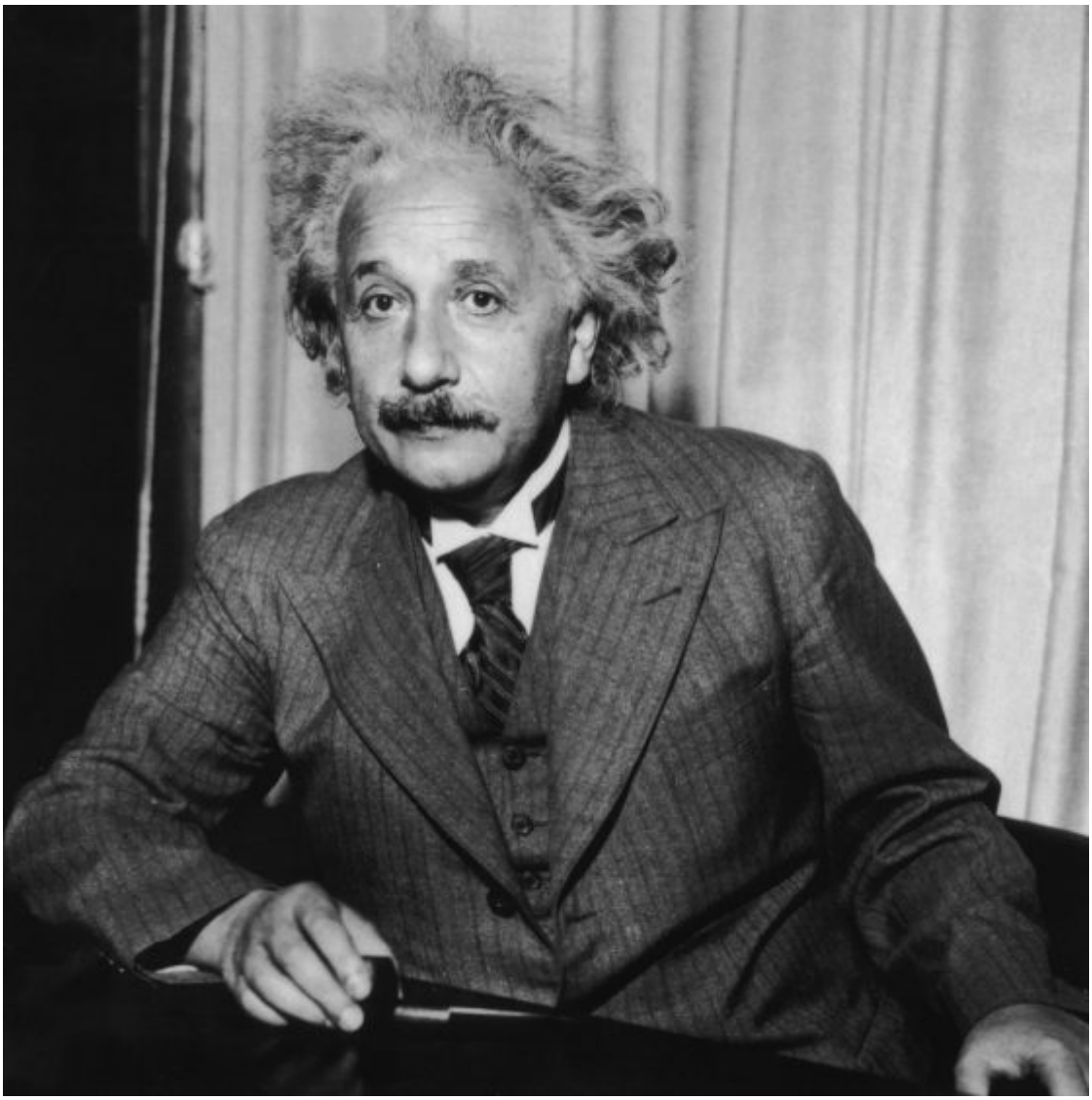
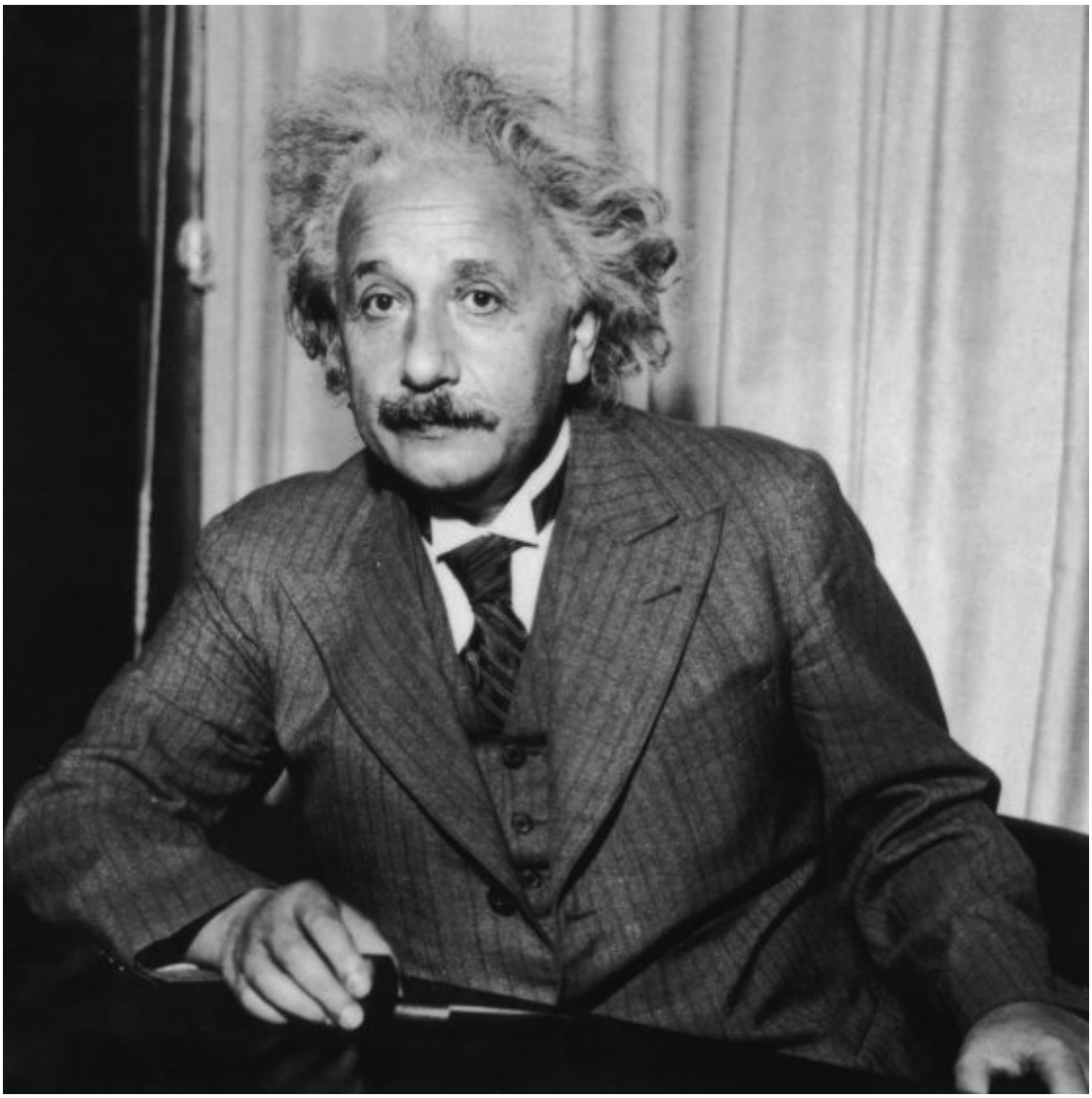
La Relativité Générale d’Albert Einstein, et oui… (partie 6 et dernière)

