POUR TENTER DE CORRIGER QUELQUES MÉPRISES EN RELATIVITÉ.

Les incompréhensions et méprises concernant la théorie de la relativité sont nombreuses, mais, selon mon expérience personnelle, (d'autres ont peut-être un ressenti différent), je pense que la principale cause de ces incompréhensions vient d'une approche trop limitée à ce que l'on appelle les transformations de Lorentz*, et le fameux «paradoxe» des jumeaux. Surtout si ce dernier est simplement «raconté» comme une histoire étonnante.

(*)Comme celles ci, par exemple:

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

Pour les durées….

Ou celle là: $\Delta l' = \Delta l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ **ou** $\Delta l'^2 = \Delta l^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$

Pour les distances ou longueurs…

C'est (trop) connu….. Mais tel quel, ça ne sert à rien...

Elles sont souvent utilisées aussi pour «prouver» que la vitesse de la lumière est une limite infranchissable, et même inatteignable par un objet possédant une masse. Sauf que, sans comprendre le mécanisme réel qui est à l'origine de ce fait, ça ne prouve en fait rien.

Les «mécanismes» qui sont derrière ces histoires de vitesse, de temps, de distance et de jumeaux sont, je crois, bien plus faciles à approcher en les «voyant» plutôt qu'en les lisant (d'autant que la théorie de la relativité EST géométrique à la base). Et c'est cet aspect plus «visuel» que je vais utiliser.

Je vais quand même commencer par un peu d'histoire, parce que ça aussi ça peut aider.

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 cette 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).

Pour résumer grandement, on peut dire que ça commence surtout avec un physicien du 19ième siècle qui s'appelle Maxwell.

Il découvre, en étudiant l'électromagnétisme, et surtout en le formalisant mathématiquement, qu'il doit exister des ondes électromagnétiques[1] et que ces ondes doivent aller à une certaine vitesse très précise et constante que l'on représente par la lettre «c» (pour «célérité», qui signifie «vitesse», tout simplement).

(1) C'est d'ailleurs en apprenant que la vitesse de la lumière a été mesurée à cette valeur (ou presque à cette valeur compte tenu de la (faible) précision des instruments de l'époque), qu'il en déduira que la lumière est une onde électromagnétique.

Petite parenthèse informative facultative (facultative pour les allergiques aux maths) écrite en bleu pour faciliter son «évitement» éventuel:

En fait, il détermine que cette vitesse doit obligatoirement, mathématiquement et donc logiquement valoir:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Donc: C = 1 sur racine carrée de ε_0 μ_0

Avec ε_0 qui est la permittivité électrique du vide, et μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

Remarque: Les termes permittivité, et perméabilité signifient à peu près la même chose: la «facilité» avec laquelle le champ électrique (pour la permittivité) ou le champs magnétique (pour la perméabilité) peut traverser un milieu.

Exemples: la permittivité électrique de l’eau est de 78,5 fois 8,854187 10^{-12} F/m, soit environ 700 10^{-12} ou 0,7 milliardièmes de farads par mètre (F/m), celle du marbre est de 4 fois 8,854187 10^{-12} F/m, soit environ 35,4 10^{-12} ou 0,0354 milliardièmes de farads par mètres (F/m), et celle du vide vaut tout simplement 8,854187 10^{-12} F/m (farads par mètre), soit 0,008854187 milliardièmes de farads par mètres (F/m).

La perméabilité magnétique du fer vaux environ 6 . 10^{-3} H/m celle du Mu métal environ 0,12 H/m, et celle du vide $4\pi\times10^{-7}$ H/m soit environ 1,2 millionnième de H/m (Henry par mètres).

Bref, il s’aperçoit que les ondes électromagnétiques existent et se propagent à une vitesse qu’il nomme «c» et qui ne dépend QUE de deux grandeurs (permittivité électrique du vide $\varepsilon 0$, et perméabilité magnétique du vide $\mu 0$.), grandeurs logiquement(2) indépendantes de tout mouvement.

(2)Parce que l’équation ne contient aucun lien avec une quelconque vitesse, mais uniquement ces deux grandeurs $\varepsilon 0$ et $\mu 0$).
Et si cette vitesse est mathématiquement et donc logiquement indépendante de la vitesse de celui qui la mesure, et donc de son mouvement….. Elle est donc (une) constante….

La vitesse de la lumière doit donc être constante............ mais constante par rapport à quoi?
Ben **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, à cette époque, de poser l'existence d'un éther (qui remplira ce rôle de milieu matériel).

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 pensé, 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 invariante 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. Ce qui, au passage, est bien plus conforme à ce que l'on doit déduire de l'équation de Maxwell:
$C = 1/ \sqrt{\varepsilon 0}\ \mu 0$ qui ne contient aucune mention de vitesse ou de mouvement.

(*)Un référentiel inertiel, c'est, par exemple, tout objet pouvant servir de référence pour la mesure d'un mouvement, et qui ne soit, lui même, soumis à aucune accélération.

La démarche d'Einstein est aussi influencée par quelque chose qui lui semble incontournable, à savoir que les lois de la physique ne dépendent pas du référentiel, ou, pour le dire autrement: Les lois ne peuvent changer simplement parce que l'on est en mouvement, d'autant qu'être en mouvement est déjà en soi une chose bien relative (et ce, depuis Gallilée).

Et donc justement, l'enjeu est bien là parce que les explications alternatives avaient beaucoup de difficultés à garantir l'indépendance des lois de l'électromagnétisme par rapport au mouvement.

Einstein va donc «poser» que la vitesse «c» est toujours constante pour tout le monde quelle que soit son mouvement. On dit alors qu'elle est **invariante pour tous les référentiels inertiels.**

Cette invariance de c pour tous les référentiels inertiels, n'a peut-être l'air de rien à première vue, mais ça implique des choses tout à fait surprenantes pour ce que l'on appelle le «sens commun».

Ce sens commun, trop influencé par notre vécu quotidien, qui finit par nous sembler être l'évidence la plus élémentaire, alors que la réalité est toute autre..

Par exemple et entre autres, il apparaît en conséquence qu'il n'existe pas de simultanéïté absolue valable pour tout le monde(3), et que le temps et l'espace sont liés.
(3) Voir: https://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_du_train

Ce problème lié à la (non) simultanéïté est très dérangeant pour certains philosophes. En effet, on peut imaginer alors des expériences de pensée qui heurtent le «sens commun».
Dire que deux événements simultanés pour un observateur ne le sont pas pour un autre, en mouvement par rapport au premier, ce n'est pas anodin. Dans l'expérience de pensée dite du «paradoxe du train», on peut adopter une approche qui montre bien le problème.

Imaginons un homme (on dira un observateur) sur un quai de gare.

Aux deux extrémités de ce quai, il y a des lampes d'éclairage.

L'homme, donc l'observateur, sur le quai voit les deux lampes s'éclairer en même temps.

Il en déduit naturellement, que, puisqu'il se trouve juste au milieu du quai et que donc, une même distance le sépare de chaque lampadaire, les deux lampes se sont allumées exactement au même moment, une infime fraction de seconde avant qu'il ne les voie.

Un autre homme (un autre observateur) se trouve dans un train qui passe, sans s'arrêter ni même ralentir, dans la gare. Il voit, lui aussi, les deux lampes s'allumer en même temps alors qu'il se trouve juste en face de l'observateur sur le quai.
Sauf que, pour lui, les choses sont différentes.

Pour lui, comme pour l'observateur sur le quai, les deux lampes se sont allumées une fraction de seconde avant qu'il ne les voie, mais, à la différence de l'observateur sur le quai qui, lui, ne bougeait pas, l'observateur du train ne se trouvait pas au même endroit lorsque les lampes se sont allumées puisqu'il s'est déplacé pendant le temps de trajet des rayons lumineux des deux lampes.

Le train se déplaçant le long du quai, il était forcément plus près de l’une des lampes et plus loin de l’autre au moment de l’allumage.

Depuis Gallilée, on considère comme vrai que le mouvement est strictement relatif (= relativité Gallileénne).

En d’autres termes, il n’y a strictement aucune différence entre dire que l’objet A se déplace vers l’objet B, et dire que c’est l’objet B qui se déplace vers l’objet A.

Le fait que l’on soit ici dans un cas apparemment particulier (le train roule <u>sur</u> la Terre des milliards de fois plus grosse que lui) ne peut en aucun cas justifier un changement de loi, on peut donc dire aussi bien que le train se déplace vers telle lampe ou que c’est telle lampe qui se déplace vers le train.

Il faut aussi ajouter que tout observateur est au repos (à l’arrêt) par rapport à lui même (on dit: «au repos dans son propre référentiel»).

De tout cela, on doit conclure que, pour l’obervateur du train, c’est le quai et les lampes qui se déplacent, pas lui.

Cette approche est non seulement légitime, mais obligatoire pour respecter ce que l’on appelle la «relativité Gallileénne», reconnue depuis 400 ans.

Tout cela pour dire, pour enfin dire, que selon le point de vue de l’observateur du train, les lampes sont en mouvement, et elles ont émis leur lumière à un instant où l’observateur du train n’était pas encore juste en face de l’autre observateur, il n’était donc pas (encore) pile au milieu du quai.

Ce qui implique que, dans le référentiel de l’observateur du train, les rayons venant de l’une et l’autre lampes ont parcouru des distances différentes.
Sauf, que, on l’a dit dès le début, l’homme dans le train les <u>voit s’allumer en même temps</u>.

Si il les voit s’allumer en même temps, c’est que leurs lumières arrivent en même temps.

Et si elles arrivent en même temps alors qu'elles ont parcouru des distances différentes, il n'y a que deux solutions:
-soit leurs vitesses sont différentes,
-soit elles n'ont pas été émises au même moment.

Dès lors que la théorie de la relativité d'Albert Einstein affirmait que la vitesse de la lumière était invariante dans tous les référentiels, il fallait absolument choisir la deuxième solution et donc que les deux lampes qui s'étaient allumées simultanément selon l'observateur du quai, se soient allumées successivement selon l'observateur du train….

Et c'est là que les philosophes «font des bonds» parce que, pour eux, et quoi que l'on fasse, il faut alors qu'au moins une des deux lampes soient allumée pour l'un des observateurs à un instant où elle est éteinte pour l'autre observateur, bref que ce qui existe pour l'un n'existe pas pour l'autre…..

Sauf que ce paradoxe ne marche que s'il existe un temps commun aux deux observateurs. Mais alors comment imaginer un monde où une différence de temporalité de ce genre soit logique?

C'est un dénommé Hermann Minkowski qui «sauvera» cette logique en montrant que tout cela prend vraiment sens dans **<u>un espace-temps à quatre dimensions un peu spécial que l'on appellera «espace-temps de Minkowsky».</u>** Et il a non seulement raison, mais c'est justement cet aspect là qui permet aussi de mieux comprendre.

Tout ça c'est très bien mais c'est quoi cet espace-temps de Minkowsky?

Tout de go, ainsi, c'est un peu trop compliqué, je crois, alors on va faire un détour par un espace-temps **totalement inventé pour l'occasion**, mais qui lui ressemble suffisamment pour servir d'outil pédagogique.

Petite précision préalable: un espace-temps comme celui dont on parle, ce n'est **<u>pas</u>** un espace **<u>plus</u>** un temps, mais c'est un **ensemble espace <u>et</u> temps <u>uni</u> dans un même «objet».** Dans un tel espace-temps, les dimensions d'espace et de temps <u>ne sont pas séparables</u>.

Prenons l'exemple d'un volume.
Un volume possède trois dimensions formant un tout non séparable.
Il ne viendrait à l'idée de personne de dire qu'un volume est une surface plus une hauteur.

De la même manière, un tel espace-temps n'est donc **pas** un espace **plus** un temps, mais bien un ensemble inséparable où le temps n'est qu'une des dimensions du tout au même titre que les autres.

Pour tenter de faire un peu comprendre le concept d'espace-temps en relativité, je vais d'abord décrire un espace-temps très spécial, **un espace-temps qui n'existe pas en vra**i, mais qui, je le crois, facilitera la compréhension de la relativité, parce qu'il ressemble à celui de Minkowsky, parce qu'il présente sur beaucoup de points, la même logique.

Dans cet espace-temps, je vais complètement **«spatialiser**» le temps. Ce sera donc un espace-temps très intuitif dans lequel l'une des dimensions spatiales sera le temps lui même.

Dans cet espace-temps, des concepts de temps et de longueur ressemblant à ceux de la relativité apparaîtront naturellement et même une simultanéïté «relative». Bref, tout s'y passera un peu comme dans la «vraie» relativité, avec des différences que je mentionnerai ensuite

Notre espace-temps a 4 dimensions (au moins) mais personne au monde ne peut s'en représenter plus de trois.

À ce niveau, je crois utile, au moins pour certains, de faire une petite «digression» au sujet du concept de «dimension».
Poutquoi? Parce que j'ai pu m'apercevoir, par le passé, que le concept de dimension utilisé en physique échappait totalement à certains.

Le mot «dimension», dans la vie de tous les jours, est utilisé pour désigner le résultat de la mesure des longueurs, largeurs et hauteurs d'un objet.

Sauf que, en physique (et en math aussi d'ailleurs), les choses sont différentes.
Le mot «dimension» n'y est pas forcément utilisé pour désigner la valeur chiffrée d'une longueur, d'une largeur ou d'une hauteur.

Lorsque l'on parle d'un espace à **trois** dimensions, on parle d'un espace dans lequel existent **trois** directions perpendiculaires dans lesquelles il est possible de s'étendre et/ou de se déplacer. Peu importe la valeur chiffrée que donnerait une mesure de distance dans ces trois directions, seul compte le fait que le nombre de directions perpendiculaires possibles soit de **trois**.

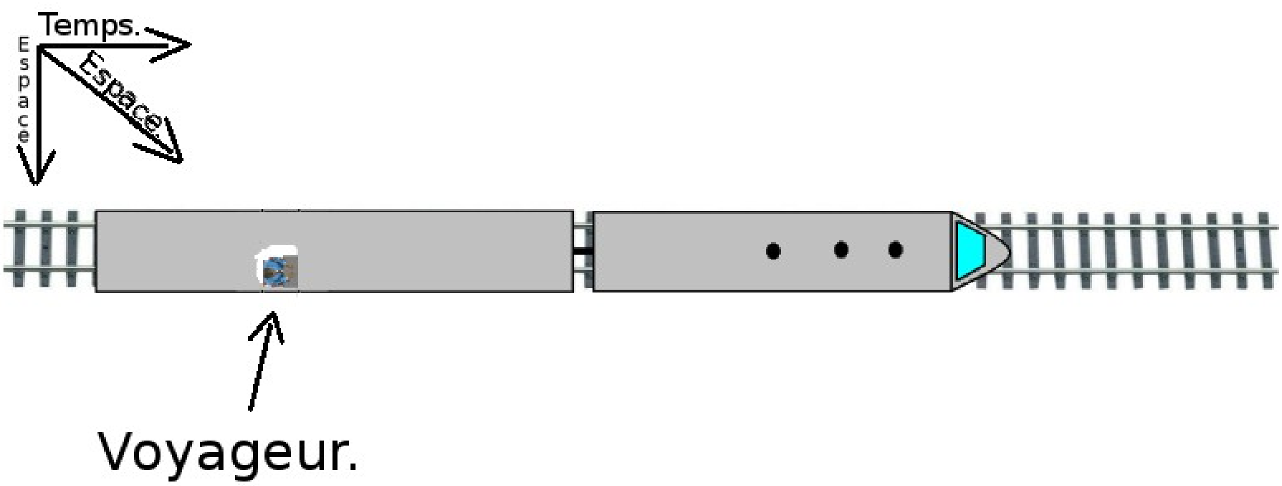
Ou, pour le dire autrement, un espace à **une** dimension, c’est une simple **ligne** d’épaisseur obligatoirement nulle; un espace à **deux** dimensions, c’est une **surface**, elle aussi d’épaisseur nulle, et un espace à **trois** dimension, c’est un **volume**, point barre et rien d’autre, peu importe la taille de tout cela.

Je disais donc, juste avant cette digression que notre espace-temps a 4 dimensions (au moins) mais personne au monde ne peut s’en représenter plus de trois.

Cet espace-temps que je vais présenter n’en comportera donc que 3 mais il n’est pas trop difficile d’extrapoler ensuite.

Imaginons nous donc à bord d'un train qui roule, regardant par la fenêtre le paysage qui défile.

Il s’agit d’un train très spécial puisque, dans cet espace-temps à 3 dimensions, on est obligé de ne garder que deux dimensions d'espace afin d'en conserver une pour le temps (pour faire seulement trois en tout).



Même dans la «vraie vie», lorsque je ne me déplace pas dans l'espace «tout court», j'ai quand même une **trajectoire** dans l'espace-temps, **c'est un peu comme si je me déplaçais dans le temps.**

Et si, en plus, je me déplace (aussi) dans l'espace «tout court», ben ma trajectoire dans l'espace-temps change mais continue forcément d'exister.

Cette trajectoire, qui donc je le rappelle, existe toujours, que je sois ou non en mouvement, s'appelle ma **ligne d'univers**.

Revenons donc à notre train, ou plutôt dans notre train.

Je peux décider des déplacements que j'effectue dans l'espace «tout court», pas de mon «déplacement» (avec guillemets) dans le temps.

Le plus évident est donc d'identifier, dans mon exemple du train, le déplacement que je ne maîtrise pas (celui du train qui «m'emporte») avec le temps.

On a donc un train qui roule et son déplacement correspond à l'écoulement du temps.

Ou d'une manière symétrique, la succession de «choses» que je vois défiler au travers de la fenêtre, c'est la succession des événements du temps qui passe.

J'ai donc un espace-temps à trois dimensions dans lequel le déplacement du train (ou celui du paysage), c'est le temps, et les autres dimensions (vers le haut et le bas, pour l'une et latéralement vers la gauche et la droite, pour l'autre) sont celles d'espace.

En regardant par la fenêtre du train, on voit donc «défiler» les événements les uns après les autres, et c'est ce «défilement» qui est l'écoulement du temps.

Je ne peux pas voir le futur ni le passé, tout ce que je vois c'est le présent (même si l'information a mis du temps à me parvenir et que donc elle «date» un peu, c'est bien dans le présent que je la reçois).

Mais qu'est-ce donc que le présent dans un tel espace-temps?

Ben très logiquement et d'une manière applicable dans tous les cas, le présent est le moment qui n'est déjà plus du passé, mais pas encore du futur.

Comment traduire ça dans notre exemple du train?

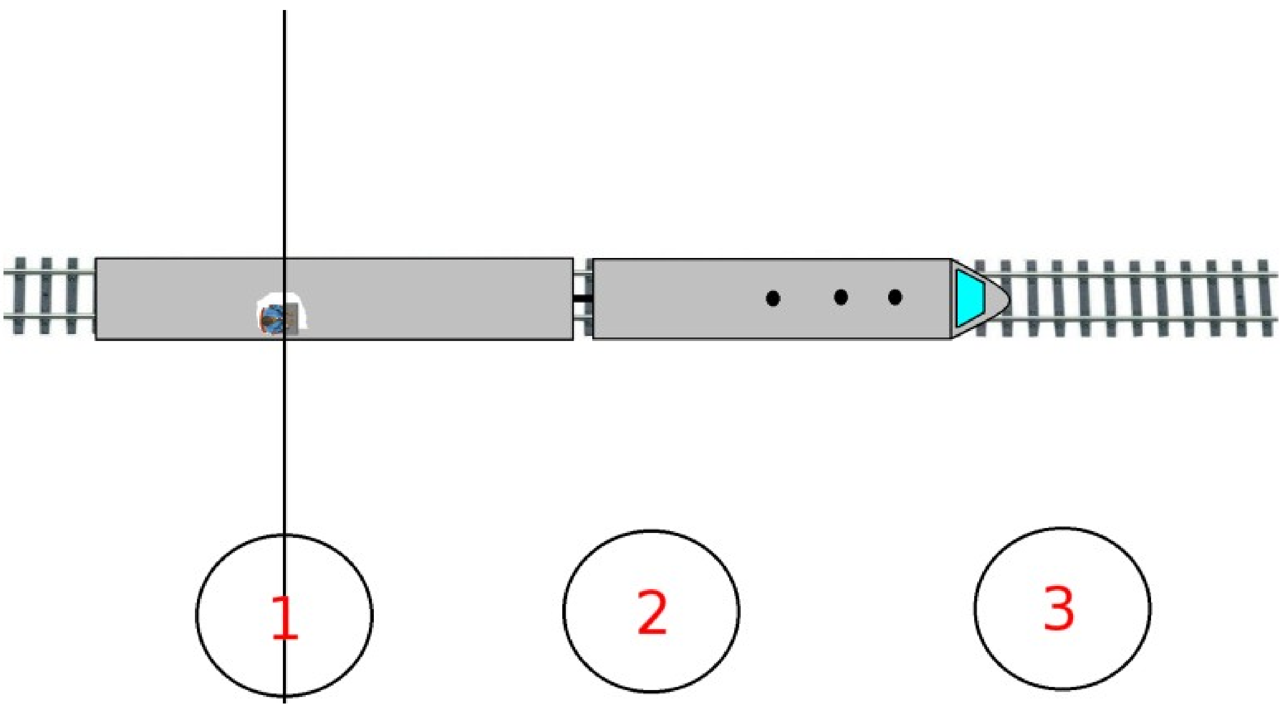
Facile: les événement futurs sont ceux vers lesquels se «dirige» le train ou symétriquement, ce sont les événements qui «viennent» vers nous, qui «s'approchent» de nous, et les événements passés sont ceux dont s'éloigne le train ou symétriquement, ce sont les événements qui s'éloignent de nous.

Le présent, ce sont donc les événements qui ne s'approchent plus mais ne s'éloignent pas encore, ce sont donc les événements qui se trouvent «au plus près» de moi dans l'exemple du train (Ils se sont approchés jusque «au plus près» et vont ensuite s'éloigner).

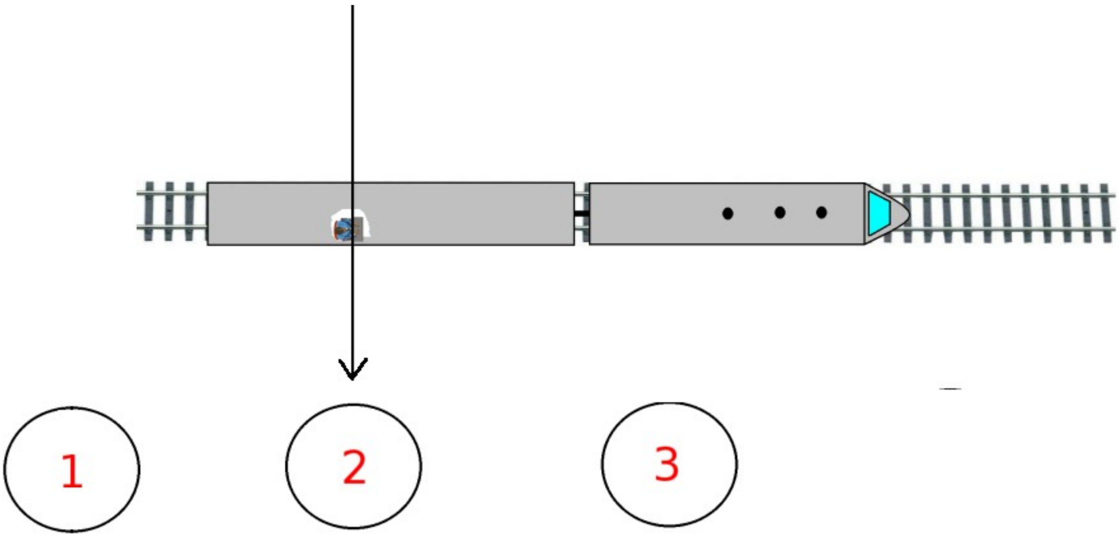
Si l'on se représente bien la situation, les «événements» se rapprochent jusqu'à être arrivés «à ma hauteur», c'est à dire sur une **<u>perpendiculaire</u>** à ma trajectoire (je suis dans un train), passant par moi.

<u>Dans cette description là, dans ce modèle d'espace-temps là, les événements présents sont donc ceux qui se trouvent dans un plan perpendiculaire à ma trajectoire.</u>

Dans l'exemple illustré par le dessin ci dessous, le «présent» du voyageur est l'événement «1».



