Comprendre Einstein

Chez le même éditeur :

- *Comprendre l'hindouisme*, Alexandre Astier
- *Petite histoire de l'Inde*, Alexandre Astier
- *Les maîtres spirituels de l'hindouisme*, Alexandre Astier
- *Communiquer en arabe maghrébin*, Yasmina Bassaïne et Dimitri Kijek
- *QCM de culture générale*, Pierre Biélande
- *Le christianisme*, Claude-Henry du Bord
- *La philosophie tout simplement*, Claude-Henry du Bord
- *Comprendre la physique*, Frédéric Borel
- *Marx et le marxisme*, Jean-Yves Calvez
- *Comprendre le catholicisme*, Jean-Yves Calvez, Philippe Lécrivain
- *L'histoire de France tout simplement*, Michelle Fayet
- *Comprendre l'ésotérisme*, Jean-Marc Font
- *Citations de culture générale expliquées*, Jean-François Guédon et Hélène Sorez
- *Psychologie de base*, Ghéorghiï Grigorieff
- *QCM Histoire de France*, Nathan Grigorieff
- *Citations latines expliquées*, Nathan Grigorieff
- *Philo de base*, Vladimir Grigorieff
- *Religions du monde entier*, Vladimir Grigorieff
- *Les philosophies orientales*, Vladimir Grigorieff
- *Les mythologies tout simplement*, Sabine Jourdain
- *Comprendre les crises financières*, Olivier Lacoste
- *Découvrir la psychanalyse*, Édith Lecourt
- *L'histoire des civilisations tout simplement*, Éliane Lopez
- *Comprendre l'islam*, Quentin Ludwig
- *Comprendre le judaïsme*, Quentin Ludwig
- *Comprendre la kabbale*, Quentin Ludwig
- *Le bouddhisme*, Quentin Ludwig
- *Les religions tout simplement*, Quentin Ludwig
- *La littérature française tout simplement*, Nicole Masson
- *Dictionnaire des symboles*, Miguel Mennig
- *Histoire du Moyen Âge*, Madeleine Michaux
- *Histoire de la Renaissance*, Marie-Anne Michaux
- *Les mots-clés de la géographie*, Madeleine Michaux
- *La culture générale tout simplement*, Madeleine Michaux
- *Découvrir la philosophie antique*, Cyril Morana et Eric Oudin
- *Chopin*, Sylvie Oussenko
- *L'opéra tout simplement*, Sylvie Oussenko
- *Découvrir la franc-maçonnerie*, Alain Quéruel
- *Citations philosophiques expliquées*, Florence Perrin et Alexis Rosenbaum
- *L'Europe*, Tania Régin
- *200 femmes de l'histoire*, Yannick Resch
- *Citations historiques expliquées*, Jean-Paul Roig
- *Histoire du XXème siècle*, Dominique Sarciaux
- *QCM d'économie*, Marion Stuchlik et Jean-François Guédon
- *QCM Histoire de l'art*, David Thomisse
- *Comprendre le protestantisme*, Geoffroy de Turckheim
- *Petite histoire de la Chine*, Xavier Walter

Guy Louis-Gavet

Comprendre Einstein

EYROLLES

Éditions Eyrolles
61, Bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Du même auteur :

- *Sachez maîtriser votre informatique et son budget*, Editions LGE, 1990 - 350 pages
- *Quelle Base de Données devez-vous choisir pour votre entreprise*, Editions LGE, 1992 – 302 pages
- *Comment construire pratiquement un Réseau de Micro-Ordinateurs dans votre entreprise*, Editions LGE, 1993 - 200 pages
- *Comprendre les concepts de la programmation Objets. Applications dans votre entreprise*, Editions LGE, 1993 - 120 pages
- *Tout savoir sur INTERNET et INTRANET. Comment les implanter dans votre entreprise*, Editions LGE, 1997 - 190 pages
- *La Sécurité et INTERNET. Comment votre entreprise peut-elle se protéger et à quel coût*, Editions LGE, 2000 - 70 pages

Mise en pages : Istria

Illustrations : Hung Ho Thanh

ISBN : 978-2-212-54404-6

Sommaire

À tous ceux qui veulent comprendre le monde moderne dans lequel nous vivons.

Et, plus particulièrement :

à ma famille,

à Grégoire et Alexia nés en ce début de XXIe siècle.

Préambule

Si vous feuilletez un dictionnaire des noms propres à la recherche de savants connus, à la lettre E, vous lirez, entre Edison et Eisenhower : « Einstein, Albert, physicien allemand, né à Ulm en 1879, naturalisé suisse en 1901, puis américain en 1940, mort à Princeton aux États-Unis en 1955. »

Cette présentation lapidaire cache une immense œuvre scientifique qui a complètement bouleversé le paysage scientifique du XXe siècle. Elle s'est réalisée aussi bien dans l'infiniment petit (atomes, composition de la lumière, effet photoélectrique...) que dans l'infiniment grand (gravitation, structure de l'univers, cosmologie...) et a permis d'améliorer fondamentalement notre vie quotidienne. En effet, l'énergie nucléaire, l'électronique, les cellules photoélectriques, l'informatique, les horloges atomiques, l'IRM, le laser, le four à micro-ondes, le GPS, sont autant de grandes découvertes du XXe siècle qui trouvent, directement ou indirectement, leur origine dans les théories scientifiques élaborées par Albert Einstein.

La physique à l'aube du XXe siècle

En 1900, quand Einstein commence ses recherches, les siècles précédents ont accouché d'une physique tellement solide qu'aucun scientifique ne songe à la remettre en cause. Elle comporte trois grands courants qui expliquent parfaitement l'ensemble des phénomènes perçus aussi bien sur Terre que dans le proche univers qui l'entoure.

Le premier, le plus ancien, qui trouve sa source dans la physique galiléenne (vieille de trois siècles), concerne l'étude des corps en mouvement et des forces à l'origine de ce mouvement. La compréhension des trajectoires des planètes soumises aux forces gravitationnelles d'**Isaac Newton (1642-1727)** en est un très bon exemple.

Le deuxième englobe tous les phénomènes ondulatoires auxquels sont assujettis, par exemple, l'électricité, le son, ou tout simplement les mouvements de la surface de l'eau sous l'action du vent.

Le troisième implique les phénomènes physiques liés aux transferts de la chaleur, expliqués dans le contexte de la thermodynamique (littéralement « chaleur en mouvement »).

Cette physique, appelée classique, est à son apogée. Elle représente pour tout chercheur, au sens presque religieux du terme, les tables de la loi scientifique que personne ne peut ou n'ose remettre en cause. Einstein, qui se tient à distance de ce conservatisme et ne réclame rien aux tenants du savoir scientifique de l'époque (il n'est pas universitaire et ne travaille pas dans un laboratoire scientifique), apparaît comme un révolutionnaire, qui n'hésitera pas à dynamiter cette institution. Il construira sur ses ruines, en s'appuyant le plus souvent sur des hypothèses scientifiques très audacieuses, deux nouvelles physiques, réduisant ainsi à des cas particuliers les théories jadis intouchables de **James Clerk Maxwell (1831-1879)** et de Newton.

Si Einstein, dont les études universitaires n'ont pas été brillantes, a pu réaliser cet exploit unique dans l'histoire des sciences, c'est parce qu'il a eu le génie de découvrir que la physique classique comportait d'étonnantes failles – et s'y est engouffré. Inconnues sous **Galilée** et Newton, très minces au début du XIXe siècle, ces failles se mirent ensuite à grandir démesurément. Dans la seconde moitié du XIXe siècle et au début du XXe, les savants découvrent peu à peu d'étranges phénomènes qu'ils ne parviennent pas, malgré tous leurs efforts, à expliquer dans le cadre des lois de cette physique plusieurs fois centenaire. Dans le ciel, on s'aperçoit que la trajectoire de la planète Mercure n'est pas tout à fait conforme à la loi de Newton. Sur Terre, il se passe des choses très étranges : la lumière, que tout le monde croyait instantanée, semble avoir une vitesse limitée. Autre constatation surprenante, certains indices montrent que parfois, la lumière se propage non pas de façon

continue, comme une onde, mais discontinue, par petits « paquets » baptisés *quanta* (pluriel du mot latin *quantum* signifiant « quantité »). Par ailleurs, les savants incrédules découvrent, grâce à des outils d'observation plus modernes, des phénomènes inexplicables dans le monde microscopique, dus au comportement étrange de petites particules non perceptibles à nos sens.

Voilà ce qu'Einstein exploitera, lui dont la principale chance est d'avoir été présent à cette période avec son imagination, son intuition géniale et son indépendance d'action (liberté inestimable, même à cette époque). Il parviendra en quelques années (de 1905 à 1915) à deux nouvelles théories physiques révolutionnaires : la physique relativiste (bâtie sur deux concepts différents mais complémentaires : la relativité restreinte et la relativité générale) et la mécanique quantique.

Dans sa théorie sur la relativité restreinte, en s'appuyant en grande partie sur les travaux de Galilée et du savant français **Henri Poincaré (1854-1912)**, il montre que le temps et l'espace, suivant la position de l'observateur, ne sont plus identiques, mais relatifs. Cette théorie généralisera celle sur l'électromagnétisme de Maxwell (unifiant l'électricité et le magnétisme) et sera à l'origine d'une nouvelle énergie, appelée plus tard nucléaire, exprimée par la très célèbre formule $E = mc^2$.

Quant à sa théorie sur la relativité générale, qui est une théorie relativiste de la gravitation, elle remplacera celle de Newton en démontrant que l'origine de la gravitation n'est pas du tout liée aux forces d'attraction censées influer sur le déplacement des astres, mais à la structure géométrique de l'univers.

En faisant le pari audacieux que la matière, à son niveau intime, est constituée d'atomes et peut être expliquée par l'utilisation d'outils statistiques, Einstein deviendra l'un des pères de la troublante mécanique quantique, théorie physique de l'infiniment petit.

Une vie privée mouvementée

La vie d'Einstein n'a pas suivi le cours d'un long fleuve tranquille. Subir les deux guerres les plus terribles de l'histoire humaine a été, pour lui comme pour tant d'autres, très traumatisant.

En quelques années, il fait d'incessants changements de poste, de fonction, de ville et même de pays. Sur une période de trente ans, il vivra successivement en Allemagne, en Italie, en Suisse, en Autriche, puis de nouveau en Allemagne et enfin aux États-Unis. Par ailleurs, il n'hésite pas à changer de nationalité : d'allemand, il devient apatride, prend ensuite la nationalité suisse puis, tout en la gardant, il reprend la nationalité allemande, qu'il reperd de nouveau pour enfin prendre définitivement la nationalité américaine. Son caractère naturel instable est renforcé par d'autres éléments.

D'abord, son ambition et son opportunisme. Ainsi n'hésite-t-il jamais à mettre en concurrence plusieurs universités pour obtenir un poste plus intéressant, aussi bien au niveau intellectuel que financier. Mais il n'est pas particulièrement attiré par l'argent ; il s'agit plutôt d'une sorte de revanche personnelle. En effet, il eut beaucoup de mal à se faire accepter par le monde universitaire et en garda longtemps une très grande amertume. Vers 1910, l'université ne l'admet que « contrainte et forcée », quand son génie devient trop évident, et après de multiples attaques personnelles qui, parfois, n'ont rien à voir avec sa valeur scientifique. Elles sont souvent teintées d'incompréhension, de jalousie et parfois même d'antisémitisme. Absurdité totale, on l'accuse même de faire de la « physique juive » !

Ensuite, il est à la fois allemand, antimilitariste et juif. Si être juif l'aide parfois (grâce à certaines relations familiales ou autres), c'est le plus souvent la source de graves ennuis personnels, notamment en Allemagne où il est sérieusement inquiété durant plusieurs années. Craignant pour sa vie, il s'expatrie définitivement aux États-Unis dès le début du régime hitlérien.

Enfin, bien qu'Einstein soit le plus souvent affable et souriant, il a un caractère têtu et entier qui l'empêche de dissimuler très longtemps ses vrais sentiments. Aussi tient-il parfois des propos abrupts et peu diplomatiques qui le desservent toujours, aussi bien dans son parcours de lycéen et d'universitaire que dans sa vie professionnelle.

Ces changements incessants de fonction, de nationalité et de ville ne pouvaient avoir que des effets néfastes sur le cours de sa vie privée, qui ne fut pas non plus un modèle de stabilité. Il eut toujours beaucoup de mal à concilier sa vie privée avec, d'une part, sa vie très prenante de

chercheur et, d'autre part, sa vie publique, quand sa célébrité s'étendit à toute l'Europe, puis au monde entier. Par la force des choses, ses activités professionnelles et publiques prirent peu à peu le pas sur sa vie familiale. Mais la trajectoire de sa carrière de chercheur fut toujours conforme aux objectifs qu'il s'était fixés.

Einstein en 1900

Il n'est pas tout de vouloir faire de la recherche dans un domaine déterminé, encore faut-il avoir des idées, des sujets qui s'y prêtent, des connaissances scientifiques suffisantes et une maîtrise satisfaisante de certains outils mathématiques. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, les purs mathématiciens étaient rares ; tout chercheur était généralement à la fois physicien et mathématicien. Il essayait d'abord de comprendre les phénomènes physiques par des expériences pratiques, puis il démontrait que celles-ci avaient une assise mathématique théorique. En un mot, il conceptualisait.

Dans ce contexte, Einstein occupe une place à part : il a été à la fois un expérimentateur pas très habile et un mathématicien plutôt moyen, du moins au début de ses recherches. Heureusement pour lui, son oncle Jacob l'avait initié, dès l'âge de douze ans, à la géométrie classique et à certains outils mathématiques de base. Ensuite, la lecture des cours d'ingénieur de ce même oncle et de certains ouvrages scientifiques lui permirent d'évoluer progressivement dans la connaissance des théories physiques et dans l'utilisation de la plupart des outils mathématiques connus en ce début du XXe siècle : la géométrie euclidienne avec son cortège de théorèmes, la description analytique des courbes (cercle, parabole, ellipse...), les probabilités et les lois statistiques s'y rattachant... En revanche, il ne connaissait pas certains concepts mathématiques importants qu'il sera obligé d'apprendre à maîtriser, dans la douleur, pour pouvoir développer sa théorie sur la relativité générale.

Ainsi, toute sa vie, Einstein se fera aider pour développer ses démonstrations mathématiques, bien souvent approximatives. Au début par sa femme **Mileva**, ensuite par ses amis Michele Besso et Marcel Grossmann, son professeur de mathématiques, Hermann Minkowski, et le renommé mathématicien David Hilbert. Puis, de 1915 jusqu'à la fin de

sa vie, plusieurs assistants mathématiciens se succéderont pour l'aider à mettre « en équations » la petite musique de chercheur solitaire et indépendant qui lui trottait dans la tête.

Nous sommes donc loin d'un Einstein pur génie des mathématiques. Il possédait simplement entre 1900 et 1905 un bagage mathématique certes basique, mais suffisant pour étayer ses premières recherches sur les atomes et les quanta de lumière et pour développer sa théorie sur la relativité restreinte – tout en s'appuyant beaucoup, pour cette dernière, sur les travaux scientifiques de Poincaré et les démonstrations mathématiques développées par d'autres chercheurs, notamment Galilée et **Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)**. Car contrairement à ce que la plupart de ses publications scientifiques, ne comportant aucune référence bibliographique, pourraient laisser penser, Einstein connaissait très bien les recherches effectuées par d'autres savants, décédés parfois depuis plusieurs décennies, voire plusieurs siècles. Aussi était-il au courant des réalisations scientifiques effectuées antérieurement, notamment dans les domaines qui l'intéressaient vraiment : la mécanique classique, l'électromagnétisme, la théorie cinétique des gaz, la mécanique statistique, la thermodynamique, la vitesse et le mode de propagation de la lumière, la notion d'atome, la gravitation, les premiers concepts sur la relativité du temps et de l'espace.

Trois grandes périodes

Trois grandes périodes jalonnent la carrière scientifique d'Einstein de 1900 à 1955, année de sa mort. Ce découpage nous a paru le plus pédagogique pour accompagner Einstein dans les différentes étapes de l'élaboration de ses théories. Nous le suivrons pas à pas dans ses espoirs, ses doutes, ses erreurs mais aussi dans ses joies, quand les aboutissements de ses recherches se confirmeront.

La première période va de 1900 à la fin de 1905 : de 1900 à 1901, il se démontre à lui-même qu'il peut être un chercheur et que ses premières idées sur la constitution moléculaire (ou atomiste) de la matière semblent se confirmer. De 1902 à 1903, avec comme unique objectif de démontrer l'existence de l'atome, il se forge des concepts mathématiques et se crée un mode de raisonnement personnel pour démontrer que

la mécanique statistique (prémices de la mécanique quantique) peut expliquer certains phénomènes thermodynamiques. Durant ces années, il réfléchira constamment (en s'appuyant sur les travaux complémentaires de Galilée, Lorentz et Poincaré) aux concepts qui l'amèneront peu à peu à l'élaboration de sa célèbre théorie sur la relativité restreinte. Enfin, de 1904 à la fin de 1905, en s'appuyant sur les récents travaux de **Max Planck (1858-1947)**, Einstein peut, grâce aux concepts et aux outils mathématiques qu'il s'est construits précédemment, approfondir ses recherches sur l'existence de l'atome et des quanta de lumière. En parallèle, il peaufine sa théorie sur la relativité du temps et de l'espace.

En 1905, c'est l'apothéose, la fameuse *annus mirabilis* durant laquelle il rédige trois publications, autant de branches d'un feu d'artifice scientifique magnifique qui éclairera tout le XXe siècle et le rendra mondialement célèbre. Dans l'une, il démontre l'existence des quanta de lumière (appelés plus tard photons), expliquant l'effet photoélectrique. La deuxième prouve l'existence de l'atome (concept de base de la mécanique quantique). La troisième concerne la relativité du temps et de l'espace (c'est sa théorie sur la relativité restreinte, qui s'applique aux phénomènes dotés d'un mouvement rectiligne et uniforme). Elle lui permet de mettre en évidence l'équivalence qui existe entre l'énergie et la matière, concrétisée par la célébrissime formule $E = mc^2$. En avril de cette même année, il trouve le temps de publier sa thèse de doctorat, dans laquelle il confirme l'existence des atomes et détermine leur taille.

La deuxième période va de 1906 à 1915. Einstein élabore, peu à peu et très péniblement (essentiellement à cause de ses lacunes mathématiques), sa théorie sur la relativité générale qui, comme son nom l'indique, permet de passer d'un mouvement uniforme et rectiligne à un mouvement quelconque (notamment non rectiligne et accéléré). Cette théorie remplacera celle de Newton sur la gravitation, c'est pourquoi elle est aussi appelée « théorie relativiste de la gravitation ».

La troisième période va de 1916 à 1955 : de 1916 à 1924, ses grandes découvertes achevées, Einstein crée le premier modèle mathématique cosmologique de l'univers qui nous entoure et apporte de nombreuses contributions à la mécanique quantique (notamment en découvrant un cinquième état de la matière). L'année 1924, celle d'une dernière publi-

cation, concrétise toutefois sa rupture avec cette physique probabiliste (donc non déterministe) dans laquelle il ne se reconnaît plus.

De 1925 à sa mort, en 1955, dans le secret espoir d'éliminer la mécanique quantique, il consacre toute son énergie à trouver une théorie scientifique unitaire capable d'unifier la théorie électromagnétique et sa théorie gravitationnelle relativiste. Hélas, il échouera, tout comme actuellement, plus de cinquante ans après sa mort, des milliers de chercheurs qui, dans le monde entier, consacrent leur vie à la recherche de cet eldorado appelé « la théorie du Tout ».

Première période (1900-1905)

Théorie sur la relativité restreinte

Le début d'une carrière solitaire

En juillet 1900, Einstein, à vingt et un ans, a obtenu son diplôme de professeur à orientation mathématique et physique de l'institut universitaire suisse du Polytechnicum de Zurich et file le parfait amour avec sa future femme, Mileva, étudiante dans le même institut.

Contre l'avis de son père, qui le destine à une carrière d'ingénieur, il choisit celle de chercheur scientifique, ayant en tête de nombreuses idées de recherches à concrétiser. Dans un premier temps, pour pouvoir préparer sa thèse de doctorat, il doit être pris comme assistant par son professeur de physique. Mais celui-ci, vu le comportement exécrable d'Einstein envers lui et les autres professeurs, lui refuse ce poste.

Aussi Einstein se retrouve-t-il sans travail, sans argent et très aigri contre le monde universitaire. Heureusement, Mileva est là qui l'encourage et le pousse à faire ce qu'il désire. Fort de cette grande complicité et porté par l'heureuse inconscience de la jeunesse, il commence alors en solitaire une carrière très hasardeuse de chercheur.

On croit souvent qu'Einstein a tout découvert par lui-même, grâce à son génie, sans aucune référence à d'autres travaux scientifiques antérieurs ou contemporains. Or, si ses découvertes sont effectivement exceptionnelles, elles ne sont la plupart du temps que le couronnement, certes génial, de celles réalisées avant lui par des dizaines de savants, parfois plusieurs siècles plus tôt.

La progression d'Einstein dans ses différentes recherches a été, au niveau intellectuel, une longue montée en puissance, souvent labo-

rieuse et harassante. Ses recherches ont été élaborées progressivement, s'appuyant premièrement sur ses connaissances personnelles, deuxièmement sur des travaux effectués par des savants avant lui, et troisièmement sur ses réflexions et sur les découvertes successives effectuées au cours de ses recherches ; l'élaboration de sa théorie sur la relativité générale en est un excellent exemple.

Cette démarche, que l'on peut qualifier d'heuristique, est obligatoire pour tout chercheur qui veut progresser dans sa recherche. Elle suit le cycle récurrent suivant : « J'ai une ou des idées, j'essaie de démontrer leur véracité ; si je ne trouve pas, j'émets d'autres idées ». Elle est, dans le domaine scientifique, toujours ponctuée par des démonstrations mathématiques précédant ou suivant des expériences ou observations soit intellectuelles, soit matérielles.

Là non plus, Einstein n'a guère innové en la matière. Cependant, ses « expériences de pensée », qui ont toujours précédé les preuves théoriques apportées par ses démonstrations mathématiques, furent d'une importance capitale, car elles ont été à l'origine de toutes ses étonnantes découvertes. C'est sûrement dans cette démarche très originale, où l'imagination est reine, que se situe une grande partie de son génie.

1900-1901 : À la recherche des atomes

À la fin de l'année 1900, Einstein se pose une question cruciale : dans quels domaines vais-je exercer mes talents de chercheur ?

Depuis quelques années, il a l'intuition que certains phénomènes physiques, incompréhensibles dans le cadre des théories scientifiques classiques de l'époque, peuvent être expliqués grâce au concept moléculaire ou atomique (à l'aube du XXe siècle, ces deux termes désignent une même réalité). Pour lui, la matière de tous les corps est, au niveau microscopique, constituée d'atomes qui doivent, grâce à leurs propriétés physiques, expliquer au niveau macroscopique, c'est-à-dire au niveau que nous percevons, le comportement général de ces corps. Il écrit à cette époque : « Je cherche des phénomènes qui me permettront d'établir l'existence des atomes ainsi que leur dimension... » Or, la notion d'atome, bien que déjà utilisée intuitivement par les chimistes,

n'était pas encore scientifiquement prouvée. Il aura fallu presque vingt-cinq siècles d'une gestation très lente pour que l'existence de l'atome s'impose aux scientifiques. Durant tout ce temps, la physique d'Aristote, en récusant la notion d'atome, a fait des dégâts considérables dans la progression de la recherche scientifique : elle n'a apporté aucun élément positif dans le domaine de la physique, mais a aidé l'Église à freiner la recherche scientifique, à faire condamner des savants illustres et à en brûler quelques-uns. Quel énorme gâchis !

■ Pourquoi la sève monte au printemps...

Ainsi, à la fin de l'année 1900, Einstein se fie à son intuition et choisit le phénomène de la capillarité pour appliquer ses idées sur la structure intime de la matière. Il démontre que ce phénomène est dû à des interactions entre les molécules provoquant des phénomènes de tension physique à la surface d'un liquide, ce qui engendre des forces permettant à un liquide quelconque de s'élever dans un corps. Ces forces sont par exemple responsables de la montée de la sève dans les arbres au printemps (heureusement qu'il existe aussi la gravitation, sans l'action de laquelle les arbres n'arrêteraient pas de grandir vers le ciel !).

Fin 1901, il fait paraître ses premiers et modestes travaux de recherche dans la très sérieuse revue scientifique allemande *Annalen der Physik*. Il a à peine vingt-deux ans. Cette publication sur la capillarité, bien que très argumentée, est anecdotique. Cependant, elle lui permet de se prouver à lui-même qu'il est certainement sur la bonne voie, puisque cette revue scientifique sérieuse qui a pour président du comité de lecture le célèbre et très reconnu physicien allemand Max Planck, l'a acceptée. Cela est assez exceptionnel, Einstein, qui n'est pas universitaire, étant encore totalement inconnu de la communauté scientifique de l'époque. Imaginons un instant que Planck ait refusé sa publication – il n'y aurait certainement pas eu d'Einstein ! Planck le soutiendra constamment par la suite, bien qu'il fût souvent en désaccord avec ses idées scientifiques, parfois trop révolutionnaires à son goût.

Fort de cet encouragement, et bien qu'il soit toujours chômeur et vive chichement de quelques cours particuliers et d'une aide financière de ses parents, Einstein, avec la collaboration active et la connivence

amoureuse de Mileva, voit sa foi en ses qualités de chercheur et, bien sûr, en l'existence des atomes, renforcée.

Deuxième bonne nouvelle, au début de l'année 1902, il obtient, après de très longues démarches et une enquête administrative poussée, la nationalité suisse. C'est essentiel pour lui car, ayant refusé de faire son service militaire en Allemagne, il est apatride depuis 1896. Détail amusant, il réussit à échapper aux célèbres périodes militaires helvétiques grâce à ses pieds plats !

C'est à cette époque que Mileva lui apprend qu'elle est enceinte. Il n'a pas de travail, pas d'argent, pas d'avenir professionnel solide, ses parents désapprouvent sa liaison et il va être père... Malgré ses espoirs de chercheur, il traverse une période bien difficile ! D'autant plus que Mileva accouche seule, en février 1902, dans sa Serbie natale, d'une petite fille prénommée Liserl, qu'Einstein ne verra jamais. Fait incroyable, malgré plusieurs enquêtes effectuées dans ce pays, on n'a jamais su ce qu'elle était devenue. Certains pensent qu'elle mourut très jeune, d'autres qu'elle survécut à ses parents. En réalité, drame de la pauvreté et de la misère morale dans lequel se trouvait le couple, il semble qu'elle fut abandonnée. Ce mystère, seul fait inexpliqué dans la biographie d'Einstein, et auquel il ne fera jamais allusion, restera sans doute à jamais entier.

Heureusement, en mai 1904 naîtra Hans, leur premier fils. Celui-ci fera comme son père des études scientifiques au Polytechnicum. Il terminera sa vie professionnelle aux États-Unis, comme ingénieur. Leur deuxième fils, Eduard, naîtra sept ans plus tard. Hélas, il subira dès son plus jeune âge de graves crises de démence dont il souffrira toute sa vie.

1902-1903 : remise en cause des lois de la thermodynamique

En 1902, suivant son intime conviction, Einstein veut, pour poursuivre ses recherches, utiliser la thermodynamique, branche de la physique qu'il avait le mieux étudiée, fondée principalement sur deux lois très simples : la conservation de l'énergie et la notion d'entropie (évaluation de la dégradation de l'énergie lors d'un transfert de chaleur entre deux

corps). Ces lois furent peu à peu élaborées à partir de la fin du XVIIIe siècle pour comprendre comment s'effectuent les transferts de chaleur dans une machine à vapeur. Entre autres phénomènes, les savants observèrent que la chaleur va toujours du corps le plus chaud vers le corps le moins chaud (jamais l'inverse), jusqu'à ce que la température soit identique dans les deux corps. Ils appelèrent cet état stable « équilibre thermique ». Peu à peu, après beaucoup d'expériences et de tâtonnements, les physiciens créèrent une relation entre chaleur, température, travail mécanique et énergie.

Lorsque Einstein commence sa carrière de chercheur, la thermodynamique est la science qui étudie la transformation de la chaleur en travail ; plus généralement, c'est la branche de la physique qui traite des relations entre phénomènes caloriques et mécaniques. Mais en 1902, ce qui l'impressionne le plus, c'est l'explication de l'entropie basée entièrement sur des calculs de probabilité applicables aux innombrables molécules de tout fluide (gaz, liquide...), démontrée par le physicien autrichien **Ludwig Boltzmann (1844-1906)** à la fin du XIXe siècle. Aussi fera-t-il de cette explication l'un des fondements principaux de sa réflexion pour redéfinir la thermodynamique.

Ses recherches sont ponctuées par plusieurs publications complémentaires, marquant sa progression intellectuelle, dans la même revue scientifique *Annalen der Physik*. Et bien que ces publications ne suscitent pas un très grand intérêt, les résultats de ses travaux le confortent dans sa conviction profonde que la matière, à son niveau intime, est bien constituée d'atomes. Cependant, il ne l'a pas encore démontré ; il le fera deux ans plus tard en s'inspirant de l'effet brownien.

Durant cette période, une bonne nouvelle redonne le moral à Mileva et à Einstein. Après être resté sans travail durant presque trois ans, il est embauché comme ingénieur à l'Office fédéral des brevets de Berne, grâce au père de son ami **Marcel Grossmann (1878-1936)**, celui qui lui recopiait, au Polytechnicum, tous les cours de mathématiques auxquels Einstein ne daignait pas assister...

1904-1905 : Atomes, quanta de lumière et relativité restreinte

Nous sommes au début de l'année 1904. Même si ses travaux de recherche sur la capillarité et sur les lois de la thermodynamique sont passés inaperçus dans le monde de la recherche scientifique, Einstein a accompli un premier parcours de chercheur qui le rassure pleinement. Ses premières intuitions, notamment sur l'existence possible des atomes, se sont vérifiées. Il sait qu'il est dans la bonne direction, mais encore faut-il le démontrer.

Il est persuadé que la clé se trouve dans ses travaux précédents qui ont donné un autre visage aux lois classiques de la thermodynamique en les « relookant » profondément, s'appuyant sur des concepts probabilistes développés à la fin du XIXe siècle. Il s'est ainsi forgé des concepts intellectuels inédits, de nouveaux outils mathématiques et une solide démarche scientifique qu'il pourra appliquer à d'autres domaines où, en ce début de siècle, certains phénomènes physiques ne peuvent pas être expliqués par les lois de la thermodynamique ou celles de la mécanique classique. Il s'agit notamment du rayonnement du « corps noir », de l'effet photoélectrique et de l'agitation brownienne.

Animé de solides certitudes, il se met au travail avec ardeur.

Un feu de cheminée et une grande découverte

C'est dans les années 1860 que la marche vers la découverte des quanta de lumière (ou photons) est ouverte, sans qu'il s'en doute, par le physicien allemand **Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)**.

Un soir d'hiver, devant sa cheminée, il s'interroge sur le fait que les braises émettent des lumières de couleurs différentes en fonction de leur température. C'est un phénomène bien connu des potiers, des verriers et des boulangers qui, depuis l'Antiquité, vérifient *de visu*, grâce à sa couleur, à quelle température est leur four (par exemple : 750 °C pour le rouge vif, 1 000 °C pour le jaune, 1 200 °C pour le blanc). Pour comprendre ce phénomène qui l'intrigue beaucoup, Kirchhoff imagine le concept du « corps noir ». Physiquement, celui-ci ressemble à un four idéal, ayant la forme d'une boîte fermée (cubique ou autre) qui absorbe la totalité

du rayonnement qu'il reçoit (d'où le terme « corps noir »). En analysant les fréquences du rayon lumineux (liées à sa couleur) en fonction de son intensité (le rayon sort d'un petit trou percé dans l'une des parois de la boîte), il obtient une courbe qu'il n'arrive pas à décrire entièrement par une formule mathématique.

Quarante ans plus tard, à la fin de l'année 1900, Max Planck va le sortir de ce mauvais pas. Après beaucoup d'hésitations, en s'appuyant sur les précédents travaux de Boltzmann, Planck subdivise, au sens mathématique du terme, le rayon lumineux en de très petites quantités (ou quanta), en attribuant à chacune d'elles une énergie « e » égale à « h » (constante de Planck très petite) multiplié par f(i) (fréquence du rayonnement représentant une couleur). D'où la formule $\mathbf{e = hf_{(i)}}$.

