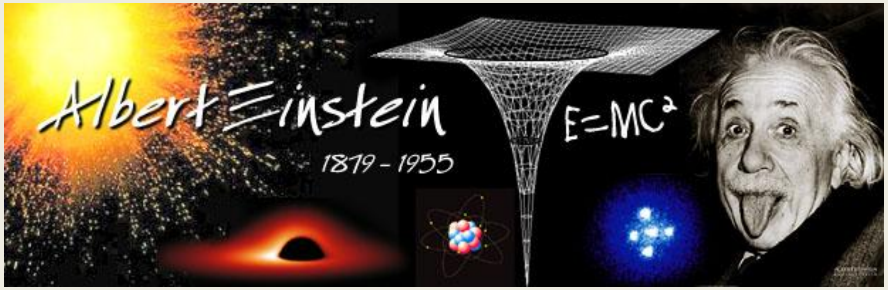
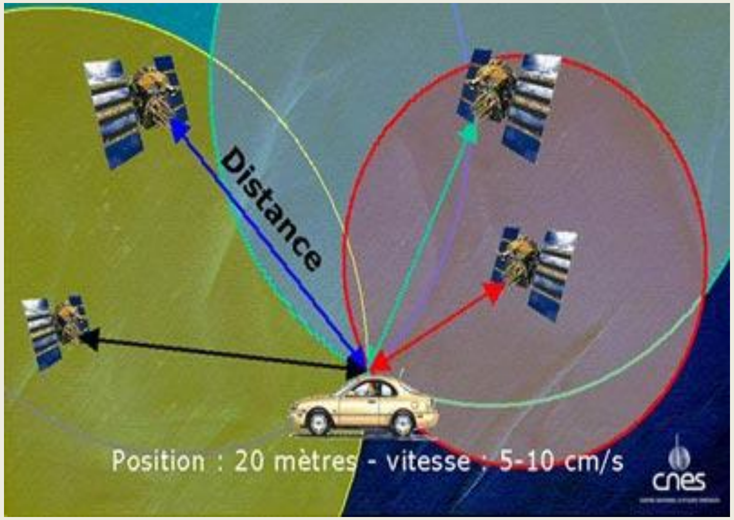
Stage du dispositif PAF
5 Décembre 2013
LGT BELLEVUE

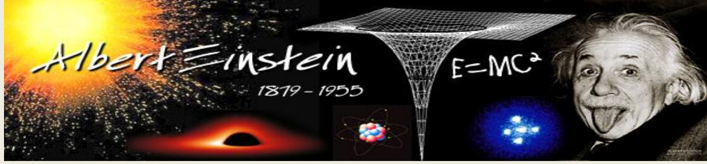


De la relativité restreinte au GPS



Extrait du stage animé par

Mme AUBRY-MALOUNGILA



« You tube : Documentaire – Einstein – Le mystère de l'horloge »

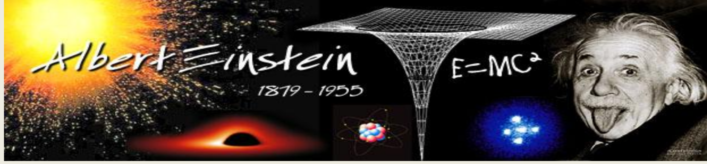
Ce document vidéo présentent les principaux résultats de la relativité restreinte, sur lesquels s'articule le stage :

▸ **La notion d'espace-temps** : l'espace seul et le temps seul n'ont pas un caractère absolu (ne sont pas des constantes de la nature).

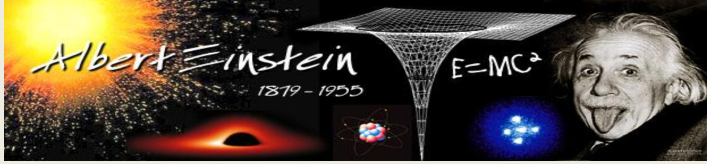
Le résultat d'une mesure faite dans un référentiel au repos n'est pas le même si la mesure est réalisée dans un référentiel en mouvement.

▸ Le phénomène de **contraction des longueurs**.

▸ Le phénomène de **dilatation du temps** et son application dans notre vie quotidienne : le système de positionnement GPS.



I- Rappels de quelques notions de relativité restreinte



Les deux postulats de la relativité restreinte

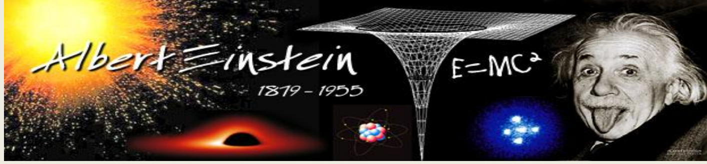
Postulat d'invariance de la vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière c est identique dans tous les référentiels galiléens.

Elle ne dépend pas de la vitesse de la source, ni de celle de l'observateur.

2^e Postulat

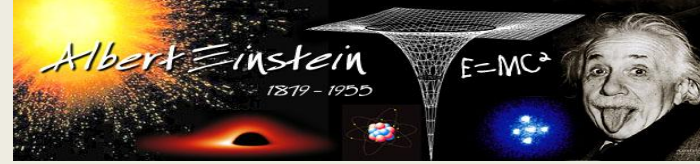
« Les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels galiléens »



Comment la lumière peut-elle se déplacer à la même vitesse quel que soit l'observateur ?

- On considère un évènement de coordonnées (x, y, z, t) donné dans le référentiel galiléen « fixe » R.

- Le même évènement a les coordonnées (x', y', z', t') dans le référentiel galiléen R' en translation uniforme de vitesse $\vec{v}$ par rapport à R suivant l'axe Ox.



On suppose que les origines O et O' des référentiels R et R', coïncident aux instants t = t'= 0.

Transformation de Lorentz

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad x' = \gamma(x - vt)$$

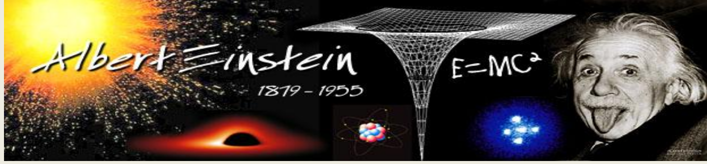
$$y' = y \qquad y' = y$$

ou

$$z' = z \qquad z' = z'$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)$$

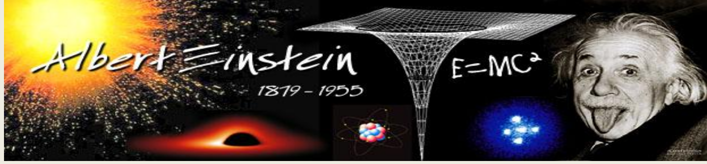
Le coefficient γ est le coefficient sans dimension : $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$



Remarque :

Les formules réciproques donnant les coordonnées dans le référentiel R en fonction des coordonnées dans le référentiel R' sont :

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad ; y = y' \quad ; z = z' \quad ; \; t = \frac{t' + \frac{v^2}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



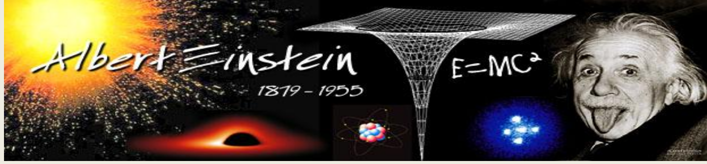
Qu'appelle-t-on évènement ?

<u>Définition</u> : Un événement est un phénomène physique localisé, dans un référentiel donné, à la fois dans le temps et dans l'espace.

Citons quelques exemples d'évènement :

- Thomas est au pied de *l'immeuble (x) à 8h du matin (t)*
- Un signal de détresse est envoyé depuis un bateau *(x, y) à 22h (t).*
- Le passage d'une particule *en un lieu à un instant donné.*

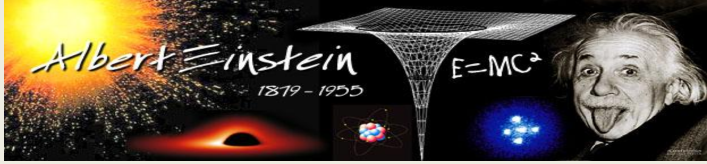
Un événement est caractérisé par ses coordonnées d'espace et de temps, par exemple : **x, y, z, t**



Deux évènements sont-ils toujours simultanés ?

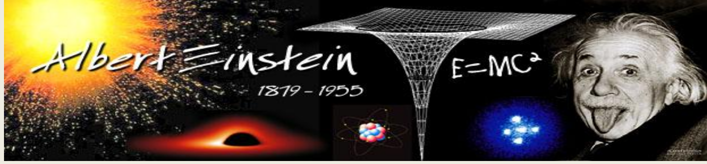
Deux événements simultanés dans un **référentiel galiléen R au repos**, ne le sont pas dans un **référentiel galiléen R' en mouvement** rectiligne uniforme par rapport au référentiel R.