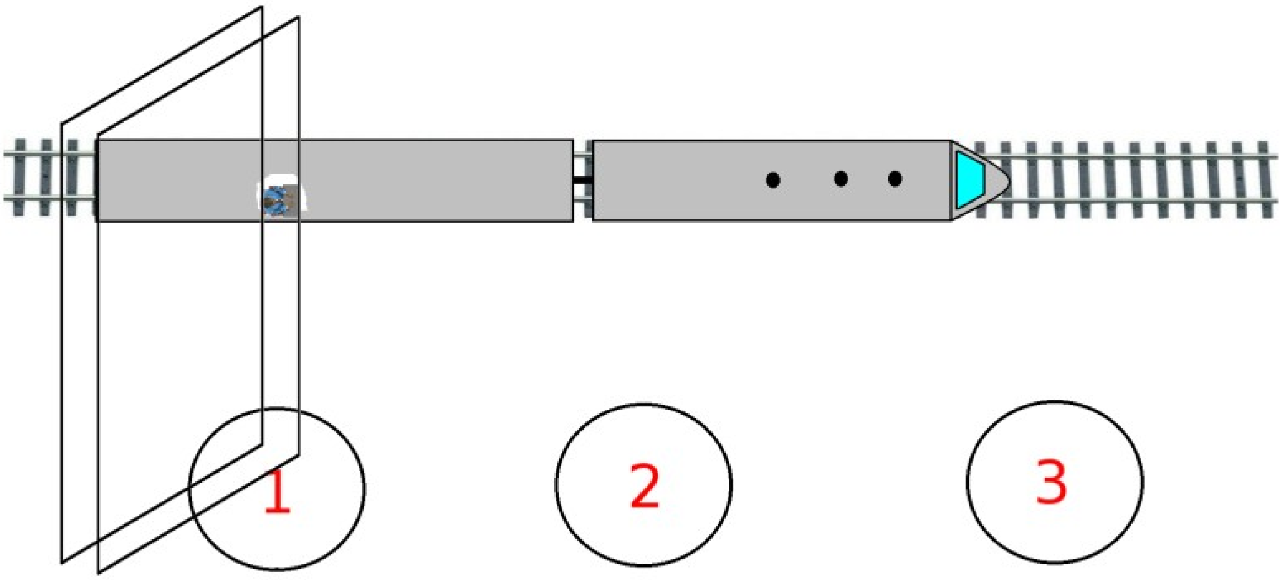
Puis 2, etc...



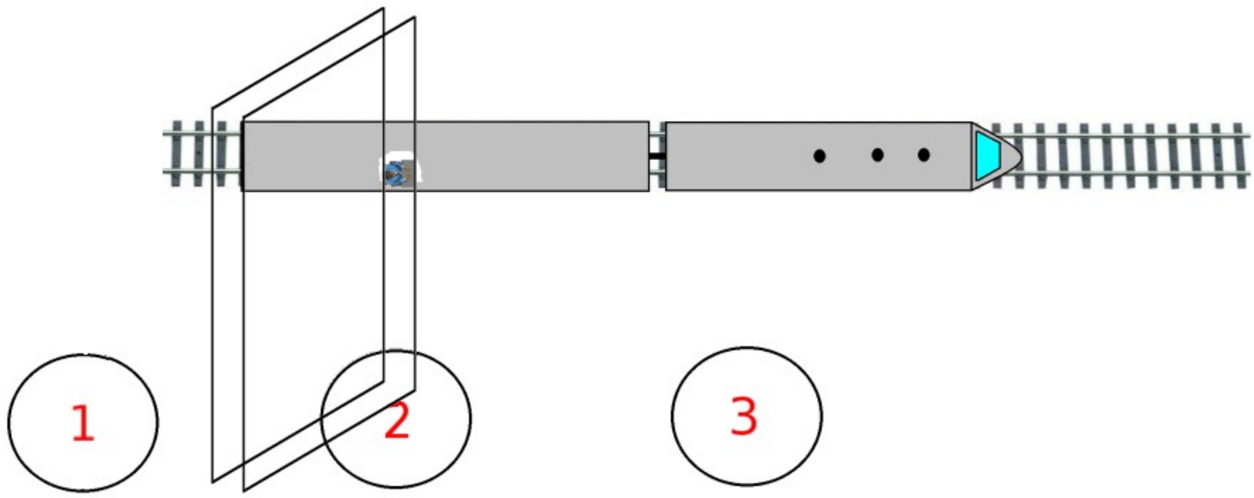
Le passager regarde donc par la fenêtre du train, et voit «défiler» les événements les uns après les autres.
De par son champs de vision large, il devrait pouvoir voir en même temps plusieurs événements, normalement successifs, mais pas de chance, il est équipé d'œillières si performantes qu'elle ne permettent de voir qu'un seul événement à la fois..

Le plus facile, pour symboliser les œillières, c'est d'enfermer le voyageur entre deux «plaques» opaques, une devant lui, et l'autre derrière lui afin de limiter son champs de vision à ce fameux plan perpendiculaire.

Il passe donc ainsi devant l’événement numéro 1.



Et ensuite, l’événement numéro 2 etc...



Reste.... à tourner la tête d'un côté ou de l'autre.... Ça ne permet toujours pas de voir plusieurs événements consécutifs en même temps, mais ça permet au moins de voir dans le futur, ou de (re)voir le passé.....

Encore pas de chance, il lui est impossible de tourner la tête......

Et si c'était le train entier qui pouvait tourner?.......

Le déplacement du train, c'est l'écoulement du temps, le déplacement dans l'espace c'est ou ce serait un déplacement selon une perpendiculaire à la direction du train, donc vers le haut ou latéralement, sauf qu'un train c'est assez fermé de ce côté là.....

Et si à la place d'être dans un train, j'étais (situation bien plus libre) un nageur emporté par le courant (ça, c'est le temps) au milieu d'un fleuve très large....

Je pourrais décider de nager en direction d'une des berges (donc déplacement latéral, donc déplacement dans l'espace), tout en continuant à être emporté par le courant du fleuve.

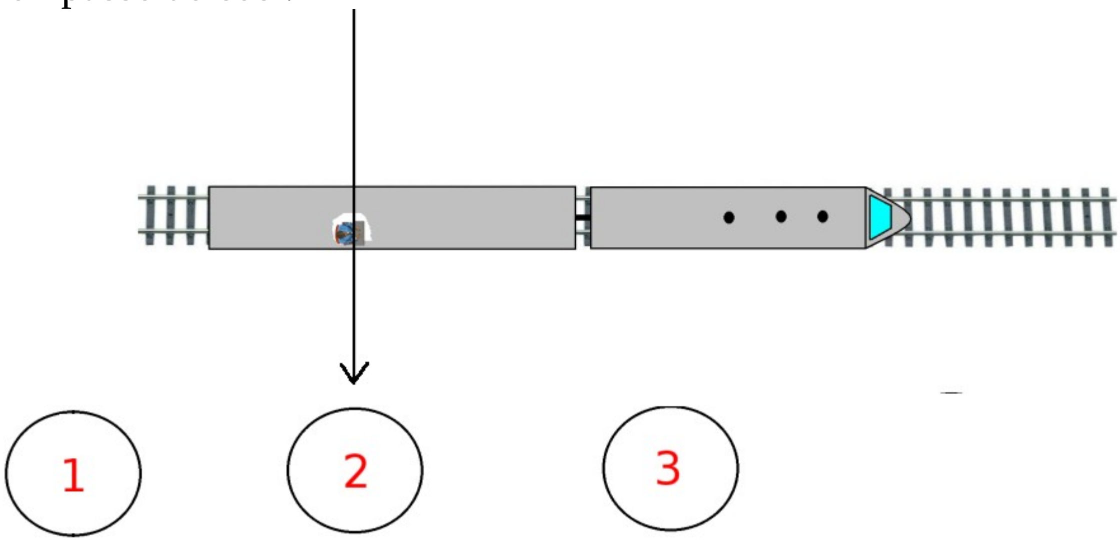
Ma nouvelle trajectoire dans l'espace-temps, devient donc une combinaison de deux mouvements, celui d'entraînement par le courant, et celui (latéral) de la nage vers une berge.

Cette nouvelle trajectoire «en biais», résultante de la combinaison du mouvement latéral (nage) et du mouvement d'entraînement du au courant du fleuve, **est strictement équivalente à une trajectoire «en biais» qui serait causée par une modification de la direction d'écoulement du fleuve alors que le nageur serait resté passif** (donc sans nager lui même latéralement).

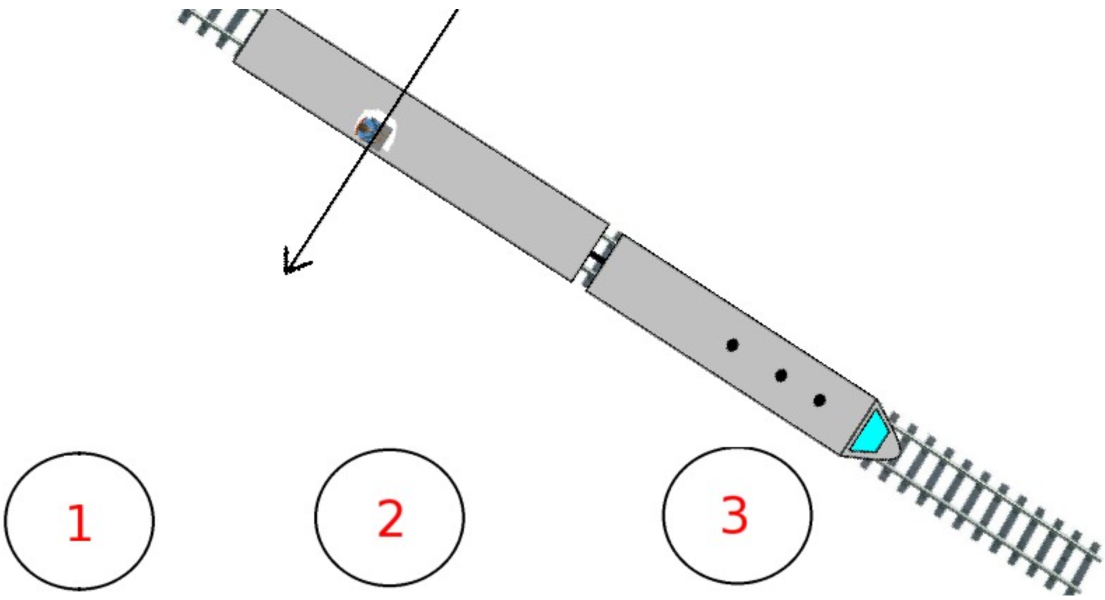
Un déplacement dans l'espace est donc strictement équivalent à un basculement, un pivotement, du """mouvement""" dans la dimension temps (je rappelle que nous sommes toujours dans cet univers inventé dans un objectif pédagogique où la dimension temps n'est qu'une "autre" dimension d'espace).

Ramené à l'exemple du train, ça signifie qu'un déplacement dans l'espace de notre voyageur est strictement équivalent à un changement de direction de l'ensemble du train tandis que le voyageur ne bouge pas et reste assis.

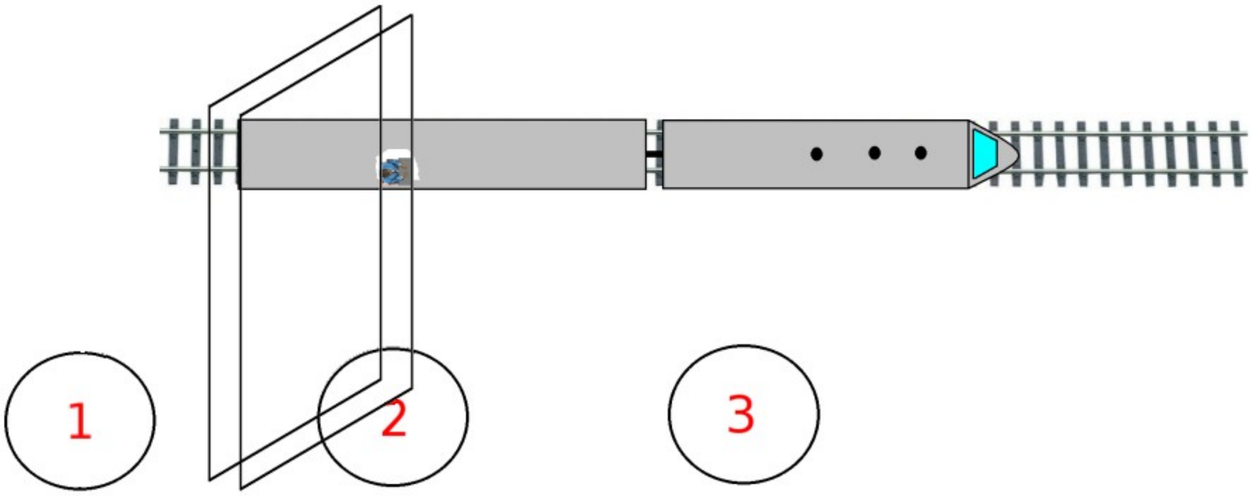
Du coup on passe de ceci:



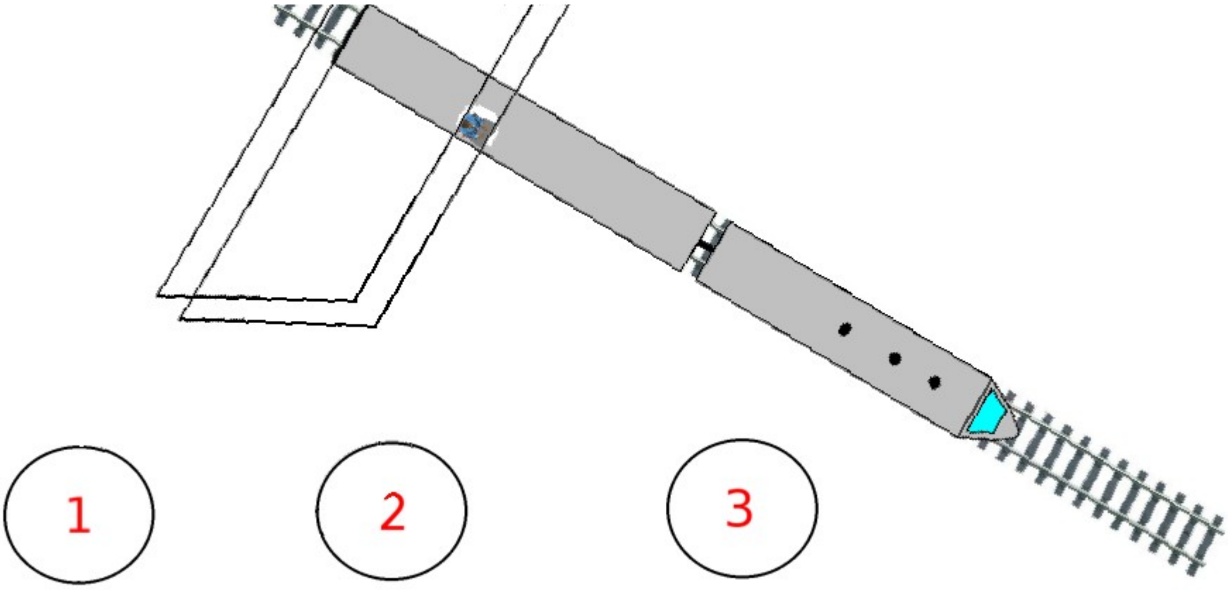
À cela:



Ou, en version «œillières»:
De ceci:



À cela:



Sauf que là, visiblement, après pivotement, le «présent» du voyageur qui «pointait» vers l’événement «2», pointe ou RE-pointe désormais vers l’événement «1» (théoriquement plus ancien), et cela sans avoir fait le moindre «retour en arrière».
En effet, le train ne recule pas, il continue d’avancer, il a simplement pivoté.

C’est la «magie» du système et ça ne peut fonctionner QUE avec ce «genre» d’espace-temps.

Remarque: Plus la vitesse de déplacement dans l'espace est grande, plus l'angle de pivotement est grand puisque la composante spatiale (donc latérale sur le dessin) qui «tire» le pivotement est plus importante.

On peut aussi se demander s'il n'est pas plus pertinent de conserver exactement la même orientation de l'axe du temps quitte à ce que la direction donnée au présent reste la même après pivotement.

Sauf que il en découlerait deux conséquences fâcheuses:

1) Le fait de se rapprocher d'un événement ne signifierait plus qu'il est dans le futur, et parallèlement, le présent ne pourrait plus être aussi logique entre le futur qui vient et le passé qui s'éloigne.

2) Le relativité Galliléenne du mouvement (donc celle, toute simple, qui est admise depuis près de 500 ans, pas celle d'Einstein) serait violée.

Cette relativité là me permet de me considérer comme au repos (par rapport à moi même), et donc de pouvoir considérer <u>mon axe des temps comme référence</u>.

Deux exemples, deux descriptions un poil différentes de la même chose donnent souvent un bien meilleur résultat, alors je vais en quelque sorte tout recommencer, mais avec une autre «image»...

Je recommence donc <u>presque</u> la même chose, mais cette fois avec un bateau au lieu d'un train.

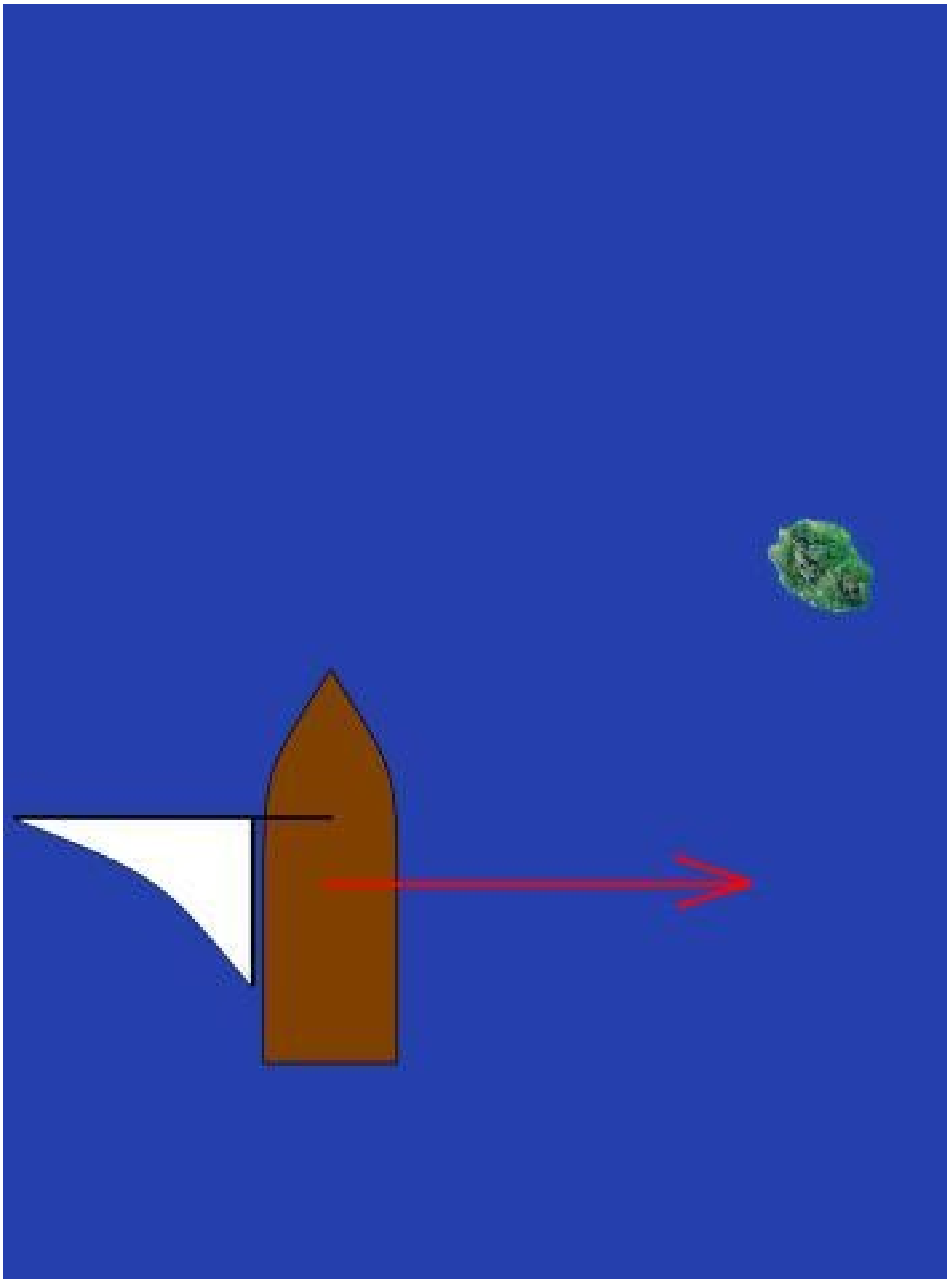
Et quelques différences au niveau des détails.

Je pense que tout le monde a compris l'équivalence et la correspondance entre la flèche qui indique la position de l'événement «présent», et les deux plaques.

Tout ce que ces deux plaques ajoutent, c'est une mise en évidence claire du fait que l'observateur du train (et bientôt du bateau) ne peut rien voir, ni vers l'avant, ni vers l'arrière, seulement latéralement, selon la direction donnée par les plaques.

Il suffit simplement de retenir que l'observateur ne peut voir que dans la direction de la flèche, et on pourra se passer des plaques sur les futurs dessins.

Voici donc un bateau:



Son déplacement vers l’avant (il ne recule jamais), c’est **<u>le temps</u>**, et tout déplacement latéral est un déplacement **<u>dans l’espace.</u>**

La flèche rouge c’est, **<u>EXACTEMENT COMME AVEC L’EXEMPLE DU TRAIN</u>**, son présent.

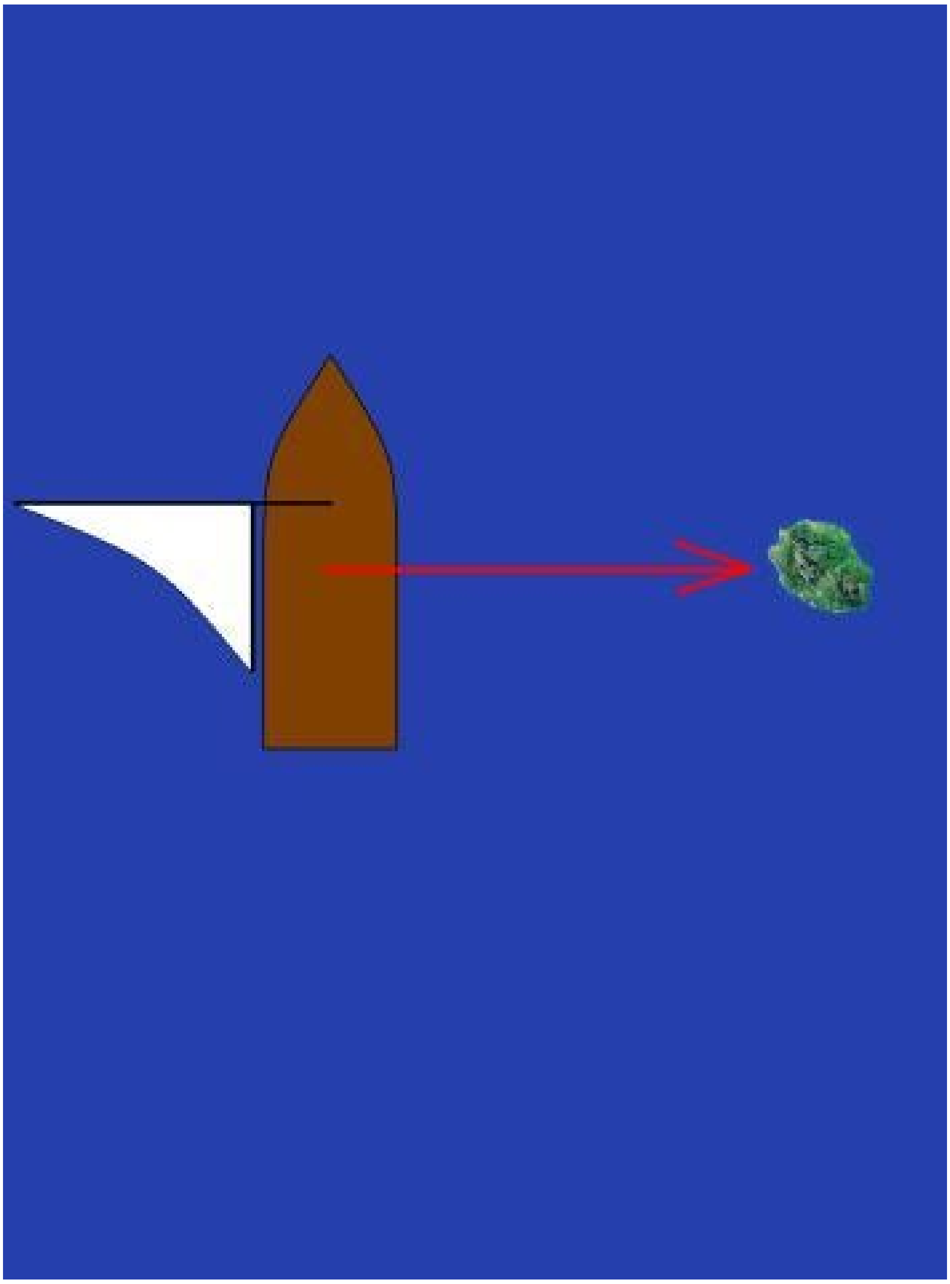
La petite île, c’est un ÉVÉNEMENT. Attention, j’ai bien dit un événement, pas un objet, pas une chose, **<u>un événement</u>** (comme un mariage, un flash lumineux, un bruit, une fête, enfin quelque chose qui implique un lieu et une date, ou une heure, un instant, bref un temps précis).

