

RELATIVITE - II

LE TEMPS, PRINCIPES ET PARADOXES (suite)

Stephen GINER

IV. LE TEMPS ET LA VITESSE

Cependant, malgré son immuabilité, le temps peut ralentir.

Comment le temps peut-il avoir des fluctuations de vitesses ?

Quand on a des notions sur les théories de la relativité d'EINSTEIN, on sait que le temps peut ralentir voire s'arrêter. Ce phénomène qui est à priori impossible est maintenant devenu un fait avéré qui a plusieurs fois été vérifié par des expériences de plus en plus pointues comme nous allons le voir dans les lignes suivantes.

Prenons un premier exemple tout simple. Deux avions font le tour de la Terre en allant dans deux directions opposées. L'avion A vole de l'ouest vers l'est et l'avion B vole de l'est vers l'ouest.



Fig. 18 – Déplacement en sens inverse autour de la terre

Mettons à bord deux horloges atomiques dont la précision est encore supérieure aux horloges actuelles et gardons-en deux sur Terre : une au Pôle Nord et une à l'Equateur.

Imaginons que ces avions aient assez de carburant pour pouvoir voler toute une année sans avoir à se poser.

Ils partent le 1^{er} janvier et atterrissent le 31 décembre. Quand on mesure le temps affiché aux cadrans des horloges, nous pouvons constater que celui affiché sur l'horloge de l'avion A est inférieur à celui affiché sur le cadran de l'horloge de l'avion B qui est lui-même inférieur au temps de l'horloge de l'Equateur qui est lui-même inférieur au temps affiché sur le cadran de l'horloge du Pôle !!

Pour faire simple : HA = horloge de l'avion A, HB = horloge de l'avion B, HE = horloge de l'Equateur et HP = horloge du Pôle et T = temps.

Nous avons donc : $THA < THB < THE < THP$.

Pourquoi cette différence de temps ? Pourquoi le temps est-il passé plus vite pour les uns que pour les autres ? Bien entendu, le décalage est infime et se compte en milliardièmes de secondes, mais si ténu est-il, il est là et bien là !!

C'est l'un des résultats fracassants de la **théorie de la relativité** d'**EINSTEIN** : **tout objet en mouvement voit son temps s'écouler moins vite**. Oublions pour l'instant les horloges terrestres (en effet, un autre paramètre entre en jeu, mais n'anticipons pas) et concentrons-nous sur les horloges des avions.

Au vu du résultat affiché par l'horloge de l'avion A, nous pouvons conclure qu'il s'est déplacé plus vite que l'avion B. En effet, **plus nous allons vite, plus le temps se ralentit**. Il s'agit d'une des **découvertes majeures du XX^e siècle**. Le temps n'est pas fixe et immuable et peut être influencé par la vitesse d'un objet. Tout le monde a entendu parler du paradoxe des jumeaux dont je reparlerai plus loin : un frère part faire un voyage dans l'espace à **99,5 % de la vitesse de la lumière** et quand il revient quelques années après, son double resté sur Terre a vieilli dix fois plus que lui.

Qu'est-ce qui fait que l'avion A vole plus vite que l'avion B ? Nous avons d'une part la rotation de la Terre et la fameuse force de Coriolis qui entrent en jeu ainsi que les fameuses cellules de vents d'ouest, les *westerlies*, qui font que les voyages d'ouest en est sont toujours plus rapides que ceux effectués d'est vers l'ouest. Ceci pour expliquer simplement pourquoi les vols ouest-est sont plus rapides...

Le **principe de dilatation du temps** (ou son ralentissement...) édicté par **EINSTEIN** a été vérifié plusieurs fois par plusieurs expériences et à chaque fois été prouvé avec justesse. Bien entendu, pour que cela ait un effet notable, il faudrait que les avions se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière afin de pouvoir ressentir les effets de ce ralentissement du temps. Cependant, même si cela est négligeable, le temps s'écoule moins vite pour ceux qui se déplacent à grande vitesse (inutile d'écraser le champignon sur l'autoroute car pour gagner quelques milliardièmes de secondes de vie, vous risquez de perdre tous vos points et ... la vie elle-même !!).

Ce phénomène appelé **dilatation du temps** peut se calculer facilement. Imaginons une horloge à lumière. Le mécanisme est très simple : il s'agit d'un photon (le plus petit « paquet » de lumière qui soit) qui rebondit entre deux miroirs qui se le renvoient dans un mouvement perpétuel comme nous pouvons le voir dans la figure ci-dessous.

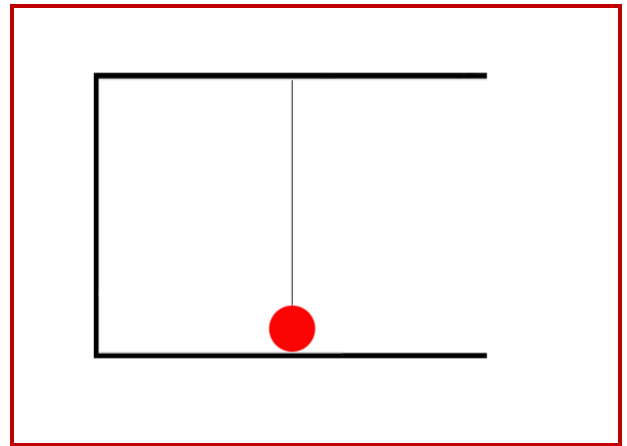


Fig. 19 – Principe de l'horloge à lumière

Les miroirs sont **distants de 15 cm** ce qui fait que le photon qui rebondit entre les faces réfléchissantes met **un milliardième de seconde** pour atteindre la face opposée et y émettre son « tic » ou son « tac ».

