

# <sup>1</sup>INTRODUCTION

[Lien absolu ici](#)

Si les animations fonctionnent mal dans le fichier pdf, cliquer ici pour les avoir directement.

## À LA RELATIVITÉ RESTREINTE

### I- LA CONCEPTION ARISTOTÉLICHIENNE DU MOUVEMENT : ARISTOTE -384, -322

**1- Conception.** Considérons un chariot tiré sur une route horizontale. Les chevaux tirent, donc une force est nécessaire au mouvement et à son entretien. Plus le chariot va vite, plus les chevaux doivent tirer. Il y a du bruit, l'air fouette le visage des passagers.



Donc, les objets sont spontanément au repos. il faut une force pour entretenir le mouvement. Le mouvement est un changement entre deux états de repos.

- ⎵ **Mouvement spontané** : mouvement naturel ; le corps rejoint son lieu de repos naturel, un caillou vers la Terre, une fumée vers le haut.
- ⎵ **Mouvement contre nature** : mouvement violent, cause violente.

On voit donc que le mouvement a un caractère **absolu et lié à l'objet**, indépendant de tout rapport à autre chose. En observant l'objet **seul**, on peut

---

<sup>1</sup>relres

dire s'il est en mouvement ou non. Il y a donc un lien entre le mouvement d'un corps et sa constitution interne.

**2- Conséquences cosmologiques.** La Terre est totalement immobile. En effet, on ne décèle aucune vibration ni aucun bruit ou souffle d'air lié à un mouvement éventuel. La Terre devient donc le centre du monde, seule chose immobile dans l'Univers. Si la Terre tournait sur elle-même, un caillou lancé en l'air verticalement ne retomberait pas à son point de départ, mais très loin de là. En effet, pendant qu'il est en l'air, rien ne le pousse et son mouvement horizontal doit disparaître, tandis que pendant ce temps là, la Terre défile en dessous de lui.

C'est justement pour défendre la théorie de COPERNIC (1473-1543) dans laquelle le Soleil est au centre du système planétaire que GALILÉE (1564-1645) fut amené à s'opposer à la théorie aristotélicienne du mouvement.

## II- LA CONCEPTION GALILÉENNE DU MOUVEMENT

**1- Quelques écrits de GALILÉE.** Ces textes sont extraits de : Galilée penseur libre de Raymond Zouckermann, éditions de l'union rationaliste 1968. Page 125 :

**Salviati.-** *Donc, un navire qui serait en mouvement par mer calme est un de ces mobiles qui parcourt une surface qui ne monte ni ne descend. Si tous les obstacles accidentels et externes étaient supprimés et l'impulsion une fois donnée, il serait disposé à se mouvoir incessamment et uniformément.*

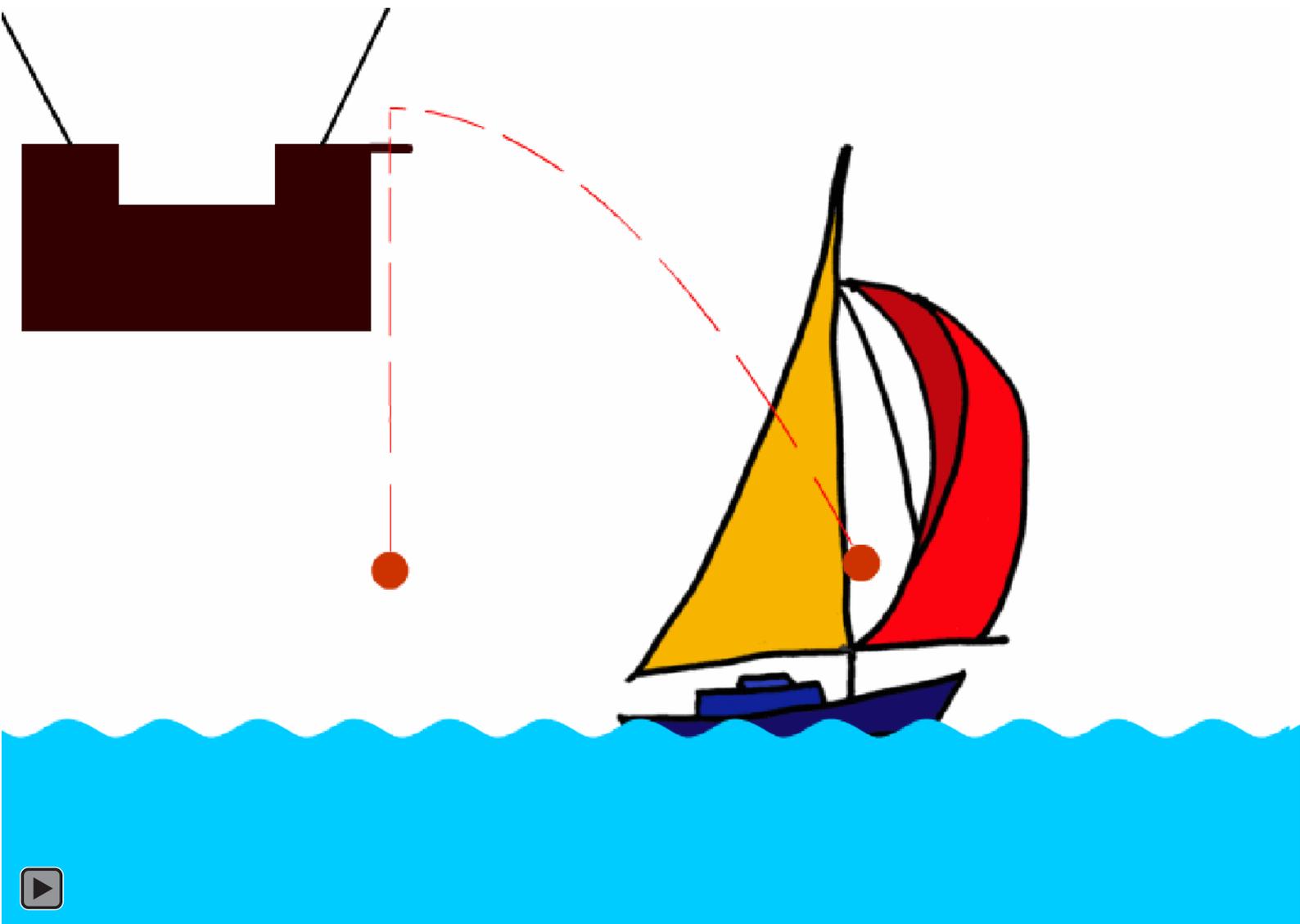
**Simplicio.-** *Il me semble qu'il devrait en être ainsi.*