Par cette approche radicalement différente, Planck donne une vision à la fois inédite et révolutionnaire du déroulement de ce phénomène : l'énergie (issue de la matière) ne se propage pas d'une façon continue, mais discontinue. En effet, lorsque nous mettons une bûche dans notre cheminée, les autres bûches qui brûlent apportent de l'énergie qui fait vibrer les atomes de cette nouvelle bûche suivant une certaine fréquence. Cela permet à la matière (bois qui brûle) de restituer une certaine quantité d'énergie sous la forme d'un rayonnement thermique lumineux. Or, au mépris des lois classiques de la thermodynamique, qui affirment que cette restitution d'énergie doit s'effectuer de façon continue, Planck vient de démontrer que celle-ci est discontinue. Malgré sa très grande perplexité, tous ses calculs confirment que sa démonstration est juste.

Pour comprendre cela, conformément à la formule trouvée, il suffit de savoir que la quantité d'énergie transportée par un quantum varie suivant la fréquence (ou la couleur) d'un rayon lumineux. Dans la pratique, plus la fréquence est élevée, plus un quantum transporte d'énergie. Par exemple, un quantum lié à la couleur ultraviolette transporte beaucoup plus d'énergie qu'un quantum lié à la couleur infrarouge. Si ce n'était pas le cas, il n'y aurait aucune raison pour que la température d'une cheminée ne s'élève pas à plusieurs milliers de degrés : l'élévation de cette température étant proportionnelle à la quantité de bois mise dans la cheminée, il est normal que l'énergie dégagée soit de plus en plus importante. Or, quand nous nous réchauffons devant notre chemi-

née, nous constatons que tel n'est pas le cas (heureusement, car nous serions sinon rapidement brûlés !). Cela s'explique par le fait que, lorsque le degré d'excitation des atomes provoque l'émission de beaucoup d'énergie sous forme de chaleur (ce qui se situe au niveau des rayons de couleur ultraviolette), les atomes n'arrivent plus à restituer assez d'énergie pour former (en quelque sorte « remplir ») un quantum de la couleur ultraviolette. Le transfert d'énergie « tombe en panne » : c'est la « catastrophe ultraviolette ». Cette réalité physique explique pourquoi la chaleur dégagée par votre cheminée ne peut pas dépasser un certain seuil. Explicitons ce phénomène physique bizarre par des exemples simples.

L'haltérophile

Imaginez que vous soyez un haltérophile. Certainement, vous avez une énergie personnelle suffisante pour soulever une barre de 10, puis de 30, 50 kg... (Vous pouvez assimiler l'action de soulever une barre d'un certain poids à un quantum d'énergie.) Mais, peu à peu, la barre devenant de plus en plus lourde, vous aurez de plus en plus de difficulté à la soulever, car votre quantité d'énergie personnelle (même si vous mangez beaucoup de sucre) deviendra de plus en plus défaillante. En jargon sportif, on dit que vous vous mettez progressivement « dans le rouge » - Planck aurait pu dire (en pensant qu'il puisse avoir de l'humour) « dans l'ultraviolet ». Peut-être qu'à 100 kg, vous ne pourrez plus soulever la barre, car toute l'énergie contenue dans votre corps n'y suffirait pas. Pour vous, comme pour Planck, c'est « la catastrophe de la barre ultraviolette » !

L'escalier

L'exemple de l'utilisation d'un escalier un peu particulier peut aussi mieux vous faire comprendre ce phénomène. Tout d'abord, imaginez celui-ci avec des contremarches de plus en plus hautes (la hauteur de chacune représentant, par analogie, une quantité d'énergie, de plus en plus élevée, contenue dans un quantum). Ensuite, faites monter cet escalier bizarre par une foule de personnes de taille différente (ayant donc des longueurs de jambes différentes). Vous constatez que pratiquement tous les adultes peuvent monter les premières marches (les

contremarches mesurant 20, 30, 40, 50 cm), mais dès 60 cm, certaines n'y arrivent plus ! Ainsi, suivant la dimension de leurs jambes, de moins en moins de personnes peuvent continuer à gravir cet escalier, par exemple : 10 personnes à 70 cm, 3 à 80 cm, 1 à 90 cm et aucune ensuite. La contremarche de 100 cm représente donc parfaitement « la catastrophe ultraviolette ».

■ La pseudo-réalité scientifique

Pour Planck, l'énergie d'un quantum (portion d'un rayon lumineux) est égale à $e = hf_{(i)}$. Pour plus de clarté, prenons pour la constante de Planck h = 0,1 (soit une valeur environ 10^{33} plus grande que la valeur réelle) et les valeurs suivantes pour les différentes fréquences : f(infrarouge) = 10, f(violet) = 100, f(ultraviolet) = 1000.

Pour une énergie reçue, un atome va restituer des quanta de valeur énergétique différente suivant la couleur du rayon lumineux (donc de sa fréquence) :

- pour f(infrarouge) = 0,1 x 10 = 1
- pour f(violet) = 0,1 x 100 = 10
- pour f(ultraviolet) = 0,1 x 1000 = 100

Ceci montre bien que chaque quantum, suivant la fréquence de la couleur du rayon lumineux, transporte des quantités différentes d'énergie. Notre calcul très approximatif montre qu'un quantum de la couleur ultraviolette (haute fréquence) transporte 100 fois plus d'énergie (en réalité, entre 2 et 3 fois plus) qu'un quantum de la couleur infrarouge (basse fréquence). Aussi est-il évident que, pour une énergie reçue, un atome peut plus facilement émettre un quantum rouge ou violet qu'un quantum ultraviolet. Le changement de couleur d'un rayon lumineux ne peut donc s'effectuer que si l'atome dispose d'une certaine quantité d'énergie, d'où l'expression donnée au début par Planck de « quantité élémentaire d'action ».

Ces trois exemples montrent comment le transfert d'énergie entre la matière et la lumière (plus généralement : le rayonnement électromagnétique) devient de plus en plus difficile suivant la quantité d'énergie que doit transporter un quantum. Arrivé à un certain niveau, ce trans-

fert s'arrête. C'est uniquement pour cette raison que la chaleur dégagée par notre cheminée ne nous grille pas !

Planck, grâce à sa découverte révolutionnaire, n'est pas devenu le plus heureux des savants, il en fut au contraire totalement effondré. L'ultra-conservateur qu'il était qualifia même sa découverte d'« acte de désespoir » ! Il s'en tira par une sorte de pirouette scientifique en déclarant que cette discontinuité (représentée par les quanta) ne provient pas directement du rayonnement électromagnétique mais qu'elle est le résultat de son interaction avec la matière, comme de l'eau s'écoulant de façon continue sur un sol en terre en arrache régulièrement de petites mottes. Bien entendu, ce raisonnement était complètement faux, et Planck le savait pertinemment. Einstein se fera un plaisir d'en apporter la preuve cinq ans plus tard.

Ainsi, en 1900, Planck vient malgré lui d'ouvrir largement la porte à la mécanique quantique, que Boltzmann avait furtivement entrebâillée en découvrant une constante universelle « h » (certes très petite, mais non nulle). Toute la physique du XXe siècle en sera bouleversée. La nature est extraordinaire : elle a été obligée de concevoir la mécanique quantique pour que vous puissiez, sans vous brûler, vous réchauffer devant votre cheminée !

Une révolution scientifique s'est mise en marche, Einstein l'opportuniste ne peut pas la manquer !

L'explication de l'effet photoélectrique

Bien entendu, en 1904, Einstein connaît très bien les travaux de Planck et, contrairement à ce dernier, il sait que le raisonnement utilisé pour l'explication du « corps noir » est juste car, comme Planck, il a utilisé les travaux de Boltzmann ; d'autre part, il a découvert quelque chose qu'il pressentait intuitivement.

En utilisant la formule de Boltzmann, Planck démontre en quelque sorte le bien-fondé de ses recherches personnelles dans sa reformulation des lois de la thermodynamique dans une optique à la fois atomiste et statistique. En partant de ces hypothèses, il prouve que le rayonnement électromagnétique confiné dans le « corps noir » est un phéno-

mène thermodynamique, et aboutit à une conclusion révolutionnaire en créant une analogie parfaite entre un gaz et un rayon lumineux. Pour Einstein, tout comme un gaz est formé de molécules, la lumière est constituée de petites particules qu'il appelle « quanta de lumière ». Pour lui, l'énergie d'un rayon lumineux se diffuse non pas de façon homogène et continue (comme l'écoulement d'un long fleuve tranquille, ou une onde), mais de façon discontinue (ou discrète) par petits paquets (ou quanta), comme les balles d'une mitrailleuse. Par ailleurs, par un autre cheminement intellectuel, il aboutit pratiquement à la même formule que Planck quant à l'énergie contenue dans chaque quantum de lumière : $e = hf_{(f)}$. Ainsi, tout en confirmant la justesse des travaux de Planck, Einstein débouche sur une conclusion encore plus extraordinaire : il n'y a pas que les échanges d'énergie entre la matière et la lumière qui s'effectuent d'une façon discontinue (par quanta d'énergie), mais la propagation de la lumière est aussi, elle-même, discontinue (par quanta de lumière).

Cette découverte qui, à la fois, confirme et généralise la découverte de Planck, est révolutionnaire pour l'époque et fait d'Einstein l'un des pères fondateurs de la mécanique quantique qui va prendre son essor tout au long du XXe siècle. Précisons que, sans oublier le très célèbre Maxwell (déjà connu pour sa théorie électromagnétique), le véritable initiateur de cette révolution est Boltzmann. En effet, c'est lui qui a écrit la première page de la formidable épopée quantique qui occupe, aujourd'hui encore, nombre de chercheurs. De plus, en s'appuyant sur la découverte des quanta de lumière (vecteur énergétique de celle-ci), Einstein peut élucider un certain nombre de phénomènes jusque-là inexpliqués dans le cadre des lois physiques classiques. C'est notamment le cas de l'effet photoélectrique.

C'est le physicien allemand **Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)** qui, en 1888, en ouvrant la voie à la télégraphie sans fil, découvre par hasard l'effet photoélectrique, phénomène qui consiste à créer un courant électrique à l'aide d'un rayon lumineux. Partant de là, le physicien allemand **Philipp Lenard (1862-1947)** étudie sérieusement l'effet photoélectrique. Pour cela, il a recours à un dispositif très astucieux qui consiste à amener d'abord un rayon lumineux sur un prisme pour pouvoir sélectionner des rayons monochromatiques de fréquences différentes, puis à

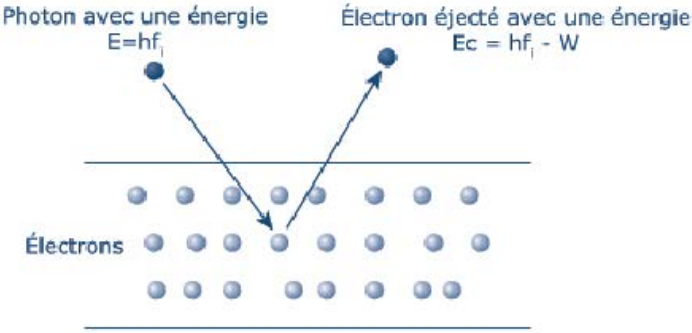
orienter chacun de ceux-ci sur un métal. Il constate alors que le courant électrique ainsi créé est dû à des particules de matière de charge négative (appelées plus tard électrons). Il montre aussi que plus la fréquence du rayon lumineux monochromatique est élevée, plus il y a d'électrons éjectés de la plaque de métal, ce qui, bien sûr, fournit un courant électrique de plus en plus fort. Tout comme Hertz, Lenard constate que d'une part, l'intensité du rayon lumineux ne joue aucun rôle dans l'effet photoélectrique et que, d'autre part, observation encore plus étrange, il n'existe plus de courant électrique, quelle que soit l'intensité de la lumière, en dessous d'une certaine fréquence.

Tous ces phénomènes sont facilement explicables grâce à une analogie entre un quantum de lumière et de petites boules faites de matières différentes (plastique, bois, acier) pesant respectivement 1, 30 et 300 grammes. En visant avec chacune de ces trois boules, animées d'une même vitesse, une autre boule, immobile, pesant 50 grammes (assimilable à un électron contenu dans une matière métallisée), située à quelques mètres de vous, vous verrez que l'impact produit sur cette dernière sera forcément différent.

Avec votre boule en plastique, vous ne pourrez jamais faire bouger la boule cible ; l'énergie de la boule lancée étant trop faible, elle rebondira systématiquement sur la « cible » : nous nous situons dans l'infrarouge. Avec la boule en bois, vous pourrez parfois faire bouger la cible (quelquefois, un électron sera éjecté) : nous nous situons dans le violet. En revanche, avec l'importante énergie véhiculée par la boule en acier, la cible sera toujours déplacée (électron éjecté) : nous nous situons alors dans l'ultraviolet.

On ignore si Einstein savait jouer à la pétanque, mais il est certain que ce fut un jeu d'enfant, pour lui qui connaissait les travaux de Lenard, de Hertz et de Planck, que d'expliquer scientifiquement l'effet photoélectrique. Quand un quantum de lumière (ou photon) arrive sur la surface de métal, il transmet son énergie « e » à un électron contenu dans le métal. Mais pour s'extraire du métal avec une énergie cinétique, cet électron doit fournir une certaine quantité de travail W (cette quantité doit être d'autant plus grande que l'électron est éloigné de la surface de métal). Ainsi, l'électron ne pourra s'échapper que si l'énergie cinétique est au moins égale à ($hf_{(i)}$ - W). Bien entendu, Einstein démontre que

l'intensité du rayon lumineux ne joue aucun rôle dans l'effet photoélectrique, seule sa fréquence est impliquée.



En mars 1905, Einstein publie ses recherches sur l'existence des quanta de lumière et sur l'explication de l'effet photoélectrique dans la revue Annalen der Physik. Comme nous le verrons plus loin, en 1921, il en sera récompensé par le prix Nobel de physique.

Nature de la lumière

Avec sa découverte sur les quanta de lumière, Einstein souleva un énorme problème sur lequel de nombreuses générations de chercheurs s'étaient déjà penchées dans le passé : la lumière est-elle une onde ou est-elle formée de particules ou photons ?

À cette époque, la lumière représente plus que jamais un phénomène physique naturel très ambigu. En effet, sa fonction ondulatoire présente forcément un phénomène continu, mais les particules dont elle semble être constituée montrent qu'elle est aussi un phénomène discontinu. Le célèbre physicien français **Louis de Broglie (1892-1987)** démontrera en 1924 que la lumière peut être à la fois un phénomène ondulatoire *et* corpusculaire.

En revenant plusieurs millénaires en arrière, il est très étonnant, voire émouvant, de distinguer clairement sur une stèle égyptienne datant d'environ mille ans avant notre ère le dieu Soleil baignant le monde

de rayons lumineux constitués de fleurs de lys aux multiples couleurs (assimilables à des particules).

Grains de pollen et atomes...

En 1827, le botaniste écossais **Robert Brown (1773-1858)**, spécialiste de la flore australienne, découvre par hasard, à l'aide d'un microscope, que des particules de pollen d'un diamètre d'environ un micron immergées dans l'eau sont animées de mouvements incessants, à la fois saccadés et désordonnés. Grâce à ce phénomène, qu'il sut décrire sans toutefois l'expliquer, Brown accéda à la notoriété grâce au terme de « mouvement brownien » (utilisé aujourd'hui dans un contexte sémantique plus large).

Vers les années 1900, ces mouvements incompréhensibles rendent les savants très perplexes : les déplacements de chacune des particules, dotées à la fois d'une trajectoire non rectiligne et d'une vitesse non uniforme, ne sont pas conformes aux principes galiléens et newtoniens de la mécanique classique, notamment au mouvement d'inertie. Ces mouvements ne correspondent donc à rien de connu. Les savants peuvent uniquement observer que ces petits grains de pollen s'agitent d'autant plus que l'eau dans laquelle ils sont plongés a une température plus élevée. Ce phénomène bizarre doit donc se situer au confluent de la mécanique des fluides et de la thermodynamique, puisque les molécules d'eau semblent jouer un rôle majeur. Cela tombe bien : Einstein, grâce à ses travaux antérieurs, commence à être un expert dans ces deux domaines. Aussi s'appuie-t-il sur cet atypique et marginal mouvement brownien pour démontrer définitivement l'existence des atomes. Pour l'expliquer, en partant, bien entendu, d'une hypothèse purement moléculaire (c'est-à-dire atomiste), il avance que les mouvements irréguliers et imprévisibles des petits grains sont dus à des collisions aléatoires avec les molécules d'eau (car Einstein sait que l'agitation moléculaire d'un gaz ou d'un liquide s'amplifie d'autant plus que la température est élevée). Il peut alors utiliser ses propres concepts et outils mathématiques, développés les années précédentes dans un contexte gazeux à partir des travaux de Boltzmann, pour expliquer le mouvement brownien.

Cette solide démarche scientifique permet à Einstein d'apporter la preuve irréfutable de l'existence de l'atome, mettant un point final à une longue traque initiée par Aristote en publiant, en mai 1905, le résultat de ses recherches dans la revue *Annalen der Physik*. Plus tard, en 1909, le physicien français **Jean Perrin (1870-1942)** entérinera par de multiples expériences tous les travaux d'Einstein dans ce domaine, en remplaçant les grains de pollen par de minuscules billes de mastic, de gomme, etc., immergées dans des liquides différents.

La théorie sur la relativité restreinte

Si les découvertes de l'atome et des quanta de lumière (ou photons) procurent à Einstein une très grande reconnaissance de l'ensemble de la communauté scientifique, ses théories sur la relativité restreinte et générale le feront entrer à tout jamais au panthéon des sciences. Leur contenu, à la fois inattendu et extraordinaire, aurait pu servir d'exemple à Dante lorsqu'il écrivit *Voi qui entrate qui, lasciate ogni speranza...* (« Vous qui entrez ici, laissez toute espérance »). En effet, si ces théories relativistes nous paraissent hermétiques, ce n'est pas pour des raisons purement mathématiques, mais parce qu'elles bouleversent complètement nos intuitions ordinaires et par-là même notre façon de voir le monde, l'univers qui nous entoure. Aussi représentent-elles un défi matériel et conceptuel, voire religieux. La théorie sur la relativité restreinte, notamment, nous entraîne dans un monde non intuitif et donc forcément, dans un premier temps, incompréhensible pour le commun des mortels, dans lequel les vitesses des corps en mouvement ne s'additionnent plus, le temps se dilate (on rajeunit d'autant plus que notre déplacement s'accélère) et les corps se rétrécissent. Aussi les notions de temps et d'espace et leurs rapports sont-ils bafoués.

Au début des années 1900, Einstein, passionné par les ondes électromagnétiques (donc la lumière) et par la relativité galiléenne, ne pensait absolument pas bouleverser quelques années plus tard le paysage scientifique. C'est pourtant ce qu'il fit. D'une part en remettant en cause la notion d'éther (sorte de fluide imaginé par les Romains, qui permit aux scientifiques des XVIIIe et XIXe siècles d'expliquer comment se propageait la lumière dans l'espace) et celles du temps et de l'espace

absolus, érigées en dogme intouchable par le célèbre mathématicien, physicien et astronome anglais Isaac Newton. D'autre part en réconciliant la physique classique et la théorie électromagnétique, conçue en 1873 par le physicien et mathématicien écossais James Clerk Maxwell, qui démontre de façon irréfutable la complémentarité des phénomènes électriques et magnétiques.

L'électromagnétisme

Les phénomènes électriques et magnétiques sont connus depuis l'Antiquité. Nos ancêtres avaient observé que s'ils frottaient les poils d'un chat avec une baguette d'ambre ou de verre, celle-ci attirait les poussières et faisait se dresser les poils de leurs avant-bras. Ils ne savaient pas encore que c'était le signe tangible d'un phénomène électrique. Quant au magnétisme, il était déjà connu des Grecs grâce à une pierre composée de magnétite (en réalité un oxyde de fer) se comportant comme un aimant. C'est pour cela que les oiseaux migrateurs, qui ont dans le cervelet un peu de magnétite, ne se trompent jamais de direction en suivant les lignes de force du champ magnétique de la ceinture de Van Allen qui entourent notre planète. Les Chinois utilisèrent intelligemment ce phénomène en inventant la boussole (laquelle avait permis à Einstein de « faire sa première expérience scientifique à cinq ans », comme il le racontait souvent), ce qui fit d'eux dès le IXe siècle de très grands navigateurs au grand savoir-faire commercial.

Ce n'est toutefois qu'à partir du milieu du XVIIIe siècle, grâce à Maxwell, que les phénomènes électriques et magnétiques furent sérieusement étudiés scientifiquement.

En croisière avec Galilée

En 1630, Galilée vous invite à faire avec lui une petite croisière en bateau. Il vous a réservé une cabine, certes jolie mais sans hublot, où il a installé une petite ménagerie (des mouches, des papillons, des poissons rouges dans un bocal), une vasque et une carafe d'eau. Imaginons que le bateau soit à quai. Les papillons et les mouches volent dans tous les sens et les poissons rouges s'amusent à nager dans toutes les directions. Au bout d'un moment, pour vous laver les mains, vous versez dans la vasque de l'eau, qui, depuis la carafe, s'écoule perpendiculairement au sol de

la cabine – rien de plus normal. Mais entre-temps, sans vous le dire, le facétieux Galilée a fait avancer le bateau à une vitesse uniforme le long du quai avec une trajectoire rectiligne. Étrangement, vous n'avez rien ressenti physiquement, ni remarqué de changement dans le comportement des animaux ou l'écoulement de l'eau. Surprenant ? C'est pourtant en grande partie grâce à cette petite expérience anodine que Galilée va devenir l'un des savants les plus célèbres au monde.

En partant du fait que vous avez été incapable de dire si le bateau était au repos ou pas, Galilée déduit logiquement que vous n'avez détecté aucun mouvement et que, par conséquent, le mouvement d'un corps quelconque n'existe que par rapport à un autre corps pris comme référence. C'est ce qui lui permet d'émettre cette étrange mais excellente remarque : « Le mouvement est comme rien ». Ainsi, pour affirmer qu'un corps est au repos ou en mouvement uniforme, il faut qu'il soit regardé de « l'extérieur ». En effet, lorsque vous êtes dans votre cabine sans hublot, vous êtes incapable de dire si le bateau est immobile ou s'il glisse sur l'eau, seules les personnes qui sont sur le quai peuvent vous renseigner. Dire qu'un corps est en mouvement uniforme et rectiligne ou au repos n'a donc aucun sens en soi, il ne peut être en mouvement ou au repos que par rapport (ou par référence) à un autre corps.

Vous vous croyez parfaitement au repos lorsque vous êtes chez vous, tranquillement assis devant votre télévision ou endormi dans votre lit. Que nenni ! Un astronaute immobile, loin de la Terre, vous voit à la fois tourner avec la Terre (suivant un mouvement de rotation de plus de 1 000 km/h) et autour du Soleil (à environ 100 000 km/h). Si vous ajoutez à cela que la Terre est entraînée par le Soleil autour de notre galaxie, qui tourne aussi sur elle-même à raison d'un million de kilomètres par heure, vous voyez qu'en fait d'immobilité, vous vous trouvez en permanence dans un formidable carrousel ayant pour moteur l'univers entier !

Vous basculez donc d'un état de repos que vous croyiez absolu à un état complètement relatif. Alors, comme Galilée, vous pourrez soutenir que tout est relatif, y compris le mouvement et le repos. Cela provient du fait qu'à chaque instant de votre vie, vous vous situez dans ce qui s'appelle, au sens mathématique, un *référentiel* aux coordonnées géographiques précises. Cela peut être votre maison, votre voiture, un bateau, un train,

un avion, la Terre, la planète Mars... Galilée a ainsi défini le principe de relativité dans un système de coordonnées orthogonales (donc euclidien) particulier appelé « référentiel galiléen » dont les caractéristiques sont simples : ce référentiel doit être animé d'un mouvement uniforme, rectiligne et parallèle par rapport à un autre référentiel galiléen (ce dernier, bien entendu, pouvant être au repos). En d'autres termes, deux référentiels sont galiléens s'ils sont, l'un par rapport à l'autre, en translation rectiligne et dotés d'une vitesse uniforme. C'est seulement dans ce contexte que le principe de relativité est applicable. Si un corps a un mouvement accéléré (ou décéléré) et/ou suit une trajectoire courbe, ce principe n'est plus applicable.

C'est l'exemple classique du train dans lequel vous êtes assis sans pouvoir, durant un instant, déterminer si c'est le vôtre ou celui du quai voisin qui vient de démarrer. Vous êtes situé dans un référentiel galiléen (votre train) et votre corps a ressenti la « relativité » par rapport à un autre référentiel galiléen (le train jouxtant le vôtre sur une voie parallèle et ayant, au départ, une vitesse quasi uniforme).

La notion de relativité est aussi une notion de point de vue (Einstein a abusé de cette expression), car suivant que vous vous situez dans tel ou tel référentiel galiléen, vous n'aurez pas la même perception d'un même phénomène se déroulant dans un autre référentiel galiléen.

L'exemple le plus simple de cette réalité est quotidien. Tous les matins, vous voyez le Soleil « se lever » (les guillemets ne sont pas superflus) à l'est, pour « se coucher » le soir à l'ouest. Étant dans un référentiel « terrien », vous avez vraiment l'impression que vous êtes immobile et que le Soleil tourne autour de la Terre. Imaginez maintenant que vous êtes sur le Soleil (donc immobile), donc dans un référentiel « solaire » ; vous verrez alors la Terre tourner autour de vous, non pas en 24 heures mais en 365 jours (bien entendu, cette durée n'a aucune incidence sur votre réflexion). Alors, qui tourne autour de qui ? Où se situe la réalité ? Quel point de vue adopter ?

On ne connaît la réponse que depuis quelques siècles, grâce à Galilée.

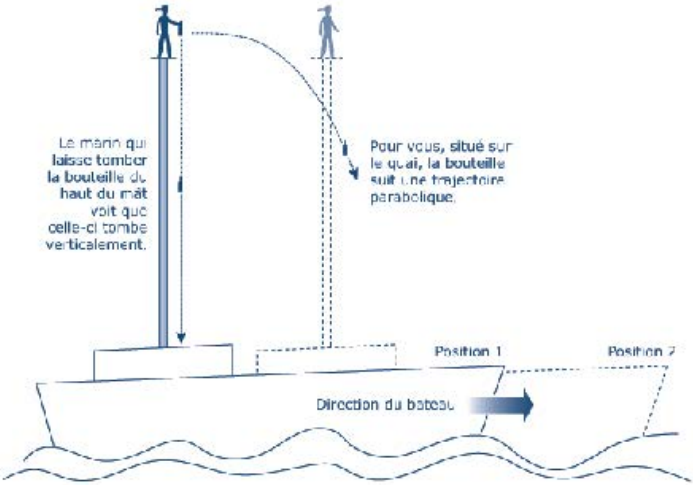
D'un référentiel galiléen à l'autre

Galilée, pour passer mathématiquement d'un référentiel galiléen à un autre, a conçu ce que nous appelons communément les « équations de transformation de Galilée », qui permettent de calculer les coordonnées d'un même corps (ou objet quelconque) dans l'un ou l'autre référentiel. Dans l'exemple suivant, elles vous permettent à tout instant de connaître la position du marin aussi bien dans le référentiel représenté par le bateau (qui est en mouvement) que sa position perçue par vous, dans votre référentiel représenté par le quai (qui est au repos).

Vous êtes sur le quai et vous regardez un bateau qui va à une vitesse uniforme v_1. Un marin marche sur le bateau (dans la même direction) à une vitesse uniforme v_2. Pour lui, dans son référentiel, v_2 sera sa vitesse réelle. En revanche, pour vous, situé dans un autre référentiel représenté par le quai, vous trouverez que le marin marche à une vitesse $V = v_1 + v_2$. En d'autres termes, si le marin fait deux mètres par seconde et le bateau quatre mètres par seconde, le marin aura la sensation d'avoir parcouru deux mètres, mais pour vous, il en aura, dans la même seconde, parcouru six.

Prenons un autre exemple moins évident. Un marin, installé à la cime du mât d'un bateau avançant sur l'eau à une vitesse uniforme et en ligne droite, tient dans sa main une bouteille, qu'il lâche. Quelle que soit la vitesse uniforme du bateau (ici, quatre mètres par seconde), le marin voit tomber la bouteille verticalement (position 1 du bateau). De votre référentiel au repos (le quai), vous constatez que, un quart de seconde plus tard, la bouteille se sera déplacée d'un mètre, une demi-seconde plus tard de deux mètres, une seconde plus tard de quatre mètres... Ce qui montre bien que, pour vous, la bouteille, tout en restant située près du mât, suit, au fur et à mesure que le bateau avance, une trajectoire non pas verticale, mais parabolique (position 2 du bateau).

Ce phénomène bizarre provient du fait que depuis votre référentiel galiléen au repos (le quai), vous aurez vu avancer le bateau d'une certaine distance durant la chute de la bouteille. En revanche, le marin, situé dans un autre référentiel galiléen (le bateau) trouvera tout à fait normal que la bouteille tombe verticalement sur le pont du bateau, car lui se sent immobile en la regardant tomber.



Dans un contexte de deux référentiels galiléens, les mouvements sont donc totalement relatifs, puisqu'un même phénomène est perçu différemment suivant le référentiel où vous vous situez.

Vous noterez que cette relativité galiléenne trouve son expression mathématique dans des formules très simples (elles ne font appel qu'à des opérations d'addition ou de soustraction pour passer d'un référentiel à un autre).

Remarquons que, pour Galilée, le temps dans les deux référentiels considérés, et plus généralement dans tout l'univers, ne peut être qu'identique. Newton sera plus tard du même avis. Lorentz (en collaborant avec Poincaré) les contredira trois siècles après en généralisant les équations de Galilée et en permettant à celles de Maxwell de rester invariantes en passant d'un référentiel galiléen à un autre. Cela signera l'émergence d'une nouvelle physique, incroyable pour l'époque (et même encore actuellement pour beaucoup), qui verra la mise à mort d'un temps et d'un espace universels (donc absolus) mais aussi, *a contrario*, la naissance d'un temps et d'un espace relatifs, non indépendants, sur lesquels Einstein pourra construire ses théories relativistes.

Lorentz offre ainsi à Einstein à la fois le concept de la relativité (du temps et de l'espace) et les outils mathématiques (ses équations de transformation), lui ouvrant une voie royale vers la gloire planétaire et éternelle.

Enfin !

Fort de toutes les découvertes précédentes, Einstein peut désormais construire sa théorie sur la relativité restreinte : il n'a plus qu'à déposer le chapeau de la pyramide construite laborieusement, mais incomplètement, par Galilée, Maxwell, Lorentz et Poincaré. Pour cela, il lui faut prendre certaines décisions courageuses et pertinentes (que Lorentz et Poincaré ont parfois osé envisager, sans pour autant les mener à leur terme).

Einstein, simultanément, supprime la notion d'éther, abolit la notion de temps et d'espace absolus et érige en principe physique la limitation de la vitesse c de la lumière (environ 300 000 km/h) qu'aucun phénomène ne peut dépasser. Celle-ci devient ainsi une constante universelle.

C'est dans cette prise de décisions révolutionnaires qui abolit plusieurs millénaires de croyance scientifique que se montre le génie d'Einstein.

Einstein élimine ainsi toutes les ambiguïtés scientifiques qui existaient auparavant. Le principe de relativité peut alors s'appliquer pleinement. L'éther n'existant plus, tous les référentiels mis en jeu dans le phénomène d'induction (l'aimant et le circuit fermé) sont bien de même nature galiléenne. Einstein, en s'appuyant totalement sur les équations de transformation de Lorentz et de Poincaré, peut enfin démontrer que les deux jeux d'équations de Maxwell n'ont plus lieu d'exister, puisque ces équations sont devenues symétriques. Il donne ainsi, contrairement à ce dernier, une seule explication à deux effets qui semblaient totalement indépendants, preuve que son intuition était parfaitement fondée. C'est pourquoi il peut annoncer que les phénomènes électromagnétiques, tout comme ceux liés à la physique classique, obéissent bien au principe de relativité défini par Galilée, réconciliant ainsi la mécanique classique et l'électromagnétisme.

