peut en effet opter pour une géométrie plane ou bien opter pour une géométrie courbe. Par conséquent, soit les objets sont courbés, soit il faut ajouter des règles et des lois afin de rendre compte de la contraction et de la dilatation des longueurs. Ainsi, si aucune raison d'ordre logique ne peut permettre de choisir entre les deux types de conception, il est donc possible de conserver un univers euclidien si l'on est prêt à en payer le prix. Et ce, comme nous l'avons vu précédemment, Poincaré semblait être prêt à parier sur ce choix et donc à en payer le prix. Ainsi, Carnap tire deux choses de cela, premièrement que nos instruments de mesure pourraient être capables de déterminer si notre univers est courbe. Deuxièmement, Carnap dit que « Les deux hypothèses, euclidiennes et non euclidiennes, ne sont que des descriptions différentes appliquées à des faits identiques. »²¹. Cela car il sera toujours possible de créer des règles afin de rendre compte des phénomènes observés grâce à la théorie de la relativité restreinte. Le problème est que, à l'inverse de Poincaré, Carnap a vécu la publication de la théorie de la relativité générale. Et comme nous l'avons dit précédemment, Einstein n'a pas opté pour un espace euclidien mais bel et bien pour un espace à géométrie non euclidienne variable d'une extrême complexité. C'est pourtant dans cet espace non euclidien si loin de la commodité prônée par Poincaré que la théorie de la relativité a su si bien s'exprimer et rencontrer un tel succès.

6.2.3. Le choix d'une géométrie non euclidienne

La question qui se pose maintenant est pourquoi avoir choisi une géométrie non euclidienne ? La close de simplicité semblait pourtant être une bonne approche, mais Carnap montre qu'elle n'est en fait pas si simple. Carnap prend l'exemple des longueurs et dit que selon le critère de simplicité, on pourrait n'admettre aucune correction dans la méthode de mesure des longueurs. Pour cela il suffirait de considérer une baguette étalon comme unité de mesure. Mais si l'on fait ça, le prix à payer est énorme. En effet, si l'on chauffe la baguette étalon, c'est l'univers tout entier qui se contracte. Ainsi, le choix le plus simple concernant les longueurs entraîne une complication très significative des lois physiques, et cela aucun

²¹ R. Carnap, *Les fondements philosophiques de la physique*.

physicien n'est prêt à payer ce prix. Il en va ainsi de même pour le choix de la géométrie non euclidienne dans la relativité générale, où la complexité des géométries non euclidiennes est en réalité un avantage pour la simplicité d'ensemble du modèle de la théorie. « ... Ils ne se sont pas fondés sur le degré de simplicité qui caractérise tel ou tel aspect partiel de la situation, mais plutôt sur la simplicité d'ensemble du système de lois physiques qui se développe à partir de cette option. »²². Il est donc bien clair ici que le critère de simplicité au sujet du choix la géométrie s'efface vis-à-vis du critère de simplicité de l'ensemble du modèle physique que représente la relativité générale.

Après ce choix d'une géométrie non euclidienne pour décrire la réalité par Einstein, Carnap note que le monde non scientifique mais aussi une partie de celui-ci a beaucoup de mal à l'accepter. Il est vrai que la transformation est immense mais de nombreuses personnes voient en cet acte une mathématisation du réel et craignent que la physique ne devienne que mathématique abstraite et sans aucun rapport avec le réel qu'il est sensé expliquer. C'est pourquoi Carnap veut faire la distinction nécessaire entre géométrie mathématique et géométrie physique. Car même s'il est vrai que gravitation de la physique classique a été remplacé par une géométrie du système spatio-temporel, Carnap pense que cette géométrie fait encore partie de la physique et non des mathématiques pures. La géométrie de la relativité est une géométrie physique car « La géométrie mathématique est purement logique, alors que la géométrie physique est une théorie empirique. »²³. La théorie de la relativité est une théorie physique où l'on y étudie des grandeurs physiques. Elle porte sur l'espace physique et n'est pas une pure abstraction. Carnap voit en Kant une cause de la confusion et de la réticence des gens envers la théorie de la relativité. Il est encore une fois question ici de la question du synthétique *a priori*. Carnap n'est pas prêt à accepter la géométrie comme synthétique *a priori*. Pour cela, il fait référence à Hilbert et montre que les axiomes de la géométrie ne doivent pas contenir d'attribut de style vérité ou universalité. Les axiomes de la géométrie, quelle soit euclidienne ou pas, sont comme les règles d'un jeu et il suffit que leur cohérence logique soit présente pour former un système logique tout à fait acceptable. Mais en aucun cas la vérité ne doit rentrer en ligne de compte lorsque l'on parle des axiomes. C'est pourquoi la géométrie mathématique relève des mathématiques pures, elle est

²² R. Carnap, *Les fondements philosophiques de la physique*.

²³ Idem.

donc analytique *a priori*. La géométrie physique est quand à elle synthétique *a posteriori*. Carnap reprend ainsi la conception d'Einstein en disant « Dans la mesure où les théorèmes mathématiques s'appliquent au réel, ils ne sont pas certains et dans la mesure où ils sont certains, il ne s'applique pas à la réalité. »²⁴. Ce qui signifie bien que la géométrie mathématique est analytique *a priori* et la géométrie physique synthétique *a posteriori*. Le synthétique *a priori* est pour Carnap une illusion idéaliste d'où l'importance de faire la distinction entre géométrie mathématique et géométrie physique.

Une des principales objections que l'on a fait à propos des géométries non euclidiennes est le fait qu'elles ne sont pas imaginables ou intuitionables. Il semble que les géométries non euclidiennes aillent contre nos habitudes de penser et notre intuition dans le sens où la très grande majorité des gens pensent encore que la géométrie euclidienne est « la » géométrie. Pour ceux qui se posent pourtant la question, reste encore un obstacle de taille, à savoir le fait que notre intuition de l'espace paraît être euclidienne. Poincaré nous a montré que non. Mais l'objection reste profondément kantienne. Carnap mentionne Reichenbach et s'accorde avec lui pour dire que ce problème est purement psychologique et qu'il n'y a aucune raison de supposer que nos intuitions aient été préformées selon un cadre euclidien. Il reprend ainsi l'exemple des astigmatiques dont la vision est courbée et dont la perception de l'espace est loin d'être plane comme elle devrait l'être si nous étions préformés selon un cadre euclidien. Avec des lunettes de correction, le cerveau s'adapte bel et bien dans les deux sens bien qu'il faille un temps d'adaptation. Enfin, son argument le plus fort tient dans le fait que la capacité de représentation d'une théorie n'a pas à intervenir dans la science physique. En effet, chaque théorie doit avoir sa représentation à l'échelle humaine et cela afin de donner du sens et du crédit à ces théories. L'esprit humain a besoin de ces représentations, pour comprendre les théories comme pour les utiliser. Le problème est que plus la science avance et plus les théories se complexifient et plus les possibilités de représentation s'amenuisent et deviennent difficiles. Le physicien a besoin de ses représentations et cela est ancré en lui et la théorie de la relativité générale ne satisfait pas ce besoin de représentation. Un bon exemple de cette conception est la représentation de l'atome de Niels Bohr où l'on représente un atome comme un

²⁴ R. Carnap, *Les fondements philosophiques de la physique*.

système planétaire, l'électron gravitant autour du noyau. Hors on sait maintenant que cette représentation est simplifiée à l'extrême puisque l'électron ne suit pas de trajectoire de type planétaire. Depuis lors plus personne n'exige de représentation complète de ce domaine. Il devrait en être de même pour la géométrie non euclidienne et la théorie de la relativité générale. Car s'il est vrai que nous n'avons pas vraiment de représentation de la déformation du tissu spatio-temporel sous l'effet des corps massifs dans une quatrième dimension, la théorie ne doit pas en être rejetée pour autant. Notre représentation d'un espace à deux dimensions courbé dans une troisième est comme l'atome de Bohr très simpliste mais cela ne doit pas empêcher la théorie de la relativité d'être acceptée. Pour Carnap, la représentation ne doit avoir un but que pédagogique. « La construction d'un modèle visuel élégant ne garantit nullement la solidité de la théorie qu'il incarne, et on aurait tort également de rejeter une théorie sous prétexte qu'elle ne propose pas de modèle visuel. »²⁵. Ainsi, la géométrie non euclidienne ne peut être simplement rejeté sous de tels prétextes.

