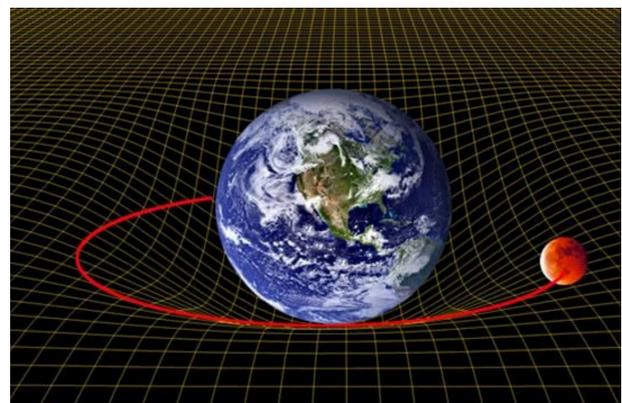
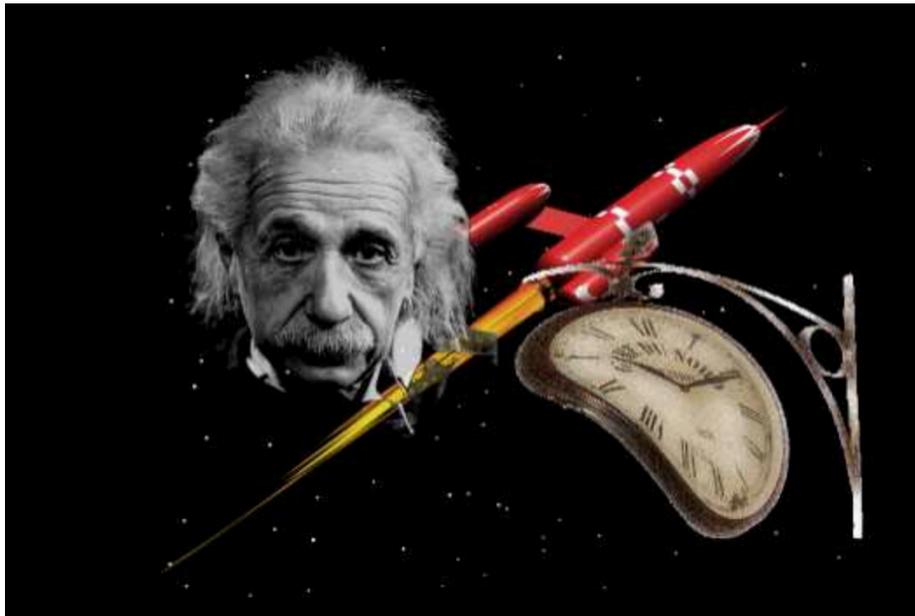
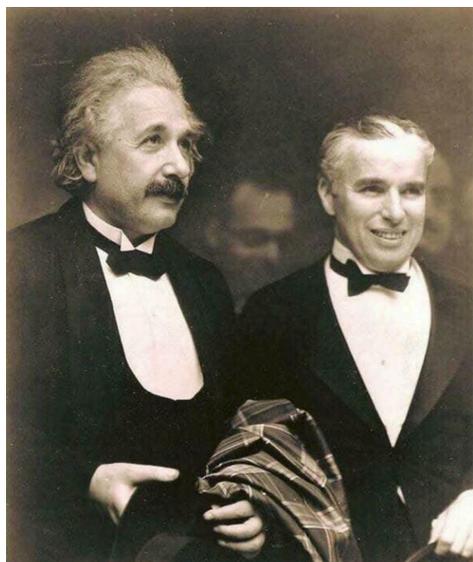


# Le doute nécessaire

## Chapitre III : Théorie et histoire de l'astrophysique



Quand Albert Einstein a rencontré Charlie Chaplin en 1931, Einstein lui a dit :  
« Ce que j'admire le plus dans votre art est son universalité. Vous ne dites pas un mot et pourtant le monde vous comprend. »  
« C'est vrai, lui répondit Chaplin. Mais votre renommée est encore plus grande. Le monde vous admire quand personne ne vous comprend. » Peut-être admirerez-vous Einstein en connaissance de cause après avoir lu ce chapitre.



La physique et l'astrophysique explorent l'univers dont nous faisons partie, ces deux sciences ont un but commun : comprendre les principes fondateurs, comprendre ce qu'est l'univers et ce qui s'y est passé depuis sa naissance. Elles analysent, du plus petit au plus grand, son fonctionnement. La quête ultime, finalement, est d'essayer de répondre aux questions fondamentales que se pose l'être humain : Est-on seul dans l'univers ? Y a-t-il un Dieu ou tout autre chose derrière tout cela ?

Voilà, me semble-t-il, des sujets importants à aborder si le doute nécessaire est la thématique de ce livre.

Et pour mieux discerner notre place dans cet immense cosmos, il est donc primordial d'aborder ces sciences, il est nécessaire d'évoquer la physique pour, ensuite, pouvoir appréhender l'astrophysique et ainsi mieux entrevoir la métaphysique\*. Y a-t-il une raison à notre existence ? Avons-nous une tâche à y remplir ? Y a-t-il « une vie » après la mort physique ?

## 1. Le grand tout, l'univers

Derrière la réalité quotidienne, il y a un monde fascinant dans lequel il apparaît que notre perception de l'univers est ... faussée.

Quelle est donc la véritable apparence du cosmos ?

En fait, il n'y a pas de réponse unique.

Pour tenter de sonder l'incroyable diversité des visages du cosmos, il faut le scruter avec des moyens d'investigation qui dépassent les mécanismes nécessaires pour vivre notre aventure d'être humain.

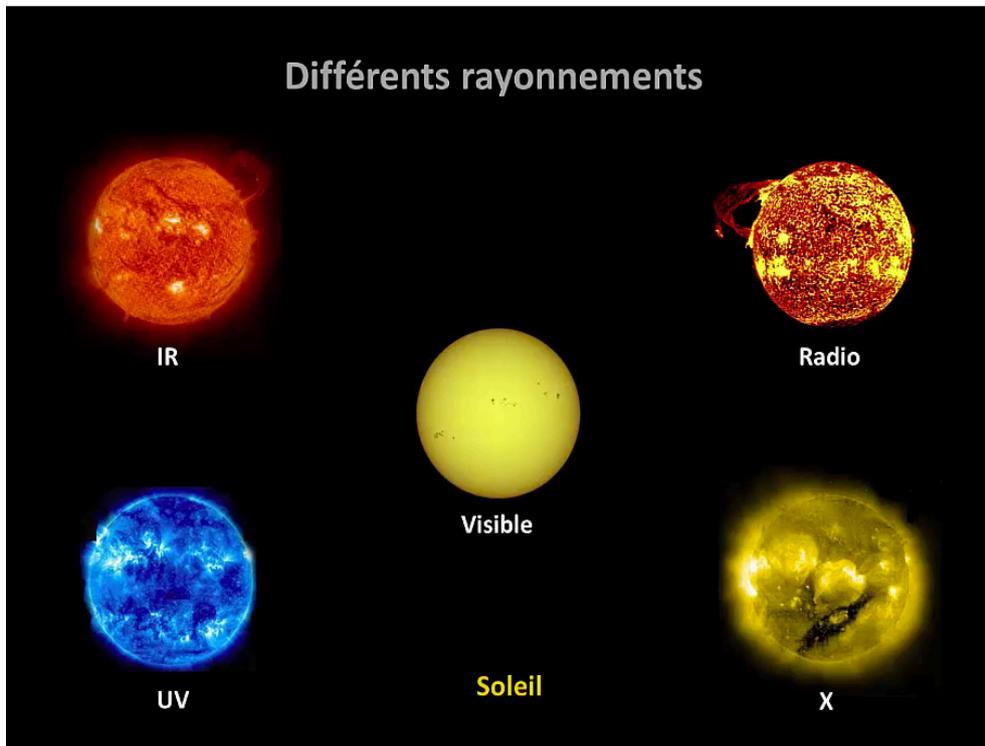
Depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma, en passant par les infra-rouge, par les micro-ondes, par les rayons X, c'est une fantastique diversité d'images du cosmos, il n'y a pas de vision unique. Il y a une extraordinaire diversité du réel qui nous entoure, le monde est une magnifique étrangeté.

\*Métaphysique : Recherche rationnelle ayant pour objet la connaissance de l'être (esprit, nature, Dieu, matière...), des causes de l'univers et des principes premiers de la connaissance.

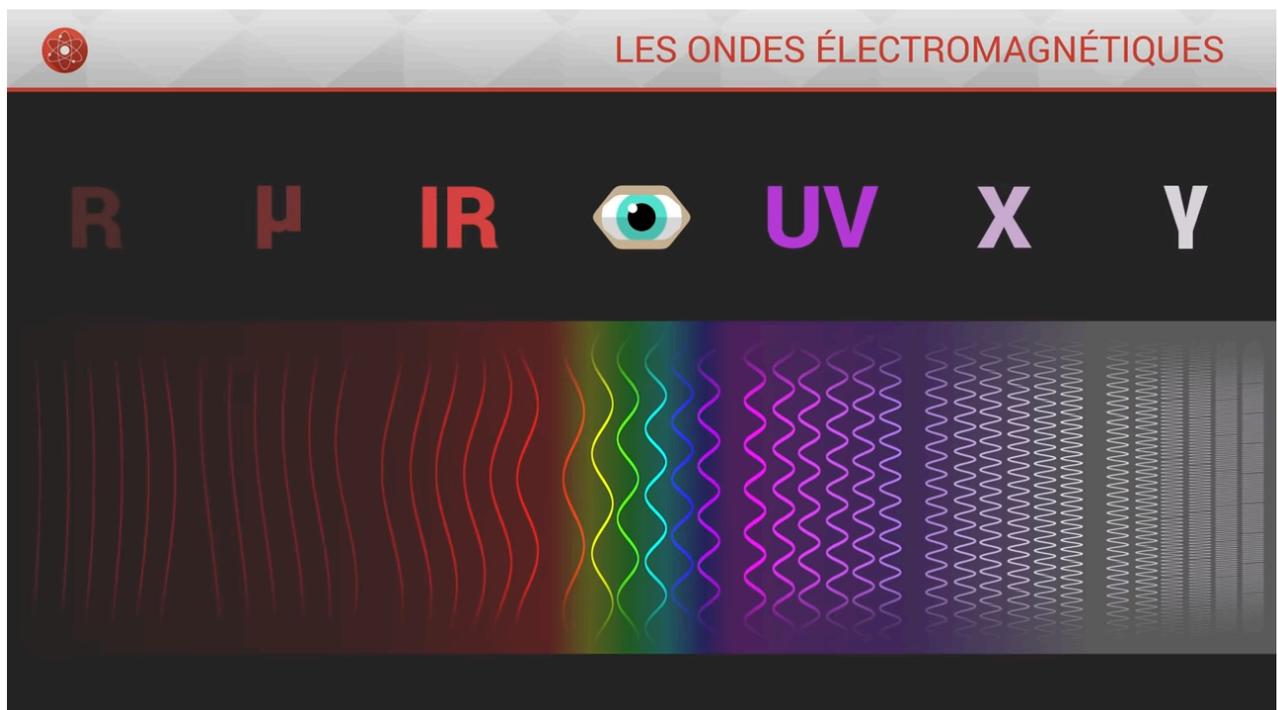
Seule la lumière optique est visible à nos yeux. Notre cerveau ne perçoit que ce rayonnement. La perception humaine est effroyablement limitée. Nous pensons voir un tout, alors que nous ne voyons qu'une fraction.