Le **temps** n'est donc pas absolu, il est **relatif.**



Comment faut-il déterminer la simultanéité de deux évènements ?

Pour déterminer la simultanéité de deux évènements, il faut placer sur les lieux des évènements, des ***horloges synchronisées*** qui indiquent toujours la même heure.



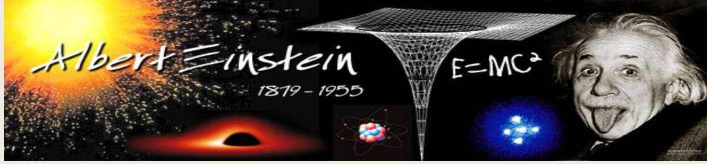
Les notions de Temps propre et de Temps mesuré

♦ **Le temps propre** d'un observateur est le temps qui s'écoule dans un référentiel dit **« référentiel propre R_P»** dans lequel il est immobile.

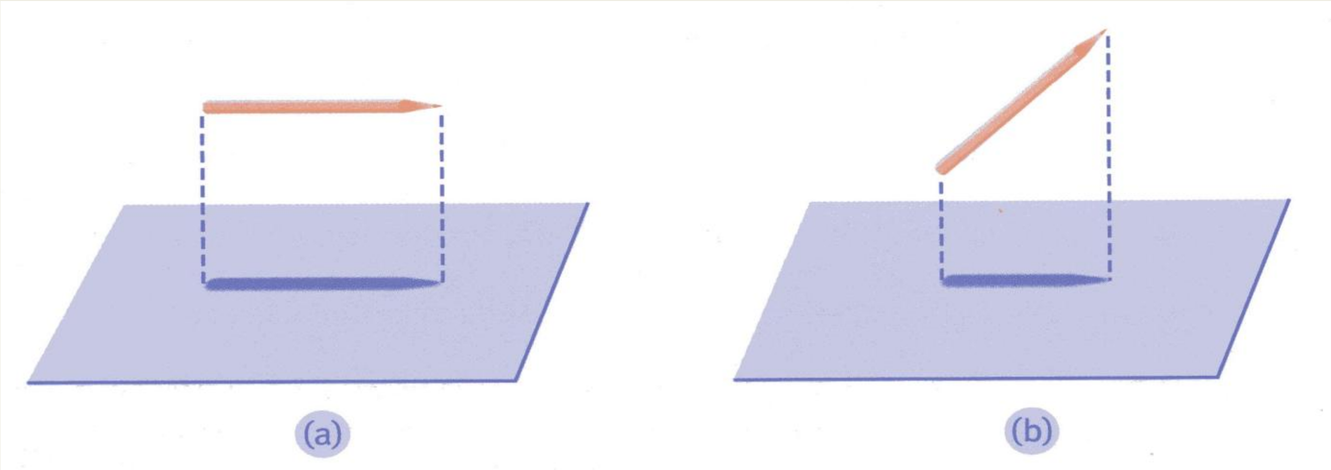
♦ **La durée propre** est l'intervalle de temps entre deux évènements se produisant en un même endroit de l'espace.

Elle est mesurée par une **seule et même horloge fixe** dans le référentiel propre R_P des deux évènements.

♦ L'intervalle de temps mesuré par **deux horloges différentes situées en deux lieux différents** d'un référentiel galiléen R' en mouvement de translation uniforme par rapport à R_P est appelé **durée mesurée.**

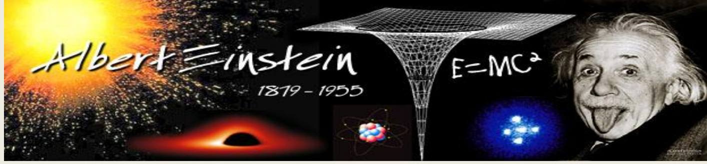


II- Sommes-nous capable de visualiser une quatrième dimension ?



Un crayon est positionné horizontalement à la hauteur des yeux, puis pivoté.

On suppose qu'il n'y a aucune façon de prendre conscience de la rotation et qu'on ne puisse percevoir que l'ombre du crayon.



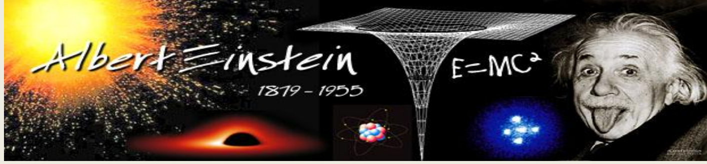
II- Sommes-nous capable de visualiser une quatrième dimension ?

Nous devenons alors des êtres pour qui la réalité est le monde des ombres.

Dans ce monde plat à deux dimensions, le crayon a rapetissé au cours de son mouvement.

Lorsque le crayon pivote, il le fait dans une troisième dimension.

Un être vivant dans ce monde des ombres à deux dimensions n’a aucune façon de voir cette rotation. Pour lui, il n’y a aucune façon de percevoir, ni même d’imaginer, une troisième dimension puisque ses sens et son cerveau ne fonctionne qu’à deux dimensions.



II- Sommes-nous capable de visualiser une quatrième dimension ?

Revenons à notre monde réel à trois dimensions !

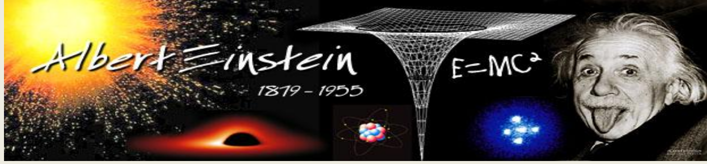
Lorsqu'un objet (ex: une perche) se déplace à grande vitesse, il pivote (à l'instar du crayon) dans la quatrième dimension que nous sommes incapable de voir.

Nos sens et notre cerveau fonctionnent seulement à trois dimensions !!!

Plus la perche va se déplacer rapidement, plus elle pivotera, et plus son « ombre » à trois dimensions (sa projection) dans notre monde sensible va rapetissé.

Puisqu'on ne peut pas percevoir cette rotation dans la quatrième dimension, la perche sera vue de plus en plus courte.

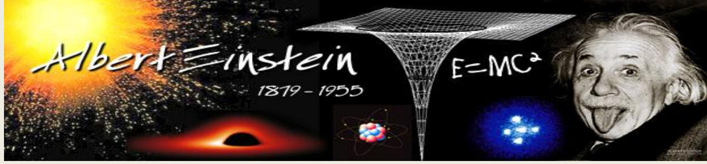
L'ombre d'un objet n'est pas quelque de chose de concret. Que voyons-nous exactement ?



II- Sommes-nous capable de visualiser une quatrième dimension ?

Nous voyons des coupes (ou des sections) au cours du temps d'un « objet quadridimensionnel », impossible à dessiner !

Cet « objet quadridimensionnel », appartient à notre espace-temps à quatre dimensions, que nous sommes incapables de percevoir !

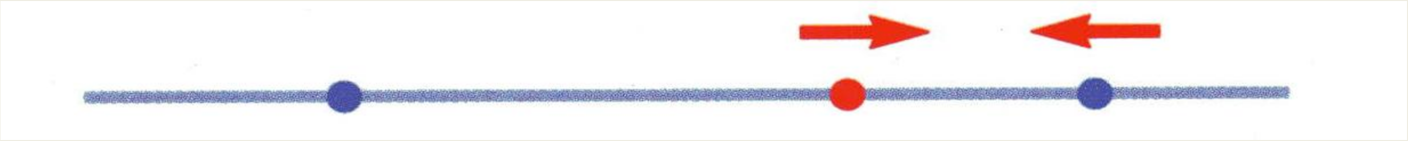


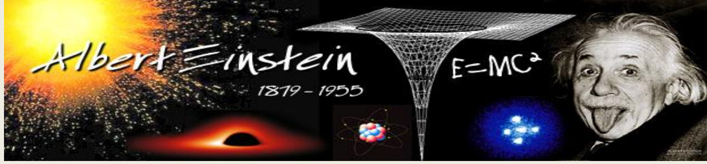
III- L’espace-temps

Puisque nos sens ne peuvent pas percevoir plus de trois dimensions, donnons une explication à ce phénomène en réduisant le nombre de dimensions en jeu.

Nous allons considérer un **monde à une seule dimension**, c’est-à-dire une ligne droite.

Dans ce monde, seuls peuvent exister des points et des tiges, c’est-à-dire des objets unidimensionnels qui ne peuvent bouger que le long de la ligne.