La pyramide ébauchée par ses illustres prédécesseurs est parfaitement harmonieuse, les nouveaux concepts qu'elle sous-tendait deviennent

évidents. Le plus important d'entre eux est l'abolition d'un temps unique, universel donc absolu, remplacé par un émiettement infini de temps relatifs n'indiquant plus jamais, dans l'univers, la même heure. Einstein est, en ce début de 1905, persuadé qu'il a enfin trouvé la réponse à cette lancinante question : pourquoi les effets électromagnétiques (donc la lumière) sont-ils des phénomènes qui ne se soumettent pas au principe de relativité, comme le mouvement des corps en mécanique classique ?

Mais Einstein n'ose pas, pas plus que Lorentz et Poincaré, franchir ce pas intellectuel qui l'effraie un peu. Briser en mille morceaux relatifs, à tout jamais, l'heure divine, éternelle et absolue de Newton, n'est pas chose aisée. En effet, toujours petit employé besogneux assigné à la vérification de brevets industriels et privés, Einstein se sent terriblement isolé et complètement inconnu de tout ce qui représente la recherche scientifique de son époque. Il a besoin d'une très grande aide morale, qu'il va trouver dans le soutien indéfectible que lui porte son autre ami intime : **Michele Besso (1873-1955)**, qui fut lui aussi étudiant au Polytechnicum et qui le fit engager, en 1904, comme ingénieur à l'Office des brevets, renforçant ainsi leurs liens d'amitié réciproques.

Par un beau dimanche de printemps, moins de deux mois avant la plus fameuse publication d'Einstein sur la relativité restreinte, ils font une longue promenade dans la campagne fleurie de Berne et discutent de la relativité et de ses stupéfiantes conséquences aux niveaux temporel et spatial dans le contexte des effets électromagnétiques. Ils échangent leurs idées, les confrontent pour la énième fois à tous les travaux scientifiques précédents et s'aperçoivent, de nouveau, qu'ils sont d'accord sur tout. Aussi Besso encourage-t-il vivement Einstein à publier ce qu'il croit être la seule vérité possible : le temps et l'espace absolus, universels, de Newton, sont révolus, ils n'ont plus lieu d'exister !

Fort de ce soutien moral, Einstein se met vaillamment au travail. Comme Poincaré avait démontré et écrit que plus rien n'était absolu, tout mouvement ne pouvait être que relatif, Einstein n'a plus qu'à reprendre presque mot pour mot ce raisonnement, en y ajoutant quelques additifs mathématiques judicieux. Ayant d'une part éliminé l'éther, ce référentiel toujours immobile, et s'inspirant donc d'autre part fortement des améliorations effectuées par Poincaré sur les équations de transforma-

tion de Lorentz, Einstein élabore, dans un premier temps, ses propres équations de transformation qui permettent de passer d'un repère galiléen à un autre et de calculer avec une très grande précision les effets relativistes créés par des phénomènes se propageant à de très grandes vitesses. Citons deux exemples.

En 1971, des scientifiques ont pu comparer pour la première fois les temps donnés par deux horloges situées dans deux référentiels galiléens différents (ou considérés comme tels). L'une était embarquée dans un satellite tournant autour de la Terre à une vitesse quasi uniforme, l'autre restant sur Terre. Après de très nombreuses rotations du satellite, ils constatèrent que le temps indiqué par l'horloge satellisée indiquait un retard significatif (de l'ordre de la seconde) par rapport à celle restée sur Terre. Ce qui montrait bien la dilatation du temps (donc son ralentissement) lors même que les vitesses devenaient importantes.

Dans la très haute atmosphère de notre planète, à 10 000 mètres d'altitude, des particules appelées « muons » naissent grâce aux rayons cosmiques qui bombardent constamment les molécules de gaz qui s'y trouvent. Même si leur durée de vie est très éphémère (de l'ordre de deux millionièmes de seconde), leur vitesse, frôlant celle de la lumière, leur permet quand même de parcourir environ 500 mètres. Alors, par quel miracle peuvent-elles atteindre le sol de la Terre ? Tout simplement parce qu'elles vivent, vu leur très grande vitesse, vingt fois plus lentement que nous, ce qui leur permet alors d'atteindre la Terre (500 multiplié par 20 donne bien 10 000 mètres). Ces particules, du fait de leur vitesse de déplacement, voient les distances se raccourcir terriblement. Pour elles, relativement parlant, les 10 000 mètres n'en font plus que 500 !

Lorentz, Poincaré et Einstein avaient entièrement raison quant à la réalité des effets relativistes.

Enfin, Einstein met noir sur blanc les idées les plus révolutionnaires de sa vie de chercheur ! Comme poussé par une force intérieure incontrôlable, il met à peine cinq semaines à rédiger l'une des plus retentissantes publications scientifiques du XXe siècle qui, répétons-le, lui permet de casser définitivement l'horloge divine cosmique et universelle donc absolue. Encore maintenant, un siècle plus tard, beaucoup n'y croient toujours pas !

Il serait injuste de ne pas souligner que le destin d'une grande partie de la physique de cette époque a aussi basculé, en ce mois de mai 1905, grâce à Besso, qui aura donné la petite impulsion poussant la nouvelle théorie relativiste à rouler irréversiblement. D'ailleurs, Einstein reconnaissant ne citera en référence que son ami : « Je tiens à dire que mon ami et collègue Michele Besso m'a constamment prêté son précieux concours (...) Je lui suis redevable de maintes suggestions intéressantes. »

Il faut désormais admettre que tout ce que nous vivons et ressentons depuis toujours dans notre environnement physique (spatial et temporel) n'existe en fait pratiquement pas. Quelle injure au sens commun façonné par les milliers de générations qui nous ont précédés ! Ce monde étrange, où règne en maître un espace-temps quadridimensionnel, sonne à la fois le glas d'une physique classique vieille de plusieurs millénaires et la naissance d'une physique relativiste, qui le deviendra d'autant plus que l'on approchera de la vitesse de la lumière.

En cette année extraordinaire, des millénaires de croyances erronées se trouvèrent englouties à tout jamais. Einstein fit plus, il permit à une autre lumière d'éclairer tout le XXe siècle, avec ses bons et, hélas, ses très mauvais côtés : c'est $E = mc^2$.

Inspirations multiples

La prouesse accomplie par Einstein, tout en s'appuyant sur toutes les recherches scientifiques accomplies avant lui, est due essentiellement à sa logique de pensée. En réalité, contrairement à ce qu'il fera pour sa théorie sur la relativité générale, il n'a ici guère innové. D'ailleurs, les premiers scientifiques allemands qui ont lu sa publication ont cru que c'était simplement une compilation des travaux antérieurs effectués par Lorentz et Poincaré ! Dans la construction d'un puzzle de concepts à rendre cohérent, fait d'une multitude de connaissances et de travaux scientifiques (parfois totalement contradictoires) éparpillés sur plus de trois siècles, Einstein a su, grâce à sa très grande imagination et à son fort tempérament, adopter les bons raisonnements et prendre les bonnes initiatives pour construire une théorie universelle compréhensible par tous.

Cependant, pour démontrer la relativité restreinte, fallait-il obligatoirement passer par des phénomènes électromagnétiques mal compris. En effet, depuis pratiquement le milieu du XIXe siècle, les savants étaient conscients que la vitesse de la lumière n'était pas infinie et se doutaient que cette vitesse représentait une limite physique infranchissable (et ne pouvait donc certainement pas obéir aux règles classiques d'addition). Avec ces hypothèses, on aurait déjà pu dire, dans la mesure où des phénomènes physiques se réalisent à des vitesses proches de celle de la lumière, que le temps et l'espace étaient forcément relatifs.

Explicitons nos propos. Dans la formule très simple ($x = vt$) qui donne la vitesse ($v = x/t$), c'est cette vitesse qui change constamment en fonction du temps t mis pour parcourir la distance parcourue x. Si v devient la vitesse c de la lumière, il ne reste plus, puisque c ne peut changer de valeur, qu'à jouer sur les valeurs de x et de t : la longueur x peut se rétracter, le temps se dilater, etc., alors les valeurs x (d'espace) et t (de temps), d'absolues, deviennent forcément relatives !

Ce raisonnement est peut-être réducteur (et certainement provocateur) mais il aurait pu, en s'appuyant sur la relativité et les référentiels galiléens, être la source d'une autre démarche scientifique, certainement plus simple. Cela aurait épargné bien des nuits blanches à Lorentz, à Poincaré et bien sûr à Einstein !

Mais cela fit le bonheur et la gloire de ce dernier. D'ailleurs, comment imaginer un XXe siècle sans Einstein ? Il nous aurait terriblement manqué !

$E = mc^2$

$E = mc^2$ est certainement la formule la plus célèbre au monde : chacun la connaît, mais sans forcément comprendre ce qu'elle signifie. Elle est révolutionnaire pour trois raisons essentielles.

Premièrement, elle réunit deux mondes, l'énergie et la masse, que tout scientifique, à l'époque, pensait complètement indépendants.

Deuxièmement, idée totalement nouvelle, elle démontre implicitement que la masse et l'énergie sont les deux facettes d'une même entité (la masse est énergie et réciproquement).

Enfin, elle utilise comme facteur de conversion entre l'énergie et la masse la vitesse de la lumière, ce que personne, en 1905, n'avait pu ou osé penser.

Cette formule n'est pas venue spontanément à Einstein. Elle n'est qu'une conséquence purement mathématique et logique de sa théorie sur la relativité restreinte, l'aboutissement harmonieux d'un raisonnement purement intellectuel, comme la cerise sur le gâteau. En effet, cette formule parachève d'une manière particulièrement élégante et esthétique tous les travaux d'Einstein dans ce domaine. On a même l'impression qu'il déposa cette « cerise » avec un certain regret, puisque ce n'est que deux mois après avoir envoyé sa publication sur la relativité restreinte qu'il fit parvenir à la revue *Annalen der Physik* un additif constitué de cinq pages intitulé : « L'inertie d'un corps dépend-elle de sa capacité d'énergie ? ». Cette fameuse formule, à laquelle il n'avait jamais songé auparavant, lui semblait ésotérique et quelque peu irréaliste, sans réalité physique quelconque. D'ailleurs il écrit fin 1905 à son ami Habitch, en parlant de l'équivalence entre énergie et masse : « Cette idée me divertit et me fascine, je ne sais pas si Dieu ne s'amuse pas de tout cela et ne me mène pas par le bout du nez. » En songeant à la bombe atomique, Einstein aurait plutôt dû penser au diable !

Ici, on retrouve Poincaré. En 1900, il avait eu une étonnante intuition, démontrant que la masse d'un corps diminue d'un rapport égal à E sur c^2 lorsque ce corps dégage une énergie E sous forme de rayonnement. Mais Poincaré n'a jamais explicitement écrit $E = mc^2$ ni déclaré qu'il existait une équivalence entre la masse et l'énergie (il est d'ailleurs étonnant de constater que ce n'est qu'en 1912 qu'Einstein écrivit réellement $E = mc^2$ dans son livre intitulé *Sur la théorie de la relativité*).

Démontrer que la masse et l'énergie sont équivalentes et introduire en physique la vitesse c de la lumière comme constante universelle sont deux des apports les plus intéressants et les plus féconds qu'Einstein ait légués à la physique du XXe siècle, prouesse scientifique dont la physique classique, heureusement, ne se remettra jamais.

Plus de détails...

■ Que représente E ?

E représente l'énergie, mais qu'est-ce que l'énergie ? Étonnamment, on ne sait toujours pas la définir explicitement, on sait simplement qu'elle permet de fournir du travail. C'est pourquoi elle apparaît pour la première fois au milieu du XVIIIe siècle, pour expliquer comment fonctionne une machine à vapeur.

Dans la nature, tout est énergie, puisque toute transformation ou tout transfert utilise de l'énergie. Ainsi, toute matière ou tout phénomène naturel peut être source d'énergie : notre corps, nos muscles, le charbon, l'électricité, la chaleur, les hydrocarbures, l'uranium, les rivières, les marées, les volcans... On en distingue donc plusieurs formes, dont les plus importantes sont d'origine cinétique, potentielle (liée généralement à un corps qui tombe), hydraulique, nucléaire, électrique.

Tout système énergétique isolé possède une énergie totale qui reste toujours constante, et surtout, ce système ne peut pas, de lui-même, créer ou faire disparaître de l'énergie. La conséquence fondamentale de ce postulat est qu'il ne peut exister dans l'univers que, d'une part, des transferts d'énergie d'un système à un autre et, d'autre part, des transformations d'une forme d'énergie en une autre. Cependant, ces transferts ou ces transformations s'accompagnent toujours d'une perte d'énergie plus ou moins grande (l'exemple le plus connu est celui du rendement de la voiture, qui est seulement de l'ordre de 30 %). Ainsi, et c'est étonnant, l'univers possède une quantité totale d'énergie qui restera constante à jamais.

Le génie d'Einstein a été de découvrir une forme d'énergie que personne ne soupçonnait, celle qui pouvait naître de la disparition d'une partie de la masse d'un corps. Cette hypothèse paraissait alors complètement farfelue. Pourtant, c'est ce que reflète la formule $E = mc^2$, où E représente notamment l'énergie nucléaire qu'Einstein ne pouvait, en 1905, pas même soupçonner.

Et puis, cette formule montre qu'une énergie peut se transformer en matière. Nous devons d'ailleurs notre existence à cette transformation,

puisque le phénoménal big-bang permit à l'univers de se construire à partir d'une pure énergie.

$E = mc^2$ induit aussi le fait que tout système physique qui possède, sous une forme quelconque, une énergie E au repos, a forcément une masse inertielle m. Einstein, par cette équivalence, a introduit, tout comme pour une masse, le principe d'inertie de l'énergie.

Que représente m ?

La notion de masse, tout comme celle d'énergie, ne se définit pas aisément. Au départ, disons simplement qu'elle représente la quantité de matière contenue dans un corps.

En général, tout le monde identifie la notion de *masse* à celle de *poids*. Cette vision est fausse, car ce dernier est donné par le produit de la masse par l'accélération due à la pesanteur. Ainsi, bien qu'ayant toujours la même masse, vous ne pèserez pas le même poids si vous êtes sur Terre, sur la Lune ou en état d'apesanteur (dans lequel votre poids est nul ; la télévision a popularisé cet état en montrant des astronautes flottant dans leur satellite). C'est la notion de masse *pesante* ou *grave*.

De la même façon, nous identifions la notion de masse à la notion de poids lorsque nous voulons déplacer un objet quelconque. Plus un objet est lourd, plus vous avez de mal à le déplacer ; on dit alors que son inertie est plus grande. C'est la notion de masse *inertielle*.

Einstein va démontrer après les années 1910, dans le cadre de sa théorie sur la relativité générale, que les masses pesante et inertielle sont équivalentes.

C'est le chimiste français **Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)** qui a démontré que toute matière, toute substance, tout objet a une masse et que toute matière peut être transformée en une autre matière mais qu'en aucune façon elle ne peut disparaître. L'univers est donc doté d'une masse globale invariante qui ne changera jamais.

Ainsi, tout comme il y a une loi de la conservation de l'énergie, il y a une loi de la conservation de la masse.

En approfondissant ses réflexions sur $E = mc^2$, Einstein démontre en 1913 que ce n'est pas la masse seule qui est invariante, mais le couple

« masse-énergie ». Cette affirmation a été une contribution essentielle à l'achèvement de sa théorie sur la relativité générale.

Que représente c ?

c représente la vitesse de la lumière dans le vide ; disons qu'elle est représentée par la lettre « c » comme *celeritas*, mot latin qui a donné « célérité », synonyme de rapidité, de promptitude dans l'exécution d'une action.

Comme nous l'avons déjà souligné, depuis l'Antiquité, la lumière apparaît comme un phénomène instantané. Ce n'est qu'au milieu du XIXe siècle, lorsqu'ils commencent sérieusement à étudier les phénomènes électriques et magnétiques, que les savants s'y intéressent de plus près.

C'est le physicien allemand **Wilhelm Eduard Weber (1804-1891)** qui pour la première fois, en 1848, utilisa un facteur de conversion, qu'il baptisa « c », pour passer, dans une de ses formules mathématiques, d'une unité de charge électromagnétique à celle d'une charge électrostatique. Ce n'est qu'en 1856, en approfondissant ses travaux, qu'il émet l'hypothèse que ce facteur « c » pourrait correspondre à la vitesse c de la lumière, tant était grande la vitesse des réactions réciproques entre un aimant et un circuit conducteur fermé.

Puis, en 1873, Maxwell assimile c à la vitesse de la lumière dans ses célèbres équations mathématiques pour unifier les phénomènes électriques et magnétiques.

Enfin, en 1905, Einstein en fait une constante universelle au même titre que les constantes G de gravitation et h de Planck.

Conséquence très importante, ces constantes ont façonné tout l'univers par leur rôle structurant. La constante c notamment, en passant progressivement d'une vitesse peu élevée à celle de la lumière, nous fait peu à peu basculer de notre monde classique à celui relativiste régenté par d'autres lois physiques.

Pourquoi c est-il au carré ?

Tout comme la loi statistique purement empirique des 80/20, le fait d'élever au carré un terme figurant dans une équation mathématique reflète un rapport entre certains phénomènes naturels, ou l'invariance de certains phénomènes physiques se déroulant dans notre univers terrestre.

Un exemple très simple va vous montrer que ceci est absolument normal.

Examinons ce qui se passe quand deux voitures de même poids roulent sur une route, à la même vitesse, mais en sens contraire, et, malheureusement, se percutent. En simplifiant à l'extrême, si leur « énergie » cinétique individuelle est égale à $\frac{1}{2} mv^2$, il est simple de voir que l'énergie totale dégagée par le choc frontal sera

$$\frac{1}{2} m(+v)^2 + \frac{1}{2} m(-v)^2 = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} mv^2 = mv^2$$

Maintenant, imaginez un instant que la vitesse ne soit pas élevée au carré, l'énergie dégagée par le choc frontal des deux voitures roulant en sens inverse serait alors :

$$\frac{1}{2} m(+v) + \frac{1}{2} m(-v) = \frac{1}{2} mv - \frac{1}{2} mv = 0$$

Cela voudrait dire que toutes les voitures circulant sur les routes pourraient se tamponner allègrement sans dégager une énergie quelconque, donc sans provoquer un seul petit dégât ! La réalité, hélas, est bien différente.

C'est pourquoi une élévation au carré d'un terme dans une formule mathématique est parfois indispensable pour refléter une réalité physique. Il est à noter que dans le cas de c^2, cela représente un chiffre multiplicateur énorme. En effet, comme c = 300 000 km/s ou 300 000 000 m/s ou 3×10^8, la valeur de c^2 est alors égale à 9×10^{16}, soit environ 10^{17}.

Il est tout à fait normal que cela ne vous dise rien. Mais sachez quand même que si la page que vous êtes en train de lire pèse dix grammes et qu'elle se transformait en énergie pure, comme $E = mc^2$ le suggère, elle

permettrait, très théoriquement, d'élever la température de plusieurs millions de m^3 d'eau de un à cent degrés !

Vous commencez certainement à mieux comprendre pourquoi une bombe atomique contenant trente kilogrammes d'une matière radioactive (uranium par exemple) fait autant de dégâts effrayants ; et pourtant, son « rendement » n'est que de l'ordre de 1 % !

■ Galilée et $E = mc^2$

Élaborer la formule la plus célèbre au monde n'est guère difficile. En utilisant une logique et des outils mathématiques à la portée de tout lycéen qui prépare son baccalauréat, nous pouvons effectuer une démonstration plus simple que celle effectuée par Einstein mais aboutissant au même résultat.

Il suffit d'avoir à l'esprit d'une part que les principes de conservation de la masse, de l'énergie et donc de la quantité de mouvement sont invariants dans le contexte d'un même référentiel galiléen, et d'autre part que la quantité de mouvement d'une masse m qui se déplace à une vitesse v déterminée est donnée par la formule $p = mv$.

En suivant notre démarche, ironie d'un sort scientifique contraire, Galilée, trois siècles avant Einstein, aurait presque pu construire cette formule, car il croyait à une vitesse limitée de la lumière (rappelons qu'il avait essayé de la mesurer avec d'illusoires lanternes). Quant à Maxwell, cinquante ans avant Einstein, il aurait pu, sans aucun problème, l'élaborer. Quel séisme scientifique cela aurait créé ! Rappelons enfin que Poincaré l'avait pratiquement écrite cinq ans avant Einstein !

Deuxième période (1906-1915)

Théorie sur la relativité générale

En 1906, pour initier cette nouvelle théorie, Einstein peut s'appuyer sur tous les acquis scientifiques qu'il a démontrés avec sa théorie sur la relativité restreinte.

Premièrement, la vitesse de la lumière n'est plus instantanée mais limitée. Elle est devenue une constante universelle, « c ».

Deuxièmement, les notions de temps et d'espace absolus, chers à Newton, n'existent plus ; ils sont devenus relatifs, dans la mesure où deux observateurs situés dans des référentiels galiléens distincts perçoivent l'espace et le temps d'une façon différente.

Troisièmement, l'invariance des lois physiques pour passer d'un référentiel galiléen à un autre est acquise.

Quatrièmement, l'équivalence de l'énergie et de la masse d'un corps est devenue une réalité. Elle est résumée dans la très célèbre formule $E = mc^2$.

Einstein peut alors construire sa théorie sur la relativité générale. Il le fera en trois étapes.

De 1906 à 1910, il élabore d'abord les deux principes de base de sa future théorie gravitationnelle et détermine les trois tests à partir desquels elle pourra être vérifiée. Suit alors une période de réflexion durant laquelle il comprend qu'il ne peut pas développer cette nouvelle théorie à partir d'une simple généralisation de celle sur la relativité restreinte.

De 1911 à mi-1912, c'est l'assimilation d'un nouveau concept mathématique découvert par Poincaré et enrichi par **Hermann Minkowski (1864-1909)**, son ancien professeur de mathématiques : le fameux « espace-

temps » à quatre dimensions qui l'amène progressivement, après de très nombreuses réflexions, à élaborer le cadre mathématique précis dans lequel sa théorie doit s'inscrire.

La troisième étape, de mi-1912 à la fin 1915, consiste essentiellement à comprendre et à utiliser certaines théories (notamment celle de **Bernhard Riemann (1826-1866)** sur les univers courbes à n dimensions) et outils mathématiques (le calcul tensoriel) inconnus des physiciens de l'époque qui lui permettront d'élaborer son espace-temps courbe quadridimensionnel. Ce n'est qu'ensuite qu'il pourra mener à son terme sa nouvelle théorie relativiste de la gravitation. Celle-ci sera concrétisée par une unique équation tensorielle.

1906-1910 : Nouvelle théorie relativiste gravitationnelle

Généralisation

Einstein est fatigué de tous les efforts fournis durant l'année 1905, aussi l'année 1906 sera-t-elle relativement calme. Même si ses extraordinaires découvertes ne sont pas encore reconnues par les scientifiques de l'époque, Einstein pourrait se reposer sur ses lauriers et attendre patiemment qu'une université ou une école d'ingénieurs lui offre un poste de chercheur ou de professeur. Outre le fait de réaliser son ambition de toujours, cela lui permettrait de s'évader de l'Office des brevets de Berne, où il croupit toujours comme simple employé besogneux – il ne garde cet emploi que pour des raisons alimentaires.

Einstein ne peut se contenter de cette situation passive, lui dont le tempérament à la fois entier, têtu et ambitieux le pousse constamment à élargir le champ de ses recherches. Il sait notamment que sa théorie sur la relativité restreinte est trop restrictive, ne correspondant ni à la réalité du monde qui nous entoure ni à ses désirs profonds. En effet, elle ne concerne que les corps qui se déplacent parallèlement les uns par rapport aux autres en des mouvements uniformes et rectilignes. Il a conscience que sa théorie a été construite sur des principes formant un cas de figure extrêmement rare aussi bien dans notre environnement

terrestre que dans le contexte de notre univers (la Lune tourne autour de la Terre qui, elle-même, tourne autour du Soleil, et tous les astres suivent des trajectoires non pas rectilignes mais curvilignes, dotées, la plupart du temps, d'une vitesse accélérée, donc non uniforme).

Aussi Einstein se pose-t-il la question suivante : « Puis-je généraliser ma théorie sur la relativité restreinte en considérant qu'elle puisse devenir un cas particulier d'une théorie relativiste générale qui prenne en compte n'importe quel mouvement d'un corps (uniforme, accéléré...) suivant une trajectoire quelconque (rectiligne, circulaire, elliptique...) ? ». Cette théorie s'appellerait alors « relativité générale ».

Par ailleurs, il est à la fois étonné et irrité par le fait que sa théorie sur la relativité restreinte, ayant permis de réunifier les phénomènes d'essence mécanique et électromagnétique grâce au principe de relativité, ne puisse pas s'appliquer à la théorie gravitationnelle de Newton, qui s'appuie pourtant sur les travaux de Galilée. La théorie gravitationnelle de Newton lui semble donc une proie toute désignée.

■ La théorie gravitationnelle de Newton

Résumons très simplement la théorie de la gravitation universelle de Newton : tous les corps, ayant une masse, s'attirent instantanément les uns les autres, les plus gros attirant toujours les plus petits ou, plus précisément, les plus lourds attirant toujours les plus légers.

Ce qui frappe le plus Einstein, c'est que Newton ait pu élaborer sa géniale théorie gravitationnelle sur les faits suivants :

Premièrement, celle-ci est entièrement bâtie dans le contexte d'un temps unique dans tout l'univers, complètement dissocié de la notion d'espace. Or, Einstein a démontré dans sa théorie sur la relativité restreinte qu'il ne pouvait exister que des temps et des espaces relatifs totalement associés, appelés « espace-temps ».

Deuxièmement, Newton n'a jamais pu donner d'explication rationnelle à l'existence des forces d'attraction qui permettent aux astres de s'attirer mutuellement et instantanément, sinon à évoquer la présence de l'hypothétique éther et, accessoirement, de Dieu ! Qu'est-ce qui peut expliquer ces forces d'attraction existant entre deux corps et s'exerçant instantanément ? Comment une planète d'une masse donnée peut-

elle « dire » à une autre planète : « Je suis plus lourde que toi, donc je peux t'attirer » ? Pour pouvoir affirmer cela, elle devrait tout d'abord connaître à la fois sa propre masse, celle de sa voisine, la distance qui les sépare et, de plus, la constante de gravitation. Après avoir appliqué la formule de Newton, dont elle aurait inexplicablement connaissance, elle pourrait enfin dire : « Je sais maintenant la valeur de la force avec laquelle je vais t'attirer ».

Troisièmement, Einstein ne peut pas accepter que le phénomène d'attraction se propage de manière instantanée, donc avec une vitesse supérieure à celle de la lumière !

Quatrièmement, Newton a conçu sa théorie en partant des principes galiléens de relativité et d'inertie ; or, d'une part, les trajectoires suivies par les astres n'obéissent pas à ces principes, étant généralement curvilignes, et d'autre part les planètes subissent constamment des accélérations ou des décélérations. Une pomme qui tombe d'un arbre se garde bien d'obéir au principe de base de la relativité galiléenne car, si elle suit bien une trajectoire rectiligne, elle le fait avec une vitesse non pas uniforme, mais accélérée.

Cinquièmement, Newton a été incapable d'expliquer pourquoi tous les corps soumis à la gravitation, quel que soit leur poids, chutaient tous avec la même accélération dans un même laps de temps.

Enfin, pour couronner le tout, en ce début du XXe siècle, aucun scientifique, en s'appuyant sur la théorie newtonienne, ne peut donner une explication sérieuse de la trajectoire fantaisiste de Mercure autour du Soleil.

Pour Einstein, cela fait beaucoup trop d'interrogations sans réponse. La théorie gravitationnelle de Newton ne peut être qu'incomplète, voire construite sur de mauvaises hypothèses ; il faut donc certainement la reformuler. Mais comment ? Tout simplement en proposant une autre solution scientifique, à la fois complètement différente et totalement inédite, bâtie sur de nouveaux concepts qu'il lui reste à découvrir. Pari à la fois audacieux et invraisemblable qu'il va réussir à tenir, deux siècles après Newton.

Une étonnante découverte

Preuve que les idées d'Einstein développées dans sa théorie sur la relativité restreinte font leur chemin, le physicien allemand très connu à l'époque **Johannes Stark (1874-1957)** lui demande, au milieu de l'année 1907, de rédiger pour la revue *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* un article de synthèse sur sa théorie et ses retombées conceptuelles et pratiques.

À l'automne de cette même année, en rédigeant cet article qui lui demande une très grande rigueur pédagogique et une réflexion approfondie sur l'essence même de la relativité et de l'inertie des corps, Einstein a une sorte d'illumination. En 1919, il décrira la scène ainsi : « Assis à mon bureau à l'Office des brevets de Berne, approfondissant la notion d'inertie des corps, une image soudaine et précise s'imposa à moi : une personne tombant d'un toit ne sent pas son propre poids. Je restai immobile, ahuri, comme fasciné par cette idée. Ce fut certainement la plus heureuse que j'aie pu avoir dans ma vie. »

Quelque peu saugrenue pour le commun des mortels, cette révélation fait à Einstein l'effet d'un électrochoc. Il vient de comprendre que le poids d'un corps qui accélère en tombant sur Terre a certainement un rapport direct avec la gravitation. Pour assimiler cette hypothèse, il vous suffit de penser que vous êtes dans un ascenseur qui monte. Vous avez donc les pieds collés au plancher de la cabine ; si vous lâchez un dossier, celui-ci tombera sur le plancher. Tout cela vous paraît on ne peut plus normal. Pour Einstein, il en va tout autrement : cette situation démontre que le mouvement accéléré de l'ascenseur qui monte génère les mêmes effets que la gravitation terrestre, appelée traditionnellement pesanteur.

Par malheur, le câble qui tracte votre ascenseur se casse. En un instant, vous vous retrouvez flottant dans la cabine, tout comme votre dossier, que vous avez de nouveau lâché. Vous vous sentez immobile, et le dossier à côté de vous l'est aussi (situation identique à celle, très médiatisée, du cosmonaute en état d'apesanteur flottant dans la cabine d'un satellite). Une fois remis de vos émotions, vous conclurez, comme Einstein, que la chute accélérée de la cabine de votre ascenseur (donc simultanément de votre corps et de votre dossier) annule l'effet de la gravitation.

La conclusion étonnante de ces deux expériences est évidente : il existe bien une équivalence entre la gravitation et l'accélération. Pour Einstein, elles sont des phénomènes identiques, mais perçus sous des points de vue différents, comparables aux interactions réciproques d'un aimant et d'un circuit fermé.

À cette même époque, Einstein se demande à quoi peut ressembler matériellement le phénomène de gravitation. Là aussi, il a une idée lumineuse. Fort de ses connaissances dans le domaine de l'électromagnétisme, il réalise que, comme un aimant engendre un champ magnétique, chaque astre doit engendrer un champ gravitationnel doté de lignes de force, l'intensité de ce champ étant d'autant plus élevée que la masse de l'astre est importante.

De cette manière, il peut élargir la notion d'équivalence entre gravitation et accélération et celle entre un champ gravitationnel et un champ en mouvement accéléré (donc remplacer ces champs et leurs référentiels l'un par l'autre, et réciproquement). Ceci l'amène à penser que, tout comme dans sa théorie sur la relativité restreinte, dans le contexte de celle sur la relativité générale, les mêmes lois physiques doivent rester elles aussi invariantes dans des référentiels se déplaçant, les uns par rapport aux autres, d'une façon quelconque (uniforme, accélérée, décélérée...) et suivant des trajectoires courbes quelconques (circulaire, elliptique...).