Si la progression du bateau, c’est le temps, alors le futur est ce qui se rapproche de lui, et le passé est ce qui s’en éloigne, comme on l’avait déjà défini pour le train.

Entre ce qui arrive (le futur) et ce qui s’éloigne (le passé), il y a ce qui ne s’approche plus mais ne s’éloigne pas encore, donc ce qui est «au plus près», et c’est ça le présent.

L’île sera au plus près du bateau lorsqu’elle croisera la direction de la flèche. La flèche indique donc le présent du bateau, et donc là, l’événement «île» est encore dans le futur.

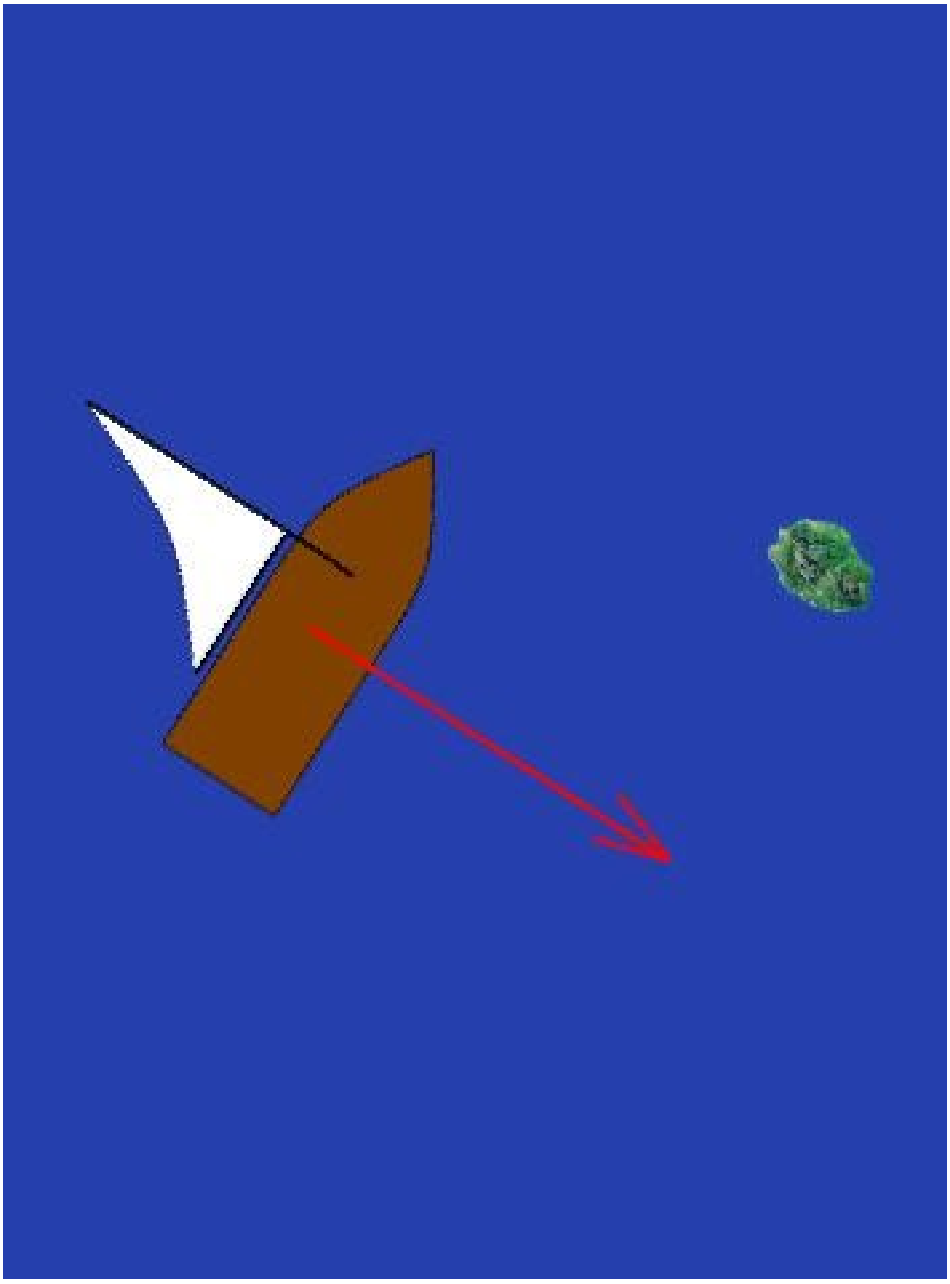
Sur le dessin suivant, l’événement représenté par l’île est dans le présent du bateau.



Comme pour le train, il y a équivalence entre un déplacement latéral, donc dans une des dimensions de l’espace, **s’ajoutant** au déplacement «vers l’avant» du bateau et un simple pivotement donnant une trajectoire «en biais».

Si donc, le bateau veut se déplacer dans l’espace, en plus «d’avancer» dans le temps, il doit se déplacer latéralement en plus et en même temps que sa trajectoire d’origine, et ça c’est équivalent à virer de bord, à «pivoter».

Faisons le donc pivoter, et…….



………….. et l’événement représenté par l’île est de nouveau dans son futur….

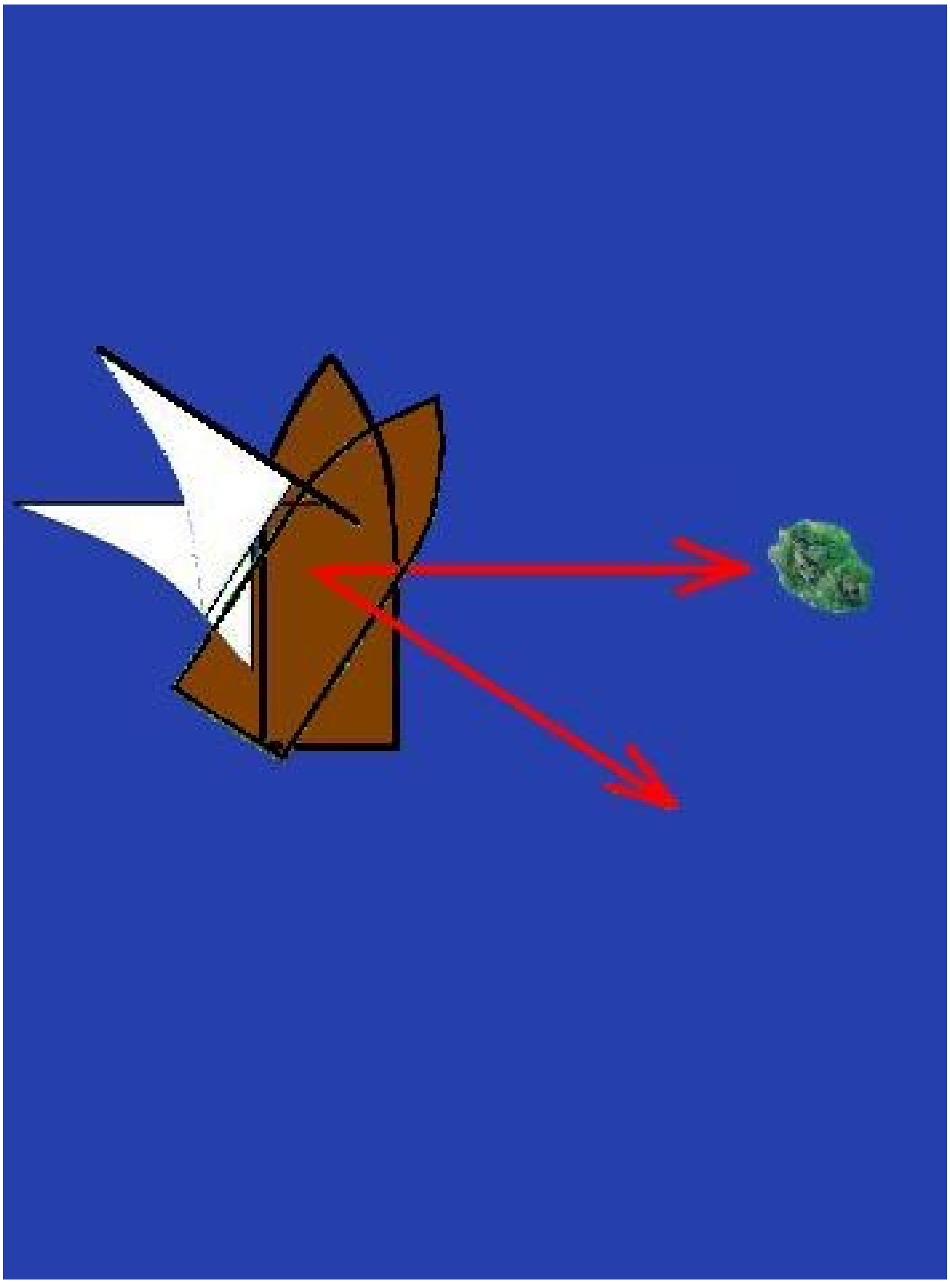
(Puisque la flèche rouge indiquant le présent n’atteindra (à nouveau) l’île que si le bateau progresse encore.)

C’est la «magie» de ce genre d’espace-temps, et malgré l’aspect hallucinant de la chose d’un point de vue intuitif et/ou culturel, c’est logique et cohérent avec la nature du temps dans cet espace-temps là.

Logique avec la nature du temps adoptée ici (dimension «spatialisée»), parce que si l'on ne trouve pas ça logique, alors soit on ne respecte pas la convention de départ (temps spatialisé), soit on ne doit pas non plus trouver logique qu'une île qui se trouve pile poil à notre droite, à un moment donné, se retrouve, ensuite «plutôt vers l'avant» lorsque l'on a pivoté.

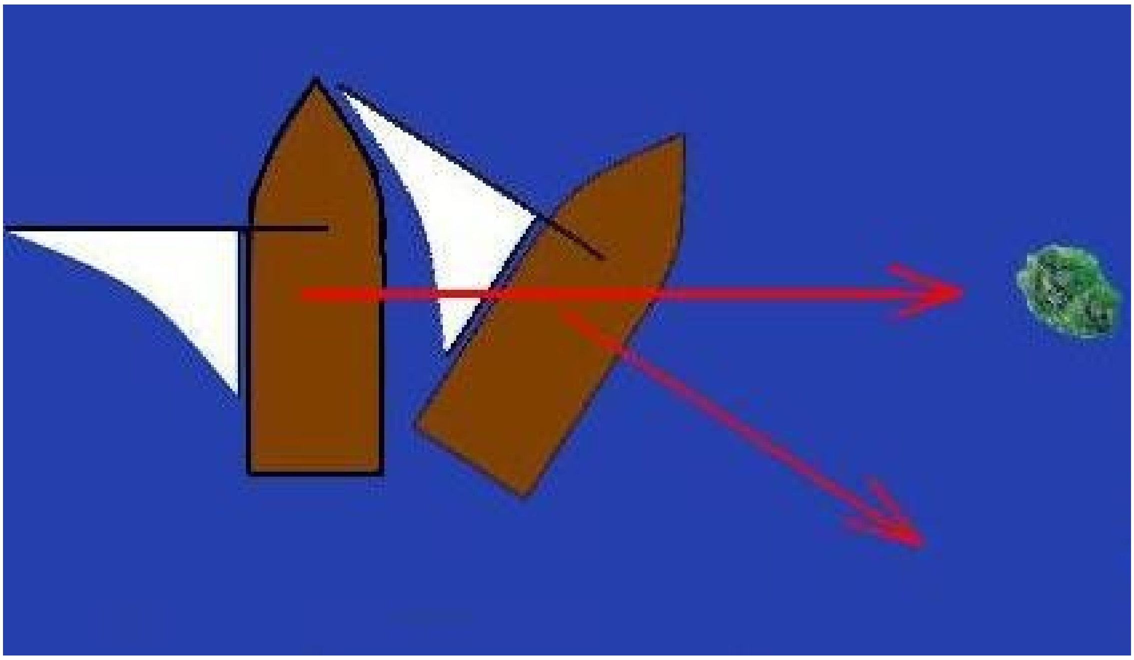
Et c'est le moment de rappeler que plus la vitesse de déplacement dans l'espace est grande, plus l'angle de pivotement est grand puisque la composante spatiale (donc latérale sur le dessin) qui «tire» le pivotement est plus importante.

On peut faire mieux: On prend deux bateaux qui se croisent de très près, et pour l'un des deux, l'événement représenté par l'île est dans son présent tandis que pour l'autre il est encore dans le futur………… Comme ci dessous:



Ce n’est pas un simple détail, parce que ça permet d’introduire le concept de «relativité de la simultanéïté».

Si les chevauchements vous perturbent, voici une autre version du «croisement»:



Je répète cette fois encore, c’est logique, parce que si l’on ne trouve pas ça logique, alors soit on ne respecte toujours pas la convention de départ (temps spatialisé), soit on ne doit pas non plus trouver logique qu’une île qui se trouve pile poil à notre droite, est logiquement et en même temps, «plutôt vers l’avant» pour quelqu’un qui est partiellement tourné vers l’île, par rapport à nous.

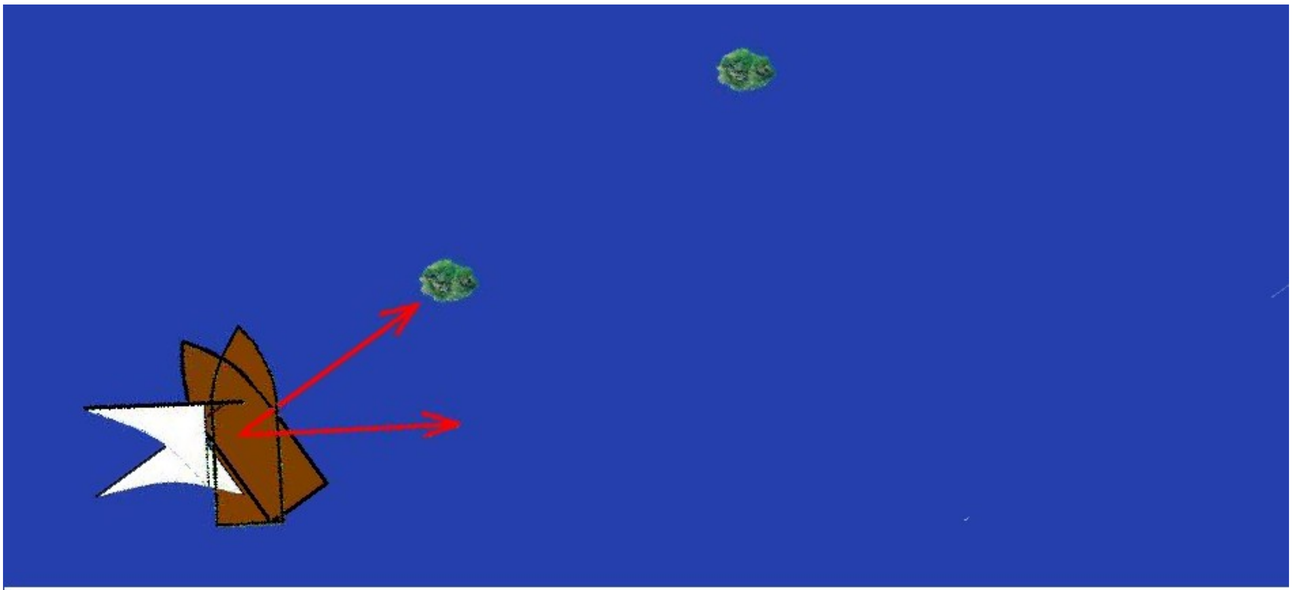
Ces images sont ne sont pas de simples représentations graphiques «allégoriques» nécessitant des contorsions de méninges pour une interprétation correcte. Elles montrent vraiment la réalité de cet espace très particulier que, rappelez vous j’ai totalement inventé (il n’est pas question d’en faire le nôtre, mais il est clairement «cousin», voir frère, de celui de Minkowsky), et prouvent indiscutablement la logique, et la cohérence du système.

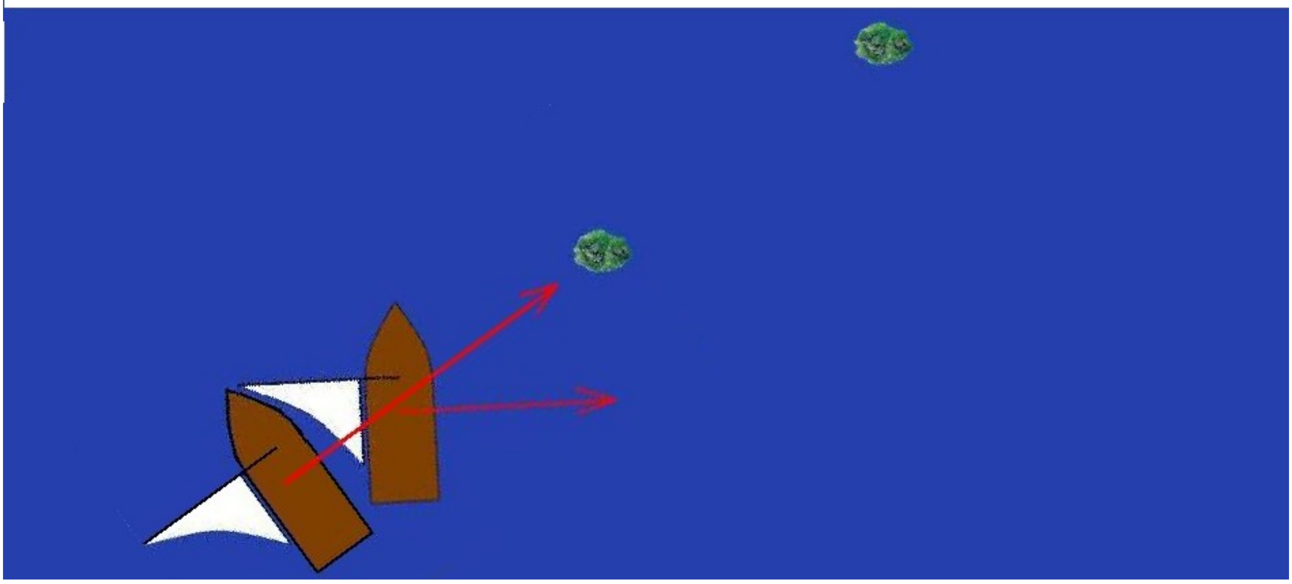
J’ai dit plus haut que ce dont on parle maintenant permet d’introduire le concept de «relativité de la simultanéïté». Eh bien c’est justement ce qu’illustre le dessin suivant:

Les deux îles sont alignées selon la direction de la flèche (horizontale) représentant le présent pour l’un des deux bateaux mais pas pour l’autre.

En faisant pivoter l’image (dessin suivant), les deux îles sont, bien entendu toujours alignées, mais plus à l’horizontale.

Cela ne change strictement rien, sauf que ce changement de «point de vue» permet de mieux voir que, pour le bateau dont la flèche est désormais horizontale, les deux îles, donc les deux événements sont bien successifs et pas simultanés.





Il y aura d’abord un alignement flèche => première île, puis ensuite un alignement flèche => deuxième île.
Traduis en terme de temps: les deux événements (îles) sont SIMULTANÉS (alignement des deux îles en une seule fois) pour l’un des deux observateurs (bateau) et SUCCESSIFS (pas d’alignement avec les deux îles en une seule fois) pour l’autre observateur.

Maintenant, il faut que je complète et/ou corrige mon système pour éviter des paradoxes du genre: «revoir ou revivre un événement déjà passé», ou encore «pouvoir prédire ce qui va arriver.»

La solution c’est la vitesse limite de l’information ET du déplacement dans l’espace (donc ici, déplacement latéral).

Revenons donc à notre bateau, et fixons lui une vitesse unique et précise dans la direction, ou plutôt dans la dimension, qui tient le rôle du temps.

Fixons aussi une vitesse limite très précise à l'information, donc à toute chose permettant de «voir» savoir, détecter, se «rendre compte de», l'existence d'un événement.

Cette vitesse limite sera la même que celle du bateau dans son déplacement vers l'avant, c'est à dire dans ce qui tient lieu de temps.

Il est bien sur permis de recevoir une information plus lentement, mais jamais plus vite que cette limite.

Enfin fixons aussi une limite à la vitesse de déplacement d'un objet solide, ou d'un observateur, dans cet espace-temps, donc une vitesse limite au déplacement latéral d'un observateur avec le bateau.

Cette vitesse sera presque la même, on va juste imposer qu'elle soit juste un tout petit peu inférieure à celle de l'information.

Conséquences: Lorsqu'un observateur est juste «en face» d'un événement (train à hauteur des événements 1, 2 ou 3, bateau juste en face de l'île), il ne le «voit» pas, il ne le détecte pas, il n'en connais pas l'existence parce que l'information, même à sa vitesse maximum, ne lui est pas encore parvenue.

Ce que nous voyons donc sur les dessins, l'observateur, dans la réalité, ne le voit pas, ne le sait pas, ne l'imagine même pas.

En fait, lorsque l'observateur voit l'île, il l'a déjà dépassée depuis un certain temps, peut-être même depuis longtemps (événement lointain).

Pour être complet, il faudrait même dessiner **LE** bateau à chaque instant le long de sa ligne du temps (donc sur un dessin ça donnerait plein de bateaux identiques à la queue-leu-leu, bien qu'en fait il n'y en a qu'un à différents instants), et il faudrait dessiner aussi les différents événements (comme dans l'exemple du train au début) ou l'évolution d'un événement, en parallèle avec les bateaux.

Comment les choses se passent-elles alors? Comment l'information sur un événement arrive-t-elle à l'observateur? Et quelles conclusions doit-on en tirer?

Pour illuster ça, je vais utiliser l'allumage bref d'une lampe, une sorte de flash donc.

Rappelez-vous du train au début, il passait successivement devant les événements 1 puis 2 puis 3, etc.

Compte tenu de la façon dont j'ai choisi de décrire le temps (une dimension spatiale), je n'ai qu'une seule façon logique de représenter plusieurs événements consécutifs, ou un phénomène évolutif. Je dois dessiner ces différents événements, ou les différentes phases du phénomène évolutif, à la queue-leu-leu, selon la direction attribuée au temps.

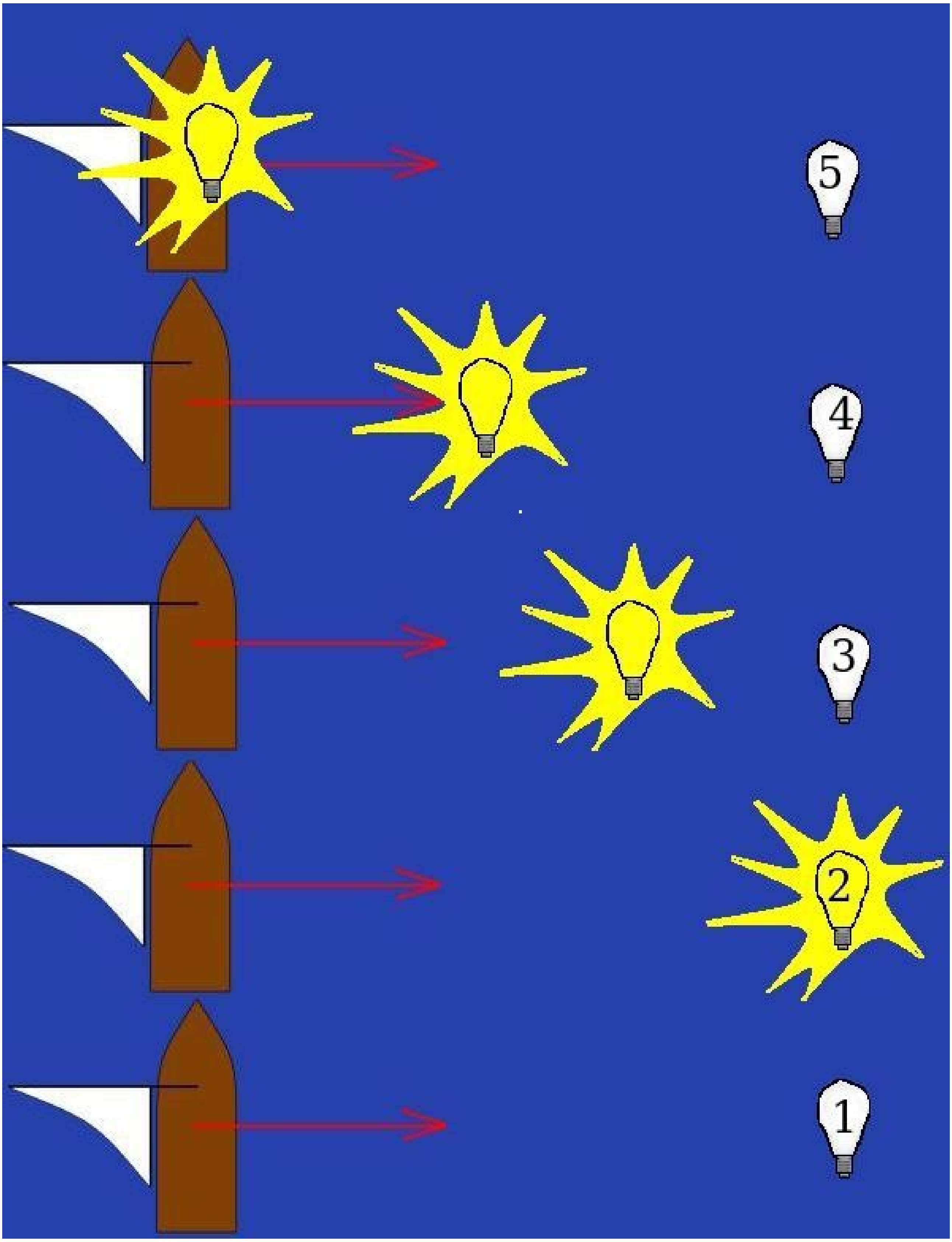
Ça donne une série de lampes ÉTEINTES (1,3,4,5), sauf une (2 = l'instant du flash) et le bateau de l'observateur.