6.3. Le point de vue de Ernst Cassirer

6.3.1. *Presentation contextuelle de Cassirer*

Ernst Cassirer est un philosophe Allemand né en 1874 et mort en 1945. Cassirer fait parti du courant de pensée qu'on appel néo-kantisme. Il est en effet idéaliste et va donc s'intéresser à la pensée kantienne. Il va notamment essayer d'approfondir la théorie de la connaissance kantienne. En ce qui nous concerne, Cassirer ayant une connaissance dans le domaine de la science assez importante, il va s'essayer au maintien de l'idéalisme kantien après l'arrivée de la théorie de la relativité. Il a en effet vécu la transformation relativiste en science et va donc s'y intéresser philosophiquement. Son but à donc être de transformer le kantisme pour lui permettre de passer l'épreuve de la théorie de la relativité. Cassirer est donc une réponse aux positivistes logiques qui pensent que la relativité signe la fin de la pensée kantienne.

²⁵ R. Carnap, *Les fondements philosophiques de la physique*.

6.3.2. *L'acceptation relativiste*

Le premier acte de Cassirer va en effet être d'accepter la théorie de la relativité. Cassirer est très au fait de la recherche scientifique de son temps, il sait alors que la théorie de la relativité est une grande avancée et que la physique Newtonienne est bel et bien dépassée. Par cela, il admet donc aussi l'existence des géométries non euclidiennes comme pouvant être utilisées pour représenter le réel, ce qui comme nous l'avons vu va à l'encontre de la pensée kantienne. Il le dit lui-même, « Physics now proves not only the possibility, but the reality of non Euclidean geometry.»²⁶. Cassirer, au lieu de refuser et trouver des arguments allant contre l'emploi de la géométrie non euclidienne comme on le supposerait faire reconnaît bien le point aux positivistes et autres détracteurs de Kant. Ensuite, il va rejoindre Poincaré sur l'idée qu'il est impossible de vérifier empiriquement si l'espace est euclidien ou non euclidien. Il veut dire par là qu'il serait impossible de mesurer la courbure de l'espace, par exemple en utilisant la méthode de la mesure des angles d'un grand triangle. Car comme l'a dit Poincaré, les mesures ne peuvent nous informer que sur la relation des objets entre eux et jamais la relation des objets à l'espace. Ce qui implique qu'il est impossible de confirmer ou de réfuter le type de géométrie de l'espace par l'expérience. En revanche, Cassirer va se séparer de Poincaré sur le fait que la géométrie euclidienne doit être choisie par sa simplicité envers les lois de la physique. Cassirer étant vécu l'arrivée de la relativité générale, il reconnaît donc bien que ce critère de simplicité est intenable.

Après avoir accepté la relativité tout en maintenant qu'il était impossible de trancher empiriquement entre une géométrie, qu'elle soit euclidienne ou non euclidienne arrive à cette conclusion très relativiste. « And here we are first forced to a negative decision, which is demanded by the first principles of the theory of relativity. Whatever meaning we may ascribe to the idea of non Euclidean geometry for physics, for purely empirical thought, the assertion has lost all meanings for us that any space, whether Euclidean or non Euclidean, is the real space.»²⁷. Cassirer prend ici une décision très importante, il nous dit donc que la théorie de la relativité nous montre bien une chose fondamentale par l'utilisation de la géométrie non euclidienne, c'est qu'il est maintenant impossible de donner du sens à l'espace à

²⁶ E. Cassirer, *Einstein's theory of relativity considered from the epistemological standpoint*, Chap. VI, dans *Substance and function*.

²⁷ Idem.

travers les géométries. Ce que la théorie de la relativité nous apprend donc avec les géométries qu'elle utilise ne porte donc pas sur l'espace réel. Peu importe la géométrie qu'on utilise, la théorie de la relativité nous montre justement que les modèles qu'on utilise ne porte pas sur l'espace réel et que de ce fait la théorie de la relativité enlève toute source d'objectivité dans la physique. Le concept d'espace perd alors tout sens. Cassirer va même jusqu'à dire que la théorie de la relativité va indirectement contre l'empirisme, car c'est par le concept d'espace que toute objectivité est perdue car au final, s'il est impossible de confirmer ou de réfuter quelle type de géométrie est la bonne, alors l'espace comme on l'entend au sens physique devient obsolète si l'on veut y donner du sens.

Ainsi, il faut voir les géométries différemment des positivistes, « the structure of geometry, whether euclidean or non euclidean poses no immediate correlate in the world of existence. They exist as little physically in things as they do psychically in our presentation but all their being, i.e. their validity and truth consists in their ideal meaning."²⁸. Ainsi, les géométries ne sont que des modèles, elles sont des lettres qui nous permettent de lire les faits empiriques. Elles ne peuvent donc pas être utilisées pour donner du sens à l'espace.

6.3.3. La transformation idéaliste de Cassirer

Finalement, Cassirer, après avoir préparé le terrain en montrant la perte de toute objectivité dans le concept d'espace doit maintenant effectuer une transformation dans la pensée kantienne. Ainsi, puisqu'il n'y a plus rien d'ontologique dans la conception géométrique de l'espace et que les géométries doivent être considérées comme une méthode permettant de rendre compte des faits empiriques, la transformation consiste à intégrer les géométries non euclidiennes dans les moyens dont l'entendement dispose pour rendre compte des faits empiriques. En effet, si les géométries sont considérées comme des outils, indépendants du réel, alors il suffit d'intégrer les géométries non euclidiennes comme concept méthodique de l'entendement et ainsi permettre de réfuter les arguments disant que la pensée kantienne ne peut supporter les géométries non euclidiennes. « Instead of speaking

²⁸ E. Cassirer, *Einstein's theory of relativity considered from the epistemological standpoint*, Chap. VI, dans *Substance and function*.

ontologically of the being or indeed of the coexistence of diversely constituted spaces, which results in a tangible contradiction, the theory of relativity speaks purely methodologically of the possibility or necessity of applying different measurements i.e. different geometrical conceptual languages for the interpretation of certain physical manifold.”²⁹. Après avoir intégrer les géométries non euclidiennes au système kantien, il reste néanmoins le problème du choix de la géométrie euclidienne comme forme *a priori* du sens externe. Car intégrer les géométries euclidiennes dans le domaine méthodologique ne justifie en rien ce choix ontologique.