Quand notre horloge compte **1 milliard de « tic » et de « tac »**, il s'est passé **une seconde**. Cette horloge parfaitement irréalisable est l'horloge la plus précise qui soit.

Imaginons maintenant que nous ayons une horloge à lumière devant nous et que nous observions celle d'un vaisseau qui se déplace à une vitesse extrêmement rapide (bien plus rapide que tous les vaisseaux existants : une vitesse qui se rapproche de celle de la lumière). Alors que notre horloge aurait le même comportement que celle représentée plus haut, le photon de l'horloge en déplacement aurait, de notre point de vue, le comportement que l'on peut voir ci-dessous.

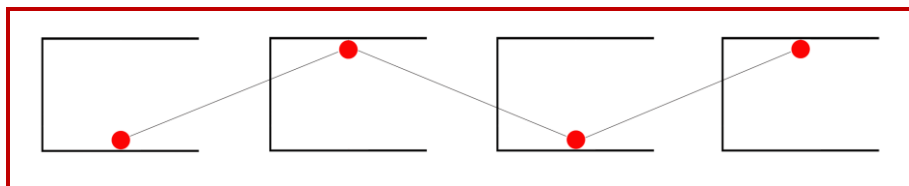


Fig. 20 – Comportement de l'horloge à lumière en déplacement

Pour atteindre la face opposée, il mettra un temps **supérieur à un milliardième de secondes** puisque le photon ne se déplace plus verticalement mais obliquement du fait du mouvement de l'horloge, ce qui fait que nous obtiendrons ce résultat :

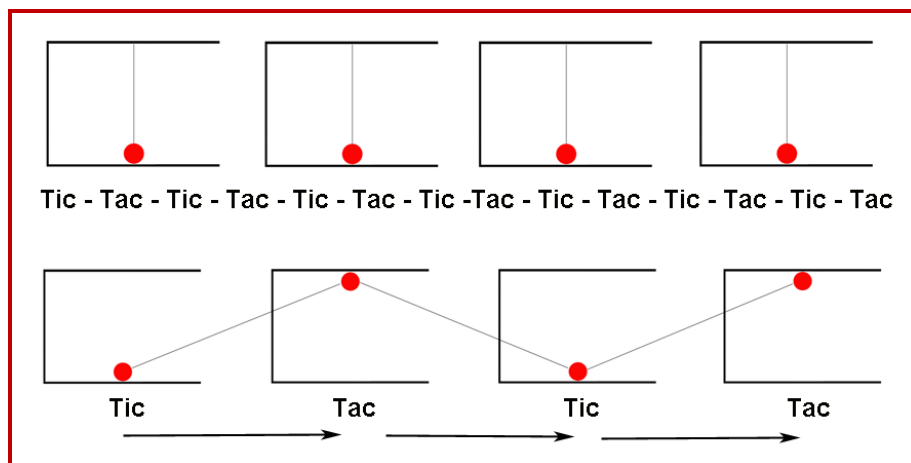


Fig. 21 – Comparaison du comportement de l'horloge dans les deux situations

Pour l'horloge en mouvement, le temps s'est dilaté. Il existe un **coefficient de dilatation du temps** et il est possible de le calculer.

Pour les **deux observateurs**, celui qui est au sol et celui qui est dans le vaisseau, le **photon de son horloge** a parcouru la **distance L**. Pour l'**observateur en vol**, le **battement de son horloge** a duré $t^* = L/c$.

Pour l'**observateur au sol**, la **lumière dans l'horloge du vaisseau** n'a pas parcouru la distance L, mais la **distance d**. Le **battement de l'horloge qui se déplace** a donc duré $t = d/c$. Il a également noté que le vaisseau a parcouru à ce moment la **distance D**, ce qui donne $D = v.t$ (où v est la vitesse relative du vaisseau).

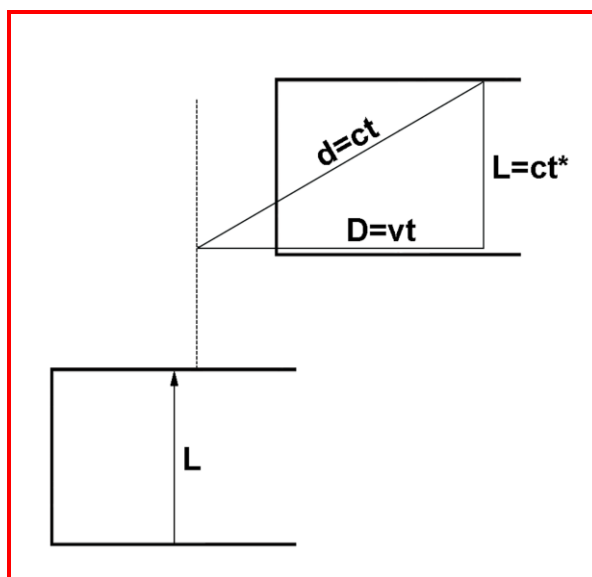


Fig. 22 – Coefficient de dilatation du temps

Le théorème de Pythagore nous permet d'écrire $d^2 = L^2 + D^2$. En simplifiant (!!!), nous obtenons :

$$t^* = t \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

En vraiment simple, cela signifie que le temps t^* (qui s'écoule au sein du vaisseau en mouvement) est inférieur au temps t (pour l'observateur au sol).

Quand nous abordons ce phénomène à des vitesses proches de celle de la lumière (**300.000 km/s**), il est évident que le déplacement D du vaisseau est beaucoup plus important que celui d'un homme dans une voiture. C'est la raison pour laquelle nous ne nous rendons pas compte de cette dilatation du temps dans la vie de tous les jours : le **coefficient de dilatation** est alors trop réduit pour être perceptible.