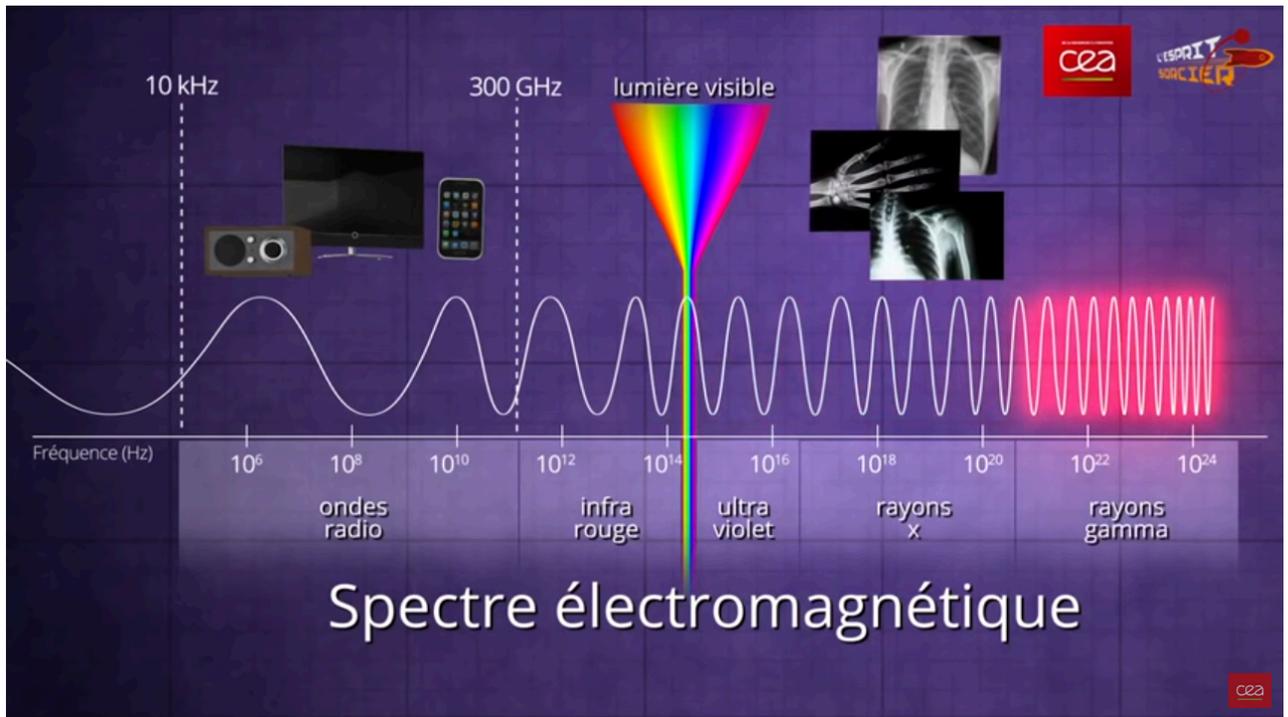
Voici comment est perçu notre Soleil

Selon les différents rayonnements : infrarouge, ultraviolet, radio, optique (visible par l'homme), rayon X.



Ces deux schémas ci-dessous montrent ce que nos yeux sont capables de voir, une toute petite fraction de toutes les ondes électromagnétiques.

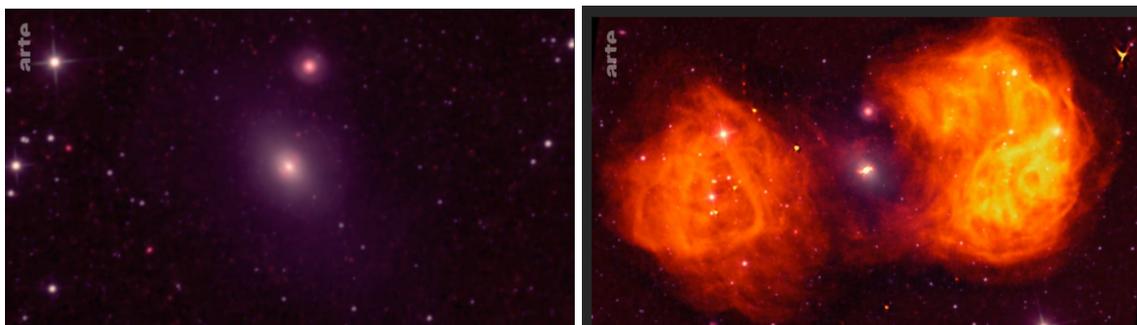




Si, dans le spectre des rayons optiques (ou visibles), une galaxie peut sembler paisible (le vert sur la photo ci-dessous), aux rayons X, elle bouillonne d'activités (en mauve sur la photo).



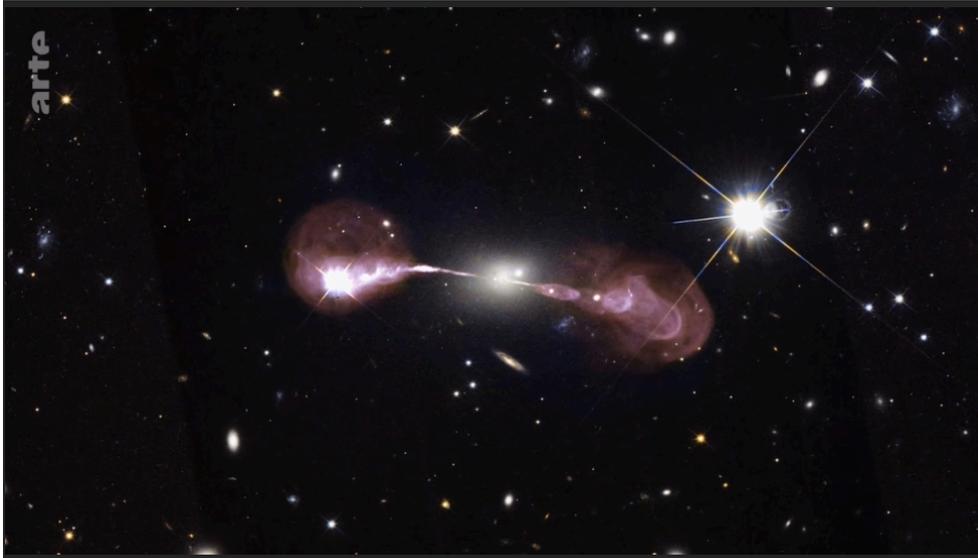
Les astronomes se sont rendus compte que la voûte céleste qui paraissait si tranquille, si calme et dépourvue de la moindre activité, hormis le mouvement des planètes (en mauve, ci-dessous), était en réalité chaotique (la couleur orange).



La radio astronomie et les rayons X nous ont ouvert le ciel et ont permis de détecter des objets pâles ou invisibles pour nos yeux, émettant une énergie colossale auparavant insoupçonnée.

Les chercheurs ont découvert que l'univers était très différent, bien plus violent et plus actif, de ce qu'ils observaient en lumière visible.

Ici en rose, ce que l'on voit aux rayons X



**Déjà nous pouvons en déduire une première conséquence :  
notre réalité humaine n'est pas la vraie réalité !**

Autre constat :

Si l'on représente **l'évolution de l'univers** de 13,7 milliards d'années **en 1 an** :

Notre système solaire apparaît seulement au mois d'aout !

Le 15 décembre, les mammifères sortent de l'eau et le 30 décembre, suite à une météorite, les dinosaures disparaissent.

Et le 31 décembre vers 23h, apparaissent les premiers homidiens !



Et la chute de l'empire romain a lieu le 31 décembre à 23 heures 59 minutes 56 secondes !

**Cela donne une idée des échelles de temps gigantesques de notre univers par rapport à notre propre existence.**

Alors notre création est-elle le but final de l'évolution de l'univers ?

Ou sommes-nous là pour un court instant dans cet univers, comme n'importe quelle particule l'est à l'intérieur d'un objet ?

Dans ce gigantesque univers qui contient des centaines de milliards de galaxies et dans ces galaxies, des centaines de milliards d'étoiles avec chacune leurs planètes, on peut se demander : est-ce qu'il y a un autre endroit où les gens se posent ces questions ?

Il faudrait d'abord définir ce qu'est la vie ?

Elle peut certainement se présenter sous des formes différentes que celles que nous connaissons. On a découvert des bactéries extrêmophiles c'est-à-dire des bactéries qui aiment se développer dans des conditions extrêmes. Par exemple dans des geysers de soufre à 200 degrés sur Terre, comme sur Mars !

Le satellite Kepler a repéré plus de 100 planètes potentiellement semblables à la Terre autour d'étoiles lointaines dans notre galaxie. Mais que veut dire habitable ? Pour nous ou pour d'autres espèces qui n'ont pas les mêmes besoins pour se développer ?

Ensuite il faudrait aussi définir ce qu'est l'espace ?

N'a-t-il un sens qu'entouré de cloisons ? L'espace n'existe-t-il que quand il est habité ?

Pensons à la distance qui sépare deux objets. Cet espace existe-t-il encore si on enlève les objets ? Quelle signification donner à la distance si elle n'a ni début, ni fin ?

En fin de compte, la question est : l'espace lui-même a-t-il une contenance ? A-t-il une structure ou une forme ou est-ce simplement un endroit où des choses arrivent ?

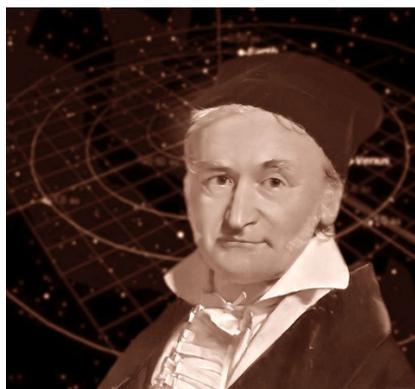
Les propriétés de l'espace ont d'abord été décrites par le mathématicien **Euclide**, il y a plus de 2000 ans. Il a établi un ensemble de règles simples et logiques au sujet de l'espace dans ce qu'on appelle aujourd'hui la géométrie euclidienne.

C'est la géométrie que l'on voit à l'œuvre quotidiennement autour de nous. Si l'on est assis dans une pièce rectangulaire ordinaire, on voit beaucoup de lignes droites, d'angles droits, de lignes parallèles. Les deux côtés d'une fenêtre, par exemple, sont parallèles. Si on les prolongeait, ils resteraient à la même distance l'un de l'autre sans jamais se rencontrer. Ce que l'on verrait aussi en regardant de plus près, c'est que la somme des angles d'un triangle est toujours égale à 180 degrés. Ce sont les caractéristiques de la géométrie euclidienne.

Et tout le monde pensait que la géométrie était ainsi et qu'il n'existait aucune autre possibilité. Pour Euclide lui-même comme pour tous les mathématiciens, au cours des 2000 ans suivants, ces règles n'étaient pas seulement vraies mathématiquement, elles constituaient aussi des affirmations sur la réalité physique elle-même. On pensait donc que deux lignes parallèles resteraient parallèles à jamais. Qu'un triangle dans l'espace aurait toujours des angles dont la somme serait égale à 180 degrés.

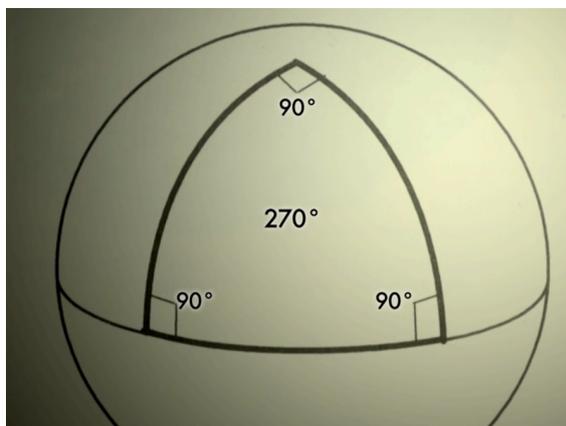
Mais aussi bizarre que cela puisse paraître, ce n'est pas toujours vrai.

En Allemagne, il y a 250 ans, naquit un physicien doué de la capacité et de l'originalité nécessaires pour commencer à contester la géométrie euclidienne et à changer nos idées sur l'espace. Il s'appelait **Carl Gauss**.



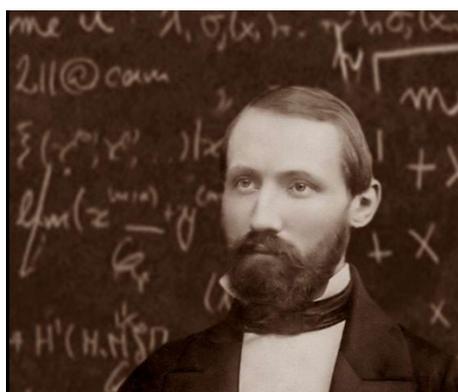
Plus précisément, il commença par voir que dans les espaces incurvés, courbés, d'autres sortes de géométries pouvaient exister avec des règles différentes.

Par exemple, à la surface d'une sphère, la somme des angles d'un triangle peut excéder 180 degrés et une infinité de parallèles peuvent passer par un point.



Ses découvertes ne s'appliquaient qu'aux surfaces courbées en deux dimensions.

Il faudra attendre qu'un brillant étudiant de Gauss : **Riemann** développe ces idées de façon à ce qu'elles puissent s'appliquer à l'espace tridimensionnel qui nous entoure.



Son concept est hardi, bizarre, voire absurde pour un non-mathématicien.

En 1854, devant un public en extase, Riemann a résumé ses étranges idées lors d'une conférence qui allait devenir légendaire parmi les mathématiciens. Il détailla la façon dont il avait généralisé les idées de Gauss sur les surfaces courbées afin qu'elles ne s'appliquent pas seulement aux surfaces bidimensionnelles mais à la courbure d'un espace, dans n'importe quelle dimension.

**Tout ceci prouve qu'une expérience de penser peut obliger à réinterpréter l'observation au quotidien. Parfois la physique se construit en fait contre le sens commun et surtout contre l'observation.**

Le génie de Riemann fut de montrer que pour savoir si un espace est courbe, on peut le calculer de l'intérieur de cet espace.

Mais ceci restera une idée purement mathématique.

C'est Einstein qui va relier ces concepts mathématiques et appliquer la géométrie flexible, courbe, non euclidienne, à l'espace qui nous entoure.

