LA RELATIVITÉ POUR LES NULS.

La théorie de la relativité n'est pas née de rien, Albert Einstein ne s'est jamais réveillé en disant: «arrêtez tout, la vitesse de la lumière est une constante indépassable, et le temps est relatif»!

La théorie de la relativité prend ses racines dans la physique du 19ième siècle.
À cettte époque déjà, et en s'appuyant sur les découvertes récentes (en particulier en électromagnétisme), plusieurs physiciens envisagent de remettre en question «l'absolu» de l'espace et du temps (Voir: http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_relativité_restreinte).

Selon les équations de Maxwell, la vitesse de la lumière est constante............. au moins par rapport à son milieu de propagation (supposé «matériel»). Problème: le vide n'est pas un milieu «matériel» de propagation, d'où la nécessité d'existence d'un éther.
Sauf que, une expérience conduite en 1887 par Michelson et Morley pour mesurer la vitesse de la Terre par rapport à cet éther................. n'a pas trouvé............. d'éther.............. Ou plus exactement, l'expérience a montré que la vitesse de la lumière était strictement identique dans toutes les directions, donc totalement indépendante du mouvement de la Terre dans le supposé éther.

L'interprétation du résultat de l'expérience de Michelson et Morley n'était pas facile, et certains ont pensés, au début, que l'éther existait quand même, mais qu'un phénomène inconnu avait provoqué le raccourcissement de certaines branches du dispositif de mesure (celles qui avaient la direction du mouvement de la Terre). Cette explication a très vite été mise en doute, et c'est un article d'Albert Einstein publié en 1905 (De l'électrodynamique des corps en mouvement), qui apportera une nouvelle réponse............ et une nouvelle façon de «voir le monde» dont la pertinence a été, depuis, largement vérifiée.

En substance, Einstein dit que l''éther est inutile, que la vitesse de la lumière dans le vide est constante et égale à c dans tous les référentiels inertiels, et que cette vitesse ne dépend ni du mouvement de la source ni de celui de l'observateur.
Il dit aussi que les lois de la physique ne dépendent pas du référentiel, et confirme la valeur des transformations de Lorentz.

Dans ces fameuses transformations de Lorentz, le temps et l'espace sont déjà liés, mais c'est Hermann Minkowski qui montrera le mieux ce lien en décrivant un espace-temps à quatre dimensions.

L'ESPACE-TEMPS DE MINKOWSKY

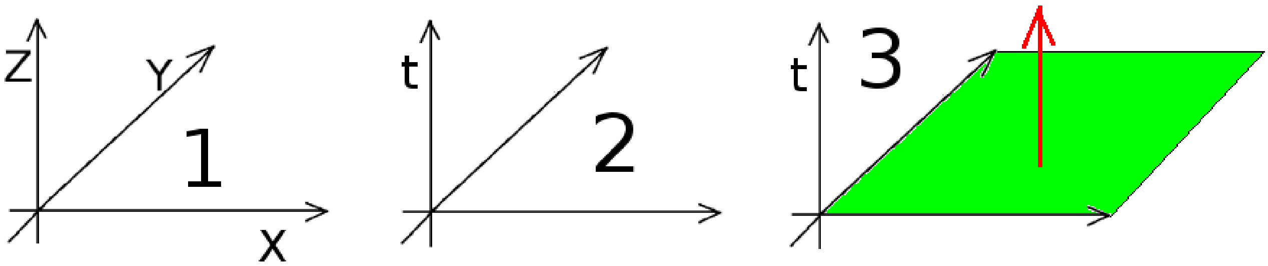
L'espace-temps décrit par la relativité restreinte est donc l'espace-temps de Minkowsky.
Mais cet espace-temps est particulier, il peut être considéré comme absolu (on oublie ici que l'espace-temps peut être courbé par une masse, cela ne concerne que la relativité générale).

Dès qu'il y a mouvement, il y a CONTRACTION des distances et DILATATION du temps, jamais l'inverse, et jamais l'un sans l'autre, la contraction de l'un compensant en quelque sorte la dilatation de l'autre et cette compensation résultant du caractère absolu de l'espace-temps de Minkowsky.

On ne peut pas décrire un événement dans l'espace 3D en faisant comme si l'une des dimensions n'existait pas.
On ne peut, en tous cas, le décrire correctement (on l'a coupé en tranche, et on n'en a pris qu'une)
De la même façon, si l'on veut décrire un événement dans l'espace 4D il faut tenir compte de la dimension temps.

Il est impossible de faire un dessin 4D, alors pour pouvoir représenter la dimension temps (t), on peut «écraser» les trois dimensions d'espace (x,y,z) pour en faire seulement deux, auxquelles on pourra rajouter le temps (t).

On passe donc d'un repère orthonormé X, Y, Z, (1) à un autre repère orthonormé où la dimension temps remplace Z, et où les deux autres dimension représentent l'espace trois D «écrasé» (2).



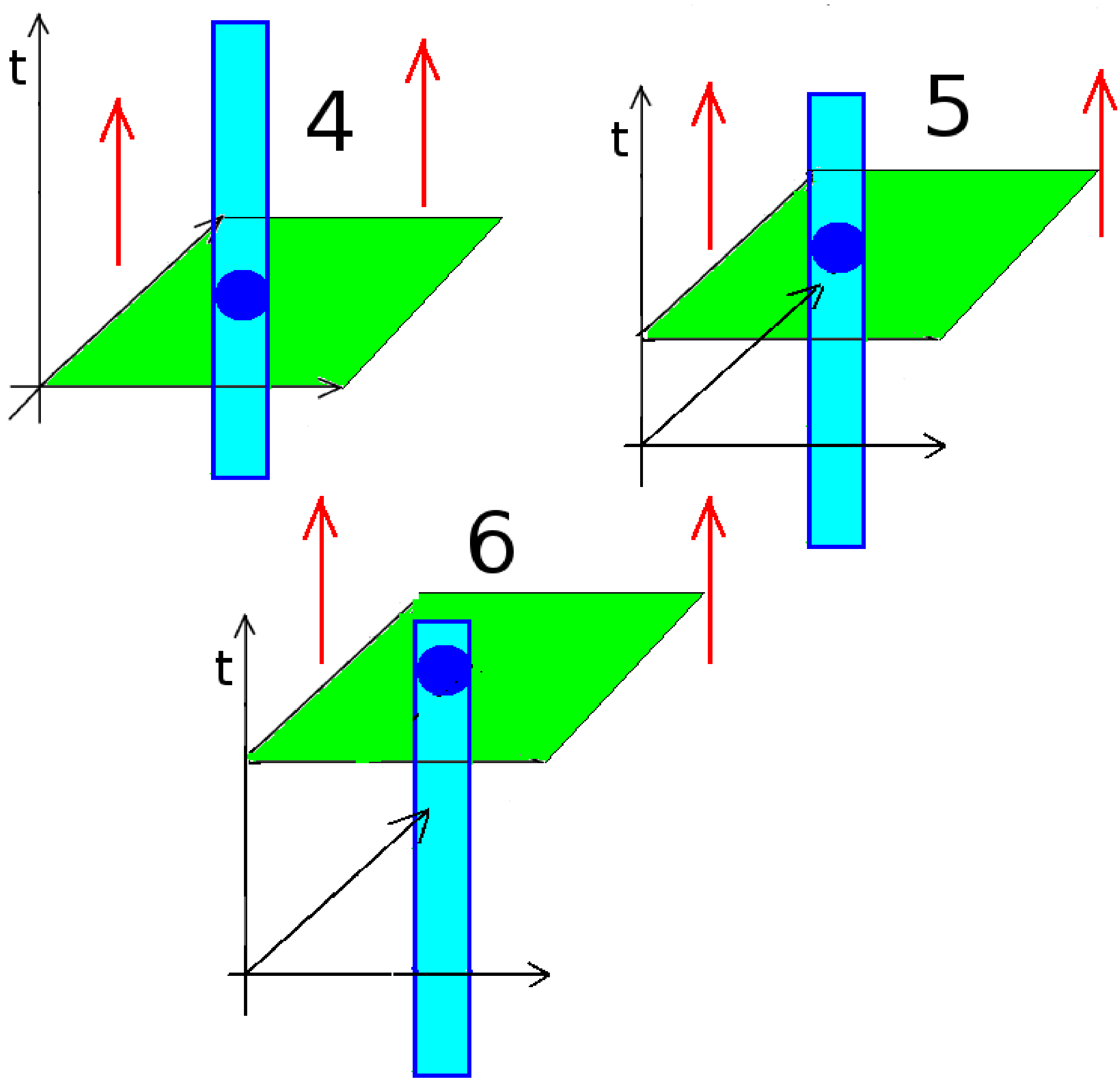
Puis, pour symboliser l'écoulement du temps, on fera se déplacer le plan horizontal représentant l'espace, le long de l'axe t (3).

Imaginons maintenant un objet de forme simple (pour être facile à dessiner), rond par exemple, au repos.
S'il est au repos, sa position ne change pas.

Sur un dessin représentant cet objet dans l'espace, je dois le placer au même endroit, que ce soit au temps t1, t2, t3, ou t4 etc......

Si ensuite je veux représenter (par un dessin) TOUT L'ESPACE-TEMPS 4D (donc en «écrasant» les trois dimensions d'espace en deux, et en plaçant l'axe du temps à la place de Y), mon objet rond, toujours exactement au même endroit sur le plan représentant l'espace (puisqu'il ne bouge pas), mais S'ÉTENDANT le long de l'axe du temps (puisqu'il continue d'exister à cet endroit à chaque instant), mon objet rond donc deviendra un long cylindre parallèle à l'axe du temps.

Dans le dessin ci après, on retrouve donc:
-Notre espace trois D «écrasé» représenté par le plan vert.
-L'objet rond dans notre espace trois D représenté par le disque bleu sur le plan vert.
-Ce que devient l'objet rond pour un observateur qui serait capable de voir TOUT l'univers 4D, donc avec la dimension temps incluse, ce qui est une vision plus «vraie» parce que n'oubliant aucune des 4 dimensions qui sont pourtant équivalentes. Cet objet rond devient donc un long cylindre représenté simplement ici par un rectangle bleu.