Ce principe entraîne pour Einstein à la fois une obligation de généraliser sa théorie sur la relativité restreinte au phénomène de gravitation, et une volonté profonde d'éthique, à la fois personnelle et scientifique. En effet, il se plaisait à dire : « La nature n'a que faire des systèmes référentiels galiléens ou autres, l'homme ne les a créés que pour sa propre convenance. »

On remarque aussi que la perception des mouvements de votre corps dans la cabine de l'ascenseur sont relatifs. En effet, lorsque vous pensez être au repos dans celle-ci, une personne située à l'extérieur vous voit soit monter, soit descendre. Tout comme, dans une cabine sans hublot sur le bateau de Galilée, vous ne pouviez pas savoir si celui-ci était immobile ou pas, vous ne saurez pas plus, dans la cabine d'ascenseur, si vous êtes soumis à un effet gravitationnel ou à une accélération. En poussant le raisonnement plus loin, vous pouvez dire aussi que le poids

de votre corps est lui-même relatif puisque, suivant les mouvements de la cabine de l'ascenseur, il varie considérablement (de zéro quand vous êtes en apesanteur à votre poids normal quand l'ascenseur est immobile). Pour Einstein, tout devient alors relatif : les mouvements, l'inertie, l'accélération, le poids…

Einstein pourrait-il généraliser sa théorie sur la relativité restreinte pour développer une nouvelle théorie relativiste de la gravitation ? Cette analogie lui permettrait de s'approcher de son objectif primordial, à savoir démontrer, en s'appuyant en grande partie sur sa théorie de la relativité restreinte, que les phénomènes électromagnétiques et gravitationnels doivent obéir aux mêmes lois physiques.

Principes de base

Avec seulement deux nouveaux principes physiques simples (d'une part l'équivalence de la gravitation et de l'accélération, d'autre part l'invariance des lois physiques dans les référentiels ou systèmes de coordonnées se déplaçant les uns par rapport aux autres avec des mouvements quelconques), Einstein se propose donc de construire une nouvelle théorie relativiste de la gravitation en lieu et place de celle de Newton. Ceci a pour conséquence immédiate d'expliquer le phénomène gravitationnel sans avoir recours à la fois à des forces d'attraction existant entre deux corps et à des notions d'espace et de temps absolus reconnues depuis plus de deux siècles comme les fondements intouchables de la gravitation newtonienne. Aussi ne manque-t-il pas de développer avec empressement et enthousiasme toutes ses idées, extraordinairement novatrices, dans la dernière partie de l'article de synthèse demandé par Johannes Stark (avec comme sous-titre « Principe de relativité et gravitation ») qu'il finit de rédiger en novembre 1907.

Dans ce même article, Einstein propose aussi deux tests qui doivent permettre de vérifier ses étonnantes hypothèses. Ce sont deux phénomènes naturels impossibles à expliquer avec la théorie gravitationnelle de Newton.

Le premier doit constater le décalage qui existe entre la fréquence des rayonnements des atomes perçus au niveau du Soleil et celle enregistrée au niveau de la Terre (toutes ces fréquences étaient considérées par

Einstein comme des « horloges naturelles »). Plus généralement, ce test doit montrer qu'une raie d'émission d'un atome est d'autant plus décalée vers le rouge (vers des fréquences plus basses) que la densité du champ gravitationnel dans lequel elle est émise est importante.

Le deuxième doit calculer la déviation d'un rayon lumineux près du Soleil due au champ gravitationnel qu'il crée autour de lui.

Ce test lui a été suggéré par l'observation suivante : Quand vous êtes dans l'ascenseur qui monte avec un mouvement accéléré, vous pouvez considérer, grâce au principe d'équivalence entre l'accélération et la gravitation, que vous vous situez dans un champ gravitationnel. Imaginons maintenant qu'un rayon lumineux pénètre par un trou se situant dans une paroi latérale de la cabine ; tout naturellement, vous constaterez que ce rayon se propage suivant une ligne horizontale. En revanche, suivant le principe de la relativité galiléenne, une personne située à l'extérieur de la cabine de votre ascenseur verra au contraire ce rayon lumineux s'incurver et donc atteindre la paroi opposée en un point situé légèrement au-dessous de l'horizontale (pensez à la trajectoire parabolique perçue par vous, immobile sur le quai, suivie par la bouteille que le marin laisse tomber du sommet du mât du bateau de Galilée). Einstein peut donc en déduire qu'un champ gravitationnel incurve un rayon lumineux.

Peu après, à la fin de l'année 1907, il propose un troisième test, qui doit expliquer pourquoi la trajectoire de Mercure autour du Soleil présente une anomalie (découverte, en 1859, par l'astronome français **Urbain Le Verrier (1811-1877)**). En effet, Mercure, contrairement aux lois newtoniennes, au lieu de toujours passer au même endroit par rapport au Soleil, dérive régulièrement au niveau de sa périhélie (point le plus proche de ce dernier). Outre le fait que la théorie gravitationnelle de Newton est incapable d'expliquer cette anomalie, Einstein propose ce test pour une raison beaucoup plus subtile. Comme nous le savons, sa théorie sur la relativité restreinte implique des vitesses très importantes, proches de celle de la lumière, pour en percevoir les effets d'une façon concrète. Or, les planètes dans l'univers ne parcourent évidemment pas leurs trajectoires à cette vitesse. Ainsi, la Terre ne parcourt que 20 km par seconde, soit 15 000 fois moins vite que la vitesse de la lumière ! Mais nous savons, grâce aux lois de Képler, que, dans notre système solaire, plus

une planète est proche du Soleil, plus sa vitesse de déplacement par rapport à ce dernier est importante, et plus on a de chances de détecter des effets relativistes, certes faibles, mais discernables. Or, comme par hasard, la planète la plus proche du Soleil est Mercure et c'est justement celle-ci qui présente une anomalie de trajectoire lorsqu'elle se trouve au point le plus proche de lui. Cette coïncidence n'a pas échappé à Einstein, qui pense intuitivement que sa future théorie relativiste doit pouvoir enfin l'expliquer.

Ainsi, dès la fin de 1907, avec seulement deux principes jusqu'alors inconnus de la communauté scientifique et trois tests à confirmer, Einstein affirme avec une certitude frisant l'arrogance que la théorie gravitationnelle de Newton est bel et bien morte et doit être remplacée par la sienne. Il met même au défi les physiciens de son époque de démontrer qu'au moins un de ses trois tests est faux.

Une incrédulité totale s'empare du monde scientifique quand cet article paraît, en janvier 1908. C'est parfois un tollé, mais, plus grave encore, le plus souvent un silence très pesant, reflétant une grande gêne. Comment, vouloir remplacer le grand Newton après Maxwell ? Décidément, ce petit employé, simple vérificateur de brevets, dépasse les bornes ! Mais cela ne touche guère Einstein, qui a depuis longtemps faite sienne la maxime : « Quand les bornes sont franchies, il n'y a plus de limites » !

Les années 1908 à 1910 n'apportent rien de nouveau dans l'élaboration de sa nouvelle théorie sur la gravitation ; au contraire, ce sont des années parsemées d'essais, de doutes et, bien souvent, d'espoirs déçus. En effet, les démonstrations mathématiques qui s'appuient sur l'ensemble des concepts développés dans sa théorie sur la relativité restreinte n'aboutissent pas. Après 1910, il devra repartir vers d'autres horizons sur la base de réflexions plus solides.

Durant cette période, la situation professionnelle d'Einstein s'améliore brusquement, entraînant de grandes perturbations dans ses activités de chercheur. Début 1908, il donnait gratuitement des cours à l'université de Berne ; un an après, il quitte son emploi de vérificateur de brevets pour devenir enfin universitaire à part entière, ayant obtenu un poste de professeur à temps plein à l'université de Zurich (au grand étonnement du directeur de l'Office des brevets, qui lui dit : « Je ne comprends

pas pourquoi vous délaissez un si brillant avenir dans mon institut pour un poste dans une université » !).

Il réalise enfin son rêve de toujours. Il est enchanté, mais ses nouvelles fonctions vont l'occuper entièrement jusqu'en 1911, tant il lui tient à cœur de préparer et de dispenser ses cours d'électromagnétisme, de mécanique classique et de statistiques. Paradoxalement, il ne donne à cette époque aucun cours sur ses nouvelles théories ni sur le principe de relativité.

1911-mi-1912 : Dans la quatrième dimension

Nouvelles recherches sur la gravitation

1911 est l'année où Einstein reprend sérieusement ses recherches sur la gravitation. Deux faits importants vont l'y inciter. D'abord, après avoir tâtonné durant plusieurs années, il commence vaguement à percevoir dans quelle direction orienter ses recherches pour construire une véritable théorie relativiste de la gravitation. Ensuite, fin 1910, il quitte l'université de Zurich pour celle de Prague où il est nommé professeur associé, ce qui lui permet de consacrer plus de temps à ses recherches sur la gravitation.

■ Un disque en rotation rapide

Depuis 1908, Einstein tourne en rond dans ses réflexions, car il sait que sa future théorie relativiste gravitationnelle ne peut pas être une généralisation de celle sur la relativité restreinte. Simplement, il est sûr que les deux principes et les trois tests qu'il a formulés en 1907 sont justes et incontournables pour élaborer et vérifier sa future théorie. Cependant, bien que certain du cadre dans lequel il doit élaborer sa théorie, il ne sait toujours pas comment la construire. Comme toujours, c'est une expérience de pensée qui va le faire évoluer dans sa réflexion.

Il imagine un disque qui tourne rapidement autour de son axe et un observateur au centre de celui-ci (c'est-à-dire à la place de l'axe) qui

devra effectuer un certain nombre d'expériences pratiques à l'aide de deux horloges (l'une placée au centre, l'autre sur le bord du disque) et d'une très petite règle rigide graduée (placée tangentiellement sur ce dernier). Le résultat de ces expériences permet à Einstein de déduire trois conséquences très importantes.

Premièrement, elles confirment qu'un champ gravitationnel ralentit le cours du temps.

Deuxièmement, elles attestent que dans deux référentiels différents, il ne peut pas exister de simultanéité vraie (les deux horloges n'indiquant pas la même heure), ce qu'il avait déjà démontré d'une autre façon dans sa théorie sur la relativité restreinte, dans le contexte de deux référentiels galiléens.

Troisièmement, si le mouvement d'un corps (la règle graduée) suit une trajectoire courbe avec une vitesse accélérée, ce corps se déforme (la règle se rétrécit). Poussant plus loin sa réflexion, Einstein subodore que ce n'est pas celle-ci qui se rétrécit mais que c'est plutôt l'espace entourant le disque en rotation qui subit cette déformation, ce qui lui permet de penser que c'est sous l'effet de la gravitation que ce dernier se déforme : de plat, il devient courbe. Cette hypothèse implique une énorme conséquence : les coordonnées classiques d'un référentiel galiléen ne peuvent plus être utilisées, puisqu'elles ne traitent que de corps rigides, de longueur fixe, animés d'une vitesse uniforme dans le contexte d'un univers plat. Aussi, très logiquement, Einstein pense-t-il que pour expliquer le phénomène de gravitation, il faut peut-être renoncer à la géométrie euclidienne, vieille de plusieurs millénaires, pour une autre, applicable à des univers courbes.

Cette nouvelle expérience de pensée est pour Einstein d'une importance capitale car elle lui permet, d'une part, de faire une transition naturelle entre sa théorie sur la relativité restreinte et celle sur la relativité générale et, d'autre part, d'utiliser à la fois des principes appartenant à chacune de ces deux théories pour déboucher véritablement sur la construction d'une nouvelle et inédite théorie relativiste de la gravitation. Einstein va alors faire véritablement le deuil de sa théorie sur la relativité restreinte, car il comprend que celle-ci n'est pas généralisable dans son intégralité. Aussi va-t-il devoir maîtriser un nouveau monde physique courbe, où plus rien n'est plat. Il ne le fera qu'au prix d'immenses et très pénibles

efforts intellectuels, puisque cet univers courbe ne pourra être domestiqué qu'avec des outils mathématiques novateurs et intellectuellement très difficiles d'accès, jamais utilisés par un physicien pour développer une théorie physique de cette importance.

Cette expérience de pensée marque le début de sa profonde métamorphose, mieux encore, elle est l'acte de naissance d'un Einstein mathématicien qui estompera peu à peu le génial physicien. Mais comme ce sera dur ! Il avouera plus tard : « Ces années-là furent les plus harassantes de ma vie. »

Euclide est mort, vive Gauss !

Durant tout le XIXe siècle, des mathématiciens éprouvèrent le besoin de conceptualiser, grâce à de nouveaux outils mathématiques, certaines théories physiques (notamment celles liées à des phénomènes de torsion et d'élasticité en mécanique, de potentiel et de champ en électromagnétisme), les entraînant dans un monde non euclidien courbe à n dimensions. Pour comprendre comment ce monde peut se concevoir physiquement, faisons, comme Einstein, une expérience de pensée.

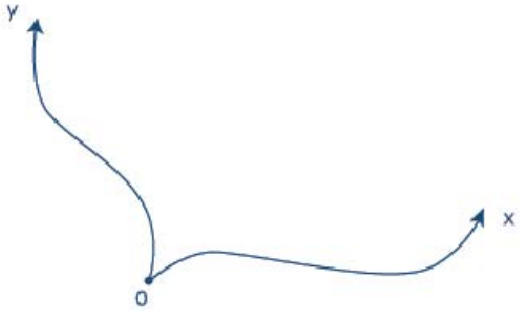
Imaginez que vous êtes très grand et que vous habitez une planète ronde et toute petite, de sorte que votre environnement immédiat, au lieu d'être plat, comme sur Terre, est courbe. Vous vous trouvez alors dans un monde étrange où le maçon ne peut pas construire de murs droits (le fil à plomb ne servant à rien) et le géomètre a beaucoup de peine à définir des longueurs, des largeurs et donc des surfaces (la règle et le compas n'ayant plus aucune utilité). Dans ce contexte, vous ne pouvez pas utiliser la géométrie euclidienne, car les systèmes de coordonnées sont constitués non pas de droites, mais de courbes non perpendiculaires entre elles, et les droites ne sont plus que des courbes, ce qui a pour conséquence évidente que par deux points distincts peuvent en passer une infinité. La somme des angles d'un triangle n'est plus égale à 180 degrés, et le très fameux théorème de Pythagore ne peut pas être appliqué, puisque les triangles rectangles ne peuvent plus exister. Avouez que vous auriez beaucoup de difficultés à vous adapter à un monde aussi étrange. Pourtant, cela ne gêne en rien les habitants de cette petite planète qui, forcément habitués à une géométrie non eucli-

dienne, considéreraient peut-être que notre brave géométrie terrienne est complètement farfelue.

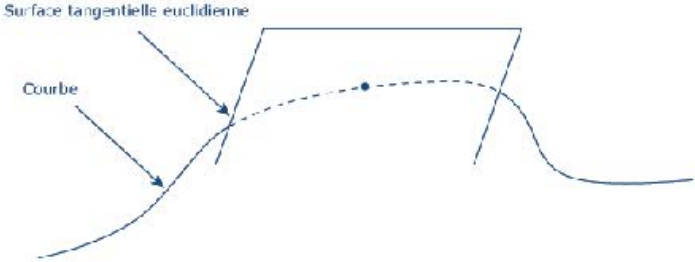
C'est par hasard que **Carl Friedrich Gauss (1777-1855)** va développer les bases théoriques de cette nouvelle géométrie non euclidienne pouvant s'appliquer aux surfaces courbes. Ayant la mission d'effectuer un relevé cartographique complet du royaume de Hanovre, il se trouve confronté au problème bassement matériel suivant : comment traduire les courbes d'un relief (colline, vallée....) et, plus généralement, la courbure de la Terre, de façon la plus précise possible, sur la surface plane à deux dimensions des cartes géographiques ? Pour cela, il recourt à deux astuces.

Tout d'abord, il utilise un référentiel, ou système de coordonnées, dont des axes curvilignes sont non perpendiculaires, généralisant en cela les coordonnées euclidiennes.

Présentation graphique d'un référentiel doté d'axes curvilignes



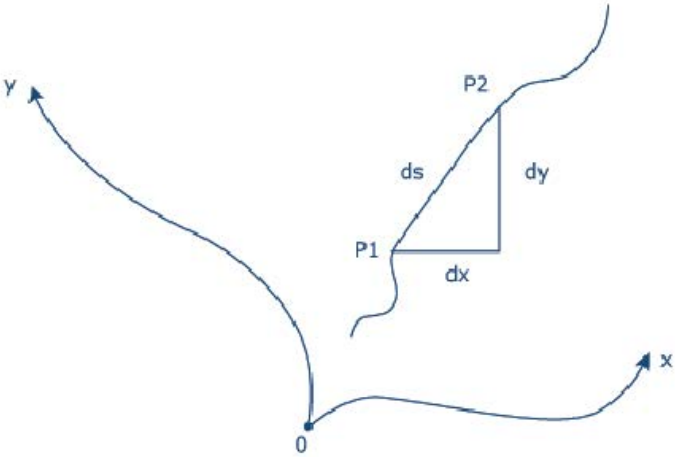
Puis il se sert d'une règle rigide graduée, la plus petite possible, pour mesurer les distances sur une surface courbe (en effet, pour connaître la longueur qui sépare deux points sur une courbe, on est d'autant plus précis dans les mesures que la règle est petite). Ainsi, l'utilisation de cette très petite règle graduée théorique (autour d'un point quelconque d'une courbe) lui permet de dire que, très ponctuellement, il se situe sur une surface plane euclidienne, donc de courbure nulle, située tangentiellement au point considéré de la courbe.



Grâce à cette astuce, il peut donc utiliser le théorème de Pythagore pour calculer la longueur d'une très petite portion de cette courbe comme le montre la figure suivante. Cela lui permet donc aussi de calculer, de proche en proche, la distance entre deux points (P1 et P2) situés très près l'un de l'autre sur une courbe d'une surface quelconque. Il appela cette distance « élément linéaire ds ».

Ce dernier, initialement, en appliquant le théorème de Pythagore, a pour valeur la somme des carrés des distances représentées dans les coordonnées euclidiennes, à savoir : $\mathbf{ds^2 = dx^2+dy^2}$ ou $\mathbf{ds = \sqrt{(dx^2+dy^2)}}$.

Calcul de « ds » dans le contexte de coordonnées curvilignes

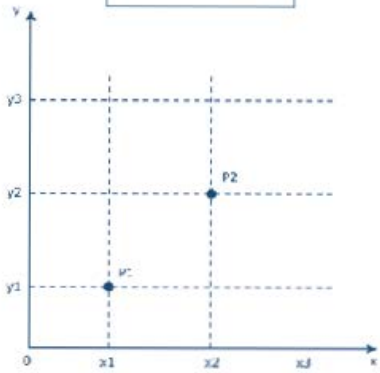


Gauss s'aperçoit que pour être encore plus précis, c'est-à-dire plus près de la réalité physique quant à la longueur de l'élément « ds », il faut quand même tenir compte, quelle que soit la petitesse de la distance entre les deux points P1 et P2, des caractéristiques physiques de la surface courbe. En effet, dans ces conditions, les côtés du triangle rectangle, de rectilignes, deviennent curvilignes, ce qui engendre obligatoirement une imprécision dans la traduction d'un relief courbe sur une carte géographique plane. En effet, une ligne courbe tracée entre deux points est toujours d'une longueur plus grande que celle d'une droite. Pour rectifier cette imprécision, il a l'excellente idée d'utiliser des coefficients numériques, E et F, qui permettent de passer de la longueur d'une ligne courbe du relief terrestre à celle d'une droite que l'on pourra dessiner sur une carte géographique plane. Par exemple, une courbe d'un relief (dotée d'une courbure uniforme) d'une longueur de 10 mètres multipliée par un coefficient 0,7, deviendra une droite d'une longueur de 7 mètres, représentée sur une carte géographique, avec une échelle au 1/10 000e, par une droite de 0,7 millimètre.

Gauss a ainsi déterminé des paramètres topologiques numériques E et F qui permettent de décrire la forme, c'est-à-dire la géométrie d'une surface courbe entre deux points (en effet, si E et F sont égaux, notamment à 1, nous retrouvons bien une surface plane euclidienne). En incluant E et F, nous avons alors comme nouvelle valeur de l'élément « ds » : $\sqrt{\mathbf{(Edx^2+Fdy^2)}}$. Par la suite, Gauss, en approfondissant sa réflexion sur la précision de la longueur de l'élément ds, lui donne comme valeur : $\sqrt{\mathbf{(dx+dy)^2}}$, c'est-à-dire $\mathbf{(dx^2+dy^2+2dxdy)}$. En incorporant un nouveau paramètre topologique G, il peut alors calculer avec une plus grande approximation la longueur de l'élément « ds » avec comme valeur définitive : $\sqrt{\mathbf{(Edx^2+Fdy^2+2Gdxdy)}}$. Cette meilleure approximation est le reflet du fait que la surface plane très petite, tangente à la surface courbe, ne peut même pas se décomposer en triangles rectangles. En effet, à certains endroits du relief, la courbe étant trop accentuée, le plus petit rectangle ou carré tangentiel à celle-ci est quand même étiré à partir de ses sommets, aussi devient-il forcément un parallélogramme. C'est pourquoi Gauss a utilisé des axes de coordonnées curvilignes qui ne se coupent pas perpendiculairement.

Dans un espace euclidien

Carré ou rectangle

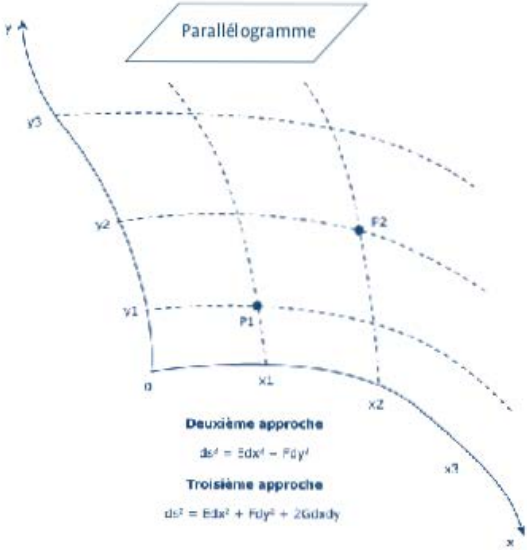


Première approche

$ds^2 = dx^2 + dy^2$

Dans un espace gaussien

Parallélogramme



Deuxième approche

$ds^2 = Edx^2 + Fdy^2$

Troisième approche

$ds^2 = Edx^2 + Fdy^2 + 2Gdxdy$

Par la suite, cette approximation lui permit de calculer avec une très grande exactitude la longueur d'une courbe quelconque et le rayon de courbure en un point d'une surface courbe, appelé communément « courbure de Gauss ». Ainsi, une surface courbe étant parfaitement définie en chacun de ces points par sa courbure et l'élément linéaire « ds », Gauss, au voisinage d'un point d'une surface courbe, peut facilement calculer l'écart qui existe entre sa représentation dans une géométrie non euclidienne d'une surface courbe à trois dimensions et celle, euclidienne, d'une surface plane à deux dimensions. Conséquence très pratique de ce calcul, Gauss peut démontrer quelle est la meilleure projection (ou représentation physique) d'un pays ou d'une région du globe terrestre sur une carte géographique plane.

Mais la renommée de Gauss vient surtout du fait qu'il est le père d'une nouvelle géométrie courbe, non euclidienne où, notamment, les perpendiculaires n'existent plus, le théorème de Pythagore ne peut plus s'appliquer, la somme des angles d'un triangle n'est plus égale à 180°, les droites ne sont plus parallèles... En 1828, il rédige un mémoire intitulé *Disquisitianes circa superficies curvas* où il décrit ce monde si étrange pour nous.

Ainsi s'écroulent grâce à Gauss plus de deux mille ans d'histoire liés à la géométrie d'**Euclide**. Cela n'est pas rien !

Le concept d'espace-temps quadridimensionnel

Après son expérience de pensée sur un disque en rotation, Einstein, au milieu de l'année 1911, est persuadé qu'il lui faut s'appuyer sur les travaux de Gauss, puisque sa théorie sur la relativité générale ne peut être développée que dans le contexte d'un espace courbe où tout référentiel est représenté par des axes de coordonnées curvilignes. Cependant, il ne sait toujours pas comment décrire dans l'espace le déplacement accéléré des astres induit par sa nouvelle théorie gravitationnelle. Il sait simplement que celui-ci n'a aucun rapport ni avec la masse des corps ni avec une quelconque force d'attraction. Il a seulement l'intuition que les astres suivent des trajectoires courbes qui leur permettent de parcourir librement l'espace suivant des distances les plus courtes possibles. Heureusement, grâce à Gauss, Einstein sait maintenant leur

donner un nom : ce sont les fameuses géodésiques (distance la plus courte entre deux points sur une surface courbe).

Einstein a encore une intuition extraordinaire. Et si la gravitation se manifestait non pas dans un espace ordinaire à trois dimensions, mais à quatre dimensions ? La quatrième dimension étant le temps, c'est la fameuse théorie de l'espace-temps quadridimensionnel élaborée par Minkowski, à partir des travaux de Poincaré, et dévoilée par son auteur, en septembre 1908 à Cologne, dans une célèbre conférence ayant pour titre « L'espace et le temps ».

Ainsi est né le concept de l'espace-temps quadridimensionnel qu'Einstein, entre les années 1908 et 1910, jugeait inintéressant, voire farfelu. En fait, ce rejet cachait une terrible réalité intellectuelle. Bien qu'il soit issu de sa propre théorie, il a beaucoup de mal à comprendre (donc à assimiler) ce nouveau concept, qui élargit considérablement le champ d'application de cette théorie. Ce qui lui fait dire un jour : « Depuis que les mathématiciens [sous-entendu Minkowski et Poincaré] s'occupent de ma théorie, je ne la reconnais plus ! ».

Néanmoins, quelques années après, il reconnaîtra que sans le concept de l'espace-temps, sa théorie relativiste sur la gravitation n'aurait jamais pu voir le jour. Bel hommage rendu, certes un peu tardivement, à Poincaré et à son ancien professeur de mathématiques, qui le traitait parfois de fainéant parce qu'il oubliait souvent d'assister à ses cours…

L'espace-temps de Minkowski et de Poincaré

Quiconque vous entendant parler de la quatrième dimension se trouvera rapidement plongé dans un abîme de réflexion, atteignant une indicible perplexité si, en plus, vous y associez la notion d'espace-temps.

Ces deux notions s'apparentent pour certains à une forme de mysticisme que, sans doute, le cinéma et la télévision ont contribué à forger. En effet, dès qu'il s'agit de quatrième dimension ou d'espace-temps, le scénariste se croit obligé de vous faire traverser les murs ou disparaître dans des trous noirs cosmiques pour vous faire réapparaître, grâce à un « trou de ver », dans un autre univers à n dimensions ! Rassurez-vous, tout ceci n'est que fiction : la notion d'espaces de une à quatre dimensions est, somme toute, assez naturelle.

À partir de définitions très élémentaires, nous allons peu à peu montrer pourquoi ce concept représente une réalité physique et est actuellement l'un des piliers indispensables pour comprendre la théorie d'Einstein sur la relativité générale et, plus généralement, le comportement des astres dans l'univers qui nous entoure.

Un espace à une dimension, par exemple le câble sur lequel marche un funambule, n'est représenté que par un seul axe de coordonnées (ox).

Un espace à deux dimensions est communément déterminé par une surface sur laquelle vous pouvez vous déplacer (par exemple entre les quatre murs de votre salon), aussi est-il représenté par deux axes de coordonnées perpendiculaires (ox, oy).

Un espace à trois dimensions est représenté par l'univers qui nous entoure (c'est le domaine des oiseaux, des avions... ou de vous-même, si par exemple vous faites du parapente) ou par le monde aquatique (si vous faites de la plongée sous-marine). Cet espace est représenté par trois axes de coordonnées perpendiculaires (ox,oy,oz).

Si tout cela vous apparaît comme une réalité évidente, il vous paraîtra tout aussi évident que votre position géographique, dans n'importe quel espace, est constamment repérée perpendiculairement par rapport aux axes de coordonnées (une valeur pour un espace à une dimension, deux pour un espace à deux dimensions et, bien sûr, trois pour un espace à trois dimensions). Bien entendu, et ceci est très important, les valeurs prises par ces coordonnées sont relatives à votre position dans l'espace considéré. Par exemple, si nous prenons un espace à deux dimensions (votre salon), votre position dans ce dernier sera repérée par deux valeurs situées respectivement sur les axes des coordonnées ox et oy. Ainsi, si vous marchez, celles-ci vont prendre d'une façon continue des valeurs différentes, relatives à l'endroit où vous vous trouvez dans la pièce. Ces « banalités » vous emmènent vers la découverte de l'espace-temps, où le temps (ou mieux, son écoulement), que nous avons oublié, va jouer un rôle primordial.

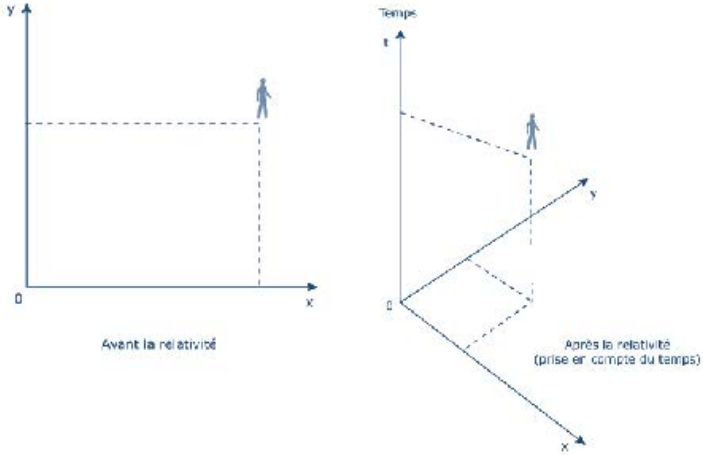
Avant qu'Einstein fasse découvrir sa théorie sur la relativité restreinte, cet « oubli » était entièrement justifié, car pour Newton, le temps avait une valeur unique ou absolue, il indiquait la même heure à tout instant dans tout l'univers. Dans ces conditions, que votre salon soit sur Terre,

sur la Lune, sur Mars ou sur une autre planète, à l'intérieur ou en dehors du système solaire, votre position dans votre salon, l'heure et la durée de votre marche seront toujours identiques. Cette notion absolue du temps est pour nous à la fois très intuitive et très naturelle. En effet, quand vous marchez dans votre salon à une certaine vitesse, votre position dans celui-ci vous semblera identique quelle que soit sa situation géographique dans l'univers, puisque cette position est le résultat d'une simple multiplication de votre vitesse de marche (qui peut varier) par un laps de temps (forcément invariable) : $x = vt$. Ce qui montre bien, dans ce contexte, le découplage qui existe entre l'espace et le temps ; d'où la notion, dans l'univers de Newton, d'indépendance du temps par rapport à une position géographique quelconque.

Or, Einstein avait démontré dans sa théorie sur la relativité restreinte que le temps est non plus absolu, mais varie suivant le repère galiléen où vous vous situez. Par conséquent, si nous revenons à votre position dans votre salon, celle-ci variera forcément suivant la position géographique de celui-ci. Ainsi, concrètement, si sur Terre la durée de votre marche est t_1, elle peut être t_2 sur la Lune et t_3 sur Mars, ce qui implique que la position dans votre salon et la distance parcourue seront forcément différentes suivant son emplacement planétaire, puisque l'équation unique précédente, $x=vt$, devra se décliner forcément suivant les équations suivantes $x_1 = vt_1$ (sur Terre), $x_2 = vt_2$ (sur la Lune), $x_3 = vt_3$ (sur Mars)... Votre position dans votre salon est bien relative au temps, puisque celui-ci varie suivant la planète où il se situe.

Ceci implique que pour connaître matériellement votre position dans votre salon sur chacune de ces planètes (qui sont autant de référentiels galiléens différents), il faut ajouter un autre axe de coordonnées, qui représentera le temps. Ainsi, vous ne serez plus dans un contexte à deux, mais à trois dimensions (deux géographiques et une temporelle) : pour connaître votre situation dans chaque référentiel, il faut connaître conjointement les valeurs des coordonnées situées sur les axes géographiques ox et oy et sur l'axe du temps ot (ces trois axes étant perpendiculaires).

Position dans votre salon en tenant compte de la relativité du temps



Vous voyez bien, grâce au croquis ci-dessus, que les notions d'espace et de temps ne sont plus indépendantes mais complètement imbriquées, donc totalement solidaires d'un même fait (votre situation dans votre salon), d'où le terme unique « espace-temps ». Ainsi, tout comme, dans un espace ordinaire à deux dimensions, vous ne pourrez plus vous situer si vous supprimez un axe de coordonnées géographiques (ox ou oy), cela serait aussi le cas si, dans un contexte d'espace-temps, vous enleviez l'axe du temps (ot). C'est précisément la réalité de ce phénomène d'imbrication physique de l'espace et du temps qu'Einstein a eu beaucoup de mal à comprendre, puis à assimiler.

