

**VOYAGE  
DANS  
L'ESPACE**

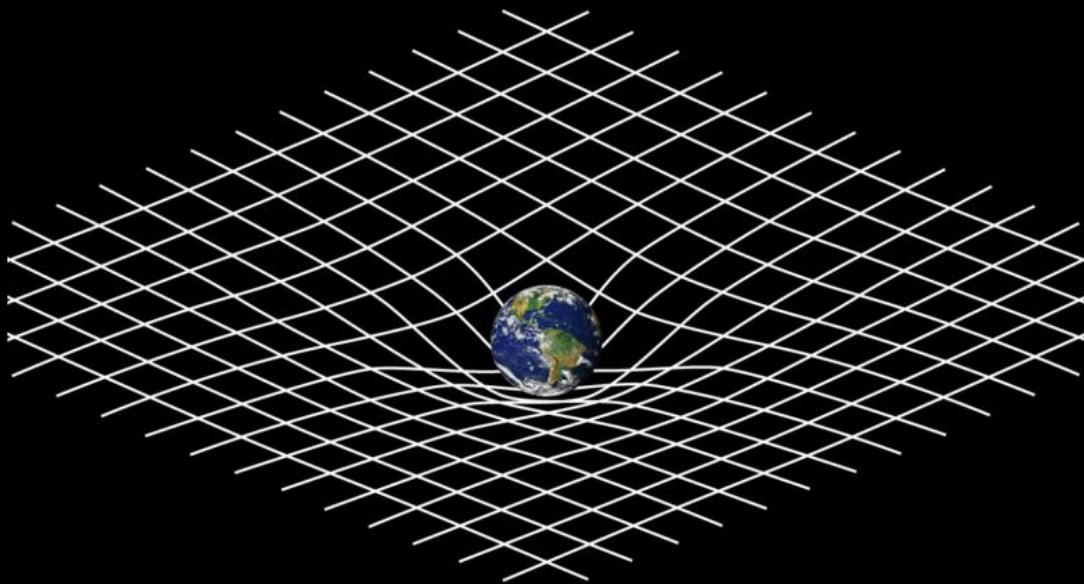
Épisode

82

---

**LA RELATIVITÉ**

---



---

Les expériences par la pensée  
d'Albert Einstein

# Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur et Mathieu Rancourt produisent un balado consacré à l'exploration de l'espace. Intitulé *Voyage dans l'espace*, il est diffusé sur la plateforme soundcloud.com. Chaque épisode vous fait parcourir une dimension particulière, qu'il s'agisse de l'exploration d'une planète, de la recherche de vie dans l'Univers ou de l'aventure des astronautes et de ceux et celles qui rêvent d'espace.

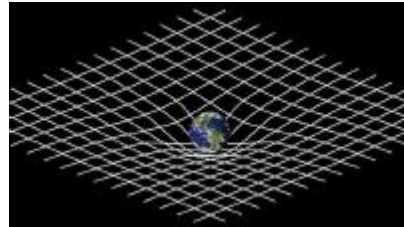
Pour la plupart des balados, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Il peut s'agir d'une conversation entre Mathieu, l'animateur de *Voyage dans l'espace*, et Claude, le passionné d'espace, ou d'une entrevue avec un spécialiste (souvent un astronome). Ils publient ces exposés sous forme de fascicules, comme celui-ci.

Notez que le balado diffusé s'inspire librement des questions/réponses préparées à cet effet. Le texte qui suit n'est pas un verbatim de l'émission, mais plutôt une autre version; le balado et ce fascicule se complètent l'un et l'autre.

Tous les fascicules sont offerts aux abonnés du balado *Voyage dans l'espace*, abonnement au coût de 5\$/mois, via la plateforme patreon.com.

**Mathieu Rancourt** est géographe et professionnel de recherche. **Claude Lafleur** est journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis plus de 50 ans les péripéties de l'exploration spatiale.

## En couverture



Selon la relativité d'Einstein, la présence d'une masse importante courbe l'espace.

### L'équipe de *Voyage dans l'espace*:

**Claude Lafleur**, contenu

**Mathieu Rancourt**, animation

**Florent Meunier**, montage

**Laurent Runigo**, médias sociaux

[Les balados](#) ; [Abonnement](#) ; [Courriel](#).

[Facebook](#) ; [YouTube](#) ; [Instagram](#).

### L'équipe des fascicules:

Rédaction: Claude Lafleur et Serge Pineault

Couverture: Florent Meunier

Illustrations: NASA et Serge Pineault

© Copyright, Claude Lafleur, 2022

ISBN 978-2-925106-53-1 (pdf)

ISBN 978-2-925106-54-8 (kindle)

Dépôt légal:

Bibliothèque nationale du Québec, 2022

Bibliothèque nationale du Canada, 2022



## Balado 82 – La relativité

### Les expériences par la pensée d'Albert Einstein

[Écoutez](#) le balado *La relativité* diffusé le 6 mars 2022.

Entrevue avec l'astronome Serge Pineault, colligée par Claude Lafleur.

**La relativité est sans doute la théorie scientifique la plus célèbre de toutes... mais également la moins comprise!**

Il s'agit d'une théorie élaborée par Albert Einstein il y a plus d'un siècle. Nous y consacrons un balado puisque cette théorie est à la base de plusieurs développements de la physique moderne. La relativité a notamment mis au jour des concepts aussi fondamentaux que la notion de temps, le Big Bang et la naissance de l'Uni-

vers, les trous noirs, les ondes gravitationnelles, etc. On s'en sert même au quotidien – sans même le savoir! – lorsqu'on utilise notre cellulaire pour savoir où on est.

Qui plus est, la relativité a été conçue par un personnage véritablement unique en son genre. En effet, on pourrait dire qu'en science, on retrouve deux types de

chercheurs. Il y a les *observateurs* – ceux et celles qui observent le monde autour d’eux et qui récoltent des données. Et il y a les *théoriciens* qui, à partir des observations et données récoltées, élaborent des hypothèses et des théories pour tenter d’expliquer le monde autour d’eux. Mais Albert Einstein n’était ni l’un ni l’autre. C’était plutôt un *penseur*, quelqu’un qui réfléchissait sur le monde qui l’entourait en se posant des questions, souvent simples mais parfois étranges. Il s’est ainsi demandé: comment verrait-on le monde si on voyageait à la vitesse de la lumière?

Or, cette question l’a amené à découvrir un concept qui a bouleversé la physique: les observations sont différentes selon d’où on est placé pour les faire. C’est ainsi que quelqu’un qui, dans un train, lance des balles ne sera pas perçue de la même façon par un observateur situé à l’extérieur du train – qui regarde passer le train – que par un observateur qui se trouve à bord du train.

Cette simple pensée peut paraître banale, mais c’est celle qui nous a menés au concept de la relativité du temps et de l’espace – donc à la relativité.

Voilà ce dont nous parle Claude, qui s’entretient avec l’astrophysicien Serge Pineault, professeur titulaire retraité au Département de physique, de génie physique et d’optique de l’Université Laval.

**Dites-moi, Serge, vous avez longtemps donné un cours sur la relativité à l’Université Laval, un cours qui attirait, je pense, beaucoup les étudiants et qui vous a procuré beaucoup de satisfaction?**



L’astrophysicien Serge Pineault.

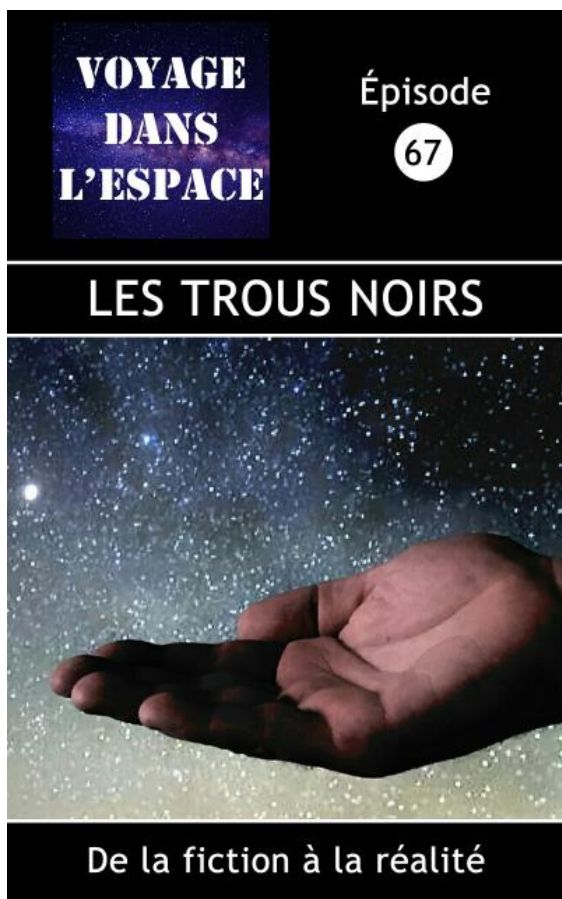
En fait, j’ai forcément donné plusieurs cours durant ma carrière de professeur, dont deux qui traitaient de la relativité. Ainsi, un premier cours, qui se donnait au premier trimestre de la première année, abordait la relativité restreinte (que nous appellerons simplement **RR** pour alléger le texte). C’était un cours que j’aimais particulièrement donner puisque j’avais devant moi des étudiants fraîchement sortis du cégep et qui n’avaient donc reçu aucune «influence externe»!

J’ai également eu la chance de donner un cours de relativité générale (**RG** dans le reste du texte) aux étudiants finissants ou gradués, donc à ceux et celles qui terminaient leurs baccalauréats en physique trois ans plus tard. Ce cours a d’ailleurs été celui qui m’a le plus donné de plaisir puisque j’avais devant moi des étudiants motivés qui savaient créer une atmosphère très positive.

Je couvrais ainsi le cheminement des étudiants du début jusqu’à la fin de leurs études: mes étudiants amorçaient leur

formation avec la RR et la terminaient avec la RG.

Pour clarifier la question dès le début, il est important de réaliser que la théorie de la relativité d'Einstein est en fait deux théories très différentes: la première, la RR, est une théorie où Einstein démontre que les notions de temps et d'espace ne sont pas absolues; il n'y est aucunement question de gravité. La deuxième, la RG, est une théorie de la gravitation.



Le prof Pineault est à la fois un spécialiste des trous noirs et des théories de la relativité.

Rappelons que Serge est un ami de *Voyage dans l'espace* puisque nous avons fait avec lui le [Balado 67](#) consacré

aux trous noirs – Serge étant un spécialiste de ces objets cosmiques très particuliers. C'est un balado très apprécié de nos auditeurs et auditrices puisque c'est l'un des plus écoutés de tous. Avec Serge, nous avons donc exploré en profondeur un sujet pas facile à comprendre, et voilà que nous allons à présent nous attaquer à la relativité.