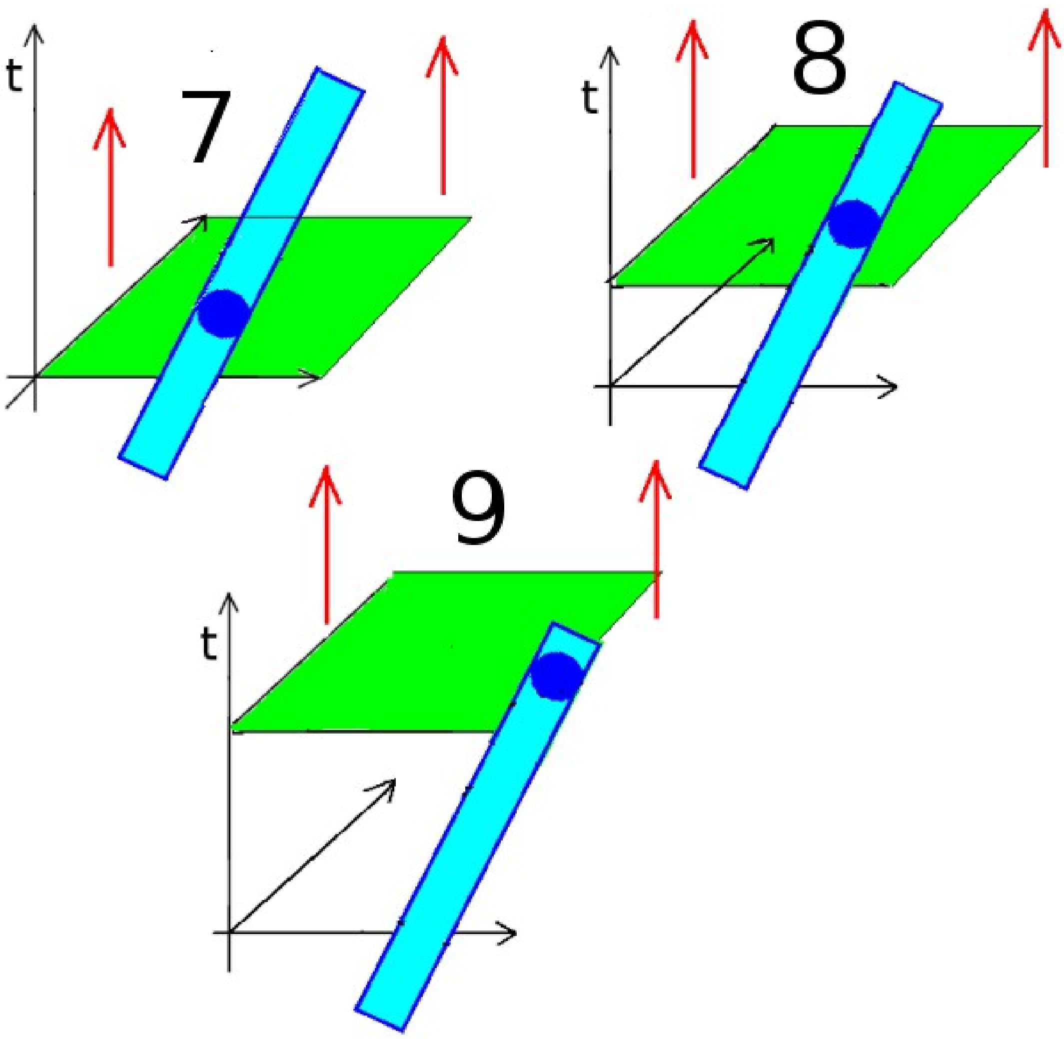


Les dessins 4, 5, et 6 montrent l'objet rond au repos donc au même endroit sur le plan dessiné en trois instants différents.

Que se passerait-il maintenant si le rectangle bleu n'était pas parallèle à l'axe du temps (pas vertical)?
Alors, l'intersection entre le rectangle bleu et le plan vert (donc le disque bleu) ne se ferait pas au même endroit à chaque instant.

On voit clairement dans le dessin ci dessous que le disque bleu, représentant l'objet dans l'espace 3D «écrasé» en 2D, occupe une position différente aux trois instants différents représenté par les dessins 7, 8, et 9.
En fait, le disque bleu s'est déplacé dans le plan vert entre le dessin 7 et 8, puis encore entre le dessin 8 et 9.
Ce déplacement du disque bleu dans le plan vert est l'image du mouvement de l'objet rond dans l'espace trois D.

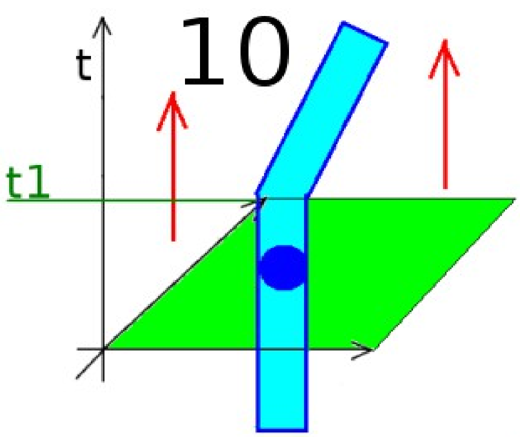
Conclusion: Vu dans sa globalité, par un observateur voyant TOUT l'univers SANS OUBLIER L'UNE DE SES DIMENSIONS (un tel observateur est bien sûr inimaginable en physique, mais il suffit de dire que c'est Dieu..), le mouvement dans l'espace 3D n'existe pas.

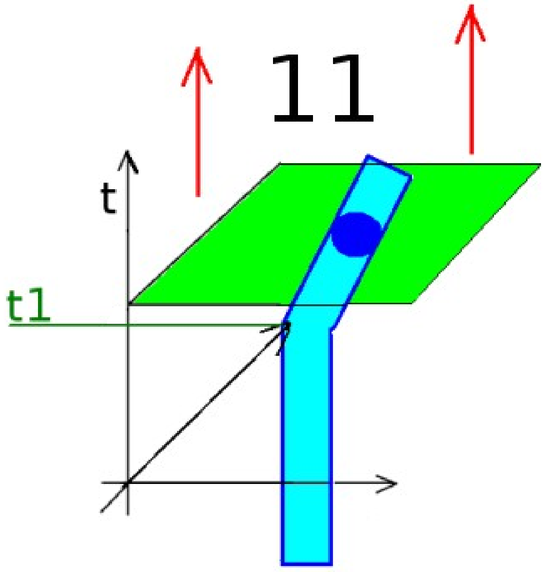


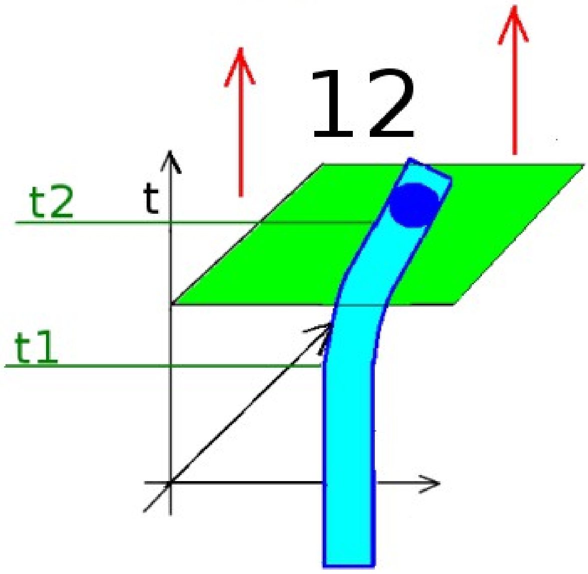
Pour NOUS il existe, mais il n'est que le résultat d'une impression que les observateurs privés d'une vue globale ont lorsqu'ils découvrent PROGRESSIVEMENT, tranche par tranche, un objet FIXE MAIS INCLINÉ dans l'espace 4D.

Comment décrire de cette manière, le passage depuis l'état de repos à l'état de mouvement d'un objet?
Si l'objet est d'abord au repos, alors le cylindre le représentant sur une certaine durée doit être parallèle à l'axe du temps (donc vertical) pendant cette durée. Puis, lorsque l'objet est en mouvement, le cylindre le représentant doit être incliné.

J'ai dessiné ci dessous ce que donnerait un objet au repos recevant une impulsion à l'instant t1.
Le dessin numéro 10 représente l'objet au repos dans l'espace 3D quelques instants avant l'impulsion, donc avant t1.
Le dessin numéro 11 représente l'objet en mouvement dans l'espace 3D quelques instants après l'impulsion, donc après t1.
L'impulsion en t1 provoque un basculement du cylindre qui passe d'une position FIXE verticale à une position inclinée, MAIS TOUT AUSSI FIXE QUE LA PREMIÈRE.
Au niveau de l'espace-temps 4D, il n'y a eu qu'un pivotement du cylindre qui a commencé en t1 et s'est arrêté presque immédiatement.
Ce pivotement est bien un changement, mais de courte durée et dont la cause est une impulsion, une force brève.
Le pivotement cesse immédiatement en même temps que l'impulsion.
La nouvelle position du cylindre est une position fixe, inclinée mais fixe.







Rien ne change plus désormais, et le mouvement de l'objet rond que constatera un observateur confiné à l'espace 3D ne sera que l'illusion résultante de sa découverte PROGRESSIVE du cylindre incliné mais fixe.
Le dessin numéro 12 représente l'objet en mouvement dans l'espace 3D quelques instants après une phase d'accélération s'étant déroulée entre les instants t1 et t2.
Pendant cette phase d'accélération, l'inclinaison du cylindre a continuellement augmenté.
Après l'instant t2, plus rien ne bouge dans l'espace-temps 4D, et le mouvement qui serait encore mesuré dans l'espace 3D ne serait que l'illusion résultante de la découverte PROGRESSIVE du cylindre toujours incliné mais désormais fixe.

Seule l'accélération nécessite une cause continue, mais le mouvement rectiligne uniforme n'est que la conséquence de l'écoulement du temps qui nous fait découvrir progressivement une **réalité fixe** mais inclinée par rapport à notre référentiel.

Le mouvement rectiligne uniforme n'est donc pas un «changement» dans l'univers (le vrai, le 4D), mais une illusion causée par l'écoulement du temps nous faisant découvrir progressivement, tranche après tranche, une situation fixe.

On peut aussi prendre le problème dans l'autre sens et s'apercevoir qu'un objet se déplaçant dans un espace 3D doit INÉVITABLEMENT ET OBLIGATOIREMENT devenir un «objet allongé fixe et incliné» s'il est vu dans un espace-temps4D, parce que la prise en compte de la dimension temps dans sa totalité, implique cela.

C'est un peu ce qu'il se passe lorsque l'on filme une route la nuit, on peut voir les phares des voitures se déplacer.