C'est ce qui est représenté à la page suivante.

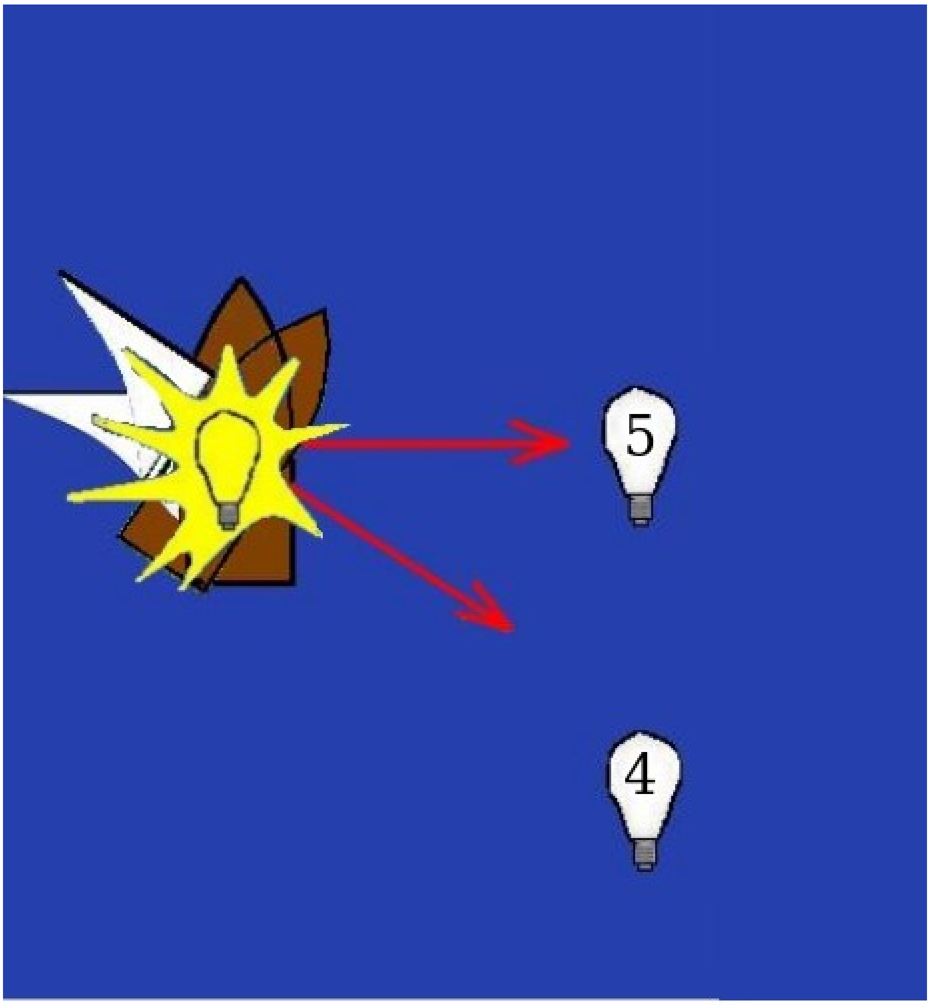
La lampe (presque) en bas à droite (la numero 2), c'est le flash, les trois autres lampes <u>éclairées</u> sont l'information (l'image de la lampe) qui se propage jusqu'à l'observateur (le bateau) avec le temps.

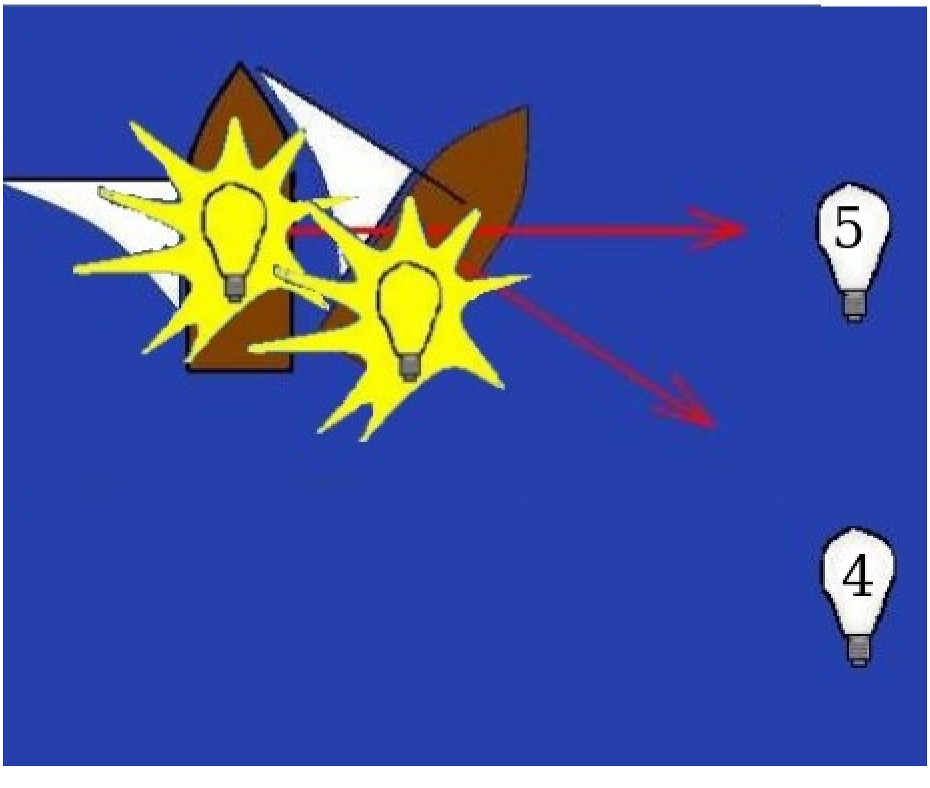
Le flash se produit donc à l'instant où l'observateur est sur la deuxième position en partant du bas, mais il ne voit ce flash que lorsque la lumière lui en parviens, c'est à dire sur la dernière position, toujours en partant du bas, donc en haut (à gauche).

Et lorsque l'information (représentée par une lampe qui se déplace en diagonale sur le dessin) parvient à un observateur (ici, un bateau), alors elle parvient au même instant (ou presque) à tous les observateurs qui se trouvent au même endroit que lui.



Sur les dessins suivant, sont représentés deux bateaux (donc deux observateurs) qui se croisent.





L’information de l’éclair du flash leur parvient exactement au même instant (premier dessin) ou presque au même instant (deuxième dessin), alors que les flèches supposées indiquer la «direction du présent» selon la convention adoptée depuis le début pointent dans des directions différentes (l'une vers l'événement lointain 4, et l'autre vers l'événement lointain 5).

Les deux observateurs voient le flash en même temps, mais il n'est pas possible de leur faire correspondre un événement commun lointain qui serait, pour tous les deux, simultané avec l'instant de réception de l'information «flash».

Bref, et plus généralement, lorsque deux (ou plus) observateurs se croisent, avec entre eux une vitesse non nulle, ils reçoivent les mêmes informations en même temps, mais il n'est pas possible d'établir une même simultanéïté valable pour les deux **et qui soit autre que <u>locale</u>.**

Ça marche aussi lorsqu'il faut reconstruire une suite d'événements à posteriori:
Exemple: Un rayon laser est «tiré» depuis la planète Mars en direction de la Terre. Sur la Terre, nous allons nous intéresser à deux hommes.

L'un attend le bus à un arrêt, et l'autre roule en voiture depuis un certain temps déjà et toujours dans la même direction et le même sens.
Le rayon arrive exactement à l'endroit et à l'instant où les deux observateurs se croisent.

Ils seront tous les deux d'accord pour dire qu'ils ont vu le flash au même instant mais ne pourront jamais se mettre d'accord sur l'instant où il a été émis sur Mars.
De plus, cela reste vrai que l'observateur «conducteur» ait ou non démarré avant le moment (calculé à posteriori par reconstruction par l'observateur à l'arrêt de bus) d'émission du flash sur Mars.

Soit le conducteur avait déjà démarré et une vitesse relative non nulle entre les deux observateurs existait déjà, et dans ce cas, peu importe d'ailleurs la distance spatiale qui les séparait, du seul fait de cette vitesse relative, leurs «présents respectifs convenus» (que l'on pourrait représenter par des flèches rouges) pointaient vers deux événements lointains différents (donc si c'est le flash pour l'un ça ne l'est pas pour l'autre).

Soit le conducteur n'avait pas encore démarré, mais l'a fait ensuite et avant l'arrivée du rayon et dans ce cas, il «rejoint» en quelque sorte le point de vue plus proche de celui qui roule déjà, parce que désormais ses flèches rouges à lui pointent aussi dans une direction différente de celui de l'arrêt de bus..

C’est pour cela qu’en relativité, le temps n’est défini que <u>localement.</u>

Contraction des longueurs

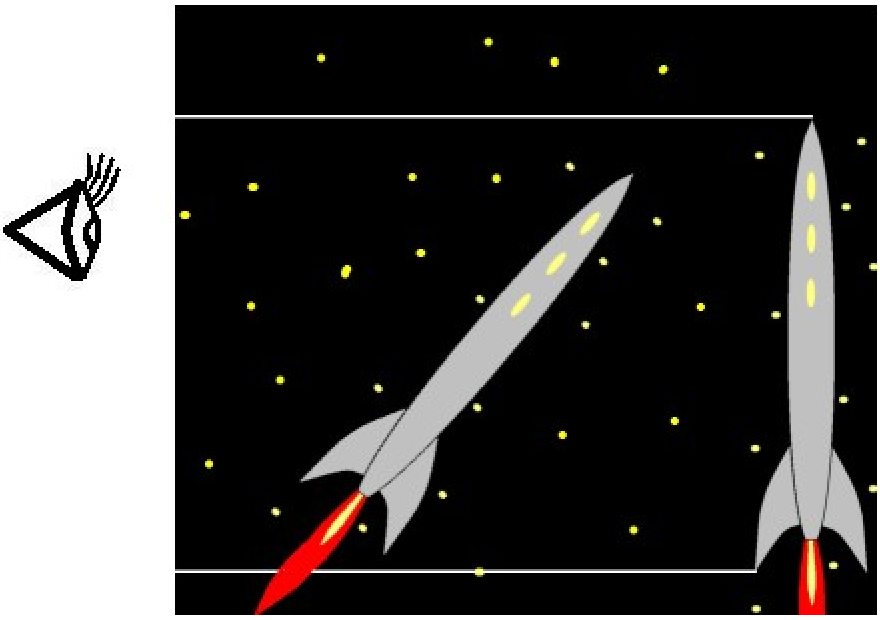
(Toujours dans cet univers inventé, mais «frère» de celui de Minkowsky).

Qu’il s’agisse de l’exemple du train ou de celui du bateau, il apparaît systématiquement sur les dessins qu’un objet en mouvement est représenté formant un angle avec celui par rapport auquel ce mouvement est déterminé*.

Bref entre deux corps en mouvement, il y a un «angle dans l’espace-temps».

(*) Parce qu’on combine les deux mouvements, l’un dans la dimension strictement spatiale et l’autre dans celle tenant le rôle du temps, puis on aligne les axes pour déterminer une perpendiculaire plus logique.

Mais, lorsque l’on regarde un objet allongé que l’on a incliné (ça c’est l’angle dont on parle), et si cette inclinaison n’est pas latérale mais dans la direction du regard, on voit cet objet plus court.
Comme sur ce dessin où la fusée de gauche sera vue (mesurée) plus courte que celle de droite:



L’œil dessiné à gauche donne l’orientation du regard (donc de la gauche vers la droite).

Conclusion: Cet espace-temps particulier, en plus de générer logiquement et automatiquement une simultanéïté relative*, avec un temps strictement local (ce qu'on a vu avant) implique une contraction des longueurs **mesurées** (comme dans la «vraie» relativité d'Einstein) tout aussi automatiquement et logiquement.

Pas mal non?

(*)en fait simplement **convenue** puisque tout est «présent de fait» dans cet univers là.

LA DILATATION DU TEMPS:

Ben là, c'est plus difficile de le montrer comme ça, mais ça part de la même logique que la contraction des longueurs. Sauf que, dans cet espace-temps ci, un dessin donnerait une contraction du temps; la raison de cette différence sera expliquée plus loin.

Voilà, on a décrit un espace-temps inventé dont les caractéristiques et propriétés(au niveau simultanéité, longueurs, durées) font furieusement penser à l'espace-temps de Minkowsky (donc celui de la relativité restreinte et dont on a déjà parlé dès la troisième page), sans l'être vraiment, mais, comme je l'ai dit déjà, il y a plus qu'une ressemblance il y a une parenté…...

Quelles sont les différences (importantes à dire dans le cadre d'une simple vulgarisation, bien sûr)

Premièrement, dans le cas présenté ici jusqu'à maintenant, toutes les dimensions sont spatialisées (elles ont exactement comme des dimensions d'espace), tandis que dans l'espace-temps de Minkowsky, la dimension temps est, quand même, différente (quoique certains physiciens n'hésitent penser que la différence est extrêmement minime).

Différente donc, oui, mais tout aussi liée, tout aussi incluse dans un tout unique et unifié.

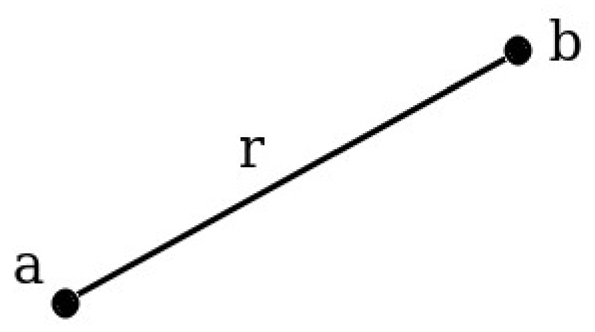
Dans l'espace-temps de Minkowsky, il n'y a donc pas trois dimensions d'espace et une de temps mais quatre dimensions (formant un seul ensemble) **DONT** trois d'espace et une de temps (dont la nature réelle fait débat).

Deuxièmement (et c'est un «deuxièmement» fortement lié au «premièrement») la métrique est différente.

Mais du coup, avant d'aller plus loin, il faudrait expliquer simplement (pour la vulgarisation) ce qu'est une métrique.

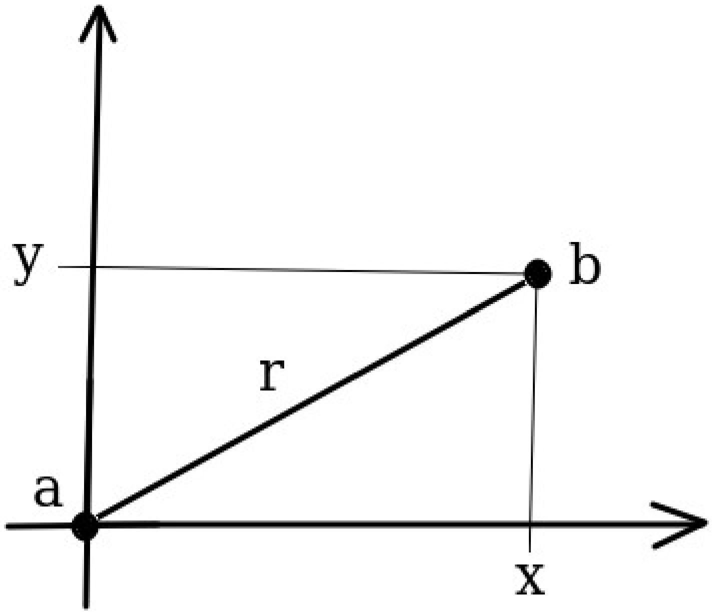
Une métrique est un «système» (pour utiliser un mot qui ne fasse pas peur..) permettant de mesurer des distances (si c'est dans l'espace) ou pour plus de généralité, des intervalles (si c'est dans un espace-temps).

Comment mesurer une distance (un intervalle) de manière facile et sûre? Imaginons deux points a et b séparés d'une distance r.



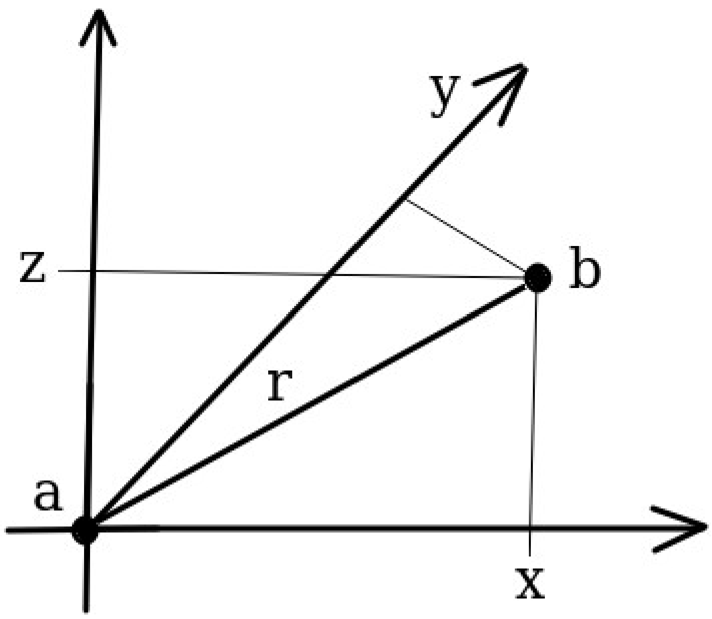
Et essayons de calculer la valeur de r d'une manière sûre, efficace, généralisable, et qui ne nécessite pas de sortir notre règle graduée à chaque fois.

Le plus efficace est de munir notre espace d'un repère orthonormé (des axes perpendiculaires), de faire correspondre le point «a» avec l'origine (croisement des axes) et de regarder où se projette le point b sur les axes.



Et là, on peut voir immédiatement que l'on a un triangle rectangle (a, b, x).
Dans ce triangle rectangle, on connaît la longueur [a, x]; elle vaut x puisque a est sur le point d'origine (0, 0).
On connaît aussi la hauteur [x, b] puisqu'elle exactement égale au segment [a, y] qui vaut y, puisque «a» se trouve sur le point d'origine (0, 0).
On a donc un triangle rectangle dont la longueur vaut x, et la hauteur vaut y.
À partir de là, Pythagore nous a appris que r^2 (le carré de l'hypothénuse) vaut $x^2 + y^2$ (la somme des carrés des deux autres côtés)
Ça y est on a notre méthode pour calculer la longueur d'un intervalle «r».

Cette méthode est généralisable à un espace à 3 dimensions, comme ci-dessous:



Et cette fois on dira que $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Et s’il y avait 4 dimensions (impossible à dessiner), ça donnerait:
$r^2 = w^2 + x^2 + y^2 + z^2$.

Tous les signes sont positifs, ce qui donne {+ + + +} pour ce que l’on appelle la signature de la métrique.

Juste pour information, une métrique de ce genre correspond à un espace dit «euclidien», c’est à dire en gros le plus intuitif pour tout un chacun.

Voilà donc ce qu’est une métrique en version simplifiée et vulgarisée.

Avant ce petit détour explicatif, je parlais des différences entre cet espace-temps inventé et l’espace-temps de Minkowsky (et donc de la relativité d’Einstein), en me limitant au niveau de la dimension temps et de la métrique..

Au niveau «dimension temps»:

L’espace-temps de Minkowsky est à 4 dimensions, trois d'espace (qui se mesurent en mètre) et une de temps (qui se mesure en seconde), qui n’est donc pas réellement «spatiale», mais qui est néanmoins aussi liée aux trois autres que s’il s’agissait d’une dimension spatiale de plus.

Au niveau «métrique»:

L’espace-temps de Minkowsky a une métrique correspondant à un espace-temps dit «pseudo-euclidien» (ça ressemble à de l’euclidien mais ce n’est pas de l’euclidien…..).

C’est quoi la différence?

Ben c’est que la dimension temps «fonctionne» un peu à l’inverse des dimensions spatiales.

Au niveau de la signature de la métrique, ça donne non pas {+ + + +} comme dans le cas euclidien, mais {- + + +}, et donc le calcul d’un intervalle ne se fera pas par $w^2 + x^2 + y^2 + z^2$, ou même, en désignant le temps par une variable plus pertinente, $t^2 + x^2 + y^2 + z^2$, mais $-t^2 + x^2 + y^2 + z^2$….

Le signe de t^2 est négatif, et ce n’est pas un simple détail, on va en reparler, mais avant ça deux ou trois précisions supplémentaires au sujet de la métrique et de son expression:

La métrique de l’espace-temps de Minkowsky est donc du genre: $r^2 = -t^2 + x^2 + y^2 + z^2$

On a donc d’un côté un intervalle «r», et de l’autre un temps t (en seconde) et des coordonnées d’espace x, y, et z (en mètres).

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 la vitesse de la lumière, donc la vitesse «c», la vitesse constante par excellence.

Aux coordonnées traditionnelles d'espace x, y, et z, on ajoutera ct au lieu de t, 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: ct, x, y, z.

Du coup, cette fois, ça donne:
$r^2 = -(ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$

Par convention, un intervalle d’espace-temps est symbolisé par s, on a donc:
$s^2 = -(ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$

Puisqu’il s’agit d’un intervalle, utilisé une «différence» est plus approprié, et donc on choisi plutôt:
$\Delta s^2 = -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ Le Δ indique une différence, un écart entre deux points.

Ou en différentielle:
$ds^2 = -c^2dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ Le «d», c'est une différentielle, c'est comme un Δ infiniment petit.

Le signe de la composante temps est TOUJOURS différent des trois autres, mais 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 (seulement l'habitude) est alors de donner un signe positif au temps et négatif aux autres, ce qui donne une signature comme ça : {+- - -} et donc $ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$

J'ai donc dit plus haut que le fait que le signe de t^2 était négatif n'était pas un simple détail.
Alors voilà, on en reparle.

On a vu au début qu'un événement dont on se rapprochait était de ce fait dans notre futur, et au contraire un événement dont on s'éloignait était dans notre passé.

Ces constatations logiques l'étaient même intuitivement, parce que l'espace-temps choisi était strictement euclidien (on vient d'en parler peu avant).

Dans ces conditions on peut voir (revoir les dessins si nécessaire) que l'observateur qui s'approchait «temporellement» d'un événement (cet événement était donc dans le futur), s'en approchait aussi spatialement, «géographiquement» en quelque sorte et si vous préférez.

Dès lors que la dimension «temps» est munie d'un signe (dans la signature de la métrique) inverse des trois autres, le résultat en est impacté et, à un certain niveau, inversé lui aussi.

Bon, bien sûr, d'un stricte point de vue temps, un événement futur est et reste toujours un événement dont on se rapproche (temporellement) et le contraire pour un événement passé, mais si dans nos exemples précédents il y avait en même temps un rapprochement spatial (pour le futur), ici ce sera l'inverse.

Encore une précision: Dans l’exemple d’univers euclidien inventé qui m’a servi d’outil explicatif, la dimension faisant office de temps est déjà entièrement «déployée». Bref, le passé, le présent, et le futur coexistent en permanence.
Dans le cadre de la (vraie) relativité restreinte, et donc de l’espace-temps de Minkowsky, une disposition semblable est possible et souvent évoquée sous l’expression «univers-bloc», mais ce n’est pas une réalité prouvée, seulement une hypothèse possible.

LES FAMEUX JUMEAUX!

Il fallait bien qu’on en parle à un moment où à un autre…. Ben c’est maintenant…..

On imagine donc deux jumeaux. L’un reste sur Terre, et l’autre part faire un petit tour du côté d’une étoile située à 10 années-lumières de la Terre. Il voyage à une vitesse très proche de celle de la lumière, donc une vitesse très proche de c.