écrit par Professeur Tetenlair | 19 janvier 2022





Pour relire (ou lire) la première partie de notre exposé, c’est ici.

Pour relire (ou lire) la deuxième partie de notre exposé, c’est ici.

Pour relire (ou lire) la troisième partie de notre exposé, c’est ici.

Pour relire (ou lire) la quatrième partie de notre exposé, c’est ici.

Pour relire (ou lire) la cinquième partie de notre exposé, c’est ici.

ET MAINTENANT?
IL NE FAUT PAS L'OUBLIER, LA CÉLÈBRE FORMULE

MAIS, MAIS, je te réserve une cerise sur le gâteau pour la fin !

Alors, je te le concède, cette dernière partie de la Relativité Générale par l'explication (oh, combien simplifiée !) de la formule E=MC² est un peu technique. Mais bon, difficile de faire autrement. Et puis, c'est notre dernière partie (6 quand même !) de la Relativité Générale. Après, on passe à autre chose.

L'équation E = MC² est une formule d'équivalence entre la masse et l'énergie rendue célèbre par Albert Einstein avec sa publication en 1905 sur la relativité restreinte. Mais, tiens toi bien ma cousine, cette célèbre formule apparaît, en fait en 1900 chez le mathématicien et physicien français Henri Poincaré dans un article « *La théorie de Lorentz et le principe de l'action et de la réaction* » où il développe certains principes de déformation de l'espace-temps qu'il appelle relativité, puis en 1903 dans la thèse peu médiatisée d'Olinto de Pretto.

T'as vu ça ? C'est Henri Poincaré dans son mémoire qui a imaginé cette formule, à laquelle il ajoute certaines notions liées à la relativité restreinte (déformation de l'espace et du temps eux-mêmes, et non simple déformation des solides comme le supposait Fitzgerald), dans son ouvrage La Science et l'Hypothèse, publié en 1902. Je t'en bouche un coin, hein ?

Edmund Taylor Whittaker, mathématicien et historien des sciences britannique, intitule le chapitre 2 du tome II de son

ouvrage « *Histoire des théories de l'éther et de l'électricité*« , paru en 1953, « La théorie de la relativité de Poincaré et Lorentz », en précisant, page 40, qu'en 1905 « Einstein a publié un article qui exposait la théorie de la relativité de Poincaré et Lorentz, avec quelques développements ». Edmund Taylor Whittaker crédite également Henri Poincaré pour la formule $E = mc^2$.

Selon l'historien italien Umberto Bartocci, l'équation d'équivalence entre masse et énergie aurait été formulée dès 1903 par un physicien amateur italien, Olinto de Pretto. La formule est décrite le 29 novembre 1903 dans un article de 62 pages publié par la revue scientifique de l'Institut Royal des Sciences, Lettres et Arts de Venise.

C'est deux ans plus tard, avec le dernier des articles publiés lors de son annus mirabilis, qu'Einstein exprime ce qui deviendra son équation célèbre : Si un corps perd une énergie L sous forme de rayonnement, sa masse diminue de L/c2.(Soit $E = MC^2 > M = E/C^2$)

Dans ce texte il produit une première démonstration pour le cas général de cette égalité, qui jusque-là n'avait été démontrée que dans des cas particuliers. Il en proposera par la suite deux autres, en 1934 et en 1946.

L'équation $E = MC^2$ fait toutefois partie des apports que certains contestent à Einstein dans le cadre de la controverse sur la paternité de la relativité. Celle-ci ne concerne que la relativité restreinte.

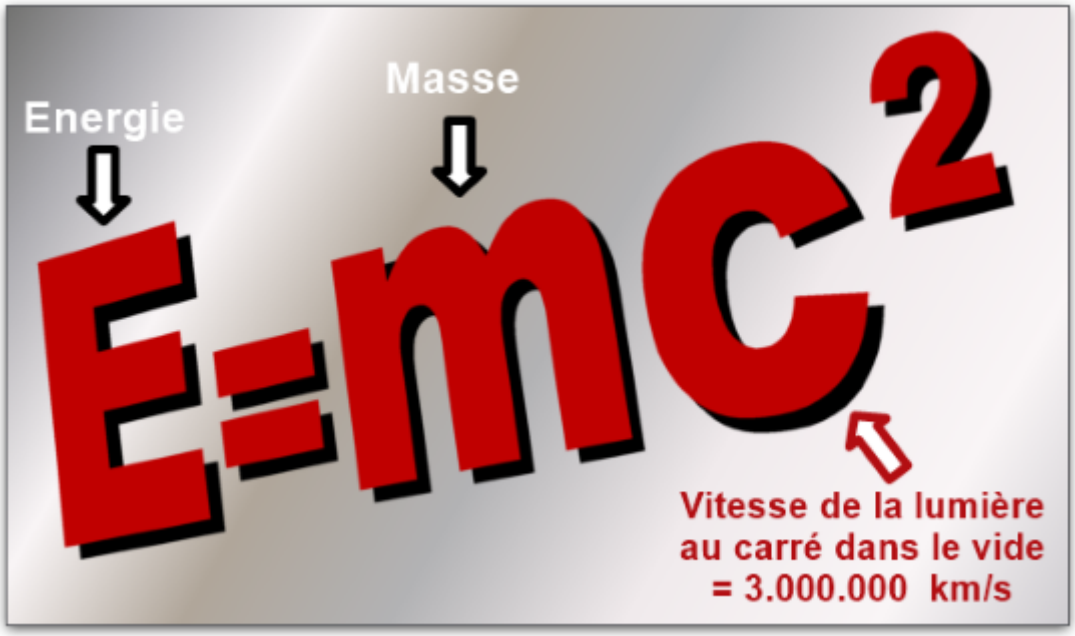
Par contre, la relativité générale, qui demanda dix ans de travaux supplémentaires à Einstein, ne lui fut guère vraiment contestée.

