

## Mini conférence

### La (re)naissance de la cosmologie pendant le 1<sup>er</sup> tiers du XXe s.

(2) La cosmologie, littéralement la science de l'ordre de l'univers, c'est l'étude de l'origine, de la structure, des propriétés et de l'évolution de l'Univers. Mais la cosmologie n'a pas toujours été scientifique.

Elle est d'abord mythologique et religieuse. Les hommes ont forgé des mythes impliquant des dieux pour expliquer la création de l'Univers. On a utilisé le terme de cosmogonie pour évoquer ces récits. Dès l'Antiquité les philosophes ont cherché à s'émanciper des mythes et ont créé une branche de la philosophie qui a pour finalité l'étude de la réalité, de l'espace et du temps : la métaphysique. En parallèle, une pensée scientifique tente de lier les observations, les calculs et la métaphysique. Les penseurs de l'Antiquité et du Moyen-Âge ont créé une cosmologie mélangeant textes sacrés, textes scientifiques et philosophiques pour expliquer les origines et la structure de l'univers. Tout change aux XVIe et XVIIe s., la cosmologie classique s'écroule.

Les scientifiques s'appuient d'abord sur des calculs et des observations pour proposer une compréhension scientifique du monde qui les sépare peu à peu des philosophes et des théologiens. Leurs recherches portent d'abord sur la mécanique du système solaire et sur les propriétés des étoiles et de l'espace interstellaire. Elle n'est pas encore une science dotée d'un cadre théorique, les spéculations demeurent, notamment celles des philosophes. Jusqu'à la fin du XIXe s. les observations ne permettent pas d'envisager une cosmologie scientifique dont les sujets d'études vont au-delà du système solaire.

**Mais tout change au début du XXe s. et on a pu parler de renaissance de la cosmologie. Comment ?**

#### 1. État des lieux de l'astrophysique au début du XX e s.

- Que sait-on de l'Univers au début du XXe s. ? (3)

Depuis le XVIIe s., des Galilée et Newton, notre connaissance de l'Univers a finalement peu évolué.

On a une bonne vision et compréhension du système solaire depuis les observations astronomiques faites par Galilée et les découvertes des nouvelles planètes, Uranus (1781) et Neptune (1846). Avec les lois établies par **Kepler et Newton**, on peut prévoir avec une grande précision les mouvements des planètes et des principaux astres dont on peut calculer l'orbite.

On sait calculer la distance de nombreuses étoiles grâce aux méthodes de la parallaxe (1ère distance d'étoile calculée en 1838 par **Friedrich Wilhelm Bessel**) et des chandelles standards, notamment des céphéides, des étoiles variables dont la période est liée à l'intensité lumineuse (relation mise en évidence par **Henrietta Leavitt** vers 1910). A la même date, 1910, on sait que l'analyse spectrale des étoiles permet de définir leur type et leur Intensité lumineuse. On peut donc à partir de leur luminosité apparente estimer leur distance à partir de la relation : Intensité lumineuse (luminosité apparente) = Luminosité / Distance au carré. Ainsi, au début du XXe s. la « sphère des étoiles » des modèles du passé a éclaté car les étoiles apparaissent extrêmement lointaines. Cependant le système solaire est toujours placé à proximité ou au centre de l'Univers.

L'Univers se résume encore à notre galaxie. De **William Herschel** à la fin du XVIIIe s. à **Jacob Cornelius Kapteyn** au début du XXe s. on ne possède qu'une vision très limitée de celle-ci. L'astronome néerlandais la décrit comme un disque stellaire de 40 000 A-L de diamètre. L'étude des céphéides permet néanmoins d'étendre sa taille, l'astrophysicien américain **Harlow Shapley**, dans les années 1920, porte sa dimension à 300 000 A-L et déporte le Soleil de son centre.

En avril 1920 a lieu à Washington le Great Debate qui porte sur la distance d'étoiles appartenant à des nébuleuses dont le spectre lumineux décalé vers le rouge suggère qu'elles sont très lointaines et s'éloignent rapidement du système solaire. Certains suggèrent qu'elles appartiennent à des galaxies extérieures à la nôtre, les autres, derrière Shapley, rejettent cette hypothèse. A cette date, rien ne permet de trancher entre les deux thèses.

- La cosmologie théorique au début du XXe s. (4)

Si les observations et les calculs ont mis à mal l'organisation de l'univers imaginée dans l'Antiquité, ils n'ont pas réussi en ce qui concerne **la substance qui est censée transmettre les effets entre les corps : l'éther**. La notion d'éther est ancienne, elle est fondée sur le refus du

vide et revêtu à partir du XVIIe s. plusieurs idées au fur et à mesure où le nombre de ces effets augmente : la force gravitationnelle, la lumière, l'électricité, le magnétisme sont expliqués par l'éther.

Avec **Newton**, l'éther est ce qui remplit l'espace et permet aux forces d'agir, notamment de **transmettre la force gravitationnelle de façon instantanée**. Cet éther est médiateur de la force gravitationnelle mais n'y est pas soumis, il ne se déforme donc pas. C'est ce même éther qui **transmet la lumière**, composée de corpuscules. Les oscillations de l'éther sous l'action des corpuscules de lumière créent les couleurs. Mais Newton s'oppose à Huygens qui décrit plutôt la lumière comme une onde.

Les défenseurs de la nature ondulatoire de la lumière créent un **éther luminifère** : un **éther solide et élastique** dont les vibrations expliquent la nature ondulatoire de la lumière. De plus, au XIXe s. on demande à l'éther d'expliquer les nouveaux phénomènes étudiés par les scientifiques : les phénomènes électriques et magnétiques. **James Clerk Maxwell**, dont les équations permettent d'unifier le magnétisme et l'électricité, propose un éther capable de rendre compte des ondes électromagnétiques, qu'il identifie aussi à la lumière. **L'éther est perçu comme un référentiel absolu à partir duquel on peut expliquer tous les mouvements.**

(5) Au début du XXe s. les scientifiques sont peu nombreux à rejeter le concept d'éther, c'est-à-dire le milieu où se propagent les ondes électromagnétiques, un milieu rigide et élastique dans lequel la Terre se déplace (sans résistance !). Pourtant une expérience cherchant à en souligner les propriétés, celle de **Michelson et Morley** aux États-Unis dans les années 1880 a donné **un résultat négatif** qui pouvait être interprété comme une preuve de la non existence de l'éther. Les deux américains, pendant plusieurs années et à différents moments du déplacement de la Terre autour du soleil et dans l'éther, mesurent la vitesse de deux faisceaux dans deux directions. Selon la loi de composition des vitesses, dans le référentiel éther, les vitesses de la lumière et de la Terre doivent s'additionner ou se soustraire. Cette différence est trop petite pour être mise en évidence par le calcul des durées, elle l'est par l'observation des franges d'interférence.