**Le point le plus important de l'histoire, c'est qu'elle montre à quel point les mathématiques et le monde réel sont liés.**

Autre point crucial est que chercher, même sans savoir pourquoi, peut aboutir à de grands bouleversements.

Dans ce cas-ci, cela a commencé avec un mathématicien se demandant s'il pouvait y avoir une géométrie différente de celle d'Euclide. Et, à force de chercher, les mathématiciens conclurent avec étonnement que plusieurs géométries différentes étaient possibles, seulement personne ne voyait à quoi pouvoir appliquer ces concepts.

Si quelqu'un avait demandé à Riemann : à quoi sert cette découverte ? Il aurait répondu : c'est juste intéressant.

Mais voilà qu'intervient le visionnaire Einstein !

Il se dit que c'est exactement ce dont il a besoin.

Tout à coup, grâce à lui, ces mathématiques ésotériques deviennent essentielles à l'entreprise scientifique. Cela devient de la physique réelle !

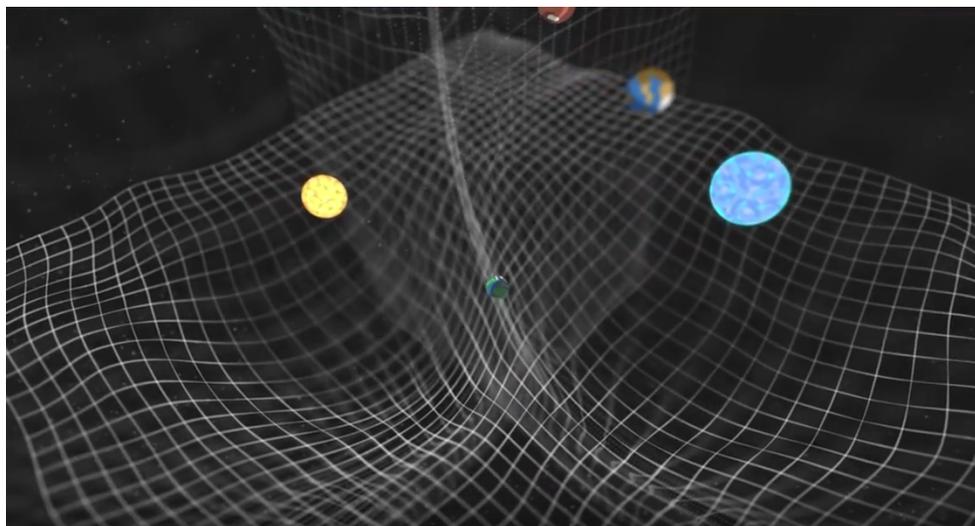
Einstein démontre que l'on ne vit pas dans le monde plat d'Euclide mais dans le monde étrange et courbe de Gauss et Riemann.

En l'espace de quelques années, Einstein est mondialement connu grâce au travail de toute sa vie : la théorie générale de la relativité.

Dans sa théorie, Einstein est parti des mathématiques de Gauss et Riemann et s'en est servi pour dépeindre une image révolutionnaire du monde physique. L'espace est courbe et déformé partout autour de nous, la perspicacité d'Einstein a montré que c'était la capacité de l'espace à se tordre et se courber, à être flexible et de géométrie variable qui donnait naissance à la force que l'on appelle gravité.

Depuis Newton, on pensait que la gravité était une force qui attirait les objets ensemble.

Mais la théorie de la relativité générale nous donne une image totalement différente et une perspective radicalement nouvelle. La gravité n'est rien d'autre que la courbure de l'espace lui-même. Quand un objet tombe, il n'est pas du tout attiré par la gravité. Il suit simplement le chemin le plus simple à travers l'espace courbé par son poids.



Les équations de la théorie générale ont révélé que c'était la présence de la masse qui conduisait l'espace à se courber et se déformer. La raison pour laquelle la gravité existe sur Terre, c'est parce que la Terre courbe l'espace autour d'elle par son poids.

**Dans la théorie d'Einstein sur l'univers, l'espace devient un corps dynamique, presque vivant qui réagit à son contenu par une déformation. L'espace connaît la présence de corps gravitationnels et réagit à leur présence en changeant sa géométrie, sa forme.**

La théorie d'Einstein a révélé que l'espace lui-même, l'univers entier, le grand tout n'était pas seulement extraordinairement grand, mais qu'il avait également une forme et une structure.

La forme de l'univers est liée à son contenu c'est-à-dire à la quantité de matière qui s'y trouve et à la nature de cette matière.

Gauss, Riemann et Einstein, à eux trois, ont réussi à décrire la façon dont le temps et l'espace que nous habitons peuvent être déformés. Ils ont montré que l'espace et le temps ne sont pas une scène fixe et immuable.

(Je n'ai pas encore parlé du temps qui est un concept plus difficile à comprendre. J'y reviendrai en consacrant un paragraphe entier à l'explication de ce que sont les deux relativités d'Einstein.)

Plus tard, les observations au télescope de Hubble (du nom d'un astrophysicien) vont dans la même direction que la théorie générale d'Einstein et la confirment c'est-à-dire que l'univers a une forme mais en plus, Hubble prouve qu'il est en expansion. Ce ne sont pas les galaxies qui se dilatent mais plutôt la matière, dont est fait l'espace lui-même entre les galaxies, qui grossit, l'univers dans sa totalité s'agrandit.

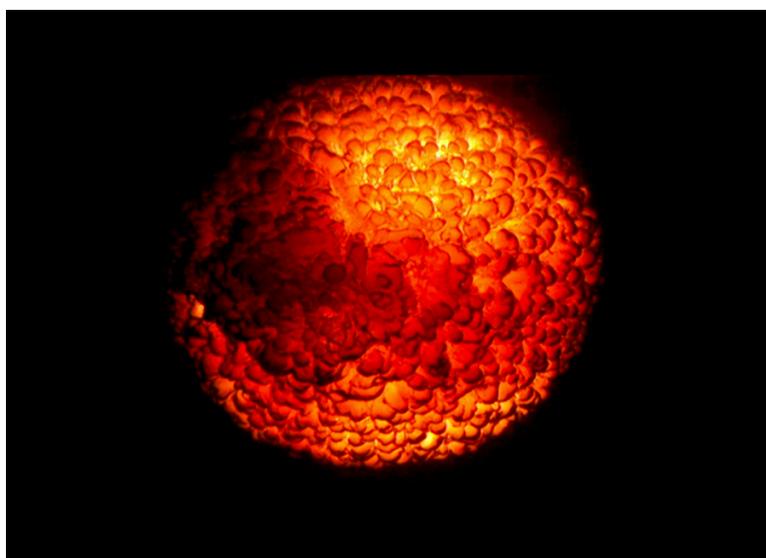
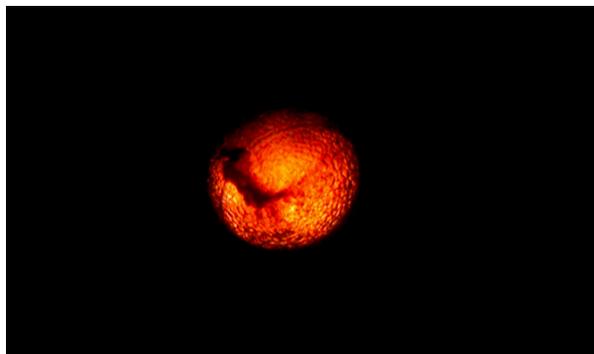
C'est ce qu'a révélé le travail d'Einstein et d'Hubble, l'un par la théorie mathématique, et l'autre, plus tard, par l'observation !

Pourquoi l'univers se dilate-il ainsi ?

Ces scientifiques se sont vite mis d'accord : forcément si la matière de l'espace se dilate, cela signifie qu'avant, l'univers était plus petit. Et si l'on remonte suffisamment le temps, il apparaît qu'il y a un moment où tout notre univers a commencé. Les données indiquaient un moment de création.

Les sceptiques l'appelèrent par dérision : le Big bang et l'expression est restée.

Simulation du Big bang



De nombreux scientifiques n'étaient pas convaincus par cet apparent big bang. Cette conception semblait aller trop loin, c'était un changement trop important dans la conception de l'univers. Pour convaincre la communauté scientifique, il fallait une preuve irréfutable.

Un chercheur américain d'origine russe démontre alors mathématiquement que le big bang devait avoir été suivi d'un immense flash lumineux. Or un rayonnement n'arrête jamais de se propager sauf s'il est absorbé par quelque chose. Par conséquent, il devrait rester dans l'univers, même aujourd'hui, une trace lumineuse de ce flash, un pâle écho de la formation des mondes. Pourrait-on un jour détecter un signal aussi faible ?

En 1965, deux ingénieurs qui mettaient au point des radios télescopes, virent une sorte de bruit de fonds cosmique et ne savaient pas trop quoi faire avec ces observations, voyant cela comme une anomalie technique. Lors d'un séminaire, ils exposèrent leurs résultats bizarres.

Il y avait dans la salle des cosmologistes théoriciens qui comprirent que c'était là cette preuve qu'ils cherchaient tant, que l'on avait enfin détecté, ce pâle écho du grand flash au moment du Big bang, ce « le rayonnement fossile ».

Et il s'est avéré qu'il l'était. Au moment du Big bang, à chaque endroit de l'espace, les photons de cet éclair lumineux se mirent à voyager sans entrave et l'univers entier fut rempli d'une lumière aveuglante.

Mais cette lumière émise lors de l'univers naissant s'est estompée. Alors que l'espace se dilatait, la lumière s'est étirée à travers le spectre en micro-ondes.

Aussi improbable que cela paraisse, la relique de la boule de feu du Big bang est en fait encore visible... à la télévision maintenant. C'est ce qu'on appelle la neige sur les écrans de télévision !

Ce sont ces micro-ondes que captent les antennes de télévision.

De façon incroyable, presque 1% de ces parasites est l'après-brillance de la création elle-même.

Ce sont les vestiges de la toute première lumière de l'univers !

A partir de ce moment-là, tous les scientifiques, même les plus sceptiques, se sont dits qu'il n'y avait rien à redire, une théorie qui fait des prédictions qui se réalise avec précision, on doit en tenir compte.

Ce fut un moment très important pour l'astronomie et la science mais aussi pour la pensée humaine, ce moment où l'on prend conscience avec des preuves solides que nous vivons dans un univers qui a une histoire.



Aujourd'hui grâce au satellite Planck, il est devenu possible d'établir une carte incroyablement précise de l'univers au moment où il est devenu lumière. C'est la lumière fossilisée de la première aurore, 380 000 ans après le Big Bang. Une preuve convaincante que l'univers a bel et bien eu un début.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=13&v=ftpc0xfBk4I&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=13&v=ftpc0xfBk4I&feature=emb_logo)

Explication de l'incroyable mission du satellite Planck, lancé dans l'espace en 2009.

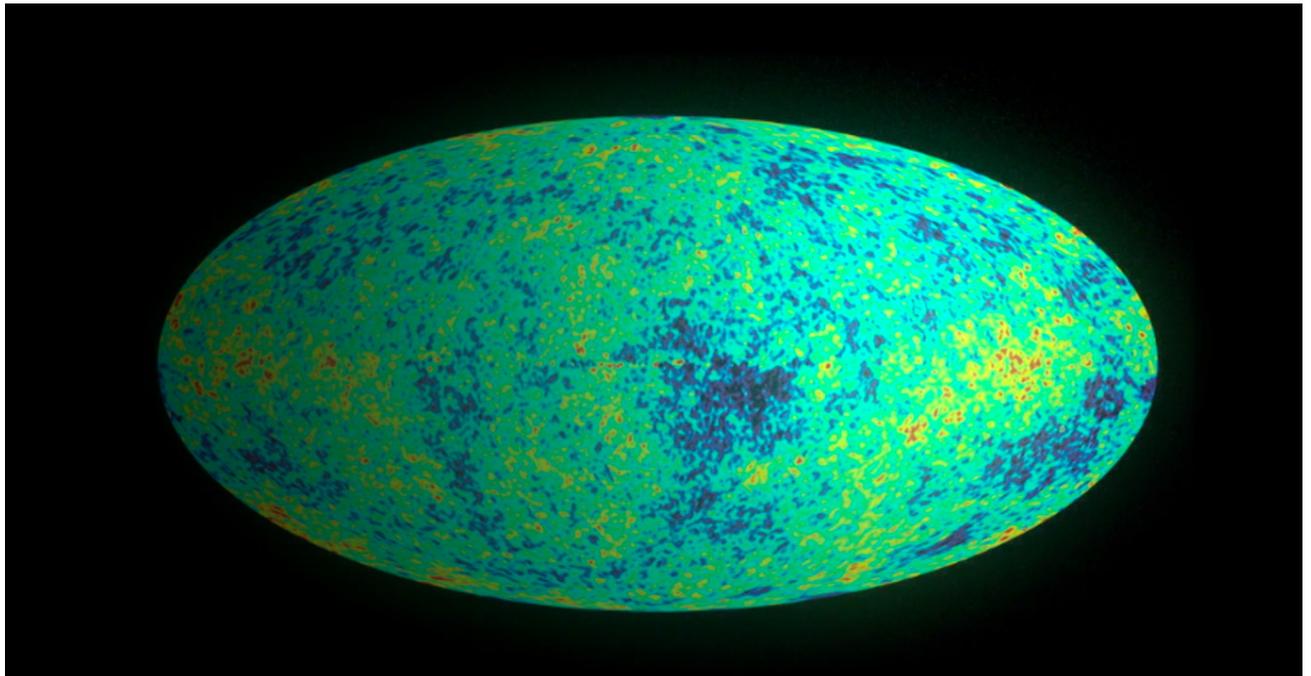
Son but : photographier ce rayonnement fossile cosmique, prévu mathématiquement.