III- L’espace-temps

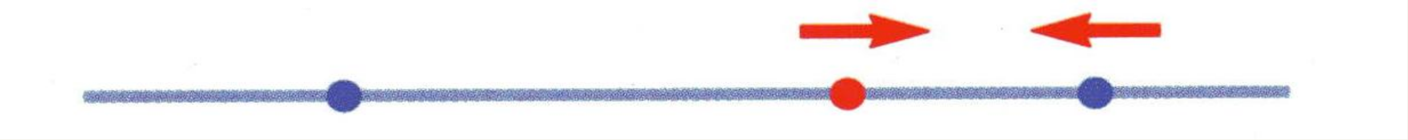
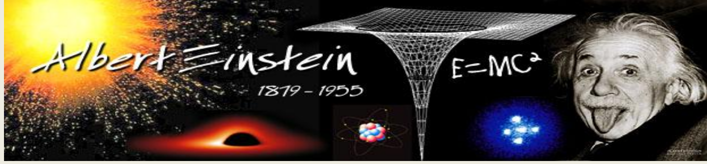


Figure 1

Observons les trois points placés sur la ligne : le point de gauche est immobile, et les deux autres points sont en mouvement et se dirigent l’un vers l’autre pour ensuite se frapper et rebondir.

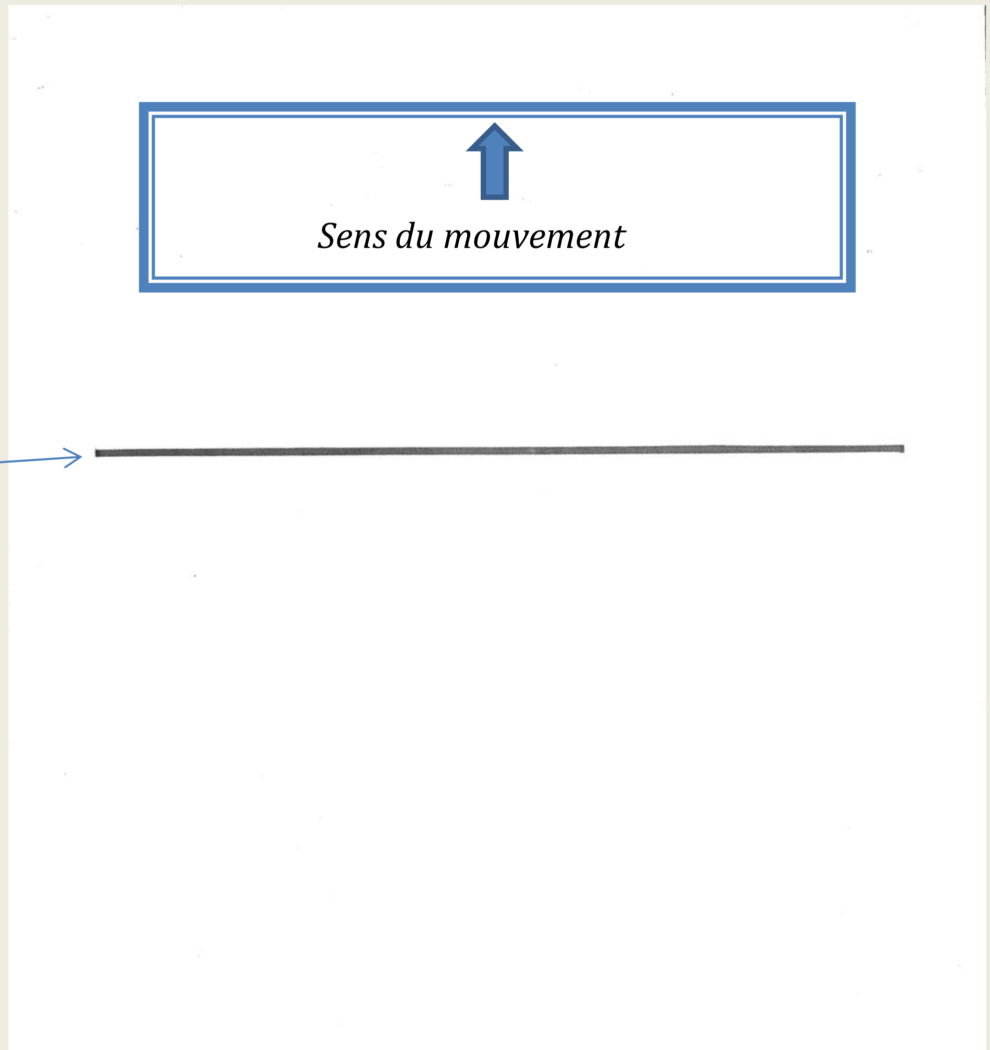
Montrons qu’il existe une autre façon d’interpréter ces phénomènes.

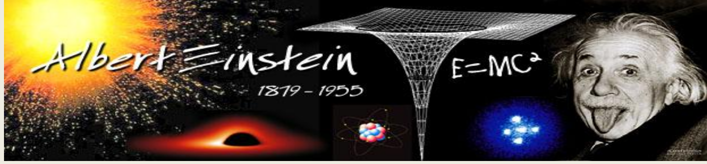
Pour cela, utilisons une feuille à animation comportant une fente très fine.



III- L’espace-temps

Fente fine

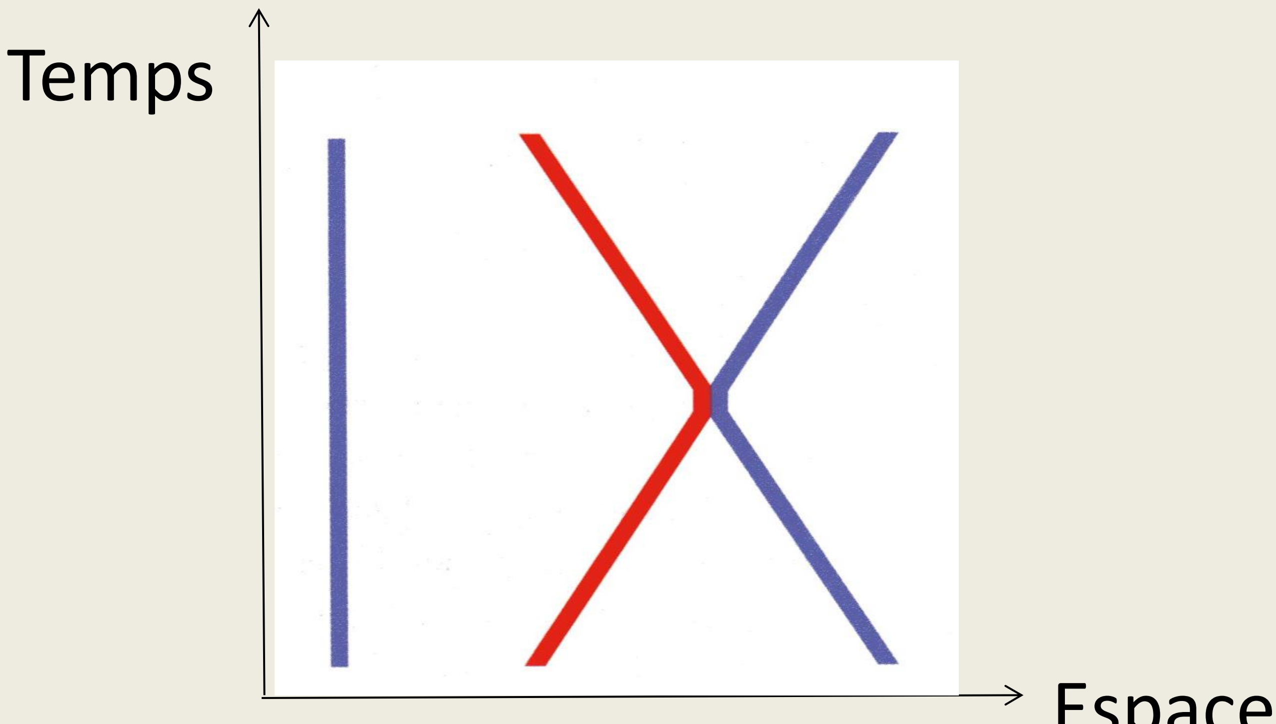


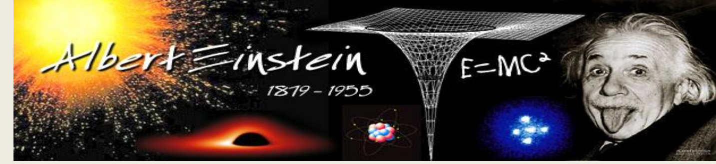


III- L'espace-temps

Placer la feuille à animation sur la **figure suivante** et faites-la glisser du bas vers le haut, tout en maintenant la fente horizontale.

Figure 2



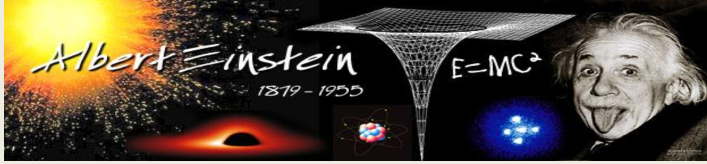


III- L’espace-temps

La fente représente l’espace à une dimension, tandis que son glissement correspond à l’écoulement du temps.