Mais si l'on cherche à avoir une vision englobant la totalité de la dimension temps, alors il faut prendre une seule photo mais avec une pause longue, et là le mouvement des phares disparaît au profit d'un long serpent de lumière................. immobile!

Si nous vivons bien dans un espace-temps 4D, alors le mouvement est OBLIGATOIREMENT un pivotement dans l'espace-temps, et PLUS PRÉCISÉMENT, un pivotement dans la dimension temps (en effet, le cylindre ne pivote pas dans le plan symbolisant l'espace 3D, mais bien en dehors de celui-ci, donc dans la seule dimension restante: le temps).

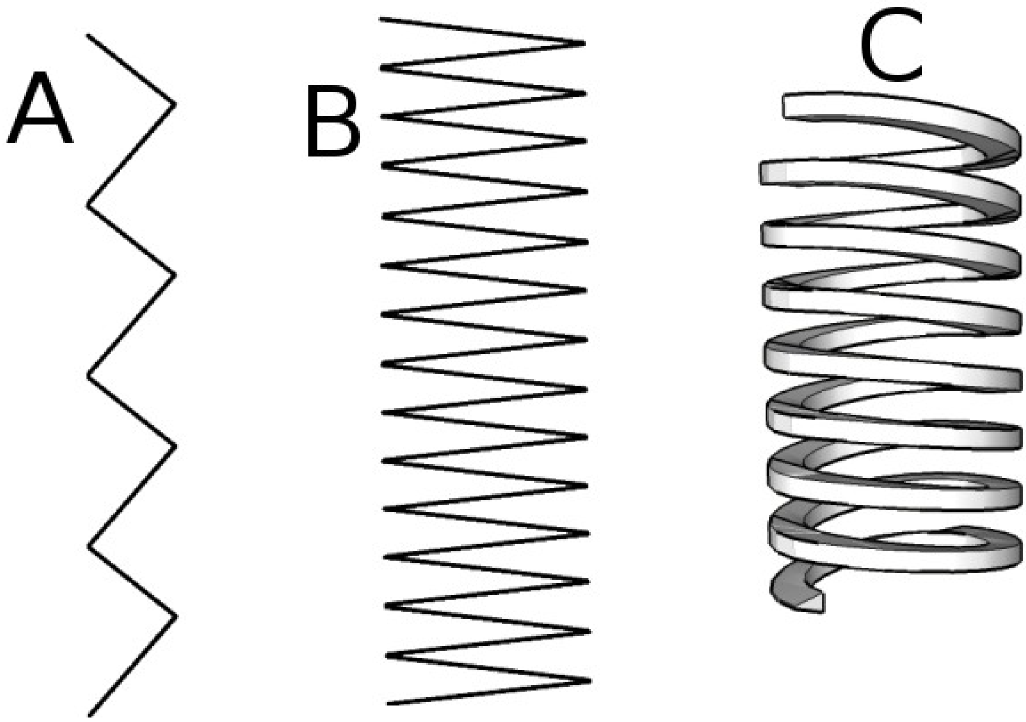
Une autre façon d'expérimenter ce qu'est le mouvement dans l'espace-temps 4D de Minkowsky est de partir des trois dessins ci dessous.

On prend le dessin A (ou on le recopie en plus grand, en plus clair).
On le masque avec une feuille de papier percée d'une petite fente horizontale d'un millimètre d'ouverture.
Puis on fait glisser la feuille vers le haut, et par la fente on ne verra qu'un point se déplaçant alternativement de gauche à droite et de droite à gauche, à vitesse modérée.

Ensuite, on prend le dessin B (ou on le recopie en plus grand, en plus clair).
On le masque avec une feuille de papier percée d'une petite fente horizontale d'un millimètre d'ouverture.
Puis on fait glisser la feuille vers le haut, et par la fente on ne verra qu'un point se déplaçant alternativement de gauche à droite et de droite à gauche, à vitesse élevée.

En retirant la feuille fendue, on s'apperçoit que ce que l'on voit (un mouvement de va et viens) lorsque l'on n'a accès qu'à UNE PETITE PARTIE de la réalité (la fente est une manière de forcer à ne pas voir une des dimension)s est bien différent de la réalité entière.

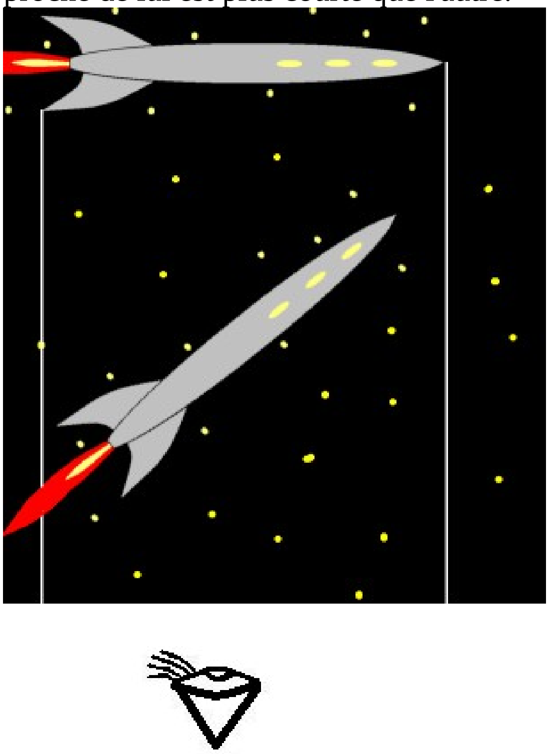
Ce que l'on prend pour un mouvement, ce que certains prennent pour un «changement dans l'univers», n'est qu'une illusion due à notre ignorance de l'essentiel de la réalité.



Bien sûr, le dessin C correspond à une rotation dans l'espace 3D......... Mais qui nécessite un plan horizontal se déplaçant verticalement (comme sur les dessins précédents) et non pas une simple fente pour se révéler.

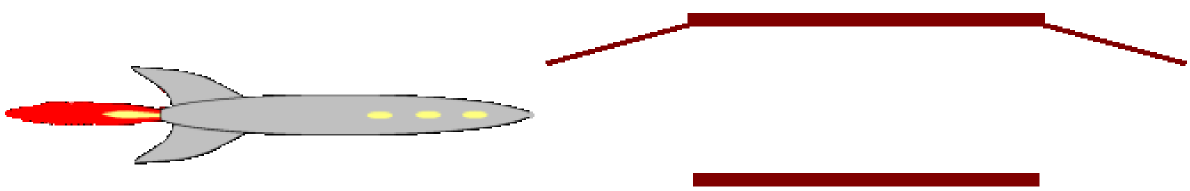
Contraction des longueurs.

La contraction est AUSSI, le résultat d'une inclinaison, d'un pivotement.
Le dessin ci dessous montre deux fusées semblables, et de même longueur, mais pour l'observateur symbolisé par l'oeil dessiné au bas du dessin, les choses paraissent un peu différentes.
Si l'alignement de l'oeil est tel qu'il ne peut voir la profondeur (donc pas d'effet de perspective), il conclura que la fusée la plus proche de lui est plus courte que l'autre.

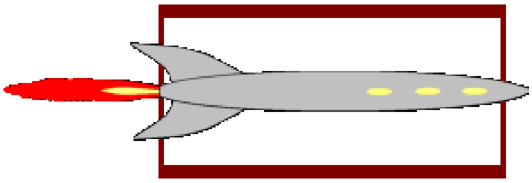


Si l'observateur voit la fusée plus courte plutôt que «pivotée», c'est parce qu'il ne voit pas la dimension dans laquelle la fusée est «pivotée». Cette condition est remplie, dans le dessin, grâce à un alignement particulièrement bien calculé pour que l'observateur ne voit pas en perspective, mais dans la réalité, la raison pour laquelle on voit les objets en mouvement plus court plutôt que «pivotés» est que leur pivotement se fait dans une dimension que l'on ne peut pas voir, et c'est la dimension temps..
Ben oui, si nous vivons bien dans un espace-temps 4D, alors le mouvement est OBLIGATOIREMENT un pivotement dans l'espace-temps, et PLUS PRÉCISÉMENT, un pivotement dans la dimension temps (en effet, le cylindre ne pivote pas dans le plan symbolisant l'espace 3D, mais bien en dehors de celui-ci, donc dans la seule dimension restante: le temps).

Attention, la contraction des longueurs n'est pas qu'une illusion sans aucune réalité physique ; exemple:
Imaginons une fusée relativiste (donc se déplaçant à très très haute vitesse), qui traverse un garage comportant une porte à chaque extrémités.

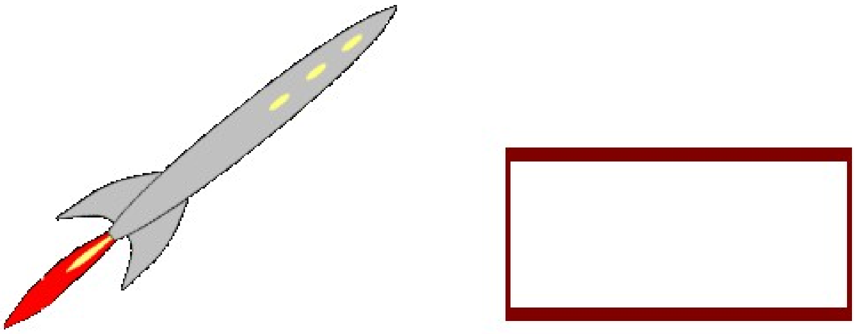


Le but est de fermer les deux portes pendant un instant extrêmement court, de préférence simultanément, enfermant donc totalement la fusée très très trèèèèèèèèès brièvement.
Sauf que.................. le garage est plus court que la fusée...............

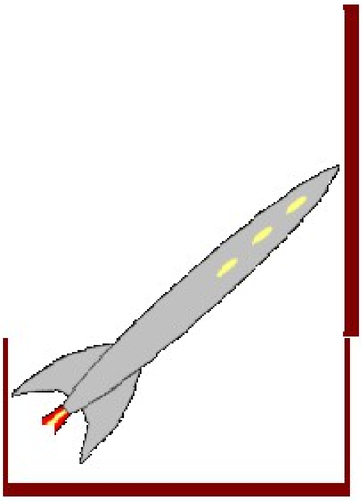


Alors est-il possible de l'y enfermer quand même?
La réponse est oui, en tous cas pour le référentiel du garage, et cela justement parce que le fusée sera plus courte POUR LE RÉFÉRENTIEL DU GARAGE.

Peut on dire que si la contraction n'est que le résultat d'un pivotement, il ne sera toujours pas possible de faire entrer la fusée, parce que la situation ressemblerait au dessin suivant?