J'aimerais savoir, en premier lieu, Serge, en quoi il est utile pour les futurs physiciens de connaître la relativité? Est-ce simplement pour assouvir leur curiosité ou cela risque-t-il de leur être utile dans leur éventuelle carrière?

En fait, la théorie de la relativité d'Albert Einstein est l'une des deux plus importantes théories scientifiques du 20<sup>e</sup> siècle – l'autre étant à mon avis celle de la [physique quantique](#). C'est en soi une raison suffisante pour considérer que tout physicien devrait être exposé à ces théories.

Malheureusement, on ne peut pas tout enseigner en trois années de baccalauréat et il faut faire des choix. Par exemple, au Département de physique de l'Université Laval, le cours de RG est un cours optionnel, tandis que celui sur la RR est un cours obligatoire.

Et jusqu'à un certain point, c'est logique puisque la relativité restreinte est essentielle dans de multiples disciplines. Il faut en effet la comprendre pour traiter des processus qui impliquent des particules élémentaires (protons, électrons, neutrons, etc.). De même, si on parle de rayons cosmiques ou de fusion nucléaire, il faut être familier avec la RR.

Quant à la relativité générale, je dirais que c'est un peu différent, mais lorsque nos étudiants désirent aller en astrophysique, connaître cette théorie devient quasiment obligatoire, puisque dès qu'on parle de cosmologie, d'étoiles à neutrons, de trous noirs..., on fait intervenir la RG.

Par contre, il n'est pas nécessaire de

comprendre à fond ni de maîtriser les deux théories, on peut tout simplement utiliser leurs conclusions générales. Il n'en demeure pas moins qu'il est très pertinent de suivre un cours sur la RR, tandis que pour la RG, il faut être passablement avancé en mathématiques pour la saisir. Mais c'est une si belle théorie!

## 1 – Le phénomène Einstein

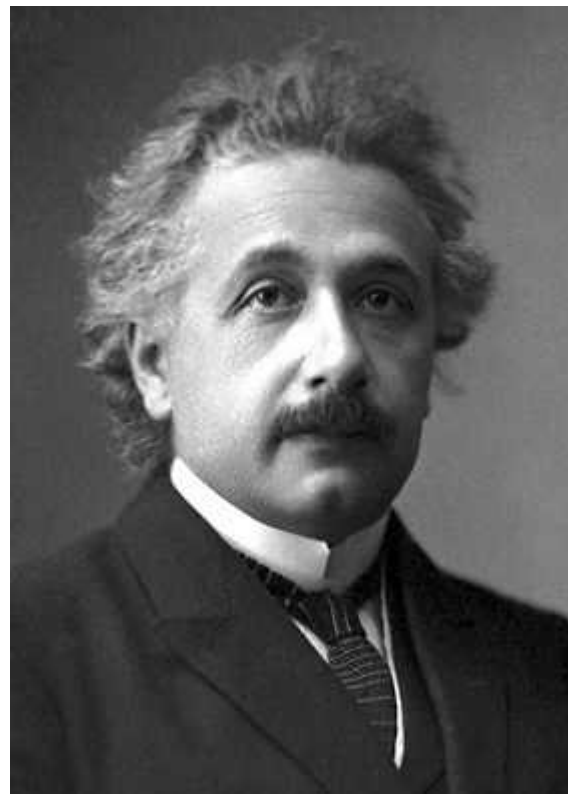
Avant d'aller plus loin, parlons brièvement de celui qui est à l'origine de tout, donc d'Albert Einstein. Il s'agit d'un personnage un peu particulier. Étant né en 1879, lorsqu'il a émis sa première grande théorie (la relativité restreinte) en 1905, il n'avait que 26 ans. Il devient alors vite un savant qui fascine les foules. Or, il faut se souvenir qu'à l'époque, il n'y avait ni radio ni télé, on ne le voyait donc pas. Néanmoins, il est vite devenu populaire.

**Peut-on expliquer pourquoi Einstein attirait autant les foules comme il nous fascine encore aujourd'hui?**

Je dirais que c'est parce qu'il a abordé des sujets qui font rêver...

Je vais commencer par relater une petite anecdote personnelle. J'ai beaucoup voyagé afin d'assister à des conférences tout au long de ma carrière de professeur-chercheur. Or, lorsque je disais à ceux avec qui je voyageais que j'étais astrophysicien, alors là, nous conversions durant tout le voyage. Par contre, je suis persuadé que si j'avais dit que je faisais de la physique nucléaire, on m'aurait répondu que «C'est intéressant cela...» mais ça aurait été la fin de la conversation.

Autrement dit, je crois que c'est un peu ce qui a dû se passer avec Albert Einstein, lui qui travaillait sur des questions qui intriguent un peu tout le monde.



[Albert Einstein](#) (1879-1955)

## Le temps, quelque chose de... relatif?

Avant la relativité restreinte (RR), on s'était habitué à considérer que le temps est quelque chose d'absolu; il n'y a pas le temps de Claude Lafleur, ni celui de Serge Pineault ou encore le temps de nous sur Terre et celui de quelqu'un qui chemine en fusée vers le centre de la galaxie. Mais voilà qu'Einstein montre que le temps, c'est quelque chose de relatif. (Nous y reviendrons.) Et cela a mené à des paradoxes fascinants, dont celui des jumeaux.

Imaginons qu'un jumeau demeure sur Terre pendant que l'autre s'envole à bord d'une fusée qui se déplace à 98% de la vitesse de la lumière. Ce dernier revient sur Terre après deux années passées à bord de sa fusée mais, ô surprise, sur Terre, son jumeau a vieilli de dix ans.

Les gens se disaient: «Mais cela ne se peut pas, voyons, c'est impossible!» Et pourtant oui, c'est possible en vertu de la théorie de la relativité. (On l'a même démontré expérimentalement.)

## Une vitesse inconcevable

Ce qu'il importe de réaliser, lorsqu'on parle de la RR, c'est que la vitesse de la lumière joue un rôle déterminant.

Or, cette vitesse, ce n'est pas 100 km/h ou quelque chose du genre puisque la lumière se déplace dans le vide à la vitesse de 300 000 kilomètres à la seconde! Voilà qui est prodigieux. Pour vous donner une idée, à cette vitesse, un rayon de lumière ferait neuf fois le tour de la Terre en *une seconde* seulement. [De même, elle franchit la distance Terre-Lune, 385 000 km,

en un peu plus d'une seconde.] Il ne s'agit donc pas d'une vitesse concevable dans notre vie de tous les jours. On ne peut pas réaliser de petites expériences dans notre cuisine pour voir ce qui se passe à cette vitesse.

Un autre fait étonnant qui découle de la relativité générale (RG) cette fois, c'est qu'après avoir considéré durant très longtemps que la force gravitationnelle énoncée par Newton était ce qui faisait tomber une pomme et tourner la Lune autour de la Terre, voilà qu'Einstein nous dit qu'*il n'y a pas de force gravitationnelle!* Ce sont plutôt les masses qui courbent l'espace. Et qui plus est, les masses courbent ce qu'Einstein a appelé l'*espace-temps!* (Nous y reviendrons.)

Il paraît qu'à la suite de la théorie de la RR, on parlait beaucoup d'Einstein dans les salons de thé de Londres! On imaginait des tas de trucs à propos de jumeaux qui ne vieilliraient pas au même rythme...

Jusqu'à un certain point, les gens ne croyaient pas vraiment à tout ce qu'avancait Einstein, jusqu'à ce que des expériences démontrent ses théories. Et même parmi les physiciens, on a mis du temps à accepter ces théories.

**Autrement dit, ce qui fascinait le monde, c'était qu'Einstein arrivait avec des concepts auxquels personne n'avait songé avant lui, ne serait-ce que celui de la lumière qui file à une vitesse constante de 300 000 kilomètres à la seconde ou l'idée qu'on vieillirait moins vite si on voyageait à cette vitesse, etc.**

## 2 – Au temps de l'électricité et de l'électromagnétisme

Avant d'aller plus loin, situons Einstein dans son contexte. Celui-ci est né en 1879 à Ulm, dans ce qu'on appelait à l'époque l'Empire allemand. Si on résume d'un trait les années 1800, c'est la grande période où on découvre l'électricité.

Les physiciens venaient en effet de découvrir une force très curieuse, une force qui, entre autres, influence l'aiguille d'une boussole (ce qui fascinera le jeune Einstein, à qui son père avait donné une boussole). C'est également l'époque où on invente l'ampoule électrique qui permettra aux gens de s'éclairer le soir – toute une révolution!

Ainsi donc, l'époque où Einstein élabore ses théories en est une de grands progrès technologiques; c'est l'époque où apparait l'automobile, où des avions commencent à voler, apparait également la radio, le téléphone, etc. C'est une ère de grands développements technologiques – qu'on prend de nos jours pour acquis, comme si tout cela avait toujours existé.

Effectivement. Claude, vous avez mis le doigt sur les deux aspects de la science: l'aspect fondamental – où se situe Einstein, puisque c'est un physicien théoricien qui s'intéresse aux grands problèmes de la physique fondamentale – et, en même temps, cela montre que la science fondamentale génère éventuellement des applications pratiques. Et nous allons d'ailleurs voir que les deux théories de la relativité d'Einstein nous servent au quotidien (applications GPS). Qui aurait cru cela il y a un siècle?!



Qu'est-ce qui fait bouger l'aiguille d'une boussole? Lorsqu'il était enfant, Einstein a reçu de son père une boussole, jouet qui l'a fortement intrigué. Sans le savoir, il côtoyait une force magique, l'électromagnétisme, qui allait alimenter son esprit toute sa vie durant.

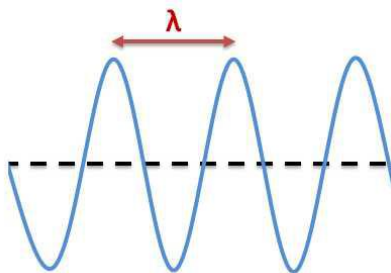
Si on considère les physiciens qui ont précédé Einstein, on retrouve des sommités comme [James Clerk Maxwell](#) (1831-1879), [Ludwig Boltzmann](#) (1844-1906) et [Max Planck](#) (1858-1947). C'est l'époque où on introduit la [constante de Planck](#), tandis que Maxwell unit l'électricité et le magnétisme dans sa théorie de l'[électromagnétisme](#). Cette théorie établit que les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière. Et Maxwell considère que la lumière est tout simplement une onde électromagnétique qui se déplace, forcément, à la vitesse de la lumière.