(6 minutes)

Grâce aux radiations micro-ondes, les cosmologistes peuvent même le dater.

Notre univers a plus ou moins 13,7 milliards d'années.

A partir de cette carte, on est capable de tirer une richesse d'informations absolument extraordinaires sur les propriétés de l'univers jeune et en les extrapolant, aujourd'hui on est pratiquement capable, dans un pont fascinant de plus ou moins 14 milliards d'années, de relier ce qu'on observe autour de nous : les grands amas de galaxies, à ces infimes petits grumeaux que l'on voit dans cette carte des rayonnements fossiles, avec déjà les emplacements des parties vides et remplies de l'espace actuelle.



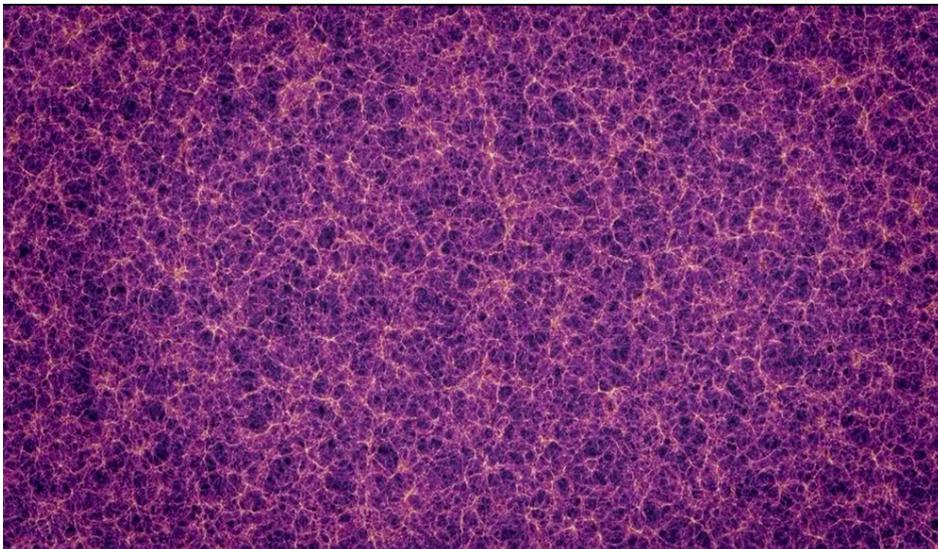
Les astronomes ont ce que les historiens rêvent d'avoir : une machine à remonter le temps ! Cette machine existe en astrophysique, nous pouvons voir une image en direct de notre univers à son plus jeune âge. Et avec tous les instruments puissants actuels, on peut certifier que nous sommes dans un univers qui a une histoire et qui est en changement profond. Quand on recule dans le temps, on peut observer ce qu'était l'univers dans le passé, on peut aller jusqu'à 14 milliards d'années en arrière mais au-delà de ça, on ne sait rien.

C'est-à-dire que ce n'est pas un début, c'est un horizon. Lorsque vous êtes au bord de la mer, vous voyez de l'eau jusqu'à l'horizon mais vous ne vous avisez pas de dire que ça s'arrête là parce que vous ne voyez rien au-delà.

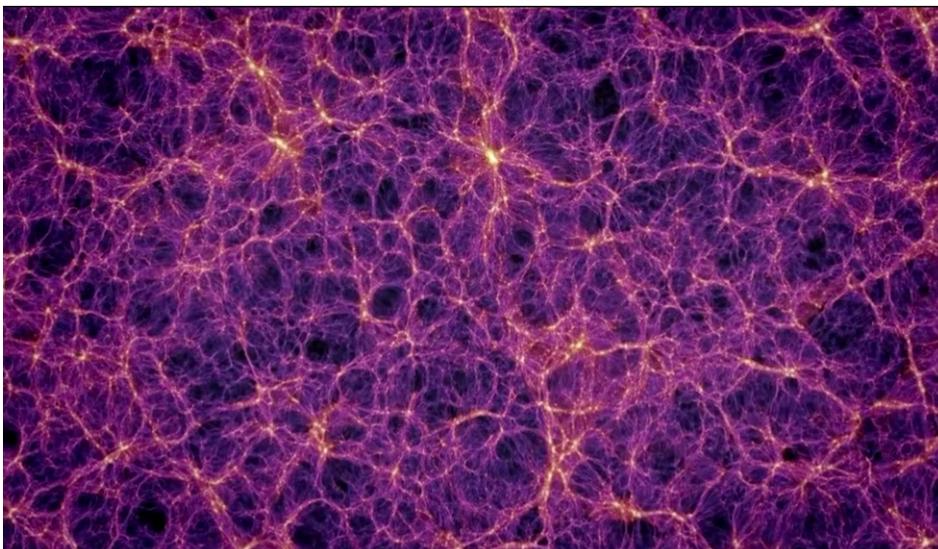


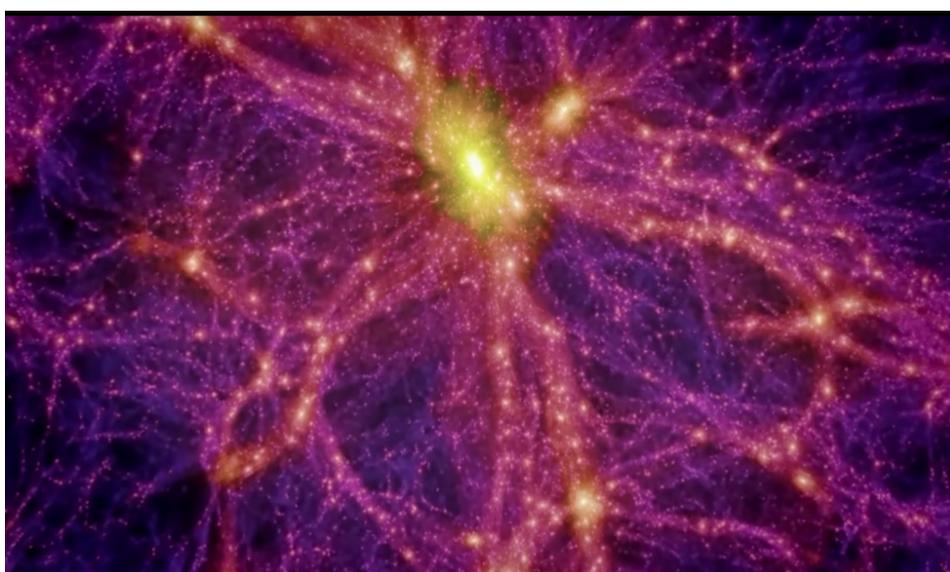
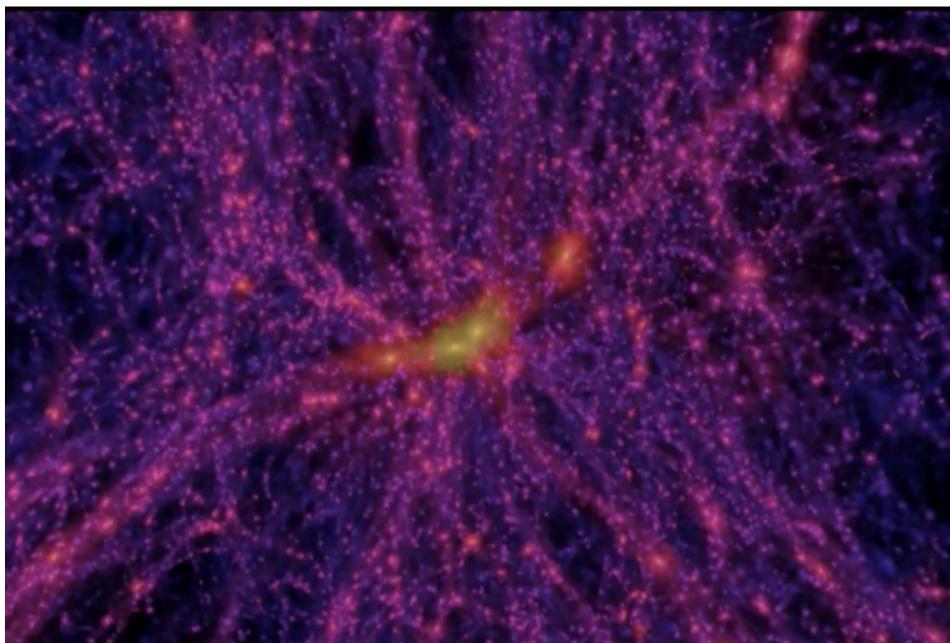
Au-delà de cela, pour l'instant, nous ne savons rien.

Aujourd'hui voici comment la science voit l'univers (simulation informatique de l'univers) :  
C'est ce qu'ils nomment la « toile cosmique » :



En zoomant de plus en plus sur ce cosmos, l'on distingue que c'est la force de gravité qui a donné forme à l'univers au long des milliards d'années. Les régions jaunes et rouges, les plus brillantes sur ces images, montrent où se forment les galaxies et les amas de galaxies.





Cette simulation montre de gigantesques amas de galaxies reliés par de longs filaments. Chacune d'entre elles contient des trillions d'étoiles comme notre Soleil. C'est jusqu'ici la plus belle image de ce à quoi pourrait ressembler le grand tout, à grande échelle.

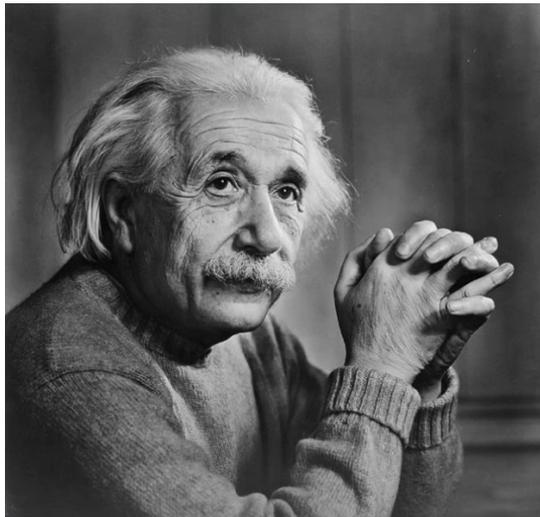
Son échelle est difficile à appréhender mais il faudrait à la lumière près de dix milliards d'années pour traverser la distance que l'on voit sur cette image.

Et rappelons que la vitesse de la lumière est de 300 000km/seconde.

De plus, l'univers devient de plus en plus grand et de plus en plus vite. Une sorte de force mystérieuse semble tout écarter. On n'en comprend toujours pas l'origine mais on l'a nommée « l'énergie sombre ».

Comment expliquer que l'expansion de l'univers semble accélérer, alors même que la seule force à l'œuvre à grande échelle dans le cosmos, la gravitation, est une force attractive et donc de freinage ? Nous y reviendrons.

## 2. La relativité d'Einstein



Dans la physique classique (celle d'avant la relativité et d'avant la physique quantique) c'est-à-dire la physique utilisée jusqu'à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, l'on considère qu'il y a deux sortes d'objets physiques : les corpuscules et les ondes.

Einstein va se préoccuper, en particulier, de la distinction qui commence à se lézarder entre ce monde de la matière et celui de la lumière et il va tout chambouler.

**En 1905**, Einstein élabore une nouvelle théorie physique que l'on appelle la **relativité restreinte**.

Sa théorie est une révolution et a une implication qui est la formule bien connue de  $E=MC^2$ , formule mathématique simple mais qui a des effets qui sont contradictoires avec le sens commun : l'énergie peut se transformer en matière et la matière peut se transformer en énergie. La formule nous dit que si deux particules entrent en collision, et bien l'**énergie** cinétique des particules est capable de se transformer en de nouvelles particules.

C'est une formule qui nous indique qu'une **PROPRIÉTÉ** d'objet peut devenir elle-même un objet. C'est comme si je vous disais que la **HAUTEUR** de la tour Montparnasse peut se transformer en tour Eiffel.

Cette idée est complètement contre-intuitive et on ne peut la comprendre que grâce à des calculs utilisant eux-mêmes des concepts mathématiques sophistiqués.