## **2. La « révolution » : la relativité restreinte et la relativité générale d'Albert Einstein (1905 et 1915)**

- Des lois théoriques pour résoudre des problèmes rencontrés par les physiciens et astrophysiciens.

L'un de ces problèmes est celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley, la vitesse de la lumière dans l'éther ne varie pas quel que soit la direction du mouvement de la Terre. Le second concerne l'orbite de Mercure dont les lois de Newton ne permettent pas de calculer le décalage du périhélie, le point de l'orbite le plus proche du Soleil au cours des siècles.

- La relativité restreinte (1905) dans un référentiel galiléen.

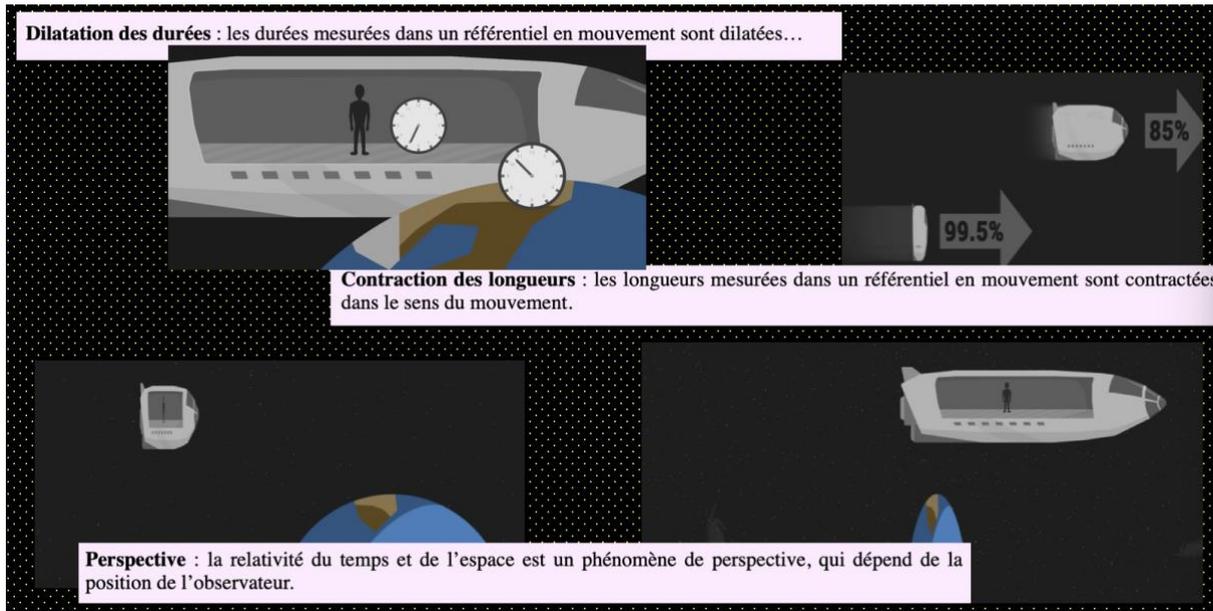
(6) En 1905, Albert Einstein propose que **la vitesse de la lumière dans le vide soit une constante absolue** quelle que soit la personne qui la mesure. En partant de cette idée, il s'intéresse à ce que deviendrait la relativité galiléenne pour des corps en mouvement rectiligne et uniforme proche de la vitesse de la lumière.

(7-8) Dans **la relativité galiléenne**, les **lois de la physique sont les mêmes dans n'importe quel référentiel** à partir du moment où il est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme. Les distances, les durées et la similarité des événements sont des invariants (le temps présente un caractère absolu), **seule la vitesse est relative, liée au référentiel d'observation**. Des formules permettent aisément de changer de référentiel pour effectuer les calculs. Les changements de coordonnées entre les référentiels se calculent avec **la transformation de Galilée**. Lorsqu'il y a des forces, c'est la loi de Newton,  $F=Ma$  qui s'applique, laquelle permet de calculer l'accélération. La gravité est une force instantanée s'appliquant sur les corps en fonction de leur masse et de leur distance.

(9) Einstein part du principe que **la vitesse de la lumière est un absolu**. La 1ere conséquence c'est que la gravité comme force instantanée n'existe pas. La seconde est **que la composition des vitesses n'est plus possible** (ce que semble avoir montré l'expérience de Michelson et Morlay), c'est-à-dire que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels. Dans les années 1860, les équations de Maxwell au sujet de l'électromagnétisme supposait déjà que la vitesse de propagation des ondes est un absolu dans le vide.

Dans la relativité restreinte d'Einstein, **les distances, durées et donc simultanéité des événements sont relatifs**. Une relativité qui augmente au fur et à mesure que l'on s'approche de la vitesse de la lumière. (10) Einstein utilise la **transformation de Lorentz** (Hendrik Lorentz, 1853-1938) qui permet le changement de coordonnées entre les différents référentiels.

Lorsque les vitesses sont faibles, le **facteur de Lorentz  $\gamma$**  (gamma) tend vers 1 et la transformation donne des résultats comparables à celle de Galilée (lorsque  $v = c$  ; le facteur de Lorentz donne  $1/0$ , ce qui montre que la vitesse de la lumière n'est pas atteignable et dépassable). Si les distances (longueurs, L) et durées (T) sont relatives, leurs valeurs dans le cadre de la relativité restreinte sont  $L/\gamma$  et  $T\gamma$ . Les conséquences immédiates pour les astrophysiciens qui effectuent des mesures en sont que le **temps et les longueurs sont relatifs et dépendent du référentiel (11)**.



Diapo : la relativité du temps et de l'espace comme phénomène de perspective qui dépend du référentiel.

Il en est de même pour les durées et la simultanéité des événements. Cela permet de comprendre le « paradoxe des jumeaux ».

Comme la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels, il n'est plus nécessaire d'imaginer un éther comme référentiel absolu.