■ Trajectoires des corps dans un espace-temps à quatre dimensions

Prenons des exemples très simples afin de donner une représentation graphique compréhensible d'une trajectoire dans un espace-temps.

Dans un espace-temps à deux dimensions, c'est le cas du funambule, on a un seul axe de coordonnées géographiques horizontal (où il peut se déplacer) et un axe de coordonnées perpendiculaire lié au temps qui s'écoule. S'il est immobile sur son câble, la trajectoire dans l'espace-

temps sera simplement représentée par une droite perpendiculaire à l'axe des coordonnées géographiques où le funambule se trouve. Cette droite sera forcément parallèle à l'axe (ot) des coordonnées temporelles, montrant ainsi que le temps s'écoule normalement (figure 1).

Mais si le funambule se met à marcher, avec une vitesse uniforme, en partant de l'endroit où le câble est attaché, la trajectoire dans l'espace-temps sera représentée par une droite oblique, d'autant plus oblique que sa vitesse de marche sera élevée (figure 2). Dans cette hypothèse, elle se rapprochera de plus en plus de l'axe des coordonnées (ox) représenté par le câble, jusqu'à se confondre avec celui-ci si le funambule se déplace à la vitesse de la lumière !

Imaginons maintenant que notre funambule revienne, toujours avec une vitesse uniforme, vers son point de départ : la trajectoire dans l'espace-temps sera alors représentée par une ligne brisée (figure 3).

Représentation de trajectoires simples dans l'espace-temps

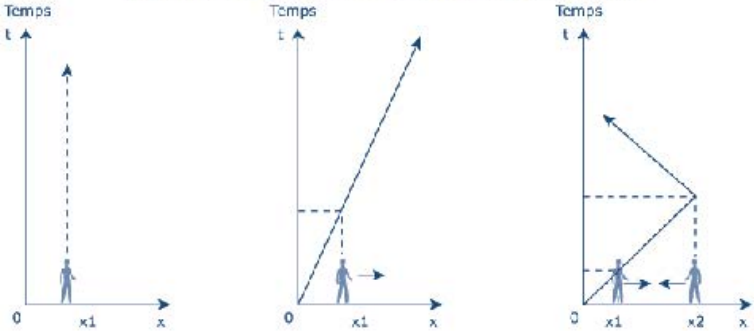


Figure 1 Figure 2 Figure 3

Remarquons, par rapport à l'écoulement du temps, que dans le cas où le funambule reste immobile, sa position géographique ne change évidemment pas. En revanche, le temps s'écoulant plus ou moins lentement suivant que vous êtes sur Terre, sur la Lune ou sur Mars, les graduations représentant l'écoulement du temps sur l'axe (ot) seront différentes selon la planète où se trouve le funambule (cependant, il est

évident que la trajectoire dans l'espace-temps sera toujours représentée par une droite parallèle à l'axe (ot) du temps).

Conséquence directe de la remarque précédente : comme l'écoulement du temps n'est pas le même sur les différentes planètes, les droites obliques dans les différents espaces-temps n'auront pas la même inclinaison.

■ Significations des points d'une trajectoire dans l'espace-temps

Pour Poincaré et Minkowski, chaque point d'une trajectoire est un « événement de l'espace-temps » qui est forcément, au moment où il se produit, le résultat d'une imbrication d'une action spatiale et d'un instant temporel.

Maintenant imaginons que notre funambule reste toujours au même endroit sur son câble et que l'axe (ot) des coordonnées temporelles soit segmenté par des intervalles représentant chacun une seconde. Chaque seconde, il se passe un événement. Par exemple, s'il lève et baisse les bras alternativement toutes les secondes durant dix secondes, la trajectoire dans l'espace-temps (qui, en réalité, est une droite) enregistrera dix fois (de la 1re à la 10e seconde) ce mouvement alternatif. Si, ensuite, il s'accroupit et se lève alternativement durant dix secondes, la droite dans l'espace-temps enregistrera dix fois ce mouvement alternatif (de la 11e à la 20e seconde).

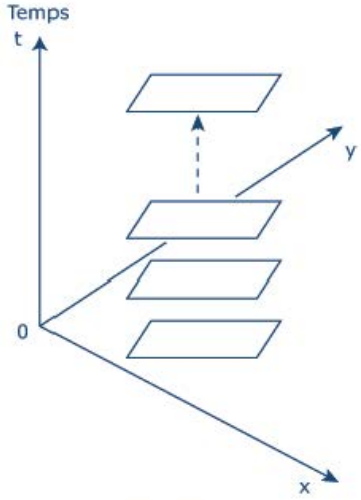
Tout d'abord, ces vingt événements constituent une trajectoire de l'espace-temps (droite parallèle à l'axe (ot) du temps) représentant autant d'images d'une réalité physique située dans l'espace-temps. Pour mieux comprendre, imaginez un photographe qui prend toutes les secondes une photo de notre funambule ; la pile obtenue des vingt photos rangées verticalement (avec, entre elles, un intervalle de temps d'une seconde) vous donnera une assez bonne image de tous les événements constituant une trajectoire dans l'espace-temps.

Un autre exemple : à l'école primaire, pour vous faire comprendre comment créer un dessin animé, votre institutrice vous faisait dessiner sur un petit carnet, feuille par feuille, un personnage qui, d'immobile, se mettait à courir de plus en plus vite. Pour ce faire, sur la première feuille vous dessiniez un personnage immobile, sur la deuxième feuille

vous dessiniez le même personnage avec la jambe droite qui avançait un peu, sur la troisième feuille celle-ci avançait un peu plus... et ainsi de suite jusqu'à la 50e feuille. En feuilletant rapidement vos 50 dessins, vous vous aperceviez que votre personnage se mettait à courir de plus en plus vite.

Imaginons maintenant que vous posiez sur une table votre carnet de dessins et que passer d'une feuille à l'autre vous prenne un dixième de seconde. L'action de tourner une page représentera dans l'espace-temps un événement situé sur une droite qui, bien entendu, se répétera tous les dixièmes de seconde, formant alors une trajectoire de l'espace-temps.

Ainsi, la représentation physique dans l'espace-temps de cette trajectoire liée à cette action (d'une durée de cinq secondes) aura l'aspect d'un millefeuille constitué de 50 événements ayant la forme d'un parallélépipède rectangle parallèle à l'axe (ot) (chacun étant espacé d'un autre d'un dixième de seconde) dont la base sera votre carnet posé sur la table.



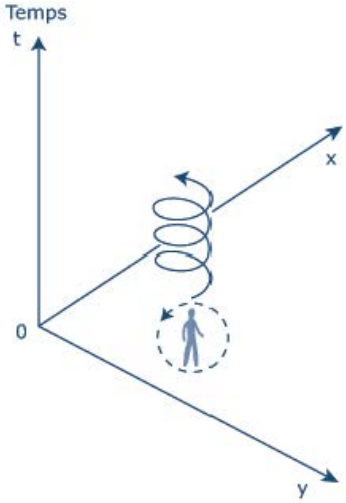
Cette action s'est d'ailleurs déroulée dans un espace-temps à trois dimensions, puisque la table représente une surface à deux dimensions auxquelles il faut, bien entendu, ajouter celle du temps.

La représentation de l'espace-temps, comme nous venons de le voir avec l'exemple du dessin animé, prend la forme physique de l'objet qui se meut dans l'espace-temps. C'est pourquoi, par exemple, une particule élémentaire génère dans l'espace-temps une trajectoire dont le diamètre sera de l'ordre du milliardième de mètre.

Les trajectoires suivies par un corps dans l'espace-temps sont toujours dirigées de bas en haut, c'est-à-dire du passé vers le futur.

Ceci nous permet d'introduire un autre exemple d'un espace-temps à trois dimensions en reprenant celui de votre salon. Bien entendu, l'axe du temps (ot) est toujours perpendiculaire aux axes (ox,oy) géographiques représentant la surface plane de votre salon. Si vous êtes immobile ou si vous vous déplacez parallèlement à l'une des cloisons, nous obtiendrons les mêmes trajectoires (sous forme de droites) dans l'espace-temps que dans le cas du funambule immobile (figure 1) ou qui marche sur son câble (figure 2).

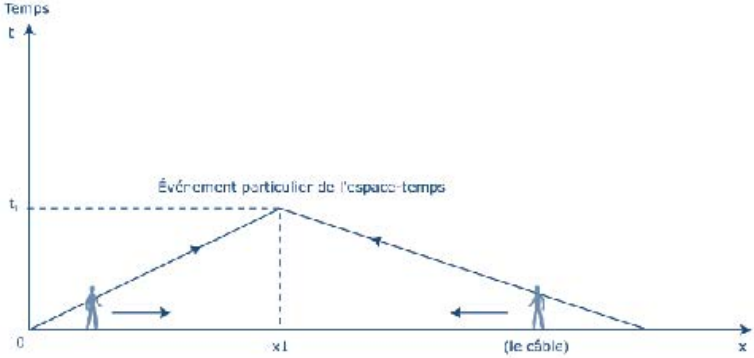
Mais vous avez un degré de liberté supplémentaire dans votre façon de vous déplacer dans votre salon : vous pouvez marcher à gauche, puis à droite, en rond ; dans ce dernier cas, si vous faites toujours le même rond avec une vitesse de marche uniforme, vous obtiendrez comme trajectoire une très jolie spirale dotée d'une forme régulière.



Vous pouvez même imaginer marcher dans votre salon en suivant un carré, un losange... et dessiner vos propres trajectoires de déplacement dans l'espace-temps.

Notons qu'un événement de l'espace-temps peut aussi être le fruit de l'intersection de deux trajectoires appartenant au même espace-temps, c'est-à-dire dans un même système de coordonnées.

Si nous reprenons l'exemple de notre funambule marchant sur un câble et considérons un autre funambule avançant sur le même câble, mais dans le sens opposé, ceux-ci vont générer à chaque instant deux droites dans l'espace-temps (plus ou moins inclinées suivant leur vitesse de déplacement). Naturellement, celles-ci se croiseront lorsque les deux funambules se toucheront. Ce point d'intersection, que nous pouvons appeler « collision (x1,t1) » de l'espace-temps à deux dimensions, sera un événement particulier, qui indiquera à quel moment et à quel endroit sur le câble cet événement se sera produit (soulignons que c'est seulement dans ce cas très précis qu'existe, dans l'espace-temps, une simultanée vraie).



Ainsi, les employés de la SNCF devant déterminer où et quand deux trains, roulant en sens contraire sur la même voie, vont se croiser, étudient en quelque sorte des événements d'un espace-temps bidimensionnel.

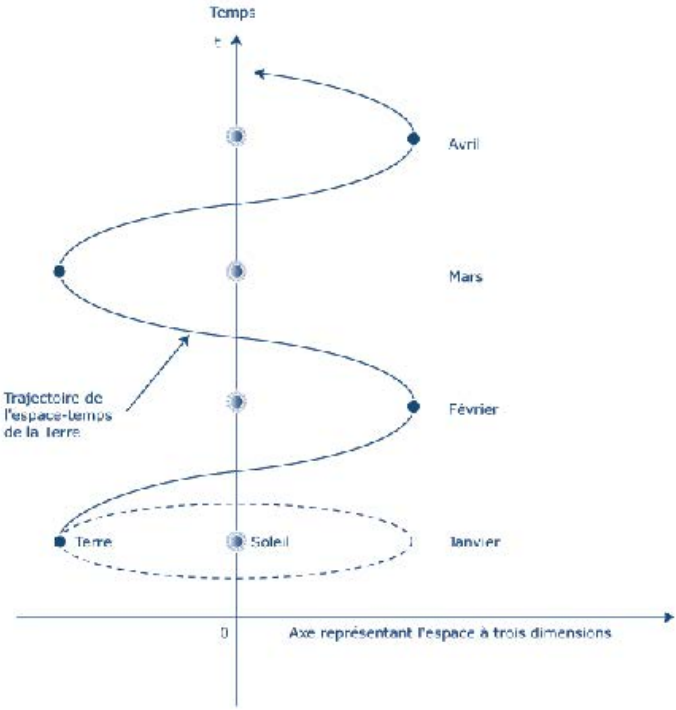
Quatre dimensions

Maintenant, nous pouvons comprendre un espace-temps quadridimensionnel ; celui-ci se situe dans la parfaite continuité des espaces à deux et à trois dimensions que nous venons de découvrir. Rappelons qu'il peut représenter soit l'espace aérien, soit le monde aquatique. Cet espace-temps sera représenté par trois dimensions géographiques (largeur, longueur et hauteur) et, bien entendu, par une dimension temporelle (dont l'axe des coordonnées est perpendiculaire aux trois autres).

Imaginons que vous êtes un pilote d'hélicoptère. Si vous décollez verticalement et stabilisez votre hélicoptère dans une position immobile, puis volez parallèlement à l'un des trois axes géographiques, vous obtiendrez les mêmes droites dans l'espace-temps que dans notre exemple du funambule.

Si, maintenant, vous formez des ronds identiques avec une vitesse uniforme et à une même altitude, vous obtiendrez comme trajectoire la même spirale obtenue en marchant en rond dans votre salon. Il est évident que votre trajectoire dans l'espace-temps aura une représentation d'autant plus complexe que vous ferez monter, puis descendre, tourner à gauche puis de nouveau monter votre hélicoptère.

En revanche, il est très difficile de représenter matériellement les trajectoires situées dans un espace-temps à quatre dimensions sur la page que vous êtes en train de lire (à deux dimensions). Cette cécité doit être compensée par votre certitude de l'existence réelle des concepts que nous venons de décrire, donc de leur juste application, notamment à propos des mouvements des astres. Vous aurez une assez bonne idée d'une trajectoire d'un corps dans un espace-temps à quatre dimensions avec l'exemple de notre Terre tournant autour du Soleil. Pour cela, nous prendrons pour l'espace géographique un seul axe de coordonnées (regroupant les trois axes spatiaux) et, pour le temps, un axe perpendiculaire à ce dernier.



Ainsi, par leurs travaux, Poincaré et Minkowski signaient l'arrêt de mort d'un espace géographique euclidien tridimensionnel pour le remplacer par un espace-temps quadridimensionnel où tout objet, tout astre suit forcément une trajectoire formée d'une infinité d'événements déterminés par des coordonnées d'espace et de temps complètement imbriqués. Nous sommes loin du monde géométrique d'Euclide où la notion de temps est une variable indépendante et où une ligne quelconque ne peut être constituée que d'une infinité de points ne représentant que des coordonnées spatiales.

Le « temps propre » de Minkowski

Minkowski, en 1907, est un excellent mathématicien et connaît parfaitement les travaux de Gauss effectués soixante ans auparavant et ceux de Poincaré publiés l'année précédente. Il s'intéresse beaucoup à cette géométrie courbe non euclidienne et notamment au fait que, quel que soit le système de coordonnées (ou référentiel) considéré, l'élément linéaire gaussien « ds », qui permet de mesurer la distance entre deux points très proches sur une même courbe, est un invariant.

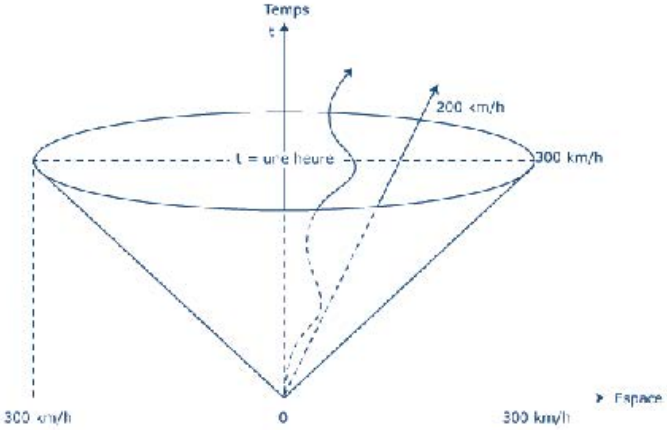
C'est pourquoi il s'appuie entièrement sur les travaux de Poincaré en reprenant le même raisonnement mathématique que lui sur l'analogie effectuée entre cet élément « ds » et un intervalle de temps entre deux événements situés très près l'un de l'autre sur une même trajectoire d'un espace-temps quadridimensionnel. Poincaré, en améliorant les équations de transformation de Lorentz, permet l'éclosion d'un nouveau concept : l'espace-temps quadridimensionnel. Dans sa publication, en juin 1906, dans la revue italienne *Kendiconti del circolo matématico di Palermo*, il démontre que l'on peut facilement passer d'un espace euclidien à trois dimensions (purement géographique) à celui spatio-temporel à quatre dimensions où la quatrième dimension représente le temps. Cette affirmation lui permet de définir « un intervalle de l'espace-temps » comme une très petite distance séparant deux événements situés sur une même trajectoire d'un espace-temps. La formule mathématique qu'il trouve est relativement simple : c'est une généralisation du théorème de Pythagore à partir des équations de transformation de Lorentz.

Minkowski reprend cette idée à son compte en déterminant un « temps propre », au sens « personnel » du terme (par exemple, l'heure indiquée à votre montre), qu'il appelle, lui aussi, « ds » et qui, dans le contexte d'un espace-temps, deviendra l'unique invariant. Concrètement, cela veut dire que deux observateurs situés dans deux référentiels galiléens différents, regardant un même phénomène se passant dans un autre référentiel galiléen, s'apercevraient que la montre qu'ils portent sur eux indique la même heure. Celle-ci exprime que le « temps propre » intègre à la fois des notions de temps et de distance, comme les astronomes quand ils disent que telle étoile est à dix années-lumière de la Terre. Ce fut, pour Einstein, une notion très importante qu'il fut obligé, après

l'avoir volontairement ignorée, de prendre en compte pour développer sa nouvelle théorie gravitationnelle.

Structure d'un espace-temps à quatre dimensions

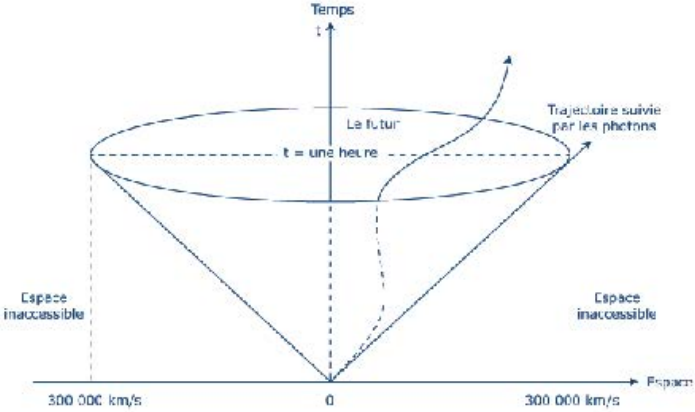
Avec un peu d'imagination, nous pouvons maintenant essayer de représenter sur une feuille de papier à deux dimensions la structure physique spatiale d'un espace-temps quadridimensionnel. Pour cela, ne considérons que deux axes de coordonnées : l'un représentera l'espace doté de trois dimensions, l'autre sera l'axe du temps perpendiculaire à ce dernier.



Commençons par un exemple simple où les vitesses des objets sont largement inférieures à celle de la lumière. Si vous pilotez un hélicoptère dont la vitesse maximale est de 300 km/h, vous ne pourrez atteindre en une heure, d'où que vous partiez, que les endroits de l'espace-temps qui sont situés dans un rayon de 300 km. Cette portion accessible pourra être représentée par le diagramme suivant, qui aura forcément la forme d'un cône dont l'enveloppe sera constituée par l'ensemble des trajectoires de l'espace-temps, dans le cas où vous volez constamment à 300 km/h. Si vous volez en dessous de cette vitesse, votre hélicoptère suivra une trajectoire de l'espace-temps qui se situera à l'intérieur de ce

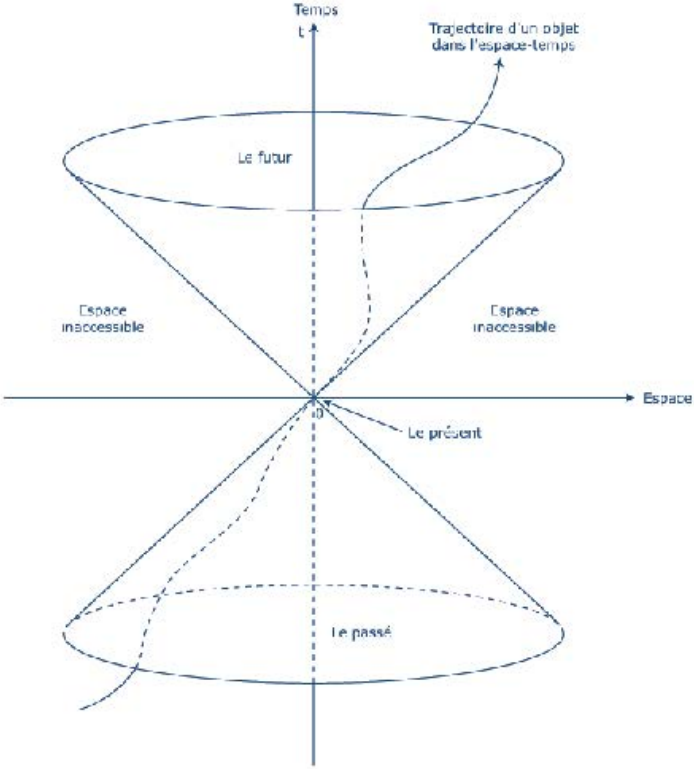
cône (reflétant fidèlement vos changements de vitesse et de direction). Si nous prenons un cas particulier, par exemple le fait de voler constamment à 200 km/h, votre trajectoire sera alors une droite.

Remplaçons la vitesse maximale de votre hélicoptère par celle de la lumière. Vous obtiendrez le même cône mais avec, comme base, un cercle doté d'un rayon fixe de 300 000 km, communément appelé « cône de lumière ». Cette dénomination provient du fait que même les rayons lumineux ne peuvent aller au-delà de ce cône : cette partie sera physiquement inaccessible. Il faut cependant souligner qu'il existe des trajectoires droites particulières de cet espace-temps, celles qui forment l'enveloppe de ce cône de lumière. Cette lumière sera formée par toutes les trajectoires possibles parcourues par les photons (quanta de lumière) qui sont les seules particules à atteindre la vitesse de la lumière, leur masse étant nulle. C'est pourquoi un faisceau de lumière n'est constitué que de photons.



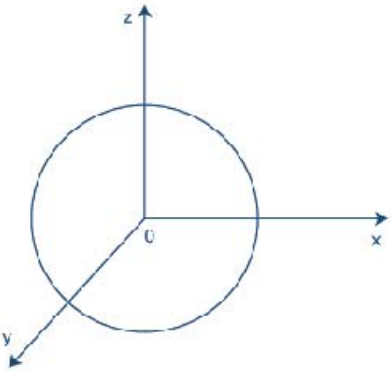
Nous nous apercevons que cet espace-temps courbe à quatre dimensions, contrairement à un espace euclidien classique, comporte deux régions physiques distinctes : l'une est accessible, l'autre non. Cette caractéristique différencie fondamentalement, ceci est très important, ces deux catégories d'espace. Par ailleurs, une trajectoire dans l'espace-temps aura forcément un passé, un présent et un futur (flèche du temps

oblige). Le croquis ci-dessous donne une assez bonne représentation d'une trajectoire d'un objet dans cet espace-temps courbe à quatre dimensions.



La structure physique d'un espace-temps quadridimensionnel ressemble curieusement, suivant vos goûts, soit à un coquetier, soit à un sablier. Par opposition, un univers euclidien à trois dimensions (sans notion de temps) peut être représenté par une sphère (ou un ballon de football) car, dans un tel espace, il est possible, en partant d'un point précis, d'atteindre tous les points situés géographiquement à une même distance

de ce dernier (bien entendu, dans ce contexte, la vitesse de déplacement de tout objet est toujours inférieure à la vitesse de la lumière).



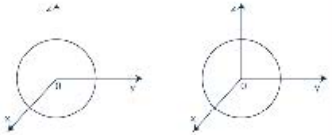
Intérieur physique d'un espace-temps à quatre dimensions

Prenons pour exemple un univers euclidien classique (où le temps est le même pour chaque événement qui s'y déroule) composé d'un ensemble de voitures roulant dans le même sens sur une autoroute. Chacune de ces voitures représente un référentiel galiléen différent, doté de trois dimensions géographiques, qui peut être symbolisé par la sphère décrite précédemment.

Par analogie, dans un espace-temps à quatre dimensions, chacune de ces voitures peut être représentée par un petit sablier doté d'un référentiel possédant un temps « propre » lié à tout événement qui peut s'y passer. La structure de cet espace-temps, telle qu'elle est décrite, exprime bien le fait que le temps et l'espace sont complètement imbriqués au niveau de chaque événement. Ceci sous-tend une conséquence très importante : le temps ne peut pas exister en dehors d'un sablier. Il ne peut donc pas exister une notion de temps (donc d'écoulement de celui-ci) au niveau général d'un espace-temps quadridimensionnel (contrairement à un espace euclidien). Ceci peut se résumer dans les deux tableaux comparatifs suivants.

Représentation globale d'un espace euclidien à trois dimensions

Temps unique, absolu qui s'écoule de la même façon dans tout l'univers pour tous les événements E_i

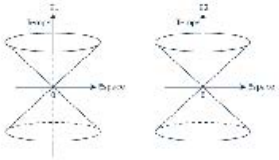


Coordonnées géographiques indépendantes du temps

Le passé, le présent et le futur sont identiques pour tous les événements

Représentation globale d'un espace-temps à quatre dimensions

Temps unique inexistant, éclaté en une multitude de temps relatifs, chacun de ceux-ci étant lié à un événement E_i



Coordonnées d'espace-temps liées au temps "propre"

Le passé, le présent et le futur n'ont de sens que dans le contexte d'un seul événement

Le temps absolu et universel de Newton est bien pulvérisé, dans le contexte d'un espace-temps quadridimensionnel, en un nombre infini de temps relatifs, chacun de ceux-ci étant lié à un événement situé sur une trajectoire.

Cela peut paraître inadmissible, mais cette réalité est incontournable. Le temps unique n'existe plus, seule l'illusion relative et éphémère d'un

temps lié uniquement à chaque événement particulier d'un espace-temps demeure.

C'est là que Poincaré, Minkowski et Einstein nous ont entraînés !

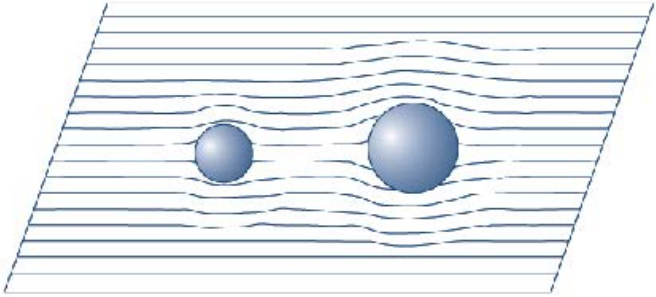
Représentation de l'espace-temps déformé par la masse des astres

En ce début de 1912, après bien des années de réflexion, Einstein a une assez bonne idée de la représentation physique de la structure de l'espace-temps dans sa globalité. Maintenant, il a la conviction intime que les astres ne se déplacent plus dans un espace géographique à trois dimensions, mais dans un espace-temps à quatre dimensions, et que celui-ci est courbé, déformé par la masse des astres qui se déplacent en son sein. C'est ce phénomène qui engendre la gravitation, et non pas d'hypothétiques forces d'attraction s'exerçant entre ces astres. Mais comment représenter physiquement cette déformation de l'espace-temps due à la masse des astres ?

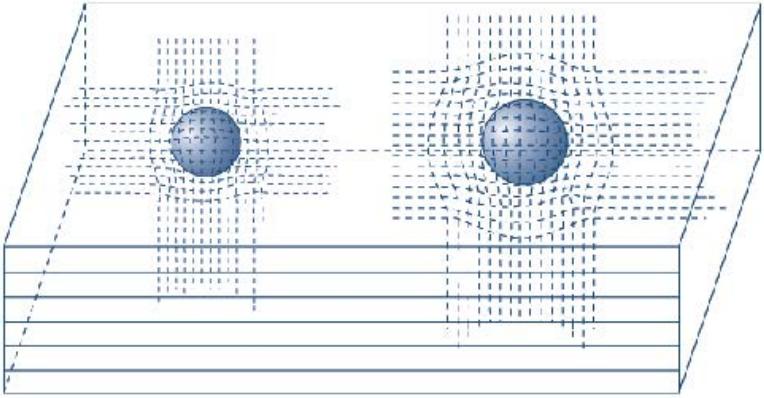
Dans tous les articles publiés dans la presse, spécialisée ou non, on donne une fausse représentation physique de ce phénomène. Tout d'abord, on représente l'espace-temps comme une trame, un tapis, ce qui ne reflète pas du tout la réalité, car il a forcément une forme volumique. Ensuite, on montre des astres posés sur cette trame qui la déforment en créant des creux, comme le feraient des boules de billard ou de pétanque posées sur un épais tapis. Cette représentation est également fausse : les astres se déplaçant toujours à l'intérieur d'un espace-temps, les déformations de ce dernier ne se produisent pas à l'extérieur, mais à l'intérieur de celui-ci. Mais la théorie relativiste de la gravitation est tellement peu intuitive que cette image erronée peut être un bon outil pédagogique pour une première approche de la compréhension d'un espace-temps quadridimensionnel, notamment pour montrer qu'il s'agit bien d'un espace courbe, et non plat comme celui d'Euclide.

Le dessin suivant, qui ne traduit donc pas la réalité, montre bien le maillage de la trame qui, d'une forme carrée plane, prend celle d'un parallélogramme aux formes de plus en plus étirées et courbes à mesure qu'on s'approche de l'endroit où est situé l'astre. Par ailleurs, ce dessin montre bien que plus la masse de l'astre est importante, plus elle

déforme les mailles de cette trame et plus le creux est important (c'est pourquoi Gauss, pour être plus précis dans ses mesures, utilisa des parallélogrammes et non des carrés ou des rectangles). On voit alors bien pourquoi deux astres s'attirent, le plus petit étant attiré par le plus gros (généralement plus lourd) parce que la déformation causée par ce dernier est beaucoup plus importante. On constate clairement que cette attirance n'a rien à voir avec une quelconque force d'attraction.



L'image d'un espace-temps quadridimensionnel doit en fait avoir la forme d'un volume dont l'intérieur se déforme à proximité de tout astre qui s'y meut, et ceci tout autour de cet astre, c'est-à-dire à 360°.



Bien sûr, il est assez difficile de représenter ces déformations spatiales situées à l'intérieur d'un espace-temps quadridimensionnel au voisinage des astres. En créant une analogie entre un champ gravitationnel et un champ magnétique, on voit bien, grâce au dessin précédent, qu'il s'agit non pas de gravitation, mais d'un champ gravitationnel (formé par un ensemble de lignes de force) engendré par la présence d'un astre, tout comme un aimant engendre un champ magnétique (d'une forme générale différente, bien entendu). Ce champ gravitationnel est d'autant plus déformé que la masse de l'astre est importante.

Une équation très générale : C(ourbure) = M(asse)

Einstein est maintenant sûr qu'il doit trouver une équation mathématique qui, d'une part, associe complètement la géométrie de l'univers à la matière, plus précisément à la masse des astres qu'il contient, et, d'autre part, explique comment cette masse déforme l'espace-temps. Par ailleurs, il est convaincu que la théorie newtonienne de la gravitation doit apparaître comme un cas particulier de sa théorie. C'est une des conditions *sine qua non* pour démontrer la justesse de celle-ci.

Un savant français va lui faciliter la tâche.

Un siècle plus tôt, le mathématicien français **Siméon Denis Poisson (1781-1840)** avait élaboré, en partant des travaux de Newton, une équation mathématique prouvant l'existence d'une relation entre les variations spatiales d'un champ gravitationnel (appelées df) et la masse d'un corps (appelée r) qui en était l'origine. D'où la formule dite « de Poisson », df = r, qu'Einstein interprète ainsi : « Plus la masse d'un corps est importante, plus le champ gravitationnel qui l'entoure est intense et plus elle déforme l'espace-temps environnant ». Les travaux de Poisson correspondent parfaitement aux idées qu'il s'est lui-même progressivement forgées et peuvent donc être un excellent point de départ. Aussi fait-il une analogie complète entre l'équation qu'il doit trouver et celle de Poisson.