Ben pour que la fusée puisse entrer dans le garage, il suffit d'ouvrir ce garage dans la dimension où la fusée est pivotée afin d'obtenir suffisamment de place, comme ceci.



Et justement ça tombe bien, le garage est ouvert dans la dimension du pivotemment.
Je dirai même plus, le garage n'a pas de mur ni de toit dans la dimension du pivotement, puisque ce pivotement se fait dans la dimension du temps.

Petite précision pour ceux que ça intéresse: Le calcul de la contraction des longueurs (et des distances) se fait comme suit:

$$\Delta l' = \Delta l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{ou} \quad \Delta l'^2 = \Delta l^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

La longueur dans le référentiel en mouvement (delta l') est égale à la longueur dans le référentiel au repos (delta l) multipliée par la racine carrée de 1 moins la vitesse au carré (v^2) sur la vitesse de la lumière au carré (c^2).

Cette inclinaison des objets dans l'espace-temps 4D, nous ne la voyons pas (les objets en mouvement gardent, selon nous, la même orientation), **parce que justement elle se produit dans la dimension temps et que cette dimension nous est «cachée»**.

D'un autre côté, on sait que le mouvement, **DANS L'ESPACE 3D** est RELATIF, donc cette inclinaison ne doit pas être la même selon chaque référentiel.

Et non seulement cette inclinaison n'est pas la même d'un référentiel à l'autre, mais en plus, et toujours en conséquence de la relativité du mouvement, DANS L'ESPACE 3D, chaque référentiel étant au repos selon son point de vue, **c'est toujours l'autre qui est vu comme incliné** (dans notre propre référentiel on est toujours forcément droit) **donc c'est toujours l'autre qui est vu comme RACCOURCI**, parce que le raccourcissement des longueurs n'est qu'une conséquence du pivotement dans la dimension temps.

Ouais mais........... du coup, dans le référentiel de la fusée, c'est le garage, pourtant déjà trop petit au départ, qui a rétrécit encore d'avantage par effet relativiste (pivotement) donc la fusée ne peut pas entrer dedans..

D'accord; le garage est trop petit pour la fusée, mais la fermeture simultanée des portes qui enfermait très brièvement la fusée, se passait dans le référentiel du garage, pour lequel c'était la fusée qui était en mouvement.

Mais dans le référentiel de la fusée, c'est le garage qui est en mouvement, et par conséquent ce qui y est simultané ne l'est PAS POUR LE RÉFÉRENTIEL DE LA FUSÉE.

Les événements:

-Fermeture trèèèèèèèèèèèèès brève de la première porte, immédiatement suivie de sa réouverture.

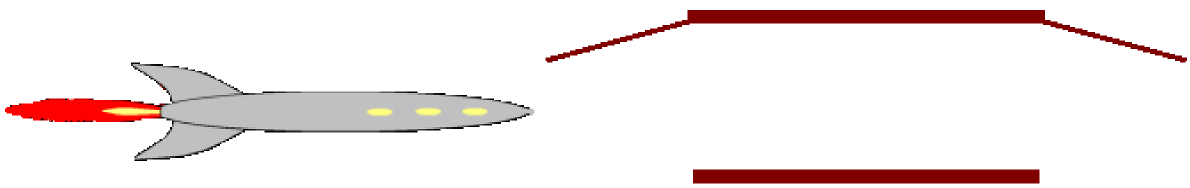
-Arrivage au centre du garage.

-Fermeture trèèèèèèèèèèèèès brève de la deuxième porte, immédiatement suivie de sa réouverture sont simultanés dans le référentiel du garage, DONC ILS NE LE SONT PAS DANS CELUI DE LA FUSÉE, du fait du mouvement relatif (surtout à si haute vitesse).

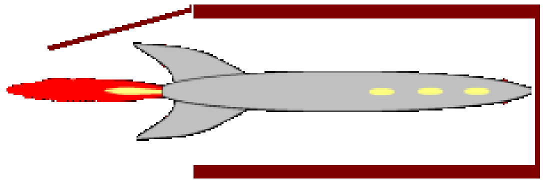
Dans le référentiel de la fusée, **les mêmes événements se produisent**, bien sûr, mais ils ne sont pas simultanés, et même plus, ils ne peuvent pas l'être puisque il y a un mouvement relatif entre les deux référentiels.

La suite d'événements pour le référentiel de la fusée est donc:

1) La fusée s'approche du garage dont les portes sont ouvertes (exactement comme pour l'autre référentiel).

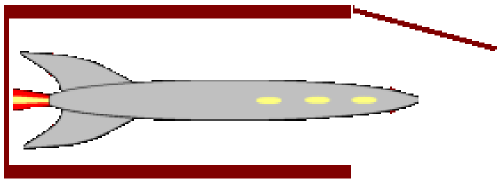


2) La porte arrière (arrière pour le garage, donc devant la fusée) se ferme trèèèèèèèèèèèèès brièvement avant de se rouvrir juste avant que la fusée ne l'atteigne, et alors que l'arrière est encore hors du garage.



3) La fusée passe par le centre du garage avec sa pointe avant, et sa queue hors du garage (pas besoin de dessin pour ça).

4) La porte avant (avant pour le garage, donc derrière la fusée) se ferme trèèèèèèèèèèèèès brièvement avant de se rouvrir juste après que la fusée l'ait dépassée, et alors que l'avant est déjà hors du garage.



SIMULTANÉÏTÉ

Puisque l'on vient de dire que ce qui était simultané dans un référentiel ne l'était pas pour un autre référentiel en mouvement par rapport au premier, précisons un peu la notion de simultanéïté.

Être simultané, c'est être «en même temps», mais qu'est-ce que cela veut-il dire réellement d'être «en même temps»?

On a vu que les objets en mouvement pour nous dans notre espace 3D étaient en fait des objets plus complexes inclinés, mais fixent dans l'espace-temps 4D.

Ce qui nous donne l'impression du mouvement, c'est le fait que nous découvrons les choses progressivement. Nous sommes dans la situation de quelqu'un qui découvrirait un objet tranche par tranche au travers d'une fente en déplacement.

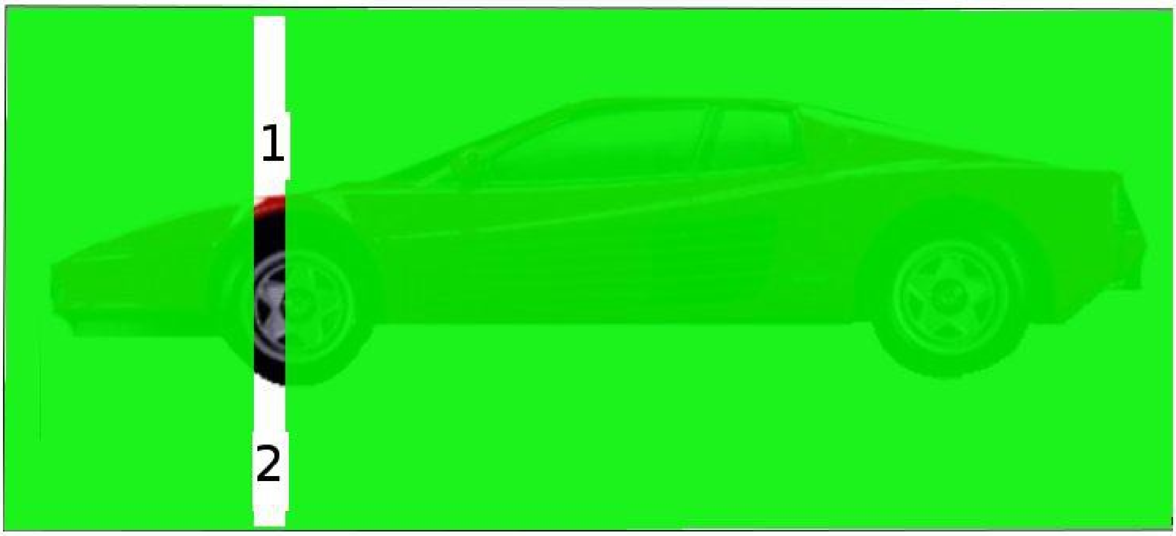
Imaginons donc une voiture cachée par une paroi coulissante percée d'une fente verticale et que l'on découvre tranche par tranche au fur et à mesure du déplacement de la paroi, et de sa fente.

Pour ceux qui ne voient que par la fente, il n'y a pas de voiture, mais une ligne de longueur variable, parfois changeante dans ses détails (couleur, matière, éléments nouveaux comme les poignées de portières) au cours du temps.

Pour quelqu'un qui voit les choses en trois dimensions, il y a une voiture qui ne change JAMAIS de forme......

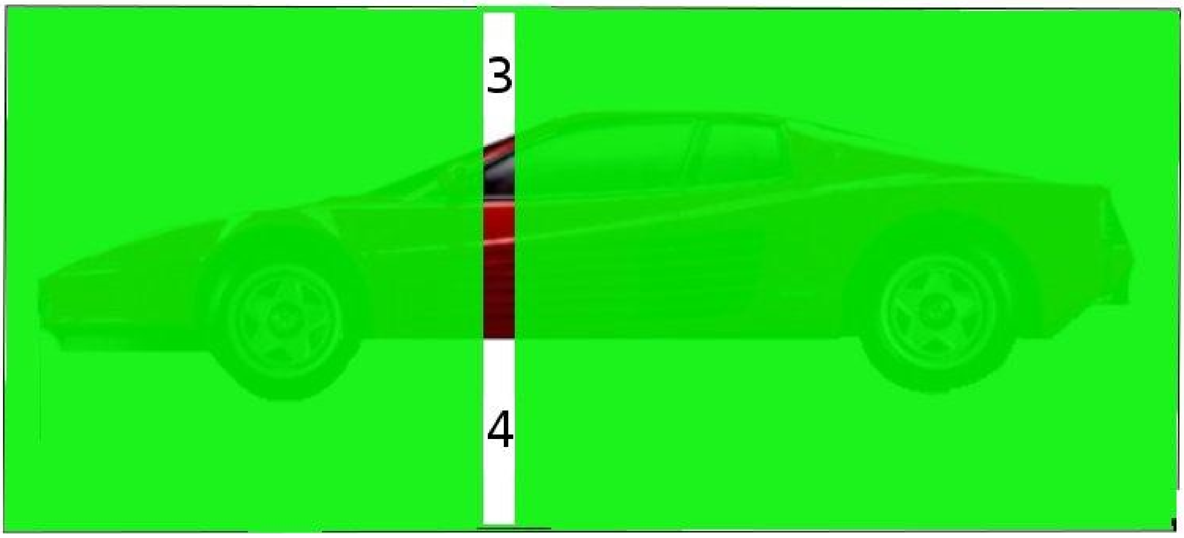
Voici la voiture:

Et la voici avec sa paroi coulissante fendue:



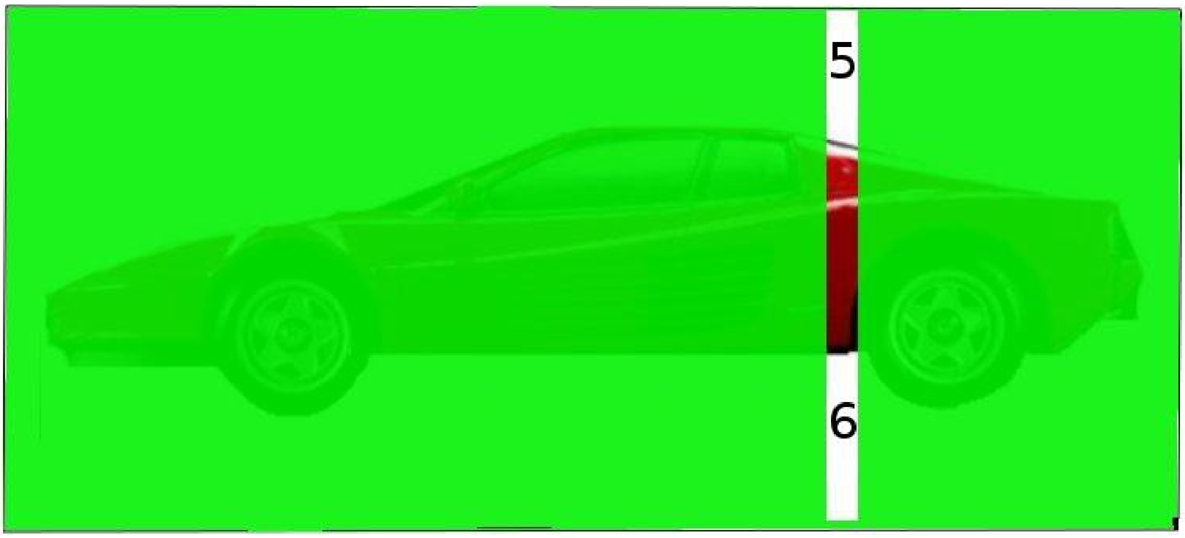
Pour celui qui découvre la voiture par cette fente, image de notre espace 3D progressant et découvrant l'espace-temps 4D «tranche par tranche», les points 1 et 2 sont simultanés, parce qu'ils lui apparaissent simultanément.

Ensuite, la paroi continue à se déplacer vers la droite, entraînant la fente avec elle, et laissant apparaître d'autres parties de la voiture.



Cette fois, ce sont les points 3 et 4 qui sont simultanés.

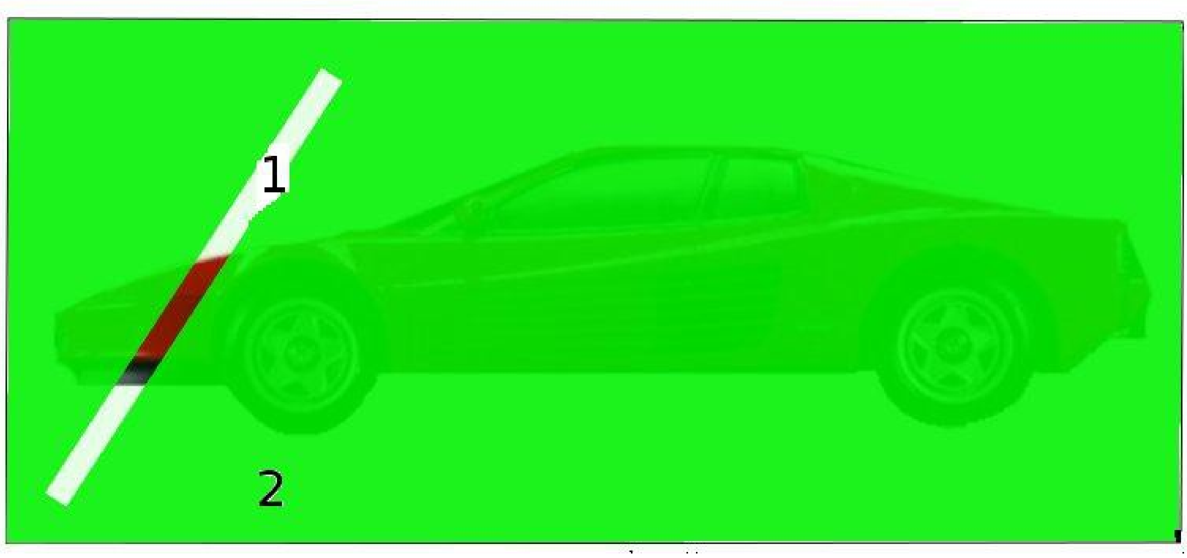
Et, la paroi continue encore à se déplacer vers la droite, entraînant toujours la fente avec elle, et laissant apparaître à nouveau d'autres parties de la voiture.



Et bien évidemment, les points 5 et 6 sont simultanés pour cette image.
Cette fente qui se déplace pour faire découvrir peu à peu la voiture est l'image de l'écoulement du temps pour un observateur.

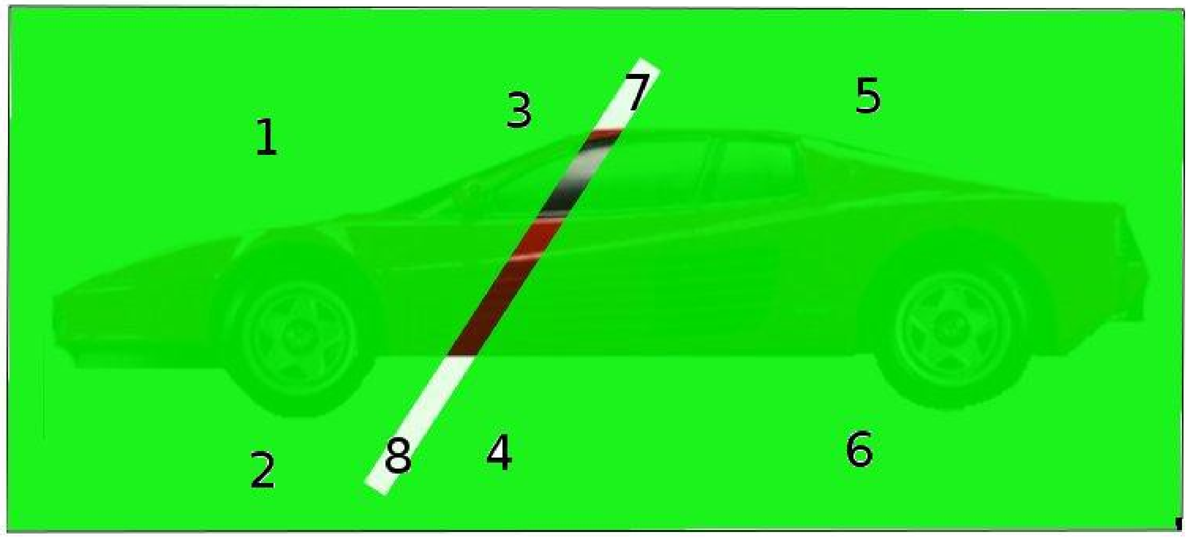
Mais puisque le mouvement correspond à un pivotement dans la dimension temps, un autre observateur en mouvement relatif par rapport au premier, découvrira donc la voiture au travers d'une fente........... INCLINÉE par rapport à celle du premier observateur.

Pour montrer ce que verrait un autre observateur en mouvement par rapport au premier, il faut donc incliner la fente par laquelle il découvre la voiture. Ça donne ça:



Et on remarque tout de suite que dans cet exemple, les points 1 et 2 ne sont plus simultanés..........

Et si l'on poursuit la progression de la fente inclinée.........



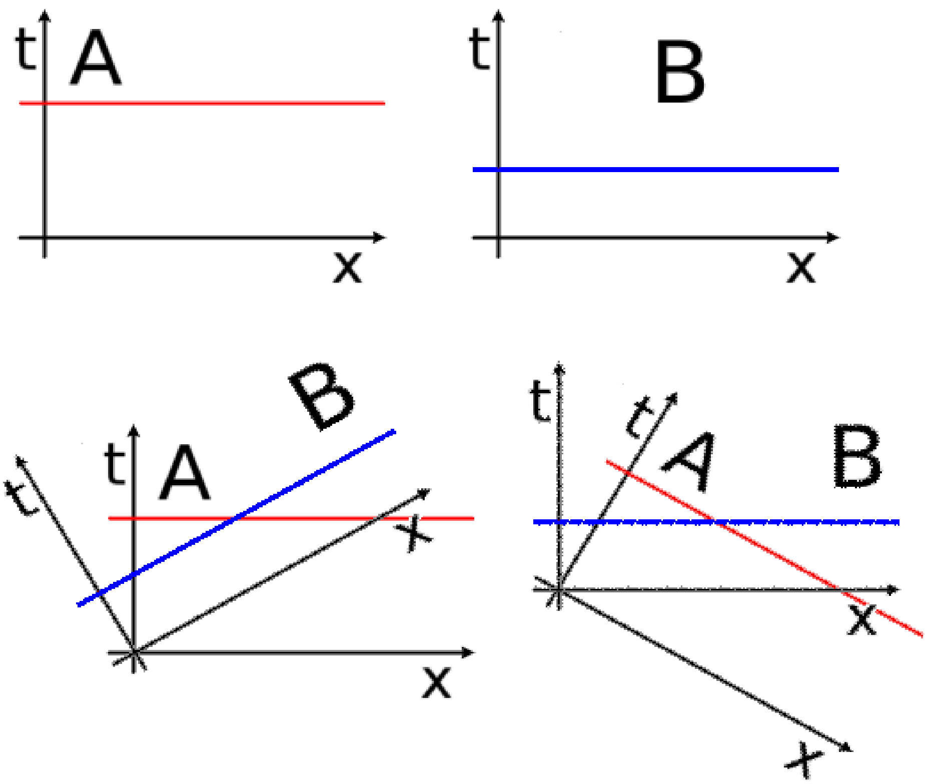
On voit que ce ne sont jamais les point 1 et 2, ou 3 et 4, ou 5 et 6, mais plutôt les points 7 et 8 qui sont simultanés dans cet exemple.