**Salviati.-** *Et cette pierre qui se trouve au sommet du mât, est-ce qu'elle ne se meut pas, portée par le navire, suivant la circonférence d'un cercle autour du centre, et, par conséquent, n'a-t-elle pas ce mouvement incessant et uniforme, si tous les obstacles extérieurs sont supprimés ? Ce mouvement n'est-il pas aussi rapide que celui du bateau ?*

**Simplicio.-** *Jusqu'ici tout va bien. mais après ?*

**Salviati.-** *Tirez-en vous-même la dernière conséquence puisque par vous-même vous avez trouvé les prémisses.*

**Simplicio.-** *Vous voulez dire, comme dernière conclusion, que la pierre étant mue du mouvement inextinguible qui lui a été communiqué, elle ne quittera pas le navire, elle le suivra au contraire pour tomber enfin au même endroit où elle tombe lorsque le navire est immobile.....*



*Commentaire du livre : (À ce raisonnement qu'il vient lui-même d'établir sous la direction de Salviati, Simplicio oppose les raisons d'Aristote :*

*1) Le mobile ne saurait fendre l'air que poussé lui-même par l'air en arrière (pour Aristote le mouvement serait impossible dans le vide) ;*

*2) L'impulsion qui lance un corps ne dure que pendant l'effort de celui qui le lance ;*

*3) Le mouvement donné par impulsion retarde ou empêche le mouvement de chute, les deux mouvements ne peuvent s'accomplir ensemble.*

*De longues discussions seront nécessaires pour rétablir le principe d'inertie démontré par Galilée.)*

*.....*

**Simplicio.-** *.....Si ce mouvement de la pierre, pendant qu'elle se trouve au sommet du mât du navire, se conservait, comme vous dites, indéfiniment après*

qu'elle se trouve séparée du navire, il faudrait aussi que, lorsque quelqu'un se trouvant sur un cheval qui court rapidement laisse tomber une boule, celle-ci, une fois tombée à terre, continue son mouvement et suive la course du cheval sans rester en arrière. Et je ne crois pas qu'on voie pareil effet, sauf si celui qui est sur le cheval la jette avec force en avant mais sans cela, je crois qu'elle restera à terre là où elle l'a frappée.

**Salviati.-** Je crois que vous vous trompez beaucoup. Je suis sûr que l'expérience vous montrera le contraire et que la boule arrivée à terre, courra avec le cheval et ne restera en arrière que dans la mesure où l'aspérité et l'inégalité du sol l'en empêcheront. En effet, quand vous, étant arrêté, vous lancez cette boule, ne continuera-t-elle pas le mouvement même hors de votre main ? .....

Page 134 :

**Salviati.-**.....Et maintenant, il me semble que c'est le lieu et le moment de montrer comment expérimenter tout cela très facilement. Enfermez-vous avec quelque ami dans la plus grande pièce ouverte d'un grand navire et arrangez-vous pour avoir des mouches, des papillons et d'autres petits animaux qui volent et aussi un grand vase d'eau, avec des poissons dedans ; suspendez encore quelque petit seau d'où, goutte à goutte tombe de l'eau dans un autre récipient à bouche étroite, placé au-dessous. Le navire étant immobile, observez alors soigneusement comment les animaux qui volent vont avec la même vitesse dans toutes les parties de la pièce ; vous verrez les poissons aller, en nageant, indifféremment de tous les côtés ; les gouttes qui tomberont entreront toutes dans le vase posé au-dessous, et vous, si vous lancez à votre ami quelque objet, vous n'aurez pas à le lancer plus fort dans une direction que dans une autre, pourvu que les distances soient égales. Si vous sautez, comme l'on dit, à pieds joints, vous parcourrez la même distance quelle que soit la direction. Bien qu'on ne puisse douter que tout devait se passer ainsi tant que le bateau restait immobile, observez tout cela soigneusement, puis faites mouvoir le vaisseau à une vitesse quelconque. Pourvu que cette vitesse soit uniforme et ne varie pas dans un sens ou dans l'autre, vous ne remarquerez pas le plus petit changement dans tous ces effets et aucun ne vous permettra de savoir si le navire est en marche ou immobile.....

## **2- Les erreurs d'ARISTOTE.**

- La force nécessaire à l'entraînement est due au fait qu'il y a du frottement. S'il n'y a aucun frottement, le mouvement s'entretient de lui-même sans force, ce qui donne le principe de l'inertie :

Un objet laissé à lui-même en n'étant soumis à aucune force avance en ligne droite à vitesse constante ou est immobile. Exemple : un caillou lancé sur la glace d'un étang gelé.

- Les vibrations sont dues aux irrégularités du mouvement (cahots dus aux irrégularités de la route).

- L'air fouette le visage car il est immobile. Dans le vide, il ne se passerait rien.

**3- La conception de GALILÉE.** Si on est dans un véhicule animé d'une vitesse constante, en ligne droite et ne tournant pas sur lui-même, rien ne permet de déceler le mouvement à l'intérieur. Donc le mouvement n'a pas de caractère absolu. Il n'a rien à voir avec ce qui se passe à l'intérieur du véhicule.

Imaginons deux objets dans l'espace se rapprochant l'un de l'autre. Il est impossible de dire lequel est en mouvement et lequel est immobile. Cette question n'a pas de sens.