Enfin, Cassirer utilise l’argument de Poincaré sur la simplicité de la géométrie euclidienne afin de justifier le choix de la géométrie euclidienne comme forme *a priori* du sens externe. Pour cela, il doit néanmoins aller plus loin dans la réflexion car comme nous l’avons dit, l’argument de Poincaré sur la simplicité de la géométrie non euclidienne s’avère finalement intenable. En effet, Cassirer pense que la géométrie euclidienne est quand même la plus simple et doit ainsi servir de fondation *a priori* au sens externe. Il dit ainsi à propos de la simplicité de la géométrie euclidienne que « the development of the general theory of relativity leaves this methodic advantage of euclidean geometry unaffected. For euclidean measurements do not indeed hold in it absolutely but they hold for certain elementary areas, which are distinguished by a certain simplicity of physical conditions.”³⁰. En effet, ce que veut dire par là Cassirer est le fait que dans n’importe quelle partie de l’espace non euclidien, si l’on regresse vers une partie plus petite et donc plus élémentaire, il sera toujours possible de retrouver les conditions de la géométrie euclidienne. C’est une façon de dire que la géométrie euclidienne est quand même première car elle pourra toujours être trouvée à la base de toutes courbures de l’espace. Un exemple simple serait celui de notre espace à l’échelle humaine. Car même si l’univers est courbé dans son ensemble, notre espace locale reste dans des conditions euclidiennes, comme à notre échelle la terre nous paraît plate alors qu’elle est une sphère. Il est donc ainsi toujours possible de dire que l’espace est primordialement euclidien et c’est ce dont se sert Cassirer pour justifier et de conserver ce choix de la géométrie euclidienne comme forme *a priori* du sens externe face à la théorie de la relativité.

²⁹ E. Cassirer, *Einstein’s theory of relativity considered from the epistemological standpoint*, Chap. VI, dans *Substance and function*.

³⁰ Idem.

7. ANALYSE DES DONNÉES COLLECTÉES

7.1. Analyse par les fondements des mathématiques

7.1.1. *Raison de la démarcation entre géométrie pure et géométrie expérimentale*

A la vue de ces différents arguments, il est clair que la réponse à notre question de départ, à savoir si la théorie de la relativité peut être considérée comme un modèle décrivant le réel, n'est pas si simple que ça. En effet, bien que les arguments de Carnap soient fort justes, le tour de main de Cassirer est tout aussi réussi. Mais une chose reste cependant sûre, c'est que la question repose sur les différentes positions que l'on tient à propos de la géométrie. Le problème vient donc bien de la géométrie. Voilà pourquoi nous allons maintenant essayer d'aller plus loin et de voir si une recherche dans les fondements de la géométrie pourraient nous permettre d'éclaircir tout cela.

Voyons donc pour commencer ce que l'on pourrait tirer de l'analyse de la géométrie et de l'expérience. Pour cela, nous allons débiter avec l'aide de Marcel Prot et de son ouvrage *essai sur la signification du langage de la géométrie*. Ainsi, une des solutions serait de dire comme Einstein, que si la géométrie est vraie alors elle ne parle pas de la réalité mais si elle parle de la réalité alors elle n'est pas certaine. C'est une façon de dire que si la géométrie est synthétique alors elle est *a posteriori* et si elle est *a priori* alors elle est analytique. Cette conception pourrait être partagée à la fois par Carnap et Cassirer. En effet, si cela semble être évident pour Carnap car il emploie lui aussi cette démarcation comme nous l'avons vu, Cassirer pourrait lui aussi s'accorder avec cela car dire cela revient à accepter la partie idéale de la géométrie. Et finalement, accepter cela, c'est consentir au fait que les axiomes de la géométrie soient complètement vides de sens et doivent l'être impérativement. C'est ainsi trancher une ligne de démarcation très nette entre la géométrie pure et la géométrie pratique. Donc, si « la géométrie pure peut constituer des propositions qui sont vérifiées par des corps réels, il faut la dépouiller de son caractère logique et en faire une géométrie pratique »³¹. Il est un fait que la géométrie nous permet de faire de nombreuses opérations sur le réel, mais pour faire cela, il est indispensable de

vider la géométrie de sa validité formelle d'après Einstein. La césure est donc considérable, d'un côté la géométrie pure fondée par des axiomes vides de tout sens et de l'autre la géométrie pratique vidée de la perfection logique et formelle de la géométrie pure. Pourtant, comme nous venons de le mentionner, la géométrie nous permet de faire tant de choses dans le réel. Cette conception dualiste de la géométrie nous amène donc à poser cette question, pourquoi est-ce si naturel que les propositions de la géométrie soient vérifiées par les corps réels, pourquoi la géométrie retourne si facilement vers la réalité ? Prot y apporte cette réponse intéressante, « c'est tout simplement parce qu'elle en sort. »³².

Il est important de voir maintenant la signification profonde des conceptions positivistes et néo kantienne. En effet, ces deux conceptions s'opposent finalement et ce à la vue de ce que nous avons montré sur la primauté de l'expérience pour les positivistes et de la connaissance *a priori* pour les néo kantien. Il va donc être intéressant de voir s'il est possible de trouver à travers les fondements de la géométrie une réponse et ainsi savoir qui de l'expérience ou de la connaissance *a priori* est le socle du processus de connaissance.

7.1.2. Fondement de la géométrie

Reprenons pour débiter la phrase de M. Prot qui dit que si la géométrie correspond si bien aux phénomènes du monde, c'est parce qu'elle en sort. Ainsi, on pourrait dire que la géométrie est née afin de décrire et mesurer les corps solides, c'est-à-dire par l'arpenteur et l'architecte. On pourrait supposer que le commencement de la géométrie fut l'expérimentation avec « l'équerre, le cordeau et le fil à plomb »³³. Nous pouvons supposer encore que les philosophes aient fondé la géométrie en traçant des traits sur le sol et en essayant d'en tirer des enseignements. Mais une chose est sûre, l'expérience joue un rôle cruciale dans le fondement de la géométrie sans pour cela dire qu'elle en est l'unique fondement. Ainsi, le concept de ligne droite aura été formé à partir de la ligne de visée de l'architecte et ainsi de suite. Dans ces temps anciens, la géométrie utilisée par l'arpenteur ou l'architecte était fondée sur des mesures concrètes et cela suffisait

³¹ M. Prot, *Essai sur la signification du langage de la géométrie*, deuxième partie chapitre I.

³² Idem.

³³ F. Gonseth, *les fondements des mathématiques*, Chap VII, § 30.

parfaitement aux besoins des premiers géomètres. Mais il suffit d'ajouter à cela un physicien qui lui veut accroître son savoir ainsi que des instruments de mesure plus précis afin d'aller plus loin dans la connaissance du monde pour compromettre l'accord si parfait que l'on pouvait obtenir entre la théorie et les faits. En effet, avec des instruments plus précis, on aperçoit aisément que la correspondance entre théorie et réalité n'est plus que de papier. On découvre alors les corps solides comme très imparfaits et très variés. Il est donc à partir de là nécessaire de chercher à faire des corrections afin de retrouver le temps d'un instant abstrait « le modèle géométrique primitif »³⁴. Modèle qui rappelle le provient essentiellement de l'expérimentation des relations géométriques des objets physiques. Il est bien sûr évident qu'un travail d'abstraction a été nécessaire même à cette époque mais ce travail d'abstraction doit être vu comme une analyse de l'impression visuelle du souvenir de la ligne ou bien d'autres choses. Mais avec l'apparition des mesures précises et de la compréhension du monde physique comme variable et imparfait, on voit aussi l'arrivée de la géométrie pure, créée pour corriger l'imperfection tout juste démontré du monde des corps solides. Par la suite, on voit qu'il est impossible de séparer ces deux conceptions de la géométrie, car elles ont besoin d'un noyau abstrait comme certaines plantes ont besoin d'un tuteur pour s'élever. Il n'y a donc pas de géométrie expérimentale indépendante de l'abstraction d'une théorie qu'on a rendue idéale justement pour palier l'imperfection et la variabilité du monde physique. Mais à l'inverse, la géométrie pure n'a pas non plus d'existence indépendante car elle n'est que le support correcteur, le tuteur de la géométrie expérimentale.