Dans un premier temps, elle peut s'écrire très simplement : Courbure = Masse (où Courbure remplace « df » et Masse remplace « r »). Elle concrétise parfaitement la pensée d'Einstein qui peut ainsi affirmer que, d'une part, la déformation de l'espace-temps est due à la présence de

la masse d'un corps (plus généralement, de la matière) et que, d'autre part, cette action est réciproque, puisque c'est la masse d'un corps qui déforme l'espace-temps qui l'environne, donnant ainsi naissance à la gravitation (ou plus exactement à un champ gravitationnel). Pour Einstein, cette action déterminera de façon précise les trajectoires (c'est-à-dire les géodésiques) suivies par les différents corps présents dans cet espace-temps courbe quadridimensionnel.

Pour cela, il est persuadé qu'il doit indiquer, dans le second terme M de son équation, la position, la vitesse et la masse de l'astre considéré, ce qui lui permettra de calculer le premier membre C et, *in fine*, la trajectoire précise de la géodésique que doit obligatoirement suivre l'astre dans cet espace-temps déformé. L'achèvement de sa nouvelle théorie relativiste gravitationnelle ne peut donc passer que par la résolution mathématique de cette équation. Hélas, Einstein n'a pas la moindre idée des théories mathématiques qu'il doit utiliser pour la construire et encore moins des outils purement mathématiques à employer pour la résoudre.

Par ailleurs, il se trouve confronté à un autre problème mathématique : il ne voit pas comment démontrer l'autre pilier de sa future théorie, à savoir l'invariance des lois physiques dans des systèmes de coordonnées différents se déplaçant les uns par rapport aux autres avec des mouvements quelconques (accélérés ou pas). Il doit donc trouver des formules mathématiques qui jouent le même rôle que les transformations de Lorentz et de Poincaré, utilisées dans sa théorie sur la relativité restreinte pour passer d'un référentiel galiléen à un autre, se déplaçant parallèlement avec une vitesse uniforme. En quelque sorte, il lui faut généraliser ces dernières. Or, il n'a aucune idée non plus sur la façon de formuler mathématiquement cette invariance qu'il avait lui-même érigée, avec justesse, en principe.

Décidément, même pour Einstein, la physique devenait trop difficile pour les physiciens ! Les mathématiques semblaient se venger d'une façon magistrale d'avoir été trop longtemps ignorées, voire vilipendées. Einstein n'avait-il pas souvent répété qu'elles « ne servaient à rien, ne pouvaient être que la source d'un temps définitivement perdu... » ?

C'est à cette période précise que le monde de la physique va basculer définitivement dans celui des mathématiques. Cette physique plusieurs

fois millénaire, ancrée dans un univers euclidien, confirmée par d'innombrables expériences et qui permit à l'humanité d'effectuer d'immenses progrès, ne s'en remettra jamais. Toutes les théories physiques des XXe et XXIe siècles ne seront plus que des monstres mathématiques de plus en plus incompréhensibles, sauf pour quelques rares initiés. Celle d'Einstein sur la gravitation relativiste n'en sera qu'un modeste prélude, c'est dire !

Mi-1912-1915 : Un très bon mathématicien

Au secours !

Einstein, en août-septembre 1912, cerne donc parfaitement les objectifs à atteindre pour élaborer sa nouvelle théorie relativiste de la gravitation, mais n'a pas la moindre idée des outils mathématiques qu'il doit utiliser pour, notamment, démontrer que la gravitation (ou les champs gravitationnels), d'une part, est due à une déformation de l'espace-temps et, d'autre part, que son origine est complètement liée à la présence de la matière (principalement à la masse des astres dans l'univers). De plus, ce qui n'arrange pas ses affaires, les résultats mathématiques obtenus, tout en restant compatibles avec ceux de la théorie de Newton (bien que construits sur des concepts totalement différents), doivent rester invariants quels que soient les systèmes de coordonnées (ou référentiels) utilisés se déplaçant d'une façon quelconque les uns par rapport aux autres.

Einstein n'a pas le moral ; pris au piège de ses propres ambitions, il pense même abandonner. Il vient de travailler durant presque sept ans sur une nouvelle théorie (censée remplacer celle de Newton) qui, maintenant, lui échappe totalement. Désespéré, il a un dernier réflexe : il appelle au secours un de ses rares amis, en qui il a entièrement confiance et qui l'a toujours aidé dans les moments difficiles, aussi bien au Polytechnicum de Zurich (en lui passant les cours de mathématiques auxquels il ne daignait pas assister) que pour lui trouver un travail à l'Office des brevets de Berne. C'est Marcel Grossmann qui, entre-temps, est devenu

un très bon mathématicien, professeur de géométrie dans leur ancien institut universitaire. Einstein clame son désarroi : « Grossmann, aide-moi, sinon je vais devenir fou ! » Sentant l'urgence de cet appel, Grossmann lui confirme dès le lendemain que, effectivement, il connaît, sans cependant en être un spécialiste, les outils mathématiques qu'il recherche. Ce sont d'une part les « tenseurs », développés récemment par des mathématiciens italiens, et d'autre part les univers courbes (forcément non euclidiens) à n dimensions de Riemann.

Ces outils vont permettre à Einstein, enfin, d'achever mathématiquement sa nouvelle théorie gravitationnelle. Grossmann apparaît donc aujourd'hui comme le véritable sauveur d'Einstein !

Les indispensables tenseurs

Il est paradoxal de constater que ces outils ont été conçus à la fin du XIXe siècle pour expliquer mathématiquement des phénomènes physiques qui, *a priori*, n'avaient aucun lien entre eux. Ils ont été développés à partir de travaux scientifiques permettant, d'une part, d'élaborer les concepts fondamentaux de la topologie riemannienne et, d'autre part, de comprendre les phénomènes d'élasticité des corps solides non rigides (travaux de **Woldemar Voigt (1850-1919)**).

Les tenseurs sont très utiles : ces outils mathématiques permettent le passage d'un système de coordonnées (ou référentiel) à un autre tout en gardant invariant, donc inchangé, le résultat de tous les calculs exécutés grâce à eux. En général, un tenseur est représenté par un tableau (appelé aussi matrice) rempli de valeurs, dont chacune permet de passer, grâce à une opération simple (multiplication, division...), de la valeur d'une coordonnée située dans un système de coordonnées déterminé à la valeur d'une coordonnée située dans un autre système de coordonnées.

Prenons un exemple concret très simple : imaginons que les coordonnées principales de votre maison sont stockées dans votre micro-ordinateur sous plusieurs angles différents (vue de face, de côté, de dessus) et que d'une vue, vous voulez passer automatiquement à une autre.

Pour cela, il suffit de représenter chacune des vues de votre maison (forcément situées dans des systèmes de coordonnées (ou référentiels) différents) par un ensemble de points ayant chacun une valeur. Ensuite, il faut construire le tableau de valeurs (représentant un tenseur) qui permette de passer automatiquement, par une opération arithmétique simple, de chaque point d'une vue à une autre.

Par exemple, pour passer d'une coordonnée d'une vue « de face » ayant une valeur égale à 3 à une coordonnée d'une vue « de dessus » ayant une valeur égale à 6, il suffit d'avoir dans le tableau représentant le tenseur une valeur égale à 2. Ainsi, l'opération qui vous permettra de passer automatiquement d'un système de coordonnées à un autre sera le résultat d'une multiplication par 2 (3 x 2 = 6). Dans ce cas ultrasimple, le tenseur ne sera constitué que d'une seule valeur, égale à 2.

Le calcul tensoriel selon Riemann

Le calcul tensoriel prend sa source dans les travaux de Gauss. Celui-ci, en considérant autour d'un point (situé tangentiellement sur une surface courbe non euclidienne à deux dimensions) une très petite surface plane (pour pouvoir appliquer localement le théorème de Pythagore), introduit les paramètres topologiques E, F et G. Ils sont l'expression mathématique, sous la forme de chiffres, des caractéristiques géométriques (c'est-à-dire de la forme géométrique) d'une courbe en chacun de ces points. Or, ces points peuvent être rassemblés dans un tableau. Ainsi, ce tableau représente l'ancêtre du tenseur, permettant à Gauss de passer localement d'une courbe à une droite (et réciproquement) sans changer l'expression de ses calculs mathématiques. Ceci démontre implicitement que l'utilisation de ce tableau de chiffres (ou tenseur) permet l'invariance des calculs dans n'importe quel référentiel choisi, propriété très importante pour Einstein.

Pour calculer avec la plus grande précision possible la valeur d'un élément linéaire « ds » entre deux points P_1 et P_2 situés sur une courbe, Gauss utilise la formule suivante : $\mathbf{ds^2 = Edx^2+Fdy^2+2Gdxdy}$.

Si nous regroupons les valeurs E, F et 2G dans un tableau, celle-ci peut s'écrire aussi :

$$ds2 = \begin{vmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & F & 0 \\ 0 & 0 & 2G \end{vmatrix} * (dx2+dy2+dxdy)$$

Ce tableau représente un tenseur. En effet, pour retrouver la formule initiale de Gauss, il suffit de multiplier chaque composante d'une ligne du tableau par chacun des membres de (dx^2+dy^2+dxdy) :

$$ds^2 = (E*dx^2 + 0*dy^2 + 0*dxdy) + (0*dx^2 + F*dy^2 + 0*dxdy) + ...$$

$$= Edx^2+Fdy^2+2Gdxdy$$

Cette voie ouverte par Gauss vers une géométrie non euclidienne est poursuivie d'une façon magistrale par un de ses élèves, le mathématicien allemand Bernhard Riemann, qui publie en 1868 la forme définitive de ses travaux dans une publication très célèbre intitulée « Leçon de Riemann ». Il formalise les travaux de Gauss en généralisant sa formule (seulement applicable à deux dimensions) à un espace courbe à n dimensions. Dans ce contexte, chaque paramètre de Gauss (E, F, G), est généralisé par g_{11}, g_{12}, g_{23}, g_{34}... Par exemple, pour un espace à quatre dimensions, les valeurs prises par E, F, G peuvent être représentées par les différentes valeurs de g_{ij} (i et j variant de 1 à 4). Bien entendu, celles-ci peuvent être stockées sous la forme d'un tableau appelé « tenseur géométrique » ou plus simplement « tenseur métrique » g_{ij} :

$$\begin{vmatrix} g11 & g12 & g13 & g14 \\ g21 & g22 & g23 & g24 \\ g31 & g32 & g33 & g34 \\ g41 & g42 & g43 & g44 \end{vmatrix}$$

C'est ainsi que la théorie des tenseurs a pu naître dans le domaine de la topologie.

Cinquante ans plus tard, Einstein, dont l'espace-temps physique quadridimensionnel, où se situe un champ gravitationnel, est déformé, donc non euclidien, sera obligé de construire sa théorie gravitationnelle en

s'appuyant sur la géométrie riemannienne. L'ensemble des valeurs des coefficients g_{ij} (mis sous la forme d'un tableau de chiffres) représente un des tenseurs qu'Einstein utilisera pour formaliser sa formule très générale Courbure = Masse en une équation tensorielle.

Le savant italien **Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925)** et son élève **Tullio Levi-Civita (1873-1941)**, en partant des travaux de Riemann, formalisent dès 1885 la notion de tenseur. En 1900, dans la revue allemande *Mathematische Annalen*, ils font connaître les fondements définitifs de cette nouvelle branche des mathématiques appelée « calcul tensoriel » ou « algèbre tensorielle ».

La théorie relativiste gravitationnelle s'inscrit donc très naturellement dans l'évolution continue et progressive des travaux de Gauss, de Riemann et de Ricci-Curbastro dont hélas, presque quinze ans plus tard, Einstein n'avait jamais entendu parler !

■ Les phénomènes d'élasticité

Historiquement, c'est le physicien allemand Woldemar Voigt qui, en 1899, utilise pour la première fois les termes de tenseurs de « déformation » (D_{ij}) et de « tension » (T_{ij}) dans ses travaux pour décrire mathématiquement l'élasticité d'un corps solide comprimé ou dilaté grâce à des tensions exercées sur sa surface en des points déterminés. Il démontre que ce phénomène peut être formalisé par l'équation tensorielle $(D_{ij}) = k(T_{ij})$ où k est le coefficient d'élasticité du corps déformé.

Einstein a tout de même quelques excuses à ne pas connaître ces remarquables outils mathématiques que sont les tenseurs : d'une part, il n'est pas un pur mathématicien et, d'autre part, ces outils n'ont jamais été utilisés en physique pour élaborer une théorie importante. Là aussi, Einstein fut un précurseur – parions qu'il s'en serait bien passé ! En effet, l'assimilation de la théorie des tenseurs fut beaucoup plus pénible qu'il ne l'avait prévu. Sa transformation en un très bon mathématicien fut d'une extrême difficulté intellectuelle, ainsi que le prouvent plusieurs de ses écrits : « Je travaille comme un cheval bien que la carriole n'avance pratiquement pas », « Une chose est certaine : de toute ma vie je n'ai jamais travaillé aussi durement (...) Maintenant j'ai un très grand respect pour les mathématiques que je considérais comme un luxe pur

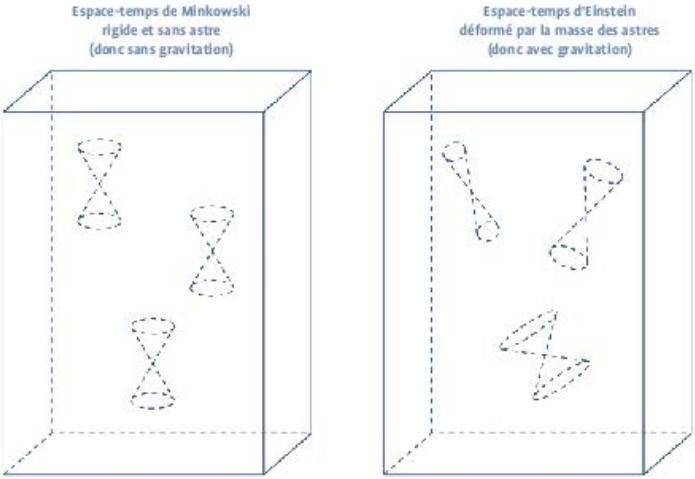
(...) La théorie sur la relativité restreinte est un jeu d'enfant comparé à ce que je subis actuellement ».

Son espace-temps un mollusque

Tout en s'initiant laborieusement au calcul tensoriel, Einstein comprend progressivement à quoi peut ressembler réellement l'espace-temps quadridimensionnel sur lequel il doit travailler, c'est-à-dire quelle est sa forme, sa structure géométrique (au sens mathématique du terme). Pour lui, il a l'apparence « d'une sorte de mollusque », car il est forcément non rigide, en quelque sorte malléable, élastique, et peut devenir non homogène si on lui fait subir des pressions ou contraintes, lesquelles, pour Einstein, sont engendrées par la masse des astres situés à l'intérieur de l'espace-temps, source de sa déformation, donc de la gravitation.

Mais que deviennent, dans un tel contexte, les « sabliers » de l'espace-temps de Poincaré et de Minkowski ? Ils se déforment tout en gardant leur forme générale. De droits, symétriques, rigides et identiques (homogénéité et isotropie obligent), ils se penchent, se rétrécissent, grossissent plus ou moins, suivant l'importance de la masse des astres présents dans cet espace-temps quadridimensionnel « mollusquien ».

Ce phénomène est tout à fait normal. Imaginez un espace-temps constitué d'un bloc de caoutchouc déformable contenant un ensemble de petits sabliers, incrustés en son sein, faits d'une matière elle-même déformable. Exercez sur ce bloc de caoutchouc diverses pressions ou contraintes : vous constaterez que tous vos petits sabliers vont s'aplatir, s'allonger, se déplacer, donc se déformer. Vous obtiendrez alors les mêmes effets que ceux décrits et dessinés grossièrement ci-dessous.



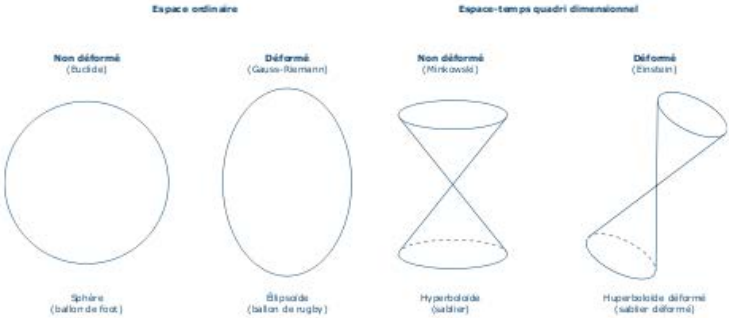
Nous pouvons aussi revenir à un exemple plus simple et plus concret. Imaginez que chaque sablier soit remplacé par un petit ballon de football ; si vous étirez le bloc de caoutchouc dans son ensemble, votre ballon se déformera et prendra la forme d'un ballon de rugby. Si, en plus, vous exercez différentes pressions latérales sur ce même bloc de caoutchouc, votre ballon de rugby aura tendance à se pencher. Ainsi, la structure de l'espace-temps « mollusquien » imaginé par Einstein n'a ainsi plus rien à voir avec celui de Poincaré et de Minkowski !

Plus loin que Gauss et Riemann

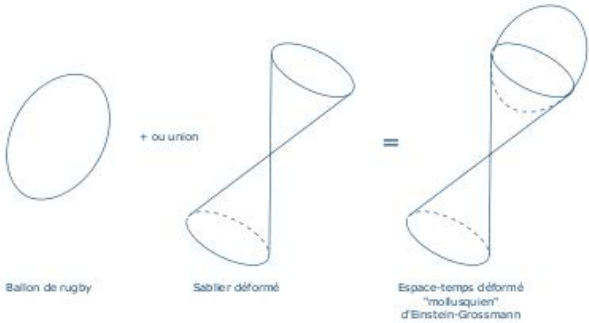
Nous avons vu que Riemann, en formalisant les travaux de Gauss, avait conçu un outil mathématique permettant de calculer l'élément linéaire invariable « ds ». Or, cet outil ne peut absolument pas satisfaire Einstein et Grossmann, car il ne comporte que des composantes géographiques (donc aucune dimension temporelle, espace-temps quadridimensionnel oblige). Aussi ont-ils recours à une astuce : ils remplacent dans la formule de Riemann la quatrième dimension géographique par une dimension temporelle, pour que la nouvelle formule soit compatible avec celle de Poincaré et de Minkowski pour calculer le temps propre (ou personnel) « ds ». Consé-

quence très importante, ils se dotent ainsi d'un nouveau tenseur g_{ij}, (appelé « géochronométrique », imbriquant à la fois des notions géographiques et temporelles). Par convention ou simplification, il est appelé, lui aussi, « métrique ». Ce tenseur leur permet alors de calculer précisément (dans le contexte d'un espace-temps déformé, décrit en chaque point par un sablier lui-même déformé) l'écart spatiotemporel « ds » entre deux événements se produisant successivement sur une même ligne d'un espace-temps (c'est-à-dire sur une même géodésique).

Pour rendre moins arides nos propos, visualisons sous forme de dessins la géométrie des espaces d'Euclide, de Gauss-Riemann et d'Einstein-Grossmann.



La prouesse d'Einstein et de Grossmann a ainsi consisté, pour pouvoir commencer à élaborer la théorie relativiste gravitationnelle, à mettre un ballon de rugby dans un sablier déformé !



Cette union paradoxale ressemble aussi beaucoup à un coquetier, avec un œuf en train de tomber !

■ « Tensorisation » de la formule Courbure = Masse

Début 1913, Einstein et Grossmann possèdent tous les concepts et tous les outils mathématiques nécessaires pour formaliser en une équation tensorielle le fait que, d'une part, la masse (en général un astre) déforme l'intérieur d'un espace-temps et que, d'autre part, la structure géométrique de ce même espace-temps « détermine » la trajectoire (ou la géodésique) que doit parcourir la masse. En d'autres termes, cette équation tensorielle, en généralisant C=M, doit permettre de créer une relation biunivoque entre la répartition des masses-énergie se mouvant dans l'espace-temps et la forme de ce dernier.

Einstein pense que le tenseur g_{ij} est l'outil mathématique adéquat pour définir parfaitement le champ gravitationnel qui entoure une masse et, par conséquent, calculer la géodésique que doit parcourir celle-ci dans son espace-temps « mollusquien ». Maintenant, Einstein et Grossmann peuvent enfin « tenseuriser » la formule très générale Courbure = Masse qui, rappelons-le, avait été bâtie par analogie à celle de Poisson (df = r). Pour cela, ils peuvent s'appuyer à la fois sur les travaux de Riemann (tenseur g_{ij}), et de Voigt ($D_{ij} = kT_{ij}$) et créer l'analogie suivante : D_{ij} exprimera les déformations créées par les astres sur l'espace-temps quadridimensionnel « mollusquien », T_{ij} décrira les pressions, les contraintes et les tensions exercées sur ce dernier. Quant à k, coefficient d'élasticité, Einstein l'assimilera plus tard à la constante G de gravitation multipliée par un coefficient.

Leur formule C = M peut alors prendre la forme générale tensorielle suivante : $D_{ij} = kT_{ij}$.

Pour Einstein et Grossmann, cette analogie mathématique, concrétisant plusieurs années de réflexion, représente un excellent point de départ pour construire la formule tensorielle définitive (ils doivent encore y incorporer le tenseur g_{ij}), expliquant le phénomène de gravitation d'une façon complètement différente de celle de Newton.

De nouvelles difficultés

Théoriquement, en ce début de 1913, il ne leur reste plus qu'à construire les composantes numériques des tenseurs D_{ij} (en associant le tenseur g_{ij}) et T_{ij}. Mais sous quel angle aborder cet objectif ? Vaste et périlleux programme auquel Einstein ne travaillera plus qu'en véritable mathématicien, ce qu'il n'est pas, hélas !

Ses lacunes mathématiques entraîneront presque trois ans d'un travail très pénible et complètement inutile. Durant cette période, il est comme un ours en cage, se heurtant constamment à un mur d'incompréhension intellectuelle totale. Il passe par des périodes de grandes joies et de grandes peines, semble même avoir un comportement dépressif. Ses écrits durant toute l'année 1913 sont éloquents : « Je suis pitoyablement enlisé dans des problèmes de gravitation (...) Ma confiance dans ma nouvelle théorie est très chancelante (...) À ma grande joie, mes doutes sur la théorie de la gravitation n'ont plus lieu d'être (...) Je suis très satisfait de ma nouvelle théorie ».

En cette fin d'année 1913, Einstein est de nouveau au bord du renoncement, d'autant plus que sa vie personnelle ne l'incite pas à avoir le moral. Son couple se désagrège inexorablement, et il doit quitter son ami intime Grossmann pour aller à Berlin, où Planck lui a proposé une chaire de professeur de physique avec de tels avantages financiers et administratifs (il est dispensé d'enseignement, a un siège à l'académie des Sciences de Prusse) qu'il ne peut pas refuser.

Mais Einstein est toujours aussi têtu et ambitieux. Il sait pertinemment que s'il arrive à remplacer la théorie de Newton, il sera célèbre pour l'éternité, et continue à travailler d'arrache-pied. Ainsi, au tout début de l'année 1914, écrit-il à un ami : « Je n'arrive pas à trouver le temps pour t'écrire, je me creuse la cervelle nuit et jour pour essayer de comprendre ». Peu après, à un autre : « Je peine encore sur la théorie de la gravitation jusqu'à en crever (...) La nature ne nous montre que la queue du lion mais je suis persuadé que le lion lui-même y est attaché ».

Heureusement, quelques bonnes nouvelles lui permettent de retrouver un peu le moral : il apprend qu'un certain **Erwin Finlay Freundlich (1885-1964)**, scientifique allemand, recherche des fonds pour monter une expédition en Russie pour vérifier, grâce à une éclipse totale du

Soleil qui doit se produire en août 1914, si les rayons lumineux sont bien déviés par la masse du Soleil. Certaines personnes croient donc quand même en sa théorie, ce qui lui fait écrire dans un moment d'euphorie, dans une lettre adressée à Besso en mars 1914 : « Je ne doute plus de la validité de ma théorie, quel que soit le résultat lié à l'observation de l'éclipse » - alors qu'il écrivait en septembre 1911 : « Je suis certain que si cette déviation [les rayons lumineux frôlant le Soleil] n'existait pas, les hypothèses de ma théorie seraient fausses. »

Hélas, la bonne volonté d'Einstein ne suffit pas ; l'année 1914 passe sans qu'il puisse faire un quelconque progrès dans l'élaboration de sa formule tensorielle.

Se voyant toujours dans l'impasse, il se met à correspondre avec Levi-Civita pour lui expliquer sa démarche d'élaboration des tenseurs qui doivent figurer dans son équation, et lui demander son opinion. Celui-ci, un jour de mars 1915, lui écrit sur un mode plaisant mais un peu ironique : « Quand je me suis aperçu que vous vous attaquiez à la démonstration la plus importante de ma théorie tensorielle, celle qui m'avait coûté des torrents de sueur, je suis devenu franchement inquiet pour vous. »

Einstein se trouve dans une situation intellectuelle dramatique ; c'est sûr, il va abandonner, d'autant plus que ses confrères, à la fois très intrigués et volontiers moqueurs (à part Lorentz et Planck), n'ont aucune envie de remplacer la théorie gravitationnelle de Newton.

C'est de plus à cette époque que Mileva et Einstein se séparent définitivement. Au printemps 1914, bien que n'approuvant pas du tout que son mari accepte les propositions de Planck, elle le suit à Berlin, ville qu'elle n'aime pas. Après quelques mois, l'attitude d'Einstein vis-à-vis d'elle étant loin d'être correcte, elle prétexte que leurs deux enfants ont besoin de vacances pour retourner à Zurich, au grand soulagement d'Einstein, qui voit dans la déclaration de guerre, en août 1914, un alibi pour ne pas les faire revenir à Berlin. Ils ne revivront jamais ensemble et divorceront cinq ans plus tard.

Une collaboration mouvementée

C'est dans ce contexte déprimant qu'Einstein, au milieu de l'année 1915, à Göttingen, où il donne une série de six conférences sur les fondements de sa théorie sur la relativité générale, fait la connaissance du très célèbre Allemand **David Hilbert (1862-1943)**, le meilleur mathématicien de son époque (Poincaré est mort en 1911, d'un cancer). Par curiosité, c'est lui qui a invité Einstein, qu'il ne connaît que de réputation. Tout de suite, il est intéressé par son approche mathématique très originale de la gravitation qu'il comprend immédiatement, sans aucun problème. Einstein est à la fois très étonné et enchanté que, enfin, un chercheur scientifique d'une aussi grande notoriété s'intéresse à son travail et assimile aussi facilement sa démarche intellectuelle. « Ce fut avec une grande joie que je m'aperçus que Hilbert avait tout compris jusqu'au moindre détail », écrit-il à un ami au mois de juillet 1915. À un autre ami, il se dit « enchanté par Hilbert, un homme d'une énergie étonnante, indépendant d'esprit ». Bref, il est enthousiasmé, voire subjugué par cette nouvelle rencontre, et voit en Hilbert, qui a des connaissances mathématiques bien supérieures aux siennes, sa dernière chance. C'est un pur mathématicien (il restera même l'un des meilleurs mathématiciens du XXe siècle), tandis qu'Einstein, malgré ses très louables et laborieux efforts, n'en est qu'un ersatz bien pâle !

Lors d'une autre rencontre, au mois d'août suivant, il lui explique dans le détail ses difficultés à trouver la forme finale de son équation tensorielle. Bien sûr, Hilbert comprend immédiatement son problème et lui donne quelques conseils. Einstein, aussi ravi que naïf, lui demande alors de collaborer avec lui pour élaborer son équation tensorielle définitive. Hilbert, lui aussi très ambitieux et peut-être même un peu malhonnête (ce qui va hélas souvent de paire), reniflant certainement une notoriété mondiale et éternelle, n'hésite pas une seconde à accepter sa proposition.

Le début de cette collaboration fut pour Einstein un véritable enchantement intellectuel. Il transmet tous ses travaux à Hilbert et, durant plus de deux mois, ils ne cessent, presque frénétiquement, de collaborer par écrit (Hilbert n'habite pas Berlin mais Göttingen), échangeant plusieurs fois par semaine l'avancement réciproque de leurs travaux personnels qu'ils commentent et enrichissent ensemble.

Hélas, tout se gâte au mois de novembre : Einstein comprend que Hilbert est en train d'usurper son travail. Ce dernier a bien compris que, s'il élaborait le premier la fameuse équation tensorielle, la paternité de la nouvelle théorie relativiste de la gravitation lui reviendrait *de facto*, car seul le contenu (et bien sûr la résolution) de cette équation pouvait déterminer la véracité de cette nouvelle théorie gravitationnelle. Et son ambition va bien au-delà, puisqu'il veut aussi réunir dans une même théorie physique, qu'il appelle « axiomatique », l'électromagnétisme et la gravitation relativiste initiée par Einstein !

À la mi-novembre, ce dernier reçoit une invitation de Hilbert qui lui explique en termes sibyllins qu'il a bien avancé dans ses travaux ; il compte publier très prochainement un article et surtout donner dans les jours suivants une conférence sur le contenu de celui-ci devant la Société royale des sciences de Göttingen, à laquelle Einstein est bien sûr invité. Einstein est perplexe. Prétextant quelques soucis de santé, il annonce ne pas pouvoir accepter son invitation et lui demande de lui envoyer en urgence la copie de son article, qu'il reçoit comme par hasard avec un certain retard, quelques jours après. Quel n'est pas son étonnement de constater que Hilbert reprend à son compte personnel certains de ses derniers calculs tensoriels ! Très contrarié, le 18 novembre, Einstein lui envoie une lettre dont le contenu ne laisse planer aucun doute quant aux sentiments furieux qui l'animent : « Vous écrivez dans votre article exactement ce que j'ai trouvé ces dernières semaines. » S'il ne le traite pas de malhonnête, c'est tout comme !

Mais Einstein n'est guère étonné de l'attitude de Hilbert, car il a remarqué depuis déjà quelques semaines un changement dans son comportement : il est moins précis dans ses explications, répond moins vite, prend même une semaine de vacances... Lui cache-t-il quelque chose ?

À tout hasard, Einstein a pris ses précautions. Au début de ce même mois de novembre, il recalcule sans le dire à Hilbert, en s'appuyant sur ses nouvelles avancées sur l'élaboration de son équation tensorielle, le périhélie de Mercure. Ô miracle : cette nouvelle équation tensorielle lui permet de parfaitement expliquer l'anomalie de la trajectoire de cette planète. C'est l'extase ! Au bout de trois années d'un travail acharné et terriblement éprouvant, il a enfin trouvé l'équation tensorielle définitive.

Aussi, pour bien marquer sa défiance vis-à-vis de Hilbert, lui écrit-il dans cette même lettre du 18 novembre : « Je vais présenter aujourd'hui même une publication à l'Académie des sciences qui explique parfaitement le périhélie de Mercure. » Mais Einstein ne dit pas que l'équation tensorielle qu'il a trouvée n'est pas tout à fait correcte, aussi son élaboration n'est-elle pas parfaite. Hélas, le temps presse, car il sait que l'équation trouvée par Hilbert sera remise au comité de lecture le 20 novembre 1915 ! Einstein enrage, craignant que Hilbert lui vole presque dix ans d'un travail intellectuel harassant et psychologiquement déstabilisant. Aussi se met-il à travailler comme un fou, pratiquement nuit et jour, pour apporter les dernières retouches, rendant son équation tensorielle scientifiquement irréprochable. Elle généralise notamment parfaitement celle de Newton. Il mettra presque une semaine à y parvenir.

Le 25 novembre 1915 marque la véritable date de naissance de sa théorie sur la relativité générale, ou théorie relativiste de la gravitation, sous la forme d'une publication présentée à l'Académie royale des sciences de Prusse, essentiellement résumable par la formule tensorielle suivante : $\mathbf{D_{ij} = R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij}R = kT_{ij}}$ qui représente le cœur de la théorie et, ainsi, la valide.

Le fameux tenseur D_{ij}, qu'Einstein a mis plusieurs années à trouver, comporte trois parties.