La **figure 2** est l’espace-temps à deux dimensions associé à la **figure 1** : l’axe horizontal représente la dimension spatiale et l’axe vertical la dimension temporelle.

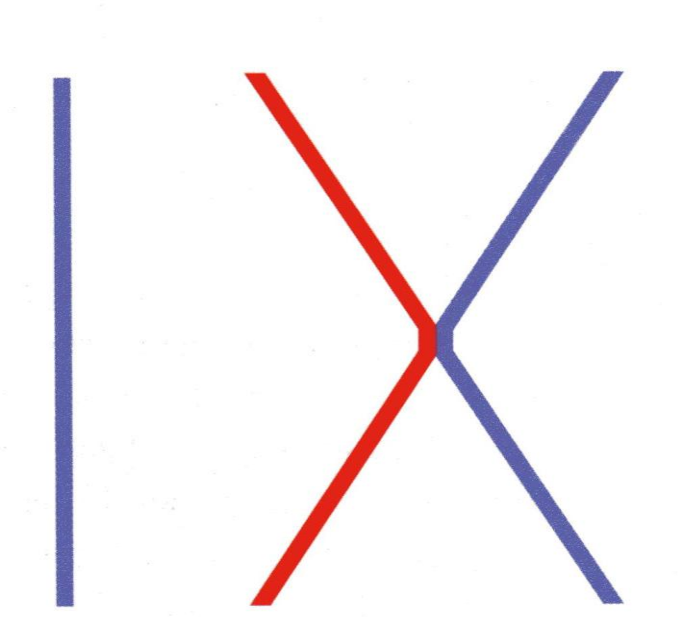
Ce qui apparaît dans la fente à un moment donné correspond à ce qui est perceptible par les sens (monde sensible).

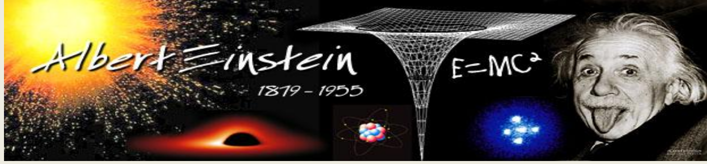


III- L’espace-temps

Selon la vision à une dimension (**figure 1**), la situation semble dynamique : il y a des points en mouvement, des collisions.

Mais selon la vision en terme d’espace-temps à deux dimensions (**figure 2**), il n’y a pas de points en mouvement, il y a seulement des lignes fixes. **On appelle ces lignes des « lignes d’univers ».**



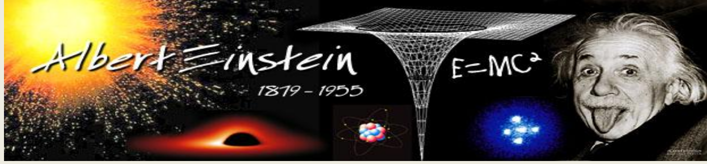


III- L’espace-temps

Propriété des « lignes d’univers

L’inclinaison de la ligne d’univers est reliée à la vitesse du point.

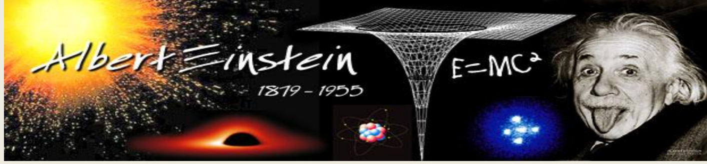
Remarque : Lorsque la ligne d’univers est plus large, on parle plutôt de **« surfaces d’univers ».**



IV- La contraction des longueurs : explication avec l'espace-temps

Nous avons vu que les différentes inclinaisons de la ligne d'univers permettent de reproduire différentes vitesse d'un point. Cependant, au lieu d'incliner la ligne d'univers, on peut tout aussi **incliner la fente pour reproduire le mouvement d'un point.**

Attention : le glissement doit **toujours être perpendiculaire** à la fente. De plus, la fente doit glisser à la même vitesse pour toutes les orientations.



IV- La contraction des longueurs : explication avec l’espace-temps

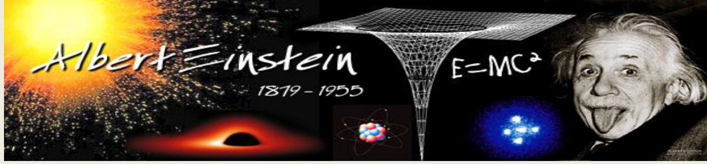
Une perche en mouvement à grande vitesse n’a pas la même longueur qu’une perche au repos.

Pour expliquer cette variation de longueur nous allons utiliser la feuille à animation mais en montrant **les effets inversés** : au lieu de montrer que la perche en mouvement rétrécit, on va montrer qu’elle s’allonge.

En effet, il est beaucoup plus facile d’expliquer les effets inversés que ceux non-inversés.

Le problème est que l’espace-temps réel (celui qui conduit aux effets non-inversés) est beaucoup plus abstrait que celui que nous proposons d’utiliser. Il est impossible à visualiser et à dessiner sans l’aide des mathématiques.

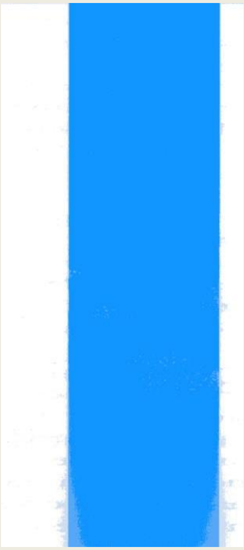
Il faut bien noter que nous cherchons à montrer une variation des longueurs, phénomène indépendant du sens des effets (contraction ou allongement).

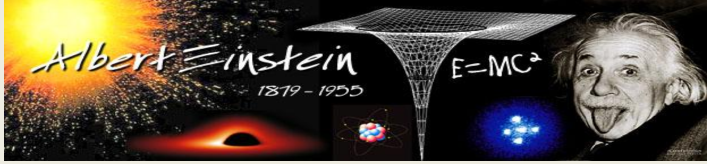


IV- La contraction des longueurs : explication avec l’espace-temps

Une perche en mouvement peut apparaître plus longue que lorsqu’elle est au repos, et plus sa vitesse est élevée, plus elle apparaît longue.

Montrons-le en animant la bande d’univers de la perche avec la feuille à animation.





IV- La contraction des longueurs : explication avec l’espace-temps

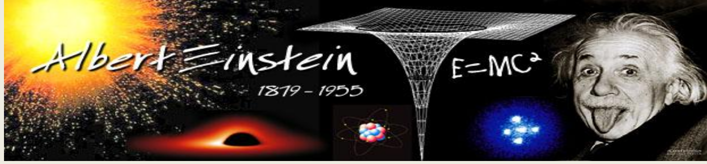
► Faire glisser la fente en position horizontale vers le haut : nous percevons dans l’ouverture une perche immobile.

Rappel : la perche est la partie de la bande qui apparaît dans la fente tandis que la bande complète est sa surface d’univers. Le glissement de la fente représente l’écoulement du temps.

► Incliner la fente et la faire glisser vers le haut : nous percevons dans l’ouverture une perche en mouvement et plus longue !

Plus la fente est inclinée, plus la perche est longue et plus elle se déplace rapidement .

Vitesse et longueur sont liées : aussitôt qu’il y a mouvement d’un objet, il y a nécessairement un changement de sa longueur !



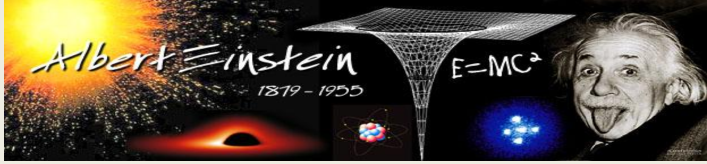
IV- La contraction des longueurs : explication avec l’espace-temps

On comprend maintenant comment la perche peut réellement changer de longueur sans pour autant se déformer physiquement : **la bande d’univers de la perche n’est jamais physiquement compressée ou étirée.**

Ce qui est apparaît dans la fente, et donc ce qui correspond au monde sensible, change réellement de longueur !!!

Nous ne percevons qu’une « coupe » d’une réalité qui possède une dimension de plus !

La contraction des longueurs est un phénomène réel même s’il n’y a pas de compression physique de l’objet.

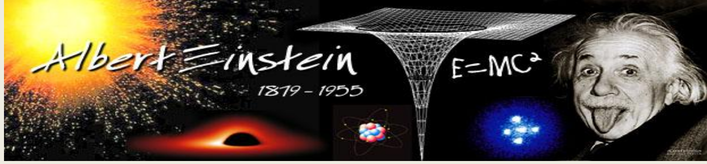


V- La dilatation du temps : explication avec l’espace-temps

Le temps d’une horloge en mouvement peut s’écouler plus lentement que celui d’une horloge au repos. Comment l’expliquer ?