Comme Monsieur **JOURDAIN** qui fait de la prose sans le savoir, nous baignons dans la **relativité** sans le savoir également. Pour que nous puissions nous rendre compte de ce phénomène, il faudrait que nous possédions un chronomètre avec un cadran qui affiche **16 chiffres**.

Imaginons maintenant que nous soyons sur le bord d'un circuit et que nous chronométrions une voiture de course. Le circuit mesure **1.500 mètres** et la voiture met **27 secondes** pour le parcourir en roulant à **200 Km/h**. Regardons maintenant le chronomètre à **16 chiffres** installé dans l'habitacle de la voiture. Il indique **26,99999999999953 secondes**.

Comme nous pouvons le constater, le temps n'est plus le même. Le temps qui s'est écoulé dans la voiture en mouvement a ralenti par rapport au temps qui s'est écoulé pour l'observateur. Bien entendu, la différence est minime pourrait-on dire. Le fait qu'elle soit minime n'entre pas en jeu. Elle existe, et ça, c'est énorme !!

Si la voiture roulait à **900 millions de Km/h** (c'est-à-dire à **83% de la vitesse de la lumière**), au vu du **coefficient de dilatation du temps**, le chronomètre à l'intérieur de l'habitacle aurait marqué un **temps deux fois moindre** que celui resté au poste d'information.

Pour écrire cela avec une formule simple : $V \nearrow \rightarrow D \nearrow \rightarrow T \nearrow$

Pour simplifier encore : $V \nearrow \rightarrow T \nearrow$

V = vitesse

D = distance

T = coefficient de dilatation du temps.

Donc, plus nous allons vite, plus le coefficient de dilatation du temps augmente et plus le temps s'écoule lentement.

Dernier exemple pour les sceptiques. Ici, ne faisons pas appel à notre imagination car il s'agit d'une expérience qui a été réalisée plusieurs fois avec des résultats à chaque fois similaires.

Il existe des particules que l'on appelle des muons. Quand elles sont au repos, c'est-à-dire quand elles ne se déplacent pas, ces particules ont une durée de vie de deux milliardièmes de seconde. Elles sont donc très fugaces.

Quand, dans un accélérateur de particules, nous leur faisons atteindre une vitesse qui est 99,5% de celle de la lumière, leur temps de vie est multiplié par 10 !!

Venons-en maintenant à cette fameuse histoire des jumeaux dont un vieillit moins vite que l'autre. Imaginons encore deux frères jumeaux âgés de 20 ans.

L'un des deux part en voyage dans l'espace pendant trois ans, Il se déplace à 99,5% de la vitesse de la lumière. Au bout de ces trois ans, il fait demi-tour et retourne sur Terre. Il arrive à destination trois ans plus tard et sort de son vaisseau spatial âgé de 26 ans vu qu'il s'est passé six ans entre son départ et son retour. Cependant, son frère qui est resté sur Terre aura 80 ans.



Fig. 24 – Les jumeaux avant le départ de l'expérience

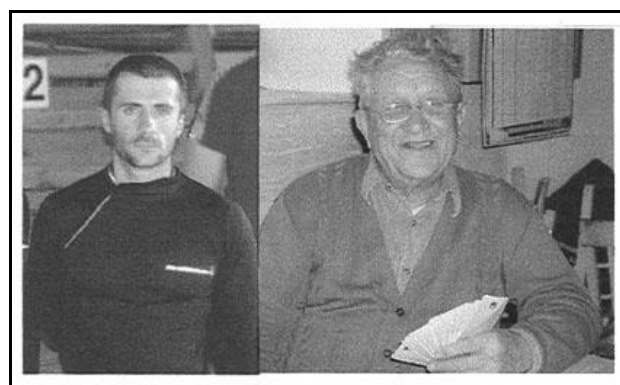


Fig. 25 – Les jumeaux après l'expérience

Que s'est-il passé ?

Tout simplement, celui qui a voyagé à une vitesse très proche de la lumière a vu son temps s'écouler plus lentement que son frère presque immobile par rapport à lui. Dix fois moins longtemps exactement.

Ceci indique plusieurs choses : le temps fluctue selon la vitesse de déplacement et surtout, il n'est pas égal pour tout le monde. Nous abordons là un problème qui échappe totalement à la logique humaine habituée à ce que le temps soit toujours le même quelques soient les circonstances.

Revenons à nos horloges situées sur la Terre. En début d'article, j'ai écrit que pour l'horloge qui se trouvait à l'Equateur le temps s'écoulait plus lentement que pour celle située au niveau du Pôle. La vitesse de rotation de la Terre est supérieure à l'Equateur qu'au niveau des Pôles, ce qui fait que là aussi, les horloges subissent un décalage infime dans le temps.



Fig. 26 – Vitesse de rotation au niveau de l'équateur

V. LE TEMPS ET LA GRAVITE

Autre facteur qui influence la vitesse à laquelle le temps s'écoule, la **gravité**. Il est en effet apparu que le **temps s'écoulait d'autant plus vite que la gravité était plus faible**. Depuis 1915 et la **théorie de la relativité** d'EINSTEIN, tout le monde sait que la **gravité déforme l'espace-temps**. Là encore, l'expérience a primé et a confirmé la théorie.