## Ondes mécaniques et électromagnétiques

Arrêtons-nous un instant sur la notion d'onde, une notion fort importante pour comprendre la suite.

Jusqu'à l'époque de Maxwell, les physiciens considéraient que toute onde avait besoin d'un support matériel pour se déplacer, par exemple les ondes sonores (qu'on entend) se déplacent dans l'air. On parle alors d'*onde mécanique*.

On a aussi l'image d'une onde mécanique qui se déplace à la surface de l'eau. Lorsqu'on jette un caillou dans un bassin d'eau, il se produit à la surface une série de cercles concentriques qui s'étendent progressivement. La même chose se produit pour une onde sonore, qui se répand dans l'air.

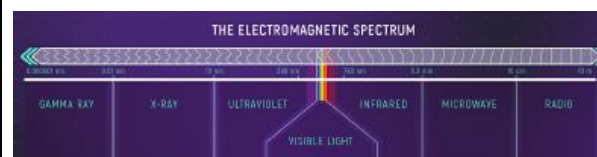


À remarquer que les ondes sont faites de crêtes (le sommet des vagues) et de creux (entre les vagues). Selon la force avec laquelle une onde mécanique est générée, la hauteur des crêtes peut être plus ou moins grande; on parle alors de *l'amplitude de l'onde*. Le sommet des vagues peut être très rapproché ou plus distant; on parle alors de la longueur de l'onde (ou, plus simplement: de *longueur d'onde*).

Dans le cas de ces ondes, si elles n'ont pas de support matériel, elles ne peuvent se propager; c'est pourquoi dans l'espace ou sur la Lune, où il n'y a pas d'air, c'est le silence total.

Par analogie, les physiciens des années 1800 imaginaient que pour se déplacer dans l'espace, la lumière avait besoin d'un support matériel. Ils ont par conséquent imaginé que l'espace devait être rempli de quelque chose de parfaitement transparent et d'indécelable: l'*éther*.

Or, Maxwell a montré que la lumière est une onde d'un nouveau type, qui n'a justement pas besoin d'un support pour se propager. Il s'agit d'une onde *électromagnétique*. On a depuis découvert une gamme d'ondes électromagnétiques, dont les ondes radio, les ondes visibles, les rayons X, les rayons gamma, etc. Toutes ces ondes se déplacent dans l'espace sans aucun support car, on le sait à présent, l'espace est vide (c'est-à-dire sans éther).



Le spectre électromagnétique, des rayons gamma (à gauche) jusqu'aux ondes radio en passant par la mince bande du visible.

Notons enfin que les ondes se déplacent à une certaine vitesse selon le milieu dans lequel elles se propagent. Comme on l'observe aisément, les ondes à la surface de l'eau se propagent très lentement. Pour les ondes sonores, la vitesse du son dans l'air est de l'ordre

de 1200 km/h. Par contre, la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide est de... 300 000 kilomètres à la seconde.

On observe aisément la différence entre la vitesse du son et celle de la lumière lorsqu'on regarde un feu d'artifice; on voit bien avant l'explosion qu'on entend son boum.

C'est aussi une époque où on commence à comprendre comment se comportent les gaz. Dans une pièce, les molécules et les particules ont une distribution de vitesse qu'on appelle d'ailleurs du nom de Maxwell-Boltzmann. C'est également une période où la physique quantique prend forme: Planck dit que dans un système, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue, mais qu'elle arrive par *quanta*, c'est-à-dire par paquets.

Bref, c'était une période où ça bouillonnait beaucoup. Et là où ça devient important pour Einstein, c'est qu'on sait déjà que la vitesse de la lumière est constante.

### La notion fondamentale de la vitesse de la lumière

Dans les années 1880, Albert Michelson et Edward Morley tentent de démontrer l'existence de l'éther en effectuant une expérience devenue si célèbre qu'on l'appelle désormais [l'expérience de Michelson et Morley](#). Ces deux physiciens montrent du coup que la vitesse de la lumière est constante, indépendamment du mouvement de la source ou de l'observateur.

Or, dans le cas des ondes mécaniques, leur vitesse de propagation varie selon les conditions; c'est ainsi que la vitesse du son varie selon le milieu dans lequel l'onde se propage (eau, air, etc.) et, dans notre atmosphère, selon l'altitude. Par contre, la vitesse de propagation de toute onde électromagnétique dans le vide est *toujours* la même – 300 000 km/s – qu'importe les circonstances (comme nous le verrons).

C'est là la notion à la base de la théorie de la RR d'Albert Einstein.

Les années 1880, c'est l'époque de l'expérience fort importante de Michelson et Morley, qui montre que la vitesse de la lumière est constante quoi qu'il arrive. Ainsi, si on bouge par rapport à une source de lumière – si on s'avance vers elle, elle n'arrive pas plus vite jusqu'à nous, ou si on s'en éloigne, elle n'arrive pas moins vite à nous... C'est toujours 300 000 km/s. Or, à bien y penser, c'est quelque chose de contre-intuitif et qui va justement mener à la RR.

Normalement, en effet, on s'attendrait à ce que les vitesses s'additionnent. Par exemple, si je suis fixe et que je lance une balle à la vitesse de 10 km/h, c'est à cette vitesse qu'elle filera. Mais si je me déplace à la vitesse de 100 km/h et que je lance une balle à 10 km/h, elle ira alors à 110 km/h. Bien entendu, les vitesses s'additionnent. Mais dans le cas de la lumière, peu importe si on se déplace ou non, les vitesses ne s'additionnent jamais ni ne se soustraient.

Exactement. En pratique, ce qu'on observe, c'est qu'à basse vitesse, les vitesses s'additionnent. Pour reprendre votre exemple:  $100 \text{ km/h} + 10 \text{ km/h} = 110 \text{ km/h}$ . Pas de problème puisque nous sommes à basse vitesse, il n'y a donc aucun changement. Par contre, lorsqu'on arrive à des vitesses qui avoisinent celle de la lumière, ce n'est plus ce qui se passe.

Si, par exemple, je suis dans une fusée qui file à 95% de la vitesse de la lumière et que je lance à partir d'elle une autre fusée à une vitesse à 50% de celle de la lumière, cette dernière ne filera pas à 145% de la vitesse de la lumière puisqu'on ne peut jamais aller plus vite que la vitesse de la lumière. Cette vitesse est *toujours* constante et une limite supérieure!

L'expérience de Michelson et Morley a montré que la vitesse de la lumière dans le vide est de  $300\,000 \text{ km/s}$ , point à la ligne!

**C'est donc à partir des années 1880 qu'on réalise que la vitesse de la lumière est constante et qu'on n'a plus besoin de l'éther pour que se propage la lumière.**

Exactement... Non seulement l'éther n'était plus nécessaire, mais il fallait s'en débarrasser!

**Précisons enfin que ce qui est amusant lorsqu'on lit des textes d'époque où on pense que l'éther existe – puisqu'on en a besoin – mais on le définit comme étant quelque chose d'absolument impossible à repérer de quelque façon que ce soit! L'éther existe, dit-on, mais il est parfaitement transparent. Ne tentons donc pas de le détecter: ne tentons pas d'aller chercher une cuillerée d'éther dans l'espace, c'est impossible!**

C'est cela, On invente l'éther parce qu'on en a besoin, mais lorsque ça ne fait pas notre affaire, on l'oublie!

### **3 – Les «*gedanken experiments*» d'Einstein**

Si on revient à Albert Einstein, ce que j'ai pu lire et de ce qu'on rapporte généralement, c'est qu'à l'origine de toutes ses théories, il se pose une question toute simple mais très étonnante: si j'étais sur un rayon de lumière, comment verrais-je le monde? Voilà la question de départ d'Einstein, n'est-ce pas?

En fait, oui, jusqu'à un certain point. À plusieurs reprises, Einstein faisait ce qu'on appelle en allemand des «*gedanken experiments*» – c'est-à-dire des expériences par la pensée. Très souvent, il se demandait: «Qu'est-ce qui se passerait si...?» Il imaginait alors quelque chose de très simple. C'est justement le cas avec: si j'étais assis sur une particule de lumière (un photon), que se passerait-il donc?

J'ignore s'il s'agit d'une légende urbaine (que j'ai toujours entendue), mais à l'époque où il travaillait au Bureau des brevets de Bern, en Suisse, la gare de train possédait une tour surmontée d'une horloge. Et il y avait un réseau de tramway qui desservait la gare.

Einstein devait sans doute prendre le tramway à l'occasion et, on raconte qu'en s'éloignant de la gare et de sa tour, il se

serait un jour demandé: «Que se passerait-il si le tramway filait à la vitesse de la lumière?» Alors là, ce serait comme si le temps s'arrêtait...

### Le monde à la vitesse de la lumière

Arrêtons-nous un instant pour réfléchir à la question.

Imaginons que nous sommes à bord du tramway qui s'éloigne de la gare. On regarde l'heure. Il est disons 11h45.

Le tram file et les aiguilles avancent. Bientôt, il est 11h46, puis 11h47, etc., alors que nous nous éloignons de la gare.

Mais si le tramway filait à la vitesse de la lumière, la lumière en provenance de l'horloge ne nous rejoindrait jamais! Jamais on ne verrait les aiguilles de l'horloge avancer.

Le temps se serait arrêté, alors qu'on s'éloignerait de la gare à la vitesse de la lumière.

Qui plus est, tout se serait arrêté autour de nous, pas plus ce qui se passe

au-devant du tram qu'à l'arrière. (Rappelez-vous: les vitesses ne s'additionnent ni ne se soustraient.) On aurait arrêté le temps en filant à la vitesse de la lumière!

Voilà la première grande découverte d'Einstein... qui découle de la simple question: si je filais à la vitesse de la lumière, comment verrais-je le monde?

Voilà qui illustre le fait que le temps n'est pas quelque chose d'absolu, puisque je suis parvenu à me mettre dans un repère où le temps s'est arrêté.

Einstein a ainsi imaginé quantité d'expériences de la sorte. Notamment, en relativité générale, il s'est demandé: que se passerait-il si je me trouvais dans un ascenseur qui tombe en chute libre? [Nous y répondons plus loin.]

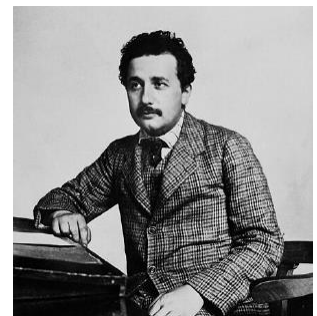
Toutes ces expériences par la pensée – ces «*gedanken experiments*» – nous ont menés à une nouvelle conception de l'Univers. C'est incroyable à quel point Einstein s'est posé de simples petites questions ... qui ont souvent mené à des conclusions très surprenantes.