- L'Union de l'espace et du temps (Paul Halpern) **(12)**



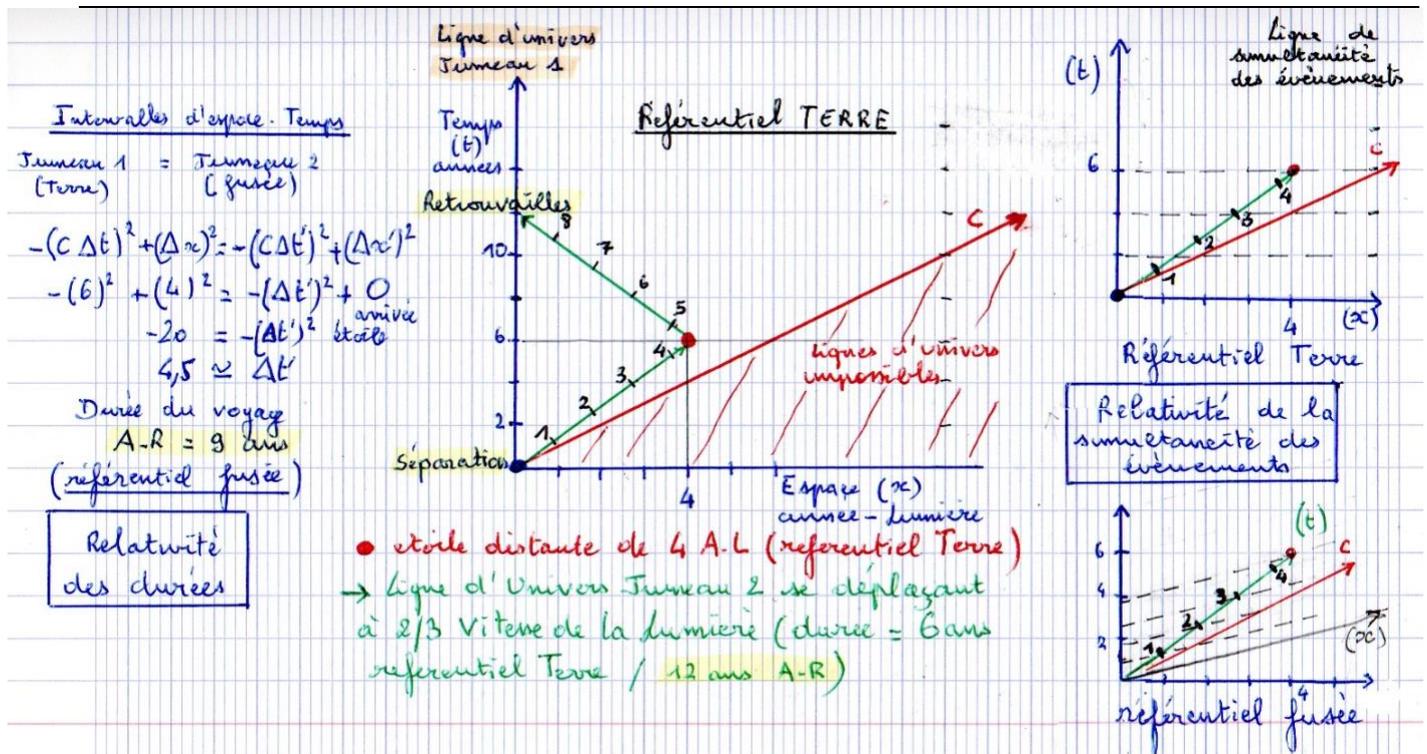
**Hermann Minkowski (1864-1909)**, un professeur allemand qui avait été un enseignant d'Einstein à Zurich, décide de reformuler mathématiquement la théorie de la relativité restreinte de façon plus rigoureuse. Ce mathématicien qui avait traité son élève de « chien

paresseux » en est devenu un fervent défenseur. Il conçoit une 4<sup>e</sup> dimension, celle du temps (multiplié par la vitesse c pour que l'unité soit adéquate) qui est associée à celles de l'espace pour former « **l'espace-temps** ». Une quatrième coordonnée, le temps (t), est ajoutée aux coordonnées spatiales (x, y, z) pour former des quadrivecteurs et construire une géométrie capable de **calculer des intervalles d'espace-temps**, c'est-à-dire des longueurs entre deux **événements** (= points) dans un espace à 4 dimensions. L'intervalle d'espace-temps est la pseudo-métrique, il est égal à :

$$\Delta s^2 = -c^2(\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$

L'espace-temps de Minkowski va **devenir une entité à part entière où l'espace et le temps s'influencent réciproquement, doté de ses propriétés capables d'influencer la trajectoire de la lumière et d'expliquer la gravité**. Dans l'espace-temps aucun corps n'est immobile, s'il l'est dans l'espace, il ne l'est pas dans le temps. Chacun a donc une trajectoire de déplacement dans le temps et/ou l'espace : c'est la **ligne d'Univers**.

Einstein dut apprendre ces mathématiques complexes, ce qui lui permit de développer la relativité générale.



**(33-34) Transition : d'après ScienceEtonnante**

Le « **paradoxe des jumeaux** » met bien évidence la relativité des durées et de la simultanéité des événements. La durée du voyage d'un jumeau qui irait vers une étoile

située à 4 AL avec une vitesse = à  $2/3$  de C (calcul de l'intervalle d'espace-temps fait à partir de la formule ci-dessus) serait d'environ 4.5 ans, mais de 6 ans selon le référentiel de l'autre jumeau resté sur Terre ! Il y a donc **non simultanété des durées**. Le philosophe Henri Bergson, dans les années 1920, faisait remarquer que du point de vue du jumeau dans la fusée c'est la Terre qui se déplace et que la durée écoulée sur Terre devrait être plus faible. C'est le cas, il s'est écoulé un peu plus de 3 ans ! Chacun des deux frères, dans son référentiel, a l'impression que l'autre est plus jeune. Aucun des deux frères ne peut fêter son anniversaire en même temps, il y a **non simultanété des évènements**. Lorsque les deux frères se retrouvent il s'est écoulé 12 ans pour le premier et environ 9 ans pour le second qui a fait le voyage. **Le paradoxe des jumeaux n'a de sens que si les deux frères se retrouvent**. C'est le demi-tour qui explique la différence car il impose un changement de référentiel et un changement des lignes de simultanété des évènements pour le voyageur. Pour le jumeau dans la fusée, son frère a pris plusieurs années (6 ans environ) lors du demi-tour ! A l'arrivée sur Terre, du point de vue du jumeau dans la fusée, son frère doit avoir  $3 + 6 + 3 = 12$  ans de plus qu'au départ !