Pour expliquer la variation des durées nous allons utiliser la feuille à animation mais en montrant les effets inversés : au lieu de montrer que le temps d’une horloge en mouvement s’écoule plus lentement, on va montrer qu’il s’écoule plus rapidement.

Imaginons une montre qui clignote à chaque seconde. Utilisons la feuille à animation pour animer cette situation à l’aide de la figure suivante :



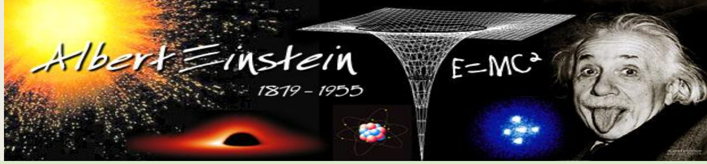
V- La dilatation du temps : explication avec l'espace-temps

► Faire glisser lentement la fente en position horizontale vers le haut (montre immobile) : l'apparition des points dans la fente représente le clignotement, et donc l'écoulement du temps.

► Incliner la fente et la faire glisser lentement vers le haut : la montre se met en mouvement et elle clignote plus rapidement !

Plus la fente est inclinée, plus la montre se déplace rapidement et plus elle clignote rapidement.

Vitesse et écoulement du temps sont liés : aussitôt qu'il y a mouvement d'une horloge, il y a nécessairement un changement de tempo.

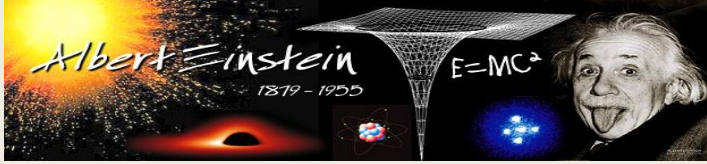


Les effets relativistes

Tous les effets relativistes s’expliquent en termes de rotations dans l’espace-temps.

Puisque dans la vie de tous les jours les vitesses en jeu sont très faibles ($v < 0{,}10c$) les rotations correspondantes dans l’espace-temps sont minimes, et tous les effets relativistes sont imperceptibles.

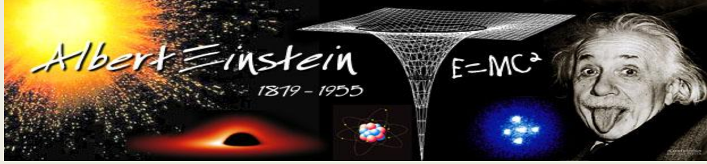
Les effets relativistes (contraction des longueurs et dilatation du temps) ne sont perceptibles que pour des vitesses égales au moins à 50% de la vitesse c de la lumière.



VI- Le paradoxe des jumeaux

Paul Langevin, professeur au collège de France répondit à la question suivante :

« Qu'adviendrait-il de la durée de vie d'un homme lancé dans l'espace à une vitesse proche de la lumière ? »



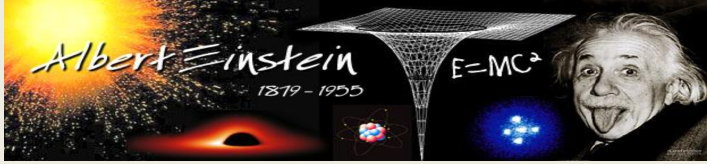
VI- Le paradoxe des jumeaux

Il imagina le scénario suivant : deux frères jumeaux Thomas et Julien décident de se séparer pour une année.

Julien reste sur Terre.	**Thomas embarque une horloge dans son vaisseau spatial se déplaçant à une vitesse constante proche de la vitesse de la lumière.**

L'horloge embarquée à bord et celle de Julien restée sur Terre ont été étalonnées et synchronisées avant le départ.

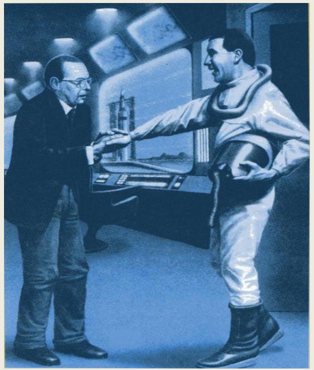
Quand Thomas rentrera, les deux frères jumeaux auront-ils le même âge ou l'un des deux sera-t-il plus vieux que l'autre ?



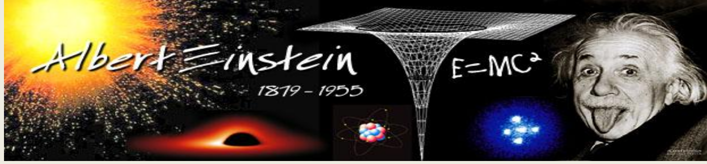
VI- Le paradoxe des jumeaux

Point de vue de Julien resté sur Terre	Point de vue de Thomas
Thomas subit la dilatation des durées ; l’horloge de Thomas subit un ralentissement du fait de son mouvement. **Thomas a vieilli moins vite que lui.** **Thomas sera plus jeune que Julien à son retour.**	Julien qui est en mouvement par rapport à lui (c’est la Terre qui s’est éloignée de lui !) et qui subit la dilatation des durées. Thomas a vieilli plus vite que lui. Thomas sera plus vieux que Julien à son retour.

Il y a donc un paradoxe dans le comportement des horloges en mouvements ; ce paradoxe est connu sous le nom du **« paradoxe du voyageur de Langevin » ou « paradoxe des jumeaux ».**



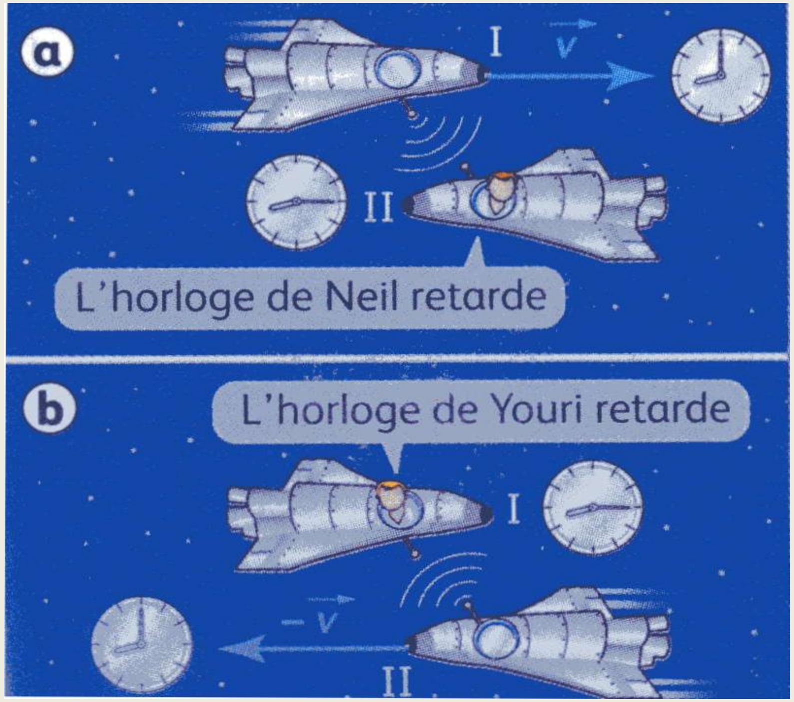
Existe-t-il réellement un paradoxe ?

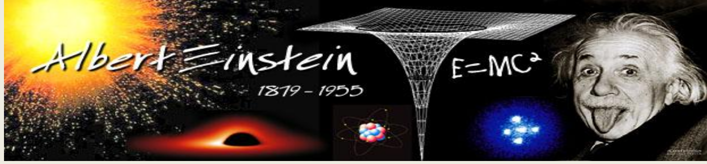


VI- Le paradoxe des jumeaux

Le principe de la dilatation des durées est symétrique

Lorsqu'un **référentiel R'** se déplace par rapport à un référentiel R à une **vitesse v**, un observateur dans le référentiel R' voit le **référentiel R** se déplacer à une **vitesse –v**.





VI- Le paradoxe des jumeaux

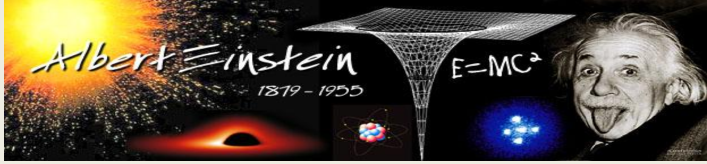
Pourquoi ne retrouve-t-on pas cette symétrie dans le cas des horloges et des jumeaux ?