## 4 – De Galilée à Einstein

Un autre aspect surprenant: Einstein énonce sa première théorie en 1905 (qu'on appellera par la suite la relativité restreinte). Il n'avait alors que 26 ans. C'est donc un jeune homme qui réfléchit par lui-même et qui pond une théorie qui changera à tout jamais notre perception de l'Univers.

J'imagine qu'à l'époque, on ne parle pas de la relativité restreinte, on doit parler de la relativité tout court, n'est-

ce pas? Quelle est donc cette théorie émise en



Einstein à 26 ans.

## 1905 et qu'on va éventuellement appeler la relativité restreinte?

Pour être honnête, je ne pourrais pas dire quand les mots *relativité restreinte* sont apparus.<sup>1</sup>

En fait, l'article dans lequel Einstein énonce sa théorie portait sur l'électrodynamique des corps en mouvement. Cet article traitait de la théorie de Maxwell sur l'électromagnétisme et de la mécanique normale à la Newton: ces deux théories sont-elles compatibles, se demandait Einstein.

Or, il arrivait à la conclusion que cette compatibilité demandait que la vitesse de la lumière soit constante dans tous les repères ce qui, rappelons-le, avait déjà été démontré par l'expérience de Michelson-Morley. C'est en examinant les conséquences de devoir conserver la vitesse de la lumière à 300 000 km/s qu'il arrive à la conclusion que les mesures de temps et d'espace sont toutes relatives. Il n'y a donc pas de temps absolu non plus!

Notons au passage que [Wikipédia](#) relate que: «En 1905, le physicien allemand Max Planck utilise l'expression «théorie relative» (*Relativtheorie*), qui met l'accent sur l'usage du principe de relativité. Dans la partie discussion de cet article, le physicien allemand Alfred Bucherer utilise pour la première fois le terme «théorie de la relativité» (*Relativitätstheorie*).»

<sup>1</sup> Après vérification, notons qu'Einstein énonce le principe de relativité dès la première page de son article de 1905 sur la relativité restreinte.

C'est donc en 1905 qu'Albert Einstein nous parle de la relativité du temps. Doit-on comprendre que sa théorie est un prolongement de celle de Newton? Newton serait le cas où on se déplace à basse vitesse tandis que tout change lorsqu'on s'approche de la vitesse de la lumière? C'est là la différence entre la physique de Newton et celle d'Einstein?

Je pense que ce serait une façon correcte de voir les choses. Mais j'irais même un peu plus loin puisque Newton était en fait un prolongement de Galilée; il y a donc Galilée, Newton et Einstein.

D'ailleurs, lorsqu'on parle de la relativité d'Einstein, on va souvent la comparer à ce qu'on appelle la [relativité galiléenne](#). C'est-à-dire que Galilée s'était demandé: qu'est-ce qui se passe si je suis dans un laboratoire et qu'il y a un charriot qui se déplace selon une certaine vitesse constante et uniforme? Il en est venu à conclure que les lois de la physique seraient les mêmes, il n'y aurait pas de différence. Puis Newton est arrivé avec sa théorie de la gravitation, ce que n'avait pas envisagé Galilée. Mais notons tout de suite ici que la gravitation n'intervient nullement dans la théorie de la RR. Ceci viendra plus tard avec la RG.

## Qui arrivera le premier au sol?

Galilée avait déjà remarqué que les objets, peu importe leur masse, tombaient au même taux, à raison de 10 mètres par seconde par seconde.<sup>2</sup> Newton s'est basé

<sup>2</sup> La valeur exacte de l'accélération gravitationnelle est de 9,8 mètres par seconde par seconde, mais on arrondit à 10 par simplicité.

sur cette observation pour élaborer sa théorie de la gravitation universelle...

### L'accélération de la gravité: $10 \text{ m/s}^2$

On parle ici de l'accélération due à la gravité terrestre.

Imaginez que vous sautiez du toit d'un édifice. Au départ, votre vitesse est de 0 mètre par seconde. Mais au bout d'une seconde, vous tomberez déjà à la vitesse de 10 m/s. Puis à la deuxième seconde, vous filerez à 20 m/s, puis à 30 m/s au terme de la troisième seconde de votre chute, et ainsi de suite.

Vous accélérerez donc de 10 m/s à chaque seconde, d'où l'idée que la Terre exerce sur vous une force d'accélération de 10 mètres par seconde à chaque seconde, ce qu'on abrège par  $10 \text{ m/s}^2$  (dix mètres par seconde-carré).

L'accélération due à la gravité terrestre demeure toujours de  $10 \text{ m/s}^2$ , peu importe le corps qui tombe, comme l'ont démontré les astronautes qui sont allés sur la Lune, en prenant un marteau et une plume qui tombaient à la même vitesse puisqu'il n'y avait pas d'air.

**Peut-être tout le monde n'a-t-il pas à l'esprit cette jolie démonstration, un concept assez amusant. Rappelons-là.**

Si on se demande: en lâchant une plume d'oiseau et un marteau, lequel arrivera en premier au sol, nous allons tout

de suite répondre que ce sera le marteau, bien sûr! C'est d'ailleurs ce qui se



L'astronaute David Scott réalisant sur la Lune l'expérience imaginée par Galilée quatre siècles plus tôt. (Voir la [vidéo](#).)

passer sur Terre puisque la chute de la plume est freinée par l'air. Mais, en réalité, les deux objets sont attirés par la même force vers le sol: la gravité. Ils devraient donc tomber à la même vitesse si ce n'était de l'air.

C'est ainsi que l'un des astronautes d'Apollo 15 a tenté l'expérience sur la Lune, où il n'y a pas d'air. En laissant tomber un marteau et une plume d'oiseau, les deux sont arrivés en même temps sur le sol lunaire, étant tous deux attirés par la même force de gravité.

Notons que sur la Lune, la force d'accélération est six fois plus faible que sur Terre; elle est de seulement  $1,6 \text{ m/s}^2$ . C'est pourquoi tout y est six fois plus léger.

Petite note personnelle de Claude: le 2 août 1971, j'ai vu en direct à la télé cette petite expérience réalisée par l'astronaute David Scott. J'avais alors 13 ans et j'ai été époustouflé; je venais d'assister à une démonstration de physique qui m'a beaucoup troublé...

C'est ce que Galilée avait compris. Newton établira par la suite la fameuse loi de la gravitation universelle qui fait que

tous les objets tombent vers le centre de la Terre avec une accélération de 10 mètres par seconde par seconde.

## 5 – Points de vue différents

Newton a fait une chose additionnelle. Il a établi une relation qui est presque aussi connue que le  $E = mc^2$  d'Einstein; il s'agit de  $F = ma$ . C'est presque une expression littéraire!

$F$ , c'est une force,  $m$  une masse et  $a$  l'accélération.

Disons qu'une certaine force agit sur une bille. Cette force va conférer une accélération à la bille. Mais, pour une force donnée, l'accélération va dépendre de la masse de la bille.

Imaginez que vous poussiez de votre main avec une certaine force  $F$  sur une bille... ou sur une boule de quille. Vous n'obtiendrez pas le même résultat: la boule de quille accélérera beaucoup moins rapidement que la bille. La force égale la masse multipliée par l'accélération,  $F = ma$  !

### Masses gravitationnelle et inertielle

Si je laisse simplement tomber une bille, la force qui agit sur elle, c'est celle de la gravité terrestre. Cette force dépend de la masse de la Terre et de celle de la bille. (Le produit des deux nous indique la grandeur de la force.) Et sous l'effet de cette force, la bille va acquérir une accélération qui dépendra de sa masse.

Ce qui importe de noter ici, c'est que j'ai parlé deux fois de masse; celle qui génère la force de gravité et celle de la bille qui accélère. Et généralement, on suppose que les deux quantités sont égales.

Lorsque c'est la gravité qui détermine la grandeur de la force qui s'exerce, on parle alors de *masse gravitationnelle*, et on parle de *masse inertielle* en ce qui concerne la bille qui accélère vers le sol. On connaît tous le mot inertie: une grosse masse est plus difficile à déplacer qu'une petite masse, parce qu'elle possède davantage d'inertie.

On a donc ici, dans le cas d'une force gravitationnelle qui agit sur une bille, deux concepts de masse. On sait maintenant avec une précision considérable que les deux masses sont rigoureusement égales, mais la question a longtemps été source de discussions et de vérifications expérimentales de plus en plus précises.

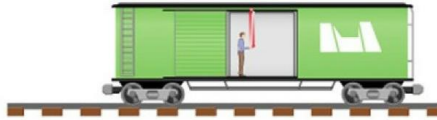
### Référentiel ou repère de référence

Pour comprendre ce qui se passe en relativité restreinte, nous devons introduire le concept de référentiel ou de repère de référence.

C'est ainsi qu'on considère deux repères qui sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Exemple: je suis dans mon labo, au repos, et j'ai un chariot devant

moi qui se déplace à une certaine vitesse. On a donc deux repères distincts qui me permettent d'observer différents phénomènes.

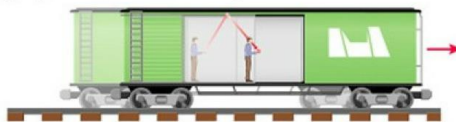
Le lancer vu par le lanceur



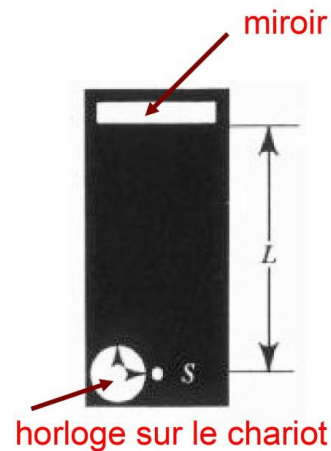
Le lancer vu par une observatrice le long de la voie ferrée



Même situation que ci-haut, mais pour une vitesse plus grande du train



On remplace le train par un chariot, la balle par une source S de lumière



A gauche: le lancer d'une balle dans un wagon, tel que vu par le lanceur et des observatrices situées le long de la voie ferrée. A basses vitesses (considérablement plus petites que la vitesse de la lumière), les vitesses de la balle dans le wagon et du train s'additionnent normalement pour les observatrices le long de la voie ferrée. A droite: on répète l'expérience, mais avec une source S de lumière.<sup>3</sup>

Comme nous l'avons vu, Einstein utilisait souvent comme exemple de repères différents un train qui circule à une certaine vitesse et des observateurs situés le long de la voie ferrée. Il examinait alors le point de vue de ceux qui se trouvent au repos et d'autres observateurs dans le train.

