

La relativité du temps

En 1687, Isaac NEWTON publia les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, ouvrage majeur dans lequel il exposait sa théorie de la mécanique. La mécanique de Newton, de 1697 jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, fut considérée comme une référence : aucune expérience n'était venue la remettre en cause et grâce à elle on avait pu interpréter tous les phénomènes terrestres et astronomiques.

Voici comme, en quelques lignes, Newton traitait la question de la mesure des durées :

« Sans relation à rien d'extérieur, le temps absolu, vrai, mathématique, s'écoule uniformément et s'appelle la durée. »

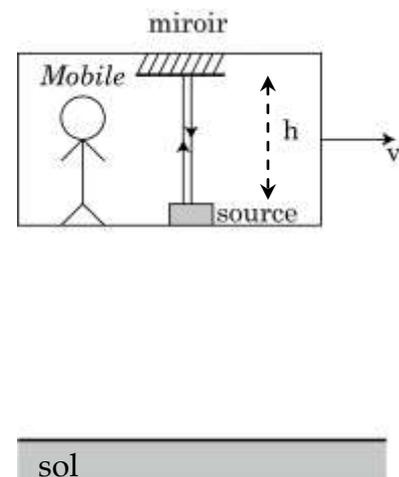
Nous l'avons vu dans l'activité précédente, Einstein a postulé en 1905 que la vitesse de la lumière était indépendante du référentiel considéré. Dans cette activité, nous allons constater que ce postulat conduit à redéfinir la notion de durée.

1^{ère} partie : la durée d'un événement est-elle la même pour tous les observateurs ?

Einstein était un théoricien mais imaginait souvent des « expériences de pensée » (Gedankenexperiment) pour illustrer ses propos. Il s'agit d'expériences imaginaires, parfaitement irréalisables, mais dont il est facile de deviner le résultat.

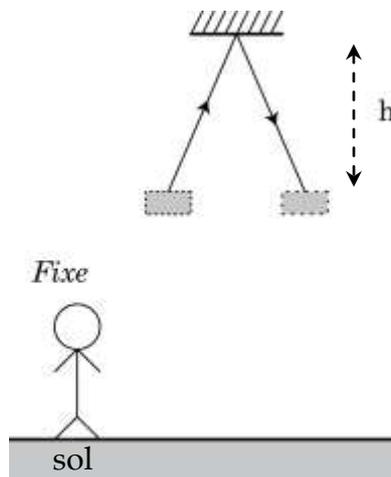
On envisage l'expérience de pensée suivante.

Un véhicule non identifié avance à la vitesse v par rapport au sol. Dans ce véhicule, un expérimentateur nommé « Mobile » a placé une source de lumière et, à sa verticale, un miroir à une hauteur h . Il allume la source et chronomètre le temps mis par la lumière pour effectuer un aller-retour.



On considère un aller-retour de la lumière. On suppose que la lumière, dans l'air comme dans le vide, se propage avec la célérité c constante.

- Exprimer la durée Δt de ce parcours en fonction de la célérité c de la lumière et de la hauteur h .



Un autre observateur appelé *Fixe*, est placé, lui, au sol. Il observe l'expérience réalisée par *Mobile* et mesure sa durée. Il obtient une valeur notée $\Delta t'$.

Du fait du mouvement du véhicule, on peut représenter la manière dont il perçoit le parcours de la lumière sur le schéma ci-contre.

- On admet le postulat d'Einstein. Expliquer, sans faire de calcul, pourquoi ce postulat implique que la durée du parcours mesurée par *Fixe* est supérieure à celle mesurée par *Mobile*.

On va maintenant relier entre elles les durées mesurées par chacun des deux observateurs.

- On note d' la distance que la lumière a parcourue, vue par *Fixe*. Exprimer d'^2 en fonction de h , v et $\Delta t'$ puis en fonction de c , v , Δt et $\Delta t'$.
- On combinant les résultats (a) et (c), établir la relation :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Cette relation bouleverse la notion de temps. En particulier, elle suggère que l'un des deux observateurs a plus vieilli que l'autre : lequel et pourquoi ?
- D'après la mécanique de Newton, quelle relation aurait-on pu écrire entre Δt et $\Delta t'$? Justifier à l'aide de la phrase de Newton citée en préambule.