QUE SIGNIFIE

Précisions : le texte qui suit ci-dessous est une explication simple de la formule.

Pour avoir une autre explication simple, très pédagogique de la formule et aussi certaines de ses applications, clique ici

Si tu es une grosse tête, et que tu aimes les maths et la physique poussées, et que tu veux aussi connaître certaines de ses applications, dans ce cas, clique ici. Et…à tes souhaits !



Cette fonction signifie qu'une particule de masse M isolée et au repos dans un référentiel possède, du fait de cette masse, une énergie E appelée énergie de masse, dont la valeur est donnée par le produit de M par le carré de la vitesse de la lumière dans le vide (C).

Cette formule de transformation, qui est celle de la fission

nucléaire et de la bombe atomique, a fortement marqué les esprits car elle met en évidence que, du fait de l'énormité du facteur C^2, une perte de masse même petite à l'échelle humaine peut dégager une quantité considérable d'énergie, par exemple, un gramme de matière que l'on annihilerait par collision avec de l'antimatière (= ensemble des particules dont les caractéristiques sont opposées aux particules ordinaires) correspond à environ 1014 joules, soit approximativement l'énergie dégagée par les premières bombes nucléaires.

En mécanique newtonienne, l'énergie d'une particule isolée provient de sa vitesse et se manifeste sous forme d'énergie cinétique. Au contraire, d'une façon inattendue à l'époque de sa découverte, $E = MC^2$ exprime qu'une particule de masse M possède intrinsèquement une énergie E, même si elle est au repos. Elle stipule que la masse fait partie de l'énergie totale d'un corps, comme l'est l'énergie cinétique. L'énergie totale d'un corps devient donc la somme de son énergie cinétique et de son énergie de masse.

Cette équivalence entre masse et énergie ouvre un éventail de possibilités inconnues de la physique pré-relativiste. En relativité restreinte, la masse peut être « convertie » en chaleur, énergie cinétique ou autre forme d'énergie, au cours d'une réaction. En effet lorsque les particules d'un système donné subissent une transformation, par exemple lors d'une collision, la relativité restreinte impose que l'énergie totale (évaluée dans un certain système de coordonnées) se conserve. Mais comme l'énergie comprend la masse, il est tout à fait possible que « de la masse » apparaisse lors de la réaction (par exemple sous forme de particules) au détriment d'énergie ou que, au contraire, de l'énergie soit libérée par « consommation » de masse.