On connaît déjà la suite, on en a tellement parlé…

Le jumeau voyageur reviendra dans un peu plus de 20 ans pour celui resté sur Terre….. sauf qu’il (le voyageur) n’aura pas vieilli autant voir même très peu s’il peu est allé suffisamment vite et en ne traînant pas trop pour atteindre cette vitesse..

Que s’est-il passé?

Le jumeau voyageur a quitté la Terre. Il a accéléré fortement parce que plus il passe de temps à basse vitesse, moins il «profite» de….. ben de ce qui va suivre..
Une fois atteint sa vitesse (très, très élevée) de croisière, il fait quelques constatations.
Mieux même, les deux jumeaux font quelques constatations*…….. très semblables en plus.

(*) On imagine qu’ils puissent magiquement espionner l’autre en temps réel..

La contraction des longueurs….. et distances:

Le jumeau resté sur Terre voit la fusée de son frère très contractée dans la direction de son déplacement, ou, pour le dire autrement, la fusée paraît bizarrement courte…

De son côté, le jumeau voyageur voit, non seulement la Terre «compactée» dans la même direction (elle est donc devenue comme un œuf), mais en fait c’est tout ce qu’il voit à l’extérieur et par rapport à quoi il se déplace pareillement qui subit cette contraction.

Conséquence: la distance qui le sépare de la Terre lui apparaît nettement plus petite que ce à quoi il s’attendait compte tenu de sa vitesse, et du temps passé depuis le départ.
Mieux encore, la distance qui le sépare de l’étoile qu’il veut rejoindre est, elle aussi, nettement plus courte qu’attendue…..

C’est ça, la contraction des distances; tout le monde la constate dans tout ce qui est en mouvement par rapport à soi. En mouvement très rapide de préférence afin que l’effet soit mesurable.

Le Terrien voit cette contraction au niveau de la fusée parce que c’est la seule chose, <u>dans notre scénario actuel</u>, qui se déplace à une telle vitesse et qui est visible de la Terre.

Le voyageur voit cette contraction presque partout hors de sa fusée parce que les conditions du scénario font qu’il est en mouvement «ultra super hyper» rapide par rapport à tout ce qu’il voit dehors.
Mais s’il était accompagné de millions de vaisseaux faisant la même chose que lui, aucun d’entre eux (les vaisseaux) n’auraient rétréci.

Petite remarque en passant: c’est justement parce que le jumeau voyageur voit la distance qui le sépare de l’étoile fortement diminuée qu’il ne s’étonne jamais du fait qu’il n’a pas beaucoup vieilli pendant le voyage puisque une distance courte implique logiquement un temps court.

La dilatation du temps:

Le jumeau resté sur Terre voit/mesure le temps* dans la fusée de son frère s’écouler lentement.
(*) Rappel: on a dit que l’un comme l’autre avait magiquement la possibilité d’espionner l’autre en temps réel.

De son côté, le jumeau voyageur voit/mesure aussi et de la même manière, le temps, sur Terre cette fois, s’écouler plus lentement.

Bref jusqu’ici, tout est symétrique et c’est normal, puisque l’un comme l’autre peuvent se dire «au repos» et considérer que c’est l’autre qui est en mouvement.

Petite précision tout de même: On parle de temps vu comme s’écoulant moins vite, mais le titre est «la dilatation du temps» et ça, ça peut paraître contradictoire.

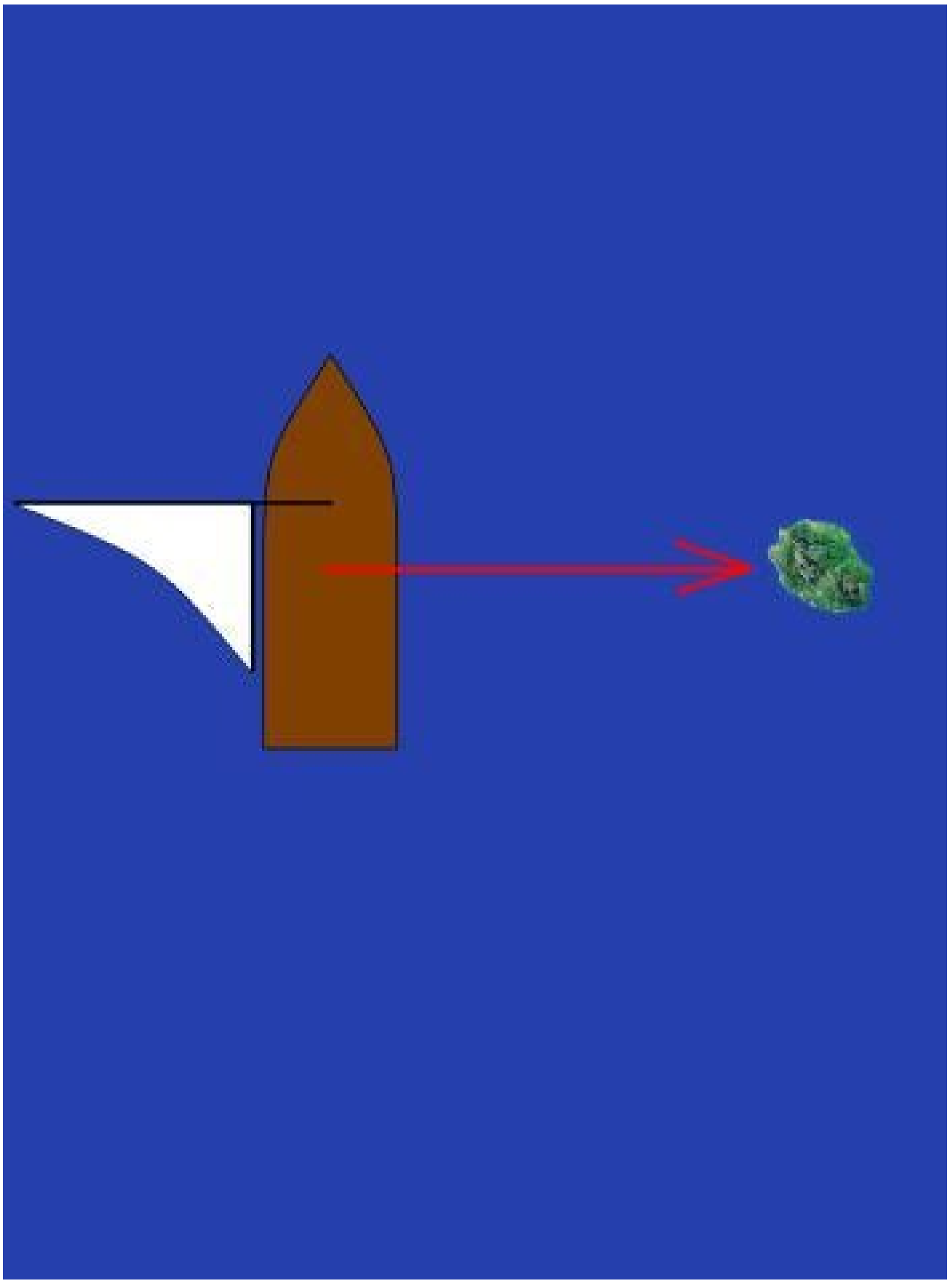
Ce qui est dilaté ici, ce sont les unités de mesures du temps, bref les secondes, et avec des secondes plus «grandes», ben il en faut moins, c’est logique...
Du coup, si, pour le même voyage il faut moins de secondes, donc moins de minutes, donc moins d’heures, etc.…. ça finit bien par faire moins d’années.

Notre voyageur poursuit son voyage, toujours avec des effets mesurés symétriquement équivalents à ceux que constate son frangin.
Puis il arrive à destination et là, il fait demi tour………. Et tout bascule…..

Revenons quelques pages en arrière. On montrait (et illustrait) comment le mouvement pouvait faire qu’un événement, lointain et encore inconnu de l’observateur, mais considéré comme dans son présent pouvait «retourner dans le futur» grâce à un mouvement dans l’espace. Sur les dessins, ces mouvements étaient systématiquement dirigé VERS l’endroit de l’événement, mais que ce serait-il passé si le mouvement s’était fait dans l’autre sens?

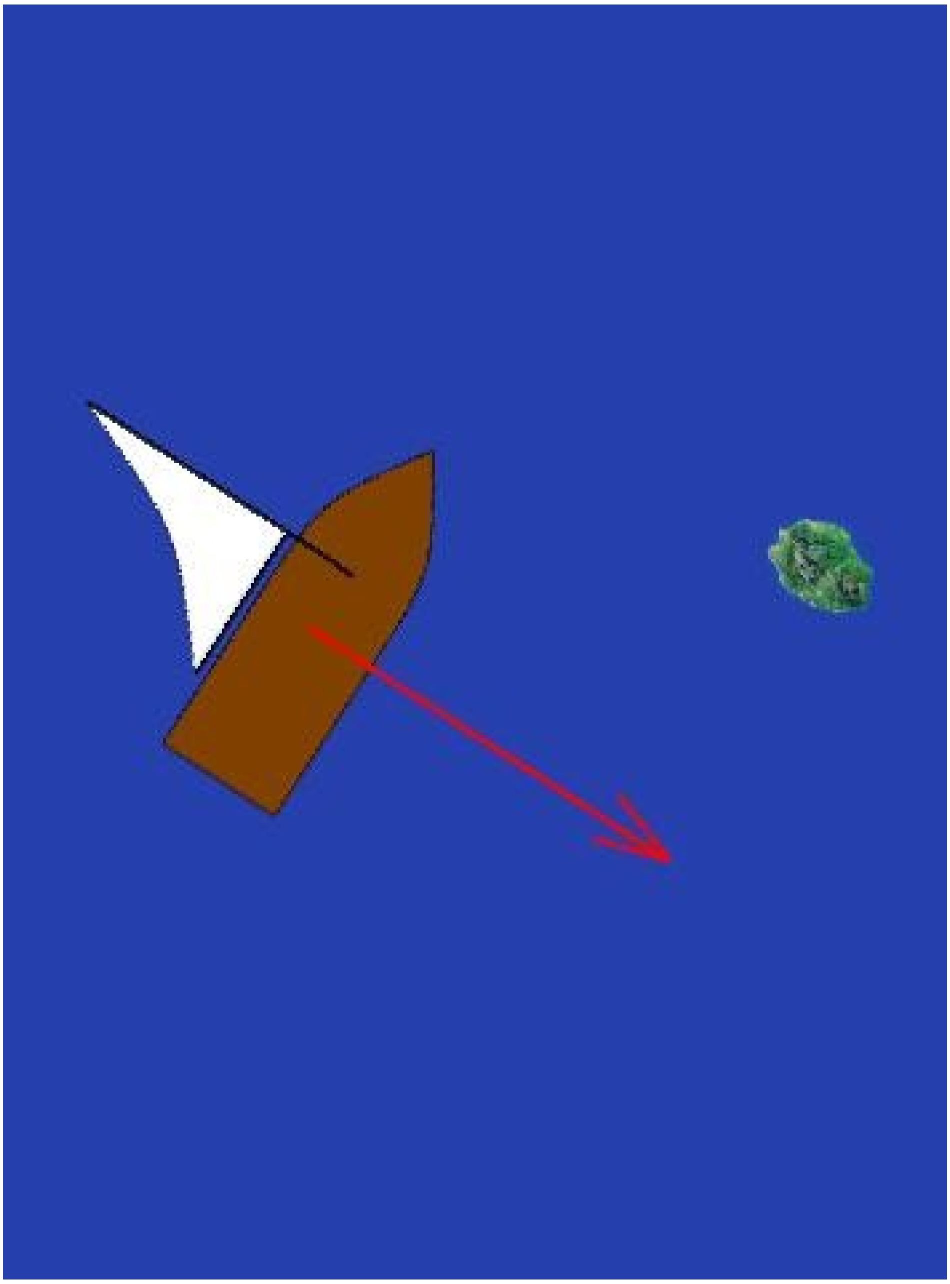
Ben voyons ça:

Rappelez vous le bateau qui arrive à hauteur de l’île, ce qui correspond à un observateur pour qui l’événement-île est dans son présent <u>selon la convention choisie</u>.

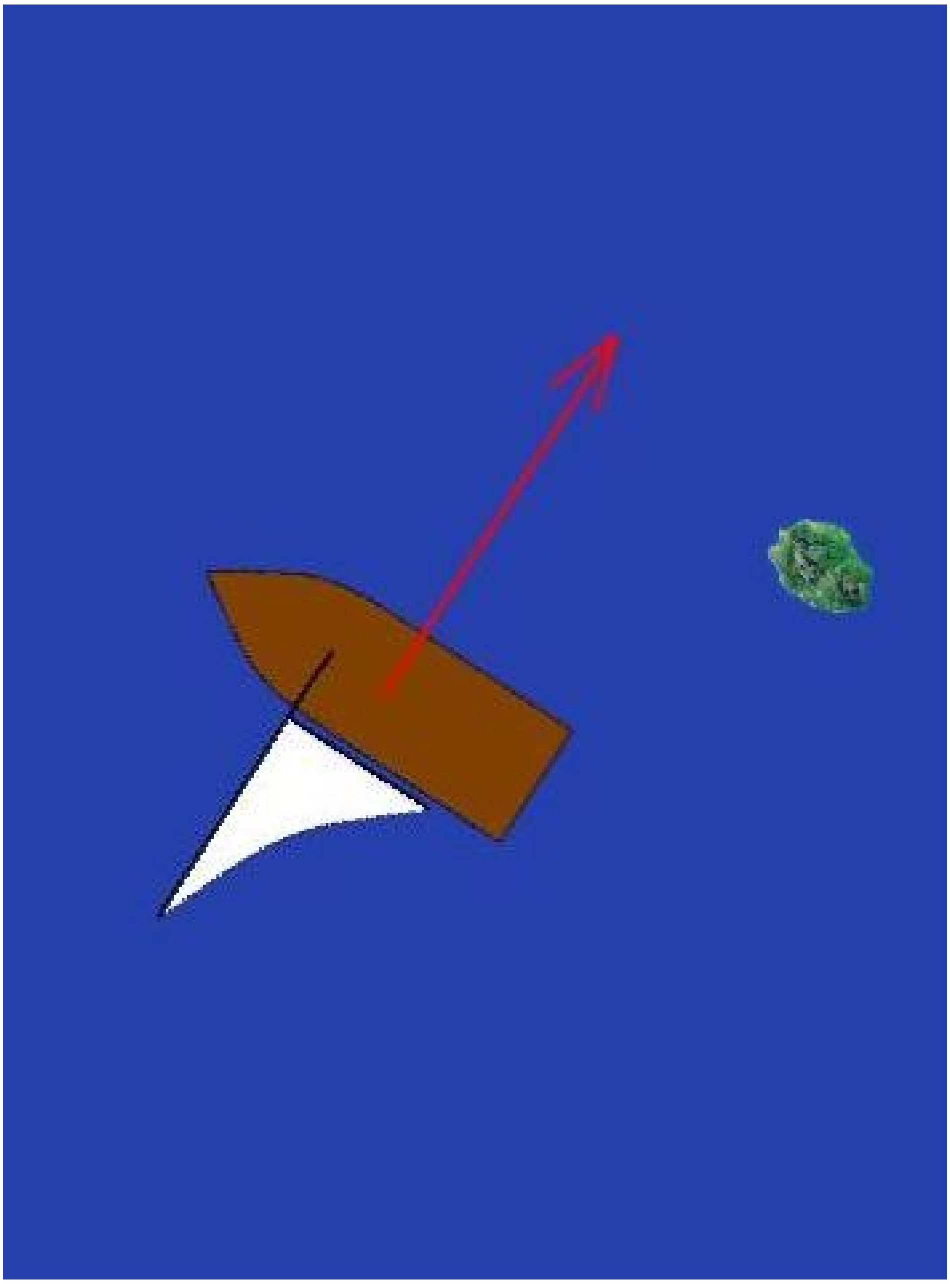


Puis, il se déplace dans l’espace, ce qui correspond, dans le cadre de cet espace-temps, à un pivotement du bateau.

Sauf que l’on a choisi un mouvement vers l’île, et ça a donné ceci:



Mais s'ils'était dirigé dans l'autre sens, et donc, sur le dessin, s'il avait pivoté de l'autre côté, ça aurait donné ça:



En pivotant à droite (= s'approcher spatialement), l'événement (île) se retrouve dans le futur, en pivotant à gauche (= s'éloigner spatialement), l'événement (île) se retrouve dans le passé….. Eh oui, regardez, ça se voit clairement.

Et tout cela juste parce que j'ai utilisé un espace-temps (euclidien) dans lequel le temps est spatialisé.

Quel rapport avec les jumeaux?

Ben revenons donc à eux et plus précisément au voyageur qui fait demi tour près de l’étoile qu’il voulait atteindre.

On a dit que c’est là que tout bascule.

L’espace-temps de Minkowsky est, c’est vrai, différent de l’espace-temps complètement spatialisé de mes dessins, mais il en est tout de même «cousin» ou même «frère».

Et de même que l’on peut effectivement voir que «tout bascule» lors du changement de direction du mouvement de l’observateur-bateau, eh bien tout bascule aussi dans le cas de l’espace-temps de Minkowsky, mais forcément, à quelques différences près.

On l’a dit, du fait du signe différent de la variable «temps» dans la métrique, certaines choses se passent différemment, et en particulier une inversion des effets temporels.

On l’a vu, sur les dessins, le fait de pivoter dans le sens «rapprochement» fait que l’événement-île lointain (re)devient futur, dans un espace-temps de Minkowsky, la même «manœuvre» aurait pour conséquence qu’un événement lointain considéré comme dans le présent convenu* deviendrait passé et même fortement passé si la vitesse est très élevée (et donc sur un graphique, l’angle de pivotement très grand).

Et donc c’est le moment de rappeler encore une fois que plus la vitesse de déplacement dans l’espace est grande, plus l’angle de pivotement est grand puisque la composante spatiale (donc latérale sur le dessin) qui «tire» le pivotement est plus importante.

(*) Convenu, et d’ailleurs souvent après reconstruction, puisque le présent n’est vraiment défini que localement, on l’a dit, et montré, il y a une douzaine de pages…

Donc tout bascule, et puisque les choses sont inversées par rapport à l’exemple en image, tout bascule dans le sens où un événement lointain supposé «actuel» devient brusquement passé voir passé depuis longtemps.

Ou, pour le dire autrement, ce qui devrait se produire actuellement sur Terre pour le voyageur selon la convention adoptée depuis le début prend subitement «un coup de vieux».

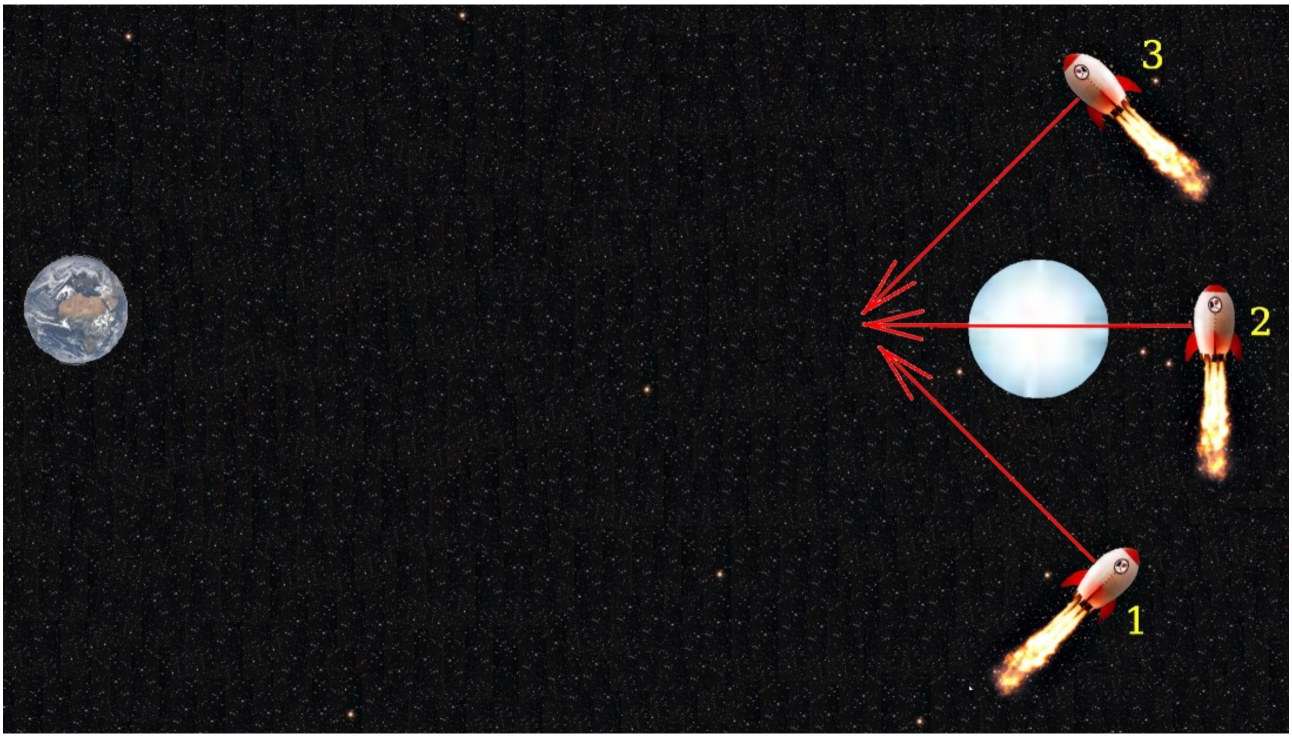
Sur le dessin ci-dessous est représenté le demi tour du jumeau, dans l’espace-temps complètement «spatialisé» qui sert de support aux explications depuis le début, et on peut y voir:

1) La Terre (à gauche), qui ne représente pas seulement la planète Terre «tout court», mais un **événement ponctuel** supposé s’y produire lorsque (<u>selon la convention adoptée</u>) le jumeau voyageur passe derrière l’étoile.

2) La fusée du jumeau voyageur pendant le demi tour (position 1, puis 2, puis 3).

3) L’étoile elle même.

4) Les flèches (rouges) indiquant le présent <u>**selon la convention adoptée**</u>.



La flèche rouge (présent convenu) de l’observateur voyageur au moment du passage derrière l’étoile (position 2) pointe donc vers cet événement ponctuel, mais la flèche rouge (toujours présent convenu) du même observateur voyageur après le passage pointe vers un événement passé, et même, au vu de l’angle de cette flèche, vers un événement passé depuis un temps non négligeable.

Conclusion, l’événement représenté ici par la Terre, et qui était considéré comme «présent» lors du passage derrière l’étoile, est désormais «rejeté» dans le futur.

Si cet événement est désormais futur, c’est que l’observateur voyageur peut considérer que, après son demi tour, ce qui correspond sur Terre au présent pour lui est bien antérieur à cet événement dont on parle. C’est comme si la Terre avait fait un bond dans le passé…..

Ça, c’est sur le dessin, et donc dans le cas de l’espace-temps spatialisé inventé que l’on utilise depuis le début, mais qu’en est-il alors, dans un cas semblable pour un espace-temps de Minkowsky?

Ben c’est le contraire (à cause du signe dans la métrique), et donc, après demi tour, le jumeau voyageur ne dira pas que c’est comme si la Terre avait fait un bond dans le passé mais plutôt dans le futur……… Sans que lui même ait vieillit de son côté.

Ça, c’est une façon de voir le fameux voyage de notre jumeau.

Voyons maintenant ça sous un autre angle.

Ce qui va suivre ne prétend pas expliquer comment (et encore moins pourquoi) le jumeau voyageur est plus jeune que l’autre à son retour, mais par contre ça montre très bien que, malgré les apparence, les deux jumeaux ne sont pas dans des situations symétriques.

Reprenons le récit du voyage depuis le début, mais avec un petit changement; les deux jumeaux ont convenu d’émettre, vers l’autre (par radio) un «bip» répétitif, avec un rythme d’un par seconde.