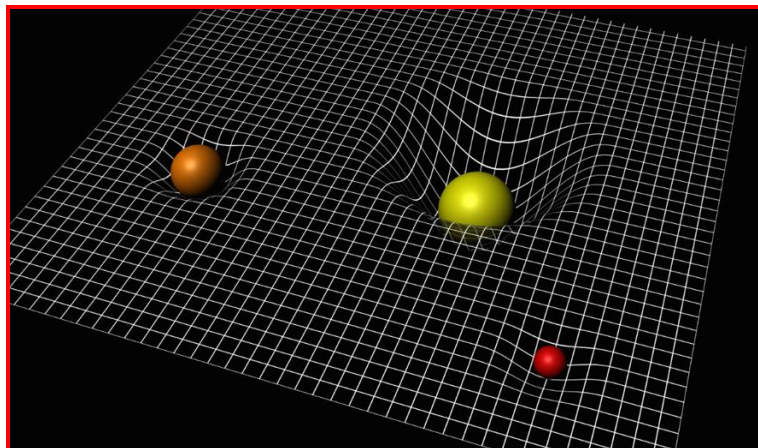


Fig. 27 – Déformation de l'espace-temps

Deux horloges atomiques extrêmement précises sont placées l'une au sommet d'une très haute tour, et l'autre au pied de celle même tour. Après une année, on relève les chiffres des cadrans. L'horloge qui se trouvait sur le sommet de la tour a vu son temps s'écouler un peu plus vite que celle située au sol. Il en va de même si l'horloge est placée sur un dirigeable en vol stationnaire avec cependant un résultat un peu plus flagrant.

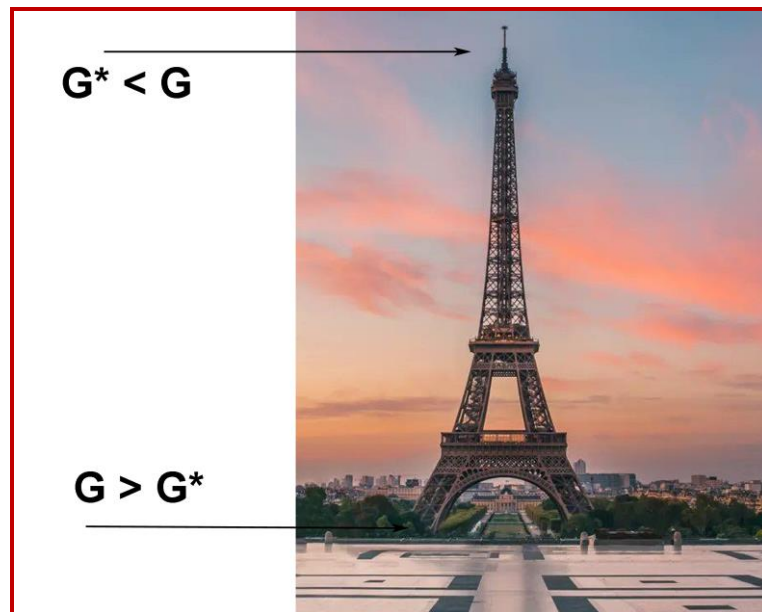


Fig. 28 – Le temps en fonction de la gravitation

Sur le schéma ci-dessus, G est la gravité ressentie au sol et G^* la gravité ressentie au sommet de la Tour Eiffel.

L'horloge qui est située sur le sol est plus proche du centre de la Terre que les deux autres et subit de ce fait un peu plus la force de gravitation. Cette force fait se ralentir le temps à une échelle infime, mais là encore, le résultat ne peut être contredit.

Prenons un autre exemple et servons-nous encore une fois de notre imagination. Deux spationautes sont dans l'espace. Ils règlent leur chronomètre de façon à ce qu'ils soient très précisément calés l'un sur l'autre.

Le premier spationaute décide de s'approcher d'une étoile très massive pour pouvoir observer sa surface. Au fur et à mesure qu'il s'éloigne de son collègue, les chronomètres ne se décalent pas et garde la même régularité.

Cependant, quand l'explorateur va commencer à s'approcher de l'étoile en question, son chronomètre va commencer à ralentir progressivement. Lorsqu'il sera situé à la lisière de l'astre massif son chronomètre aura beaucoup ralenti par rapport au spationaute resté dans sa base intersidérale.

Que s'est-il passé ? L'explorateur, au fur et à mesure qu'il s'est approché de l'étoile a senti la force d'attraction de celle-ci augmenter tandis que celui qui est resté très loin ne l'a pas ressenti. Depuis **EINSTEIN**, nous savons que la **gravitation déforme l'espace-temps** ce qui fait qu'elle influence également la vitesse d'écoulement du temps en lui-même.

Donc, nous pouvons affirmer que **plus nous approchons d'un astre massif plus la gravité augmente et plus le temps ralentit.**

C'est à ce moment que l'on peut **voyager dans le temps**. Malheureusement, le voyage se fait du présent vers le futur et il n'y aucune possibilité de retour en arrière.

Comment cela serait-il possible ?

En s'approchant du plus massif des astres que l'on connaisse, le **trou noir**.

Un **trou noir** est ce qui reste de l'**explosion d'une supernova** dont le cœur est supérieur à plus de **3 masses solaires**. Après l'explosion, l'étoile se contracte sur elle-même jusqu'à atteindre son **rayon de Schwartzchild** qui constitue un point de non-retour à la formation d'un trou noir.