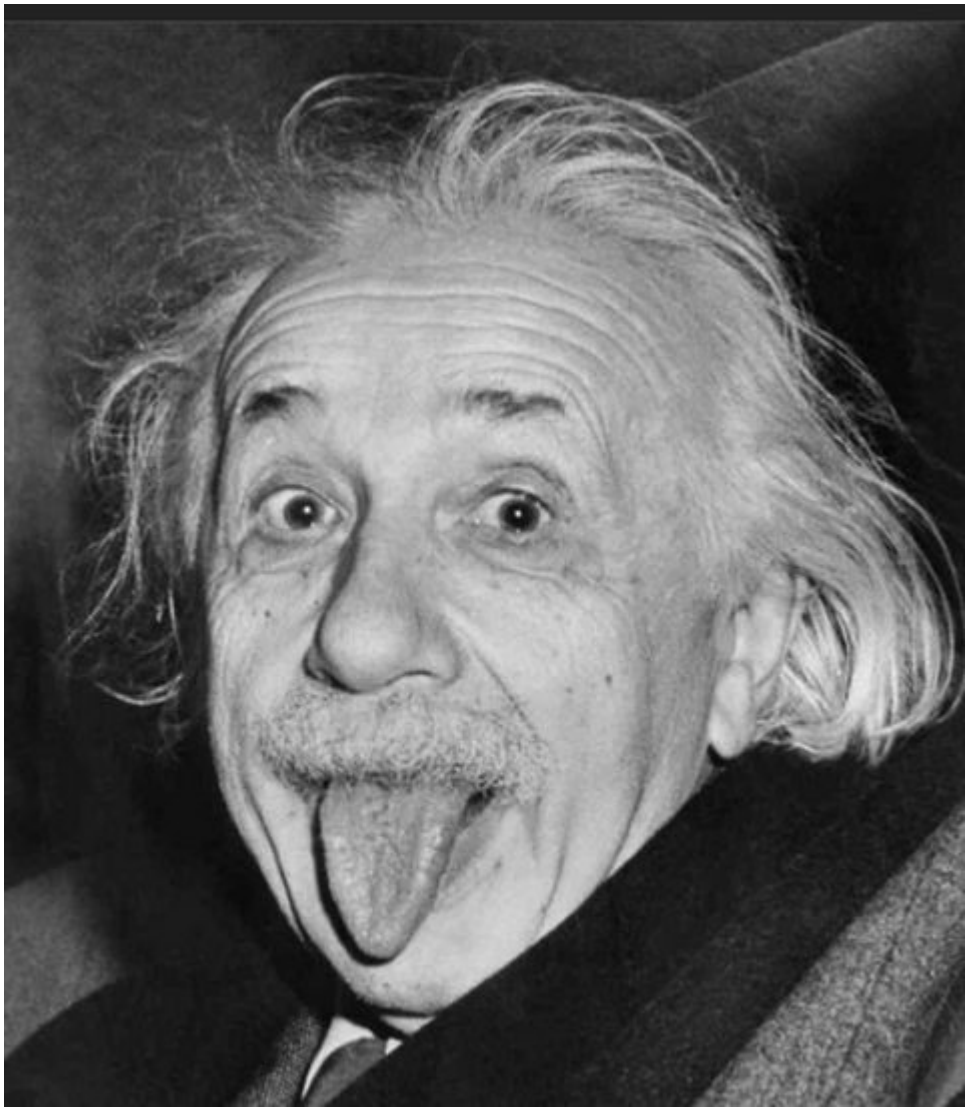
Numériquement, dans l'équation $E = MC^2$ et dans le Système international d'unités :

E est l’énergie exprimée en joules ;

M est la masse (au repos) en kilogrammes ;

C est la vitesse de la lumière dans le vide, soit 299 792 458 m/s = 2,997 924 58 × 108 m/s (environ 300 000 km/s), ce qui correspond à un facteur C^2 d’environ 9 × 1016 m2 s–2.

ET POUR TERMINER, QUAND MEME, UNE COURTE BIOGRAPHIE D’ALBERT EINSTEIN !



Né à Ulm en Allemagne le 14 mars 1879, Albert Einstein grandit au sein d’une famille juive sans grande ferveur religieuse. Musicienne, sa mère lui donne le goût de la musique, tandis que son père et son oncle éveille en lui l’amour des mathématiques. Malgré une curiosité insatiable pour certains

domaines, ses professeurs restent sceptiques à son sujet. Certes, il excelle en mathématiques, mais obtient des mauvais résultats dans toutes les autres matières. Par ailleurs, sa dyslexie, qui le handicape jusqu'à ses dix ans, ne lui facilite pas la tâche. Tant bien que mal, Einstein poursuit sa scolarité au sein des Gymnasium (lycée allemand), où l'éducation rigide et militaire dispensée alors ne contribue guère à renforcer son amour de l'école.

À cette époque, ses parents, par un malheureux retour de fortune, sont contraints de quitter le pays pour l'Italie. Albert Einstein les y rejoint durant un an, avant de finir ses études. Il ambitionne alors d'intégrer l'École polytechnique de Zurich. Malgré un premier échec, il finit par y être accepté en 1896. Toutefois, ses résultats restent décevants. En 1900, il obtient sa licence. Mais, sans recommandation de la part de ses professeurs, Einstein ne peut guère aspirer à des postes universitaires. Après une période de chômage, il demande la nationalité suisse et occupe, dès 1902, un emploi d'expert à l'Office fédéral des brevets de Berne. Son emploi du temps lui permet de se pencher sur des travaux de physique, matière pour laquelle il se passionne toujours.

La théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein

Après son mariage avec la physicienne Mileva Maric, en 1903, il poursuit les recherches qui lui tiennent à cœur. Celles-ci aboutissent à la rédaction de quatre articles fondamentaux et révolutionnaires, publiés au cours de l'année 1905 dans la revue allemande Annalen der Physik. Après avoir fourni des explications théoriques de l'effet photoélectrique (nature de la lumière) puis du mouvement brownien (mouvement moléculaire), Einstein s'attarde sur l'un des grands problèmes physiques de l'époque. En effet, entre les théories contradictoires de la mécanique classique de Newton et de l'électromagnétique de Maxwell, la discipline se trouve dans l'impasse.

Dans un article intitulé « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », Einstein apporte enfin la solution pour concilier les deux hypothèses. Pour cela, le physicien part de deux principes : la vitesse de la lumière est constante dans le vide, quelle que soit sa source ; les lois physiques de la relativité s'appliquent de la même façon dans un référentiel inertiel (c'est-à-dire dans un milieu constant, sans accélération ni changement de direction : deux référentiels sont en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre). Ces deux conditions posées, il peut alors prouver que l'espace et le temps sont relatifs à chacun des repères inertiels des observateurs. C'est la théorie de la relativité restreinte.

Il la complète un peu plus tard par un dernier article dans lequel il présente sa formule $E=mc^2$ (permettant de traduire une équivalence entre la masse et l'énergie, « c » étant la vitesse de la lumière dans le vide). Cette relation aura de nombreuses applications et conséquences, tant sur le plan théorique que pratique, notamment en physique nucléaire. Dans un premier temps, ses travaux ne font pas l'unanimité mais lui ouvrent la voie de la reconnaissance scientifique. Il obtient d'ailleurs une habilitation à l'université de Berne en 1909 puis un poste d'enseignant à l'université de Zurich en 1910.

La théorie de la relativité générale d'Albert Einstein

Comme son nom l'indique, la relativité restreinte ne peut pas s'appliquer de manière générale. Aussi, dès 1907, Einstein consacre une grande partie de ses recherches à proposer des explications qui ne s'appliquent pas au seul cas d'un référentiel inertiel mais en toutes circonstances. Toutefois, de tels travaux nécessitent des connaissances particulièrement poussées en mathématiques, lesquelles lui font défaut. À partir de 1912, il enseigne à l'École polytechnique de Zurich et rencontre l'un de ses anciens camarades : Marcel Grossmann. Grâce à l'aide scientifique de ce dernier, Einstein peut enfin progresser dans ses recherches.

Malgré une erreur qui le paralyse pendant trois ans, il parvient finalement à élaborer une théorie concrète. Il prétend alors qu'au sein du phénomène de gravitation, la masse influe sur les propriétés géométriques de l'espace-temps. Autrement dit, la masse déforme une localité de l'espace. Tout corps approchant de cette masse est alors affecté par la déformation qu'elle provoque. Einstein publie sa théorie de la relativité générale dès 1915, mais ne convainc pas tout de suite les physiciens, qui lui reprochent entre autres le caractère philosophique de ses travaux. Il faut attendre l'éclipse de 1919 et les travaux de l'astronome britannique Arthur Eddington pour rendre ses conclusions plus crédibles. Les observations d'Eddington montrent en effet que les rayons lumineux des étoiles sont déviés par la masse du Soleil. L'événement marque alors le début de la consécration scientifique d'Einstein, dont la popularité ne va cesser de croître.

L'engagement pour la paix d'Albert Einstein

Le physicien est aussi un homme engagé, qui se fait le défenseur de la paix. Il a soutenu sa cause tout au long de la Première Guerre mondiale. Aussi, après avoir reçu le prix Nobel de physique en 1921, il n'hésite pas à profiter de sa popularité grandissante pour affirmer ses idées, notamment pacifistes et sionistes. Einstein devient l'une des cibles favorites des médias mais aussi celle des persécutions raciales. Lorsque Hitler accède au pouvoir en 1933, le physicien quitte son pays natal et se rend à Princeton, aux Etats-Unis. Bientôt, la Seconde Guerre mondiale éclate et Einstein est effrayé à l'idée que les nazis puissent élaborer une arme nucléaire. Aussi, en 1939, il signe une lettre destinée au président américain Roosevelt afin de le convaincre de lancer un projet de construction de la bombe atomique. Ce courrier joue un rôle important dans la mise en place du projet Manhattan. S'étant détourné de ses convictions pacifistes par peur du nazisme, Einstein se reprochera son

intervention durant le reste de sa vie. Il était d'ailleurs revenu sur ses pas en 1945, sommant le président d'abandonner l'arme atomique.