Je crois qu’il est assez facile de comprendre que:

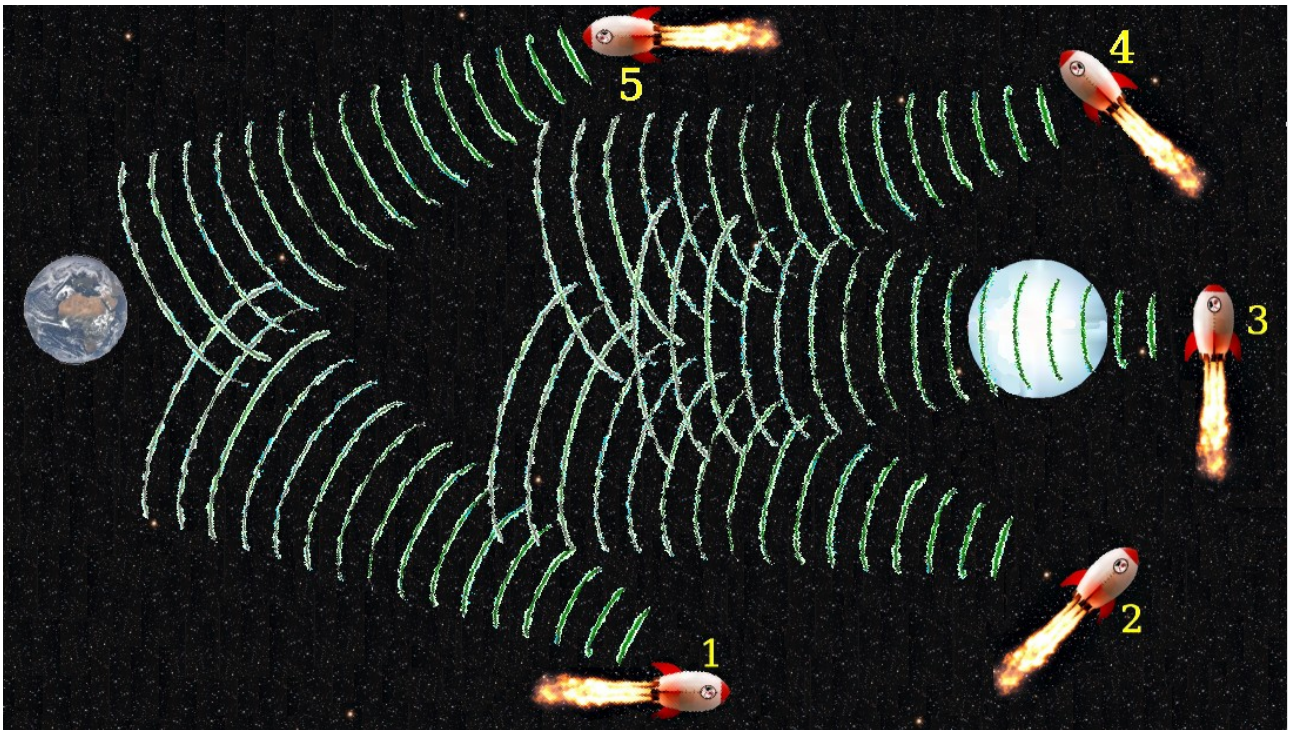
-Si le jumeau voyageur émet un bip chaque seconde (pour lui), le jumeau resté sur Terre les recevra avec un écart supérieur à une seconde puisque, du fait de l’éloignement continu de la fusée, chaque bip est émis par la fusée depuis un peu plus loin à chaque fois.

-Si le jumeau resté sur Terre émet un bip chaque seconde (pour lui), le jumeau voyageur les recevra avec un écart supérieur à une seconde puisque, du fait de l’éloignement continu de la fusée, chaque bip émis depuis la Terre a un peu plus de distance à parcourir à chaque fois pour rejoindre la fusée qui, rappelons le, s’éloigne.

Pendant toute la durée de l’accélération de la fusée, l’écart entre chaque «bip» ne cesse d’augmenter, et cela aussi bien pour le jumeau voyageur que pour celui resté sur Terre. Dès que l’accélération cesse, la durée entre les «bips» reste bien sûr supérieure à une seconde (puisque la fusée continue de s’éloigner) mais elle cesse d’augmenter……. Pour le voyageur uniquement!!!!!!

Pourquoi? Parce que le jumeau resté sur Terre devra attendre l’arrivée des premiers «bips» émis juste après l’arrêt de l’accélération. Ces premiers «bips» doivent parcourir la distance entre la fusée au moment de leur émission, et la Terre, or ça peut prendre beaucoup de temps (5 ans si l’arrêt de l’accélération se produit à mis chemin).

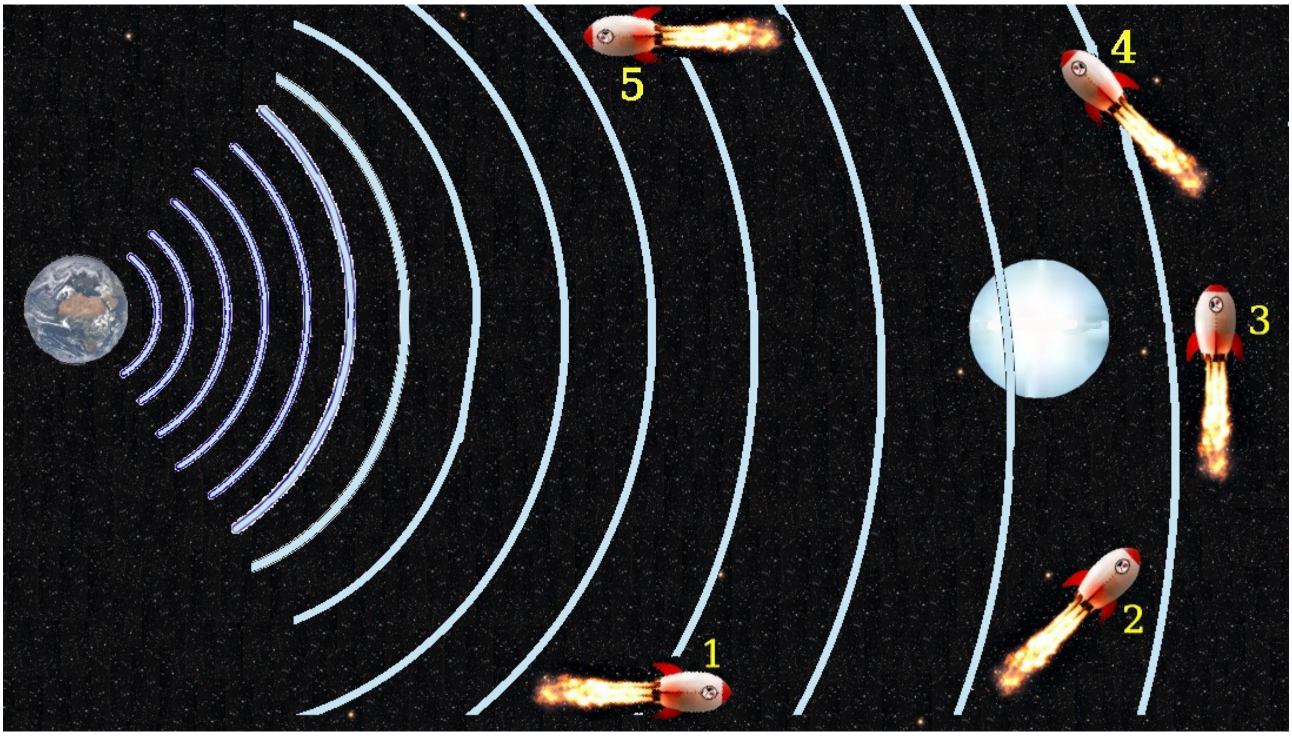
La fusée accélère jusqu’à la position «1» (dessin ci dessous), et donc les premiers «bips» émis après accélération sont les premiers «bips» envoyés depuis cette position. Ces premiers «bips» doivent donc d’abord parcourir la distance qui les séparent de la Terre avant d’ête reçus par le jumeau resté sur Terre, ce qui prend du temps (5 ans pour l’exemple choisi ici).



Du côté du voyageur, les choses sont différentes. Lui, en quelque sorte, «baigne» dans les ondes émises (et donc les «bips» émis) par la Terre depuis son départ.

Ces ondes sont toutes pareilles et la modification du rythme apparent de réception n’est en rien lié à quelque chose se produisant sur Terre, mais uniquement à la poursuite ou non de l’accélération de la fusée donc au fonctionnement de son moteur, donc à un phénomène <u>local</u> et une décision <u>locale.</u>

Conséquence: la modification du rythme de réception apparaît <u>immédiatement après la fin de l’accélération pour le voyageur</u>.



Si la différence entre le jumeau resté sur Terre (et dont le rôle est strictement passif, c’est ça l’important) et le jumeau voyageur (dont le rôle est actif, c’est LUI qui agit pour qu’il y ait accélération ou pas et c’est aussi ça l’important) ne vous semble pas encore clair, ça viendra peut-être en continuant le voyage.

Le jumeau voyageur continue donc vers la position 2, puis 3, puis 4.

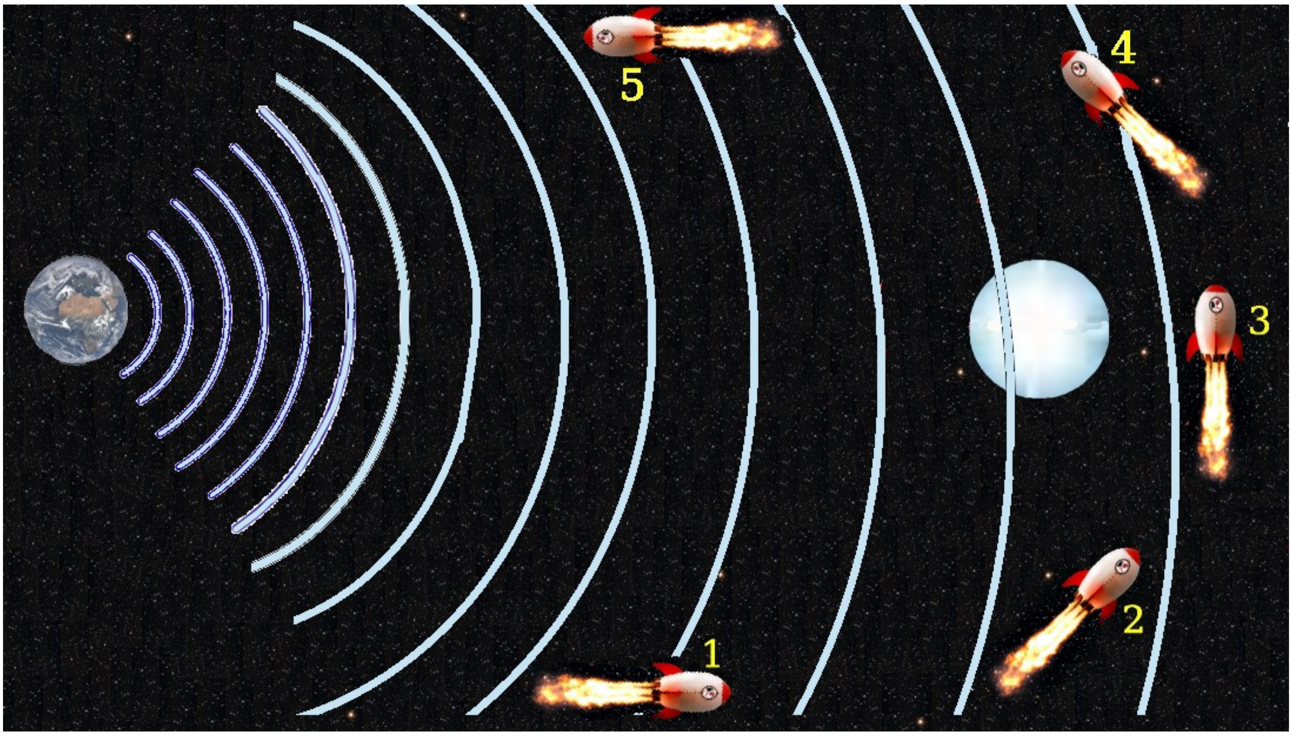
Lors de ce demi-tour, les ondes en provenance de la Terre n’ont pas changé. Par contre, de par la manœuvre d<u>écidée et réalisée par le voyageur uniquement</u>, ces ondes, désormais, il les rencontre de face.
C’est comme un bateau qui navigue d’abord dans le sens des vagues puis

qui fait demi tour, et désormais, sans qu'il y ait eu modification réelle de l'écart entre les vagues, les traverse de manière plus rapprochée parce qu'il va désormais à leur rencontre.

Oui mais, me direz vous, pour les vagues, pas de problème puisque après le demi tour, la vitesse relative entre les vagues et le bateau a logiquement augmenté, mais pour les ondes radio c'est différent puisque la relativité impose une vitesse invariante «c».

Certes, mais le seul fait que la fusée se déplace à une certaine vitesse vers la Terre, fait que la distance restante diminue constamment et donc la distance à parcourir par les ondes (ou vagues, ou «bips») diminue elle aussi constamment ,et en conséquence la distance entre deux «bips» dimminue de la même manière.
C'est pour ça que, même si la vitesse de ces ondes est invariante, la durée entre deux bips a diminué **dès** le demi tour.

On voit bien ci dessous comment la fusée vient désormais à la rencontre des ondes dès le demi-tour (position 4, puis 5). Ce qui signifie que c'est **dès** le demi-tour que le jumeau dans la fusée constate une accélération du rythme des «bips».



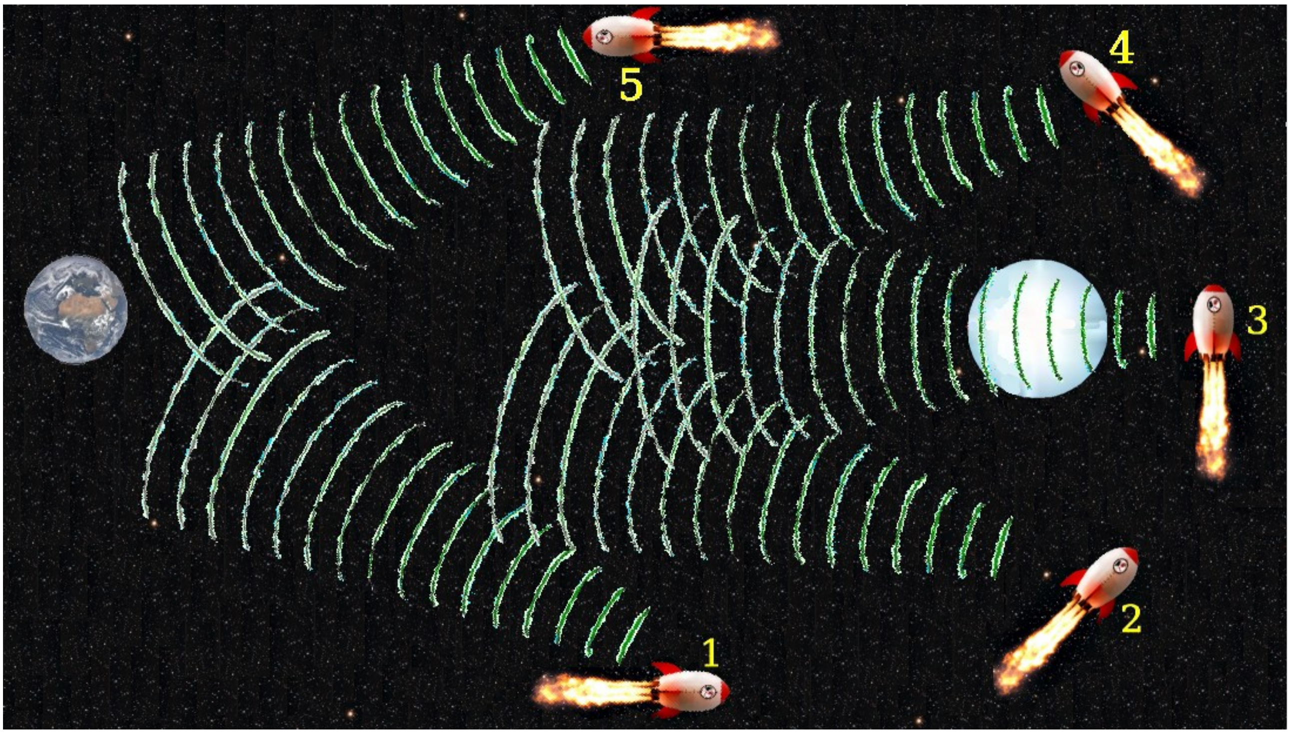
Par contre, pour le jumeau resté sur Terre, c'est différent. Lui ne se déplace pas activement en direction des ondes.

Pour lui, qui est passif, il n'est possible de constater une accélération du rythme que lorsqu'il recevra les ondes que la fusée a émises en se déplaçant vers la Terre.

C'est parce que, après le demi-tour, la fusée se déplace vers la Terre à une certaine vitesse que la distance d'émission diminue constamment entre deux «bips» et c'est ça qui donne l'augmentation du rythme.

Mais pour recevoir ces ondes émises après le demi-tour, il faut qu'elles aient fait tout le trajet depuis l'étoile où le demi-tour a été réalisé, et, dans l'exemple choisi, ça prend dix ans……….

Le rythme apparent d'émission des «bips» augmente juste après le demi-tour (position 4, et 5) parce que le déplacement de la fusée fait constamment diminuer la distance restante avec la Terre, et donc le temps nécessaire pour le trajet de chaque
«bips» consécutif.



Mais le jumeau resté sur Terre ne peut constater cette augmentation de rythme que lorsque les ondes émises depuis au minimum la position 4, seront parvenues sur Terre, donc dix ans.

Il y a donc bien une assymétrie entre les deux jumeaux.

Le jumeau voyageur constate une augmentation du rythme des «bips» dès son demi-tour, et donc tout au long de son voyage de retour, alors que le jumeau resté sur Terre ne constatera cette augmentation que dix ans plus tard (selon SON calendrier), et si le jumeau voyageur va vraiment très vite, cette augmentation du rythme précédera de peu le retour de son frère.

Ou pour le dire autrement: Le jumeau voyageur voit les messages de son frère lui parvenir au ralenti pendant la moitié du voyage et en accéléré pendant l'autre moitié du voyage, tandis que le jumeau resté sur Terre voit les messages de son frère lui parvenir au ralenti pendant la très très grande majorité du voyage et en accéléré seulement pendant un temps assez bref, à la fin.

Conclusion: Si chaque jumeau utilise le rythme des «bips» reçus pour estimer le temps qui passe chez son frère, le jumeau voyageur se dira que son frère a vieilli lentement pendant la moitié du voyage et vite pendant l'autre moitié, tandis que le jumeau resté sur Terre se dira que son frère voyageur a vieilli lentement pendant presque tout le voyage et vite pendant très peu de temps à la fin.

Pas étonnant qu'il y en a un qui est plus jeune…..

Il est à noter que, cet «effet jumeau» est directement lié au fait que le vaisseau s'éloigne puis se rapproche.

Rien d'autre ne compte, seulement que, in fine, il se rapproche.

Conséquence, si l'on est dans un univers «refermé ou replié sur lui même», c'est à dire, un univers dont la courbure est telle qu'en allant tout droit pendant trèèèèèèèèèèèèèèèèèès longtemps, on fini par revenir au point de départ sans jamais avoir fait demi tour (éventualité tout à fait possible), alors le jumeau qui fait ce voyage, sans jamais faire demi tour, mais en finissant quand même par se rapprocher dans la deuxième partie de son voyage sera, dans ce cas là aussi, plus jeune.

Bon ok, mais la raison profonde de cette différence d’âge, c’est quoi?

Même si l’espace-temps de Minkowsky n’est pas tout à fait semblable à celui, totalement spatialisé, que j’ai utilisé dans toute la première partie de ce document, on peut, on doit, quand même parler de trajectoire spatio-temporelle (donc dans les 4 dimensions d’espace et temps).

Dans le cas de nos deux jumeaux, ils ont deux trajectoires différentes.

-Celui resté sur Terre reste constamment dans le même référentiel* inertiel** pendant tout le déroulement de l’histoire, ce qui implique que sa trajectoire dans l’espace-temps est une droite (comme le train ou le bateau du début qui ne changerait jamais de direction (= n’aurait aucun déplacement dans l’espace)).

-Celui qui est parti en fusée a changé de référentiel* (et n’a pas toujours été inertiel** puisqu’il a accéléré ou décéléré à deux reprises, et même celui qui aurait fait le tour d’un univers «replié ou refermé» à, au minimum, accéléré en partant), ce qui implique que sa trajectoire dans l’espace-temps est une ligne brisée comme sur le dessin suivant.

Rappels:
(*) Pour faire trèèèès simple, un référentiel est un repère, par exemple un simple objet, par rapport auquel on détermine et mesure un mouvement.

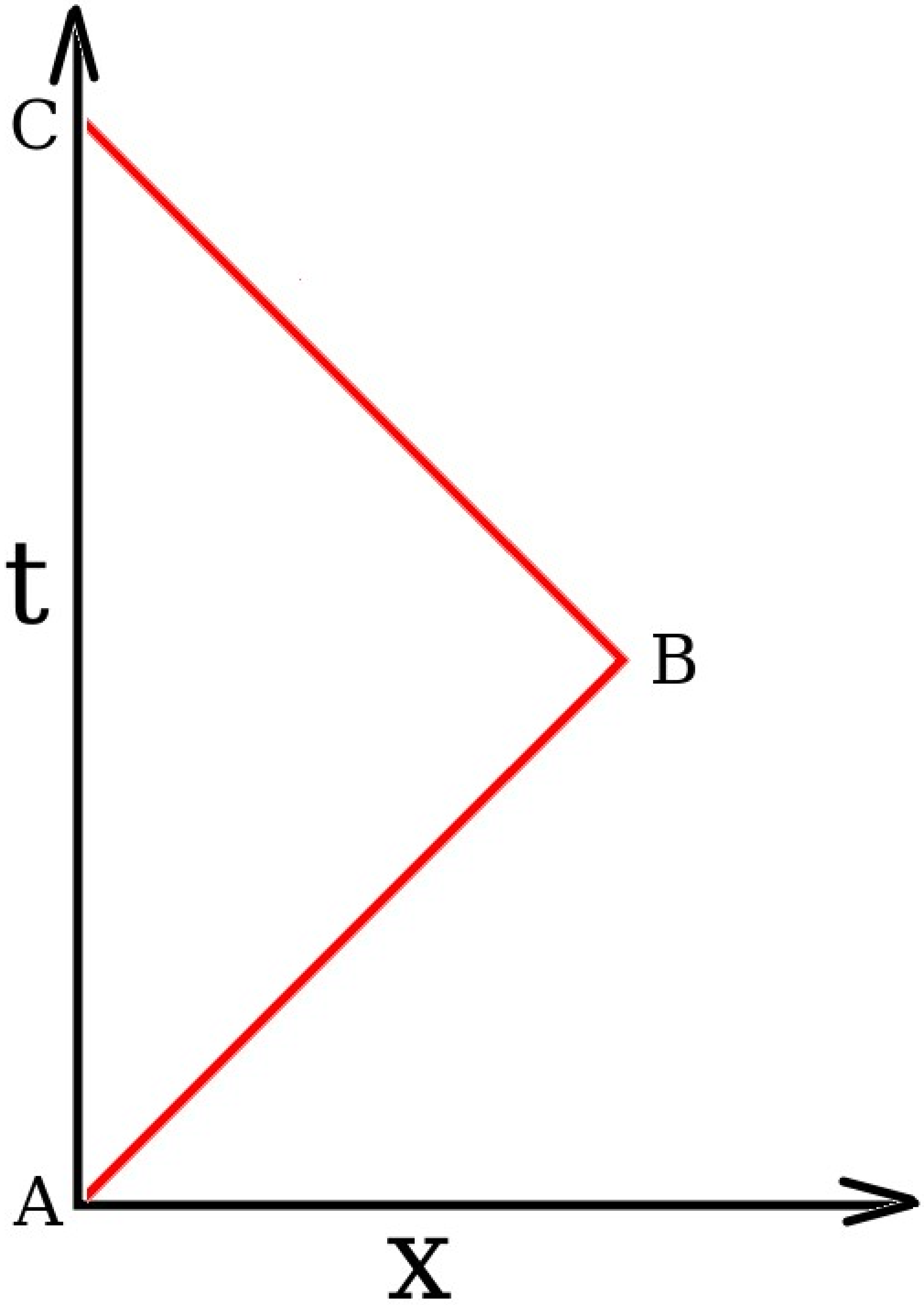
(**) Pour faire aussi simple, le terme inertiel signifie «sans aucune influence» donc en particulier sans force agissante sur le mobile. Ceci implique une accélération nulle et donc mouvement rectiligne uniforme.

On voit donc, sur le dessin suivant:

-La trajectoire du jumeau resté sur Terre (c’est la ligne droite A – C).

-La trajectoire du jumeau voyageur (c’est la ligne «brisée» A – B – C).

(Les points A et C sont sur Terre, mais à des époques différentes, le point B, c’est l’étoile où se produit le demi-tour).



Dans un espace-temps purement Euclidien, la ligne «brisée» A – B - C est plus longue que la ligne droite A – C, mais, et toujours à cause de cette histoire de changement de signe dans la métrique, dans l’espace-temps de Minkowsky, c’est le contraire. Donc contrairement à l’intuition, et aux apparences, la trajectoire A – B – C est plus **COURTE** que la trajectoire A – C.

Résultat: Le jumeau voyageur à réalisé un **«trajet» dans l’espace-temps**

qui est plus court que celui de son frère resté sur Terre, et donc il arrive à destination **en moins de temps** que lui, et il dès lors normal qu'il soit plus jeune.
Si un ami me donne rendez-vous à Paris le vingt Juillet 2030 à 10 heures pile, et que pour moi le voyage est plus court que pour lui, il est normal que j'y arrive en ayant vieilli moins que lui. Oui je sais, ça bouscule un peu notre logique familière, mais c'est pourtant bien comme ça.