Le paradoxe des jumeaux a été prouvé par l'expérience, qu'au début des années 1970. Elle a consisté à mesurer des écarts de durées avec des horloges atomiques, dont l'une est embarquée dans un avion qui fait le tour de la Terre.

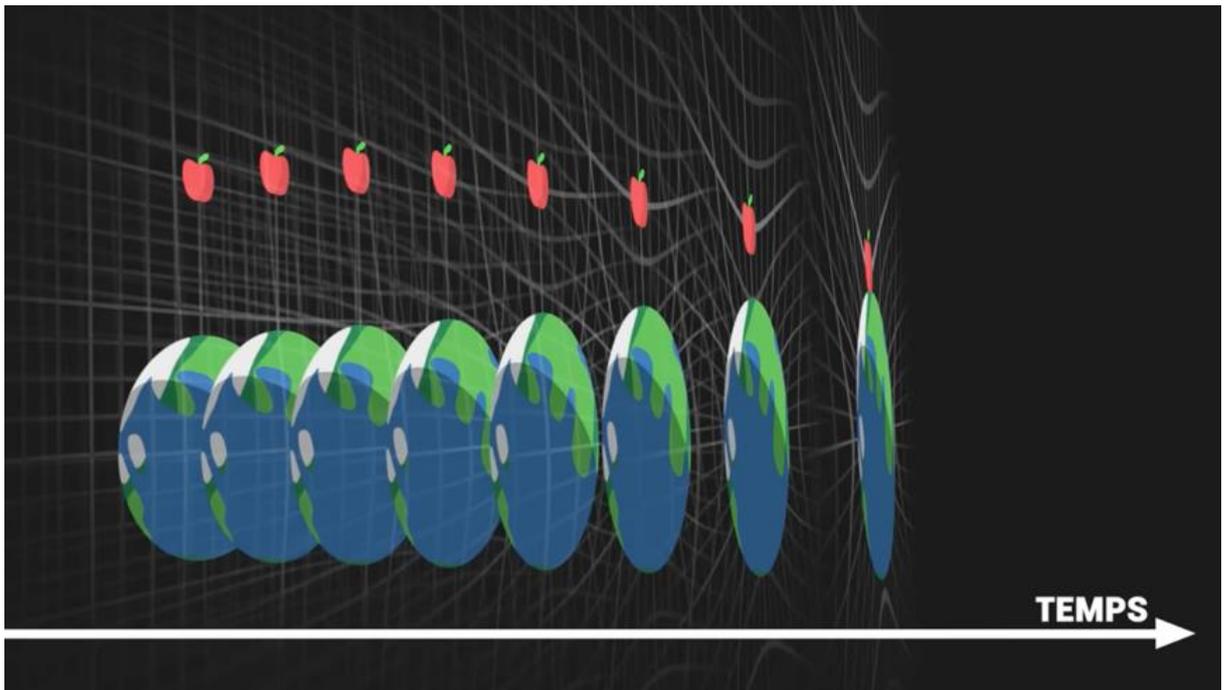
---

- La relativité générale (1915)

(13) C'est en **1907**, deux ans après la publication de la relativité restreinte, qu'Einstein a « la pensée la plus heureuse de (sa) vie ». Il a **l'intuition qu'une personne en chute libre ne sentira pas son poids comme une personne immobile dans un vaisseau spatial** et qu'aucune expérience de physique ne permettra de les distinguer. Autrement dit, une expérience faite dans un laboratoire en chute libre donne les mêmes résultats que les mêmes expériences faites dans un vaisseau spatial se déplaçant à une vitesse uniforme. C'est le **principe d'équivalence**.

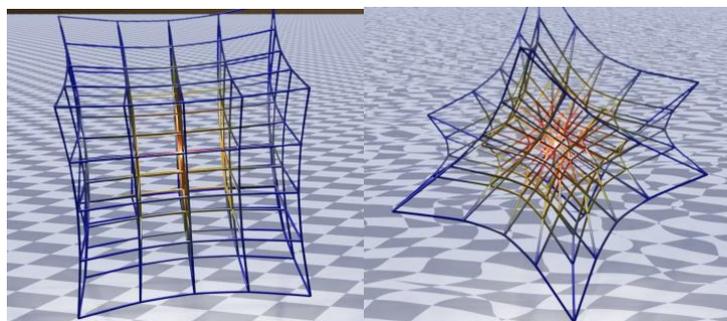
(14) **Einstein propose d'établir une théorie complète de la gravitation à partir des référentiels en chute libre**. Il présente sa théorie au **congrès de physique de Vienne en septembre 1913**. Il prétend pouvoir, comme Maxwell l'a fait pour le magnétisme et

l'électricité, unifier les différentes forces en y ajoutant la gravité. La nouvelle théorie est fondée sur quelques principes fondamentaux :



(15) Le premier est que **le mouvement naturel des corps soumis à la gravitation est la « chute libre »** (mouvement rectiligne accéléré). Einstein a l'intuition que les lois de la physique sont les mêmes dans un référentiel en chute libre que dans un référentiel galiléen.

Aussi, tous les corps avec le même état initial et soumis à un champ gravitationnel suivent la même trajectoire dans le temps : **une ligne droite**. Un objet n'est pas attiré par un corps massif, il est en dans son mouvement naturel, celui d'un mouvement rectiligne le long du temps. Pour un observateur extérieur, s'il semble attiré par ce corps, c'est que la ligne d'univers qu'il empreinte suit la courbure de l'espace-temps vers le sol. En touchant le sol, il est soumis à une réaction.



(15) Le second est que **l'espace est courbé à toutes les échelles**. A l'échelle locale, il l'est par les corps massifs. Dans cet espace les ligne droites et courbées que suivent les objets sont des **géodésiques**.