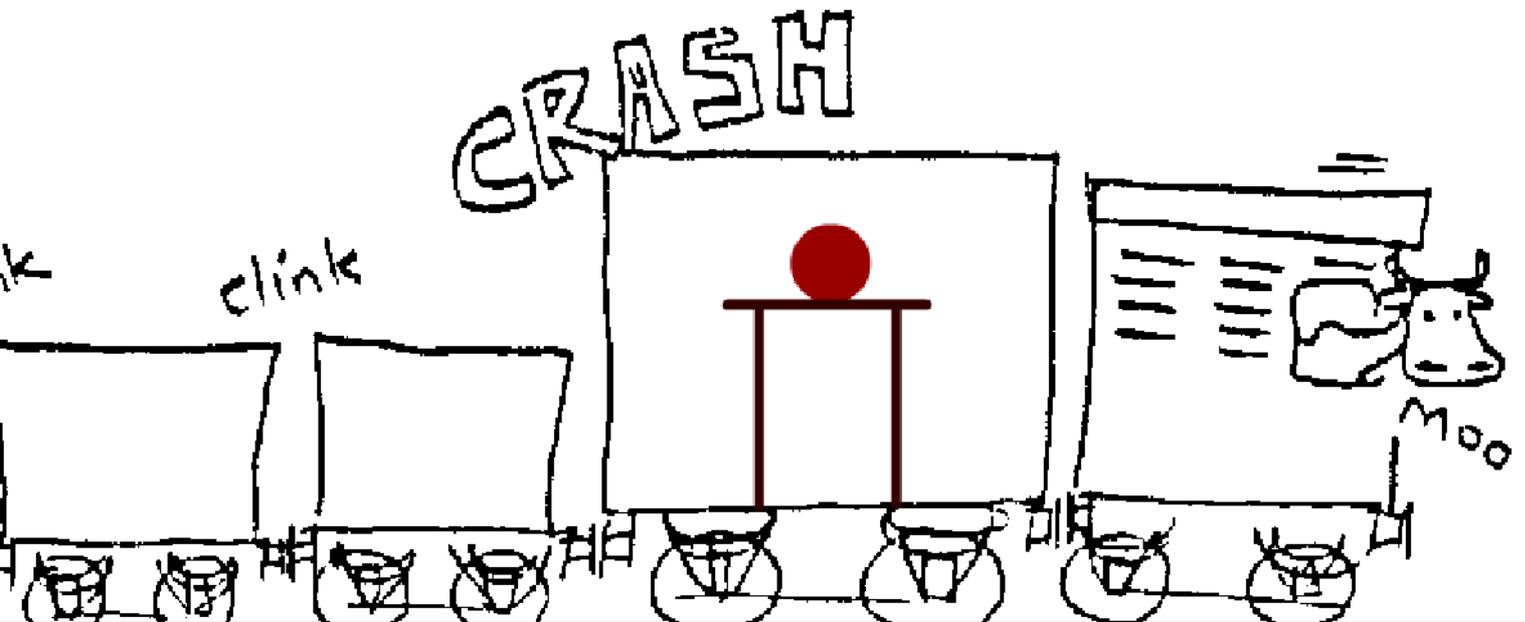


Ainsi le mouvement est relatif à ce qu'on a choisi arbitrairement de considérer comme immobile. Seul le mouvement de translation rectiligne uniforme est relatif, en effet, si un train freine ou accélère, on s'en rend compte.

Accélérer

Freiner

Presser sur les boutons à gauche pour accélérer ou freiner le train. Si le train est arrêté, presser sur le bouton accélérer pour le faire repartir.



#### 4- Le principe de relativité de GALILÉE avec le principe d'inertie.

Un référentiel est un corps solide virtuel supposé s'étendre à l'infini. On fait l'hypothèse qu'il existe une classe particulière de référentiels appelés *référentiels galiléens* en translations rectilignes uniformes les uns par rapport aux autres, dans lesquels les lois de la mécanique sont les plus simples : *un objet qui n'est soumis à aucune force est immobile ou est animé d'un mouvement rectiligne uniforme*. Ceci constitue le *principe de l'inertie*. Parmi tous ces référentiels galiléens, il est impossible d'en distinguer un particulier qui serait immobile. L'immobilité est une affaire de convention.

**Remarque :** On ne dit pas comment trouver d'une manière certaine un référentiel galiléen. On postule simplement que la surface terrestre est en bonne approximation un référentiel galiléen. Mais la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Le Soleil tourne autour du centre de la Voie Lactée. On voit la

difficulté d'une rigueur absolue. Cette difficulté mène à la relativité générale.

**5- Conséquences cosmologiques.** La Terre tourne sur elle-même sans qu'on s'en rende compte et pourtant, à l'équateur, 40 000 km en 24 heures donne une vitesse d'environ 1700 km/h. La Terre tourne autour du Soleil à environ 30 km/s. Le Soleil tourne autour du centre de la Voie Lactée à 250 km/s. D'autre part, notre galaxie se rapproche de la galaxie d'ANDROMÈDE à 100 km/s, sans que l'on puisse donner une vitesse propre à chacune de ces deux galaxies.

Cependant, notons que, après le Big bang, l'univers était une espèce de soupe de particules homogène et isotrope qui définissait un référentiel galiléen particulier local au voisinage de chaque point par rapport auquel cette soupe était immobile. Il reste un résidu de cette soupe, le rayonnement fossile à 2,7 K, qui définit un référentiel spécial, le référentiel cosmique. On peut mesurer par effet DOPPLER sur ce rayonnement la vitesse de la Terre par rapport à ce référentiel cosmique. On est animé d'une vitesse de 390 km/s par rapport à ce rayonnement fossile (COBE). Il y a un décalge vers le bleu d'un côté et vers le rouge dans la direction à  $180^0$ . Le centre de la Voie Lactée est animé d'une vitesse de 600 km/s par rapport au rayonnement fossile. **Tous ces mouvements passent inaperçus !**

### III- LES DIFFICULTÉS DE LA MÉCANIQUE GALILÉENNE

**1- Possibilité de vitesses infinies.** Cette mécanique implique que les objets peuvent aller à des vitesses aussi grandes qu'on veut. Soit  $\bar{v}$  une vitesse choisie dans le référentiel  $\bar{\mathcal{R}}$  qui avance à la vitesse  $V$  par rapport à  $\mathcal{R}$ . Dans  $\mathcal{R}$ , la vitesse est  $v = \bar{v} + V > \bar{v}$ . Les vitesses ne sont pas bornées. Il n'y a donc pas de vitesse limite. Or l'expérience montre que, aussi bien pour les rayons cosmiques que pour les particules dans les accélérateurs, la vitesse est inférieure ou égale à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s), cette vitesse étant par ailleurs facilement approchée.