2^{ème} partie : faut-il oublier la physique newtonienne ?

La théorie qui précède celle d'Einstein, en mécanique, est la physique de Newton. On l'a vu dans la partie précédente, une des corrections apportées par la relativité concerne la mesure des durées.

On va étudier, dans cette partie, dans quelle mesure la correction apportée par la relativité modifie le résultat des prévisions par rapport à la physique de Newton.

- Le facteur $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ permet d'évaluer l'écart entre les prévisions newtonienne et

einsteinienne sur la mesure des durées. Calculer et rassembler dans un tableau les valeurs de γ pour des horloges embarquées :

- à bord d'un TGV qui avance à $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol terrestre ;
- à bord de l'Airbus A380, à la vitesse de $900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol terrestre ;
- à bord de la fusée Ariane 5, à la vitesse de $8\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre ;
- à bord d'un satellite GPS, à la vitesse de $8\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre ;
- à bord d'Apollo 11, à la vitesse de $40\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre ;
- sur un proton accéléré par le LHC de Genève, à la vitesse de $299\,792\,455 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre.

Exploiter les valeurs obtenues pour déterminer, parmi les situations évoquées, celle(s) qui appartiennent au champ de validité de la physique de Newton et celle(s) qui ne sont correctement interprétées que par la physique d'Einstein.

- À l'aide d'un tableur, tracer la courbe représentant $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ en fonction de v , pour des

valeurs de v comprises entre 0 et c .

- Pour quelle valeur de v la correction relativiste modifie-t-elle de 1% le résultat d'une prévision ?
- Expliquer en quoi ce graphique permet de comprendre que, dans de très nombreuses situations, la mécanique de Newton reste pertinente.

5. D'après vos connaissances ou à l'aide d'une recherche documentaire, citer quelques applications, dans la recherche scientifique ou dans la vie quotidienne, où la correction relativiste est indispensable pour interpréter correctement les observations.

3^{ème} partie : des neutrinos remettraient en cause la relativité d'Einstein ?

En septembre 2011, des physiciens du projet international « OPERA » (*Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus*) ont mesuré la vitesse de déplacement de petites particules appelées les neutrinos.

Recherche documentaire :

Lire l'article page 8 et 9 de la revue scientifique « CNRS, le journal » n°262, paru en novembre 2011.

Cette revue est disponible gratuitement par ce lien :

<http://www.cnrs.fr/fr/pdf/jdc/262/index.html>

Elle est téléchargeable au format PDF sur ce lien :

<http://www.cnrs.fr/fr/pdf/jdc/JDC262.pdf>

Rédiger un court paragraphe qui résume ce que vous avez appris de cette lecture et répondant, entre autres, aux questions suivantes :

- quel est le parcours des neutrinos qui a été étudié ?
- qu'a d'étonnante la valeur de la vitesse des neutrinos mesurée par les chercheurs d'OPERA ?
- les physiciens qui ont réalisé cette expérience sont-ils certains de leurs résultats ?

1. De nombreux médias ont déclaré, de manière un peu caricaturale, que cette expérience remettait en cause la relativité d'Einstein. Montrer que le résultat de l'expérience des neutrinos est incompatible avec les résultats obtenus dans la partie 1 de cette activité.
2. Le 22 février 2011, la revue *Science* publie, sur son site internet le communiqué reproduit ci-après. Lire ce communiqué.

Résumer en quelques lignes ce que révèle cet article concernant l'expérience des neutrinos.

Si ce que révèle cet article est avéré, peut-on dire que les neutrinos remettent en cause la relativité ?



Science Insider
Breaking news and analysis from the world of science policy

BREAKING NEWS: Error Undoes Faster-Than-Light Neutrino Results
by Edwin Cartlidge on 22 February 2012, 1:45 PM

It appears that the [faster-than-light neutrino results](#), announced last September by the OPERA collaboration in Italy, was due to a mistake after all. A bad connection between a GPS unit and a computer may be to blame.