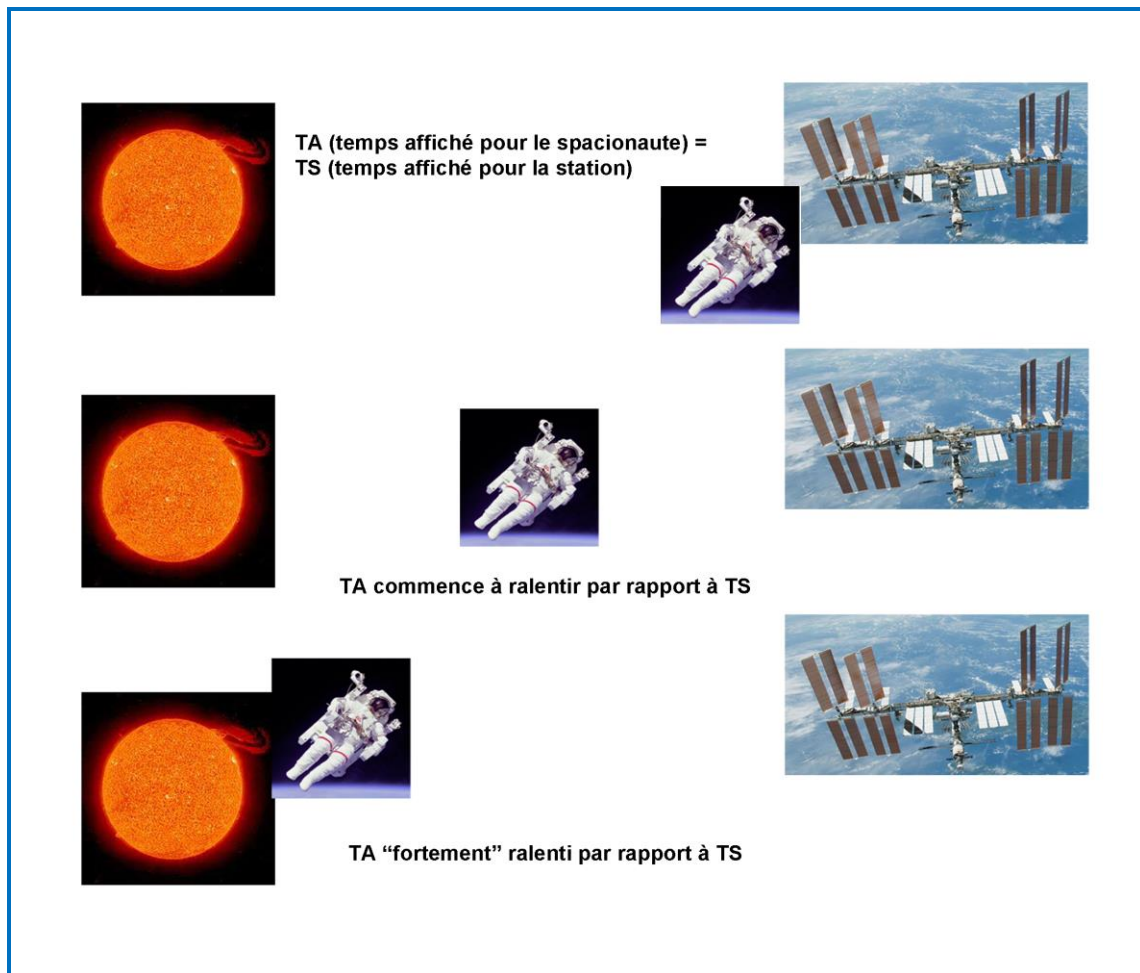


Fig. 29 – L'expérience des spacionautes

A partir de ce moment, l'effondrement ne peut plus s'arrêter et les forces électromagnétiques et nucléaires n'ont plus prise sur l'astre qui finit par accumuler toute sa masse dans une sphère extrêmement petite par rapport à la taille initiale. La densité et l'attraction gravitationnelle sont telles que la **vitesse de libération** de ce résidu d'étoile est **supérieure à 300.000 Km/s**, ce qui fait que les photons eux-mêmes, une fois qu'ils sont pris par la force d'attraction de l'astre ne peuvent plus s'échapper.

Les **trous noirs** ne sont cependant pas ces ogres qui avalent tout ce qui passe tel que l'on a bien voulu les imaginer. Il existe à la périphérie de ces astres une frontière que l'on appelle « **horizon des évènements** ». Tant que tout objet se trouve hors de portée de cet horizon, il n'est pas aspiré et peut encore s'échapper. Dès qu'il le franchit par contre, il est perdu et irrémédiablement détruit par les forces de marées qui règnent à l'intérieur de ces astres terriblement fascinants. Etant donné que les forces gravitationnelles ont une intensité considérable au niveau de cet horizon des évènements, le temps est lui aussi très influencé et très différent par rapport à d'autres endroits de l'univers.

Plus on s'approche de l'**horizon des évènements** d'un trou noir, plus le **temps ralentit**. D'après la théorie, le temps s'arrête une fois que l'horizon est franchi et il ralentit de **10.000 unités** quand on atteint sa limite.

Utilisons encore notre imagination. En l'an 26.590, un pays envoie dans l'espace une station orbitale très élaborée. Cette station a pour mission d'étudier un trou noir pendant un an et après un voyage de plusieurs années (un tel voyage est bien entendu totalement impossible aujourd'hui, mais dans l'imaginaire tout est possible...) atteint un trou noir.



Fig. 30 – Approche d'un trou noir

Une fois en position orbitale sur l'horizon des événements de l'astre, le spationaute déclenche son chronomètre et commence ses études. Un an plus tard, sa mission est achevée et il entreprend le voyage de retour. Cependant, quand il revient sur Terre, il ne la reconnaît plus et là, il se rend compte qu'il n'est plus en l'an 26.590 mais en l'an 36.590 (je ne compte pas les années passées à voyager pour simplifier). Son année passée en orbite au milieu des forces gravitationnelles très importantes aura en fait durée 10.000 années terrestres. Le temps a donc été ralenti de façon extraordinaire par la gravitation et aura, pour ainsi dire, fait voyager dans le temps le spationaute...

Si nous remontions dans le temps de 10.000 années, nous verrions une planète où les derniers mammoths sont en train de disparaître dans l'extrême nord de la Sibérie tandis que les hommes sont en train d'assembler les premières pierres de ce qui deviendra la première ville connue : Jéricho en Palestine. Nous, en France, nous sommes au Mésolithique et nous n'avons pas commencé la révolution néolithique....

Imaginons maintenant que le spationaute calcule mal sa trajectoire et plonge directement dans le trou noir. Quand il se rend compte de son erreur, il branche les caméras internes de sa station pour adresser un dernier salut à la Terre qui va suivre en direct sa chute dans le trou noir.