En fait, la symétrie du principe de la relativité est brisée car **le mouvement de l'horloge du jumeau voyageur (Thomas) n'est pas uniforme :**

- L'horloge doit arrêter sa course à son retour pour que l'on note son temps,

- De plus le jumeau doit faire demi-tour, mais aussi accélérer au décollage et décélérer à l'atterrissage. Le référentiel du jumeau voyageur n'est pas toujours galiléen.

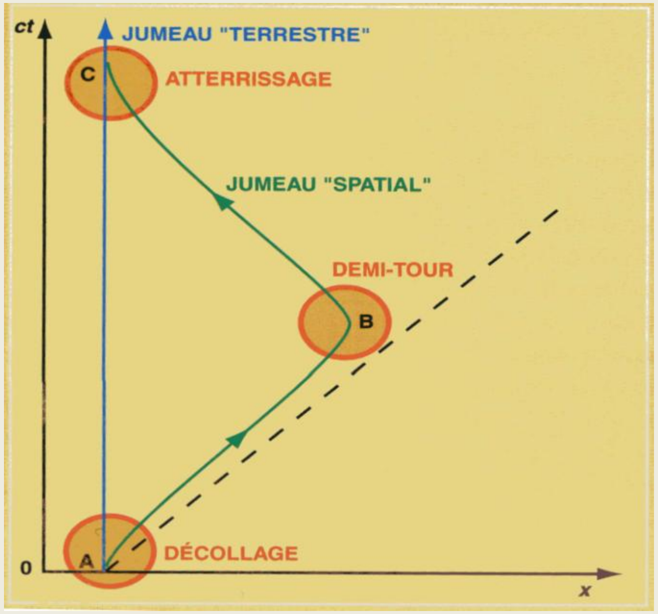
Les référentiels du jumeau voyageur et du jumeau resté dans le référentiel galiléen terrestre ne sont pas équivalents.



VI- Le paradoxe des jumeaux

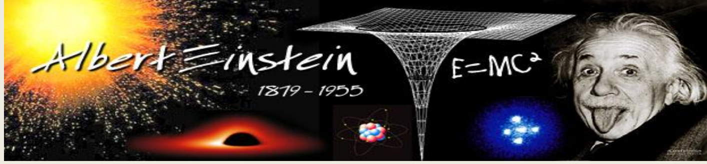
Pourquoi ne retrouve-t-on pas cette symétrie dans le cas des horloges et des jumeaux ?

La ligne d'univers, c'est-à-dire la représentation du trajet spatio-temporel de chaque jumeau dans le diagramme de Minkowski du référentiel terrestre illustre le problème :



La coordonnée spatiale (x) est en abscisse, et la coordonnée temporelle (ct) est en ordonnée dans le diagramme de Minkowski.

Le jumeau qui reste sur Terre parcourt une ligne d'univers parallèle à l'axe des temps (ligne bleue), tandis que le jumeau voyageur passe d'une vitesse nulle à une grande vitesse (vitesse proche de celle de la lumière), c'est-à-dire décrit une portion de ligne d'univers oblique, puis fait demi-tour pour rejoindre la Terre à la même vitesse, c'est-à-dire selon une portion de ligne d'univers symétrique de la première (ligne verte).

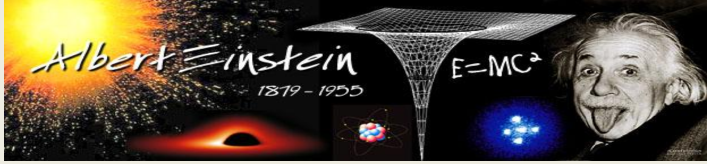


VI- Le paradoxe des jumeaux

Pourquoi ne retrouve-t-on pas cette symétrie dans le cas des horloges et des jumeaux ?

Sur ces deux portions rectilignes, le référentiel du vaisseau spatial est galiléen, et la dilatation du temps s'applique.

Cependant, **les trois portions « décollage », « demi-tour », et « atterrissage »,** ne sont pas rectilignes dans le diagramme de Minkowski, et ne sont pas des référentiels galiléens et la dilatation du temps ne s'applique pas : seule la **théorie de relativité générale** permet de déterminer l'équation exacte de ces portions de lignes d'univers. La dilatation du temps ne s'applique pas.



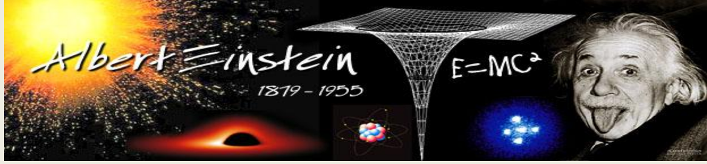
VI- Le paradoxe des jumeaux

Pourquoi ne retrouve-t-on pas cette symétrie dans le cas des horloges et des jumeaux ?

Toutefois, en supposant ces portions infiniment petites, on peut considérer que la ligne d’univers du jumeau voyageur est équivalente à deux portions rectilignes, et l’on peut calculer une approximation de la durée du voyage pour chacun des jumeaux dans **<u>le diagramme de Minkowski vu par le jumeau resté sur Terre</u>** :

- la longueur de la **ligne verte** dessinée est égale au **produit par c de la durée $\Delta t'$** qui s’est écoulée dans le vaisseau ;

- la longueur de la **ligne bleue** est égale au **produit par c de la durée Δt** qui s’est écoulée entre le décollage et l’atterrissage du vaisseau, pour le jumeau resté sur Terre.



VI- Le paradoxe des jumeaux

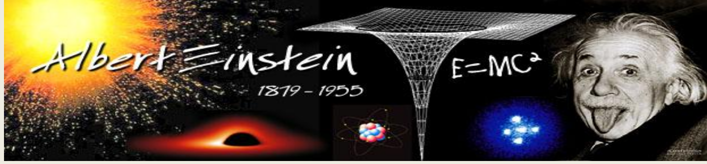
Pourquoi ne retrouve-t-on pas cette symétrie dans le cas des horloges et des jumeaux ?

Si l’on calculait la distance spatio-temporelle parcourue par le vaisseau au moyen des outils classiques de la géométrie euclidienne, l’on trouverait le trajet ABC plus long que le trajet AC.

Mais dans l’espace-temps, on considère le carré de l’intervalle Δs d’espace-temps qui amène un **signe « moins »** entre les composantes temporelle et spatiale.

Ainsi, en réalité la longueur du trajet ABC est plus courte que celle du trajet AC : la durée du trajet est plus courte pour le jumeau voyageur que pour le jumeau resté sur Terre.

Le jumeau voyageur (Thomas) sera plus jeune que celui resté sur Terre (Julien).



VI- Le paradoxe des jumeaux

Pourquoi ne retrouve-t-on pas cette symétrie dans le cas des horloges et des jumeaux ?

Si on imagine maintenant **le diagramme de Minkowski vu par le jumeau voyageur** : dans ce diagramme, la ligne d'univers du jumeau voyageur serait parallèle à l'axe des temps, et la ligne d'univers du jumeau resté sur Terre aurait la même allure que la ligne verte.

Pourquoi alors, ne pas appliquer le calcul précédent dans ce cas ?

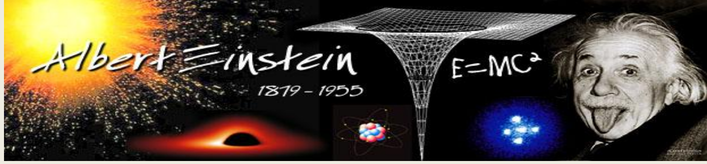
On trouverait que le jumeau resté sur Terre serait plus jeune que le jumeau voyageur…

A un détail important près : ce diagramme n'aurait aucun sens, car la Terre ne ressent pas d'accélération quand elle quitte ou rejoint le vaisseau spatial !

Conclusion

Le jumeau voyageur sera plus jeune que le jumeau resté sur Terre.

La théorie de la relativité générale montre que le temps s'écoule moins vite du fait de l'accélération.



Rappel : L’espace-temps de Minkowski

Le physicien ***Hermann Minkowski*** *(1864-1909) a défini un espace à 4 dimensions où l'espace et le temps ne seraient plus séparés.*

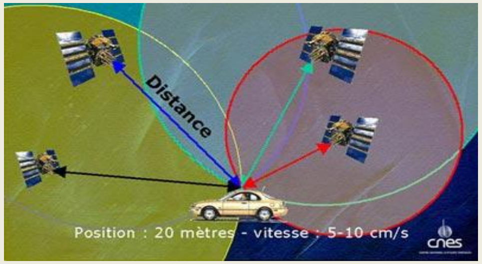
Il a montré que l’intervalle entre deux évènements E_1 (x_1, y_1, z_1, t_1) et E_2 (x_2, y_2, z_2, t_2) dans l’espace-temps, appelé **intervalle d'espace-temps** et noté **Δs** possède un caractère absolu.

$$\Delta s^2 = c^2 (t_2 - t_1)^2 - ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2) = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

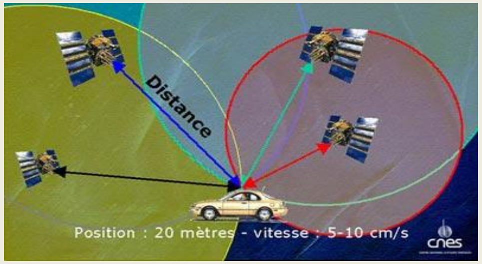
Le carré Δs^2 de l’intervalle d’espace-temps est un invariant par changement de référentiel dans la transformation de Lorentz.