Encore un petit supplément utile (et facultatif parce que….. il y a un petit peu de math), mais peut-être utile pour ceux qui veulent calculer l'un ou l'autre «truc».

Si «t» désigne la durée d'un voyage sur l'horloge du jumeau resté sur Terre, «t'» la durée du même voyage mesurée sur l'horloge du jumeau voyageur, alors cette équation (c'est en fait la même des deux côtés):

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad \textbf{et} \quad t' = t\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Permet à chaque jumeau de calculer les durées vécues par son frère.

Et si «l» désigne une longueur (une distance) mesurée par l'un des jumeaux dans son propre référentiel (tout ce qui est au repos par rapport à lui), alors «l'» est la longueur ou distance que le même jumeau mesure dans un référentiel en mouvement à la vitesse v par rapport à lui.

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

Ou pour le dire autrement:

-Si la fusée du jumeau voyageur fait 100 mètres de long avant le départ, alors, pour le jumeau voyageur, elle fera toujours 100 mètres de long (et pour lui ce sera «l»), mais pour le jumeau resté sur Terre, ce sera «l'» qui est toujours plus court dès que $v \neq 0$.

-Si la distance séparant la Terre de l'étoile est de $\mathbf{10^{17}}$ mètres (environ 10 années lumière en mètres) pour le jumeau resté sur Terre, elle aura toujours cette même valeur pour lui (ce sera «l»), mais pour le jumeau voyageur ce sera «l’» qui est toujours plus court dès que v ≠ 0.

On a parlé aussi de relativité de la simultanéïté (avec les bateaux, quand deux événements simultanés pour l’un ne l’étaient pas pour l’autre).
Eh bien la formule permettant le calcul du décalage de temps pour un observateur entre deux événements simultanés pour un autre observateur est celle ci:

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

Avec

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

et (x2 – x1) = la distance spatiale entre les deux événements.

Donc ça signifie que:
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

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

C’est presque fini pour cette partie, mais on a toujours pas parlé du fait que la vitesse de la lumière est une barrière infranchissable.

Souvenez-vous que l’on a parlé de la contraction des longueurs (et donc des distances aussi). Pour un objet se déplaçant **<u>hypothétiquement</u>**, à la vitesse de la lumière, le calcul montre que sa taille mesurée par un observateur extérieur serait….. nulle!!! De son côté, la distance qu’il mesurerait entre lui et sa destination serait, elle aussi…... nulle!!!!

On a parlé aussi de dilatation du temps. Ben pour un objet se déplaçant

<u>hypothétiquement</u>, à la vitesse de la lumière, le calcul montre que le voyageur à l'intérieur de cet objet (une fusée par exemple) mesurerait un <u>temps nul</u> pour se rendre, même à des dizaines de miliards d'années lumière de distance. Tout se passerait donc pour lui comme si sa vitesse était infinie. Une taille nulle, des distances nulles, une vitesse infinie, normal que cette vitesse de la lumière ne puisse être atteinte et encore moins dépassée.

On a parlé aussi à plusieurs reprises de trajectoire dans l'espace-temps (la ligne d'univers).
Qui dit trajectoire, dit, ou tout au moins sous entend, déplacement voir mouvement. Et qui dit mouvement dit ou sous entend **vitesse…** Sauf que pour parler de vitesse dans l'espace-temps, il faut pouvoir définir ce que ça signifierait pour la partie «temps» de l'espace-temps.
Une vitesse (dans l'espace «tout court»), c'est un espace sur un temps, mais une vitesse dans le temps, c'est quoi? Un temps sur un temps? Étrange… Sauf si la dimension temps était, en fait, réellement «spatiale» quelque part, mais ça, ce n'est que pure spéculation.

En attendant, on a tout de même **inventé** une vitesse dans l'espace-temps. Ou plutôt, on a **étendu le concept** de vitesse aux 4 dimensions de l'espace-temps; c'est ce que l'on nomme la quadrivitesse ou le quadrivecteur vitesse.
Ce quadrivecteur vitesse regroupe des composantes spatiales et temporelles, et sa norme est invariablement c (donc la vitesse de la lumière)…

Tout se passe comme si tous les objets massifs quels qu'ils soient se déplaçaient constamment à la vitesse de la lumière toujours, partout, en toutes circonstances, mais dans l'espace-temps.

Bref si je ne bouge pas (dans l'espace) je vais en quelque sorte à «c» dans le temps, et si je me déplace dans l'espace «tout court» je «vais moins vite» dans le temps.

Une sorte de transfert, mais en conservant toujours la norme du quadrivecteur à «c». C'est une autre raison pour laquelle la vitesse de la lumière n'est pas dépassable, mais en fait, en quelque sorte parce que c'est comme si la vitesse ne changeait jamais…
Cela dit certainement quelque chose de plus fondamental sur la réalité de l'univers.

<u>Bon, voilà qui est je crois suffisant comme simple mise au point au sujet de la relativité restreinte et les méprises courantes à son sujet.</u>

Je vais donc dire aussi quelques mots au sujet de la relativité générale. Elle est bien plus difficile et peut-être encore bien plus contre-intuitive, mais de toute façon il n’est pas question de l’expliquer vraiment mais de simplement préciser quelques points particulièrement sujets à de fausses «croyances».

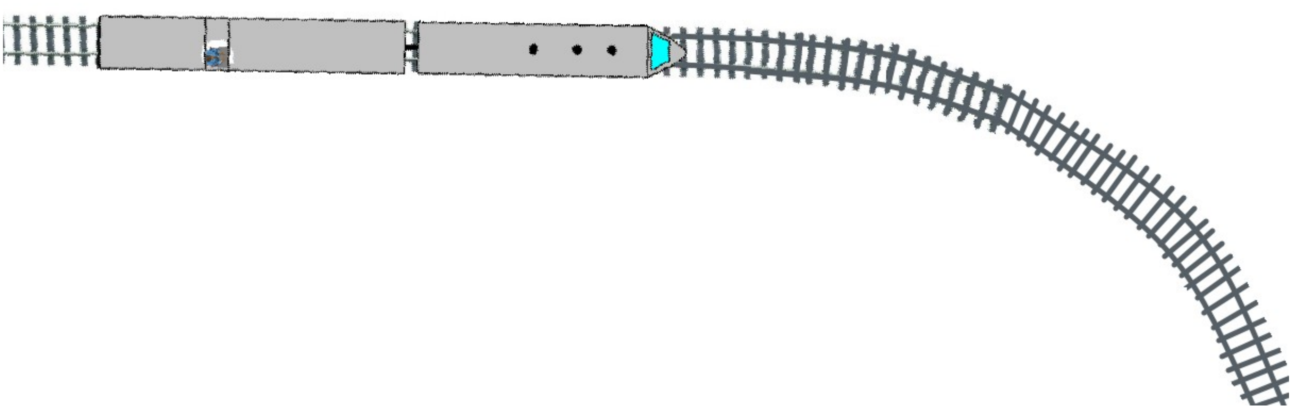
La relativité générale est de fait une théorie de la gravitation, qui y est décrite comme une déformation de l’espace-temps, j’ai bien dit de l’espace-temps et non pas de l’espace tout court, ce qui est déjà un point mal compris.

Revenons à notre train du début, et imaginons que l’observateur, donc le voyageur dans le train, ne bouge pas de son siège.

Il n’a donc, à priori, pas de déplacement dans l’espace (seul).

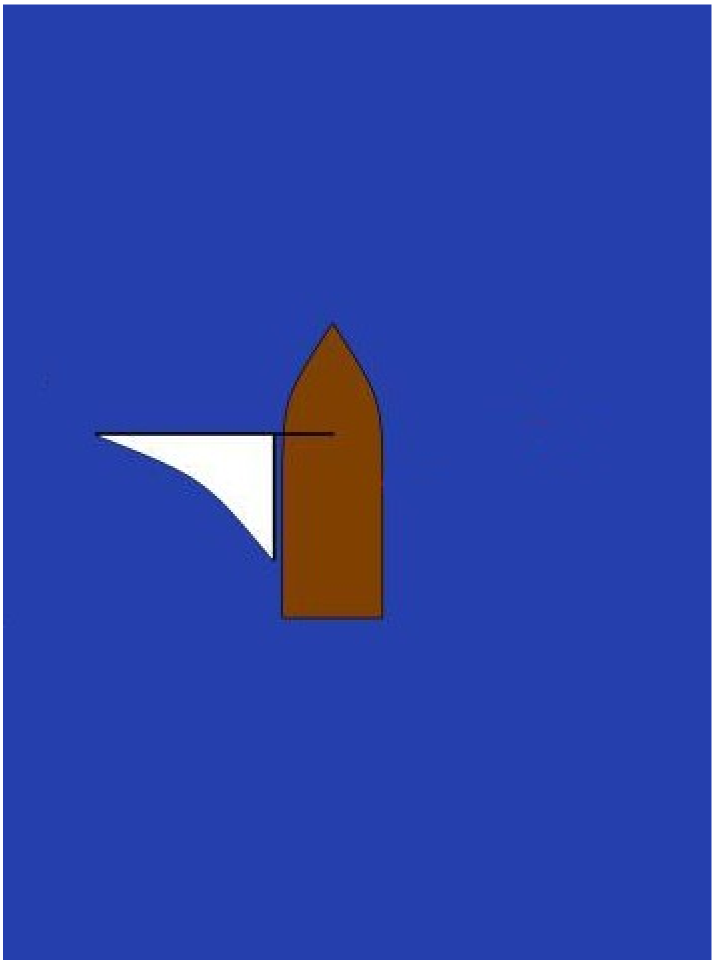
Mais imaginons donc que ce n’est pas le voyageur qui se déplace dans les dimensions spatiales (donc latérales dans les dessins), mais que ce soient les voies de chemin de fer elles mêmes qui tournent.

Le train et donc le voyageur/observateur se retrouve entraîné latéralement (équivalent à un déplacement dans l’espace) non par une force, mais par la forme géométrique de ce sur quoi il roule (= son espace-temps).



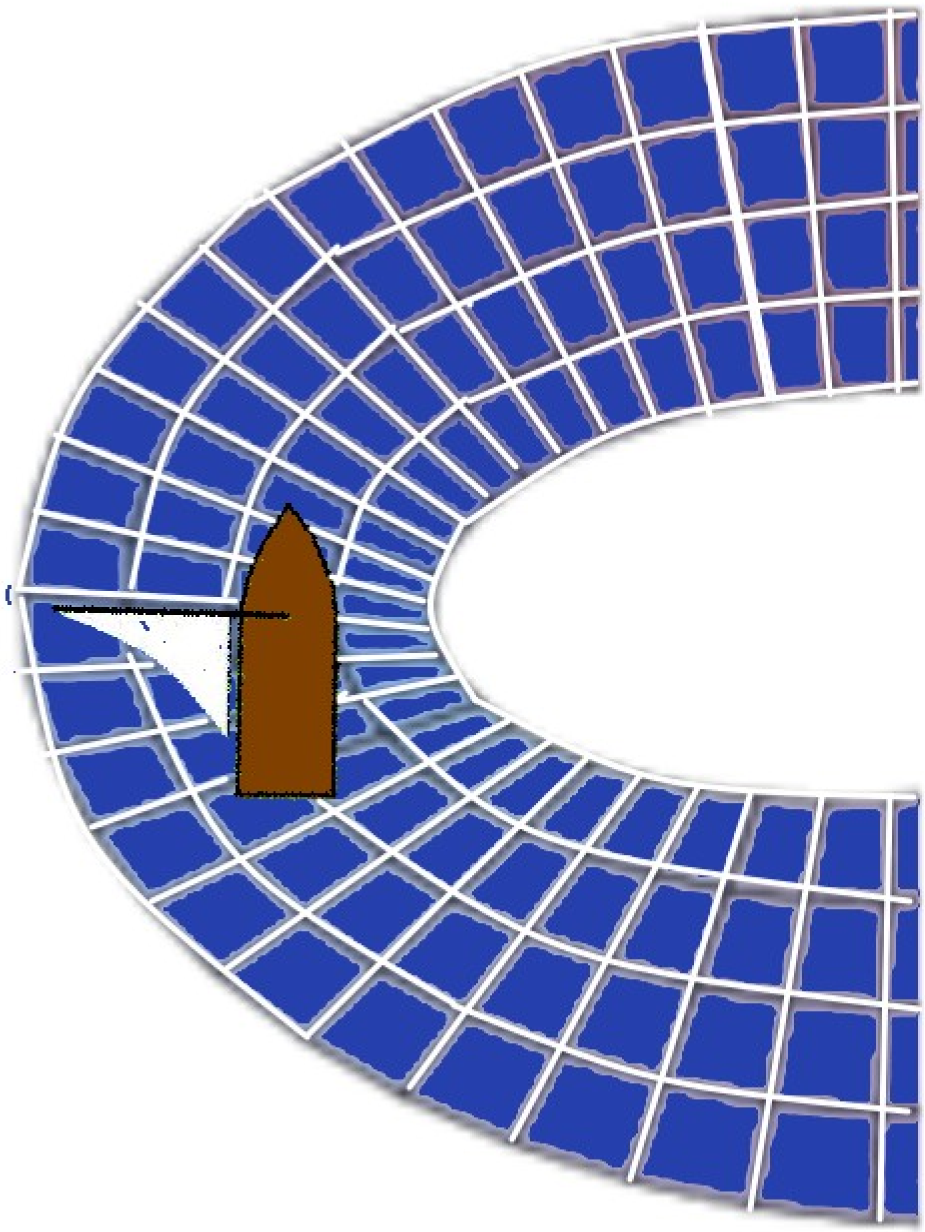
Et dans l’exemple du bateau, il faut imaginer (c’est plus compliqué) que le plan d’eau sur lequel il navigue, s’incline et se déforme de manière à le faire tourner tout en continuant apparemment en ligne droite.

On passerait donc de ceci:



Un plan d’eau tout à fait normal, habituel…..

À cela:



Il faut imaginer, grâce au quadrillage ou au «treillage», que c’est le plan d’eau lui même qui est incurvé, et ce plan d’eau c’est son espace-temps...

L’idée donc derrière tout ça, est de montrer que lorsque l’espace-temps lui même est courbé, les objets peuvent voir leur trajectoire incurvée sans qu’aucune force n’agisse.

C’est comme une fourmi se promenant sur un ballon très très grand, qui «tourne» autour du ballon en ne se déplaçant, selon son ressenti, que en ligne droite.

Ou comme un voyageur qui fait le tour de la Terre en ne se déplaçant, selon son ressenti, que en ligne droite.

L’un comme l’autre ne tourne pas parce qu’il changent de direction, mais parce que l’espace (à deux dimensions ici, donc **<u>la surface</u>** du ballon, ou **<u>la surface</u>** de la Terre) dans lequel ils se déplacent est lui même courbé, et ils <u>suivent</u> simplement cet espace courbé sans rien ressentir ni s’apercevoir.

On comprend alors que les objets non soumis à quelque force que ce soit (on dit «en chute libre», et c’est le cas, même des satellites (eh oui)) ont une trajectoire (<u>apparemment)</u> spatiale* courbe.

(*)En fait, ce n’est bien entendu pas que leur trajectoire spatiale qui est ainsi courbée (puisque la courbure concerne l’espace-temps), mais seule celle-ci <u>se voit</u>.

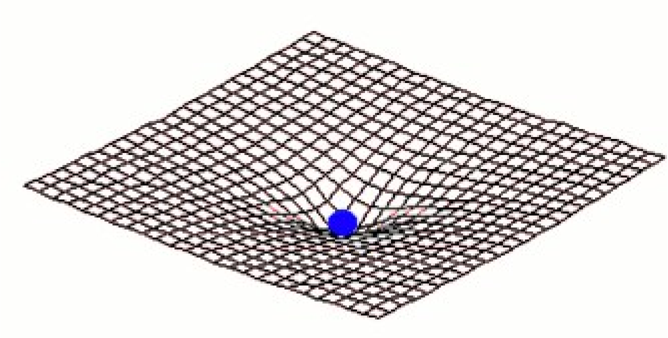
Mais qu’en est-il des objets, qui sont, ou au moins semblent être, soumis à une force?

Un objet posé sur une table, ou sur le sol ou même des objets propulsés?

Ben leur trajectoire dans l’espace-temps courbé, est en quelque sorte «empêchée» de bien suivre la courbure, à cause de la force de résistance du sol, ou de la force de propulsion.

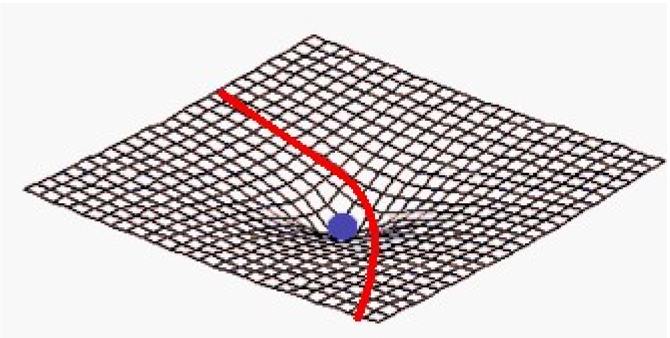
C’est cette «action contraire» qui entraîne une force de réaction qui est, par exemple, le poids.

La représentation la plus populaire de la courbure de l’espace-temps due à la gravitation, ou mieux encore **qui est** la gravitation, c’est celle-ci:



Dans cette représentation, l’objet massif (par exemple un astre) est représenté par le gros point bleu, et l’espèce de quadrillage déformé est l’espace-temps.

On dessine en plus une trajectoire supposée être celle d’un objet en mouvement passant à proximité et dont la trajectoire est déviée par la déformation produite par l’astre.

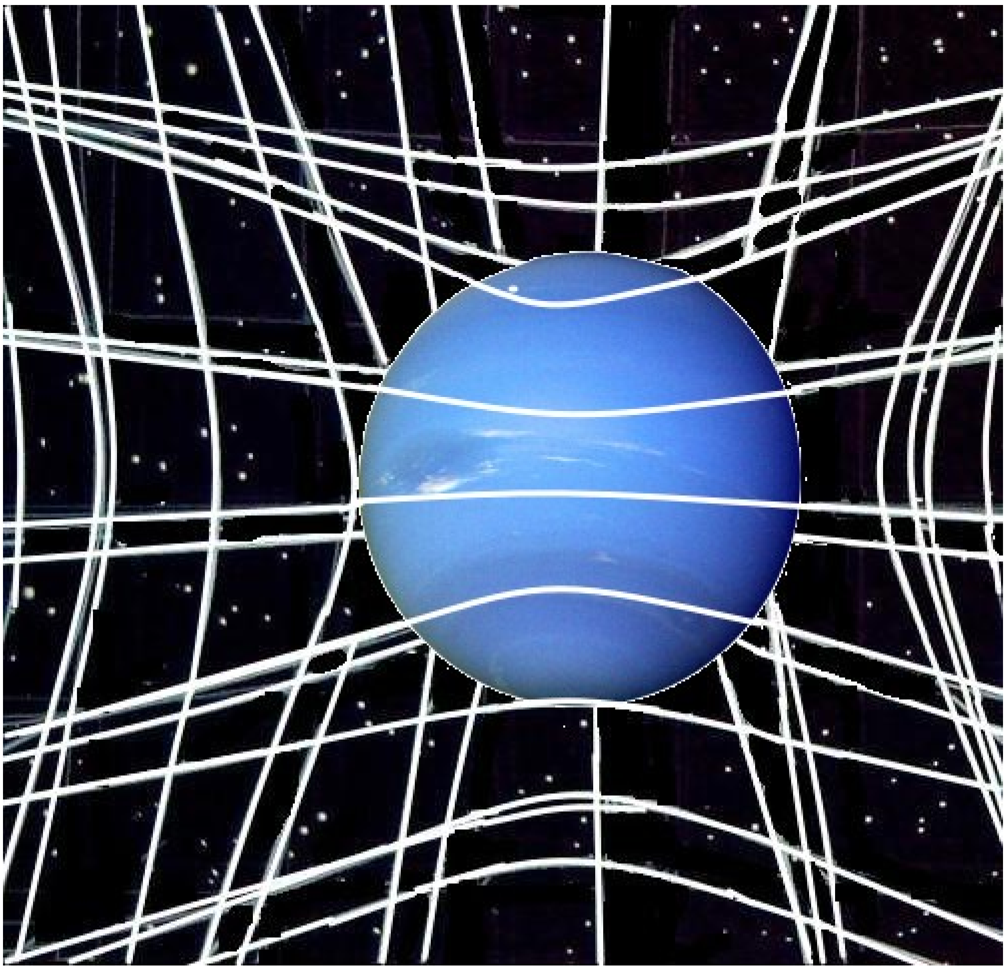


L’idée n’est pas complètement mauvaise (pas complètement mais mauvaise quand même) en ce sens qu’elle montre qu’une déformation peut modifier une trajectoire, mais elle produit beaucoup d’incompréhension aussi.

Tout d’abord, et paradoxalement du coup, elle prétend expliquer la gravitation en utilisant une image qui implique…. l’existence préalable de la gravitation…. En effet, pour déformer ainsi le «tissus» il faut que la bille……. pèse dessus… Ce qui est paradoxal..

Et puis, l’espace est ici représenté par «tissus»/quadrillage, est apparemment en deux dimension, ou tout au moins très aplati, ce qui pousse certains (je l’ai lu/entendu) à croire qu’un astre produit réellement une déformation qui a cette forme, donc qui ne se manifeste que selon une sorte de «plan».
C’est faux bien sûr.

Alors pour éviter cette confusion entre un dessin qui ne prétend rien d’autre que de montrer qu’une déformation du «support» d’une trajectoire entraîne un changement de la trajectoire elle même, et la réalité dans laquelle l’espace-temps n’a absolument pas cet aspect là, et surtout ce nombre très réduit de dimensions (2, pour le dessin précédent), on est passé à une représentation plus «tridimensionnelle», comme ceci:



Bon, là on a effectivement déjà trois dimensions (sur 4 en fait, donc toujours pas la «vraie» réalité), ce qui est est un progrès, mais je ne suis pas certain que ça aide vraiment parce que, de toute façon, en plus de l’absence d’une dimension, il reste que certaines trajectoires (orbites elliptiques, par exemple, et entre autres) ne se déduisent pas mieux ou plus intuitivement à partir de cette représentation.

Je pense qu'il n' y a pas de représentation «en image» qui soit fidèle et «explicative», et donc il faut se contenter de comprendre les représentations par «train sur des rails qui tournent», bateau sur un plan d'eau incurvé, bille sur un quadrillage «enfoncé» ou, comme ci dessus, la planète Neptune dans un quadrillage «tordu», uniquement comme des outils pour aider à accepter l'idée qu'un espace-temps courbé provoque logiquement ce qui est ressenti comme la force de gravitation.

En plus, il faut savoir que cette déformation dont on parle, et qui est la gravitation, cette déformation donc, concerne l'espace-<u>temps</u>, et non pas seulement l'espace «tout court».

Ce n'est pas un simple détail, et c'est d'ailleurs à l'origine de bien des incompréhensions.

En effet, pour suivre la courbure de l'espace-temps, il suffit d'être en «chute libre», et tous les objets «en chute libre» au même endroit suivront la même courbure.

Un satellite est, de fait, en chute libre, et donc tous les objets sur la même orbite suivent la même trajectoire, avec la même courbure.

Plus proche de nous, n'importe quel objet «lancé», et laissé à sa seule inertie, suit une trajectoire de chute libre, qu'il s'agisse d'un ballon ou d'une balle de fusil.

Et c'est là que se produit l'incompréhension qui découle de l'ignorance ou de l'oubli qu'il faut décrire la courbure dans l'espace-temps, et pas dans l'espace tout court.

Si lancer un ballon lui fait suivre <u>la même courbure</u> que la balle de fusil tirée depuis le même endroit, et dans la même direction, comment se fait-il que ce n'est pas du tout ce que l'on voit?

Faisons l’expérience de pensée suivante:

On place une cible à quelque mètres, et on décide de la viser, tout d’abord avec un fusil, et ensuite avec un ballon de football.

Il ne fait absolument aucun doute que, visuellement, les deux trajectoires seront très différentes, et leur courbure visible aussi.

Pour le tir au fusil, on verra une trajectoire très tendue, presque «plate», ou «droite», alors que pour le ballon, la courbure de la trajectoire sera visible et évidente.

Comment expliquer cette différence, alors que les deux «objets» (balle de fusil et ballon) suivent la même courbure?

C’est qu’il faut absolument voir ça, non pas dans l’espace seul, mais dans l’espace-temps, j’ai envie de dire «complet».

Lorsque l’on se contente de ne voir les deux tirs que dans l’espace, on a l’impression que les deux trajectoires ont exactement la même longueur, et c’est normal puisque la cible est posée à la même distance.

Mais si l’on pouvait «voir» cela dans l’espace-temps, on devrait y ajouter le temps, et c’est là que tout change.