Physicists had detected neutrinos travelling from the CERN laboratory in Geneva to the Gran Sasso laboratory near L'Aquila that appeared to make the trip in about 60 nanoseconds less than light speed. Many other physicists suspected that the result was due to some kind of error, given that it seems at odds with Einstein's special theory of relativity, which says nothing can travel faster than the speed of light. That theory has been vindicated by many experiments over the decades.

According to sources familiar with the experiment, the 60 nanoseconds discrepancy appears to come from a bad connection between a fiber optic cable that connects to the GPS receiver used to correct the timing of the neutrinos' flight and an electronic card in a computer. After tightening the connection and then measuring the time it takes data to travel the length of the fiber, researchers found that the data arrive 60 nanoseconds earlier than assumed. Since this time is subtracted from the overall time of flight, it appears to explain the early arrival of the neutrinos. New data, however, will be needed to confirm this hypothesis.

CORRECTION DES QUESTIONS

1^{ère} partie : la durée est-elle la même dans tous les référentiels ?

1. On considère un aller-retour de la lumière. On suppose que la lumière, dans l'air comme dans le vide, se propage avec la célérité c constante.

Exprimer la durée Δt de ce parcours en fonction de la célérité c de la lumière et de la hauteur h .

→ La lumière parcourt une distance $2h$ avec la célérité c . La durée de son parcours vaut donc :

$$\Delta t = \frac{2h}{c}$$

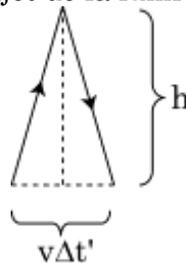
2. On admet le postulat d'Einstein. Expliquer, sans faire de calcul, pourquoi ce postulat implique que la durée du parcours mesurée par *Fixe* est supérieure à celle mesurée par *Mobile*.

→ Selon le postulat d'Einstein, la célérité de la lumière est c , que l'observateur soit sur Terre ou dans l'avion.

Si l'expérience est observée par *Fixe*, immobile par rapport à la Terre, la lumière parcourt un trajet plus long mais avec la même célérité que si son parcours est observé par *Mobile*. L'expérience dure donc plus longtemps pour l'observateur au sol que pour celui qui est dans l'avion.

3. On note d' la distance que la lumière a parcourue, vue par *Fixe*. Exprimer d'^2 en fonction de h , v et t' puis en fonction de c , v , Δt et $\Delta t'$.

→ Pour l'observateur placé au sol, le trajet de la lumière a l'allure suivante :



Horizontalement, le faisceau a parcouru la distance effectuée par le véhicule pendant la durée $\Delta t'$, c'est-à-dire $v\Delta t'$.

Par le théorème de Pythagore on a :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d'}{2}\right)^2 &= h^2 + \left(\frac{v\Delta t'}{2}\right)^2 \\ d'^2 &= (2h)^2 + v^2 \Delta t'^2 \\ &= c^2 \Delta t^2 + v^2 \Delta t'^2 \end{aligned}$$

4. On combinant les résultats (a) et (c), établir la relation : $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

→ La distance d' parcourue par la lumière vue depuis la Terre vaut $c\Delta t'$, puisque sa célérité vaut c .

On a donc :

$$d'^2 = c^2 \Delta t'^2 + v^2 \Delta t'^2$$

$$c^2 \Delta t'^2 = c^2 \Delta t^2 + v^2 \Delta t'^2$$

$$\Delta t'^2 (c^2 - v^2) = c^2 \Delta t^2$$

$$\Delta t'^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \Delta t^2$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5. Cette relation bouleverse la notion de temps. En particulier, elle suggère que l'un des deux observateurs a plus vieilli que l'autre : lequel et pourquoi ?

→ si on admet que $v < c$, le dénominateur, dans la relation précédente, est inférieur à 1, donc $\Delta t' > \Delta t$.

Cela montre que le même événement a duré plus longtemps pour l'observateur terrestre que pour celui placé dans l'avion.