Quand on parle d'Einsteinisme, c'est l'idée que pour comprendre le monde, il faut s'appuyer sur les mathématiques qui sont des connaissances abstraites. Et, pour Einstein, tout est mathématique, rien n'est dû au hasard.

Un peu plus tard, **en 1915**, Einstein complète sa première théorie par la **relativité générale**, cette théorie explique que la gravitation n'est pas une force qui s'exerce dans l'espace entre les objets comme on l'apprend à l'école. La gravitation est une déformation de l'espace-temps induite par les objets qui sont présents dans cet espace-temps et par l'énergie qu'ils contiennent.

Ces deux théories englobent plusieurs champs de la physique et ont de multiples conséquences. Nous allons essayer de les comprendre. Tout ne sera pas détaillé, le but ici n'est pas d'avoir une compréhension totale de ces théories mais de comprendre pourquoi celles-ci font basculer nos concepts sur les phénomènes de la nature.

# La relativité restreinte

Est-ce que vous avez déjà eu cette sensation étrange quand vous êtes dans un train à la gare : le train d'à côté se met à bouger mais, en fait, vous ne savez pas vraiment si c'est ce train ou le vôtre qui vient de démarrer ?

Si vous avez déjà ressenti cela, vous avez tout ce qu'il faut pour comprendre la théorie de la relativité restreinte.

Si on vous enfermait dans une pièce sans fenêtre, vous n'auriez aucun moyen de déterminer si vous êtes en mouvement à une vitesse constante ou bien immobile.

Il n'y a aucune différence entre le fait d'être immobile et le fait d'avancer **en ligne droite à vitesse constante, ce qu'on appelle le mouvement rectiligne uniforme. Et uniquement dans ce cas-là d'où le nom de « restreinte »**. (Si la vitesse n'était pas constante, vous ressentiriez les accélérations ou les freinages.)

S'il n'y a aucune différence, c'est qu'en fait ces notions ne sont pas absolues et c'est la première clé de la relativité restreinte : **la vitesse n'est que relative** car on parle toujours de vitesse par rapport à quelque chose.

C'est pareil quand on dit que quelque chose est immobile, on doit toujours préciser immobile par rapport à quoi, on ne peut pas dire d'un objet qu'il serait immobile dans l'absolu.

Cela nous paraît contre-intuitif parce que l'on vit sur Terre et qu'on a en permanence le sol sous nos pieds.

D'ailleurs vous savez certainement que, même avachi dans votre canapé, vous n'êtes pas du tout immobile ! Vous vous déplacez à cent mille kilomètres/heure par rapport au soleil. Donc sensation et réalité ne vont pas forcément de pair.

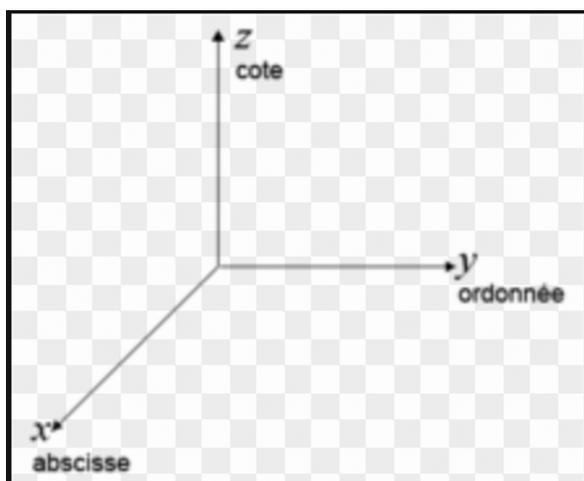
La première chose à noter c'est que, pour parler de la relativité restreinte, on a besoin de l'espace et du temps.

Et on va même tout de suite les combiner pour former l'espace-temps :

Ce qu'on va appeler un événement, c'est un point de l'espace-temps c'est-à-dire quelque chose qui se passe à un endroit précis de l'espace à un instant précis.

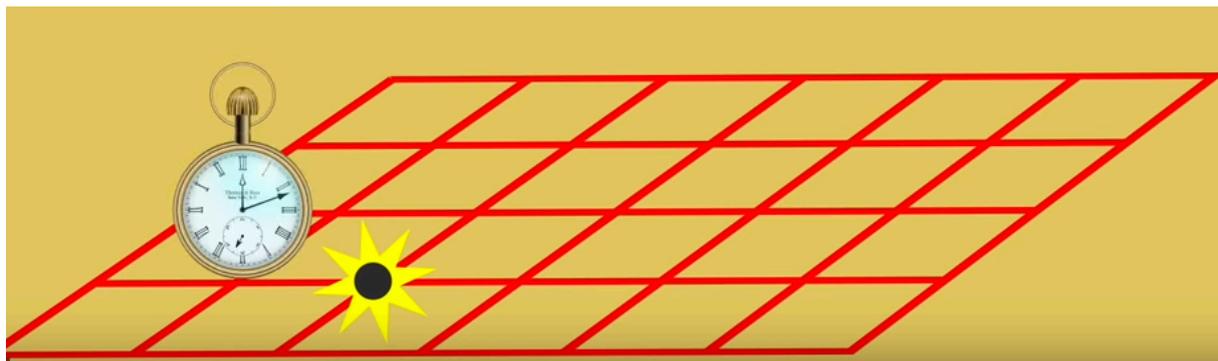
Quand on fait des expériences ou des calculs, il faut pouvoir mettre des coordonnées aux événements c'est-à-dire qu'on doit pouvoir leur attribuer, avec des chiffres, une position précise dans l'espace et un instant précis dans le temps.

Les coordonnées d'un événement prennent généralement une forme  $x$   $y$   $z$  pour l'espace : indiquer l'objet sur une surface  $X$   $Y$  et sur une hauteur  $Z$ , et  $T$  pour le temps.



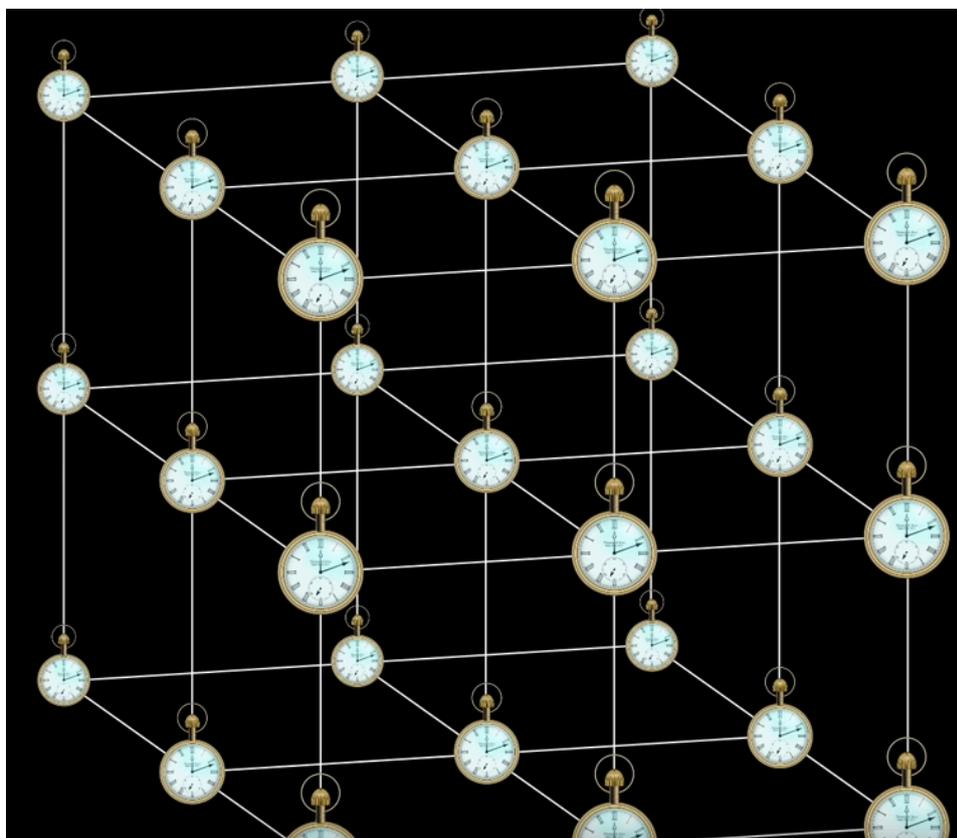
Donc un **référentiel**, c'est simplement quelque chose qui permet d'attribuer des coordonnées aux événements dans l'espace et dans le temps. On présente cela avec des grilles.

Voilà une grille avec une échelle de longueur, cela permet de dire exactement où tombe un objet.



Mais une grille ne suffit pas, il faut aussi une horloge qui permettent de dire à quel moment s'est produit l'impact.

En fait idéalement, le référentiel serait une sorte de grille géante en 3d avec des horloges en chaque point de la grille qui permettent dès qu'un événement a lieu quelque part de lui attribuer des coordonnées d'espace et de temps.



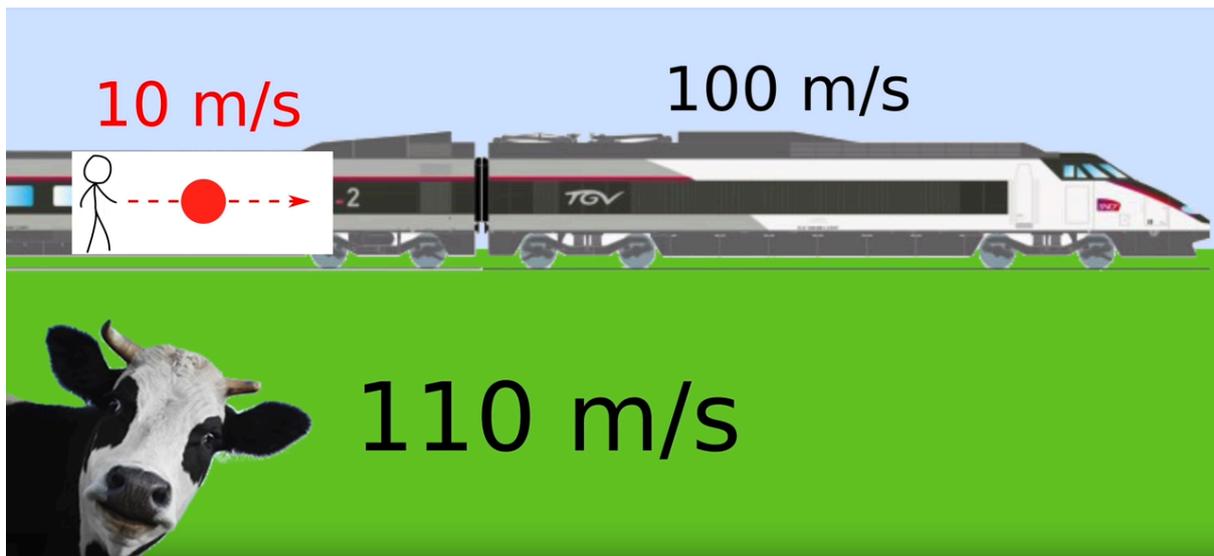
Tout ceci n'est qu'une vue de l'esprit mais l'important, pour avoir un référentiel, c'est d'avoir une procédure qui permette de comprendre.

A la fin du 19e siècle, une idée commence à émerger, l'idée que la vitesse de la lumière serait la même dans tous les référentiels (dans toutes les situations).

Pour bien comprendre ce que cela veut dire, on va prendre l'exemple classique : le train.

Imaginons que je sois dans un TGV qui avance à 100 mètres par seconde et que vous soyez une vache qui regarde le train passer.

Si je lance une balle à dix mètres par seconde devant moi, et bien, pour vous, la balle ira à 110 mètres par seconde 100 plus 10.

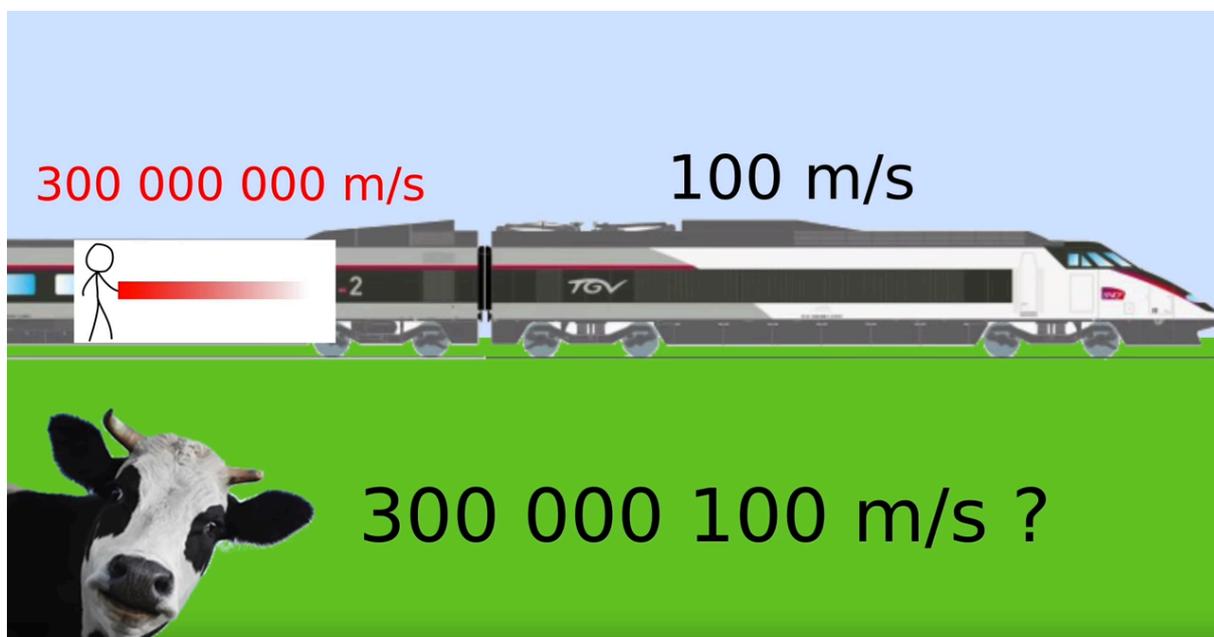


Mais avec la lumière, ça ne marche plus.