Même si le temps ou l'espace sont différents pour des observateurs appartenant à des référentiels différents, l'espace-temps est le même pour tous !

VII- Le système GPS

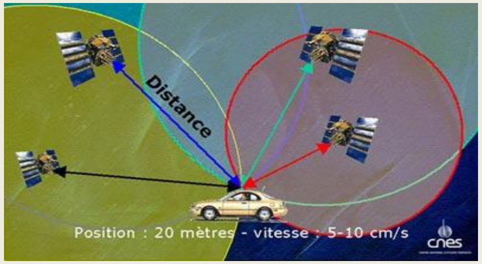


L’ancêtre du GPS !



VII- Le système GPS

- « www.explania.com : Origine et fonctionnement du GPS »
- « www.universcience.tv : un monde sans satellite »



VII- Le système GPS

Le GPS : Qu’est-ce que c’est ?

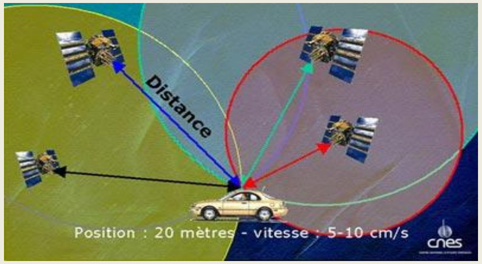
Le GPS est un **système de positionnement** par satellites, capable de donner n’importe où sur le globe une position (entre une centaine de mètres et quelques centimètres) avec rapidité et précision de jour comme de nuit.

Le GPS permet de déterminer en tout point du globe :

- La position avec une **précision < 5 m**
- L’heure exacte avec une **précision < 1 µs**

VII- Le système GPS

Histoire du GPS



On doit le concept et la concrétisation de la constellation des satellites GPS au visionnaire Dr Ivan A.Getting qui est devenu chef de la direction de la société américaine The Aerospace Corp en 1960.

Grâce à lui, les GPS sont devenus selon ses propres paroles

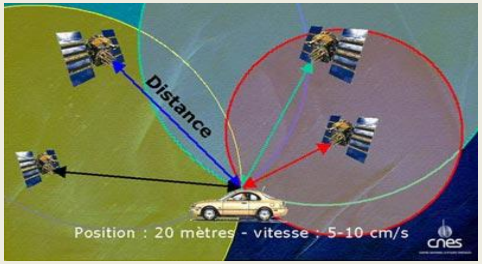
"des phares dans le ciel guidant toute l'humanité".

1968 : Le président Nixon ordonne au Pentagone d'imaginer (projet coordonné par le Dr Getting) un système de satellites capable de déterminer à tout moment la position d'un point sur la terre en temps réel.
Le but était de mettre au point des armes stratégiques et tactiques guidées par satellites à partir de données géodésiques transmises en temps réel.

1973 : Mise en place du projet NAVSTAR-GPS (Navigation System Time And Ranging - Global Positioning System), financé et développé par le Ministère de la Défense américain (MoD). Son but était alors strictement militaire.

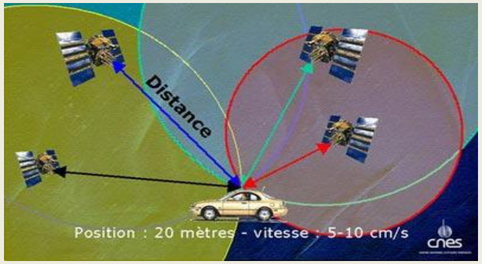
VII- Le système GPS

Histoire du GPS



1976 : Premier test du système NAVSTAR-GPS sur des bombes autoguidées lancées par des bombardiers américains dans le désert de Yuma en Arizona. Les bombes ont été larguées à une altitude de 3000 m. L'erreur maximale sur cible a été d'environ 17 mètres ce qui s'avéra extrêmement précis.
1978 : Le premier satellite NAVSTAR-GPS fut placé sur orbite par une fusée Delta IV le 21 février 1978.
1984 : Le président Ronald Reagan annonce que les civils pourront également bénéficier, en partie seulement, des possibilités qu'offre ce système. Le système GPS des civils utilise une électronique simplifiée et est soumis à une dégradation volontaire des signaux satellitaires pour une précision de 100 m environ.
1995 : Le système GPS fut déclaré officiellement opérationnel et sans aucune restriction le 27 avril 1995.

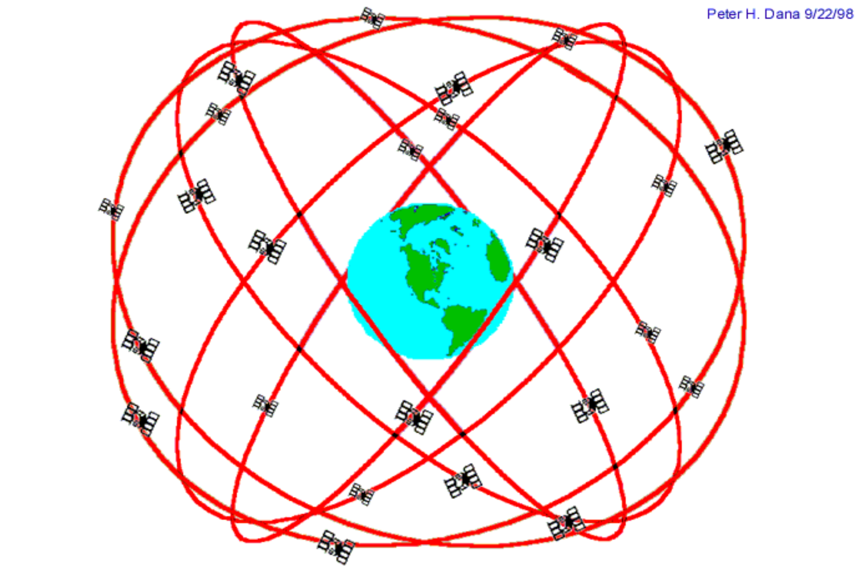
VII- Le système GPS



Le système GPS se compose de 3 secteurs distincts :

❖ Le secteur spatial

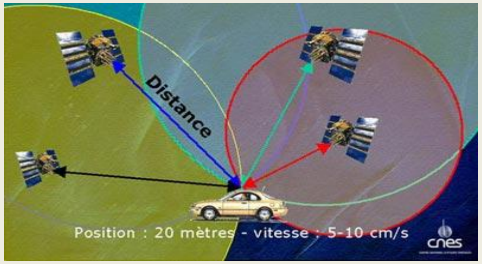
La constellation GPS est constituée de 24 **satellites NAVSTAR** placés sur 6 orbites circulaires dont voici les caractéristiques :



La constellation de satellites Navstar du système GPS

altitude	20 184 km
orbites	**6** orbites inclinées de 55° par rapport à l'équateur, 60° entre chaque orbite
nombre de satellites par orbite	**4**
durée d'une révolution (un tour d'orbite)	**12 h**

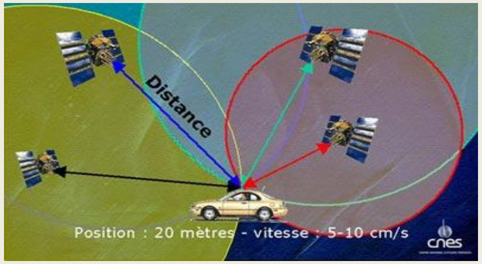
VII- Le système GPS



❖ Le secteur spatial

- La position de chaque satellite est connue avec une précision inférieure à 1 m.
- En moyenne **8 satellites** sont visibles d'un même point en même temps.
- Chaque satellite GPS (émetteur) envoie en permanence un message de navigation, qui contient toutes les données nécessaires au récepteur pour effectuer tous les calculs de navigation.
- **Ces données comprennent** :
  - **la position orbitale** du satellite
  - **les heures exactes d'émission** des messages, les éphémérides du satellite
  - une information concernant le **retard de propagation** dû à l'ionosphère
  - **l'almanach** : information sur le type de satellite, son état de fonctionnement, le calcul précis de son orbite (précision < 1 m)
- Ces informations sont transmises sous forme **d'ondes électromagnétiques (**gamme des micro-ondes) sous deux fréquences : **1227,6 MHz et 1575,42 MHz.**

- **Le récepteur** doit donc être en mesure de déterminer à tout instant la position de chacun des 24 satellites et de quel satellite provient le signal reçu.