**2- Le problème de la vitesse de la lumière.** Si la lumière se propage dans le vide absolu, y a-t-il une vitesse de la lumière, et par rapport à quoi ?

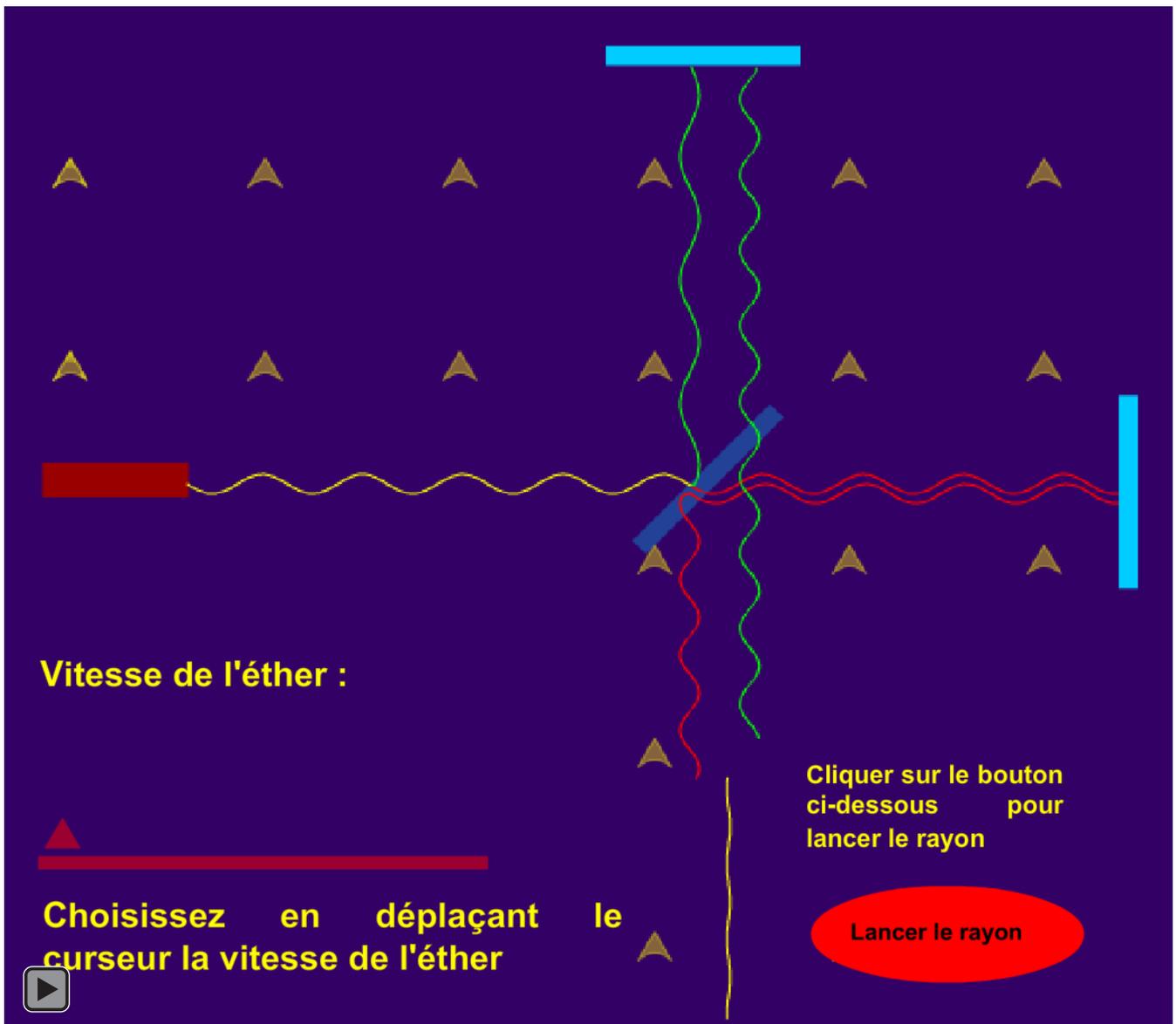
Soit la vitesse de la lumière est infinie, donc infinie par rapport à toute chose. Mais des expériences montrent que la vitesse de la lumière est d'environ 300 000 km/s. Soit la vitesse de la lumière est réglée par la source de l'émission, ou la vitesse de la lumière est quelconque. Dans ce cas, on devrait parfois voir arriver de la lumière à la vitesse d'un escargot. Qu'est-ce que de la lumière immobile ?

La lumière se propage dans le vide. On a observé que la lumière a un aspect ondulatoire. Or, une onde (vague dans la mer) correspond à l'oscillation d'un

milieu (l'eau). Pour la lumière, il s'agirait d'une vibration de l'éther qui définirait l'immobilité absolue, et la vitesse de la lumière serait  $C = 300\,000\text{ km/s}$  par rapport à l'éther. Or :

a) On n'a jamais détecté l'éther.

b) L'expérience de MICHELSON et MORLEY montre que la vitesse de la lumière venant d'une étoile est toujours  $C$ , aussi bien en janvier quand on se dirige vers l'étoile qu'en juillet quand on s'en éloigne par exemple. En effet, quand on tourne l'interféromètre, la figure d'interférence ne change pas, ce qui serait le cas si la lumière se déplaçait à la vitesse  $C$  par rapport à l'éther en mouvement, comme le montre l'animation ci-dessous.



c) On peut faire craquer un poste de radio réglé sur les grandes ondes quand on ferme un circuit électrique ou en frottant de la matière plastique (ébonite) sur une peau de chat. La lumière, comme toute onde électromagnétique est

une vibration conjointe des champs électriques et magnétiques. En faisant des expériences d'électricité dans un référentiel, on obtient les équations de l'électromagnétisme, les équations de MAXWELL, dont une solution est la propagation d'ondes à la vitesse  $C$ . Cette vitesse  $C$  peut être calculée en faisant uniquement des expériences d'électrostatiques (frottement) et de magnétostatiques avec des aimants. Or : les appareils électriques et électroniques fonctionnent avec une précision extraordinaire de la même manière en janvier et en juillet. Donc les lois de l'électromagnétisme sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens. Donc une onde lumineuse donnée se propage à la vitesse  $C$  par rapport à tous les référentiels galiléens ! Ceci est en contradiction avec la composition des vitesses  $v = \bar{v} + V$  vue ci-dessus. On dit que les équations de MAXWELL ne sont pas covariantes par la transformation de GALILÉE.