Il se disait alors: «Puisque la vitesse de la lumière doit être constante, que se passerait-il si un éclair frappait le train à l'avant et à l'arrière en même temps? Qu'observeraient des gens postés sur le toit d'un wagon à mi-chemin entre l'avant et l'arrière du train et d'autres se trouvant le long de la voie ferrée vis-à-vis du wagon central?

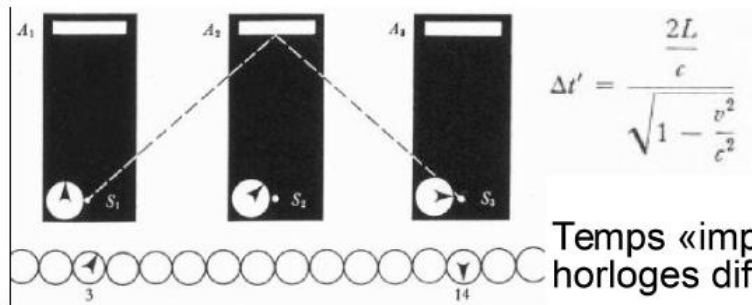
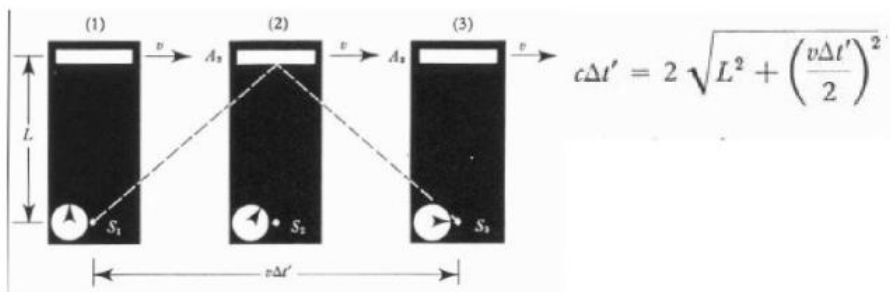
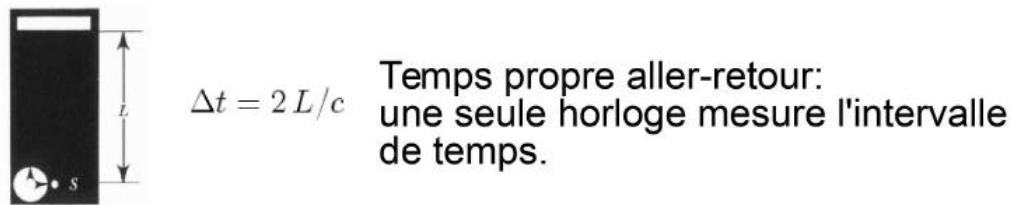
<sup>3</sup> Figures tirées respectivement du livre *Cosmic Perspective* par Bennet, J., Donohue, M., Schneider, N. & Voit, M., 2nd ed. (Addison Wesley 2002), p. 390; et de Smith, J.H., *An Introduction to Special Relativity* (Courier Dover 2016), p. 51.

Dépendamment de leur point de vue, ils ne verront pas nécessairement les deux éclairs simultanément puisque le train se déplace. La différence de temps pour voir arriver les éclairs ne sera pas la même, selon qu'on soit placé le long de la voie ferrée ou sur le train puisque que les temps de parcours seront différents.

Une autre façon de voir les choses serait de considérer ce que verraient les observateurs le long de la voie ferrée qui observent ceux à bord du train mener des expériences. Imaginons que l'un de ceux à

bord du train lance une balle ou mieux encore un rayon de lumière qui ferait un aller-retour d'un miroir situé au sol à un autre au plafond...

Or, on voit alors que le temps pour l'aller-retour de la lumière ne sera pas le même selon qu'on fait l'observation en étant le long de la voie ferrée ou à bord du train puisque la trajectoire lumineuse vue le long de la voie ferrée est plus longue (et la vitesse de la lumière doit être la même - rappelons-nous, la vitesse de la lumière est constante!).



Temps «impropre»: plusieurs horloges différentes

La vitesse de la lumière étant constante et identique dans les référentiels du wagon-chariot et des observatrices le long de la voie ferrée, le temps de parcours sera plus long tel que mesuré dans le référentiel de la voie ferrée que dans le référentiel du train (temps propre).<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Figure tirée de Smith, J.H., *An Introduction to Special Relativity* (Courier Dover 2016), p. 51.

## 6 – L'équation la plus célèbre

C'est dans le cadre de la relativité restreinte qu'Albert Einstein a mis au point l'équation  $E = mc^2$ . Que signifie-t-elle au juste et que nous apporte cette équation?

Dans cette équation,  $E$  est l'énergie,  $m$  la masse et  $c$  la vitesse de la lumière.

Elle nous dit qu'à une masse donnée est associée une quantité d'énergie, et il s'agit d'une quantité d'énergie phénoménale puisque  $c = 300\,000$  kilomètres à la seconde.

Surtout, cette équation signifie qu'il y a conservation d'énergie et de masse. Prenons l'exemple de deux particules qui interagissent. Je mesure les masses avant et après leur interaction. Si j'obtiens moins de masse après, c'est qu'il y a quelque part de l'énergie qui a été dégagée. C'est ce qui se passe lors d'un processus de fusion nucléaire, lorsque deux ou plusieurs noyaux d'atome se fusionnent.

Dans le cas le plus simple, on prend quatre protons et on les réunit pour fabriquer un noyau d'hélium. Or, en pesant le tout (façon de parler), on se rendra compte que le noyau d'hélium est un peu moins massif que la somme des quatre protons qu'on avait au départ. La différence de masse, multipliée par la vitesse de la lumière au carré [ $E = mc^2$ ] nous donne l'énergie qui est apparue. C'est l'énergie qui résulte de la fusion nucléaire. Voilà comment fonctionne le Soleil.

**Avec l'équation  $E = mc^2$ , était-ce la première fois qu'on associait énergie et masse, c'est-à-dire qu'on peut transfo-**

**mer de la matière en énergie et de l'énergie en matière?**

C'est exactement cela.

On peut donner un autre exemple, qui peut paraître encore plus étrange... mais dont on se sert pourtant tous les jours en médecine.

### Tomographie par émission de positrons

Il existe des particules qu'on appelle des *antiparticules*. C'est une curieuse appellation puisque cela peut donner l'impression qu'il ne s'agit pas de véritables particules. Or, les antiparticules existent tout autant que les particules. En fait, chaque particule a son antiparticule. Les deux ont la même masse mais une charge opposée.

Par exemple, l'électron, qui est de charge électrique négative, a une antiparticule qu'on appelle le positron. Ce positron a exactement la même masse que l'électron mais il a une charge positive.

Si on réunit un électron et un positron, ils vont disparaître en tant que matière pour générer de l'énergie sous forme de rayonnement gamma.

De façon générale, on peut dire que l'énergie peut se matérialiser – on peut fabriquer des particules à partir de l'énergie – tout autant que des particules peuvent perdre une certaine quantité de masse en s'unissant (réaction nucléaire),

et même transformer totalement leur masse en énergie (fusion d'une particule avec son antiparticule). Tant qu'on respecte  $E = mc^2$ , aucun problème! Il y a conservation d'énergie et de masse.

Voilà qui peut sembler bizarre dans notre vie de tous les jours. Pourtant, lorsqu'on se rend à l'hôpital pour passer une [tomographie par émission de positrons](#), on applique directement le principe de conversion de masse en énergie,  $E = mc^2$ .

C'est ainsi qu'on vous injecte une petite quantité de matériel radioactif – pas dangereuse pour votre santé. Ce matériel a été choisi de telle sorte qu'après un certain temps, il se produit une petite réaction nucléaire à l'intérieur, disons, de votre rein ou de votre foie.

Un positron sera émis lors de la désintégration du matériel radioactif qu'on vous a injecté. Il s'agit donc de l'antiparticule de l'électron. Mais comme vous êtes fait de matière contenant une foule de protons, de neutrons et d'électrons, le positron va vite rencontrer un électron et les deux vont s'anéantir en émettant des rayons gammas. Ces rayons gammas sont captés par le tomographe, ce qui mènera à un diagnostic sur l'état de votre rein ou de votre foie.

**Tout cela, c'est grâce à la théorie de la relativité énoncée en 1905?**

Exactement!

## 7 – Des lois universelles?

**Si nous faisons un saut dans le temps pour arriver à 1915... Einstein a alors 36 ans et énonce sa seconde théorie, qu'on va plus tard appeler la théorie de la relativité générale. De quoi s'agit-il?**

Après 1905, Albert Einstein a travaillé sur différents sujets. Il a notamment rédigé un important article sur l'[effet photoélectrique](#) qui lui vaudra de recevoir un prix Nobel en 1921. (Étrangement, il n'a jamais reçu de Nobel pour ses théories sur la relativité.)

Ce qui hantait Einstein, c'était l'idée que les lois de la physique doivent toujours être les mêmes dans toutes les circonstances. Il se disait que celles-ci se doivent d'être universelles, peu importe où on se trouve et dans quelle situation on se trouve.

Ce problème lui a demandé beaucoup plus de temps à résoudre – 10 ans – que la conception de sa première théorie.

En relativité générale, nous parlons d'accélération et de force, ce qu'on avait ignoré en relativité restreinte.

Concrètement, Einstein s'est demandé: comment faire la différence entre un système qui est accéléré par une force gravitationnelle et un autre par une force autre que gravitationnelle?

Imaginons que nous sommes loin de toute masse à bord d'une fusée qui accélère à raison de  $10 \text{ m/s}^2$ , c'est-à-dire avec



Dans *Star Trek*, l'équipage du vaisseau *Enterprise* vivait en gravité selon un procédé «magique». Mais il aurait obtenu le même résultat si leur vaisseau avait accéléré à raison de  $10 \text{ m/s}^2$ . Mais alors, comment savoir s'il avait les deux pieds cloués au sol à cause d'une force d'accélération ou d'une force gravitationnelle (celle de la Terre)?

la même accélération que celle que génère la gravité terrestre. À bord de la fusée, nos pieds se trouveront rivés au sol, exactement comme si on était sur Terre. On se sentirait exactement comme si on se trouvait sur Terre! Aucune différence.

Mais comment faire la différence entre le fait de se trouver en gravité sur Terre ou à bord d'une fusée qui accélère à  $10 \text{ m/s}^2$ ? Quelle différence entre masse gravitationnelle et masse inertielle?!

Voilà qui pourrait signifier que la gravité agit sur une masse de la même manière qu'une masse qui accélère. En conséquence, ne pourrait-on pas éliminer la force de gravité?