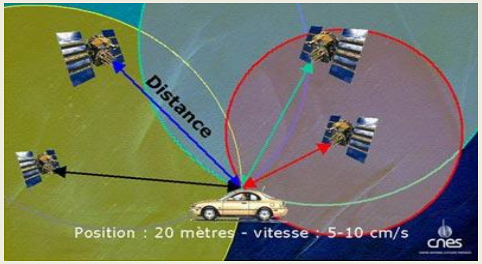


❖ Le secteur de contrôle

5 stations de surveillance sont réparties autour de la planète et suivent à tout instant le mouvement des satellites, dont l'orbite est périodiquement corrigée.

Parmi elles, une **station de commande située dans le Colorado** calcule les corrections à apporter aux messages des satellites.

VII- Le système GPS



❖ Le secteur utilisateur

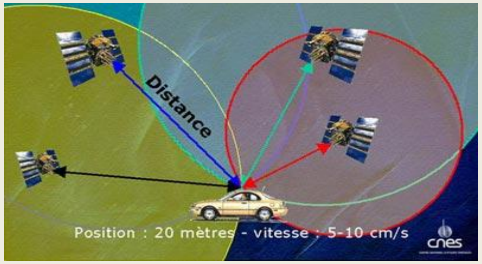
Les utilisateurs captent avec des récepteurs les signaux émis par les satellites qui :

- calculent la position à partir des données que fournissent les satellites.
- enregistrent à chaque instant la position des satellites visibles et l'heure de départ du message depuis chaque satellite.
- enregistrent aussi l'heure de réception du message envoyé par chaque satellite.

Par conséquent, le récepteur connait donc le temps mis par le signal pour parcourir la distance satellite-récepteur.

- **Le GPS récepteur** de l'utilisateur comprend une antenne de réception et un récepteur- calculateur.

VII- Le système GPS



❖ Le secteur utilisateur

	
GPS que l'on achète dans le commerce pour naviguer en mer ou se repérer en randonnée ou en montagne.	Les camions, autocars, taxi et voitures particulières sont équipés actuellement d'un GPS.

VII- Le système GPS

La détermination de la position

- Le récepteur GPS calcule la position par **triangulation** : il définit des sphères centrées sur des satellites dont l’intersection donne la position de l’utilisateur.

- Le récepteur mesure la distance entre l’utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues grâce **au temps T** qu’à mis chaque signal à parvenir jusqu’à lui.

Distance = vitesse de la lumière $\times$ temps de propagation T du signal

Remarque : Le temps T varie entre **67 et 86 millisecondes** selon la position du satellite par rapport à la Terre et au récepteur.

VII- Le système GPS

Premier satellite S_1 :

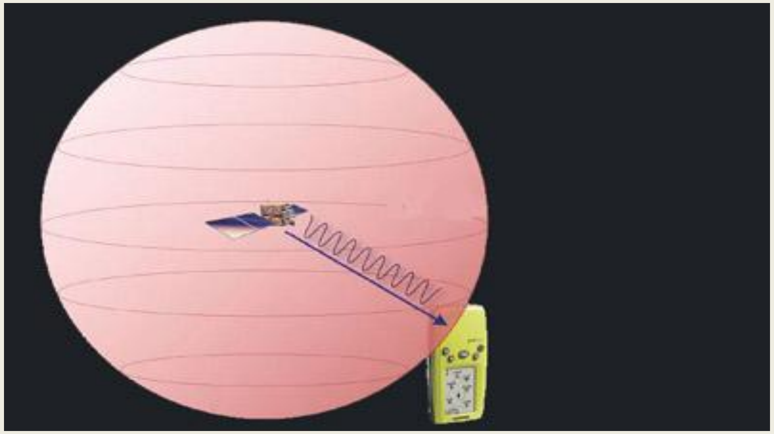
Le satellite S_1 émet une onde électromagnétique de vitesse connue v = 2,9979. 10^8 m/s.

Le récepteur GPS calcule le temps T_1 mis par cette onde pour l'atteindre.

d_1 = vitesse de la lumière $\times$ T_1

Le récepteur GPS détermine une **sphère de centre S_1 et de rayon d_1,** qui sont les positions possibles de l'utilisateur.

.



Le récepteur GPS sait alors qu'il se trouve en quelque part sur une sphère centrée sur le satellite S_1

VII- Le système GPS

Deuxième satellite S_2 :

Le satellite S_2 émet une onde électromagnétique de vitesse connue v = 2,9979. 10^8 m/s.

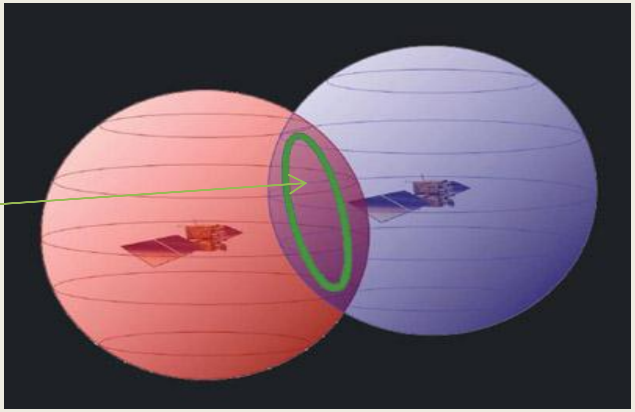
Le récepteur GPS calcule le temps T_2 mis par cette onde pour l'atteindre.

$$d_2 = \text{vitesse de la lumière} \times T_2$$

Le récepteur GPS détermine une **sphère de centre S_2 et de rayon d_2.**

En recoupant les informations de **2 satellites**, le lieu géométrique du récepteur devient un cercle.

Vous êtes quelque part par là



Ainsi, ayant capté les signaux de deux satellites, le récepteur GPS sait alors qu'on se trouve quelque part sur ce cercle.

L'information donnée par deux satellites est donc encore trop faible pour localiser sans ambiguïté un point.

VII- Le système GPS

Troisième satellite S_3 :

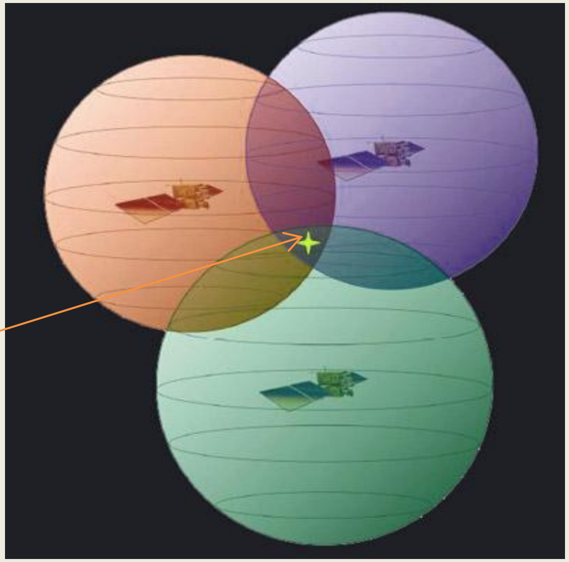
Le satellite S_2 émet une onde électromagnétique de vitesse connue $v = 2{,}9979.\ 10^8$ m/s.

Le récepteur GPS calcule le temps T_3 mis par cette onde pour l'atteindre.

$$d_3 = \text{vitesse de la lumière} \times T_3$$

Le récepteur GPS détermine une **sphère de centre S_3 et de rayon d_3.**

Vous êtes ici



Avec 3 satellites, l'intersection se réduit à deux points dont l'un est forcément absurde (loin de la terre).

VII- Le système GPS

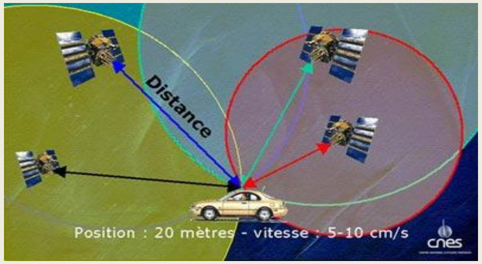
Quatrième satellite :

- Pour obtenir la position exacte, le GPS utilise un quatrième satellite : la quatrième sphère permet que les quatre sphères se coupent en un point unique.

- L'information est alors redondante, et permet de gagner en précision (de l'ordre de 25 m initialement).

- Le point restant est la localisation recherchée. Il correspond à la position en altitude, en latitude et longitude.

VII- Le système GPS



À vous de jouer !

Pour vous entraîner au principe de positionnement par triangulation, vous pouvez faire l'activité sur le système de positionnement GPS proposée toujours sur le site de physique-chimie de l'académique de MARTINIQUE (ressources TS).