#### IV- LA RELATIVITÉ RESTREINTE D'EINSTEIN (1879-1955)

**1- La vitesse de la lumière.** La lumière a la même vitesse dans tous les référentiels. c'est une constatation expérimentale de l'expérience de MICHELSON et MORLEY. Donc  $C = C + V$  ! Qu'est-ce qui cloche dans la démonstration de la loi de composition des vitesses ?

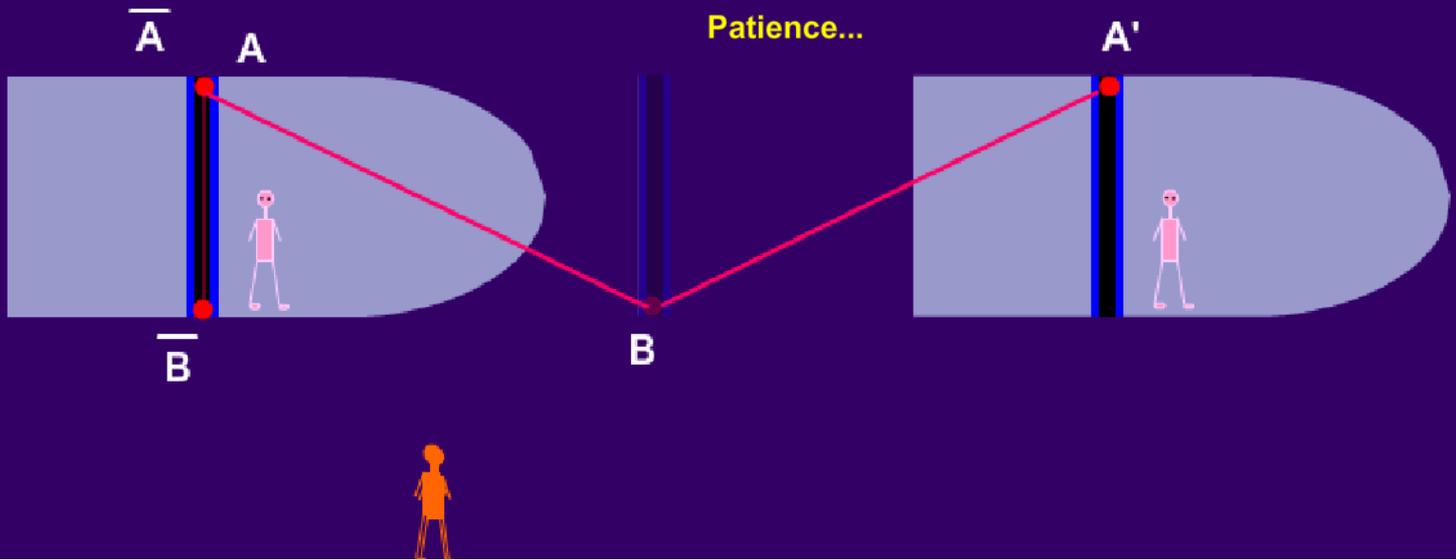
$$OM = O\bar{O} + \bar{O}M = Vt + \bar{v}t = (V + \bar{v})t \quad \Rightarrow \quad v = V + \bar{v}$$

La seule possibilité est que le temps ne soit pas le même dans les deux référentiels ! En effet, on ne pourra pas alors le mettre en facteur.

**2- Le principe de relativité restreinte d'EINSTEIN.** Pour que la vitesse de la lumière soit la même dans tous les référentiels, il faut que les lois de l'électromagnétisme soient les mêmes dans tous les référentiels galiléens. D'où le principe de relativité restreinte d'EINSTEIN qui généralise celui de GALILÉE, vrai pour la mécanique, à toutes les lois de la physique :

**Aucune loi de la physique ne permet de distinguer un référentiel galiléen d'un autre.** Un physicien dans un laboratoire ne peut pas détecter un éventuel mouvement de ce laboratoire en faisant des expériences de physique à l'intérieur de ce laboratoire. Il en résulte bien que la vitesse de la lumière est toujours la même, puisque des expériences d'électricité et de magnétisme mènent à la vitesse de la lumière

### 3- Le ralentissement des horloges dans un référentiel en mouvement.



Le passager dans le vaisseau animé de la vitesse  $V$  a une horloge constituée d'un photon (grain de lumière) qui fait l'aller et retour  $\bar{A}\bar{B}\bar{A}$  à la vitesse de la lumière sur la distance  $L$ .  $C = \frac{2L}{\Delta\tau}$  donc  $\Delta\tau = \frac{2L}{C}$ .