Il commence son salut à la lisière de l'horizon des événements et l'image est retransmise en direct. Plus le spationaute va s'enfoncer dans le trou noir, plus le temps va ralentir ce qui fait que les images retransmises iront de plus en plus lentement jusqu'au moment où elles resteront fixées dans le même mouvement.

A ce moment là, nous comprenons que l'horizon des événements étant franchi par le spationaute, le temps s'est littéralement arrêté pour lui. Pour nous le temps continue à s'écouler mais nous ne voyons qu'un arrêt sur image du dernier salut du spationaute. Quant à lui, pour lui les lois de la physique n'existent plus, ni rien d'autre non plus d'ailleurs....

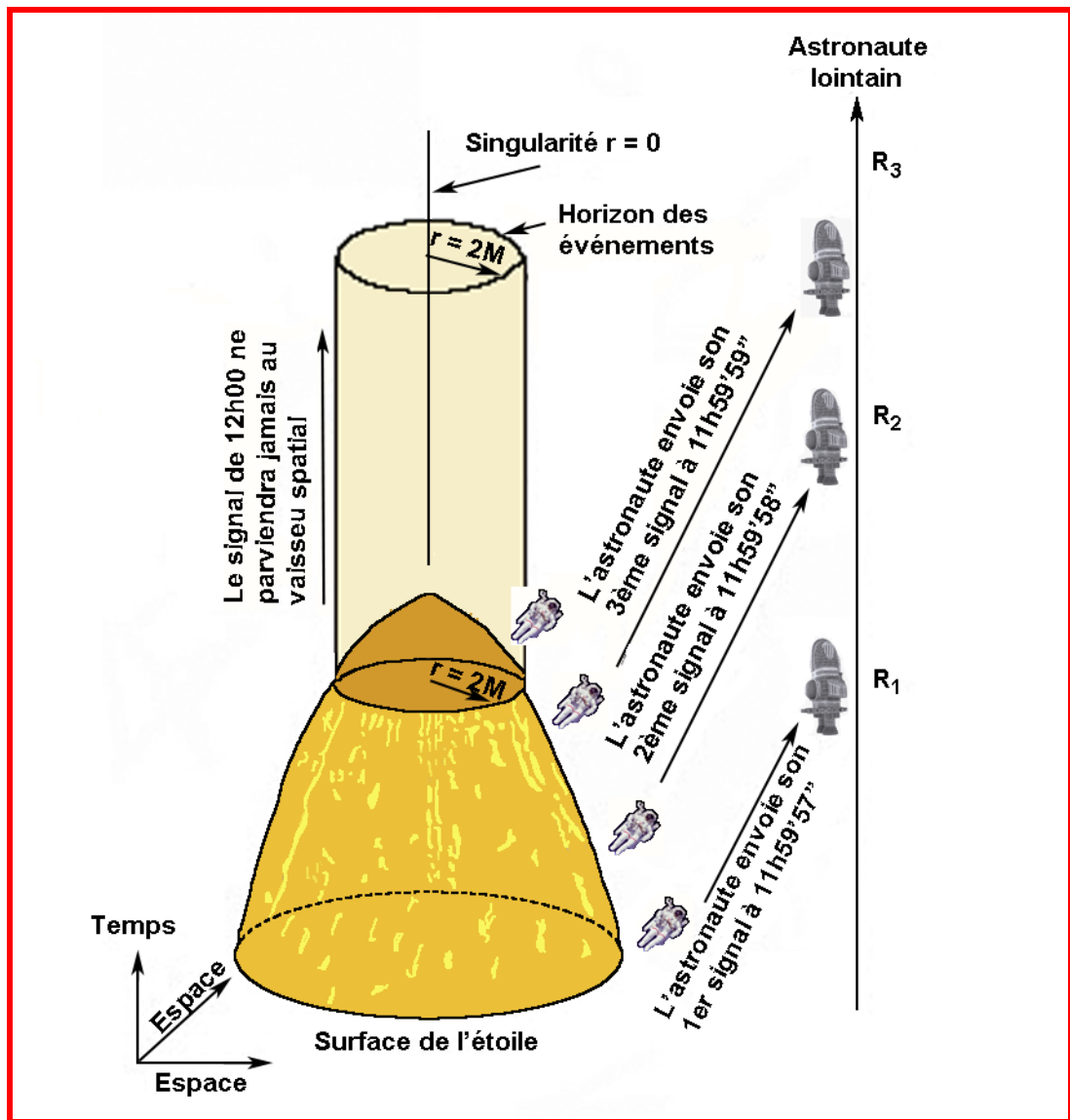


Fig. 31 – Formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel

VI. LE TEMPS A L'ECHELLE QUANTIQUE

En début d'article, j'ai évoqué le monde quantique.

Qu'en est-il du temps à ce niveau impénétrable pour nous ?

L'échelle quantique est extrêmement réduite (10^{-33} cm) est inapprochable pour nous. Nous pouvons la comprendre et l'aborder uniquement par la théorie mais les expériences réalisées ont validé plusieurs fois les théories établies.

Pour simplifier, reportons-nous à l'illustration de la page suivante.

Nous avons une pyramide avec une surface plane à la base. Cette surface correspond à l'échelle que nous sommes habitués à fréquenter. Elle pourrait correspondre à notre table par exemple. A notre échelle, une table nous paraît uniformément plate et lisse.

Quand nous nous rapprochons et que nous affinons notre vision, la table reste toujours lisse et rien ne semble changer.

Par contre, quand nous passons à l'échelle atomique, nous remarquons que celle-ci n'est plus lisse du tout et que plusieurs fluctuations de l'espace font que les lignes ne sont plus parallèles et perpendiculaires entre elles.