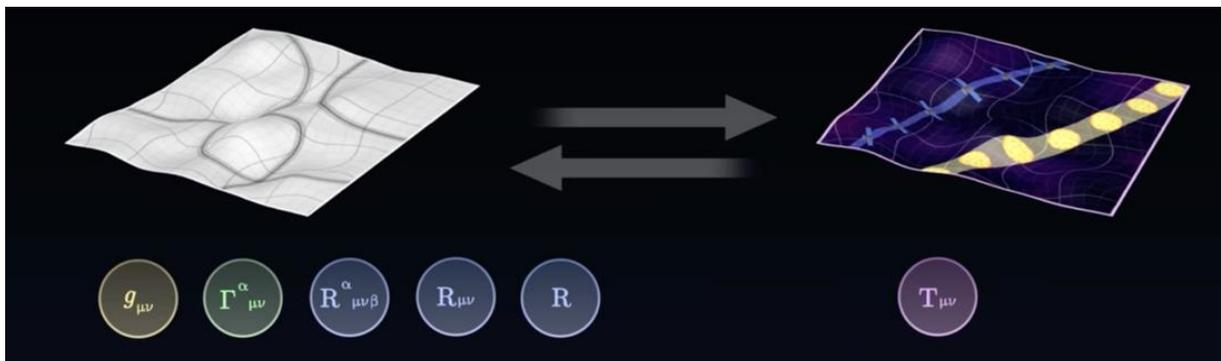
Un observateur situé à l'extérieur et qui utilise une grille de coordonnées reprenant la courbure voit que tout y est modifié : les distances, les directions, les surfaces et volumes. Ces deux derniers tendraient à diminuer vers le corps massif car l'espace-temps se contracte.

(16) Le 3<sup>ème</sup> est que **la gravitation ne serait en fait que la conséquence de cette courbure et du rapprochement des géodésiques**. Car, dans un espace courbé les lignes droites parallèles que suivent les objets se rapprochent. **Les corps massifs courbent l'espace et le temps**. Comme la vitesse, la **gravité influence la durée et la simultanéité des évènements**.

Notons qu'une modification de la courbure de l'espace-temps par un évènement n'est pas instantanée, elle se propage à la vitesse de la lumière (Si le Soleil disparaissait subitement, la Terre suivrait sa trajectoire pendant 8 mn). **Surtout Einstein prévoit que la lumière des étoiles doit être déviée par le Soleil, l'observation de la position des étoiles proches de l'astre lors d'une éclipse devrait le confirmer**.

On peut terminer en disant que la relativité générale rend la force de gravité instantanée de Newton imaginaire.

Pour Einstein ce sont l'énergie et de la masse qui courbent l'univers. L'équation qui exprime cette courbure s'appelle **l'équation d'Einstein (17)**.

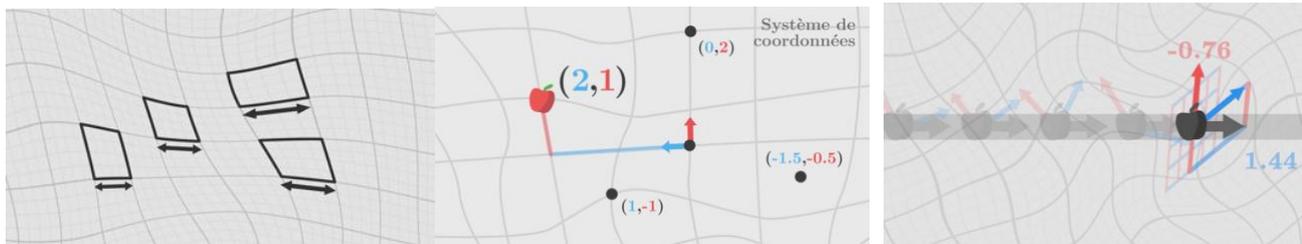


- Quelles sont les mathématiques de la relativité générale ?



Après des invitations à enseigner à Berlin et Prague, Einstein revient à Zurich en 1912, où il retrouve son ami **Marcel Grossmann** avec qui il avait été étudiant et qui lui avait permis d'obtenir son travail à l'office des brevets. Surtout, Grossmann est un excellent professeur de

mathématiques et va aider Einstein à exprimer mathématiquement sa théorie. Il avouera par la suite : « j'éprouve un grand respect pour les mathématiques dont j'avais considéré avant, par naïveté, la partie la plus subtile comme un pur luxe ». Comme Einstein expose régulièrement l'avancée de ses recherches il se retrouve en concurrence avec d'autres mathématiciens avides de trouver l'équation qui va décrire l'espace-temps non euclidien modelé par la matière et l'énergie (par exemple le mathématicien David Hilbert).



(18) Au début du XXe s., la géométrie des espaces courbes est récente. Dans un espace courbe et déformé, donc un **repère non orthonormé**, le système des coordonnées va montrer des distances, des surfaces de la grille ou des directions qui changent constamment au gré de la **variation des vecteurs de base**. De plus, si le **temps propre d'un objet en mouvement (T tau)** ne change pas, la dimension du temps sur la grille montrera une dilatation du temps correspondant à la courbure.

(19) Il faut pouvoir exprimer numériquement tous ces changements de surface, de direction et de distance afin de les utiliser dans des formules ou des équations. Les mathématiciens ont inventé **la métrique**, qui définit des **coefficients** qu'il faut appliquer aux formules couramment utilisées en géométrie, par exemple le théorème de Pythagore pour calculer les longueurs et les angles entre des points. La métrique est importante car elle permet **de donner des distances réelles en fonction des coordonnées** dans l'espace-temps.

(20) Les composantes de la métrique sont utilisées dans **l'équation des géodésiques**, celle-ci prédit la trajectoire des objets dans l'Univers. L'équation utilise les composantes du tenseur métrique pour donner la valeur **des symboles de Christoffel**. Les symboles de Christoffel ( $\Gamma$  gamma) sont un outil qui définit les variations des vecteurs de base et des coordonnées dans toutes les directions sur le trajet du corps. Cet outil utilise un nombre important de composants, le travail de calcul est très long. (21 : Bilan)

Heureusement dans de nombreux cas, les calculs sont simplifiés. Quand l'espace est « vide », c'est-à-dire non courbé, les composantes de la métrique sont les mêmes partout, les variations des vecteurs nulles (les symboles de Christoffel valent 0) et l'équation des

géodésiques montrent que sa vitesse ne varie pas. C'est la **métrique de Minkowski (21)**, celle de la relativité restreinte. L'une des composantes de la métrique de Minkowski est -1, cela nous rappelle que les dimensions de l'espace et de temps sont fondamentalement opposées. Ainsi **la trajectoire d'un objet dans l'espace-temps se répartit entre l'espace et le temps. Plus un objet a une vitesse spatiale élevée par rapport à nous plus son temps propre ralentit par rapport à notre temps.** Lorsque sa distance parcourue dans l'espace est maximale pour nous, son temps propre est proche de 0, c'est la vitesse c pour nous ! Ainsi la durée du trajet d'un photon se déplaçant à la vitesse de la lumière vers la terre depuis une galaxie lointaine serait nulle !