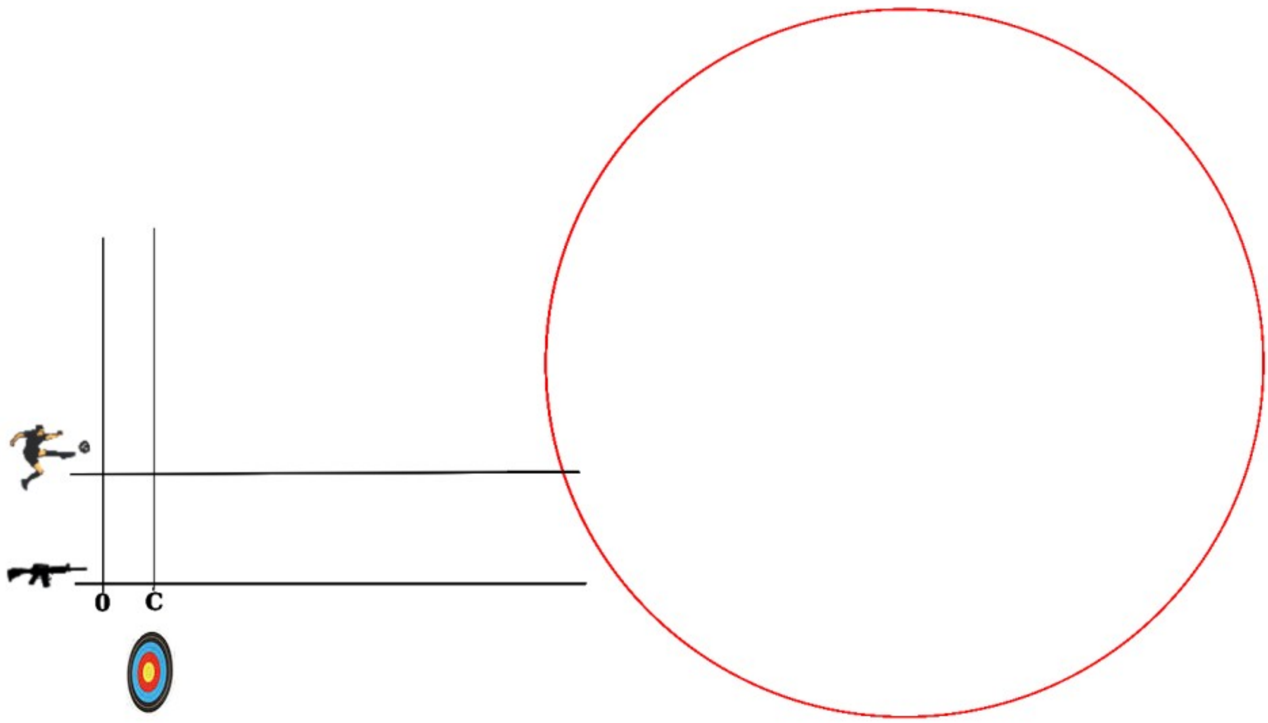
En effet, il est évident que la balle de fusil effectue son trajet en beaucoup moins de temps et que donc sa trajectoire dans l’espace-temps est forcément plus courte, parce qu’il faut «combiner» la distance spatiale (qui est la même pour tous les deux), et la «distance» temporelle (si je puis m’exprimer ainsi) qui est beaucoup plus courte, avec comme résultat que la distance combinée (espace + temps) est, au total, plus courte pour la balle de fusil que pour le ballon.

Ça change quoi?

Eh bien ça change que si les deux trajectoires sont de longueur en réalité différentes, alors il suffit d’une différence de longueur sur une même courbe pour obtenir deux «visions» différentes.

Sur le dessin suivant, j’ai illustré ce que je dis.

Le tireur au fusil et le footballeur sont tous les deux au point «0», et visent tous les deux une cible située au point «C».

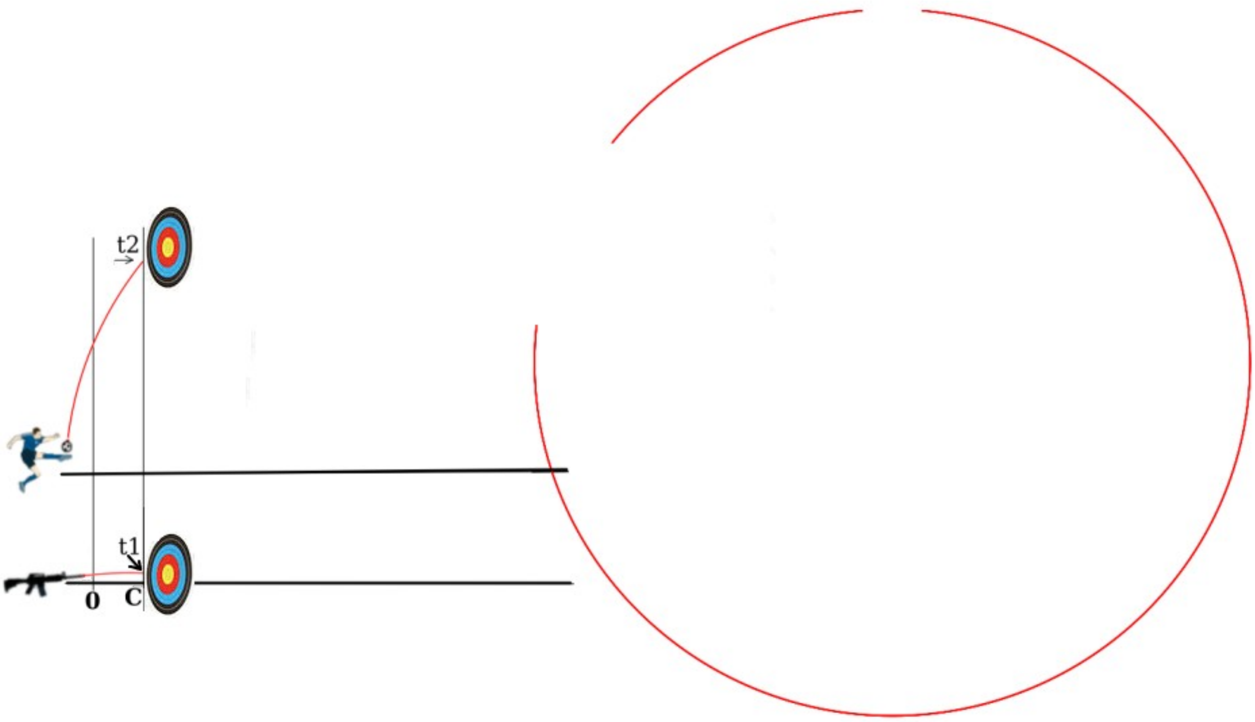


Pour respecter ce qui a été dit, il faut donc que la balle de fusil et le ballon suivent tous les deux **<u>la même courbure.</u>**

Cette courbure commune est représenté ici par le cercle rouge. Il faut donc que la balle de fusil et le ballon suivent une trajectoire qui a exactement la même courbure que le cercle.

Si c’est la **même** courbure, alors les deux lignes (courbes) représentant les deux trajectoires (belle de fusil et ballon) doivent pouvoir être «extraites» du **même** cercle, celui qui a été dessine à côté.

Ben du coup, c'est ce que l'on va faire sur le dessin suivant:



Et là on voit clairement que la trajectoire de la balle de fusil est «extraite» du haut du cercle, et la trajectoire du ballon est «extraite» de côté gauche.

Les deux trajectoires ont donc exactement <u>la même courbure</u> (celle du cercle), et la seule différence qui les fait <u>paraître</u> plus ou moins «courbées», **c'est leur longueur**.

Et comment leur longueur peut-elle être différente alors que la distance tireur – cible est la même?

Parce que elle n'est la même <u>que spatialement</u>, mais si l'on tient compte du temps (la balle de fusil parcourt la distance en beaucoup moins de temps), les deux trajectoires (spatio-**<u>temporelles</u>**, cette fois) ne sont plus du tout égales.

Celle du ballon est beaucoup plus longue…

Et c'est d'ailleurs pour ça que, sur le dessin, la trajectoire du ballon est représentée ainsi; elle rejoint la cible plus **tardivement** et donc plus **«loin dans le temps»**, et donc **<u>plus «haut» sur l'axe du temps</u>**.

<u>COUBURE DE L’UNIVERS.</u>

Je profite de l’occasion, pour parler un peu d’une autre méprise. Cette autre méprise courante, sans doute aidée par cette représentation populaire de la courbure de l’espace-temps montrée plus haut (la bille bleue sur le quadrillage), consiste à croire que, lorsque les physiciens parlent d’espace-temps **plat**, ils veulent dire que notre univers a réellement une forme de aplatie façon crèpe.

Là aussi c’est totalement faux, et l’origine de l’erreur vient de la façon totalement erronée avec laquelle beaucoup de gens comprennent le terme «plat» (espace-temps plat) dans ce cas ci.

Lorsque l’on parle d’espace ou d’espace-temps plat, ça ne signifie absolument pas qu’il est «peu épais» selon l’une des dimensions, ça signifie seulement qu’il n’est PAS courbé. Du coup, voyons un peu ce que signifie courbé pour un espace (ou un espace-temps).

On peut imaginer beaucoup d’espace avec un nombre de dimensions très variables (en fait même à l’infini).

Commençons par exemple par un cas très simple, un espace à une seule dimension, c’est à dire une ligne, mais attention une ligne <u>d’épaisseur</u> <u>**nulle,**</u> sinon il y a plus d’une dimension.

Si cette ligne est une droite, alors c’est un espace unidimensionnel <u>plat</u>.
Si cette ligne est une courbe, voir même un cercle, alors c’est un espace unidimensionnel <u>courbe</u>.
Facile donc….

Bon, un espace unidimensionnel, c’est assez ennuyeux, des êtres imaginaires qui y vivraient, et même les «objets» qui y existeraient ne se distingueraient que par leur longueur, rien d’autre ne pourrait les différencier. Ils n’auraient ni forme, ni contour, et aucune épaisseur ni largeur…

Passons maintenant à un cas juste un peu moins simple, un espace à deux dimensions, c’est à dire, par exemple, un plan, mais toujours attention un plan <u>d’épaisseur</u> <u>**nulle,**</u> sinon il y a plus de deux dimensions.

Si ce plan est…….. ben un plan, alors c’est un espace bidimensionnel <u>plat</u>.

Si cet espace bidimensionnel est, <u>par exemple</u>, la SURFACE (oui, seulement la <u>**surface**</u>) d’une sphère alors c’est un espace bidimensionnel <u>courbe</u>.

Facile donc?…. Hummmm déjà moins…. Pourquoi?

Ben parce que pour l’espace bidimensionnel, on peut déjà citer un exemple où une géométrie «populairement» considérée comme courbe, donne en fait, un espace qui est mathématiquement plat, et c’est le cylindre…… (on va en reparler).

J’ajoute qu’un espace bidimensionnel, est à peine moins ennuyeux, que le précédent. Des êtres imaginaires qui y vivraient, et même les «objets» qui y existeraient, bien que pouvant tout de même présenter une certaine variété de «formes» n’auraient aucune épaisseur,, et donc rien ne pourrait les traverser sans les couper en deux, pas même……… un «tube» (un canal plutôt) digestif…...

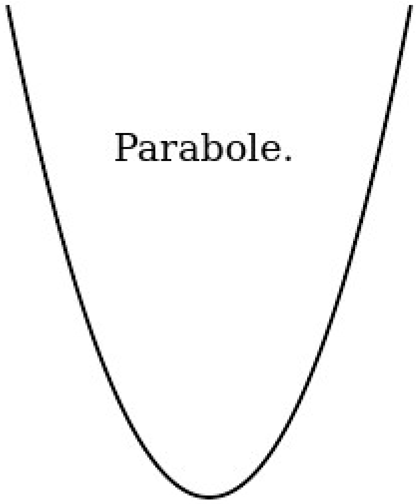
Et donc passons maintenant au cas d’un espace à trois dimensions, c’est à dire, par exemple, le nôtre, ou plus exactement ce que nous voyons, et constatons du nôtre.

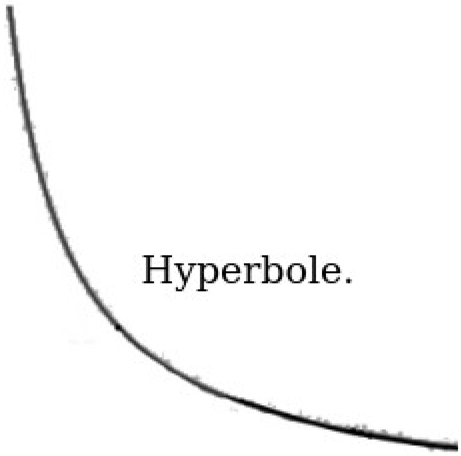
C’est un volume donc, un volume qui, comme pour les exemples précédents, peut être plat ou être courbé, et cela <u>même si ses dimensions sont **infinies** dans absolument toute les directions</u>.

Rien à voir donc avec une sorte de crèpe, de galette, ou toute autre forme «aplatie». Je le répète, être plat, ici, ne signifie absolument pas être aplati, mais uniquement être non courbé.

Comment peut-on imaginer un espace tridimensionnel infini qui soit courbé?

De la même façon que l’on imagine un espace unidimensionnel (une ligne) infini courbé (une parabole, ou une hyperbole, par exemple),

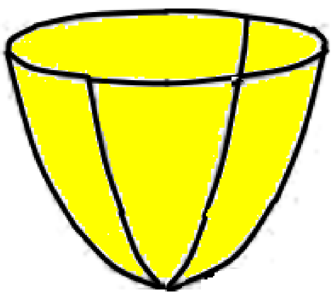


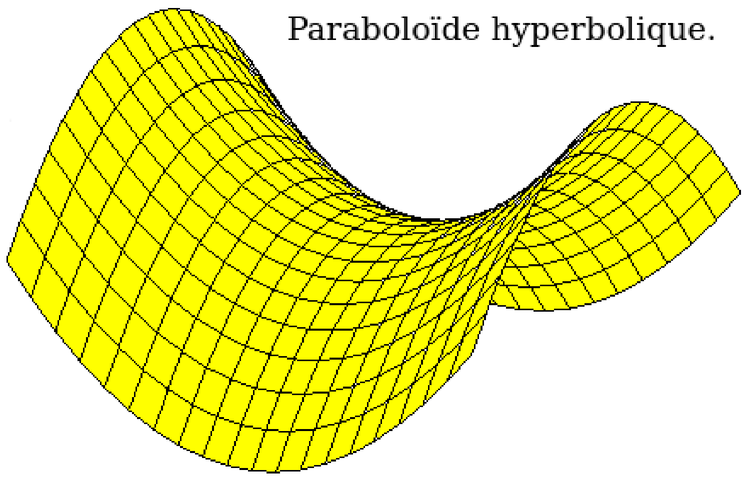


ou un espace bidimensionnel infini courbé

Comme ci dessous:

Parabolïde de révolution.





Sauf que, en trois dimensions, on ne peut pas les dessiner, mais l’idée est la même….

Ben du coup comment fait-on pour différencier un espace tridimensionnel plat d’un espace tridimensionnel courbé?

Ben pour pouvoir dire qu’un espace est courbé, il ne suffit pas de (pouvoir) dire que: «on voit bien que ça tourne»…. Surtout que, lorsque l’on est dedans, ben on ne voit rien justement… Quoique…

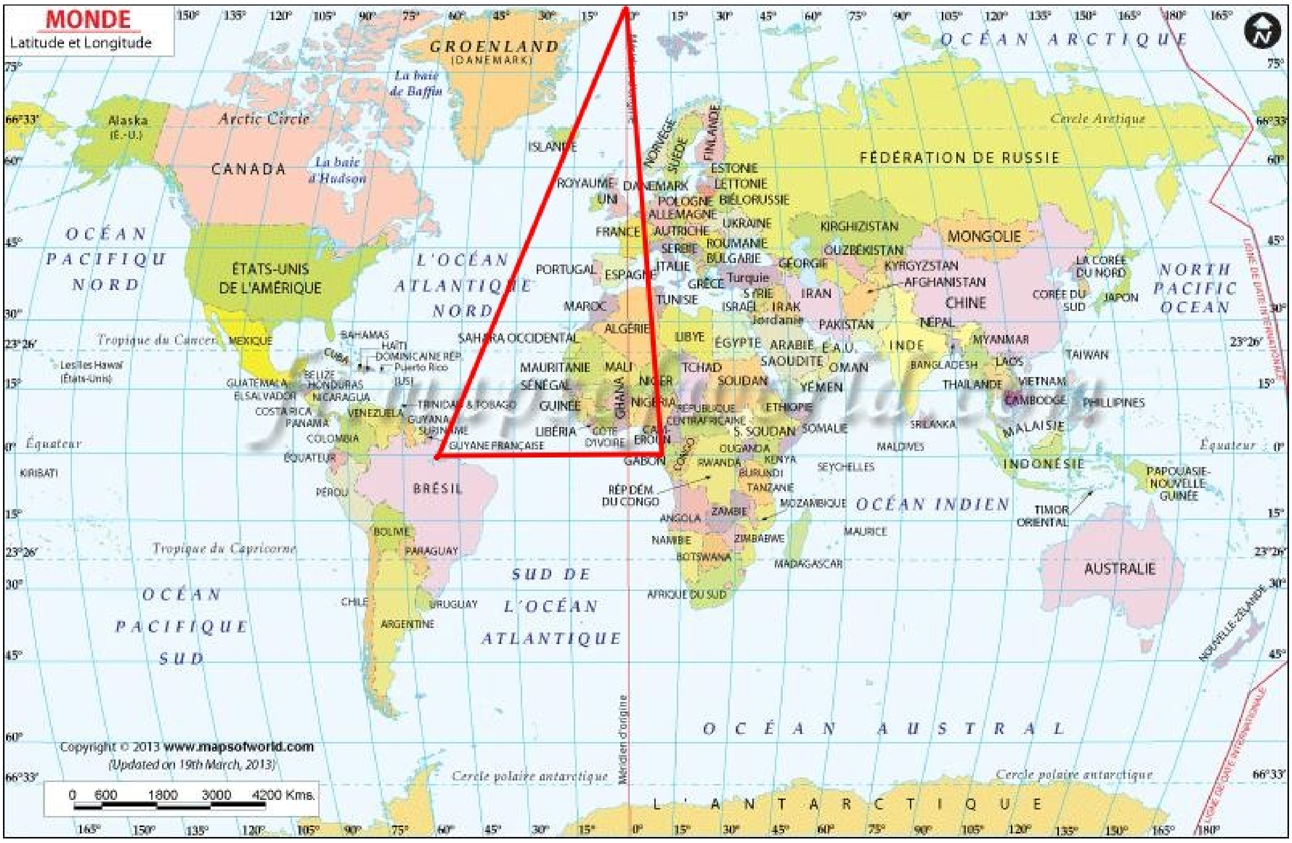
En fait, lorsqu’un espace est vraiment courbé, la courbure influe sur la «géométrie intérieure».

Explication:
Prenons l’exemple d’un triangle. On sait, depuis Euclide, donc 300 ans avant notre ère, que la somme des angles d’un triangle, de n’importe quel triangle, fait toujours 180°. Toujours, absolument toujours…. Sauf que ça n’est vrai que dans un univers plat, un univers, un espace, dit Euclidien (le nom c’est à cause de lui (Euclide) d’ailleurs).

Dans un espace courbe, la surface (rien que la surface) d’une sphère par exemple, ce n’est pas le cas.

Exemple:
Vous prenez une carte du monde, un planisphère et vous repérez deux points situés tous deux sur l’équateur (par exemple en bordure de mer au Gabon, et , pareillement au Brésil, puis ajoutez à ces deux points, le pôle nord.

Ça vous fait trois points permettant de tracer un triangle.
Sur une carte planisphère, ça vous donnerait un triangle tout à fait classique.



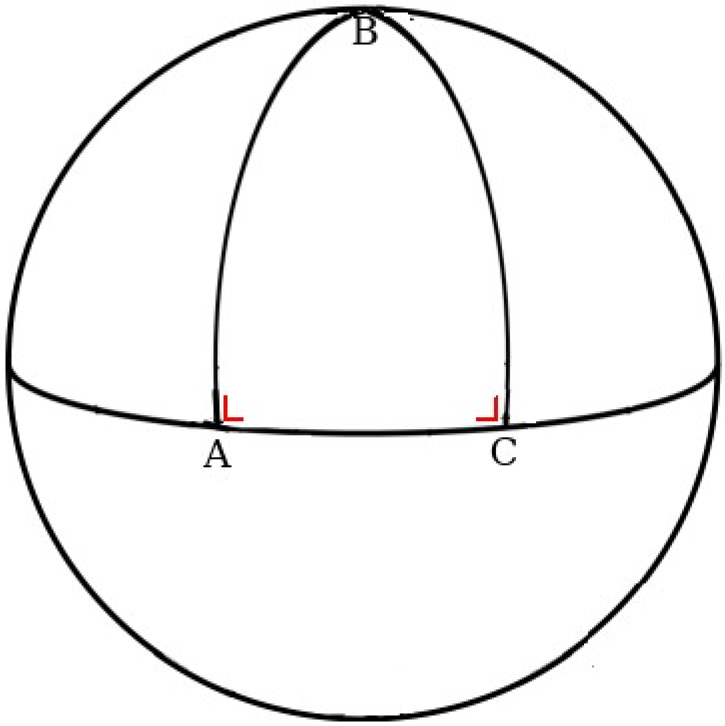
Mais, en réalité, sur la surface de la vraie Terre qui est un espace courbe, ça donnerait quelque chose comme ça.

Remarquez les angles droits entourés en vert.

En effet, si vous vous déplacez le long de l’équateur, puis que vous décidez de tourner vers le pôle nord (ce que fait le tracé du triangle ici), ben vous tournez forcément à angle droit (la direction du pôle nord fait toujours un angle droit avec l’équateur)

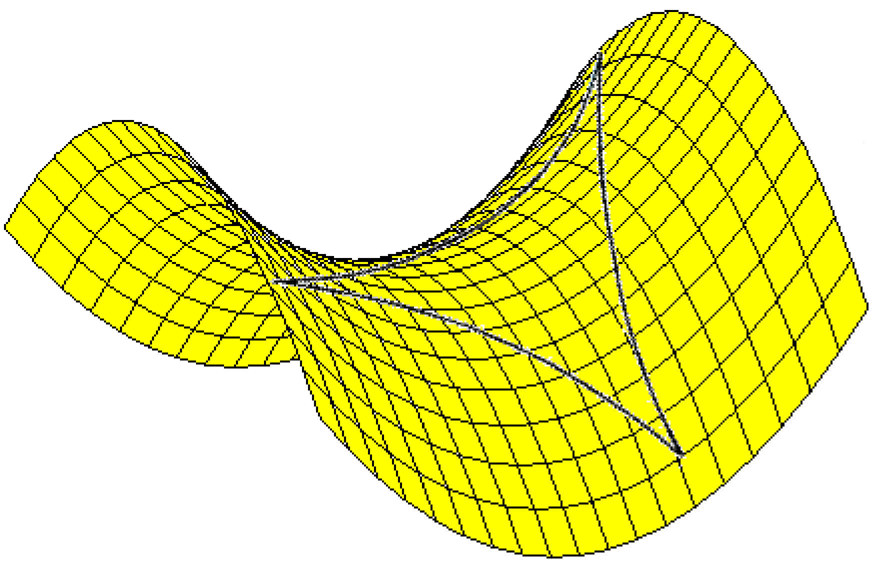
Et si, ensuite, vous descendez du pôle nord vers l’équateur, de la manière la plus directe, vous arriver perpendiculairement à l’équateur.

Bref, votre triangle ressemble à quelque chose comme ça:



Les angles sont toujours droits en A et en C (mais pas obligatoirement en B), ce qui implique que l'on a de toute façon PLUS de 180° (puisque la somme des angles en A et C fait déjà 180°), et donc c'est la preuve que, dans un espace courbe, la somme des angles d'un triangle ne fait pas 180°.

Ce sera toujours plus dans un cas comme celui-ci (courbure dite positive), et toujours moins pour une courbure dite négative.



Conclusion: Pour mesurer si notre univers est plat ou courbe, on vérifie simplement si la somme des angles d'un triangle y fait bien 180°….

Sauf que notre univers est tellement grand que ça ne peut marcher, on ne peut mesurer de différence que si le rapport entre la courbure et la taille du triangle ne dépasse pas trop la précision de mesure dont on est capable.
Bref, il faut soit un trèèèèèèèèèèèèèèèèèèèèèès grand triangle, soit une trèèèèèèèèèèèèèèès forte courbure, soit les deux.
Les mesure faites jusqu’à aujourd’hui, même avec des triangles d’étoiles assez éloignées, et donc formant un triangle très très grand, donne la platitude gagnante, mais il suffit que la courbure soit très faible et l’univers très grand……. Pour être incapable d’avoir la précision requise, et donc ne jamais savoir….