La première est un tenseur permettant de créer une équivalence entre la masse et l'énergie (il permet, en quelque sorte, de « traduire » $E = mc^2$) ; la deuxième est le tenseur géochronométrique ou métrique g_{ij} qui permet notamment de trouver la géodésique que devra parcourir l'astre dans l'espace-temps courbe quadridimensionnel ; enfin, la troisième est représentée par la courbure de Riemann R (invariante dans tout système de coordonnées). Par la suite, le tenseur D_{ij} fut rebaptisé « tenseur d'Einstein », « E_{ij} », symbolisant ainsi la reconnaissance de la communauté scientifique de l'époque. Elle lui devait bien cette petite faveur !

Malheureusement, la joie d'Einstein est de courte durée : Hilbert semble avoir publié la même équation tensorielle le 20 novembre. Einstein s'est-il effectivement fait voler, à cinq jours près, le fruit de dix ans de recherches ? Les ennemis d'Einstein, toujours aussi nombreux, ricanent bruyamment, prenant bien entendu fait et cause pour Hilbert. Pour eux,

c'est évident, Einstein a enfin trouvé son maître. Trop heureux de le ridiculiser, ils clament haut et fort qu'il n'a pu, vu son niveau en mathématiques, que copier l'équation trouvée par le meilleur mathématicien de son époque, puisque ce dernier l'a publiée cinq jours plus tôt ! Ils n'hésitent donc pas à attribuer la paternité de la nouvelle théorie relativiste de la gravitation à Hilbert, en baptisant l'équation tensorielle finale « équation de Hilbert ». Les moins virulents l'appellent tout de même « équation d'Einstein-Hilbert ». Ulcéré, Einstein, fin novembre, écrit à un ami, à propos de Hilbert : « Seul un collègue a compris intégralement ma théorie, mais hélas, il cherche à la faire sienne ; j'ai pu ainsi étudier en profondeur la misère humaine, mais cela ne me gêne pas. »

Mais la suite fut moins glorieuse pour Hilbert : son ambition personnelle l'avait poussé à être vraiment malhonnête. En effet, on découvrit quelques mois plus tard, après avoir étudié sérieusement les articles d'Einstein et de Hilbert, que ce dernier, après avoir lu celui d'Einstein, avait rectifié le sien en y introduisant l'équation tensorielle trouvée par Einstein. D'ailleurs, animé d'un certain remords, Hilbert reconnaît dans ce même article, publié seulement le 31 mars 1916, qu'il s'était fortement inspiré des travaux d'Einstein !

Entre-temps, les deux savants s'étaient expliqués. Hilbert propose alors la candidature d'Einstein comme correspondant à la Société royale des sciences de Göttingen. À l'occasion de son élection, il lui transmet ses plus vives félicitations, auxquelles Einstein répond, à la fin du mois de décembre 1915, d'une façon très agréable : « Merci pour votre message très amical ; un certain malaise a existé entre nous mais je pense de nouveau à vous avec une sereine amitié. Il serait dommage que deux vrais collègues qui ont réussi à s'évader de ce monde sordide ne s'apportent pas un plaisir mutuel. »

En écrivant cette lettre, Einstein s'est certainement souvenu que Hilbert, quelques mois auparavant, l'avait sauvé en le remettant sur la bonne voie. Sans son aide, il aurait pu encore s'égarer longtemps dans la recherche de son équation tensorielle finale, ou même abandonner. D'où sa lettre teintée de beaucoup de reconnaissance et d'affection montrant ainsi qu'il n'était certainement pas très rancunier.

Quel roman, quel suspense ! Einstein peut enfin savourer sa victoire. Il a terrassé Newton, sa célébrité peut donc s'étendre sur toute la Terre et s'épanouir pour l'éternité !

Troisième période (1916-1955)

Mécanique quantique et recherche d'une théorie physique unique

1916-1924 : Relativité générale et mécanique quantique

Retombées théoriques de la relativité générale

Einstein, en ce début d'année 1916, après avoir tant souffert, a envie de se reposer un peu. Il vérifie tout de même que les trois tests initiaux (explication de la déviation du périhélie de Mercure, calcul de la déviation d'un rayon lumineux passant à proximité du Soleil et influence d'un champ gravitationnel sur le temps) confirment sa théorie. Ensuite, il émet l'idée qu'il existe des ondes gravitationnelles (se déplaçant à la vitesse de la lumière avec une amplitude infinitésimale), témoignage d'une vibration de son espace-temps courbe. De nos jours, le projet franco-italien « Virgo » essaie, toujours sans succès, de les débusquer.

Cette même année, un jeune mais talentueux astronome et mathématicien allemand, **Karl Schwarzschild (1873-1916)**, décrit, en utilisant l'équation tensorielle d'Einstein sous une forme simplifiée, le champ gravitationnel particulier produit par une masse sphérique symétrique (par exemple le Soleil, la Terre...). Cette astuce mathématique lui permet de calculer la distance entre deux points d'un espace-temps se trouvant sur une même géodésique et de suggérer qu'une étoile peut, sous certaines conditions, s'effondrer sur elle-même (ce sont les fameux « trous noirs », découverts seulement en 1960, d'où même la lumière ne peut pas s'échapper). Ses travaux surprirent et émerveillèrent Einstein, qui lui écrira : « Jamais je n'aurais pensé que l'on puisse trouver aussi aisément un tel résultat mathématique (...) Cela me plaît énormément. »

En ce milieu de l'année 1916, une bouffée d'orgueil envahit Einstein. Pourrait-il appliquer sa théorie relativiste de la gravitation, et plus particulièrement son équation tensorielle, à l'ensemble de l'univers et, par-là même, expliquer dans sa globalité la structure de celui-ci ? Il rêve, comme pour ses théories sur la relativité restreinte et générale, d'être le premier savant à décrire l'univers grâce à une seule formule mathématique : elle sera l'expression globale du premier modèle cosmologique expliquant l'existence de l'univers, lequel, pour lui, ne peut être que statique. Après avoir tant réfléchi à son équation tensorielle et espéré qu'elle soit conforme à ses désirs, il est à la fois perturbé et très agacé par le fait qu'elle lui démontre le contraire : soit l'univers se développe à l'infini, soit il se rétracte pour, en phase finale, s'effondrer sur lui-même. Einstein sent bien où se trouve la réalité mais, hélas, il n'est plus le révolutionnaire de jadis ; étouffant ses hésitations, il se met à penser comme tout le monde. Son Dieu (qu'il appelle toujours « le Vieux ») n'a tout de même pas pu créer un univers aussi incohérent !

C'est ainsi que le mystique prend le pas sur le scientifique ; Einstein décrète que l'univers ne peut être que statique, donc fini, c'est-à-dire figé pour l'éternité. Il commet alors l'irréparable, ce qu'il regrettera toute sa vie : il traficote son équation tensorielle, recourant simplement à une astuce que tout bon mathématicien connaît bien. Elle consiste à adjoindre à son équation une constante, placée au bon endroit, qu'il baptise « constante universelle lambda » (plus tard, elle sera appelée « constante cosmologique »). Sa seule qualité est, dans sa formule tensorielle, d'annuler les effets d'extension ou de contraction subis par l'univers.

En février 1917, il publie la description de son modèle cosmologique statique dans un article intitulé « Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale ». À cette même époque, à la fois fier et goguenard, il écrit à un de ses amis : « J'ai encore commis vis-à-vis de la gravitation quelque chose qui m'expose au danger d'être enfermé dans un asile d'aliénés. »

Il déclarera plus tard : « Ma constante lambda fut la plus grande erreur de ma vie », reconnaissant implicitement qu'il avait raté une énorme occasion de devenir le père incontesté de la cosmologie moderne en affirmant, comme le montrait son équation tensorielle, que l'univers,

contrairement à ce que pensaient tous les scientifiques de son époque, n'était pas immuable dans sa stabilité, mais en perpétuelle expansion.

En 1927, l'ecclésiastique mathématicien et astronome belge **Georges Lemaître (1894-1966)** construira le premier véritable modèle théorique cosmologique dynamique qui démontre, en s'inspirant des travaux d'Einstein et de l'astronome **Edwin Powell Hubble (1889-1953)**, l'expansion de l'univers. Hubble avait prouvé, après de très nombreuses observations astronomiques, que les galaxies s'éloignaient de la Terre à une vitesse proportionnelle à leur éloignement. Ensuite, Lemaître, en approfondissant ses recherches, montrera en 1933 qu'un univers en expansion est obligé d'avoir eu dans le passé un point de départ à la fois très chaud et très dense qu'il baptise « atome primordial », devenant le véritable père du big-bang.

Notre univers, contrairement à celui d'Einstein, a bien un passé (avec une date de naissance remontant à environ 14,7 milliards d'années) et, heureusement pour nous, un présent et un futur.

Dernières contributions à la mécanique quantique

La troublante mécanique quantique

Pour bien comprendre l'essor de la mécanique quantique, il nous faut revenir presque vingt ans en arrière, au tout début du XXe siècle.

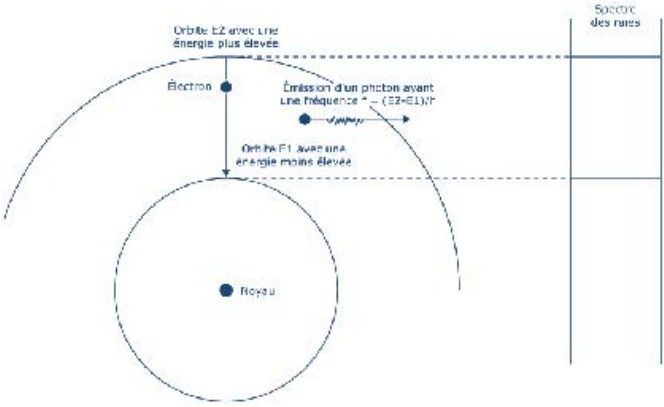
Comme nous l'avons déjà souligné, c'est Boltzmann (et, à un moindre degré, Maxwell) qui a lancé l'aventure quantique en utilisant les probabilités pour comprendre le comportement des molécules d'un gaz. Cette percée a permis à Planck, en 1900, de découvrir les « quanta d'action », qui expliquent les échanges entre la matière et l'énergie, puis à Einstein, en 1905, de démontrer que la lumière elle-même est formée de « quanta » ou photons (expliquant notamment l'effet photoélectrique).

Le 21 septembre 1909, à Salzbourg, Einstein résume ses recherches dans ce domaine dans une conférence intitulée « L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement ». Il y fait part de ses interrogations sur le fait contradictoire qu'un rayon lumineux puisse être parfaitement décrit comme un phénomène ondulatoire à partir des

lois de la physique classique, tout en ayant un comportement corpusculaire dans certains phénomènes, notamment dans le contexte de l'effet photoélectrique. Ce qui semble démontrer, pour Einstein (très dubitatif !), le caractère dual invraisemblable de la lumière, à la fois onde et corpuscule. C'est pourquoi il se montre très sceptique quant à l'avenir de la théorie des quanta, au congrès de Solvay, en 1911. D'ailleurs, il passe beaucoup plus de temps à développer les inconvénients de cette théorie qu'à mettre en valeur les premiers résultats intéressants obtenus grâce à elle.

Enfin, en 1913, c'est le physicien danois **Niels Bohr (1885-1962)** qui établit, en s'inspirant de la structure du système solaire et en s'appuyant sur les travaux d'Einstein, la première description rationnelle de l'atome représentée par des électrons tournant autour du noyau sur des orbites circulaires stables.

L'atome de Bohr



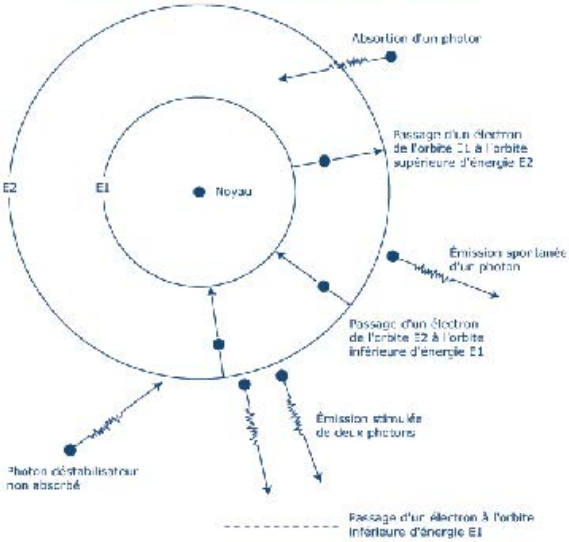
Sur la voie du laser

Malgré son scepticisme quant à la réalité physique des quanta, la découverte inattendue de Bohr ébranle profondément les convictions pessimistes d'Einstein à leur égard et le fait changer d'avis. Plus tard, il écrira : « Que des bases aussi vacillantes et contradictoires liées à la réalité possible des quanta puissent permettre à Bohr d'effectuer de telles découvertes m'a fait, à l'époque et encore maintenant, l'effet d'un véritable miracle. »

C'est pourquoi, au milieu de l'année 1916, il reconsidère la formule de Planck sur le « corps noir », dans le contexte cette fois-ci d'un raisonnement purement quantique. Pour cela, Einstein s'appuie à la fois sur ses propres travaux et sur ceux de Bohr, notamment, empruntant le raisonnement de ce dernier, sur le fait qu'un atome ne peut admettre qu'un nombre discret d'orbites (1, 2, 3...), chacune d'elles ayant une énergie croissante déterminée (E1, E2, E3...), et que le passage d'un électron d'une orbite à une autre est toujours associé à un transfert d'énergie (sous forme de photons) égale à la différence de leurs énergies respectives (par exemple : E2 - E1, E3 - E2, ces écarts étant forcément différents).

Ainsi, il affirme que les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement (lumineux, plus généralement électromagnétique) peuvent s'effectuer soit par un processus d'absorption (passage à une orbite supérieure d'un électron par l'absorption par l'atome d'un photon), soit par un processus d'émission (passage d'un électron à une orbite inférieure par l'émission par l'atome d'un ou deux photons). Einstein démontre qu'il existe, pour ce dernier, deux sortes d'émission : spontanée (émettant un photon) et stimulée (émettant deux photons).

Atome possédant deux orbites d'énergie E1 et E2



En découvrant le processus d'émission stimulée, Einstein a permis de comprendre ce qui deviendra le concept de base du laser (nom commun qui est en fait un acronyme : *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Dans ce phénomène très intéressant, un atome émet deux fois plus d'énergie qu'il n'en reçoit car, pour un photon acquis, il en libère deux, lesquels, tout en restant ensemble et se propageant en ligne droite, vibrent en phase avec une même fréquence et une même longueur d'onde. Ces photons se propagent en quelque sorte à l'unisson, contrairement aux faisceaux lumineux ordinaires qui se propagent à 360 degrés (une lampe, par exemple) et dans lesquels les photons vibrent de façon désordonnée, donc anarchique, les uns par rapport aux autres. Pour augmenter la puissance d'un rayon laser, il suffit donc de provoquer, en cascade, ce processus d'émission stimulée non pas à un atome mais à plusieurs. On obtient alors un rayon lumineux d'une très forte intensité énergétique.

Matériellement, le laser sera découvert bien plus tard, par hasard, par **Charles Hard Townes**, grâce à son sandwich, posé prêt d'un radar, dont les ingrédients se mettaient à cuire spontanément. D'ailleurs, en recevant son prix Nobel de physique en 1964, il avouera que la lecture des travaux d'Einstein ne vint que dans un deuxième temps, donnant une assise théorique à sa découverte qu'il qualifiera de chanceuse.

L'autre conséquence très importante de ses travaux de recherche dans ce domaine est qu'Einstein peut démontrer, en partant du fait que l'émission d'un ou de deux photons est toujours accompagnée d'un recul de l'atome, qu'un photon est forcément une particule, puisqu'il est animé d'un mouvement dont on connaît la trajectoire et la direction, donc doté d'une quantité de mouvement. Cette découverte entérine la réalité conceptuelle du photon.

C'est le physicien américain **Arthur Holly Compton (1892-1962)** qui, en 1922, par une expérience ingénieuse (en bombardant d'un rayon lumineux des particules chargées électriquement), démontre définitivement la réalité physique des photons.

Les probabilités

La conséquence indirecte, mais extrêmement importante, des travaux de recherche d'Einstein dans le domaine de la mécanique quantique, c'est qu'il entérine l'utilisation obligatoire des probabilités pour pouvoir prévoir le comportement des particules dans l'univers microscopique de l'infiniment petit, notamment le déplacement d'un électron d'une orbite à une autre dans un atome.

Il démontre que ce déplacement ne s'effectue que suivant une certaine probabilité parfaitement définie (liée notamment à l'état énergétique de chaque orbite), puisque l'absorption ou l'émission spontanée d'un photon est un événement aléatoire, car dépourvu de cause déterminée. Cependant, pour lui, cette absence de cause n'est pas imaginable ; aussi pense-t-il sincèrement que sa démonstration ne peut être qu'incomplète et que sa théorie comporte certainement une faille importante qu'il faudra un jour reconsidérer. Ainsi, son « Dieu ne joue pas aux dés » reste plus que jamais d'actualité ! Malgré son scepticisme, il retrouve avec bonheur, grâce à ce raisonnement quantique basé sur des calculs probabilistes, la formule de Planck sur le « corps noir ». Ces travaux, représentant une contribution très importante à la balbutiante mécanique quantique, sont publiés en 1917 sous la forme de deux articles dans des revues zurichoises.

Cinquième état de la matière

Nous sommes en 1924. Depuis 1917, Einstein n'a plus guère progressé dans ses recherches. À vrai dire, il s'ennuie un peu bien que, depuis plusieurs années, sa vie privée soit assez mouvementée. Aussitôt après son divorce, en 1919, il s'est remarié avec une cousine éloignée habitant Berlin, elle-même divorcée et ayant deux filles. En 1920, sa mère, qui vivait chez lui, meurt après une longue maladie. Comme il est mondialement connu, on l'invite très souvent à effectuer des conférences dans les capitales de nombreux pays : France, Japon, États-Unis, Espagne, Palestine, Grande-Bretagne, Belgique... Einstein y est souvent reçu avec tous les égards dus à un grand homme d'État, ce qui l'amuse beaucoup.

En 1921, à quarante-deux ans, il a enfin obtenu le prix Nobel de physique, non pas, paradoxalement, pour ses théories relativistes (à cette époque, elles sont toujours contestées, et certains scientifiques pensent que la paternité de la relativité est surtout due à Poincaré), mais pour son explication de l'effet photoélectrique. En novembre 1922, lors de la remise officielle de son prix, contrairement à la coutume qui veut que le récipiendaire explique la recherche pour laquelle il reçoit le prix, il consacre une grande partie de son discours à ses théories relativistes ! Respectant les engagements pris lors de son divorce, il s'empresse d'apporter à Mileva le montant intégral de la récompense financière liée à son prix Nobel, une très jolie somme pour l'époque, environ 30 000 euros.

En juin 1924, une lettre va rompre son ennui. Accompagnée d'un article scientifique, elle émane d'un jeune chercheur physicien indien, **Satyendranath Bose (1894-1974)**, qui cherche à introduire dans ses cours de physique la loi de Planck sur le rayonnement électromagnétique issu d'un « corps noir ». Cette très heureuse initiative va le rendre célèbre. En lisant l'article de Bose, dont il n'avait jamais entendu parler, Einstein est stupéfait et ébloui par l'audace de sa démonstration scientifique. Aussitôt, il traduit lui-même en allemand le contenu de ses travaux pour les faire immédiatement publier dans le renommé journal scientifique allemand *Zeitschrift für Physik*.

Mais Einstein, toujours aussi opportuniste, n'en reste pas là. Tout comme Planck lui a permis de découvrir les quanta de lumière, Bose le mènera vers une sensationnelle découverte : un nouvel état de la matière, avatar d'un phénomène physique purement quantique (appelé aujourd'hui « condensat de Bose-Einstein » ou « superatome »). Ce cinquième état (après le solide, le liquide, le gaz et le plasma) est un fluide composé de molécules gazeuses, d'électrons et d'ions que l'on trouve en abondance dans l'ionosphère, située à plus de 60 km d'altitude où les conditions ambiantes de pression et de température sont très particulières).

Pour le découvrir, Einstein généralise l'idée de Bose, considérant qu'il peut remplacer un gaz constitué uniquement de photons par un gaz quelconque, donc forcément moléculaire. Ensuite, il démontre que tout gaz, quand la température tend vers le degré zéro absolu (-273,15 °C), dégénère peu à peu en passant progressivement d'un état corpuscu-

laire (où les molécules sont indépendantes et dotées d'une très grande vitesse individuelle) à un état final condensé au comportement ondulatoire (où les molécules sont donc non indépendantes et au repos, sans énergie cinétique). On obtient alors un superatome quantique (puisque les atomes ne sont plus indépendants) de plusieurs millions d'atomes, ultime étape de cette condensation quantique.

En cela, Einstein fait une découverte quasi révolutionnaire : les particules de matière, soumises à certaines conditions, ont des propriétés ondulatoires. Cette démarche scientifique est à la fois étonnante et paradoxale, puisqu'en 1905, en découvrant les quanta de lumière, il avait fait passer la matière d'un caractère ondulatoire à celui de corpusculaire, tandis que dans ce contexte, il fait la démonstration inverse !

Il démontre de nouveau, par une démarche scientifique inédite, la parfaite similitude qui existe entre la matière et l'énergie, tout en redécouvrant le même paradoxe récurrent : la lumière est-elle d'une nature corpusculaire ou ondulatoire ? Pour Einstein, ce cinquième état de la matière confirme bien cette très étonnante dualité.

Einstein publie en 1925 tous ses nouveaux résultats dans deux articles, dans la revue *Preussische Akademie der Wissenschaften – Physik*. Il est important de souligner qu'il a pu notablement améliorer son deuxième article en prenant connaissance du contenu de la thèse du physicien français **Louis de Broglie**. Ce dernier y démontre que l'on peut associer à toute particule (proton, électron, photon...) une « onde de matière ». À l'époque, cette affirmation paraît totalement farfelue aux membres du jury de la thèse de de Broglie. C'est pourquoi ils font appel à Einstein, par l'intermédiaire du physicien français **Paul Langevin (1872-1946)**, membre du jury, pour lui demander son avis sur le contenu de cette thèse.

Cette découverte arrange bien les affaires d'Einstein, qui peut alors confirmer que la condensation quantique d'un gaz révèle bien un phénomène ondulatoire, lequel devient de plus en plus évident lors même que la température s'approche du degré zéro absolu. Pour remercier Louis de Broglie de son aide involontaire, Einstein écrira à Langevin : « Il a soulevé un coin du voile... ». Cette phrase sibylline permet aux membres du jury, rassurés bien que décidément incompétents, d'accorder à de Broglie sa thèse avec leurs félicitations !

La découverte d'un cinquième état de la matière sera la dernière contribution purement constructive d'Einstein à la mécanique quantique. Dans les années suivantes, il n'adoptera plus vis-à-vis de cette dernière qu'une attitude critique. Pour lui, la mécanique quantique est forcément une théorie incomplète, puisqu'elle démontre d'un côté l'existence d'un monde microscopique où règne un pur indéterminisme, et de l'autre celle d'un monde macroscopique, celui auquel nous sommes habitués, où le déterminisme règne en maître.

D'ailleurs, il publie en 1935 dans la revue américaine *Physical Review* une expérience de pensée très célèbre ayant pour titre « Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ? ».

1925-1955 : Théorie unitaire des champs

La fin de la mécanique quantique ?

Au début de l'année 1925, Einstein vient de publier avec Bose sa dernière contribution positive à la mécanique quantique. À quarante-cinq ans, il a complètement bouleversé le paysage de la physique dite classique. Il est au sommet de sa gloire, mondialement connu. Il devrait être le plus heureux des hommes, mais son génie (ou Dieu !) lui a joué un tour. Lui qui ne croit qu'au déterminisme, il a été obligé d'utiliser des outils statistiques pour démontrer l'existence de l'atome et, plus généralement, pour comprendre ce qui se passe réellement au niveau microscopique de l'infiniment petit. Certes, Einstein n'est pas opposé au fait de faire appel aux probabilités, mais il pense que celles-ci ne peuvent être utilisées que très ponctuellement, par exemple pour expliquer un fait, une réalité. En aucun cas elles ne peuvent constituer une théorie à part entière dont le seul objectif est de fournir des résultats sans rien nous apprendre sur la réalité du fait lui-même et, plus généralement, sur la description du monde qui nous entoure. La « cécité intellectuelle » impliquée par cet indéterminisme fondamental lui est insupportable car pour lui, seule la théorie décide de ce que l'on peut observer. Hélas, la mécanique quantique tend à démontrer que le monde microscopique de l'atome (et des particules qui le constituent) est, à un instant précis,

partiellement inobservable. Einstein est persuadé que l'utilisation d'outils statistiques n'est qu'une sorte d'expédient provisoire permettant de pallier l'absence de certains paramètres et de certaines fonctions physiques qui restent à découvrir pour comprendre le comportement individuel de chaque particule.

Pour lui, la nature est forcément intelligible, donc rationnelle et logique. Il lui paraît évident qu'il doit exister une courbe d'évolution scientifique normale entre les théories de Galilée, de Newton, de Maxwell, les siennes propres (relativistes) et celle, plus générale, qu'il lui reste à découvrir. Celle-ci regrouperait en une seule théorie, forcément unitaire, la gravitation et l'électromagnétisme, reléguant ainsi cette maudite mécanique quantique à une utilisation très ponctuelle, autant dire à sa disparition. Il est persuadé que la découverte de nouvelles équations mathématiques permettrait de calculer précisément, et sans aucune ambiguïté, les caractéristiques physiques des particules élémentaires (leur position, leur vitesse, leur quantité de mouvement...). La mécanique quantique n'aurait plus lieu d'exister, sa raison d'être n'étant liée, suivant Einstein, qu'au seul « flou » des connaissances entourant ces caractéristiques. La physique dans son ensemble deviendrait tout naturellement cohérente, déterministe, donc prévisible et explicable : en un mot, de nouveau normale !

Par ailleurs, n'oublions pas qu'Einstein, bien que non croyant au sens classique du terme, est une sorte de mystique scientifique ; ce problème d'esthétisme prend sa source dans sa conviction profonde que « le Vieux » (son Dieu) n'a pas pu concevoir une nature non compréhensible. Tout doit pouvoir s'expliquer : il faut absolument découvrir le projet divin (dissimulé sous la forme d'une théorie unitaire) qui existe forcément. N'a-t-il pas écrit : « Dieu ne peut pas être méchant » ?

Cette unification des théories permettrait automatiquement d'unifier les quatre forces qui régissent notre univers : la force gravitationnelle (qui existe entre deux corps possédant une masse et qui permet à l'univers qui nous entoure d'être stable), la force électromagnétique (entre deux corps possédant une charge électrique), la force nucléaire forte (qui relie protons et neutrons dans le noyau d'un atome dont l'énergie est libérée lors des réactions nucléaires) et la force nucléaire faible (qui maintient ensemble les différents atomes composant une molé-

cule, donc la stabilité de celle-ci). Vraisemblablement, ces quatre forces devaient être unifiées au début de l'univers (lors du big-bang). Par la suite, lors du refroidissement progressif de ce dernier, elles se sont individualisées.

Sur ces quatre forces, trois sont liées à l'infiniment petit et dotées de caractéristiques communes (grande intensité mais d'une portée très petite, sauf la force électromagnétique, qui a une portée infinie) et la quatrième, gravitationnelle, dépend de la physique classique, avec des caractéristiques totalement opposées (très faible intensité mais d'une portée infinie). D'un côté, trois forces actuellement unifiées, liées au monde microscopique, sous influence indéterministe, et de l'autre une seule force, sous influence déterministe, liée au monde macroscopique que nous percevons.

Conséquence logique de son attitude, de « locomotive » incontestée de la recherche scientifique mondiale, Einstein va devenir simple « wagon » qui ne fera que suivre, parfois de très loin, les nouvelles recherches menées dans le domaine de l'infiniment petit. Cruelle réalité, Einstein, bien que désormais très célèbre dans le monde entier, n'intéresse plus ces nouveaux chercheurs quantistes, car il ne leur apporte plus rien. Scientifiquement, il est mort. « Je suis devenu pour eux un vieux fossile », écrira-t-il un jour avec une très grande lucidité...

Durant trente ans, tel Sisyphe, toujours flanqué d'un collaborateur mathématicien, il va tout essayer pour élaborer sa théorie unitaire. Ses efforts incessants déboucheront sur de nombreuses ébauches qui seront autant d'impasses, donc d'échecs. La plus célèbre de toutes est certainement la première, sur laquelle il travailla durant plusieurs années.

Tous les scientifiques de l'époque l'attendent avec une très grande impatience. Ils sont persuadés qu'Einstein est encore capable d'effectuer une telle prouesse intellectuelle. Même les journalistes sont à l'affût, prêts à faire de nouveau chauffer les rotatives avec la même intensité qu'en 1916, lorsqu'il découvrit que la lumière ne suivait pas toujours une trajectoire rectiligne.

La publication tant attendue est transmise en 1929 à l'Académie des sciences de Prusse avec le titre : « Théorie unitaire des champs ». Une

demi-douzaine de pages remplies d'équations mathématiques incompréhensibles (la plupart tensorielles) qui partent dans tous les sens, avec une logique difficilement perceptible, et sans la moindre explication. Nous sommes loin de l'Einstein pédagogue de 1905 qui, pour expliquer sa théorie sur la relativité restreinte, n'hésitait pas à démontrer le moindre détail (comme le soulignait avec ironie un méchant critique de l'époque : « M. Einstein veut-il nous apprendre comment lire l'heure à notre montre ? »).

Même les physiciens et mathématiciens ne comprennent pas mieux que les journalistes, c'est dire ! **Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958)**, qui pourtant adore Einstein, n'hésite pas à déclarer : « Il se moque de nous, il n'est pas sûr qu'il ait compris ce qu'il a écrit et d'ailleurs, c'est certain, dans moins d'un an il va abandonner cette première ébauche d'unification pour, peu de temps après, en sortir une autre tout aussi bancale et ubuesque au niveau mathématique. » Et plus loin : « Je dois vous féliciter, ou plutôt vous présenter mes condoléances, pour être passé dans le camp des purs mathématiciens. »

De plus, ce qui n'arrange rien, Einstein se terre chez lui et ne fait aucune déclaration explicative. Simplement, pour désamorcer ces critiques et ce tapage médiatique, il reçoit chez lui un journaliste du *New York Times* avec qui, comme ce dernier n'a aucune connaissance scientifique, il a une conversation quasi mondaine. Aussi, l'article daté du 3 février 1929 intitulé « Einstein explique sa nouvelle découverte » ressemble parfois plus à un article « people » d'aujourd'hui qu'à une véritable explication scientifique.

La déception de tous les chercheurs de l'époque est à la hauteur de leurs attentes. Attristés, ils comprennent qu'ils viennent de perdre définitivement celui qui, depuis plus de vingt ans, les guidait, même s'ils n'étaient pas toujours tous d'accord avec ses pensées visionnaires.

Deux ans après, en 1931, Einstein avoue qu'il s'est trompé en écrivant à Pauli : « Vous aviez entièrement raison ». De très nombreuses tentatives suivirent, trop vite claironnées et aussitôt enterrées.

Trente années de vaines recherches

En partant de la théorie sur la relativité générale, Einstein, pour construire sa théorie unitaire (tout en éliminant la mécanique quantique), a tout essayé, en jouant sur tous les paramètres dont il pouvait disposer. Hélas, toutes ses tentatives, sous forme d'hypothèses diverses, de nouveaux concepts et d'ébauches mathématiques, s'écrouleront inexorablement les unes après les autres.

Or, il semble qu'actuellement, la mécanique quantique soit en train de se venger. En effet, par une réflexion inversée, ne peut-on pas retrouver la théorie relativiste gravitationnelle d'Einstein en partant, cette fois-ci, des concepts quantiques ? Aujourd'hui, après trente années de vaines recherches effectuées par Einstein, des milliers de chercheurs explorent cette voie dans l'objectif d'expliquer « quantiquement » la gravitation. Cette « unification quantique » de la physique tout entière (s'exprimant aussi par une intégration des quatre forces) est certainement le pari fondamental de la recherche théorique mondiale du XXIe siècle. Paradoxalement, l'aboutissement de ces recherches réduirait les théories relativistes d'Einstein à des cas particuliers, comme lui-même l'avait fait pour les théories de Newton et de Maxwell. C'est la « théorie du Tout ».