Vu depuis le référentiel fixe, le photon parcourt le chemin  $ABA'$  dont la longueur est :

$$2\sqrt{L^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2} \text{ à la vitesse } C$$

ce qui prend le temps :

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{L^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2}}{C} > \frac{2L}{C} = \Delta\tau$$

$$\Delta t^2 = 4 \frac{L^2 + \frac{V^2\Delta t^2}{4}}{C^2} = \frac{4L^2}{C^2} + \frac{V^2}{C^2}\Delta t^2$$

$$\Delta t^2 \left(1 - \frac{V^2}{C^2}\right) = \frac{4L^2}{C^2} = \Delta\tau^2$$

$$\Delta\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}$$

L'horloge dans le référentiel mobile retarde, vue depuis le référentiel fixe. D'où le paradoxe des jumeaux de LANGEVIN : on a deux jumeaux de 20 ans. L'un

L'horloge dans le référentiel mobile retarde, vue depuis le référentiel fixe. D'où le paradoxe des jumeaux de LANGEVIN : on a deux jumeaux de 20 ans. L'un part faire un long voyage puis revient, tandis que son frère n'a pas bougé. Celui qui a voyagé a vieilli de un an, pendant que son frère immobile a vieilli de 60 ans par exemple ! La Terre tournant sur elle-même, pour connaître avec le GPS, grâce aux satellites quelle partie du sol est à un endroit donné, il faut mesurer le temps avec une très grande précision. Or, le temps ne s'écoule pas à la même vitesse sur le sol et dans les satellites animés d'une grande vitesse. Donc cette équation de la relativité est prise en compte dans le fonctionnement des GPS. Pour deux référentiels galiléens, le retard est symétrique, et, vu depuis le référentiel dit mobile, l'horloge du référentiel fixe semble retarder également. Mais, quand un des deux personnages part puis revient, il est soumis à des accélérations, son référentiel n'est donc plus galiléen, et seul le référentiel fixe peut être pris comme référence entre le début et la fin. La symétrie est brisée, et c'est bien le personnage qui voyage qui vieillit le moins.

Citons à ce sujet un extrait du roman de Pierre BOULLE *La planète des singes*, Éditions Julliard, Paris, 1963 ISBN 2-260-01399-6 réédité en 2001 à l'occasion de la sortie du film éponyme réalisé par Tim BURTON. Les personnages font l'aller et retour de la Terre à Bételgeuse ce qui leur prend quatre ans, tandis que sur la Terre il s'est écoulé sept cents ans

### Page 16 :

*Il est temps que je vous donne quelques explications sur la marche de notre navire.*

*Grâce à ses fusées perfectionnées, que j'ai l'honneur d'avoir mises au point, ce vaisseau peut se déplacer à la plus grande vitesse imaginable dans l'univers pour un corps matériel, c'est-à-dire la vitesse de la lumière moins epsilon.*

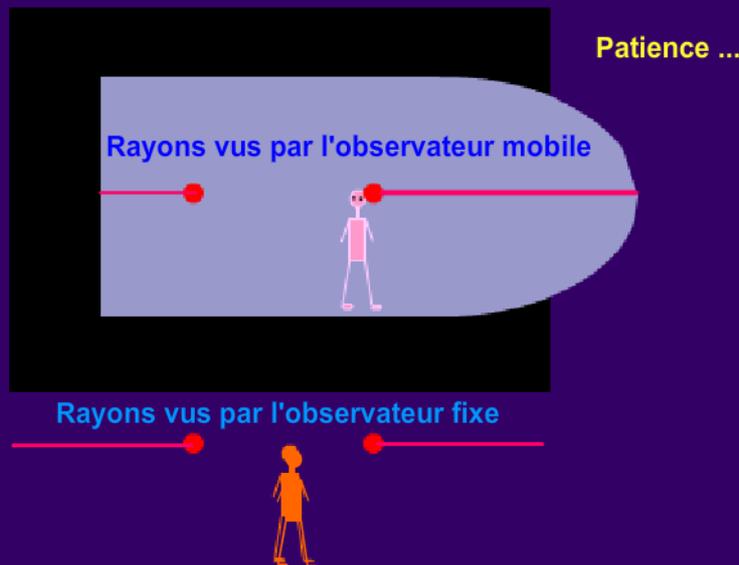
*- Moins epsilon ?*

*- Je veux dire qu'il peut s'en approcher d'une quantité infinitésimale, de l'ordre du milliardième, si vous voulez.*

*- Bon, dis-je. Je comprends cela.*

*- Ce que vous devez savoir aussi, c'est que, lorsque nous nous déplaçons à cette allure, notre temps s'écarte sensiblement du temps de la Terre, l'écart étant d'autant plus grand que nous allons plus vite. En ce moment même, depuis le début de cette conversation, nous avons vécu quelques minutes, qui correspondent à une durée de plusieurs mois sur notre planète. À la limite, le temps ne s'écoulera presque plus pour nous, sans d'ailleurs que nous nous apercevions d'un changement quelconque. Quelques secondes pour vous et moi, quelques battements de notre cœur coïncideront avec une durée terrestre de plusieurs années.*

#### 4- La contraction des longueurs.



Un vaisseau spatial passe à la vitesse  $V$  dans un tunnel. L'observateur du référentiel fixe est exactement au milieu du tunnel. Quand l'avant du vaisseau sort du tunnel, il envoie un signal lumineux vers l'observateur. Quand l'arrière du vaisseau rentre dans le tunnel, il envoie un signal vers l'observateur. L'observateur fixe reçoit les deux signaux en même temps. Pour l'observateur fixe, le vaisseau a donc exactement la même longueur que le tunnel.

Pour l'observateur dans le vaisseau et situé au milieu du vaisseau, la situation est différente. Comme il va au devant du signal parti de la tête du vaisseau, il le reçoit avant le signal de queue. Mais comme pour lui la lumière va toujours également à la vitesse  $C$ , il en déduit que le signal de tête est émis avant le signal de queue. Donc l'avant du vaisseau sort du tunnel avant que l'arrière y soit rentré. Donc pour lui, le vaisseau est plus grand que le tunnel. La conclusion est que le tunnel est vu rapetissé dans le référentiel mobile où on voit le tunnel en mouvement. Le vaisseau est alors vu également rapetissé dans le référentiel fixe où il est en mouvement. La symétrie des deux référentiels en ce qui concerne celui que l'on choisit comme fixe impose en effet cela.

Appellons  $L$  la longueur du vaisseau et  $T$  celle du tunnel. Ce que voit l'observateur immobile permet d'écrire  $T = k L$  avec  $k < 1$ .