7.1.3. Conséquence sur les arguments positiviste et néo kantien

Voilà pourquoi on ne peut décemment pas adhérer à l'idée d'une géométrie comme connaissance *a priori* qui nous condamnerait à supposer la géométrie euclidienne comme vraie et ce même en rétorquant que les modèles géométriques ne sont que des outils méthodologiques. Mais il en va aussi de même pour ceux qui croient que l'axiomatique moderne permet de débarrasser la formidable perfection

³⁴ F. Gonseth, *les fondements des mathématiques*, Chap VII, § 30.

logique et formelle de la géométrie de tout son sens car cela donne alors raison à Cassirer. Les axiomes de la géométrie ont un sens et cela même s'il est lointain et très tenu, car si les axiomes n'avaient rien à voir avec le monde physique, alors nous pourrions les exprimer avec des mots tout aussi vide de sens physique or ce n'est pas le cas, même en considérant des géométries non euclidiennes, on continue à faire des droites, des points et des triangles qui sont tous des concepts que l'on a extrait du monde physique. Pour résumer, on pourrait citer que « la distinction entre l'abstrait et l'expérimental n'est que de tendances, mais non d'essence. »³⁵. Voilà pourquoi il est important de noter que si l'on accepte la séparation entre géométrie physique et géométrie pure comme Carnap et que l'on justifie cela par l'axiomatique moderne comme Einstein, alors il est bien impossible de réfuter la justesse de l'argument de Cassirer en faveur du non sens de la géométrie appliquée à la théorie de la relativité. Voilà donc pourquoi il est indispensable de faire appel au fondement de la géométrie afin d'atténuer autant que possible la séparation entre géométrie pure et géométrie physique. Si donc nous arrêtons la notre investigation, alors a ce point de la discussion, il semble que la vision de Cassirer soit la plus tenable, ce qui reviendrait à dire que la réponse à notre question principale, à savoir si la théorie de la relativité puisse être une théorie réaliste décrivant le monde physique tel qu'il est vraiment soit négative. Pourtant, nous voulons croire que c'est bien le cas ou du moins que la conception de Cassirer soit vraiment trop anti réaliste. Voyons donc s'il nous est possible de construire quelque chose qui aille dans ce sens et cela maintenant que l'on a résolu le problème de la démarcation entre géométrie pure et géométrie physique.

7.2. Ce que l'on peut dire de la géométrie non euclidienne dans la théorie de la relativité à la vue des analyses effectuées

7.2.1. La direction à prendre en ce qui concerne la conception réaliste de la théorie de la relativité

Après avoir marqué le fait que la conception dualiste de la géométrie des positivistes nous menait à accepter la conception non réaliste de Cassirer et cela

³⁵ F. Gonseth, *les fondements des mathématiques*, Chap VII, § 31.

bien qu'elle fut construite pour appuyer la conception positiviste. Nous voulons pourtant croire en une vision positiviste et réaliste de la théorie de la relativité mais il va falloir pour cela pousser l'examen un peu plus loin. Au final, le problème tourne donc autour de l'interprétation et de l'acceptation intuitive des géométries non euclidiennes. Il va donc falloir finalement essayer de répondre directement à ce dilemme. On a montré que la géométrie devait garder un lien unitaire entre sa partie expérimentale et sa partie abstraite car rien n'allait sans l'autre. Nous avons aussi montré que la géométrie prenait ses fondements dans l'expérience, et même si pour cela il faut dire que la connaissance *a priori* de l'espace dont parle les kantien et en fait une sorte de patrimoine génétique acquis par les générations passées sur la base de l'expérience. Il est maintenant temps de faire entrer en scène ce qui rend possible l'expérience des sens, le corps. Et c'est en effet par le corps que nous voulons montrer que la géométrie non euclidienne et donc la théorie de la relativité peut être considérée comme une théorie réaliste.

7.2.2. Ce qui va nous permettre de justifier ce choix

Afin de continuer, il va nous falloir admettre la proposition qui veut que notre connaissance du monde physique est limitée par notre capacité et nos moyens à expérimenter le réel et ce peut importe l'existence ou non d'une connaissance *a priori* et peut importe son contenu si de telles connaissances existent. Le fait est que peut importe les connaissances *a priori* que vous pouvez avoir, sans aucun moyen d'expérimenter le réel, aucune connaissance sur celui-ci ne pourra jamais en sortir. Nous avons besoin d'un minimum de ces moyens pour pouvoir extrapoler de cela une connaissance quelconque sur le monde physique. Ces moyens dont nous disposons sont bien évidemment constitués par notre corps, ou plus précisément nos sens. Ainsi, il est clair que notre condition humaine et charnelle est une limite à notre capacité d'expérimentation du monde physique. Il nous ait par exemple impossible de percevoir tout le spectre des ondes électro magnétiques mais en extrapolant ou de manière indirect, il nous est possible d'acquérir une connaissance du spectre complet. L'autre point capital qui explique cela est que notre condition humaine et ainsi nos moyens d'expérimenter le monde physique sont ceux qu'ils sont car ils n'ont pas un but de connaissance mais bien de survie de l'espèce. On peut trouver cette conception dans le débat matérialiste et idéaliste. C'est par exemple Descartes,

«(...) je vois que, tant en ceci qu'en plusieurs autres choses semblables, j'ai accoutumé de pervertir et confondre l'ordre de la nature, parce que ces sentiments ou perceptions des sens n'ayant été mises en moi que pour signifier à mon esprit quelles choses sont convenables ou nuisibles au composé dont il est partie, et jusque-là étant assez claires et distinctes, je m'en sers comme si elles étaient des règles très certaines(...) »³⁶. On trouve aussi cette idée plus clairement encore chez Locke, « Car nos facultés ne sont pas adaptées à l'entier domaine de l'être ni à une connaissance parfaite, claire et étendue des choses, à une connaissance libre de tout doute et de toute réserve, mais à la conservation de l'être (nous) en qui elles sont et aux usages de la vie. »³⁷. L'intérêt est donc de comprendre que notre condition humaine est limitée dans la connaissance par notre capacité à expérimenter le monde physique par nos sens car ces sens sont là non pour nous apporter la connaissance du monde mais pour nous permettre d'avoir une connaissance dans le but de survivre au monde physique.