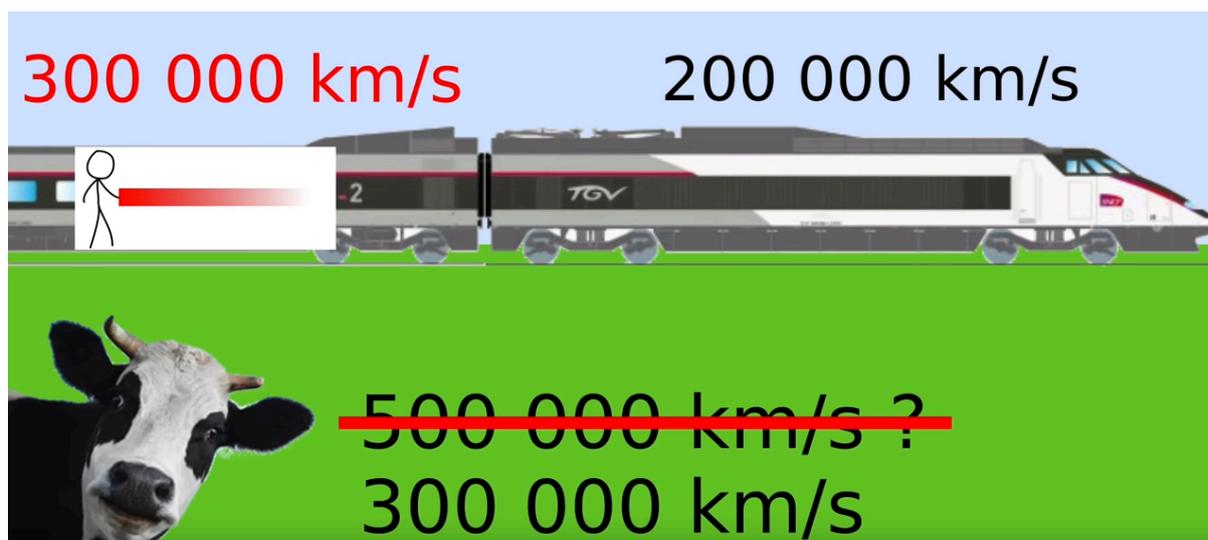
Si je tire un rayon lumineux avec un laser, ce rayon ira pour moi, qui suis dans le train, à la vitesse de la lumière, environ 300 000 **kilomètres**/seconde, soit 300 millions de **mètres** par seconde .

On a envie de penser que, pour vous ce rayon lumineux devrait aller à 300 millions de mètres ( vitesse de la lumière) + 100 mètres par seconde (la vitesse du train), l'addition des 2 vitesses (lumière + train).

Et bien non, pour vous, il ira toujours à 300 millions de m/seconde. Ca paraît bizarre !



Et de même vu du sol, si le train roulait à 200 000 kilomètres/seconde, le rayon laser resterait toujours à la même vitesse c'est-à-dire à 300 000 km/sec.



**La vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels. Elle est invariable.**

Venons-en à ce que dit la relativité restreinte : **Il existe une vitesse maximum**, on l'a vu : la **vitesse de la lumière** qui est **la même dans tous les référentiels**.

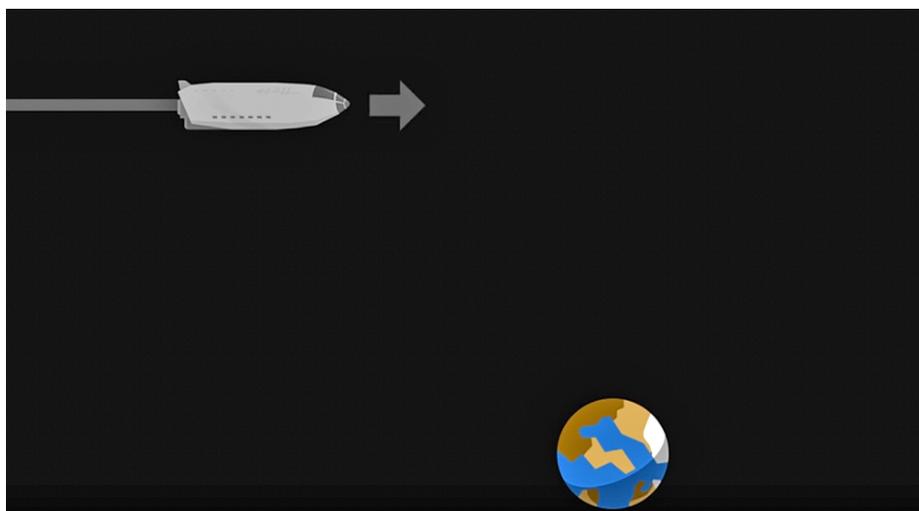
Et de plus, **aucune masse, énergie ou information ne peut voyager plus vite que la lumière.**

Pour comprendre la relativité restreinte et son côté étrange par rapport à notre quotidien, prenons un autre exemple, le déroulement est le même : imaginons un vaisseau spatial ainsi qu'une planète isolée au fin fond de l'univers.

On va supposer que le vaisseau est en mouvement par rapport à la planète, selon une direction fixe et une vitesse constante.

Une première propriété fondamentale de l'univers est que dans cette situation, il est strictement impossible de déterminer si c'est le vaisseau qui se déplace et la planète qui reste immobile ou au contraire si le vaisseau est immobile et que c'est la planète qui se déplace dans l'autre sens.

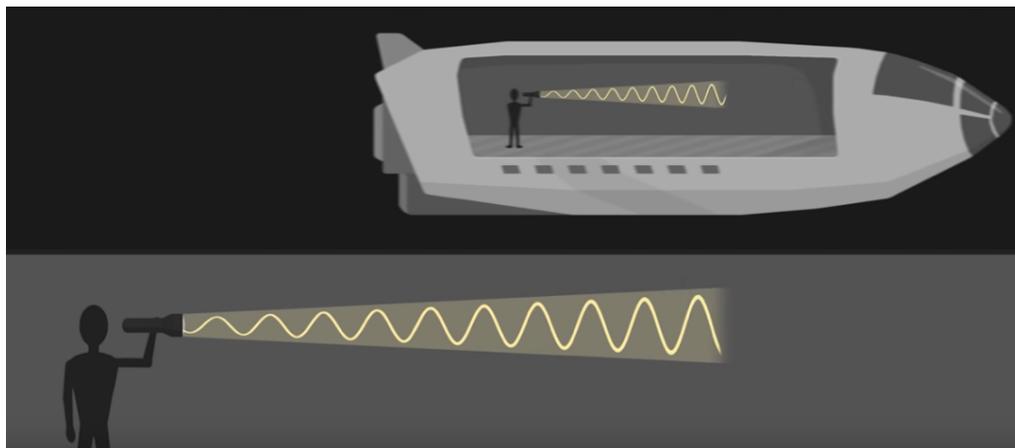
**C'est ce qu'on appelle le principe de relativité** : quel que soit le point de vue que l'on adopte, du moment que le mouvement se fait en ligne droite à vitesse constante, il est tout autant valide de considérer que c'est, soit le vaisseau, soit la planète qui se déplace.



Imaginons maintenant un passager dans le vaisseau qui va décider aussi de lancer une balle vers l'avant, comme dans le train. Pour lui, la balle se déplace vers l'avant avec une certaine vitesse, cette vitesse correspond tout simplement à l'impulsion qu'il lui a donné.

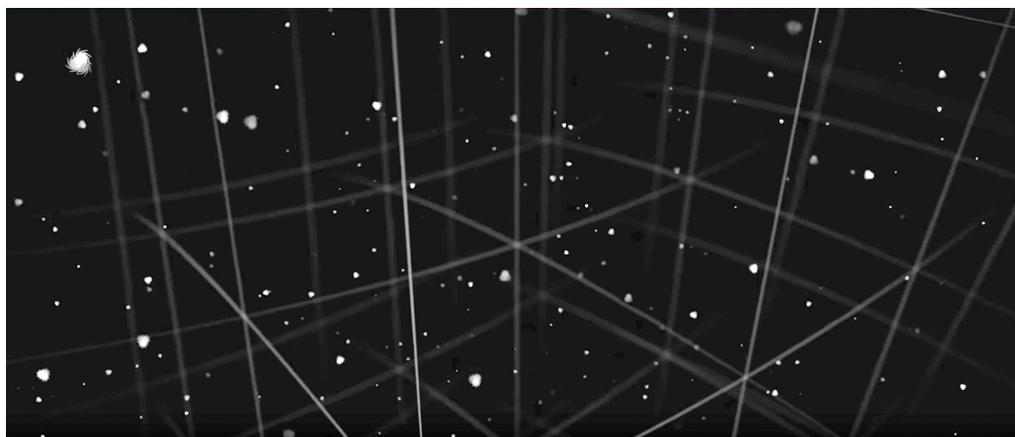
Mais si on observe la même situation depuis la planète, la balle semble se déplacer plus rapidement car à sa vitesse d'impulsion s'ajoute également la vitesse du vaisseau lui-même.

Et chose étrange mais déjà vu dans l'exemple précédent, si l'on essaye maintenant de faire la même expérience avec de la lumière cette fois-ci en utilisant, par exemple, une lampe-torche, on observe que quel que soit le point de vue adopté, la vitesse de la lumière est la même, qu'on la regarde immobile ou en se déplaçant, qu'on la propulse depuis un point fixe ou un point en mouvement.



On verra toujours la lumière se déplacer avec exactement la même vitesse.

On dit que cette **vitesse de la lumière est invariante, la vitesse de la lumière est une constante universelle fondamentale (300 000km/sec) à la base de la structure même de l'univers.**



Dans notre quotidien, la vitesse de la lumière est bien trop élevée pour qu'on puisse remarquer un quelconque effet de ce principe. En seulement l'espace d'un clignement d'œil, un rayon lumineux aura parcouru l'équivalent de trois allers retours Paris – New York.

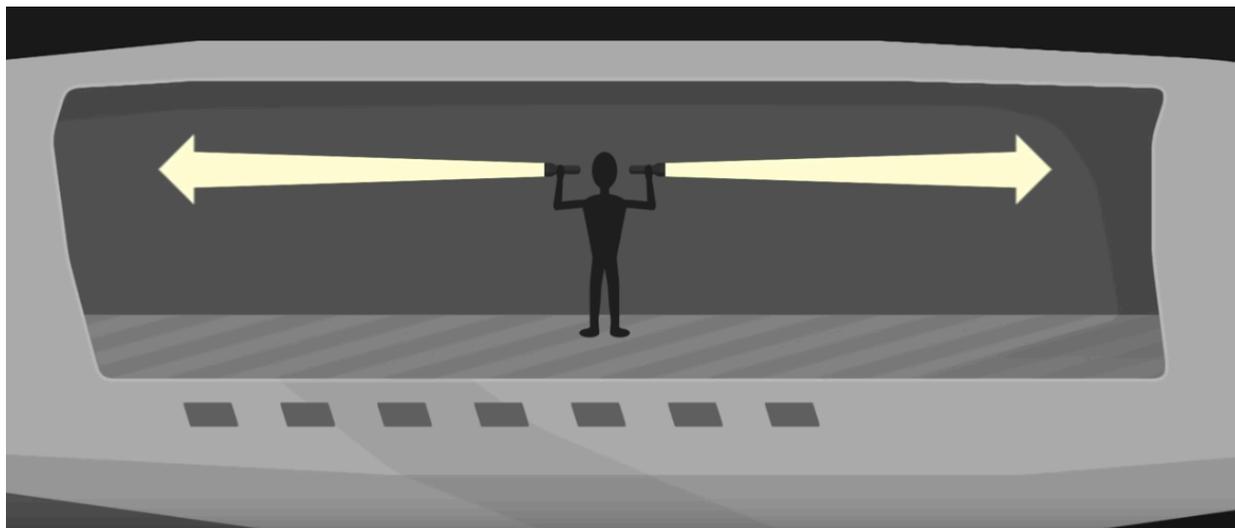
Allons plus loin dans le développement de la théorie.