L'observateur terrestre a donc vécu un événement plus long et a vieilli plus vite !

Note : Δt est la durée propre qui sépare les événements « émission de lumière » et « réception de lumière ». On considère que l'élève, lorsqu'il traite cette activité, ne connaît pas cette notion, laquelle fera l'objet du cours suivant. C'est pourquoi elle n'est pas citée dans l'énoncé.

6. D'après la mécanique de Newton, quelle relation aurait-on pu écrire entre Δt et $\Delta t'$? Justifier à l'aide de la phrase de Newton citée en préambule.

Newton écrit : « le temps absolu, vrai, mathématique, s'écoule uniformément (...) ». Donc pour lui : $\Delta t = \Delta t'$.

2^{ème} partie : Faut-il oublier la physique newtonienne ?

1. Le facteur $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ permet d'évaluer l'écart entre les prévisions newtonienne et

einsteinienne sur la mesure des durées. Calculer la valeur de γ pour une horloge embarquée :

- à bord d'un TGV qui avance à $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport à la Terre ;
- à bord de l'Airbus A380, à la vitesse de $900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport à la Terre ;
- à bord de la fusée Ariane 5, à la vitesse de $8000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport à la Terre ;
- à bord d'un satellite GPS, à la vitesse de $14000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport à la Terre ;
- à bord d'Apollo 11, à la vitesse de $40\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport à la Terre ;
- sur un proton accéléré par le LHC de Genève, à la vitesse de $299\,792\,455 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ par rapport à la Terre.

Exploiter les valeurs obtenues pour déterminer, parmi les situations évoquées, celle(s) qui appartiennent au champ de validité de la physique de Newton.

→ On peut regrouper les résultats dans un tableau :

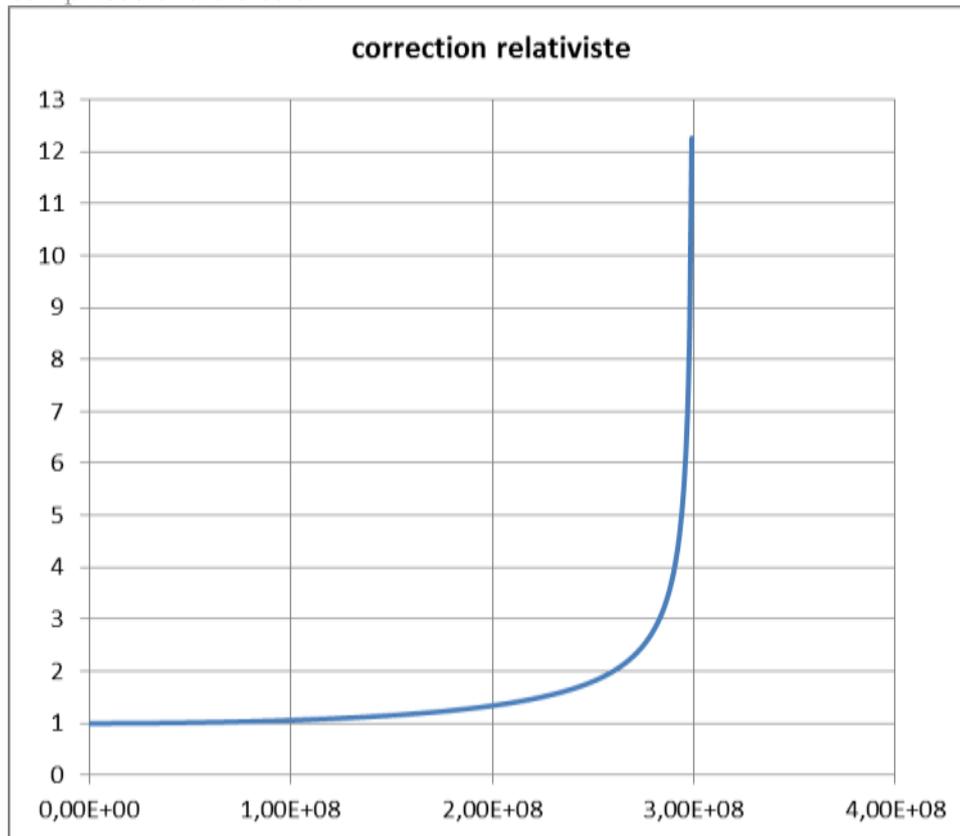
horloge embarquée sur ...	v (km·h ⁻¹)	v (m·s ⁻¹)	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
TGV	300	83,3	1,00
Airbus A380	900	250	1,00
Ariane 5	8000	2222	1,000
satellite GPS	14000	3888,9	1,0000
Apollo 11	40000	11111	1,0000
proton accéléré	-	299 792 455	7 000