L'observateur fixe mesure les temps d'arrivées des signaux lumineux sur l'observateur mobile,  $t_d$  venant de la droite et  $t_g$  venant de la gauche :

$$Vt_d = \frac{T}{2} - Ct_d \quad \Rightarrow \quad t_d = \frac{\frac{T}{2}}{C + V} \quad ; \quad Ct_g - \frac{T}{2} = Vt_g \quad \Rightarrow \quad t_g = \frac{\frac{T}{2}}{C - V}$$

$$t_g - t_d = \frac{\frac{T}{2}}{C - V} - \frac{\frac{T}{2}}{C + V} = \frac{TV}{C^2 - V^2}$$

Avec le temps du référentiel mobile :

$$\bar{t}_g - \bar{t}_d = \frac{TV}{C^2 - V^2} \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}} = \frac{T \frac{V}{C^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

$$L - kT = V (\bar{t}_g - \bar{t}_d) = \frac{T \frac{V^2}{C^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

$$\frac{1}{k}T = kT + \frac{T \frac{V^2}{C^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} \quad ; \quad k^2 + \frac{k \frac{V^2}{C^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} - 1 = 0$$

dont la solution est :

$$k = \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}$$

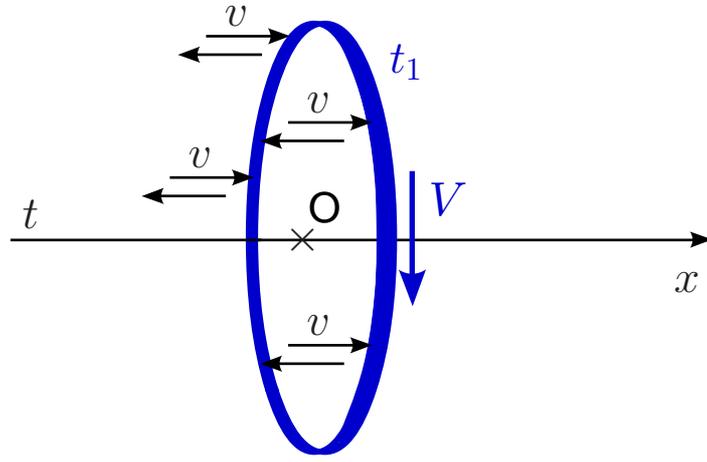
D'où le phénomène de contraction des longueurs. Une longueur  $L_{\text{Mobile}}$  qui avance à la vitesse  $V$  est vue depuis le référentiel fixe avec la longueur

$$L_{\text{Fixe}} = L_{\text{Mobile}} \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}$$

**5-  $\mathbf{E}=\mathbf{m} \mathbf{C}^2$ .** On considère un cercle massique tournant autour de son axe, l'axe des  $x$ , de telle manière qu'un point de ce cercle est animé de la grande vitesse  $V$ . À  $t = t_1 = 0$ , le centre  $O$  de ce cercle est immobile.

Le temps  $t$  est le temps vu depuis le référentiel ( $R$ ) fixe associé à l'axe des  $x$  supposé toujours immobile, et le temps  $t_1$  est celui indiqué par des horloges fixées sur le cercle (référentiel ( $R_1$ )) et donc animées de la vitesse  $V$ . Ce cercle est bombardé par des particules qui arrivent parallèlement à l'axe des  $x$  avec une vitesse  $v$  positive, donc dirigée vers la droite, et qui repartent, après choc avec le cercle, avec la vitesse  $-v$  vers la gauche. La durée  $t_1$  vue depuis le cercle est inférieure à la durée  $t$  correspondante vue depuis le référentiel fixe par l'équation  $t_1 = t \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}$ . Chaque choc contribue pour la même accélération vers la droite dans le référentiel lié au cercle, ou dans le référentiel fixe. Mais, dans le référentiel lié au cercle, où le temps s'écoule plus lentement, le débit des chocs est plus grand d'un facteur  $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$  et donc la force subie est multipliée par ce facteur, donc :

$$F_1 = \frac{F}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}.$$



Examinons maintenant la loi de mouvement de la circonférence dans les deux référentiels ( $R_1$ ) tournant et ( $R$ ) fixe.

$$x = x_1 = \frac{1}{2} \frac{F_1 t_1^2}{m_1} = \frac{1}{2} \frac{\left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} F \right)}{m_1} \left( 1 - \frac{V^2}{C^2} \right) t^2 = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}} F t^2}{m_1} = \frac{1}{2} \frac{F t^2}{\left( \frac{m_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} \right)}$$

$$x = \frac{1}{2} \frac{F t^2}{m} \quad \text{avec} \quad m = \frac{m_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

On voit une augmentation de l'inertie de la circonférence dans le référentiel fixe due à l'augmentation de son énergie.

$$\text{Pour } v \ll C \quad m \simeq m_1 \left( 1 + \frac{V^2}{2C^2} \right) = m_1 + m_1 \frac{V^2}{2C^2}$$

$$\text{soit :} \quad mC^2 = m_1C^2 + \frac{1}{2}m_1V^2$$

On interprète cette équation en disant que l'énergie totale de la circonférence dans le référentiel fixe  $E = mC^2$  est la somme de l'énergie de masse  $m_1C^2$  de la circonférence et de son énergie cinétique  $\frac{1}{2}m_1V^2$ .

On retrouve bien la fameuse formule d'EINSTEIN  $E = mC^2$  qui montre que la masse, donc l'inertie d'un objet globalement immobile, c'est à dire de quantité de mouvement totale nulle, augmente avec son énergie. Cette loi est donc une conséquence directe du ralentissement du temps dans un référentiel en mouvement.

Le formule  $m = \frac{m_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$  montre qu'une particule qui a une masse ne peut pas atteindre la vitesse de la lumière, sa masse deviendrait infinie. Une particule qui

va à la vitesse de la lumière, comme le photon par exemple, le grain de lumière, a donc une masse nulle.

**6- Les particules de masses nulles.** Une particule de masse nulle qui fait des allers et retours dans une boîte de masse nulle à la vitesse de la lumière, fait que la boîte contient de l'énergie, donc semble, vue de l'extérieur comme ayant une masse.