On peut faire aussi une représentation graphique de la simultanéïté.

Être simultané, c'est avoir la même coordonnée de temps, donc être **aligné** sur la même coordonnée de temps.

En haut à gauche: un exemple d'événements simultanés pour le référentiel A (ligne rouge).
S'ils sont simultanés, ils sont FORCÉMENT au même moment, et ont donc la même ordonnée (t), et sont donc FORCÉMENT sur la même ligne PERPENDICULAIRE à t (pour avoir la MÊME projection).

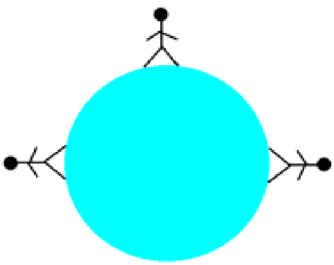
En haut à droite: un exemple d'événements simultanés pour le référentiel B (ligne bleue).
S'ils sont simultanés, ils sont FORCÉMENT au même moment, et ont donc la même ordonnée (t), et sont donc FORCÉMENT sur la même ligne PERPENDICULAIRE à t (pour avoir la MÊME projection).



Mais puisque le mouvement correspond à un pivotement dans l'espace-temps, s'il y a mouvement relatif entre le référentiel A et le référentiel B, il y aura pivotement de l'un vis à vis de l'autre, et donc on retrouvera la situation de l'un ou l'autre des deux dessins du bas (deux référentiels formant un angle).
Le seul événement qui est simultanés dans les deux référentiels est donc le point d'intersection entre la ligne rouge et la ligne bleue.

Encore un mot sur la simultanéïté:

Si Robert se tient en position verticale, que Sylvie se tient en position verticale, et que Philippe se tient lui aussi en position verticale, sont ils tous les trois parallèles? Leur tête pointe-t'elle dans la même «direction» (au sens populaire du terme)?
Ben non, en tous cas, pas FORCÉMENT. S'ils sont très éloignés les des autres, par exemple de plusieurs milliers de kilomètres, ils peuvent même être orientés perpendiculairement les uns par rapport aux autres.

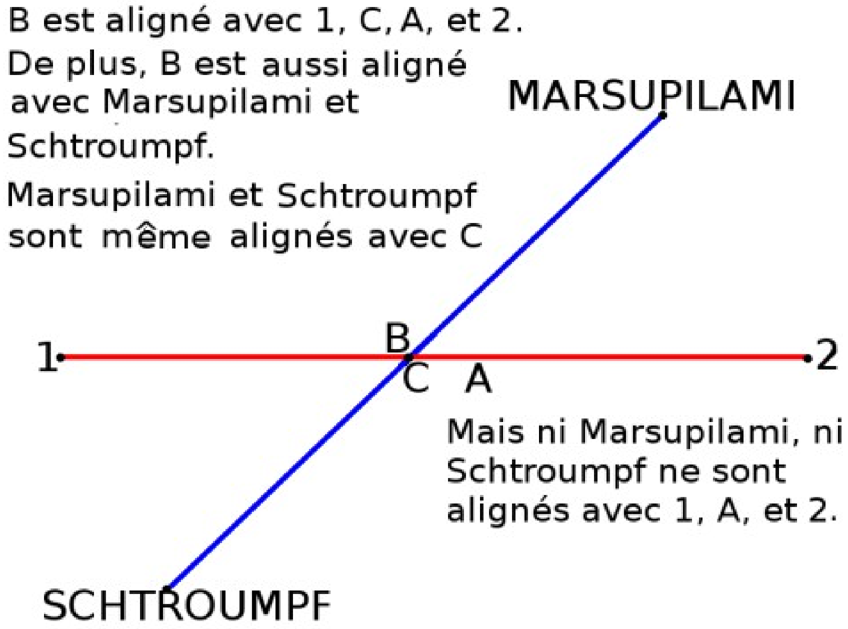


La boule bleue représente la Terre, et les trois petits personnages y sont verticaux puisqu'ils ont les pieds sur terre et la tête vers le ciel, pourtant, avec du recul, on voit qu'ils sont placés dans des directions différentes.

Le problème vient donc de la définition de «vertical». Si l'on traduit «vertical» par «qui a précisément cette direction» (en montrant la direction haut/bas), les trois personnes ne sont pas toutes verticales, mais si l'on traduit le mot «vertical», par: «qui a la direction du centre de la Terre», tout va bien.

De la même façon, le mot SIMULTANÉ ne signifie pas «qui a lieu en même temps», sans définition vraiment précise du mot «temps», mais qui est ALIGNÉ sur la même coordonnée de temps (le temps étant alors une simple dimension au même titre que les trois autres, plus connues, de l'espace-temps).

Dans ce cas, dire que si B est simultané avec C qui est lui même simultané avec A, 1, et 2, implique que B devrait être simultané avec A, 1, et 2, est aussi faux que de dire que si B est ALIGNÉ avec C qui est lui même ALIGNÉ avec A, 1, et 2, implique que B devrait être ALIGNÉ avec A, 1, et 2.
Exemple:



Pour la simultanéïté, c'est pareil, c'est un alignement sur une coordonnée, et comme le mouvement est le résultat d'un pivotement, on se retrouve avec des référentiels qui, comme les deux segments du dessin précédent forment un angle l'un par rapport à l'autre, et seul le point d'intersection (correspondant à deux événements spatialement confondus) est simultané (donc aligné) pour les deux référentiels.

<u>Il est donc tout à fait normal que deux événements géographiquement confondus soient simultanés, alors que d'autres événements, appartenant pourtant au même référentiel ne le soient pas.</u>

Nouvelle petite précision (pour ceux que ça intéresse), le calcul du décalage par rapport à une simultanéïté se fait comme suit:
Si dans un référentiel au repos, deux événements se produisent simultanément, alors ils se produisent aux temps t1 et t2 tels que t1 = t2 et que donc t2 – t1 = 0 (l'écart de temps entre les deux événements est nul, c'est pourquoi ils sont simultanés).

Par contre, dans une autre référentiel, en mouvement par rapport au premier les deux événements ne seront PAS simultanés, et l'écart de temps entre les deux événements (t'2 - t'1) sera de

$$t'2 - t'1 = -\gamma \frac{v}{c^2}(x2 - x1)$$

Avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ et (x2 – x1) = la distance spatiale entre les deux événements.

Le problème de la simultanéïté n'est pas toujours évident pour tout le monde, alors j'ai fait des compléments d'explication sur ces pages:

http://accrodavion.be/Accrodavions/explication-simultaneite-existe

http://accrodavion.be/Accrodavions/Simultaneite-train.html

ON A DONC VU QUE LE MOUVEMENT ÉTAIT COMPARABLE À UNE INCLINAISON DANS L'ESPACE-TEMPS 4D, QUE LES LONGUEURS SE CONTRACTAIENT PAR PIVOTEMENT LORSQU'IL Y AVAIT MOUVEMENT, ET QUE DES ÉVÉNEMENTS SIMULTANÉS POUR CERTAINS NE L'ÉTAIENT POUR D'AUTRE SI UN MOUVEMENT RELATIF EXISTAIT ENTRE LES UNS ET LES AUTRES.
NOUS ALLONS FAIRE MAINTENANT, UN PETIT RETOUR AU MOUVEMENT POUR MONTRER UNE DERNIÈRE CHOSE, À PROPOS CETTE FOIS DE LA VITESSE.

Lorsque l'on représente l'espace-temps 4D comme on l'a fait au début, avec le plan représentant notre monde 3D «écrasé» en 2D, qui se déplace parallèlement à l'axe du temps, on introduit de facto un mouvement permanent de l'ensemble dans la dimension temps.
C'est comme si nous nous déplacions tous dans cette dimension temps.
La question que l'on peut se poser est de savoir à quelle «vitesse» on se déplace dans cette dimension temps. (vitesse avec des guillemets parce que un déplacement dans le temps n'est pas exactement la même chose que dans l'espace).
Pourtant, la dimension temps doit pouvoir être considérée à égalité avec les trois autres dans l'espace-temps 4D, et on doit donc pouvoir définir une sorte de «vitesse» qui soit valable dans n'importe quelle dimension de l'espace-temps 4D.

La vitesse dans notre espace 3D est une variation de distance par unité de temps, et la distance spatiale est par convention, désignée par x.
Une variation (élémentaire) de distance est désignée par dx, et une variation (élémentaire) de temps est désignée par dt. La vitesse dans notre espace 3 D est donc représentée par dx/dt.

Pour l'espace-temps 4D on ne prendra donc pas x (qui représente une distance uniquement dans l'espace 3D) mais plutôt s (qui représente une «distance» d'espace-temps 4D).
La «vitesse» ainsi obtenue s'exprime par ds/dt» (le ds représentant un intervalle élémentaire d'espace temps, et dt représentant un intervalle élémentaire du temps propre du mobile).
Cette «vitesse» dans l'espace-temps 4D est appelée quadrivitesse ou quadrivecteur vitesse (à cause des 4D), et sa norme (sa valeur chiffrée) est fixée à c (la vitesse de la lumière).
Le choix de fixer cette quadrivitesse à c n'est pas du tout arbitraire et se justifie au contraire pleinement (voir fin).

Voici donc, ci dessous, un dessin représentant ce quadrivecteur vitesse de norme de constante c.
ATTENTION, AU DÉBUT DE CETTE PETITE VULGARISATION, J'AI REPRÉSENTÉ L'ESPACE-TEMPS 4D AVEC UN DESSIN DU MÊME «GENRE» QUE CEUX QUI VONT SUIVRE, ET DANS LEQUEL L'ESPACE 3D QUI NOUS EST FAMILIER, ÉTAIT «ÉCRASÉ» EN 2D ET REPRÉSENTÉ PAR UN PLAN (de couleur verte) QUI SE DÉPLAÇAIT LE LONG DE

L'AXE DU TEMPS.
MAIS MALGRÉ LES RESSEMBLANCES, DANS LES DESSINS QUI VONT SUIVRE LES CHOSES SONT DIFFÉRENTES.