Cette propriété subtile de la lumière va entraîner des changements drastiques sur notre façon de voir le monde.

**En relativité restreinte, une des idées les plus fondamentales est que deux événements peuvent se produire en même temps pour une personne, mais à des moments différents pour quelqu'un d'autre.**

Pour comprendre, imaginons la situation suivante : le passager qui se trouve au milieu du vaisseau se munit de deux lampes-torches, une qu'il va orienter vers l'arrière et l'autre vers l'avant. Son rôle va être d'allumer les deux lampes torches exactement en même temps. Il va ensuite regarder à quel moment arrivent les deux rayons lumineux aux extrémités du vaisseau. Il commence par allumer les deux lampes torches, au même moment, étant donné que, selon son point de vue, le vaisseau reste immobile, les rayons lumineux vont se propager de la même façon des deux côtés. Ils vont ainsi atteindre les deux extrémités du vaisseau au même moment pour le passager.

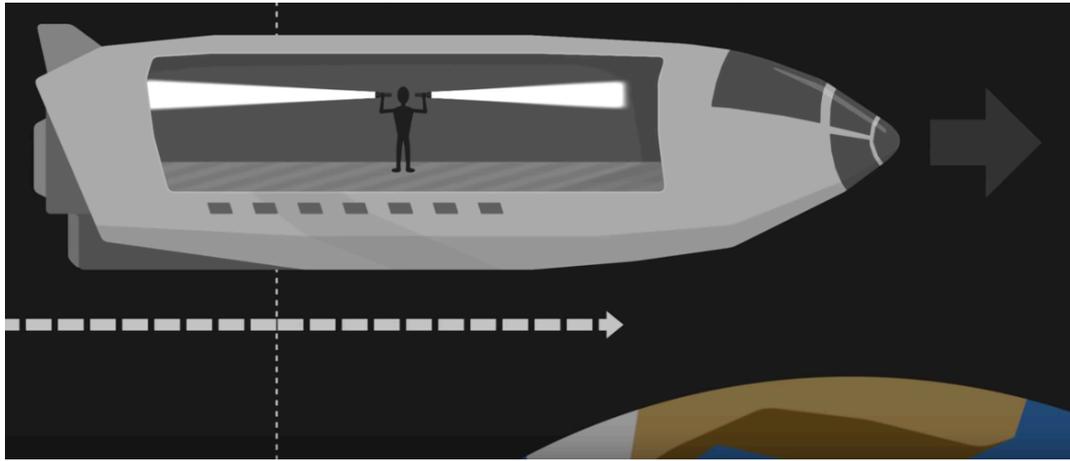
Les deux événements sont donc simultanés, les rayons lumineux ont atteint les deux extrémités du vaisseau en même temps.



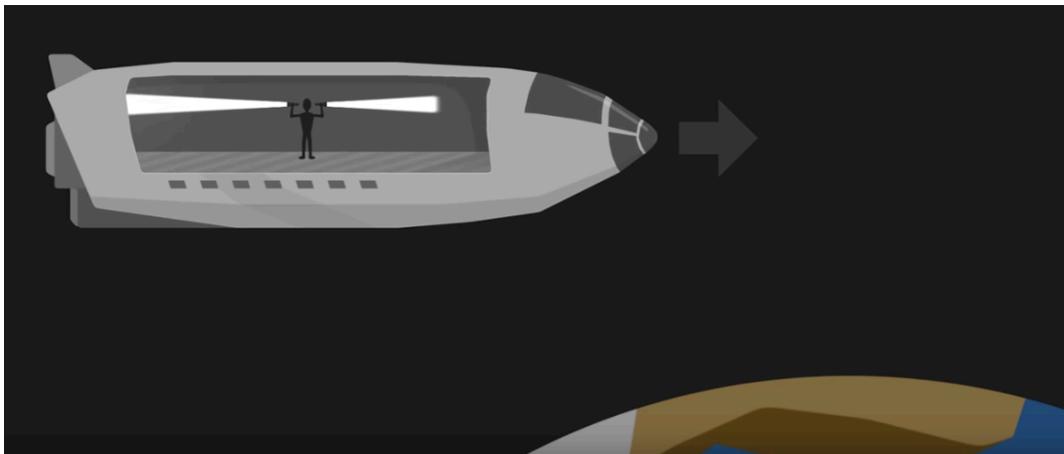
Mais regardons maintenant cette même situation telle qu'elle est perçue par un observateur à la surface de la planète. On a vu précédemment que la vitesse de la lumière est invariante, par conséquent au moment où les deux lampes torches s'allument, leur lumière va se propager à la même vitesse des deux côtés.



Mais pendant ce temps, le vaisseau se déplace vers l'avant ainsi le rayon lumineux qui est envoyé vers la gauche va atteindre l'arrière du vaisseau avant que le rayon lumineux de droite l'atteigne à l'avant.



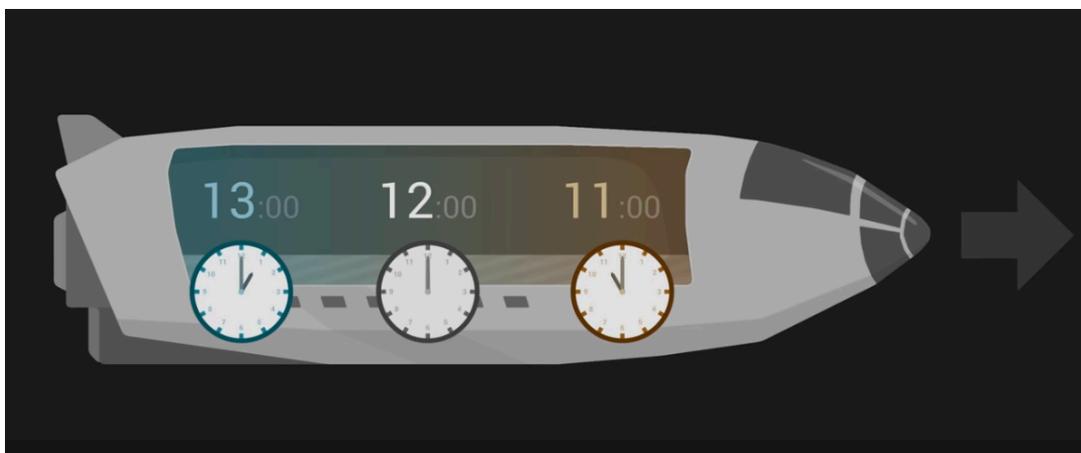
Selon ce point de vue, les deux événements ne sont donc plus simultanés, les rayons lumineux n'atteignent pas les extrémités du vaisseau au même moment.



Pour expliquer ce paradoxe, il va nous falloir bouleverser notre compréhension intuitive de ce qu'est le temps.

Dans la situation précédente, si le rayon lumineux de gauche atteint le bord du vaisseau avant le rayon lumineux de droite, c'est en réalité parce que l'arrière du vaisseau est légèrement dans le futur par rapport à l'avant du vaisseau qui est légèrement dans le passé.

Grossièrement lorsqu'il est par exemple midi au milieu du vaisseau, il est déjà 13 heures à l'arrière du vaisseau mais il n'est encore que 11 heures à l'avant du vaisseau.

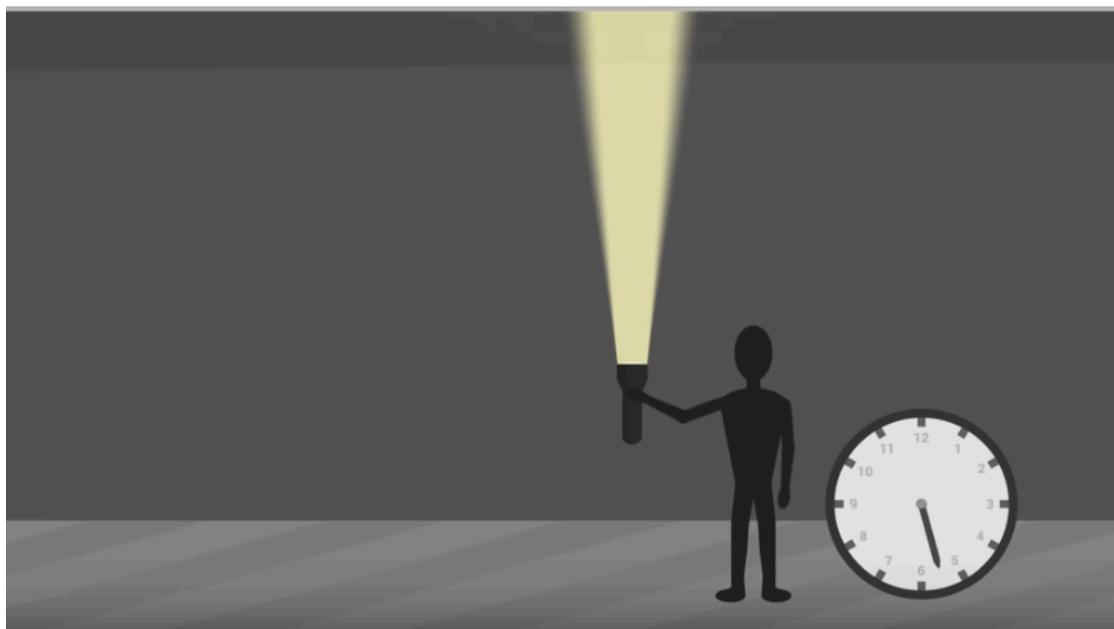


Depuis le passager à l'intérieur, les horloges sont pourtant parfaitement synchronisées, pour lui il est tout aussi bien midi à l'avant qu'à l'arrière du vaisseau. C'est le fait d'**observer quelque chose en mouvement** qui va désynchroniser l'arrière et l'avant du vaisseau.

De manière plus générale, **lorsqu'un objet se déplace à très grande vitesse par rapport à nous**, on observe que l'avant de l'objet est en retard dans le temps par rapport à l'arrière. Si l'on plaçait, par exemple, deux personnes du même âge aux extrémités du vaisseau, on observerait depuis la planète que la personne à l'avant du vaisseau est légèrement plus jeune et la personne à l'arrière légèrement plus âgée.

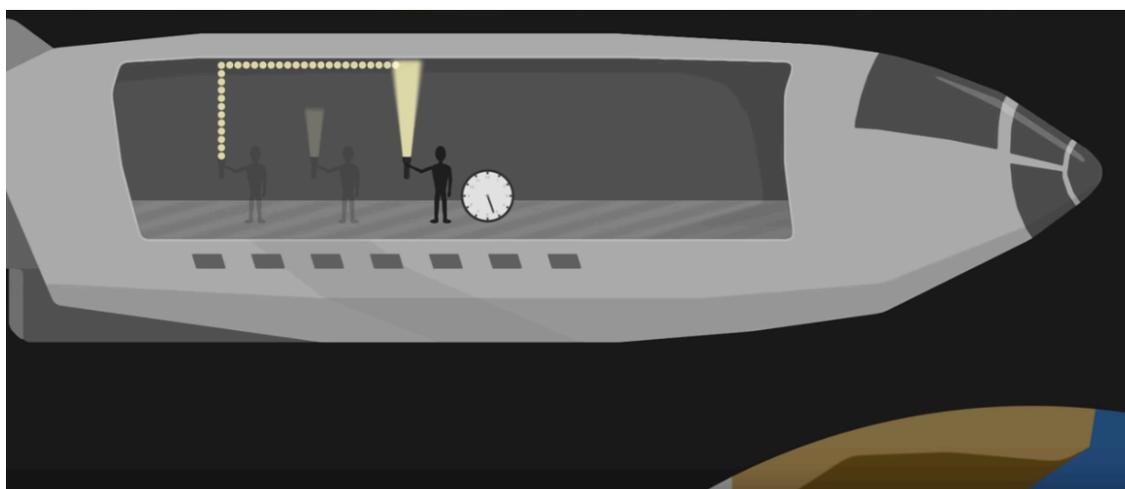
Enfin une troisième conséquence directe de l'invariance de la vitesse de la lumière, est ce qu'on appelle **la dilatation des durées**.

Pour comprendre, imaginons l'expérience suivante : le passager à l'intérieur du vaisseau se munit à nouveau d'une lampe torche qu'il va cette fois-ci dirigée vers le haut. A un instant donné, il va allumer la lampe torche et observer le temps que met le rayon lumineux pour atteindre le plafond du vaisseau.