Pour Einstein, il existe **une relation entre la courbure de l'univers et la quantité de masse et d'énergie. L'équation d'Einstein exprime cette relation (23).**

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(24) L'équation d'Einstein utilise les outils de la physique qui permettent de décrire des déformations ou des distances réelles champs : les tenseurs.

Le tenseur de Ricci va mesurer les variations de surface/volume entre deux géodésiques lorsqu'on se déplace ; le tenseur de Riemann va mesurer la courbure de l'espace-temps, la courbure scalaire est la moyenne des courbures dans tous les sens.

Le tenseur énergie-impulsion caractérise les perturbations de l'espace-temps par des flux, c'est-à-dire des quantités de matière, d'énergie ayant leur mouvement propre.

L'équation d'Einstein appelle quelques remarques : **(25)**

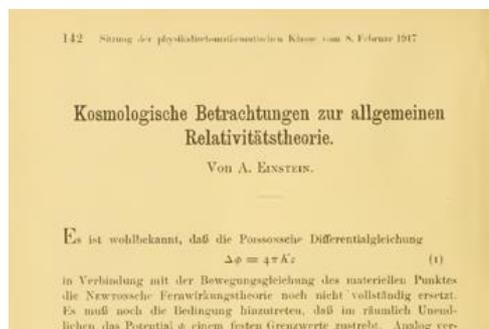
- La perception de l'Univers est au début du XXe s. très éloignée de ce que permettent d'imaginer les équations. Estimer le contenu de l'Univers en matière et énergie est impossible, estimer son rayon et sa courbure l'est tout autant !
- On parlait de « **géométrie cosmologique** » ou d « **industrie mathématique de la cosmologie** » pour qualifier cette science essentiellement théorique.

- Aucune observation ne vient dans l'immédiat confirmer ce que prédit l'équation.

Elle est présentée juste avant la 1ere Guerre mondiale, il faudra quelques années pour que la presse et les institutions scientifiques s'intéressent à la nouvelle théorie. En août 1914, une éclipse de soleil doit se produire et l'Allemand **Erwin Finlay-Freundlich**, fervent admirateur d'Einstein, organisa avec enthousiasme une expédition en Crimée afin de prouver que la trajectoire de la lumière est courbée par la masse du Soleil. Mais avant qu'il ait pu prendre des mesures, l'armée russe le captura et le fit prisonnier de guerre. C'est une équipe d'observateurs autour de l'Anglais **Arthur Eddington** qui retente l'expérience pour l'éclipse de mai 1919 avec deux voyages au Brésil et dans l'île de Principe. L'astrophysicien britannique confirme la déviation angulaire des étoiles des Hyades et révèle qu'un Allemand venait de supplanter Newton ! A la fin de l'année 1919, des journaux à travers le monde relaient la nouvelle théorie et la preuve que l'éclipse en apporte.

### 3. « La réinvention de l'Univers (1917-1932) »

Titre emprunté à l'ouvrage de Gauvain Leconte-Chevillard.



- Le moment (26) : **1917** est l'année où Einstein publie l'article « *Considérations cosmologiques sur la relativité générale* ». De nombreux historiens et philosophes des sciences considèrent que cette année est celle de la (re)naissance de la cosmologie. L'article s'intéresse à la structure physique de l'Univers, les propriétés mathématiques ayant été données par la relativité générale, Einstein propose un modèle d'univers.

Einstein aurait dit à des journalistes qui voulait savoir en quelques mots quel est le contenu de la relativité : « *voulez-vous savoir quelle est la différence fondamentale entre la physique classique et la relativité ? En physique classique, si vous videz le monde de tout objet ayant une consistance physique, il reste l'espace et le temps. En relativité, si vous videz l'Univers, il ne reste rien* ». Sa boutade qui ne prétend pas à la rigueur scientifique nous

permet de comprendre quelles sont les conséquences admises à cette époque et qu'il entend respecter.

La 1<sup>ère</sup> est que **toutes les lois physiques et les notions mêmes d'espace et de temps sont conditionnées par la matière et l'énergie présentes dans l'Univers** (c'est le **principe d'Ernst Mach**). A première vue, l'équation d'Einstein le montre.

La seconde conséquence découle de la première. Si le champ gravitationnel est partout dans l'Univers (la Voie lactée) équivalent à celui du système-solaire, l'Univers devrait se dépeupler, les corps devraient s'échapper de notre galaxie. La question du **dépeuplement** intrigue les observateurs et les physiciens au début du XXe s. La réponse apportée par Einstein est que **l'Univers est forcément au repos et clos**, ce qui permet de résoudre le problème du dépeuplement.

Ainsi pour Einstein l'Univers est **clos et sphérique**, sa courbure est constante et est déterminée par son contenu en matière et énergie. L'Univers est éternel. L'Univers est **homogène**, la matière est uniformément répartie à grande échelle. L'univers est **stable, statique** car on peut considérer que la matière dans **l'Univers est au repos car la vitesse propre des objets est faible par rapport à c**.

#### - L'ajout de la Constante cosmologique $\Lambda$ (Lambda) (27)

Par contre, Einstein se rend compte que son équation aboutit à un univers dynamique. Il ajoute donc à son équation **un terme  $\Lambda$ , qui fut par la suite nommé « constante cosmologique »**, dont la valeur permet à son univers de rester statique.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

Kappa ( $\kappa$ ) est la Constante gravitationnelle d'Einstein ; Mu Nu sont les repères sur la grille d'espace-temps.

Quelle est la valeur de  $\Lambda$  ? Pour y répondre, Einstein établit trois relations de son modèle d'univers :

1.  $\lambda = \kappa\rho/2$  (où  $\rho$  est la densité de l'Univers et  $\kappa$  la constante gravitationnelle d'Einstein) ;
2.  $\lambda = 1/R^2$  ;
3.  $M = \sqrt{32\pi^2/\kappa^3\rho}$  (où  $M$  est la masse de l'Univers).