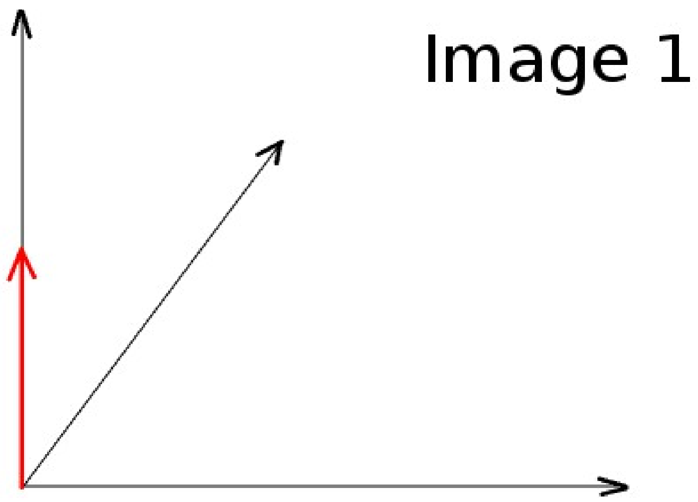
- Si les deux axes horizontaux représentent toujours l'espace 3D «écrasé» en 2D, le plan ainsi dessiné ne se déplace pas, le but ici est différent, il est de parler de la vitesse, pas du rapport entre l'écoulement du temps et la «nature» du mouvement.

- La conséquence de ce non déplacement, c'est que le rapport entre la vitesse et l'inclinaison n'est plus la même: dans le premier cas, un mobile se déplaçant dans l'espace 3D à une vitesse très très proche de celle de la lumière, aurait été représenté avec une inclinaison de près de 45° (équivalence entre le déplacement de l'objet sur le plan et le déplacement du plan lui même le long de l'axe du temps et valant c), tandis que dans ce deuxième cas, une vitesse dans l'espace 3D égale à c serait représentée par un vecteur pivoté de 90° vers la droite, donc jusqu'à l'horizontale.

- La projection du vecteur sur l'axe du temps, donne la «vitesse» d'écoulement du temps pour le mobile selon son propre référentiel, donc son temps propre, et la projection du vecteur sur le plan horizontal donne la vitesse du mobile pour un observateur «au repos». Il y a donc deux référentiels «mélangés», mais pour plus de clarté j'ai préféré ne pas rajouter d'axes.

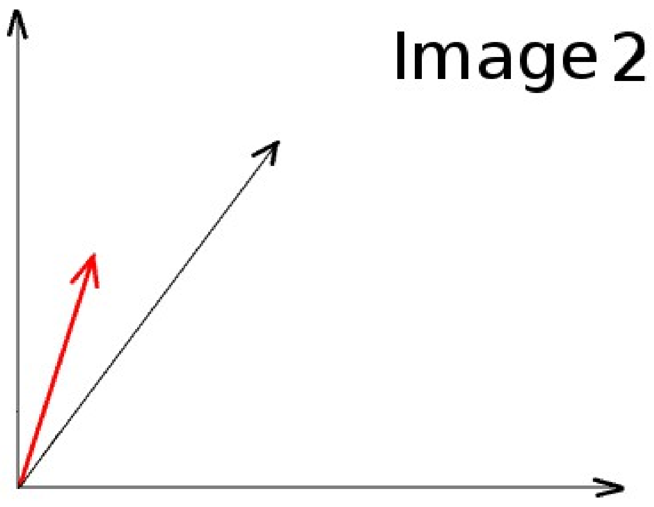
Le vecteur rouge a donc une norme constante c

Lorsque la vitesse dans l'espace 3 D est nulle, il y a donc une sorte de déplacement à c dans la dimension temps, c'est pourquoi, sur le dessin, le vecteur est placé sur l'axe du temps.
Le premier dessin représente donc la situation d'un objet au repos.



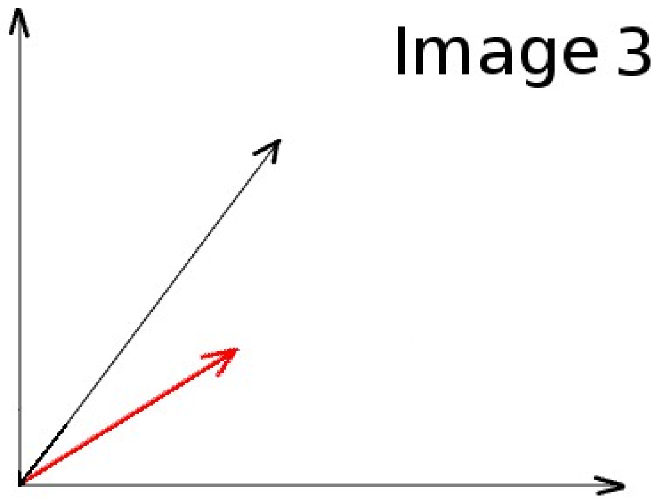
Les deux axes du bas représentaient notre espace 3D, MAIS COMPRIMÉ EN 2D, pour permettre de dessiner l'axe du temps (vertical) sur lequel est tracé le quadrivecteur vitesse (de norme c). Cette situation correspond à une vitesse relative nulle dans l'espace.

Le deuxième dessin représente la situation d'un objet en mouvement relatif (à vitesse modérée) dans l'espace 3D.



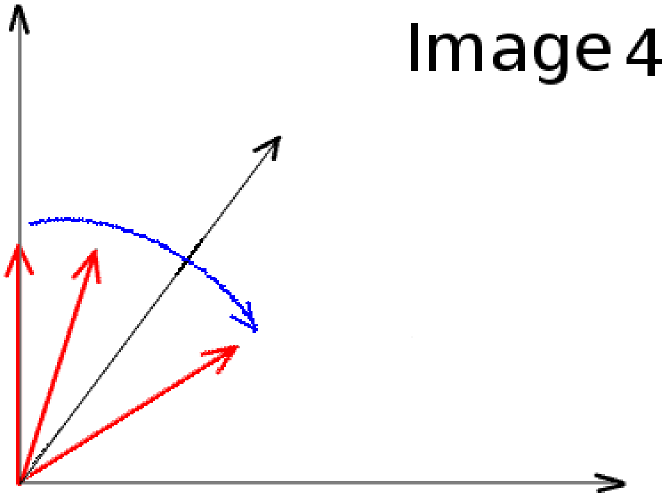
Le quadrivecteur a pivoté légèrement vers la droite, la vitesse correspondante dans l'espace est égale à la valeur de la projection du quadrivecteur sur le plan généré par les deux axes horizontaux.
La projection du quadrivecteur sur l'axe du temps donne une longueur légèrement inférieure à celle du quadrivecteur, montrant ainsi le ralentissement de l'écoulement du temps pour l'objet en mouvement.
La norme (la longueur) du quadrivecteur restant, elle, constante à la valeur c.

Le troisième dessin représente la situation d'un objet en mouvement relatif (à très haute vitesse) dans l'espace 3D.

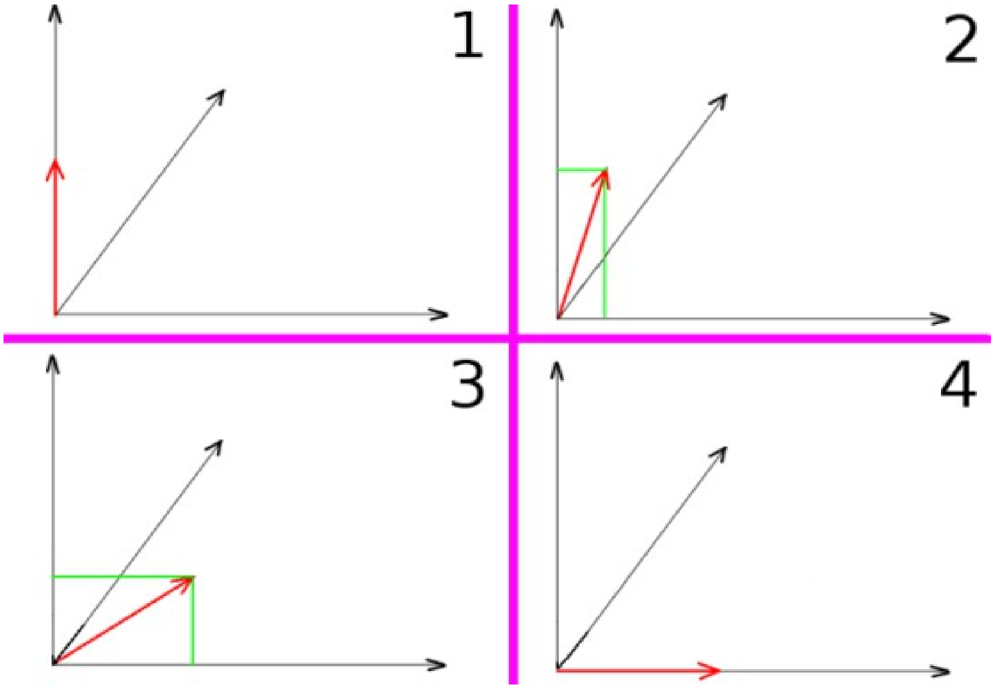


Le quadrivecteur a fortement pivoté vers la droite, la vitesse correspondante dans l'espace est égale à la valeur de la projection du quadrivecteur sur le plan généré par les deux axes horizontaux.
La projection du quadrivecteur sur l'axe du temps donne une longueur très nettement inférieure à celle du quadrivecteur, montrant ainsi le fort ralentissement de l'écoulement du temps pour l'objet en mouvement.
La norme (la longueur) du quadrivecteur restant, elle, constante à la valeur c.

Le quatrième dessin représente une accélération, la flèche bleue (courbée) indiquant la rotation continue de la flèche rouge (quadrivecteur) symbolisée ici par de multiples flèches rouges successives.



La norme (la longueur) du quadrivecteur restant, elle, constante à la valeur c.
On constate donc que:
1) Aller plus vite dans l'espace 3D signifie simplement faire pivoter d'avantage le quadrivecteur sans en changer la norme qui reste constante à c, et que, par conséquent, la vitesse maximum possible dans l'espace est obtenue quand le quadrivecteur est complètement pivoté jusqu'à l'horizontale............ correspondant à une vitesse de c, c'est à dire la vitesse de la lumière qui apparaît donc bien comme la limite.



2) Plus le quadrivecteur pivote, plus sa projection sur l'axe du temps diminue, ce qui montre, par l'image, la diminution de l'écoulement du temps avec la vitesse, et même son arrêt total lorsque la vitesse de la lumière est atteinte (le quadrivecteur est complètement pivoté jusqu'à l'horizontale et par conséquent sa projection sur l'axe du temps est nulle correspondant à un temps nul).

Petite précision pour ceux que ça intéresse.......... encore: Le calcul de la dilatation du temps (ou du ralentissement de son écoulement) se fait comme suit:

$$t=\frac{t'}{\sqrt{1-(\frac{v^2}{c^2})}} \quad \text{Ou} \quad t'=t\sqrt{1-(\frac{v^2}{c^2})}$$

Avec t = le temps de l'objet au repos, et t' = le temps de l'objet en mouvement par rapport au premier.