Les 5 premières valeurs sont tellement proches de 1 que, vu le nombre de chiffres significatifs donnés, la correction relativiste ne modifie pas la valeur du temps mesuré. Les 4 premières situations seront donc aussi bien décrites par la physique de Newton que par celle d'Einstein.

Par contre, on voit qu'une particule accélérée est très influencée par la correction relativiste : son comportement sort du champ de validité de la physique de Newton.

2. À l'aide d'un tableur, tracer la courbe représentant $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ en fonction de v , pour des

valeurs de v comprises entre 0 et c .



3. Pour quelle valeur de v la correction relativiste modifie-t-elle de 1% le résultat d'une prévision ?
Le tableau montre que pour $v = 4,30 \times 10^7 \text{ m.s}^{-1}$ la correction relativiste est de 1,01. La prévision relativiste diffère donc de 1% par rapport à un calcul newtonien. Il faut remarquer que cette vitesse est supérieure à toutes les vitesses des phénomènes terrestres et astronomiques connus des élèves.
4. Expliquer en quoi ce graphique permet de comprendre que, dans de très nombreuses situations, la mécanique de Newton reste pertinente.
Le graphique montre que la correction relativiste reste très proche de 1 pour des vitesses « usuelles » : la relativité ne modifiera donc quasiment pas la prévision newtonienne.
5. D'après vos connaissances ou à l'aide d'une recherche documentaire, citer quelques applications, dans la recherche scientifique ou dans la vie quotidienne, où la correction relativiste est indispensable pour interpréter correctement les observations.
On peut citer par exemple : l'astrophysique, la physique des particules, et plus proche de notre quotidien : le GPS.

3^{ème} partie : Pourquoi a-t-on dit que les neutrinos remettaient en cause la relativité ?

1. Recherche documentaire :

→ Des neutrinos ont été émis à Genève, au CERN, et reçus au laboratoire souterrain de Fran Sasso en Italie. La vitesse mesurée est supérieure à la vitesse de la lumière. Cependant, même les physiciens qui ont effectué ces mesures estiment que leurs résultats doivent être critiqués par la communauté scientifique. Au moins une autre mesure indépendante doit être faite pour valider la leur.

2. De nombreux médias ont déclaré, de manière un peu caricaturale, que cette expérience remettait en cause la relativité d'Einstein. Montrer que le résultat de l'expérience des neutrinos est incompatible avec les résultats obtenus dans la partie 1 de cette activité.

→ Reprenons la relation entre t et t' établie dans la première partie : $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Si $v > c$, alors $1 - \frac{v^2}{c^2}$ est inférieur à 1... et la durée $\Delta t'$ n'est pas définie !

3. Le 22 février 2011, la revue *Science* publie, sur son site internet le communiqué reproduit ci-après. Lire ce communiqué.

Résumer en quelques lignes ce que révèle cet article concernant l'expérience des neutrinos.

Si ce que révèle cet article est avéré, peut-on dire que les neutrinos remettent en cause la relativité ?

→ Cet article révèle qu'une mauvaise connexion entre un GPS et un ordinateur aurait pu être à l'origine de l'avance de 60 nanosecondes que les neutrinos semblaient avoir prise. Si ce propos est confirmé, alors, et jusqu'à nouvel ordre, aucune expérience ne remet en cause la relativité d'Einstein. Jusqu'à nouvel ordre...