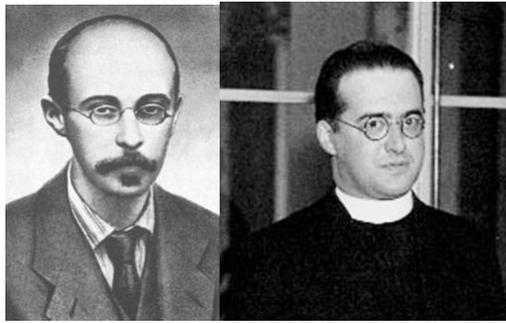
Le problème est que  $\Lambda$  ne peut être déterminée qu'à partir du modèle d'univers qui est retenu (dynamique ou statique), mais surtout de données issues de l'observation et de la mesure (densité, masse et rayon). Or l'univers observé et connu à la fin des années 10 ne permet pas de savoir si cet univers est une solution des équations de la relativité générale.

- Un autre modèle d'univers clos et statique à partir des équations de la relativité générale, celui de **Willem de Sitter (28)**

Le modèle d'univers proposé par Einstein n'est pas le seul, il en existe d'autres, comme celui de **l'astronome néerlandais Willem De Sitter**. La concurrence et les échanges entre les deux hommes dure jusqu'en **1932**, année durant laquelle les deux hommes se rallient au même modèle, celui d'un univers dynamique. Les deux hommes débattent, échangent dès le 1<sup>er</sup> conflit mondial (parfois sur des cartes postales !), le néerlandais publie en anglais, il contribue à diffuser les idées d'Einstein dans une Europe en guerre. Quel est le modèle de De Sitter qui répond aux équations d'Einstein ? Son univers s'oppose au principe de Mach car il conçoit **un univers à l'espace-temps courbé sans lien avec la masse et énergie qu'il peut contenir** (tenseur énergie-impulsion = 0). Il serait doté d'un **champ gravitationnel sans masse**. Son univers conçoit les singularités, des points de l'espace-temps où le champ gravitationnel est infini. Son univers est clos et statique mais les objets peuvent y être dotés d'un mouvement de récession par rapport à l'observateur.

L'équation d'Einstein a donc pu générer un modèle d'univers « extravagant aux yeux des scientifiques de l'époque ». Pourtant ce modèle connaît un certain succès dans les années 1920 car il permet d'intégrer des observations : le décalage vers le rouge du spectre des galaxies. En 1917, De Sitter utilise dans un article 3 spectres de nébuleuses (galaxies) pour appuyer son argumentation, 2 sont décalés vers le rouge, un vers le Bleu (celui de M31). Quelques années plus tard, **Vesto Slipher** publie le spectre de 45 nébuleuses, 41 ont un décalage vers le rouge ! La capacité du modèle de De Sitter à associer distance des objets et vitesse de déplacement lui a assuré une popularité parmi les astronomes américains qui étudient les nébuleuses spiralées comme Vesto Slipher et **Edwin Hubble**.

- Les modèles concurrents d'univers dynamiques : Alexandre Friedmann et Georges Lemaître **(29)**.



En 1922, le physicien **Alexandre Friedmann** publie d'autres solutions aux équations d'Albert Einstein. Pour le soviétique, l'univers est en mouvement (expansion ou rétraction), son rayon évolue avec le temps. Ses équations permettent de déterminer le taux d'expansion de l'Univers, ce que l'on appelle **le facteur d'échelle de l'expansion**. Mais il ne s'intéressa pas aux conséquences astronomiques de son analyse, d'ailleurs ces conséquences ne sont pas testables avec les moyens d'observation de l'époque.

Einstein considère qu'il s'agit d'une solution à laquelle « il est à peine possible d'attribuer une signification physique » et publie un article dans lequel il considère -à tort- que Friedmann s'est trompé. Le mal est fait, le soviétique meurt en 1925 avant d'avoir obtenu la reconnaissance qui lui est due.

(29) En 1927, le mathématicien et théologien belge **Georges Lemaître** publie un article qui établit la relation entre la distance des galaxies et leur décalage vers le rouge dans un univers homogène et de masse constante. Il reprend l'idée de De Sitter que le champ gravitationnel de l'univers est doté d'une propriété propre qui explique la récession. Mais comme son modèle le prévoit sans tenir compte de la quantité de matière, Lemaître s'en éloigne. L'observation de nombreuses galaxies dans l'Univers au milieu des années 20 confirme qu'il pourrait être possible d'évaluer la masse et la densité de l'Univers et donc d'expliquer la récession avec les équations d'Einstein. Des observations, Lemaître en tire une conséquence : **c'est l'expansion de l'Univers qui provoque le décalage vers le rouge des galaxies et celui-ci est proportionnel à leur distance**. Lemaître ne se contente pas de prédire l'expansion, il calcule **la valeur du taux d'expansion en 1927**, 2 années avant Hubble.

*« Lemaître n'était ni le 1<sup>er</sup> à prédire le décalage vers le rouge des galaxies, ni le premier à prédire la proportionnalité de ce décalage, ni le premier à l'avoir mesuré. Il n'est pas le 1<sup>er</sup> non plus à avoir trouvé des solutions dynamiques aux équations d'Einstein. Mais il est le premier à avoir vu le rapport entre tous ces éléments » (Gauvain Leconte-Chevillard).*

(30) Il faut noter que durant les premières décennies du XXe s. ce constat vaut pour tous les observateurs et théoriciens. Dans ce cas, si l'histoire n'a retenu qu'un nom (Hubble), c'est que le contexte géopolitique, la langue et la renommée de la personne n'ont pas permis de bien percevoir, les influences et l'antériorité de certaines découvertes. Ainsi il faut attendre 2018, pour que l'Union astronomique internationale ajoute Lemaître à la loi de Hubble).

- La situation au début des années 30 (31)

**1932, Einstein et de Sitter se rallient au modèle d'univers en expansion de Friedman-Lemaître en faisant le choix d'une courbure et d'une Constante cosmologique = à 0.**

L'Univers d'Einstein-De Sitter est un univers en expansion qui fait l'économie de la constante cosmologique (« la plus grande bêtise de sa vie » aurait dit Einstein) et d'un espace courbe (non euclidien). Les deux physiciens calculent la **densité critique** que doit atteindre l'univers afin d'avoir une courbure nulle.