Ainsi, à la lumière de cette idée, nous allons pouvoir comprendre pourquoi la géométrie euclidienne nous semble si juste. En effet, notre condition humaine semble prendre place dans un monde parfaitement euclidien. Mais pourquoi serions-nous capable de percevoir le monde de façon non euclidienne, quel intérêt l'espèce pourrait-elle en tirer. Si les kantien nous disaient que notre condition humaine reste euclidienne, et bien soit, qu'elle soit euclidienne, peut importe. Si notre intuition reste euclidienne, ce n'est pas pour nous montrer que le monde physique l'est aussi. Et même s'il nous semble contre nature d'accepter les géométries non euclidiennes, il n'en ait rien, le rôle de l'intuition doit être relativisé dans le sens ou plus la science avance et plus la science sort du contexte anthropomorphique dont elle a émergé. Ainsi, bien au contraire, on peut faire le pari que le fait que la géométrie non euclidienne sorte de notre intuition et donc de notre condition humaine soit un gage de plus d'objectivité dans la connaissance. La théorie de la relativité peut donc être considérée comme une théorie réaliste dans le sens où la théorie n'a pas besoin que l'intuition lui donne son accord pour être une représentation acceptable pour les raisons évoquées précédemment. Il n'est pas ici question de dire que la théorie de la relativité est la théorie ultime et que la science a achevé son œuvre avec elle mais bien qu'elle peut être interpréter comme une théorie réaliste car les géométries non

³⁶ R. Descartes, *Méditations métaphysiques*, méditation sixième.

³⁷ J. Locke, *Essai sur l'entendement humain*, IV, 2, §14.

euclidiennes peuvent être comme nous l'avons montrées un support au sens réaliste du monde physique.

CONCLUSION

Pour conclure, nous allons rappeler les étapes de la démonstration qui nous a amenée jusqu'ici. Nous avons ainsi débuté par expliquer la théorie de la relativité restreinte, qui repose principalement sur les lois de contraction et dilatation des longueurs et du temps entre différents référentiels en mouvement les uns par rapports aux autres. Après cela, il est apparu que la théorie de la relativité restreinte ne rendait compte que d'un certain type de mouvement. Voilà pourquoi nous avons ensuite introduit les géométries non euclidiennes qui vont être le support d'une théorie générale de la relativité. Théorie qui prend forme comme théorie gravitationnelle qui veut que la matière courbe, gauchie l'univers à son voisinage. Après avoir vu cette conception scientifique nous nous sommes proposés de voir quelle influence cela pourrait avoir sur le monde philosophique. Nous avons donc rappelé le lien qui unit Newton et Kant. Ce qui nous a permis de constater que la conception kantienne de l'espace et du temps divergeait en plusieurs points avec la théorie de la relativité. En effet, la pensée kantienne semblait incompatible avec la notion de géométrie non euclidienne, surtout si celle-ci est appliquée pour rendre compte du monde physique. Ensuite nous avons vu que la pensée kantienne avait un avenir scindé en deux, d'un côté avec les positivistes qui voulaient dépasser la pensée kantienne et de l'autre côté les néo kantien qui voulaient conserver la pensée kantienne en la transformant. Nous avons donc vu les différents arguments de Poincaré, Carnap et Cassirer. Poincaré, qui représente ici le pré débat n'ayant pas connu l'avènement de la théorie généralisée de la relativité va montrer que le choix entre les géométries devrait être fait sur la base conventionnelle de la simplicité. Ce qui signifie pour lui que la géométrie euclidienne sera toujours celle favorisée par les physiciens car plus simple. Ensuite nous avons vu comment Carnap pensait lui que la géométrie non euclidienne, qui a finalement été choisie par Einstein contrairement au choix de Poincaré était un choix que l'on pouvait soutenir et cela en marquant la différence entre géométrie physique et géométrie pure. On a vu ensuite que Cassirer parvenait à inclure les géométries non euclidiennes dans le

système kantien tout en montrant que la théorie de la relativité par l'emploi des géométries non euclidiennes enlevait tout sens et toute objectivité à l'espace, laissant les positivistes dans le désarroi. Nous avons ensuite fait appel au fondement des mathématiques et plus particulièrement à ceux de la géométrie pour montrer que la séparation entre géométrie pure et géométrie physique était une erreur des positivistes, leur adhésion à l'axiomatique moderne les éloignant des fondements de la géométrie. Cela nous permettant enfin de montrer par le corps que les géométries euclidiennes pouvaient servir de base à la théorie de la relativité et ainsi donner une interprétation réaliste du monde physique par ce biais.

Mais finalement, le point important reste celui de bien comprendre que la science apporte incessamment de nouvelles données et théories sur le monde dans lequel nous vivons. Et que l'on soit idéaliste ou positiviste ou quelque part entre les deux, il est capitale en tant que philosophe de s'intéresser à ce que la science nous offre. L'exemple de la théorie de la relativité est un excellent exemple de questionnement de la pensée kantienne pourtant le nombre de personnes en ayant connaissance est très restreint et cela est regrettable.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bibliographie

G. BACHELARD, *La valeur inductive de la relativité*, Paris : J. Vrin, 1929.

H. BERGSON, *Durée et simultanéité : à propos de la théorie d'Einstein*, 7e édition, Paris : Presses universitaires de France, 1968.

R. CARNAP, *Les Fondements philosophiques de la physique*, trad. de l'anglais par Jean-Mathieu Luccioni et Antonia Soulez, Paris : A. Colin, 1973.

E. CASSIRER, *Substance and function and Einstein's theory of relativity*, trad. de l'allemand par William Curtis Swabey et Marie Collins Swabey, New York, Dover publication, 2003.

E. MEYERSON, *La déduction relativiste*, Paris : Payot, 1925.

H. REINCHENBACH, *The philosophy of space & time*, trad. de l'allemand par Maria Reichenbach, New York, Dover publication, 1958.

The theory of relativity and a priori knowledge, trad. de l'allemand par Maria Reichenbach, Berkeley, University of California press, 1965.

axiomatization of the theory of relativity, trad. de l'allemand par Maria Reichenbach, Berkeley, University of California press, 1969.

M. SCHLICK, *Space and time in contemporary physics, an introduction of the theory of relativity and gravitation*, trad. de l'allemand par Henry L. Brose, Oxford, Clarendon press, 1920.

2. Référence bibliographiques

a. Usuels

E. KLEIN et M. SPIRO, *Le temps et sa flèche*, actes du colloque organisé par la Société française de physique, Division Champs et Particules, à Paris le 8 décembre 1993, Paris : Flammarion, 1996.

H. REINCHENBACH, *The direction of time*, n°10 de « university of California press », Los Angeles, 1956.

b. Littérature secondaire

F. BALIBAR, *Galilée, Newton lus par Einstein : espace et relativité*, 2^e édition, Paris : Presses universitaires de France, 1986.

L. BEUDIN, *Espace et matière : la véritable nature des données fondamentales*, Paris : la Pensée universelle, 1982.

K. BOUZOUBAA FENNANE, *De l'Interprétation logique des géométries non euclidiennes : vers une représentation multiple de l'espace*, [S.l.] : [s.n.], 1986.

O. COSTA DE BEAUREGARD, *La théorie physique et la notion de temps*, Paris, 1963.

Le second principe de la science et du temps, Paris, 1968.

La Notion de temps : équivalence avec l'espace, Paris : J. Vrin, 1983.

A. EDDINGTON, *Space, time and gravitation : an outline of the general relativity theory*, Cambridge, The University press 1920.

Espace, temps et gravitation : la théorie de la relativité généralisée dans ses grandes lignes : exposé rationnel, suivi d'une étude mathématique de la théorie, ouvrage traduit de l'anglais par J. Rossignol, avec une introduction de P. Langevin, Paris : J. Hermann, 1921.

The theory of relativity and its influence on scientific thought, Oxford : The Clarendon press, 1922.

The philosophy of physical science, Cambridge, The University press, 1939.

The nature of the physical world, London, Dent, 1955.

A. EINSTEIN, *La Relativité : La Théorie de la relativité restreinte et générale*, trad. De l'allemand par Maurice Solovine, Paris : Payot, 1964.