Quand nous abordons l'échelle quantique, nous assistons alors à un chaos de courbes où toute idée de planéité est à proscrire.
En effet, nous voyons les lignes se croiser, se tordre et parfois opérer des retours sur elles-mêmes.

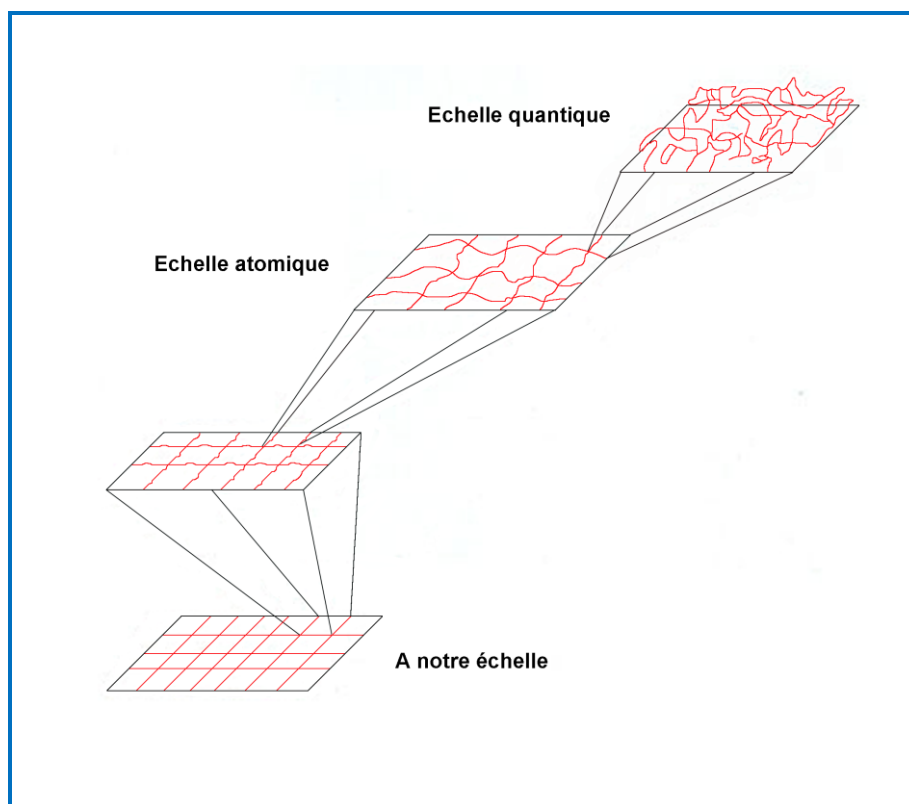


Fig. 32 – L'écume de l'espace-temps

Le meilleur exemple que l'on puisse donner est le suivant. Promenons-nous dans l'espace une dernière fois et regardons notre planète. La mer est uniformément plate et bleu...



Fig. 33 – La Terre vue de l'espace

Approchons-nous un peu et nous commençons à voir que cette image ne correspond pas tout à fait à la réalité car des ondulations apparaissent à la surface.



Fig. 35 – La mer vue à basse altitude

Cependant, entre ces vagues, il existe d'autres petites perturbations de l'espace qui ne sont perceptibles qu'à petite échelle...



Fig. 36 – Vue de la surface de la mer d'encore plus près

Il en va de même pour les dimensions. Ce qui nous paraît gravé dans le marbre, c'est-à-dire une longueur, une largeur, une hauteur et une dimension temporelle à notre échelle change totalement dès que l'on gagne en précision.



Fig. 34 – La mer vue de la haute atmosphère

Rapprochons-nous encore et là, les ondulations deviennent des vagues plus conséquentes brisant encore plus l'apparente planéité que nous avons observée de l'espace.



Fig. 35 – Vue de la surface de la mer à très faible altitude

Enfin, en observant encore plus près, nous voyons que la surface de l'eau n'est jamais immobile et fixe, mais au contraire en constant mouvement et oscillation.

C'est la raison pour laquelle il est supposé par les **théoriciens des « cordes »** que l'**Univers** possède non **pas quatre mais onze dimensions** dont les plus petites sont enroulées sur elles-mêmes. Parmi ces dimensions dont la plupart sont **spatiales**, il est autorisé de penser qu'il peut y en avoir une autre **temporelle** qui n'agit qu'à l'**échelle quantique**. Nous aurions donc à faire avec **deux temps différents** !

L'un s'écoule pour le macro-univers dont nous faisons partie, tandis que l'autre ne serait valable que pour l'univers quantique (les atomes eux-mêmes sont trop gros pour le percevoir).

Ceci explique alors que certaines **particules quantiques** sont **insensibles aux effets du temps** car nous les mesurons avec une échelle qui ne les concerne pas et qui est la notre. Cet antagonisme rejoint les **théories de NEWTON, EINSTEIN et quantique**. Ces théories sont justes prises individuellement mais ne s'appliquent qu'à certaines échelles et deviennent incompatibles entre-elles dès que l'on tente de les unifier.

Il en va de même pour les **temps**. Il en existerait un supplémentaire **au niveau quantique**. Il s'agirait d'un temps avec des fluctuations à l'image de la surface ondulatoire d'un plan d'eau. Ceci permettrait d'expliquer l'hypothèse soulevée par certains théoriciens : il existerait des particules dont le temps serait insignifiant car elles ne semblent pas vieillir et semblent aller dans le futur puis remonter dans le temps puis aller à nouveau dans le futur dans un mouvement perpétuel...

VII. LA NAISSANCE DU TEMPS

La date de naissance officielle du temps se situe à **10^{-43} s après le Big Bang**. La période écoulée entre l'inflation de la singularité qui a donné naissance à notre **Univers** et le moment où la dimension temporelle à commencer à s'écouler est appelée « **Ere de Planck** ».