Paradoxalement, **Hubble préfère le modèle de De Sitter** ou adhère à des explications alternatives pour expliquer la récession. Au moment où les observations astronomiques permettent de préférer un modèle, Hubble préfère le modèle idéalisé d'univers de de Sitter qui lui attribue une densité nulle !

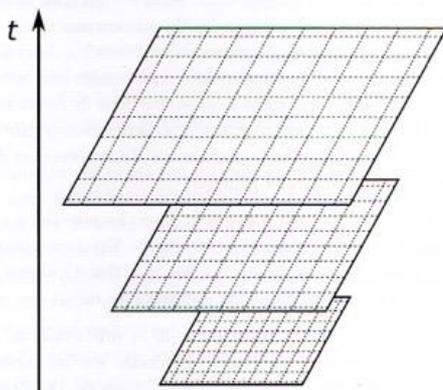


Figure 4. Projection en deux dimensions de l'Univers d'Einstein-De Sitter sur l'axe du temps cosmologique

Ce modèle d'univers est en expansion mais de courbure nulle. Il permet ainsi de définir la *densité critique\** de l'Univers, c'est-à-dire celle qui produit un espace euclidien (si la constante cosmologique vaut elle aussi zéro).

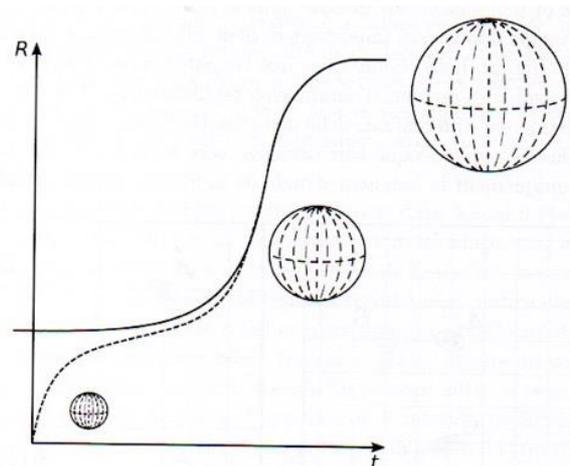


Figure 2. Les modèles d'univers en expansion

(31) En 1931, Lemaître et son professeur de Cambridge **Arthur Eddington** proposent un **modèle d'univers en expansion sphérique éternel et sans origine** qui concilie les points de vue d'Einstein et de Sitter. C'est à ce modèle que les deux scientifiques se rallient. Mais dans les années suivantes le savant belge propose un **autre modèle d'univers en expansion avec un instant  $t=0$  où  $R=0$** , c'est l'hypothèse de **l'atome primitif**. Ces deux modèles sont

différents et montrent que **la notion d'univers en expansion n'implique pas celle d'univers ayant une origine dans le temps.**

(32) Bilan :

D'abord une évidence générale : il est difficile d'étudier l'Univers, un système physique immense dont nous faisons partie et que nous ne pouvons pas voir car les observations lointaines montrent l'univers dans passé. D'autant plus que dans la période étudiée, les moyens d'observation et de calcul ne permettent pas de soutenir les modèles qui sont élaborés.

On peut ainsi s'interroger sur les raisons qui ont fait préférer un modèle à un autre !!! **La « simplicité » des équations du modèle de Lemaître prétendent Einstein et De Sitter !** On retrouve au début des années 30 les mêmes raisons qui ont conduit à la fin du XVIe s. les astronomes à préférer le modèle de Copernic à celui de Ptolémée... jusqu'à ce que les calculs montrent que le premier modèle est également plus précis pour décrire les orbites des planètes. Or, dans les années 30, rien ne peut confirmer par le calcul ou l'observation que l'un est plus précis ou « réaliste » que l'autre !

Aussi, durant toute la décennie, il y a une **multiplication des modèles de l'Univers**, de nombreux physiciens semblent s'éloigner de la vision orthodoxe de l'Univers ; aussi d'autres y voient une « **cosmolâtrie** » pseudo-scientifique (Herbert Dingle). Pourquoi ? Peut-être parce que les cosmologistes sont souvent des philosophes (Ernst Mach par exemple) ou influencés par certains discours épistémologiques s'intéressant à la construction et à la valeur des modèles proposés. Or comme les moyens d'observations et de calculs ne peuvent départager les modèles, l'épistémologie s'en mêle et encourage cette diversité.

A la fin des années 30, **le modèle standard d'univers est celui d'Einstein-De Sitter : un univers à courbure nulle avec une constante cosmologique = 0.** Il est pour plusieurs décennies le modèle d'univers le plus « simple » mais les observations et les calculs ne l'appuient pas. Ainsi, dès le milieu des années 30, des observations montrent à partir de l'étude des vitesses propres des galaxies dans certains amas que les masses les objets doivent

être supérieures à ce qui peut être observé pour expliquer leur mouvement. Il manque de la matière pour atteindre la densité critique du modèle Einstein-De Ritter !

Il faudra attendre les années 1960-70 pour que l'on s'intéresse à cette matière manquante. Le modèle cosmologique portera désormais le nom de **modèle SCDM** (Standart Cold Dark Matter) pour faire allusion à la **matière noire** que doit contenir l'Univers afin d'atteindre la densité critique qui lui permet d'avoir une courbure nulle.

Guédon Jean-Jacques, Ciel d'Aunis  
[guedon-jean.jacques@orange.fr](mailto:guedon-jean.jacques@orange.fr)

Tableau pour la reprise :

| <b>Relativité galiléenne</b><br><i>Relativité des :</i> | <b>Relativité restreinte</b><br><i>Relativité des :</i>                                      | <b>Relativité générale</b><br><i>Relativité des :</i>  |
|---|--|--|
|   | Distances  | Distances  |
| Vitesses : ajoutées, soustraites selon référentiel      | Vitesses : ajoutées, soustraites selon référentiel. Mais :<br><b>une vitesse absolue : c</b> | Vitesses : ajoutées, soustraites selon référentiel. Mais :<br><b>une vitesse absolue : c</b> |
|   | Durées   | Durées   |
|   | Simultanéité des évènements  | Simultanéité des évènements  |
|   | <b>Relativité dépend de la vitesse /c</b>  | <b>Relativité dépend de la vitesse /c et de la courbure de l'espace-temps (gravité)</b>      |