L'Éther et la théorie de la relativité : La Géométrie et l'expérience, trad. De l'allemand par Maurice Solovine. 3^e édition, Paris : Gauthier-Villars, 1964.

Correspondance 1916-1955, échangée par Albert Einstein, Max Born, Hedwig Born, commentée par Max Born, introd. de Lord Bertrand Russell, préf. De Werner Heisenberg, trad. De l'allemand par Pierre Leccia, Paris : Ed. du Seuil, cop. 1972.

Conceptions scientifiques, trad. De l'anglais par Maurice Solovine, rev. Et complétée par Daniel Fargue, Flammarion, 1990.

A. EINSTEIN et L. INFELD, *L'Évolution des idées en physique : des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta*, trad. De l'anglais par Maurice Solovine, Paris : Flammarion, 1948.

B. D' ESPAG'A, *Traité de physique et de philosophie*, Paris, Fayard, 2002.

EUCLIDE, *Les éléments*, trad. et commentaires [établis à partir de l'édition de J. L. Heiberg] Bernard Vitrac, introduction générale par Maurice Caveing, Paris : Presses universitaires de France, 1990.

M. GHINS, *L'inertie et l'espace-temps absolu de Newton à Einstein : une analyse philosophique*, Bruxelles : Palais des académies, 1990.

F. GONSETH, *Les fondements des mathématiques : de la géométrie d'Euclide à la relativité générale et à l'intuitionnisme*, Paris : Librairie scientifique et technique A. Blanchard, 1974.

G.-G. GRANGER, *La pensée de l'espace* Paris : Odile Jacob, 1999.

J. GRAY, János Bolyai, *non-Euclidean geometry, and the nature of space*, Cambridge, Mass. : Harvard Library, 2004.

W. HEISENBERG, *Physique et philosophie : la science moderne en révolution*, trad. de l'anglais par Jacqueline Hadamard, Paris : Armand Colin, 1971.

L. LAUDAN, *Science and relativism : some key controversies in the philosophy of science*, Chicago, University of Chicago press, 1990.

H. MARAIS, *introduction géométrique à l'étude de la relativité*, Paris, Gauthier-Villard, 1923.

J. MERLEAU-PONTY, *Cosmologie du XXe siècle : étude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris : Gallimard, 1966.

La Science de l'univers à l'âge du positivisme : étude sur les origines de la cosmologie contemporaine, Paris : J. Vrin, 1983.

C. NORDMANN, *Einstein et l'univers : une quête dans le mystère des choses*, Paris : Hachette, cop. 1921.

D. PARROCHIA, *Les grandes révolutions scientifiques du XXe siècle*, Paris, Presses universitaires de France, 1997.

M. PATY, *Einstein philosophe : la physique comme pratique philosophique*, Paris : Presses universitaires de France, 1993.

M. PROT, *Essai sur la signification du langage de la géométrie*, Paris : Hermann, 1940.

H. SIEGEL, *Relativism refuted : a critique of contemporary epistemological relativism*, Dordrecht : D. Reidel, 1987.

E.F. TAYLOR et J.A. WHEELER, *A la découverte de l'espace-temps*, trad. De l'anglais par C. Roux, Dunod, Paris, 1970.

R. WALLIS, *Le temps, quatrième dimension de l'esprit, étude de la fonction temporelle de l'homme du point de vue physique, biologique et métaphysique*, Préface de O. Costa de Beauregard, Paris, Flammarion, 1966.

G. ZUKAV, *La Danse des éléments : un s rvol de la nouvelle physique*, traduit de l'améric'in par Gérard Klein, Paris : R. L ffont, 1982.

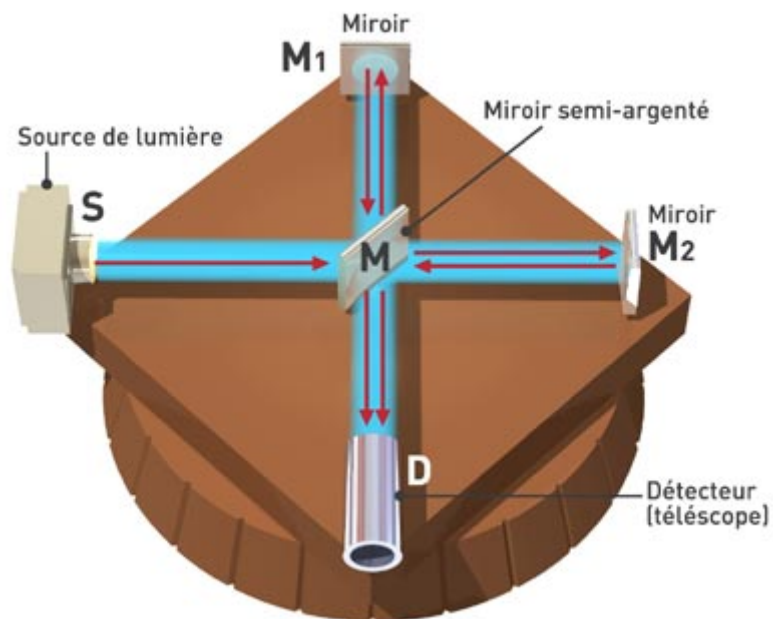
TABLES DES ANNEXES

ANNEXE N° 1 : L'EXPERIENCE DE MICHELSON ET MORLEY	81
---	----

ANNEXE N° 1 : L'expérience de Michelson et Morley

1. Dispositif

On part d'une source de lumière monochromatique S, c'est-à-dire que l'onde lumineuse n'est constituée que d'une seule fréquence, nous verrons ensuite pourquoi. Le rayon lumineux issu de cette source rencontre ensuite un miroir semi argenté M qui a pour effet de laisser passer une partie du rayon jusqu'au miroir M₂ et de réfléchir l'autre perpendiculairement vers le miroir M₁. Ensuite les deux rayons sont renvoyés sur M, celui venant de M₂ est réfléchi perpendiculairement vers le télescope D et le rayon venant de M₁ traverse le miroir M pour arriver lui aussi sur D.



2. Termes de l'expérience

L'expérience prend en compte que la terre se déplace à la vitesse de 30km/s lors de sa rotation autour du soleil. Le dispositif expérimental est orienté de façon à ce que le vecteur vitesse du déplacement de la terre soit aligné avec l'axe S-M₂. C'est dans cet alignement que tiens tout l'intérêt de l'expérience. Pour faire simple, on dira que le rayon qui passe par M₂ devrait mettre moins de temps que celui qui passe par M₁ avant d'arriver sur D car il est aligné avec le vecteur vitesse de la terre et donc, selon la loi d'addition des vitesses de la mécanique classique devrait arriver plus vite. Ce léger décalage de vitesse devrait nécessairement provoquer des interférences visibles sur D. C'est dans ce but qu'une source monochromatique a été choisie, afin de pouvoir observer des interférences correspondant au déphasage d'une seule et même fréquence.

3. Résultats de l'expérience

Malheureusement pour Maxwell, ce déphasage escompter n'aura jamais lieu. Les deux rayons se rejoignent en D simultanément et donc en phase, ce qui signifie que les deux rayons mettent le même temps pour parcourir une distance différente et le tout à la même vitesse ! Juste de quoi laisser libre cours à l'imagination de Lorentz pour expliquer ce phénomène.