Le schéma ci-dessous résume la naissance et la mise en place de l'**Univers**.

Cependant, il a bien fallu un « avant » et un « après » d'où l'existence du temps avant qu'il naisse ce qui est tout bonnement impossible.

C'est là que vient à la rescousse les échelles de temps : **notre temps classique est une création issue du Big Bang à l'image des autres dimensions...**

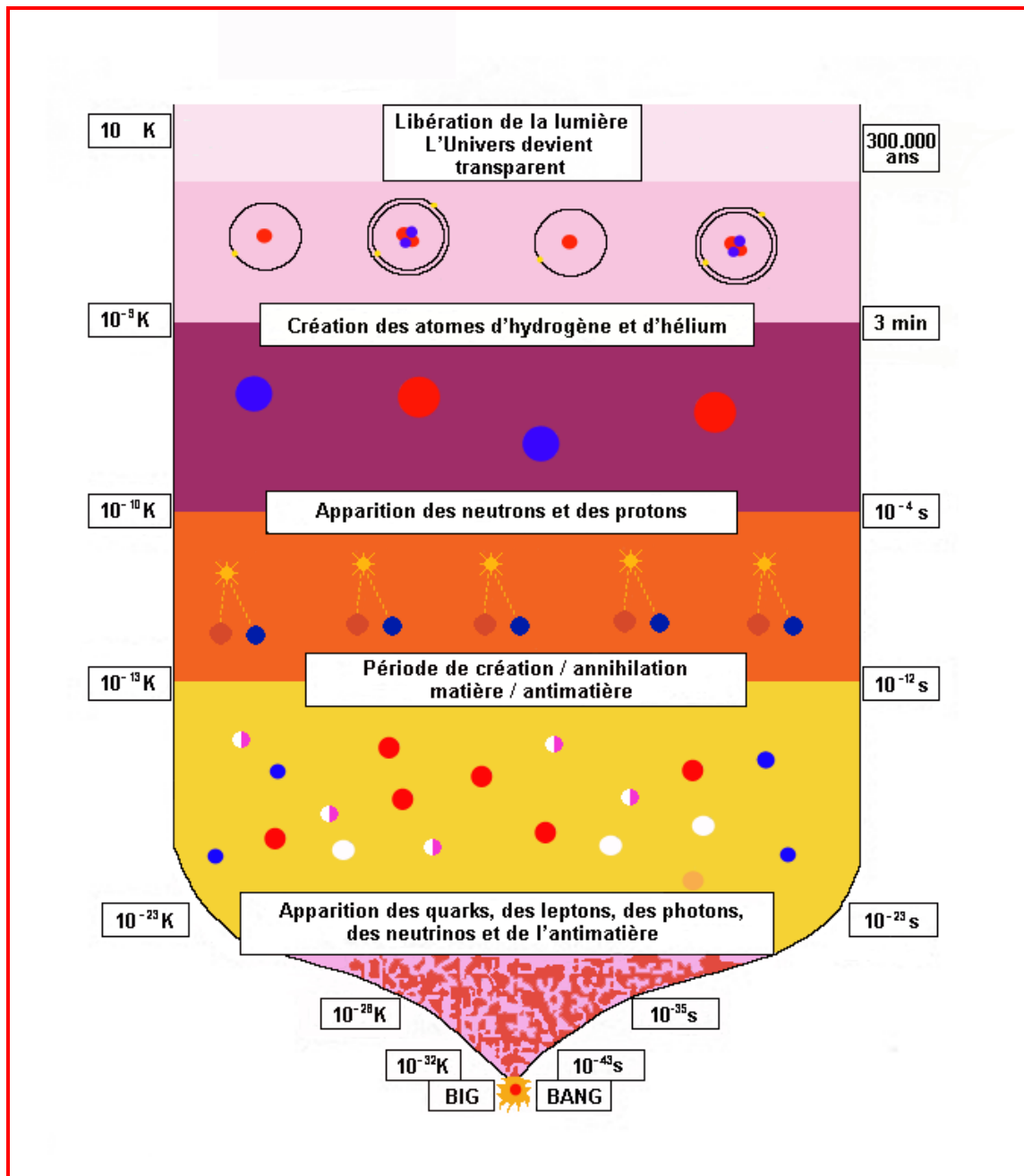


Fig. 37 – Mise en place de l'Univers

VIII. CONCLUSION

Pour conclure, nous pouvons nous rendre compte que la question du temps est une question passionnante qui a animé les recherches et les débats pendant des centaines d'années. Cette interrogation n'a pas fini de faire grincer des méninges et des dents mais une chose est sûre : il faudra aux physiciens et aux philosophes une très grande coopération afin d'aborder ces notions qui relèvent à la fois du domaine de la science pure et de la métaphysique.

Comme je l'ai mentionnée en début d'article, ce qui paraissait immuable ne l'est plus et ce détail du tableau de DALI qui représente une montre en train de fondre résume bien ce qui a été dit plus haut : **le temps n'est plus cet objet intouchable et fixe, mais bien une entité qui peut être malléable selon les échelles employées...**



Fig. 38 – Montre molle au Moment (Salvador DALI)

Pour en savoir plus :

HAWKING Stephen (1989) – *Une brève histoire du temps – Du big bang aux trous noirs*, Flammarion.

HAWKING Stephen (1992) – *Commencement du temps et fin de la physique ?*, Flammarion.

HAWKING Stephen (2001) – *L'Univers dans une coquille de noix*, Odile Jacob – Sciences, Paris.

PENROSE Roger (2010) – *Les cycles du temps – Une nouvelle vision de l'Univers*, Odile Jacob, Paris.