J'AI ÉCRIT PLUS HAUT QUE LE CHOIX DE C COMME NORME DE LA QUADRIVITESSE ÉTAIT JUSTIFIÉ, VOILÀ POURQUOI:

Notre univers a 4 dimensions, trois d'espace (qui se mesurent en mètre) et une de temps (qui se mesure en seconde), pour une question d'homogénéité, il serait préférable que les 4 dimensions se mesurent toutes en mètres.

Il faudrait donc pouvoir mesurer le temps en mètres, et pour ça il faut de multiplier le temps par une vitesse.
Puisque une vitesse c'est une distance divisée par un temps, en multipliant un temps par une vitesse, on retrouve une distance.

Sauf qu'il ne faut pas choisir n'importe quelle vitesse, il faut au moins qu'elle soit toujours la même pour que la grandeur obtenue ne dépende que du temps et pas, justement, de la vitesse.
On choisira donc c la vitesse constante par excellence.

Aux coordonnées traditionnelles d'espace x, y, et z, on ajoutera ct, tout simplement (ct parce que la vitesse c fois le temps pour obtenir quelque chose qui a la dimension d'une longeur et qui peut donc s'exprimer en mètres).
Nos coordonnées d'espace-temps à 4 dimensions sont donc maintenant ct, x, y, z.

Lorsque l'on veut repérer un point sur un plan, on trace deux axes perpendiculaires, et on projette ce point sur les deux axes, ce qui donne ses coordonnées x et y.
Si l'on veut, maintenant connaître la distance qui sépare ce point de l'origine (là où les deux axes se croisent), et que l'on trace une ligne menant de l'origine jusqu'au point, on s'aperçoit que cette ligne forme, avec la projection du point sur l'axe des x, un triangle rectangle, dont la base est une partie de l'axe des x, la hauteur, la ligne de projection du point sur l'axe des x, et l'hypothénuse le segment tracé entre l'origine et le point.

La distance (d) entre l'origine et le point est donc la longueur de cette hypothénuse, et elle est donc telle que $d^2 = x^2 + y^2$ (Pythagore).
Dans un espace 3D, cela donnerait $d^2 = x^2 + y^2 + z^2$
Et dans notre espace 4D, on aurait : $d^2 = (ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$
Ou plus précisément, on aurait: $s^2 = (ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$ (pour utiliser s comme distance d'espace-temps).
Sauf que si les trois coordonnées d'espace sont naturellement sur des axes perpendiculaires, il est difficile de dire où se trouve l'axe du temps.

Ceux qui ont fait un peu de math, même en secondaire, se souviennent du nombre imaginaire i, dont l'effet est de faire pivoter un vecteur de 90°.
Si je multiplie un vecteur par un nombre quelconque, je retrouve un vecteur de norme différente, peut-être aussi de sens différent (si le nombre est négatif), mais toujours sur le même axe, par contre, si je multiplie le vecteur par i, il garde la même norme mais pivote de 90°. Si je remultiplie encore une fois le vecteur par i, il pivote une nouvelle fois de 90°, ce qui fait 180°. Je retrouve donc un vecteur de même norme, ET SUR LE MÊME AXE, MAIS EN SENS INVERSE (puisque 180°).
En fait je me retrouve avec le même vecteur mais dans l'autre sens, « en négatif », comme si je l'avais multiplié par (-1). Donc lorsque l'on multiplie par i puis encore par i, on obtient (-1), donc $i^2 = -1$.

Si je multiplie ct par i, je le place donc sur un axe imaginaire (pas dans le sens : issus de l'imagination, dans le sens mathématique) qui sera donc par définition perpendiculaire aux autres,

comme il se doit.
Notre $s^2 = (ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$ *devient donc* $s^2 = (ict)^2 + x^2 + y^2 + z^2$ *donc* $s^2 = i^2c^2t^2 + x^2 + y^2 + z^2$
Et puisque $i^2 = -1$*, cela donne :* $-c^2t^2 + x^2 + y^2 + z^2$
Les signes obtenus sont donc - +++ on appelle ça la signature de la métrique.

Remarque: La justification du choix du signe différent pour le temps dans la signature de la métrique (surlignée en vert) est loin de faire l'unanimité, mais il n'en reste pas moins que le signe de la composante temps est TOUJOURS différent des trois autres.
En fait, ça importe peu que le signe soit + ou -, tout ce qu'il faut absolument, c'est que le signe de la coordonnée temps soit différent des trois autres. L'habitude est alors de donner un signe positif au temps et négatif aux autres, ce qui donne une signature comme ça : +- - -
Et donc $s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$

Si l'on est au repos, la distance parcourue est nulle, et on a donc : . $x = 0$, $y = 0$, et $z = 0$.
$s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 – z^2$ devient alors : $s^2 = c^2t^2$
Cela ressemble furieusement à un déplacement à c dans la dimension temps.
Pour que tous les référentiels inertiels dans l'espace-temps soient équivalents, il faut que la mesure de la vitesse soit la même pour tout le monde : c.
Si donc on se déplace dans les dimensions d'espace, il faut qu'on se déplace MOINS dans celle de temps. À la limite, si on se déplace à c dans l'espace, il faut être à l'arrêt dans le temps (c'est le cas du photon).

Maintenant, je trace deux axes perpendiculaires X et Y ; sur l'axe des x (abcisses), je mets ma vitesse dans l'espace, et sur l'axe des y (ordonnées), ma vitesse dans le temps.
Les deux sont limitées à c.
Je pose $c = 1$ pour faciliter mon calcul, et je trace un cercle avec l'origine (croisement des deux axes) comme centre, et 1 (ou c) comme rayon.
Cela ressemble ainsi au cercle trigonométrique.

Quel est, d'après ce système, ma vitesse dans le temps, si je me déplace à c/2 dans l'espace ?
L'abcisse 1/2 correspond, pour le cercle trigonométrique, à un cosinus valant 1/2, donc à un angle de 60°, donc à un sinus valant $\frac{\sqrt{3}}{2}$ que l'on retrouve donc sur l'axe des ordonnées.

Mon graphique me dit donc que si je me déplace à c/2, dans l'espace, je me déplace à $\frac{\sqrt{3}}{2}$ fois c dans le temps.

Quel est, d'après ce système, ma vitesse dans le temps, si je me déplace à $\frac{\sqrt{2}}{2}$ fois c dans l'espace ?

L'abcisse $\frac{\sqrt{2}}{2}$ correspond, pour le cercle trigonométrique à un cosinus valant $\frac{\sqrt{2}}{2}$ donc à un angle de 45°, donc à un sinus valant aussi $\frac{\sqrt{2}}{2}$ sur deux, que l'on retrouve donc sur l'axe des ordonnées.

Mon graphique me dit donc que si je me déplace à $\frac{\sqrt{2}}{2}$ fois c, dans l'espace, je me déplace à $\frac{\sqrt{2}}{2}$ fois c dans le temps.

Quel est, d'après ce système, ma vitesse dans le temps, si je me déplace à $\frac{\sqrt{3}}{2}$ fois c dans l'espace ?

L'abcisse $\frac{\sqrt{3}}{2}$ correspond, pour le cercle trigonométrique à un cosinus valant $\frac{\sqrt{3}}{2}$,donc à un angle de 30°, donc à un sinus valant 1/2, que l'on retrouve donc sur l'axe des ordonnées.

Mon graphique me dit donc que si je me déplace à $\frac{\sqrt{3}}{2}$ fois c, dans l'espace, je me déplace à c/2 dans le temps.

Comparons maintenant ces chiffres avec ceux que donnent les transformations de Lorentz.
En relativité, on ne parle pas de vitesse dans le temps, mais de dilatation du temps. Plus on va vite, plus le temps se dilate, ce qui signifie qu'une seconde pour un voyageur relativiste devient, en se dilatant, donc en « grandissant », comparable à un siècle, par exemple, pour un copain resté sur Terre.
Cela revient bien sûre au même de dire que les secondes deviennent plus longues, que de dire que le temps ralenti, ou que l'on se déplace moins vite dans le temps. Sauf que du point de vue expression mathématique, c'est un peu l'inverse, un temps dilaté donne un grand chiffre, un temps ralenti donne un petit, mais le résultat est le même.

L'expression du temps avec les transformations de Lorentz est $\frac{t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$, et elle correspond à une dilatation.

Si l'on voulait (au contraire) exprimer le temps sous forme d'une « vitesse » d'écoulement, il faut utiliser $t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ tout simplement.

Reprenons alors mes exemples pour des vitesses de c/2, $\frac{\sqrt{2}}{2}$ fois c, et $\frac{\sqrt{3}}{2}$ fois c.

Si v = c/2, alors v² = c²/4, et l'expression $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ devient $\sqrt{1-\frac{c^2/4}{c^2}}$ donc $\sqrt{1-\frac{c^2}{4c^2}}$

donc $\sqrt{1-1/4}$ donc $\sqrt{3/4}$ donc $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ce qui est EXACTEMENT la même valeur que celle obtenue précédemment par l'autre méthode.

Si v = $\frac{\sqrt{2}}{2}$ fois c, alors v² = (2/4)*c², soit c²/2, et l'expression $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ devient $\sqrt{1-\frac{c^2/2}{c^2}}$

donc $\sqrt{1-\frac{c^2}{2c^2}}$ donc $\sqrt{1-1/2}$ donc $\sqrt{1/2}$ donc $\sqrt{2/4}$ donc $\frac{\sqrt{2}}{2}$ ce qui est EXACTEMENT la même valeur que celle obtenue précédemment par l'autre méthode.

Si v = $\frac{\sqrt{3}}{2}$ fois c, alors v² = (3/4)*c², et l'expression $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ devient $\sqrt{1-\frac{3/4c^2}{c^2}}$ donc

$\sqrt{1-\frac{3c^2}{4c^2}}$ donc $\sqrt{1-3/4}$ donc $\sqrt{1/4}$ donc 1/2, ce qui est EXACTEMENT la même valeur que celle obtenue précédemment par l'autre méthode.

Les deux voies donnent le même résultat, ce qui semble bien confirmer à la fois que le choix de la constante c comme vitesse multipliant le temps dans l'expression des 4 dimensions était judicieux, et que le déplacement à c dans la dimension temps est une bonne idée.

Une application de la relativité, le jumeaux voyageur.

Une bonne description ici: http://freesciences.be/dossiers.php