Le proton est constitué de trois quarks. Les masses de ces trois quarks contribuent pour seulement 1% à la masse du proton qui vient ainsi principalement de l'énergie cinétique associée au mouvement des quarks. La masse du proton est ainsi pratiquement associée à du mouvement pur.

Le boson de HIGGS est supposé donner de la masse aux particules élémentaires (électron, quarks etc). En fait c'est le champ de HIGGS qui en interagissant avec ces particules leur communique une masse. Ainsi, une balle de Ping Pong qui se déplace dans l'eau est obligée de mettre l'eau en mouvement pour l'écarter sur son passage. La difficulté de mettre cette eau en mouvement, l'inertie de l'eau donc, associée à sa masse, peut être attribuée à la balle de Ping Pong, si on ne pense pas qu'elle est immergée dans l'eau.



À l'origine du champ de HIGGS non nul, il y a une brisure de symétrie, comme lorsque l'on presse fortement sur une tige verticale qui a la symétrie de révolution par rapport à la verticale. Elle fléchit et se courbe d'un coup d'un côté ce qui brise la symétrie. Mais alors, il apparaît un mouvement possible de rotation de la tige courbée par rapport à la verticale. Cela correspond au théorème de GOLDSTONE qui dit qu'à toute brisure de symétrie correspond l'apparition d'un nouveau mouvement possible. À ce mouvement correspond une particule de masse nulle, le boson de GOLDSTONE. Ce qui donne une masse aux particules, c'est leur interaction avec ce boson de GOLDSTONE. Chaque particule massique est alors équivalente à une boîte de masse nulle, qui renferme un ou plusieurs bosons de GOLDSTONE également de masses nulles mais en mouvement à la vitesse de la lumière à l'intérieur. La boîte donc la particule contient donc de l'énergie par  $E = mC^2$  et possède ainsi une masse.

En conclusion, toutes les masses de toutes les particules viennent en fin de compte du mouvement à la vitesse de la lumière de particules de masses nulles. Il faut remarquer cependant que la masse du boson de HIGGS elle, est donnée directement par le potentiel du champ quantique de HIGGS d'une manière ad hoc. Mais rien n'empêche d'espérer que une fois ce mécanisme élucidé, on se rende compte que pour ce boson de HIGGS lui-même, la masse vienne du mouvement à la vitesse de la lumière de particules de masses nulles.

**7- L'antimatière.** La vidéo ci-dessous permet de comprendre comment les particules de matière interagissent et s'appliquent mutuellement des forces en échangeant d'autres particules, les bosons de champs. Ce sont le photon pour l'interaction électromagnétique, les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  pour l'interaction faible, les gluons pour l'interaction forte et le graviton pour l'interaction gravitationnelle. La relativité restreinte permet leur apparition et disparition pendant une durée très courte grâce à la relation  $E = mC^2$  et à la relation d'incertitude de HEISENBERG :  $\Delta E \Delta t > \hbar$  qui donne  $\Delta m \Delta t > \frac{\hbar}{C^2}$  et montre ainsi que même si le boson est massique, il peut être créé à la condition que ce soit pendant un temps suffisamment court. On dit que le boson échangé est virtuel.



Du fait que le temps  $\Delta t$  doit être très court, la particule échangée parcourt la distance entre les deux particules à une vitesse qui peut être supérieure à la vitesse de la lumière. L'échange est ainsi pratiquement instantané.

Supposons que l'échange soit instantané dans un référentiel, comme l'entrée de l'arrière et la sortie de l'avant de la fusée au paragraphe 4. Dans un autre référentiel, on a vu que l'évènement de gauche a lieu après l'évènement de droite. Mais si on avait considéré une fusée qui allait vers la gauche à la vitesse  $V$ , on aurait trouvé que c'était l'évènement de gauche qui se produisait avant l'évènement de droite. La succession temporelle des évènements peut ainsi changer.

Considérons alors une électron qui est dévié en émettant un photon (émission d'onde électromagnétique), puis est de nouveau dévié en recevant un photon (réception d'onde électromagnétique). Vu dans un autre référentiel, l'évènement de droite a lieu avant l'évènement de gauche. Une particule va donc de la droite vers la gauche. À droite, un photon qui est neutre, produit un électron. Il doit donc en même temps produire une particule de charge positive, *le positron* pour que l'ensemble reste neutre par conservation de la charge électrique. À l'arrivée, de même, l'électron négatif rencontrant une particule positive de même charge absolue donne bien un photon de charge électrique nulle.

**La relativité mène à la possibilité de la matérialisation de la lumière en matière, et à l'existence de l'antimatière qui peut-être considérée comme de la matière voyageant vers le passé.**

Un électron est dévié en émettant un photon puis est de nouveau dévié en absorbant un photon

Dans un autre référentiel, le même processus est vu comme la matérialisation d'un photon en paire électron-positron, suivi de l'annihilation du positron lorsqu'il rencontre un électron, et cela donne un photon

▶

La relativité permet donc de prévoir l'existence des antiparticules, comme le positron antiparticule de l'électron, donc permet de prévoir l'existence de l'antimatière. Comme nous venons de le voir, on peut considérer une antiparticule comme une particule qui voyage vers le passé en remontant le cours du temps. D'autre part, on voit que l'on peut matérialiser la lumière en matière, en accord avec la formule  $E = mC^2$ . On peut ainsi créer deux particules massiques, le positron et l'électron, à partir d'une particule de masse nulle, le photon. On voit également que lorsque de la matière rencontre de l'antimatière, les deux s'annihilent dans une gigantesque explosion en lumière.

**Remarque :** dans la vidéo, on voit que l'élastique lance la boule vers la droite ce qui donne un effet de recul au chariot de gauche, tandis que le chariot de droite est propulsé à droite quand il est percuté. On a donc une force répulsive. Il est très facile d'avoir une force attractive. Il suffit que le chariot de droite lance la boule vers la droite, et que le chariot de gauche reçoive cette boule venant de la gauche.

La délocalisation de la boule liée au principe d'incertitude de HEISENBERG  $\Delta x \Delta P > \hbar$ ,  $P$  étant l'impulsion permet cela.