TABLES DES PLANCHES

PLANCHE N° 1.....	84
PLANCHE N° 2.....	85
PLANCHE N° 3.....	86

PLANCHE N° 1

Image 1A :

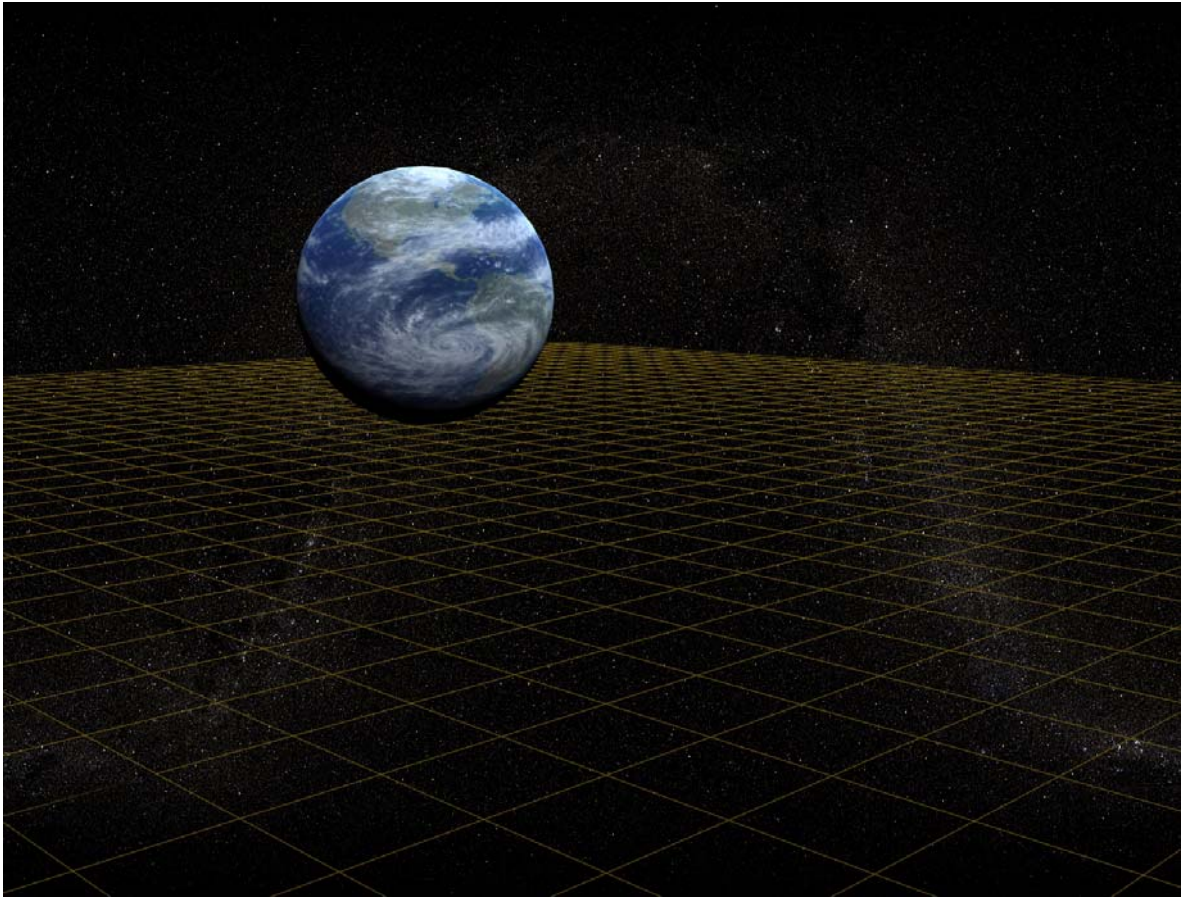


PLANCHE N° 2

Image 2A :

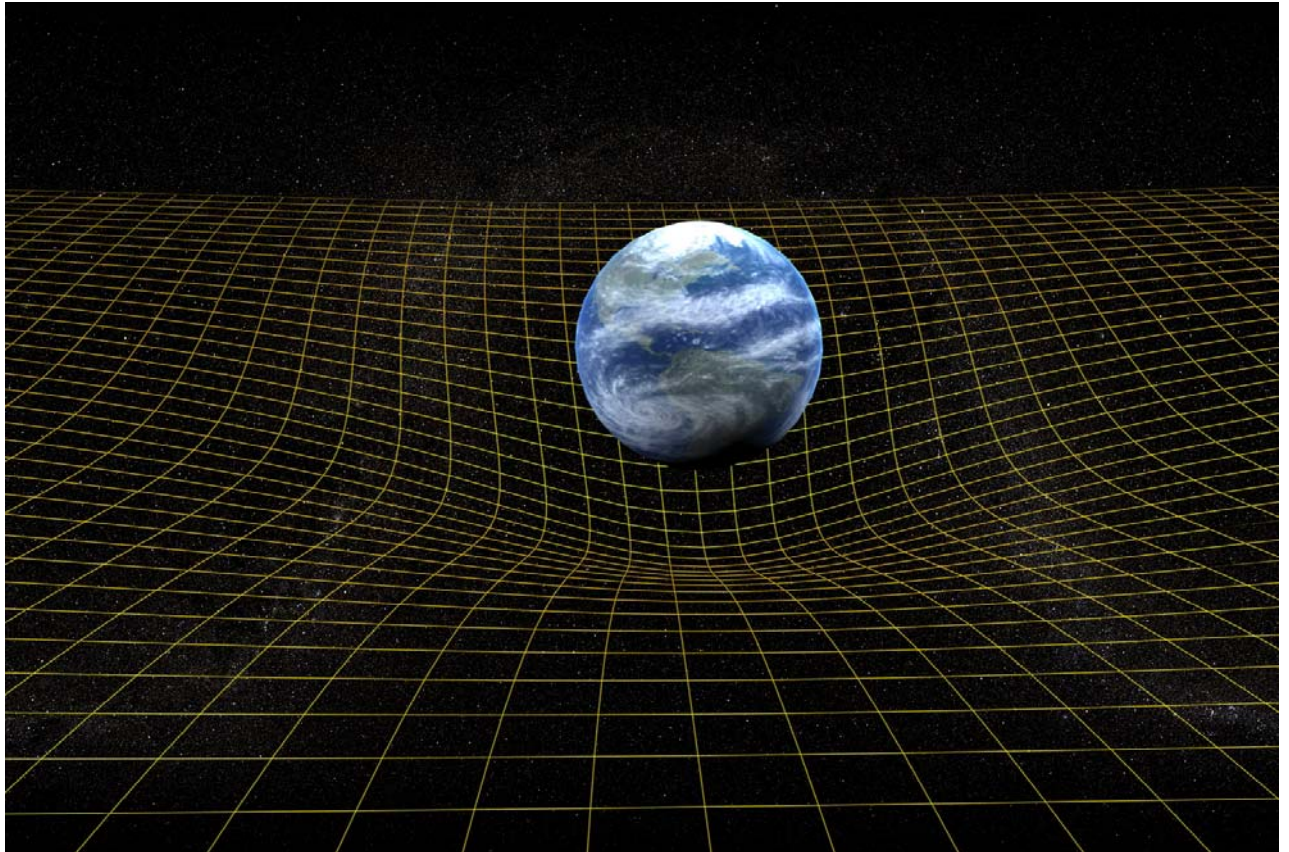


Image 2B :