Après la guerre, il s'efforce de lutter pour le désarmement international, et intégre le Comité d'Urgence des savants atomistes. Par ses travaux sur l'effet photoélectrique et ses conclusions sur la lumière (à la fois onde et particule), Einstein a également contribué à lancer la théorie quantique. Pourtant, il s'oppose à ses principes probabilistes, affirmant que « Dieu ne joue pas aux dés ». Se heurtant à la jeune génération de physiciens représentée notamment par Pauli, Heisenberg et Bohr, Einstein tente jusqu'à sa mort de concilier sa vision déterministe du monde avec les conclusions modernes de ses jeunes pairs.

La mort d'Albert Einstein

Le 18 avril 1955, Albert Einstein est victime d'une rupture d'anévrisme et meurt à l'âge de 76 ans à Princeton (Etats-Unis). Considéré comme le dernier représentant de la physique classique, il a sans conteste révolutionné la discipline. Tout en conciliant engagement politique et recherches scientifiques, il a permis de sortir la physique de l'impasse grâce à sa théorie de la relativité restreinte, puis de lui donner un nouvel élan avec ses conclusions sur la relativité générale. Au travers de ses recherches, il a également ouvert la voie à la physique nucléaire et à la physique des particules élémentaires. D'une renommée internationale, Albert Einstein laisse derrière lui une image mythique du scientifique.

Le QI d'Albert Einstein

Albert Einstein n'ayant jamais passé de test de QI, les scientifiques ne peuvent que faire des suppositions sur le quotient intellectuel du célèbre physicien. Il est placé généralement entre 160 et 180. En revanche, les études qui ont

été faites sur son cerveau (volé par son médecin légiste après sa mort) montrent un nombre de cellules plus dense que la moyenne. Quant à savoir si l'homme était atteint d'autisme, la question partage ses différents biographes. Pour certains, c'est une évidence. Ses difficultés scolaires, son retard de langage, son intellect, font de lui un autiste Asperger. Pour d'autres, Albert Einstein était une personne tout à fait normale dotée d'un grand sens de l'humour et entourée d'amis.

ALBERT EINSTEIN : DATES CLÉS

14 mars 1879 : Naissance d'Albert Einstein

Albert Einstein naît à Ulm, dans l'État de Wurtemberg en Allemagne. Sa mère est musicienne, et son père possède une usine électrochimique. Il grandira également auprès de son oncle ingénieur, qui, avec son père, lui donnera le goût des mathématiques.

1896 : Entrée à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich

Après une première tentative infructueuse, Einstein est accepté à l'Ecole polytechnique de Zurich. Sans briller dans les études, il obtiendra son diplôme en 1900 et y rencontrera sa future épouse, Mileva Maric.

Juin 1902 : Il occupe le poste d'expert à l'Office des brevets de Berne

1903 : Mariage avec Mileva

Einstein épouse son ancienne camarade d'étude, Mileva Maric, avec laquelle il a déjà eu une fille, Liersel. Mais le couple l'avait abandonnée de peur qu'une naissance hors mariage puisse nuire à la carrière professionnelle d'Einstein. Ensemble, ils auront deux fils, Hans Albert (1904) et Edward (1910), avant de se séparer. Einstein se remariera en 1919 avec sa cousine, Elsa.

Mars 1905 : Einstein publie un article sur l'effet

photoélectrique

Albert Einstein publie un premier article révolutionnaire dans la revue « Annalen der Physik », intitulé « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière ». Pour comprendre la nature de la lumière, il s'est penché sur l'effet photoélectrique, phénomène par lequel certains matériaux émettent des électrons sous l'action des rayons lumineux. En s'appuyant sur les travaux de Max Planck, il explique que la lumière est formée de « quanta » (postérieurement appelés « photons »), sorte de grains d'énergie qui, en fonction de la fréquence du rayonnement, provoque l'émission de ces électrons. Il en déduit que la lumière est à la fois continue et discontinue, une conclusion qui l'amènera à la dualité onde-particule de la lumière (elle présente simultanément les propriétés physiques de l'onde et de la particule).