## En chute libre dans un ascenseur

Einstein a alors imaginé une petite expérience. Supposons qu'on se trouve dans un ascenseur qui tombe en chute libre. Que se passerait-il pendant qu'on tombe?

On ne ressentirait pas de force de gravité terrestre. On flotterait tout simplement dans la cabine de l'ascenseur. On serait en apesanteur.

Et si on lance une balle, on la verra parcourir une ligne droite; elle ne tombera pas vers le plancher de la cabine: *elle tombe avec la cabine*, sans jamais atteindre le plancher! Elle aussi est en apesanteur. C'est dire qu'on est comme dans un repère

*inertiel*; c'est comme si on était au repos dans une cabine sans gravité.

De cette nouvelle expérience par la pensée, Einstein a déduit: «En fin de compte, je viens de supprimer la force de la gravitation. Celle-ci n'existe plus. Je puis donc mener des expériences comme si j'étais dans un labo immobile.»

C'est ainsi qu'il a établi qu'il y a équivalence entre la gravitation et une accélération uniforme. Autrement dit, les lois de la RR sont toujours aussi valables qu'importe dans quel repère on se trouve. Einstein venait de supprimer la force gravitationnelle.

Pourtant, dans notre cabine d'ascenseur, on est en mouvement, on tombe, on n'est pas immobile... Mais comment savoir si on se trouve dans un champ gravitationnel ou dans une fusée qui accélérerait à raison de 10 mètres par seconde par seconde?

Sur Terre, on ressent une accélération de  $10 \text{ m/s}^2$  mais on ne tombe pas parce qu'il y a un plancher. Si on est dans une fusée qui accélère à raison de  $10 \text{ m/s}^2$ , on se trouve également rivé sur le plancher de l'habitacle. On ne peut donc pas savoir dans quel référentiel on se trouve – au repos ou en accélération constante – puisqu'on ressent exactement la même chose. Comment faire la différence?

Einstein a proposé une autre expérience: imaginons un ascenseur qui n'aurait pas de murs et dans lequel on est en chute libre. Et plus loin de nous, il y a un autre ascenseur en chute libre lui aussi. Imaginons qu'on se voit, même si on se trouve à des centaines de kilomètres l'un de l'autre.

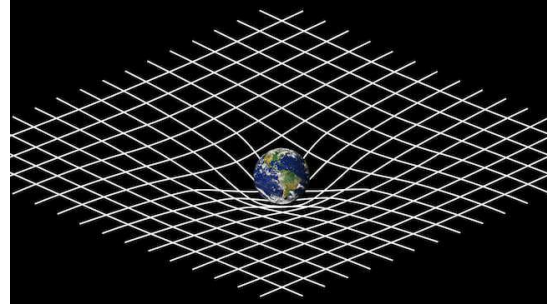
Dans les deux ascenseurs, on tombe vers le centre de la Terre en ligne droite. Mais la direction des deux ascenseurs n'est pas tout à fait la même...

En effet, imaginons qu'on a percé deux tunnels qui mènent jusqu'au centre de la Terre, l'un part de Montréal et l'autre de Paris. Même si chacun des ascenseurs tombe en ligne droite à la verticale, nous allons finir par nous retrouver tous les deux au centre de la Terre.

Or, cela signifie qu'on ne se trouve pas dans un champ uniforme, puisque dans un tel champ, on tomberait parallèlement, tandis que là, on converge vers un point.

C'est donc cette convergence qui nous permet d'établir qu'on est dans un champ de gravitation exercé par la présence d'une masse importante, par exemple, celle de la Terre.

Voilà qui revient à dire que la masse de la Terre courbe l'espace.



Selon ce qu'a découvert Albert Einstein, la masse de la Terre – comme celle de tout autre corps important – a pour effet de courber l'espace.

C'est de cette façon qu'Einstein est parvenu à établir que l'espace se trouve à être déformé par la présence d'importantes masses (planète, étoile, etc.).

Pour être un peu plus précis, ajoutons qu'il parle de la déformation ou de la courbure de l'*espace-temps*, puisque les deux sont intimement liés.

### Le chemin le plus court...

Dans le même esprit, Albert Einstein a montré que dans l'espace autour d'une masse, le chemin le plus court n'est pas une ligne droite, mais une courbe.

#### D'un monde plat à l'espace courbé

Peut-être vous rappellerez-vous avoir appris à la petite école que le chemin le plus court entre deux points, c'est nécessairement la ligne droite. C'est l'un des postulats de ce que les physiciens appellent la [géométrie euclidienne](#), établie par le mathématicien grec [Euclide](#) il y a 2300 ans. Cette géométrie repose sur un monde fait de droites, de plans, de longueurs et d'aires plates.

Cependant, comme nous venons de le voir, en relativité, l'espace est courbé par la présence d'importantes masses. Par conséquent, le chemin le plus court dans l'espace est une ligne courbe. Serge Pineault nous en fait la démonstration en observant ce qui se passe à la surface de la Terre.

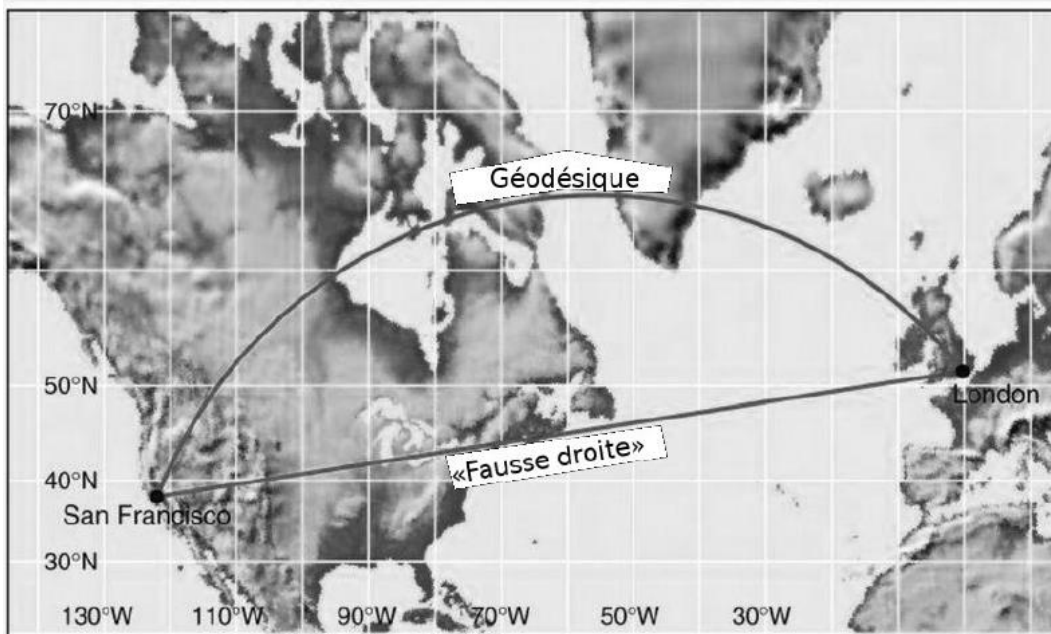
Si, par exemple, vous voulez aller de Montréal à Bordeaux, les deux villes étant situées à la même latitude, à 45° de latitude Nord, logiquement, tout ce qu'on a à faire, c'est de suivre en avion cette latitude de 45° N.

Cependant, dans les faits, les avions qui vont de Montréal à Bordeaux passent plutôt au-dessus du nord du Québec.<sup>5</sup> Pourquoi donc?

Parce que le chemin le plus court, sur une surface courbe, est ce qu'on appelle un arc de cercle. Munissez-vous d'un globe terrestre et d'une ficelle. Vous verrez alors que le chemin le plus court entre Montréal et Bordeaux, c'est bien un arc de cercle et qu'il n'est pas à latitude constante.

Nous voyons donc que la notion de ligne droite n'est pas nécessairement le plus court chemin entre deux points lorsque l'espace est courbé.

La ligne droite nous apparaît faussement comme le plus court chemin entre Montréal et Bordeaux sur une mappemonde (plate) mais pas sur un globe terrestre (sphérique). C'est la même chose dans l'espace où tout est courbé à cause de la présence d'importantes masses.



Cette carte (plate) illustre l'idée qu'en réalité, sur un globe sphérique, il est plus court de relier San Francisco à Londres en passant par le Nord, plutôt qu'en ligne droite.

<sup>5</sup> Dans le balado, on parle du Groenland ou de la terre de Baffin, mais Serge référait en fait à un voyage qu'il a fait entre Londres et Vancouver.

## Preuve que la Terre est ronde!

Imaginons maintenant qu'on parte en avion de Quito et des îles Galápagos. Il s'agit de deux endroits situés à l'équateur, mais séparés par un millier de kilomètres.

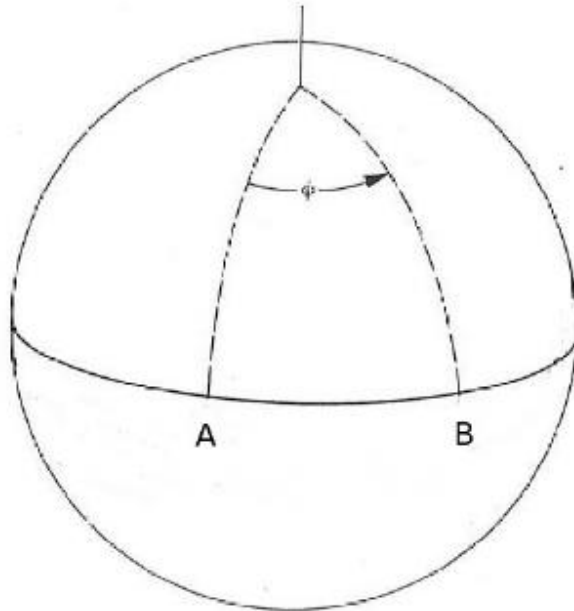
Imaginons que deux avions s'envolent respectivement de Quito et des îles Galapagos pour se diriger franc nord. Ils font donc route en parallèle vers le pôle nord.

Mais, bizarrement, en fin de course, parvenus au pôle nord, les avions vont se rencontrer! Pourtant ils volaient en parallèle lorsqu'ils sont partis.

C'est ainsi qu'en se déplaçant en lignes droites parallèles... on finit par se rencontrer! Pourtant, selon la géométrie euclidienne, deux lignes parallèles ne se rencontrent jamais!

C'est vrai si l'espace est plat. Mais en réalité, l'espace est courbé, comme la surface de la Terre.