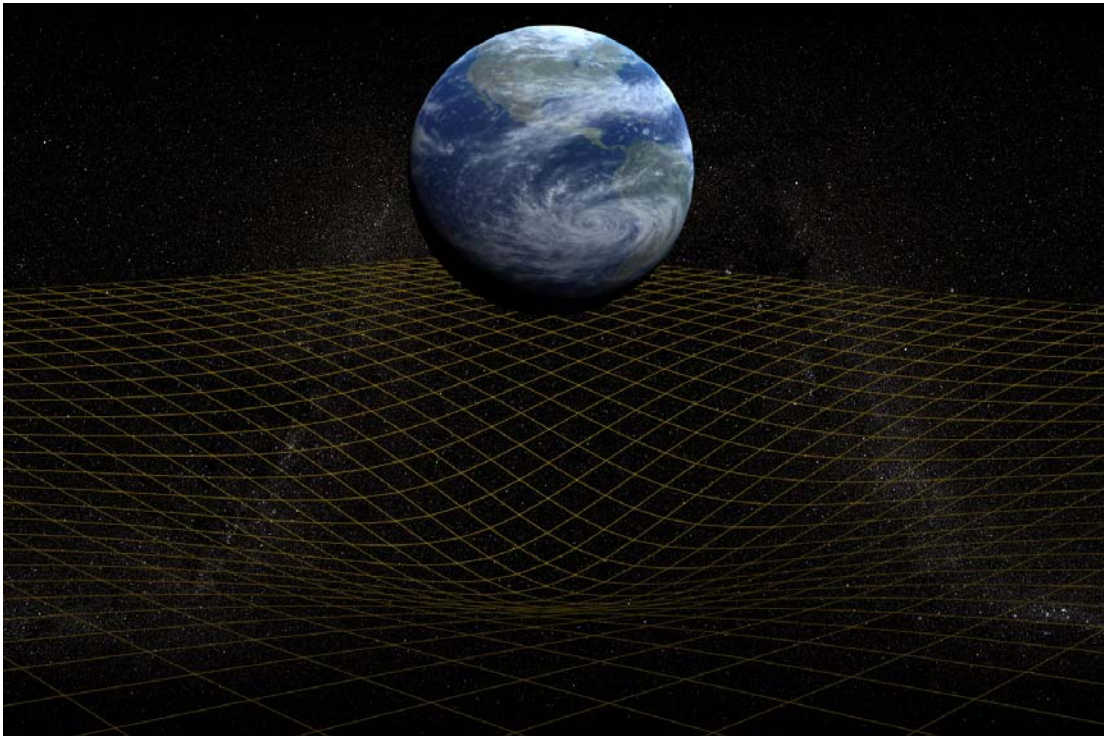


Image 2C :

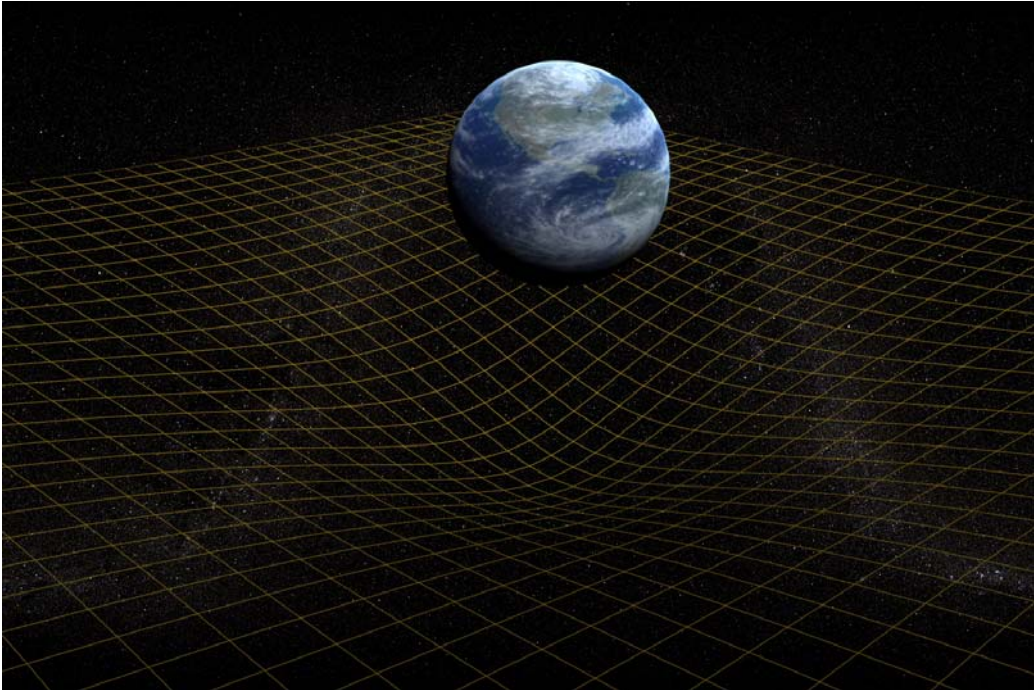


PLANCHE N° 3

Image 3A :

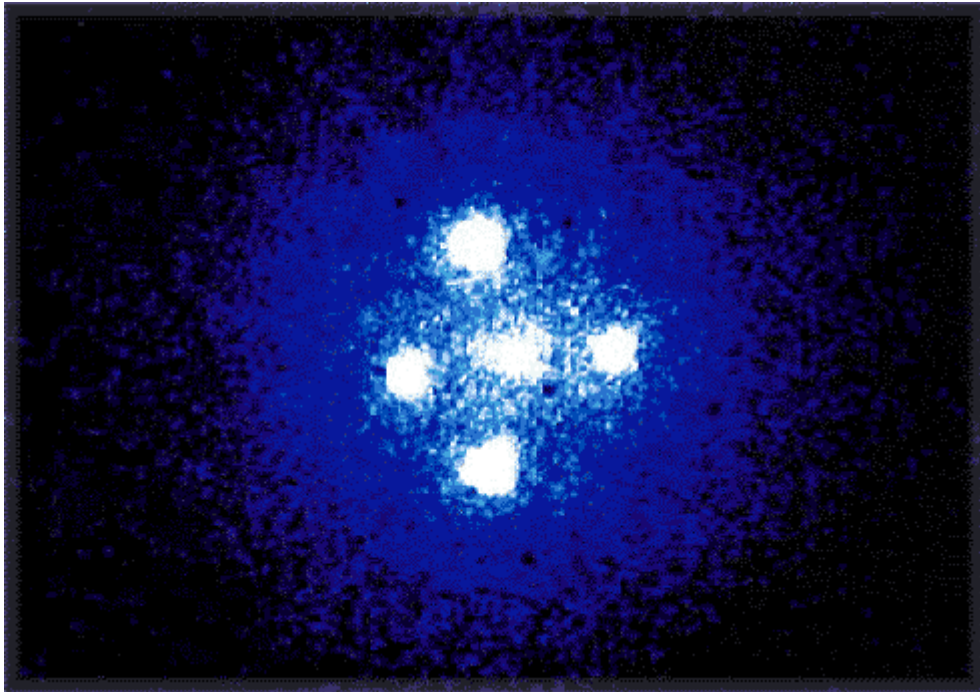


Image 3B :



MOTS CLÉS : relativité, géométrie, physique, espace, temps

RÉSUMÉ

Le présent travail essaie de montrer les possibilités d'interprétation des géométries non euclidiennes dans la théorie de la relativité d'Albert Einstein. Ceci en s'appuyant sur le débat entre réalisme et idéalisme du cercle de Vienne et des néo kantien. Il est aussi ici une grande place sur le sujet du synthétique *a priori* kantien.