Mai 1905 : Einstein explique le mouvement brownien

Dans un second article intitulé « Sur le mouvement brownien », Einstein explique ce phénomène de mouvement désordonné des particules immergées dans un fluide comme une conséquence de la nature atomique de la matière.

Juillet 1905 : Einstein publie sa théorie de la relativité restreinte

Installé à Zurich depuis 1896, le physicien d'origine allemande Albert Einstein publie dans la revue scientifique « Les Annales de physique » (Annalen der Physik) un article qui va révolutionner la physique moderne : « Électrodynamique des corps en mouvement ». À 26 ans, Einstein sort la physique de l'impasse en conciliant les théories électromagnétiques de Maxwell et les théories mécaniques de Newton. Il pose deux conditions précises : la vitesse de la lumière est constante dans le vide et les lois de la physique sont valables dans un milieu inertiel (sans accélération ni changement de

direction). Il démontre alors que l'espace et le temps dépendent de chaque milieu inertiel. Autrement dit, deux individus placés dans des milieux inertiels différents n'auront pas la même conception du temps et de l'espace. Il montrera un peu plus tard que la relativité restreinte a pour principe fondamental la relation entre la masse et l'énergie ($E=mc^2$).

1916 : Einstein publie sa théorie de la relativité générale

Dès 1907, Einstein cherche à appliquer les principes de la relativité à tous les cas de figure. Après des années de recherches, il publie les conclusions de ses travaux, élaborant ainsi la théorie de la relativité générale. Il explique que la masse d'un corps, dans le phénomène de gravitation, déforme partiellement l'espace-temps (de quatre dimensions : trois dimensions de l'espace et une du temps). Aussi, tout objet approchant d'un corps massique est affecté par la déformation provoquée par celui-ci. Le champ gravitationnel n'est donc plus responsable des interactions entre les corps, comme le stipulait Isaac Newton. La théorie d'Einstein sera confirmée en 1919 par les observations du britannique Arthur Eddington menées sur une éclipse. Il approfondira ses recherches en matière de gravitation et d'électromagnétisme jusqu'en 1950.

10 décembre 1922 : Einstein reçoit le prix Nobel de physique

Einstein reçoit le prix Nobel de physique, qui lui avait été attribué en 1921 pour ses recherches sur l'effet photoélectrique. Ses travaux sur la relativité ne font alors pas encore l'unanimité parmi les scientifiques.

1924 : Travaux sur la théorie de Bose-Einstein

Alors que la théorie quantique se développe de plus en plus, Einstein collabore avec l'Indien Satyendranath Bose sur l'élaboration de la statistique de Bose-Einstein. Celle-ci s'applique aux bosons (particules de spin entier) et contribue

à l’avancée de la physique quantique, même si Einstein s’oppose aux principes probabilistes de celle-ci. En fait, Bose avait avant tout effectué ses recherches sur les photons. Einstein les a ensuite appliquées aux atomes.

1928 : Einstein est nommé président de la Ligue des droits de l’homme

17 octobre 1933 : Einstein se réfugie aux Etats-Unis

Le physicien allemand est contraint de quitter l’Allemagne nazie suite à la mise à sac de sa maison en début d’année. De confession israélite, il s’est engagé dans la bataille contre le nazisme dès l’année 1914. Avec l’avènement d’Hitler, Einstein décide de fuir vers les Etats-Unis et accepte le poste qu’on lui a offert à l’Institute for Advanced Study de Princeton dans le New Jersey. Il prendra la nationalité américaine en 1940.

29 mars 1934 : Les nazis lui retirent la nationalité allemande

2 août 1939 : Lettre d’Einstein à Roosevelt

Albert Einstein cosigne avec les physiciens Leo Szilard, Edward Teller et Eugen Wigner, une lettre au président Roosevelt expliquant les risques que présenterait l’Allemagne nazie si elle détenait l’arme atomique. Suite au courrier, Roosevelt créera le « Manhattan Project » ayant pour objectif la réalisation d’une bombe atomique, comme le demandait le courrier. Le 6 et 9 août 1945, les Américains lanceront deux bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki.

1940 : Einstein adopte définitivement la nationalité américaine

18 avril 1955 : Mort d’Albert Einstein

À 76 ans, Albert Einstein meurt d’une rupture d’anévrisme. Après avoir bouleversé le monde de la physique par ses théories sur les relativités restreinte et générale, Einstein

deviendra une figure mythique de la science.

Professeur Têtenlair