Et puisqu'une masse a pour effet de courber l'espace autour d'elle, il en résulte que les lignes les plus courtes que peuvent suivre des particules sont des courbes (que l'on appelle *géodésiques*; les géodésiques sont les «lignes droites» d'un espace courbe).



En partant de deux points à l'Équateur et en volant en parallèle, on aboutit au même point: le pôle nord!

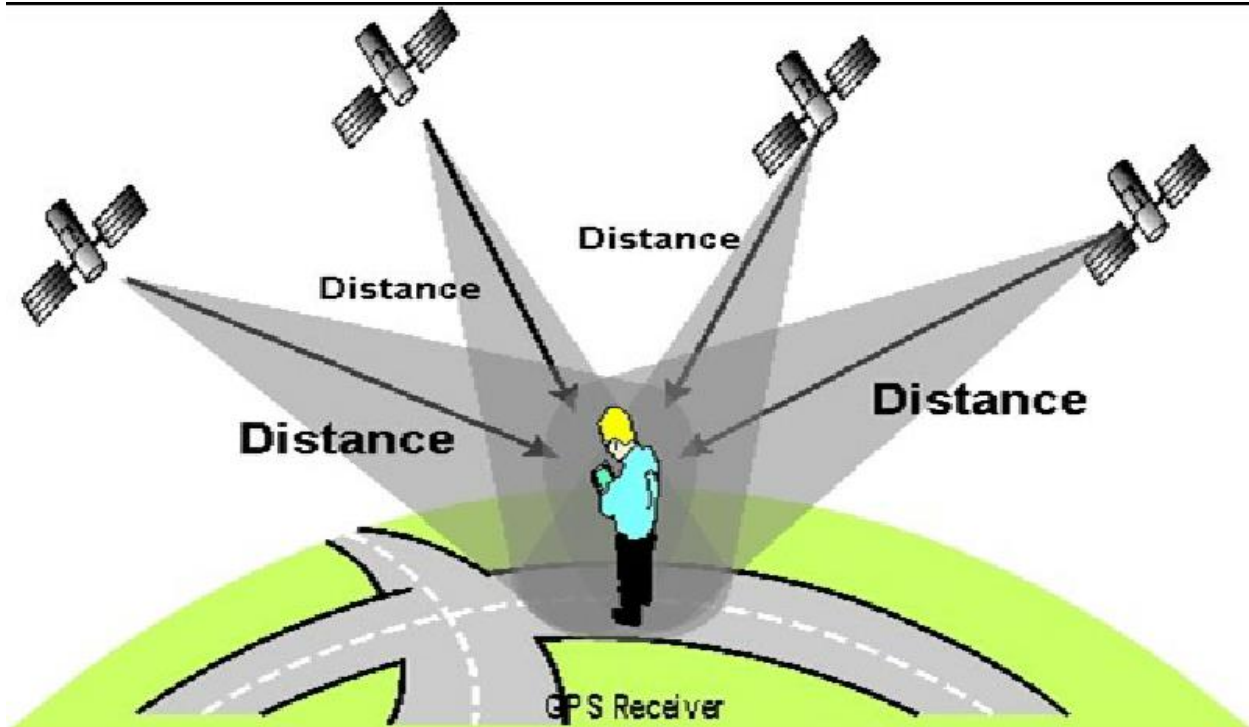
**Serge, vous venez de démontrer que la Terre est sphérique et non plate!**

Absolument. Et dire qu'il y a des gens qui pensent que la Terre est plate!

**La théorie de la relativité nous a donc apporté l'idée que la présence d'une masse courbe l'espace autour d'elle?**

Exactement. Avec la théorie de la relativité générale, on arrive au résultat que l'espace est courbe et qu'il faut désormais cesser de penser qu'on évolue sur une surface plane.

**Il y aurait encore plusieurs autres notions à rajouter mais je pense qu'on a déjà pas mal de matière à digérer...**



Pour savoir où vous êtes, votre cellulaire fait le point en communiquant avec plusieurs satellites GPS.

## 8 – La relativité au quotidien

Au début, Serge, vous avez mentionné que le fameux réseau de satellites GPS, dont on se sert pour se localiser sur Terre, doit tenir compte de la théorie de la relativité. Pourriez-vous nous expliquer en quoi le fait de se repérer sur Terre grâce à des satellites doit tenir compte de la relativité?

### Le système Navstar/GPS

Combien de fois utilisez-vous votre cellulaire pour savoir où vous êtes et quel chemin suivre? Mais savez-vous qu'à ce moment-là, votre téléphone entre en contact avec plusieurs satellites militaires qui passent au-dessus de nos têtes? C'est là un prodige technologique remarquable: être en contact radio instantané avec plusieurs satellites à la fois (illustration ci-dessus).

Pour établir votre position, votre cellulaire a besoin de faire le point avec au moins trois satellites. Pour comprendre le principe de base du système GPS (*Global Positioning System*), imaginez si vous deviez vous arrêter sur le bord de la route afin d'établir à quelle distance vous vous trouvez de trois villes environnantes. Par exemple, imaginons que vous êtes quelque part au centre du Québec et que vous cherchiez à connaître précisément la distance qui vous sépare de Montréal, de Québec et de Sherbrooke. (En France, disons: Brest, Strasbourg et Perpignan.) Connaissant

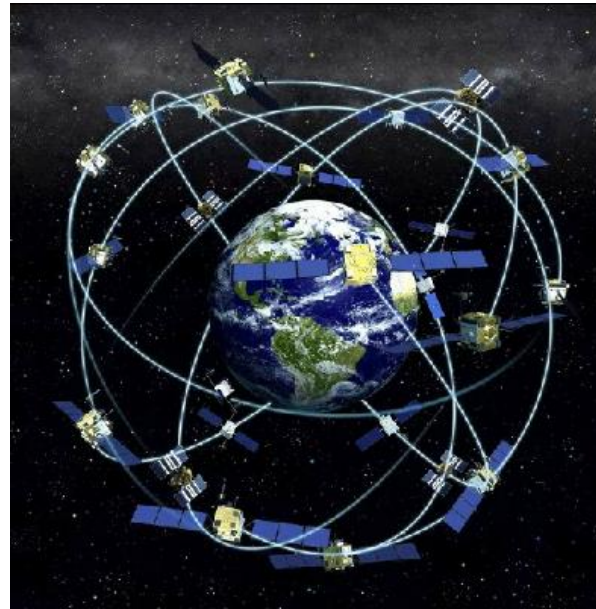
ces trois distances, par simple triangulation, vous parviendriez à déterminer où vous êtes.

Bien sûr, tout dépend de la précision: si vous connaissez la distance vous séparant de trois villes à quelques kilomètres près, vous saurez plus ou moins où vous êtes. Mais si vous connaissez ces distances au mètre près, alors là, vous allez être capable de déterminer votre position avec grande précision.

Dans le cas du système GPS, on se sert non pas de lieux géographiques mais de satellites qui circulent autour de la Terre à 20 200 kilomètres d'altitude. Ce système offre l'avantage de se repérer où qu'on soit sur Terre, en mer comme sur la terre ferme, au beau milieu d'un désert comme sur une île du Pacifique ou en plein centre-ville, sinon même dans les airs (altitude, vitesse, orientation).

Pour ce faire, depuis 1978, les forces armées américaines lancent régulièrement des satellites appelés Navstar ("étoile de navigation"), 80 ont été orbités à ce jour. Pour fonctionner, ce système a besoin de 24 satellites placés sur six orbites différentes (toujours à la même altitude) afin de disposer de 4 satellites par orbite. De la sorte, on constitue un réseau qui couvre entièrement la planète, avec au moins trois satellites visibles en tout temps où qu'on soit sur le globe. (En pratique, cette constellation compte une trentaine de Navstar, une demi-douzaine étant en réserve, alors qu'il faut régulièrement remplacer les satellites vieillissants.) Régulière-

ment, on met en place de nouvelles générations de Navstar, sans cesse plus performants.



La trentaine de satellites Navstar, qui forme la constellation GPS.

Ces satellites gravitant autour de la Terre, ils transmettent par signal radio deux informations à notre cellule: leur position dans l'espace et la distance à laquelle ils se trouvent de nous – données qui changent constamment puisque ces satellites circulent à la vitesse de 14 000 km/h.

Comme nous avons besoin de faire le point avec une très grande précision – à une dizaine de mètres tout au plus – le professeur Pineault nous explique qu'il faut par conséquent tenir compte des effets de la relativité, notamment du fait qu'on a affaire à deux *repères*: le nôtre sur Terre (plus ou moins au repos) et celui des satellites qui se déplacent à haute altitude.



Un satellite Navstar.

La première chose qu'il faut réaliser, c'est que les satellites GPS ne sont pas des trucs très brillants! Tout ce qu'ils font – et là, je simplifie bien sûr – c'est de nous dire en quelque sorte qu'il est «minuit et quart», qu'il est «minuit et vingt..., minuit et trente...» (mais bien sûr avec une très grande précision). Ils transportent donc en eux une horloge atomique extrêmement précise. Chaque satellite émet l'heure qu'il est pour lui, d'après son horloge interne.

Supposons que toutes les horloges du réseau GPS – il y en a deux douzaines – sont parfaitement synchronisées. Elles donnent toutes exactement la même heure. Supposons également que sur Terre, tous les appareils GPS sont synchronisés à la même heure. On a besoin d'au moins trois satellites pour établir notre position (mais plus il y en a, mieux c'est).

Vous recevez donc le signal d'un premier satellite qui vous indique qu'il est 12h15. Mais vous, vous regardez votre montre et vous vous dites: mais non, pas tout à fait, il est plutôt 12h16. Il y a donc une différence.

Or, cette différence vient de ce que la lumière se déplace à la vitesse de 300 000 km/s. Il s'est donc écoulé un certain temps entre le moment où le signal a été émis par le satellite, à 12h15, et celui où vous l'avez reçu: 12h16. Cet écart indique la distance entre vous et le satellite.

Vous faites la même chose avec deux ou trois autres satellites... Et tous étant à la même hauteur et extrêmement bien synchronisés, on parvient de la sorte à établir extrêmement précisément la distance vous séparant de chaque satellite. Puis, en faisant un peu de géométrie, on se situe exactement où on est. [Évidemment, tout se fait automatiquement et à la vitesse de la lumière à l'intérieur de votre cellule.]

Vous aurez remarqué qu'il faut parfaitement synchroniser toutes les horloges. Or, avec la RR, on a vu que si on a des repères qui sont en mouvement relatif, le temps ne s'écoule pas tout à fait au même taux par rapport à des repères fixes. C'est dire que toutes les horloges sur Terre fonctionnent à un rythme légèrement différent de celui des horloges des satellites. Il y a véritablement une différence d'écoulement du temps entre les deux séries d'horloges, comme l'explique la relativité.