Einstein a, hélas, perdu trente ans de sa vie de chercheur génial en refusant d'accepter la mécanique quantique comme une véritable théorie physique. Il resta incapable de dépasser ses convictions profondes, quelque peu mystiques, quant à sa vision du monde qui nous entoure.

Conclusion

Deux théories incompatibles

Avec le recul d'un siècle, on voit que les recherches d'Einstein reflètent un parcours scientifique époustouflant dont les deux points culminants se situent en 1905 (l'*annus mirabilis*) et en 1915 (achèvement de sa théorie sur la relativité générale). Résumons-le brièvement.

En partant de l'idée que la matière est constituée d'atomes et en s'appuyant essentiellement sur les lois physiques régissant la thermodynamique, il démontre, d'une part, l'existence réelle des atomes en expliquant le mouvement brownien et, d'autre part, que la lumière est à la fois un phénomène de nature continue (représentée par une onde) et discontinue (constituée de photons). Ces découvertes en ont fait l'un des pères fondateurs de l'étrange mécanique quantique qui lui permettra par la suite, entre les années 1915 et 1930, de découvrir le concept du laser et un cinquième état de la matière (appelé « condensat » ou « superatome »).

Par ailleurs, ses interrogations récurrentes sur la vitesse de la lumière et sur le fait que Maxwell, pour élaborer sa théorie électromagnétique, fut obligé de développer deux jeux d'équations mathématiques pour expliquer les interactions entre un courant électrique et un aimant, l'amènent à construire sa théorie sur la relativité restreinte, permettant d'unifier la physique classique à l'électromagnétisme. Il démontre alors, grâce à sa mythique formule $E = mc^2$, que la masse d'un corps n'est qu'énergie et réciproquement, permettant, entre autres, l'émergence d'une nouvelle forme d'énergie baptisée « nucléaire ».

Ensuite, en généralisant sa théorie sur la relativité restreinte à tout mouvement des corps (notamment accéléré), il élabore sa théorie sur la relativité générale, qui n'est autre qu'une théorie relativiste de la gravitation. Il peut alors construire le premier modèle cosmologique scientifique cohérent susceptible d'expliquer notre univers dans sa globalité, et la plupart de ses phénomènes : pulsar, quasar, trou noir, mirage...

Entre les années 1916 et 1930, les découvertes d'Einstein, même si elles sont très importantes, apparaissent comme autant de conséquences de celles effectuées dans les contextes de la mécanique quantique et de ses théories relativistes.

Enfin, il s'engluera durant trente ans dans la vaine recherche d'une théorie unitaire des champs unifiant la gravitation et l'électromagnétisme, tout en éliminant la mécanique quantique.

Son génie permit à Einstein d'enfanter deux physiques (relativiste et quantique) qui, hélas, apparaissent encore aujourd'hui inconciliables, empêchant ainsi la physique actuelle de progresser normalement. D'un côté, la mécanique quantique, qui n'a rien à faire ni d'un espace-temps à quatre dimensions, ni d'une algèbre tensorielle, ni, plus généralement, d'effets dus à la gravitation. (Comment ces concepts, ces outils mathématiques pourraient-ils avoir leur place dans un calcul de probabilité ?) De l'autre côté, la relativité générale déterministe, qui n'a aucune raison d'utiliser des probabilités. Le gouffre séparant ces deux théories est considérable. Cette incompatibilité est d'autant plus saugrenue que ces deux théories n'ont, depuis presque un siècle, jamais été prises en défaut. En effet, toutes les expériences actuelles cherchant à les déstabiliser ont échoué. Toutes leurs lois se confirment à chaque expérience, même celles qui paraissent les plus étranges.

Rappelons que ces découvertes théoriques n'eurent pas un succès immédiat auprès des scientifiques, notamment celles qui, d'une part, remirent radicalement en cause les notions d'espace et de temps et, d'autre part, décrivirent un espace-temps courbe à quatre dimensions où la vitesse de la lumière n'est pas infinie et où le temps et l'espace sont relatifs.

Einstein, compagnon quotidien

Aujourd'hui, votre premier rendez-vous étant fixé à huit heures, vous avez fait sonner votre réveil-matin à quartz à six heures.

Cette première manifestation sonore matinale est due à Einstein, qui démontra en 1916 que dans un atome, le passage d'un électron d'une orbite à une autre se faisait soit par l'absorption, soit par l'émission spontanée d'un photon. Ainsi, dans une montre à quartz, le comptage du temps s'effectue grâce à un oscillateur à quartz vibrant avec une certaine fréquence. Un mécanisme particulier permet de l'ajuster à celle du passage répétitif d'un électron d'une orbite à une autre dans, par exemple, un atome de césium.

Après avoir pris votre petit-déjeuner, vous sortez votre voiture du garage, dont la porte s'ouvre automatiquement quand vous passez devant une cellule photoélectrique.

Ceci est une application directe de l'explication d'Einstein sur l'effet photoélectrique qui, il le démontra en 1905, est dû aux quanta de lumière, ou photons, dont est constitué un rayon lumineux qui, en frappant une plaque métallique, arrache à cette dernière des électrons en plus ou moins grande quantité suivant la fréquence de ce rayon lumineux. Une cellule photoélectrique est en quelque sorte un capteur, constitué essentiellement d'un semi-conducteur muni de part et d'autre d'électrodes, qui réagit électriquement à un faisceau lumineux orienté directement sur lui. Ainsi, la variation de l'intensité de ce dernier, due par exemple au passage de votre voiture, va faire varier celle du courant électrique qui, grâce à un circuit électronique et mécanique approprié, permet le déclenchement de l'ouverture de la porte de votre garage. Ensuite, le faisceau lumineux reprenant son intensité initiale, la cellule photoélectrique ne détecte plus de variation lumineuse et ce même mécanisme permet à la porte de se refermer.

À l'usine que vous visitez, le directeur vous explique le fonctionnement d'une machine dotée d'un laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) très puissant qui permet de découper, aisément et avec une très grande précision, des tôles d'acier d'une épaisseur de plus d'un centimètre.

En partant des deux processus qui font changer d'orbite les électrons dans un atome sous l'effet d'un faisceau lumineux, Einstein, en 1916, découvre un troisième processus qu'il appelle « émission stimulée ». Celui-ci se déclenche lorsqu'un photon percute un atome déjà excité et libère, non pas un photon, mais deux, qui vont dans la même direction et vibrent en phase avec une même fréquence et une même longueur d'onde. Ce processus permet d'obtenir des rayons lumineux dont l'intensité est forcément plus puissante (d'autant plus que cette opération peut se renouveler en cascade, générant ainsi une grande quantité de photons) : c'est le principe même du laser que Charles Townes réalisa matériellement en 1954.

Après cet entretien, vous allez voir une exposition de machines-outils modernes. Dans votre voiture, il vous suffit d'entrer le nom de la ville et celui de la rue dans votre GPS (*Global Positioning System*) pour trouver la rue où a lieu l'exposition.

Quand les scientifiques américains expérimentèrent pour la première fois ce système, ils constatèrent que les calculs effectués par leurs ordinateurs à partir des temps donnés par les horloges atomiques embarquées dans des satellites étaient complètement faux : les erreurs de positionnement sur Terre d'un objet ou d'une personne étaient largement supérieures au kilomètre. Pour corriger cette dérive, ils durent faire appel à Einstein. Suivant ses théories relativistes, le temps ne s'écoule pas au même rythme suivant que vous êtes dans un satellite ou sur Terre. La Terre, par sa masse, courbe l'espace-temps qui l'entoure ; cela se traduit par une différence temporelle d'une nanoseconde (10^{-9} seconde) toutes les secondes. Pour un signal lumineux partant d'un satellite et aboutissant sur Terre, cela se traduit par un écart d'environ 0,25 mètre. Comme un satellite met environ une heure et demie pour faire le tour de la Terre et que, surtout, cette différence temporelle est cumulative, l'erreur de positionnement sur Terre devient alors de l'ordre de 1 500 mètres. Les Américains corrigèrent très facilement cette erreur ! Ainsi, les trois satellites qui suivent constamment votre voiture donnent avec une assez bonne exactitude (de l'ordre de dix à cinquante mètres) votre position sur Terre.

À l'exposition, en examinant les machines exposées, vous êtes surpris par l'utilisation massive, sous des formes très différentes, de l'effet photoélectrique et du laser.

Après la visite, vous déjeunez à la cafétéria. Comme votre plat n'est pas assez chaud, vous le réchauffez au four à micro-ondes. Celui-ci utilise le même principe que le laser décrit précédemment mais emploie, au lieu de lumière, des micro-ondes qui sont, elles aussi, des ondes électromagnétiques. C'est aussi Charles Townes qui construisit en 1952 (deux ans avant le laser) le premier four à micro-ondes, appelé « maser » (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Ensuite, en dégustant un yaourt, vous songez que la production industrielle de ce dernier a été rendue possible par la formule mathématique élaborée par Einstein pour expliquer le mouvement brownien (qui lui a permis, en 1905, de démontrer l'existence des atomes). En utilisant cette formule, les chercheurs contemporains ont pu élaborer un système de préfermentation en continu du lait, ayant notamment compris comment, suivant leur vitesse, ses particules (en grande partie la caséine) pouvaient s'agglomérer en fonction du temps sous l'influence du mouvement brownien.

Vous avez ensuite rendez-vous à l'hôpital pour passer une IRM (Imagerie par résonance magnétique) du genou. Cette technique, expérimentée sur l'homme pour la première fois en 1979, permet d'avoir une image en deux ou trois dimensions de n'importe quelle partie ou organe de votre corps. Au début, elle s'appelait RMN (Résonance magnétique nucléaire), appellation rapidement modifiée pour ne pas effrayer les patients.

Le cœur d'un appareil IRM est constitué d'un électro aimant produisant un champ magnétique très important agissant sur les atomes de l'organe étudié. Après avoir été excités, ils reviennent à leur niveau d'énergie initial en émettant un rayonnement électromagnétique sous forme d'ondes radio. Ce phénomène est mis en évidence par la résonance magnétique. Cet appareil, pour des raisons purement techniques (liées notamment à la supraconductivité), ne peut fonctionner que si l'électro aimant est immergé dans de l'hélium liquide à quatre degrés au-dessus du zéro absolu (-273,15 °C).

Cette application médicale est entièrement due à Einstein qui découvrit en 1924, à partir des travaux de Bose et en s'appuyant sur certains concepts de la mécanique quantique, un cinquième état de la matière appelé « condensat » ou « superatome ». Celui-ci est obtenu en refroidissant progressivement un gaz au degré zéro absolu, permettant à ses atomes de révéler leur caractère ondulatoire. Les deux qualités principales de cet état sont la supraconductivité (aucune résistance à l'électricité, donc aucune perte d'énergie) et la superfluidité (aucune viscosité, par exemple, défiant la gravitation, le gaz liquéfié peut remonter les parois d'un récipient). Rappelons que ce fut la dernière contribution théorique d'Einstein à la mécanique quantique.

Après l'IRM, vous repartez pour votre bureau en écoutant les informations sur votre autoradio. L'une d'elles attire plus particulièrement votre attention : certains pays veulent se doter de l'arme nucléaire en fabriquant leurs propres bombes atomiques. Il vous vient à l'esprit que leur existence est due, en grande partie, à la formule $E = mc^2$, élaborée en 1905 par Einstein, certain qu'elle tenait plus d'un artifice logique mathématique que d'une possible application. C'est seulement vers les années 1930 que les scientifiques ont vraiment compris que la matière renfermait une énergie colossale. D'où, depuis cette époque, la course effrénée de nombreux pays à un armement nucléaire de plus en plus sophistiqué. Soulignons qu'Einstein, contrairement à ce que beaucoup croient, n'a absolument pas participé à l'élaboration matérielle de la bombe atomique américaine.

Arrivé au bureau, vous envoyez à votre direction, *via* Internet, des informations très confidentielles en pensant que, si celles-ci étaient « piratées », elles pourraient créer de graves préjudices à votre entreprise. Votre crainte ne sera plus fondée quand la cryptographie quantique utilisera des photons intriqués (issus d'un même atome) et sera véritablement opérationnelle. Rappelons qu'en 1934, Einstein essaya de déstabiliser la mécanique quantique en démontrant l'impossibilité pour deux photons intriqués d'avoir toujours le même comportement, et ceci quelle que soit la distance qui les sépare. Cette étrange et surprenante qualité a été plusieurs fois confirmée depuis, notamment par les expériences du physicien français Alain Aspect, élaborées en 1982. Ainsi, aucune donnée transitant entre deux ordinateurs grâce à des photons

intriqués ne pourrait être « piratée », puisque toute tentative d'action malveillante, suivant l'un des principes fondamentaux de la mécanique quantique (toute observation du monde de l'infiniment petit le perturbe immédiatement), est obligatoirement détectée, donc vouée à l'échec.

En fin de journée, observant depuis votre bureau les lampadaires s'allumer l'un après l'autre, vous pensez qu'en France, près de 80 % de l'électricité est fournie par des centrales nucléaires, autant de témoignages matériels de cette nouvelle énergie, « fille » de $E = mc^2$.

Sur le chemin du retour, un brouillard soudain est apparu et la visibilité n'est que de quelques mètres. Au détour d'un virage, une voiture venant en sens inverse vous percute ; personne n'est blessé mais votre voiture est immobilisée dans ce brouillard très épais. Heureusement, lorsque vous appelez la gendarmerie de votre téléphone portable, doté d'une carte GPS, le gendarme de service peut vous localiser instantanément et vous secourir rapidement.

En attendant, vous repensez à un panneau publicitaire qui vous a beaucoup amusé. Il vantait les mérites d'un maillot de bain féminin deux pièces composé exclusivement de petites cellules solaires faites d'une matière très souple épousant parfaitement la silhouette de la jeune fille qui le portait. Le haut de ce maillot est équipé d'une prise très discrète permettant de recharger un portable, un lecteur MP3 ou une console de jeu. Sur l'arrière du bas du maillot se trouve une petite poche discrète, idéale pour rafraîchir sa boisson préférée grâce à un liquide réfrigérant dont le circuit est, bien sûr, connecté à l'ensemble des cellules solaires qui fournissent l'énergie électrique.

Cette application est à la fois originale, amusante et très pratique. Mais vérifiez tout de même, avant de recharger la batterie de votre lecteur MP3, que vous-même et votre maillot soient parfaitement secs !

Enfin rentré chez vous, vous tombez sur une émission scientifique à la télévision. Vous y apprenez que tous les phénomènes de l'univers (trous noirs, étoiles à neutrons, lentilles gravitationnelles...) sont expliqués par les scientifiques grâce aux théories relativistes d'Einstein, et plus particulièrement celle sur la relativité générale.

Cela a commencé en 1916 quand Schwarzschild trouva, à partir de l'équation tensorielle finalisant cette théorie, une solution mathéma-

tique simple pour décrire l'espace-temps courbe quadridimensionnel autour d'une masse sphérique comme le Soleil (cette démarche sera utilisée plus tard pour démontrer l'existence des trous noirs). En 1938, Oppenheimer (celui qui permit aux États-Unis de fabriquer les deux premières bombes atomiques) généralisa cette solution pour expliquer les processus internes physiques qui se déroulent à l'intérieur des étoiles (plus particulièrement celles à neutrons). Par la suite, en 1960, cette découverte permettra de comprendre la géométrie de l'espace-temps dans l'environnement des étoiles en rotation très rapide.

Vous apprenez aussi que les outils mathématiques permettant de calculer la déviation des rayons lumineux passant près d'un astre sont devenus indispensables pour étudier les distributions de la matière dans l'espace interstellaire et pour déceler les lentilles gravitationnelles.

Le présentateur termine l'émission en vous signalant que les électrons sortant du tube cathodique de votre télévision ont une vitesse s'approchant de celle de la lumière. Aussi, conformément à la théorie d'Einstein sur la relativité restreinte, leurs trajectoires, pour arriver au bon endroit sur l'écran, doivent-elles être corrigées grâce à des aimants disposés aux bons endroits.

Avant d'aller vous coucher, comme vous êtes un peu maniaque, vous prenez connaissance de l'heure exacte donnée par l'Observatoire de Paris, car vous savez que, depuis 1998, cet institut possède l'horloge atomique la plus précise au monde (elle se décale d'une seconde tous les 200 millions d'années !). Cependant, si elle fonctionne sur le même principe que votre montre à quartz, vous ne pourrez certainement jamais la porter à votre poignet. En effet, comme la qualité d'une horloge atomique repose sur sa capacité à maîtriser le mieux possible la vitesse des atomes afin de la ralentir au maximum, ces derniers sont refroidis à un millionième de degré au-dessus du zéro absolu. À cette température, les scientifiques peuvent utiliser la deuxième qualité d'un superatome, à savoir sa superfluidité.

Dans votre lit, au lieu de compter des moutons, vous vous amusez à dénombrer les applications pratiques issues des recherches théoriques d'Einstein que vous avez utilisées ou côtoyées durant la journée.

Les cellules photoélectriques, par exemple, ne servent pas uniquement à ouvrir la porte de votre garage mais aussi celles, coulissantes, de la plupart des magasins, ou encore à faire se mettre en marche un escalier roulant lorsque vous posez le pied sur la première marche. C'est aussi grâce à elles que les visiteurs de l'exposition que vous avez vue aujourd'hui peuvent être comptés précisément. Elles sont un élément indispensable de votre photocopieur, au bureau, et permettent à votre appareil photo digital de calculer automatiquement le temps d'exposition, ou encore à l'éclairage de rue de se mettre automatiquement en marche lorsque la nuit tombe. Même le redouté alcootest de la police fonctionne grâce à une très petite cellule photoélectrique ! Dans le fameux « ballon » est stocké un gaz incolore qui change de couleur en présence de molécules d'alcool. Une cellule photoélectrique située dans l'appareil permet de détecter ce changement de couleur.

Les panneaux solaires (inventés dans les années 1950) que vous avez fait installer sur le toit de votre maison ne pourraient vous procurer leur énergie sans leurs cellules solaires (ou « photovoltaïques »). Grâce, là encore, à l'effet photoélectrique, elles transforment l'énergie solaire en courant électrique continu, qu'un onduleur change en courant alternatif.

Votre lecteur et graveur de DVD utilise également des cellules photoélectriques, mais aussi un petit laser, sous la forme d'un faisceau de lumière de couleur rouge qui permet de lire les données stockées sur les disques. Le laser est aussi employé en chirurgie, pour l'opération de la cataracte, par exemple. Le laser utilisé par le chirurgien est évidemment infiniment moins puissant, plus fin et plus petit que celui qui sert à découper des tôles d'acier !

Et le GPS, qui a permis aujourd'hui aux policiers d'atteindre votre voiture ! Sans ce système connecté à la centrale de pilotage, un avion ne pourrait se poser dans le brouillard : avec l'ancien système « atterrissage tout temps », il lui fallait au moins deux cents mètres de visibilité.

D'autres applications issues des recherches fondamentales d'Einstein concernent moins directement votre quotidien.

L'énergie nucléaire permet aux sous-marins actuels (notamment le *Terrible*) de disposer d'une énergie pratiquement sans limite ; ils peuvent

ainsi rester cachés au fond des mers plusieurs années d'affilée (ils y restent cependant seulement six à neuf mois, plus pour des raisons humaines que techniques).

La superfluidité des superatomes permet aussi d'élaborer des capteurs capables de détecter plus facilement les tremblements de terre ou de construire des horloges atomiques encore plus précises grâce à l'apesanteur (elles seront embarquées dans des satellites : c'est le projet européen ACES). On construit grâce à leur supraconductivité des électroaimants très puissants utilisés dans les accélérateurs de particules, dans les trains à lévitation, dans les enceintes de stockage d'énergie. Ils sont aussi employés dans le projet ITER (centrale nucléaire basée sur la fusion des atomes, phénomène analogue à celui qui existe dans le Soleil et, en général, dans les étoiles) pour confiner du plasma composé de deux isotopes d'hydrogène (le deutérium et le tritium) porté à une température de plus de cent millions de degrés. Ils fusionnent alors en libérant de l'hélium, des neutrons, mais surtout une formidable énergie. Soulignons que ce confinement peut être aussi obtenu grâce à des lasers hyper puissants.

Un bracelet équipé d'une carte GPS, placé à la cheville, permet de suivre constamment des personnes placées en liberté provisoire. Si l'une d'entre elles s'approche de trop près de certains lieux sensibles (par exemple, une école), sa situation géographique est, en temps réel, automatiquement signalée au commissariat dont elle dépend. Ce genre d'applications verront leur efficacité s'accroître grâce au projet européen Galiléo, qui permettra une localisation terrestre beaucoup plus précise que le GPS américain (un mètre au lieu de vingt en moyenne).

Actuellement, les cellules photovoltaïques (convertissant plus de 30 % de la lumière captée en électricité) sont utilisées dans de très nombreuses applications, notamment pour alimenter votre calculette, votre montre à quartz, les radars fixes au bord des routes et autoroutes, les panneaux de signalisation, les satellites, les robots envoyés sur la Lune et sur Mars... Un grand couturier facétieux s'est même amusé à concevoir une robe de soirée confectionnée entièrement avec de très petites cellules photovoltaïques. La dame qui la porte peut changer à loisir la couleur de sa robe !

Les applications de l'effet photoélectrique sont innombrables, puisqu'elles sont le fruit d'une interaction, au sens très large du terme, de la lumière et la matière.

Les travaux théoriques d'Einstein sur le mouvement brownien aident aussi à rendre, d'une part, plus efficaces certains mélanges dans le domaine pharmaceutique et, d'autre part, moins polluants les dispersions d'aérosols (ensembles de particules solides ou liquides en suspension dans un gaz) dans les phénomènes atmosphériques (nuages, précipitations diverses) et dans les applications industrielles et privées (dépoussiérage, filtration de l'air, climatisation...).

Et Morphée vous prend enfin dans ses bras – à moins que ce ne soit Einstein !

La physique au XXIe siècle

Une situation charnière

Rappelons qu'à la fin du XIXe siècle, la physique classique de Newton et de Maxwell, dont les lois forment un ensemble harmonieux, explique tous les phénomènes se déroulant dans le ciel comme sur la Terre. Certains trouvent même que cela devient ennuyeux : il n'y a plus rien à découvrir ! Cependant, de petits faits anodins mais inexplicables par les théories classiques (rayonnement d'un corps noir, trajectoire de Mercure...) bouleversent cette belle harmonie quand Planck et Einstein découvrent ce qu'ils cachent. Naissent alors en quelques années deux théories physiques révolutionnaires qui vont terrasser à tout jamais cette si belle physique classique que l'on pensait éternelle.

Un siècle plus tard, l'histoire scientifique va-t-elle se répéter ?

En ce début de XXIe siècle, la théorie relativiste gravitationnelle d'Einstein explique, sans trop de problèmes, tous les phénomènes, sur Terre comme dans l'univers proche et très lointain, et la mécanique quantique, initiée par Planck, Bohr et Einstein, prévoit et explique avec une remarquable précision le monde de l'infiniment petit des atomes et des particules.

Tout va donc pour le mieux, d'autant que ces deux théories hégémoniques se gardent bien d'être employées simultanément pour expliquer un phénomène particulier. D'une façon générale, suivant que ce dernier se déroule dans l'un ou l'autre monde (microscopique ou macroscopique), les scientifiques sont obligés de choisir l'une ou l'autre. D'ailleurs, comment pourrait-on faire autrement ? Ces théories sont totalement inconciliables. La nature intelligente l'a bien compris, puisqu'elle ne se permet pas de mélanger les genres ; elle se débrouille presque toujours pour que le scientifique ayant un phénomène déterminé à comprendre et à expliquer ne doive pas utiliser théoriquement, à la fois, les lois quantique et relativiste.

Mais la nature, taquine, fait quelques petites exceptions. Par exemple, les chercheurs ne savent toujours pas expliquer le big-bang et les premiers instants qui l'ont précédé, pas plus que l'environnement des trous noirs. Or, comme par hasard, ces phénomènes semblent soumis à la fois à des phénomènes quantiques et gravitationnels, donc, actuellement, forcément inexplicables !

Aussi y a-t-il une parfaite analogie entre la situation scientifique actuelle et celle qui existait à la charnière des XIXe et XXe siècles. Il n'est donc pas insensé de croire que, par exemple, l'explication de l'environnement d'un trou noir, somme toute très anodine, débouchera sur une nouvelle « théorie physique du Tout » qui reléguerait la mécanique quantique et la théorie sur la relativité générale à des cas particuliers.

D'ailleurs, toutes les grandes découvertes ou théories ont été construites à partir de phénomènes marginaux ou anodins que des chercheurs avaient du mal à expliquer avec les théories physiques classiques admises par le monde scientifique de leur époque : l'étude de certains mouvements des corps (Galilée), la chute d'une pomme (Newton), le comportement réciproque de l'électricité et du magnétisme (Maxwell), le résultat négatif des expériences pour démontrer l'existence de l'éther (Michelson), l'étude d'un rayon lumineux issu d'un corps noir (Planck), la trajectoire bizarre de Mercure et l'explication du mouvement brownien (Einstein)...

C'est le pari fondamental que font aujourd'hui des milliers de scientifiques qui essaient de fusionner, de globaliser toutes les théories physiques actuelles en une seule théorie, forcément plus générale, qui

permettrait de trouver de nouvelles formules mathématiques applicables aux phénomènes de nature à la fois quantique et relativiste.

La physique en crise

Faute de trouver cette théorie unitaire, la physique actuelle est en crise, tout comme l'était celle du début du XXe siècle. Désemparée, elle ne peut plus progresser normalement : elle est tout simplement en panne !

Depuis pratiquement un demi-siècle, malgré tous les moyens technologiques et financiers (télescopes de plus en plus puissants, satellites de plus en plus précis, accélérateurs de particules de plus en plus impressionnants) permettant aux chercheurs de mieux en mieux décrire les mondes de l'infiniment petit et grand, ceux-ci sont dans l'incapacité d'élaborer de nouvelles théories physiques confirmées. Étonnamment, ils n'arrivent pas à apporter de réponses cohérentes à cette avalanche d'observations surprenantes qui véhiculent autant d'énigmes théoriques et les désarçonnent d'autant plus que, bien souvent, elles les éloignent de certitudes jusque-là bien établies. S'ils croient, à un moment déterminé, détenir enfin la « Vérité », elle leur échappe aussitôt suite à une découverte, une expérience ou une observation génératrice d'autres questions qui les plonge dans de nouveaux et contradictoires abîmes de perplexité.

C'est pourquoi fleurissent depuis quelques dizaines d'années de nombreuses théories physiques dont le seul objectif est de décrire le phénomène gravitationnel suivant une optique quantique, donc, *in fine*, de construire une théorie de la gravité quantique en vue de pouvoir élaborer la fameuse « théorie du Tout ». Ces nouvelles ébauches de théories, pas même partiellement confirmées, ont pour noms cordes, gravité quantique en boucle, géométrie non commutative, relativité d'échelle... Elles sont surtout impressionnantes par l'hermétisme de leur approche mathématique et par leur niveau de complexité : certaines utilisent un univers possédant plus de vingt-cinq dimensions ! Dire que quatre dimensions, comme celles d'Einstein en son temps, sont déjà très difficilement représentables...

La découverte éventuelle de cette théorie unitaire, même étayée par une très solide théorie mathématique, restera encore très longtemps un

rêve, pour la simple raison que nos accélérateurs de particules ont pour l'instant des puissances incapables de sonder la matière à une si petite échelle (environ 10^{-33} mètres). Vu les considérables énergies nécessaires, les scientifiques ne voient pas comment cela serait possible dans les prochaines décennies !

Il est à souligner que fin 2007, allant à contre-courant de toutes les recherches actuelles, une nouvelle et très originale piste a été ouverte par le physicien américain **Antony Garett Lisi**. Il a construit une « théorie du Tout » sur l'idée que tout l'univers n'est que pure géométrie, partant du fait que la gravitation est déterminée par la géométrie d'un espace-temps quadridimensionnel courbe, reprenant en cela l'idée maîtresse d'Einstein. Cependant, cette théorie, si elle est séduisante, demande à être démontrée d'une façon irréfutable.

Les plus optimistes peuvent toujours se consoler avec le fait qu'aujourd'hui encore, d'une part, la bonne vieille théorie gravitationnelle de Newton permet toujours d'expliquer pourquoi les cerises, les poires, les pommes tombent des arbres et de quelle façon les astres s'attirent entre eux, et que d'autre part, les lois très classiques de la thermodynamique suffisent amplement pour expliquer comment fonctionnent un réfrigérateur, une centrale à charbon et un système de refroidissement de centrale nucléaire. Aussi peut-on encore se contenter de ces deux théories physiques (relativiste et quantique), certes incompatibles, qui cohabitent en bonne intelligence et nous permettent, par leur complémentarité, d'expliquer l'ensemble du monde qui nous entoure.

En réalité, le fait de vouloir absolument trouver une « théorie du Tout » n'est que le reflet éthique de la caractéristique de l'être humain à vouloir sans cesse, presque jusqu'à l'outrance, simplifier les lois physiques qui expliquent notre univers. Cette attitude a cependant toujours été un facteur important de progrès pour la science et, à quelques rares exceptions près (comme la bombe atomique), pour l'humanité.

La situation scientifique actuelle est très préoccupante car, sans l'apport de nouvelles découvertes en recherche fondamentale, la recherche appliquée ne peut plus progresser dans l'élaboration de techniques aux retombées innovantes industrielles et domestiques !

En effet, durant tout le début du XXe siècle, la maîtrise progressive des retombées pratiques des théories physiques fondamentales élaborées au XIXe siècle permirent, grâce à de nouveaux outils et de nouvelles machines, un essor prodigieux des entreprises, en augmentant la productivité et en rendant le travail des ouvriers moins pénible. Cela a permis à l'Occident d'atteindre une forme de suprématie industrielle et a servi à améliorer profondément notre confort quotidien.

Malheureusement, aujourd'hui, nous vivons toujours sur les acquis d'une recherche scientifique théorique, vieille de presque un siècle, en rupture complète avec l'enchaînement des cycles de recherche (fondamentale et appliquée) qui se perpétuaient depuis plusieurs siècles.

La situation actuelle de nos chercheurs théoriciens aurait de quoi faire sourire Einstein. De son paradis, situé quelque part dans notre insondable et toujours aussi mystérieux Univers, il observe avec une ironie certainement bienveillante, en compagnie de son « Vieux » dont il disait souvent qu'il « ne pouvait pas être méchant », cette gesticulation scientifique improductive !

Bibliographie

Balibar Françoise, *Einstein, la joie de la pensée*, Gallimard, 1993

Ben-Dov Yoav, *Invitation à la physique*, Seuil, 1995

Eisenstaedt Jean, *Avant Einstein. Relativité, lumière, gravitation*, Seuil, 2005

Einstein Albert, *Comment je vois le monde*, Flammarion, 1958

Einstein Albert, *L'Évolution des idées en physique*, Payot, 1974

Einstein Albert, *Les Théories de la relativité restreinte et générale*, Gauthier-Villars, 1988

Einstein Albert, *Conceptions scientifiques*, Flammarion, 1990

Feynmann Richard, *Vous voulez rire, monsieur Feynmann*, Inter-Éditions, 1985

Gamow Georges, *Monsieur Tompkins au pays des merveilles*, Dunod, 1999

Hawking Stephen, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, 1989

Hawking Stephen, *Trous noirs et bébés univers*, Odile Jacob, 1993

Hoffmann Bernard, *L'Étrange Histoire des quanta*, Seuil, 1981

Jacquard Albert, *Voici le temps du monde fini*, Seuil, 1991

Lichnérowicz Albert, *Éléments de calcul tensoriel*, Armand Colin, 1962

Ortoli Sven, *Le Cantique des quantiques*, La Découverte, 2004

Paty Michel, *Einstein philosophe*, PUF, 1993

Paty Michel, *Einstein*, Les Belles Lettres, 1997

Pauli Wolfgang, *Physique moderne et philosophie*, Albin Michel, 1999

Reeves Hubert, *Dernières nouvelles du cosmos*, Seuil, 1994

Index des personnes

Index des objets et notions

Table des matières