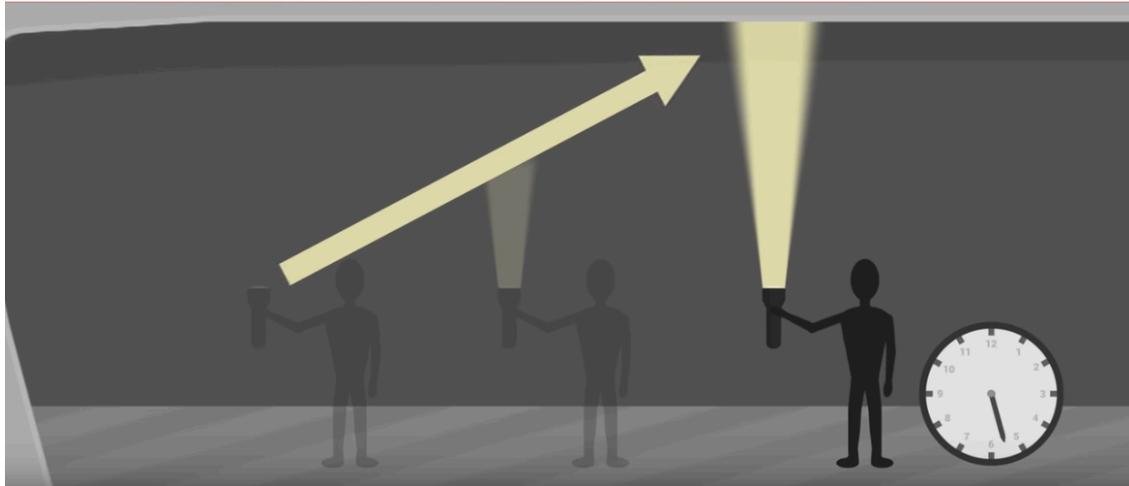


Encore une fois, le problème va changer si l'on décide d'observer la même situation depuis la planète.

Pour l'observateur qui se trouve sur la planète, le vaisseau et le passager qu'il contient sont en mouvement, par conséquent le faisceau lumineux va non seulement devoir parcourir la hauteur jusqu'au plafond mais il va également devoir se déplacer vers la droite en suivant le mouvement du vaisseau.



D'après ce point de vue, le rayon lumineux doit donc parcourir une distance plus grande



et par conséquent, tout comme il faut plus de temps pour traverser une route en diagonale que dans le sens de la largeur, il va falloir à la lumière plus de temps pour atteindre le plafond du vaisseau pour cet observateur qui regarde la situation depuis la planète.

**Le rayon lumineux a donc mis davantage de temps pour atteindre le haut du vaisseau.**

**En général, cet observateur va voir l'intérieur du vaisseau évoluer au ralenti.** Si le passager du vaisseau décide, par exemple, de lui montrer une horloge, on observerait depuis la planète que cette horloge s'écoule au ralenti.

## Pour conclure

Le simple fait que la vitesse de la lumière soit invariante entraîne de très lourdes conséquences sur notre façon de voir le monde.

Lorsqu'un objet se déplace par rapport à nous en ligne droite avec une très grande vitesse, on le voit évoluer au ralenti tandis qu'il nous semble contracté dans le sens du mouvement.

Cette façon de comprendre la relativité du temps et de l'espace en fonction du mouvement des objets est ce qu'on appelle **la relativité restreinte**. Elle nous enseigne que le temps et l'espace ne sont pas des notions absolues, que deux observateurs vont potentiellement les percevoir de façon différente.

Elle entraîne également un grand nombre d'autres conséquences, comme le fait qu'il soit absolument impossible de dépasser la vitesse de la lumière car ne serait-ce que pour atteindre cette vitesse, il faudrait disposer d'une quantité infinie d'énergie, ce qui est impossible. J'y reviendrai.

Mais cette forme de relativité est appelée restreinte car elle ne s'applique que dans des cas très simples, pour des mouvements qui ne se font qu'en ligne droite et à vitesse constante.

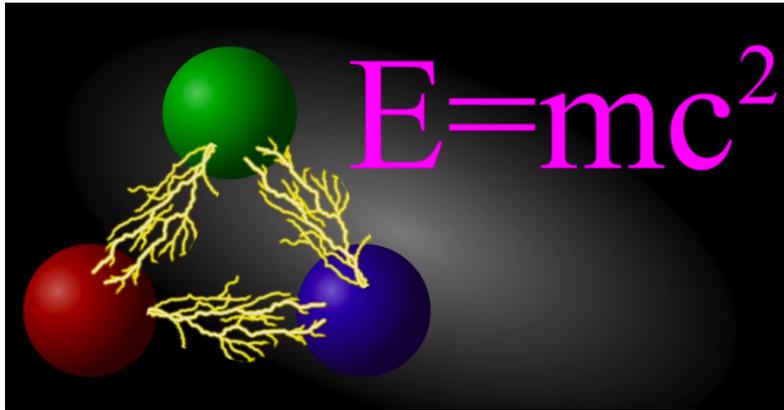
Elle n'est pas en mesure de décrire d'autres types de mouvements, par exemple : des changements de direction, des accélérations, des ralentissements ou encore des rotations.

Pour ce faire, il va être nécessaire de s'intéresser à une théorie beaucoup plus complète qui permet, entre autres, d'expliquer l'attraction gravitationnelle à partir d'une géométrie déformée de l'espace et du temps.

C'est ce qu'on appelle la relativité générale.

Mais terminons d'abord avec la relativité restreinte et **son équation :  $E = mc^2$**

qui est probablement l'équation la plus connue de toute la physique et pourtant c'est une des plus mal comprises. La plupart des gens ne connaissent pas son interprétation.



Celle-ci nous dit que si on fait varier l'énergie d'un corps d'une quantité  $E$ , alors sa masse doit automatiquement varier d'une quantité  $m$ , égale à  $E$  multiplié par  $c$  au carré, où «  $c$  » est la constante de la vitesse de la lumière.

Dit plus simplement, si l'énergie d'un corps varie, alors automatiquement sa masse doit aussi varier.

Faire une démonstration théorique rigoureuse de ce résultat démontré par Einstein est trop compliqué pour nous, le commun des mortels. Ce qu'il faut savoir, c'est que cette relation est une conséquence mathématique de la Relativité restreinte.

De la même manière que les notions d'**espace et de temps** se trouvent en quelque sorte **entremêlées** en relativité restreinte, les notions de **masse et d'énergie** qui, en physique classique, sont distinctes, se trouvent **inexorablement associées**.

**Si l'un diminue ou augmente, l'autre fait de même. En fait, la masse et l'énergie, c'est la même chose sous des formes différentes. De la masse peut devenir de l'énergie et de l'énergie peut devenir de la masse.**

Et donc finalement ce qu'on appelle communément la masse n'est rien d'autre que la mesure de la quantité totale d'énergie contenue dans un corps.

Avec  $E=MC^2$ , on explique le concept de masse à partir de celui de l'énergie.

Ainsi est résolue la question de la nature et de l'origine de la masse :

**La Masse, c'est du contenu en énergie, c'est la mesure de l'Énergie.**

**Il démontre que masse et énergie sont des manifestations différentes d'une même chose exprimée dans cette formule  $E=MC^2$**

**$E$  = énergie cinétique ou la vitesse**

**$M$  = énergie potentielle ou la masse**

**$C$  = constante cosmologique ou la vitesse de la lumière**

**La propriété fondamentale de l'énergie est qu'elle se conserve.** Malgré les apparences, à travers tous ses changements de forme ou transmissions d'un système à l'autre, elle n'est jamais perdue. Elle se transporte mais **JAMAIS** elle ne surgit de nulle part. Une énergie qui disparaît sous une certaine forme réapparaît toujours sous une autre !

**« Rien ne se perd, tout se transforme »**

L'énergie ( $E$ ) est égale à la masse ( $M$ ) au repos, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière (300 000km/sec) dans le vide.

La lumière dans l'équation, doit être entendue au sens large : elle comprend toutes les ondes électromagnétiques (lumière visible, onde radio, rayon ultraviolets...).

Pourquoi faire entrer la lumière dans le calcul de l'énergie ?

Car elle propage de l'énergie sans masse : les photons. Ces particules de masse strictement nulles voyagent à vitesse constante (C).

Ils voyagent constamment à cette vitesse, rien ne peut changer leur vitesse, ainsi ils sont une constante dans l'équation.

La lumière transfère la masse (les atomes qui constituent un objet).

Toute énergie peut se transformer en masse et toute masse peut se transformer en pure énergie.

Il faut préciser que **la masse et le poids ne sont pas synonymes en physique.**

La **masse** est une mesure de la quantité de matière d'un objet, ses atomes.

A la différence du **poids**, qui est une mesure de la force de gravitation qui s'exerce sur un corps. Ainsi un astronaute pèse moins sur la lune que sur la Terre car la gravitation exercée par la lune est plus petite que celle exercée par la terre. Mais sa **masse** reste la même car le nombre d'atomes qui le constitue reste le même.

La valeur (ou intensité) du **poids** d'un objet dépend donc de l'endroit de l'espace où l'objet se trouve, de la force d'attraction variable selon la nature (masse) de l'astre à proximité, et de la distance entre l'objet et cet astre.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZCFG3Jx3tIU>

E=MC2, la formule expliquée par Etienne Klein (9 minutes)

En 1905, cette théorie de la Relativité restreinte a été énoncée par Einstein et explique de manière simple, pour des mathématiciens, des idées ou résultats qui existaient déjà dans les travaux antérieurs de divers autres scientifiques : Fitzgerald (contraction des longueurs), Lorentz (contraction des longueurs, dilatation temporelle), Poincaré (variation de l'inertie avec la vitesse), Michelson et Morley (expériences démontrant l'invariance de la vitesse de la lumière).

Aussi certains accusèrent parfois Einstein de n'avoir été qu'un vulgaire plagiaire. Mais il est indéniable qu'il eut le mérite d'être le premier à proposer une théorie claire et précise permettant de rendre compte de ces résultats disparates de manière unifiée, tout en la faisant avant tout reposer sur des observations expérimentales et en prédisant de nouveaux effets alors inconnus.

Einstein alla en effet plus loin, ainsi l'un des grands piliers de la Relativité restreinte est la remise en cause des notions de simultanéité et d'espace absolu.

Dans sa tentative de réconcilier les mondes de la matière et de la lumière et leurs ensembles de lois, Einstein y rajoute la vitesse constante de la lumière et le temps qui passe plus vite quand on avance et qui ne s'écoule pas de la même manière pour tous les observateurs, contrairement au sens commun.

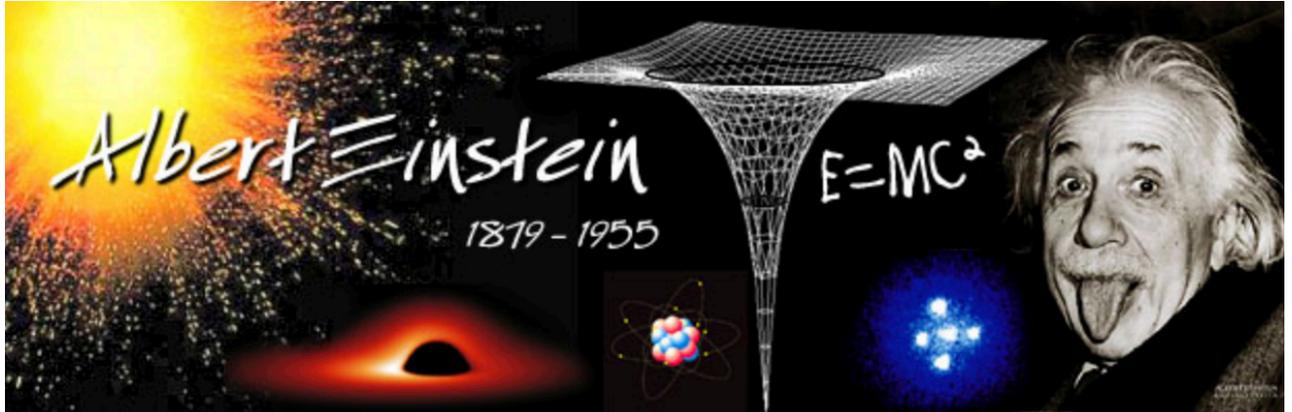
Ainsi dans la Relativité restreinte, les équations conduisent à des prévisions, des phénomènes qui heurtent le sens commun, un des plus surprenants étant le ralentissement du temps en mouvement. Et nous verrons que tout cela se confirme dans notre quotidien !

**Cette théorie bouscule des concepts si familiers qu'elle passe directement du champ de la science à celui des idées.**

**Einstein en est conscient, la validité de la théorie de la Relativité n'est pas limitée à un seul domaine de la physique, elle forme un cadre plus général qui embrasse tous les phénomènes de la nature.**

**Ainsi cette Relativité a eu un impact en philosophie en éliminant toute possibilité d'existence d'un temps et de durées absolus dans l'ensemble de l'univers. A la suite de cela, elle a forcé les philosophes à se poser différemment la question du temps et de l'espace.**

Les progressistes applaudirent cette théorie restreinte, tandis que les conservateurs protestèrent, comme toujours...



La Relativité restreinte a très rapidement évolué pour devenir la Relativité générale.