Il faut donc régulièrement resynchroniser les horloges des satellites avec nos horloges terrestres, sans quoi, après un certain temps, elles n'indiqueront pas précisément la même heure. Si on ne le faisait pas, plus le temps passerait, plus la mesure de distance serait faussée, et donc la précision d'où nous nous trouvons.

En plus, il faut tenir compte que les horloges des satellites, qui gravitent à 20 200 kilomètres d'altitude, ne se trouvent pas dans le même champ gravitationnel que les horloges terrestres. Il y a en effet une (légère) différence dans l'intensité du champ gravitationnel sur Terre et à 20 200 kilomètres. Ce qui, là aussi, a un effet sur l'écoulement du temps. Comme le veut la RG, les horloges en orbite sont (légèrement) plus rapides que celles qui se trouvent dans le champ gravitationnel plus intense à la surface de la Terre.

Il y a donc deux corrections à apporter dans la synchronisation des horloges des satellites. Je pense avoir vu que si on n'apportait pas ces corrections, au bout de 24 heures seulement, on enregistrerait déjà des erreurs de positionnement d'une dizaine de kilomètres. Et les écarts iraient en grandissant jour après jour...

**Alors que le système GPS nous donne constamment une précision de quelques mètres près.**

En terminant, j'ai une anecdote qui m'a été racontée par un collègue qui œuvre en RG, Clifford Will.

Au début des années 1970, celui-ci était allé donner une présentation au Pentagone devant des généraux. Il a tenté de leur expliquer pourquoi il allait falloir apporter des correctifs aux horloges des satellites afin de tenir compte des effets de la RR et de la RG... Mais ces généraux

étaient plutôt sceptiques... Parait-il qu'ils étaient même rébarbatifs à l'idée d'apporter des correctifs en vertu de cette théorie si bizarre. (Je pense qu'ils n'avaient probablement jamais suivi un cours de relativité!)

Apparemment, en fin de compte, ce qui aurait été décidé, c'est de doter le système GPS de quelques lignes de programmation pour que, si un certain paramètre était égal à 0, on n'apporterait aucune correction, tandis que s'il était à 1, il faudrait apporter des corrections en vertu de la théorie de la relativité.

Il semble même qu'on aurait tenté d'utiliser le système sans tenir compte des effets de la relativité, mais qu'on se serait vite rendu compte que ça ne fonctionnait pas.

Les généraux ont donc dû accepter, même s'ils ne comprenaient pas pourquoi la relativité devait être respectée!

**Les GPS, c'est une technologie absolument extraordinaire, qui nous permet de nous situer à quelques mètres près et qui doit tenir compte de la relativité découverte par Albert Einstein un siècle plus tôt. C'est inouï!**

Il faut même tenir compte de deux aspects de la relativité – différence de vitesse et de champ gravitationnel – puisque si on ne le faisait pas, on aurait vite de sérieux problèmes!

Notons qu'une partie du matériel dont nous parlons ici provient d'un cours à distance de culture générale que Serge Pineault a préparé à l'intention de l'Université Laval: [\*Astronomie: une visite guidée de l'Univers\*](#) (PHY-1902).

# Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



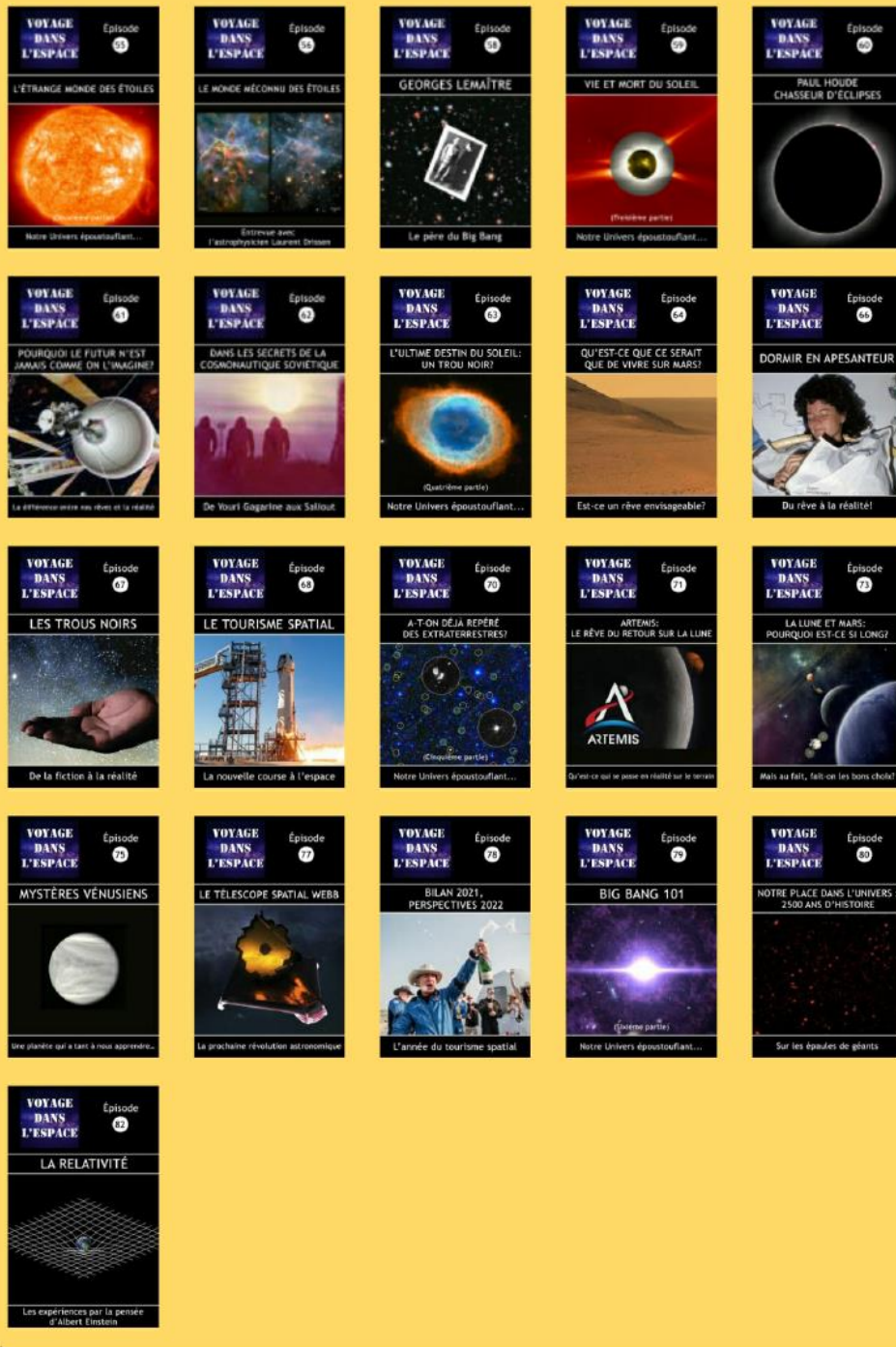
Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

# Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*

<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 26</p> <p>ALEXEI LEONOV</p>  <p>Le cosmonaute aux sept vies</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 27</p> <p>PARLONS DE... CAPSULES SPATIALES</p>  <p>Pourquoi sommes-nous revenus à l'ère des capsules?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 28</p> <p>TRING, LA FRANCHISE DÉCOUVERTE DE LA VIE SUR MARS</p>  <p>Qu'est-ce qu'il y a sur Mars... et comment en faire un deuxième site d'habitation?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 29</p> <p>LA GRANDE PEUR DE 1910</p>  <p>Quand le passé est garant de l'avenir</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 30</p> <p>FINITAS L'ESPLORATION... LES ASTÉROÏDES</p>  <p>Et petits astères... qu'il nous inspirent tout le temps</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 31</p> <p>DES IDÉES PAS COMME LES AUTRES...</p>  <p>Qu'est-ce que ça change, d'être un peu fou... et de réaliser ses idées?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 32</p> <p>PRELUDES À APOLLO 11</p>  <p>La grande Fête de la course à la Lune</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 33</p> <p>APOLLO 11 DANS LES CONGRÈS DE L'HISTOIRE</p>  <p>Et qu'il n'y ait souvent... rien...</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 34</p> <p>NOTRE UNIVERS: BEAUX, MYSTÉRIEUX... SPOUSALARIAT!</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même au-delà!</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 35</p> <p>NOTRE UNIVERS: BEAUX, MYSTÉRIEUX... SPOUSALARIAT!</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même au-delà!</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 36</p> <p>LES SURPRISES DE L'ÉTÉ 2019</p>  <p>Des idées pour les années à venir de l'espace</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 37</p> <p>POURQUOI MARS...</p>  <p>... nous obsède-t-elle autant?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 38</p> <p>OU EN SERONS-NOUS EN 2040?</p>  <p>Comment vivre à la frontière des activités humaines du Québec</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 39</p> <p>L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE</p>  <p>Avec un grand télescope spatialisé</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 40</p> <p>LA LUNE... CETTE INCONNUE</p>  <p>On croit tout savoir à son sujet... Mais non</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 41</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>1<sup>re</sup> partie: le Grand Tour</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 42</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>2<sup>e</sup> partie: destination Jupiter et Saturne</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 43</p> <p>LA MORT ET L'ÉTERNITÉ... HORS DE L'ESPACE</p>  <p>Le rôle de l'ISS pour évaluer l'impact à long terme</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 44</p> <p>ET SI ÇA C'ÉTAIT PASÉ AUTREMENT...</p>  <p>Pourquoi, en 2003, l'espace n'était pas en France</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 45</p> <p>ETÉ 2020 À L'ÉCHÉLON DE LA PLANÈTE MARS</p>  <p>À la recherche d'eau et de vie</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 46</p> <p>DE NOUVELLES PLANÈTES INCROYABLES</p>  <p>Une diversité à n'en plus finir...</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 47</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>3<sup>e</sup> partie: aux confins du système solaire</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 48</p> <p>LES GALAXIES: AUX FRONTIÈRES DE LA COSMOLOGIE</p>  <p>Comment se fait-il que nous existions?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 49</p> <p>LE SYSTÈME SOLAIRE N'EST PLUS CE QU'IL ÉTAIT</p>  <p>2<sup>ème</sup> partie: Notre Univers spatialement...</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 50</p> <p>LE MÉTIER D'ASTRONAUTE</p>  <p>1<sup>ère</sup> partie: au-delà de la simple formation...  <b>Claude Laffleur</b>          Chapitre 3 Les multiples chemins vers l'espace</p>

Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

# Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.