

# Einstein, Galilée et la barge géante relativiste !

GALILÉE : Vous avez dit ? 299 792 458 mètres par seconde ? Vous avez donc trouvé moyen de mesurer la vitesse de la lumière ? Je m'y suis moi-même essayé, en vain... Une nuit, j'ai gravi, équipé d'une lanterne, une colline, et demandé à l'un de mes élèves de se rendre au sommet de la colline voisine. Quand je découvrais ma lanterne, il découvrait aussitôt la sienne, tout en poussant un cri. Je pus ainsi évaluer la durée écoulée entre le moment où j'avais découvert ma lanterne et celui où je voyais le signal lumineux envoyé par mon élève. Cette durée me semblait nulle, mais je savais que cela ne prouvait pas que la vitesse de la lumière soit réellement infinie. La seule chose dont on pouvait être sûr, c'est que la lumière voyageait plus rapidement que le son, qui lui mettait un certain temps, non nul et mesurable, à me parvenir.

EINSTEIN : Vous ne pouvez résoudre le problème faute de moyens de mesure adéquats. C'est l'inconvénient d'être né trop tôt. Mais vous avez eu le mérite de le poser correctement.

GALILÉE (*excité comme un enfant*) : Près de 300 000 kilomètres par seconde, m'avez-vous dit... ? Diantre, c'est énorme, vraiment, presque inimaginable, mais non point infini. Et d'où vient que cette vitesse ne s'additionne pas à celle du bateau qui avance ? Comment le savez-vous ?

EINSTEIN : Disons qu'il s'agit d'un pari que j'ai fait, après avoir réfléchi longuement, pendant des années... Admettons, me suis-je dit, que la vitesse de la lumière soit immuable. Que faudrait-il en déduire ? J'ai procédé à une expérience

de pensée : imaginons deux personnages, chacun sur une barge géante de 300 000 kilomètres de long. L'une est à l'ancre, immobile. L'autre vogue à 150 000 kilomètres par seconde, à vitesse constante. Dans chacune des barges, à mi-distance de la poupe et de la proue, un pilier sur lequel repose une lanterne éteinte. Dans chacune, une horloge est fixée à la poupe et une autre à la proue. Toutes deux sont synchronisées. À bord de la première barge, le capitaine A. À bord de la seconde, le capitaine B.

GALILÉE (*intrigué*) : Soit... Pour l'instant, je vous suis. Deux "référentiels" en mouvement l'un par rapport à l'autre. Poursuivez.

EINSTEIN : Au départ de notre expérience, la barge B vient de parvenir exactement à hauteur de la barge A. Proue à proue, poupe à poupe. À cet instant précis, midi exactement à leurs horloges respectives. Les capitaines A et B allument ensemble leurs lanternes un fragment de seconde pour les éteindre aussitôt. Quelle heure sera-t-il quand la lumière envoyée par A atteindra la poupe de A ? Et quand atteindra-t-elle sa proue ? Et quand la lumière envoyée par B atteindra-t-elle la proue de la barge B ? Et sa poupe ?

GALILÉE (*bouleversé*) : Jésus Marie ! Je crois comprendre... (*Un long silence.*) Oui, j'ai compris. Sainte Vierge, c'est affolant. Si je me place du point de vue du capitaine B : la lumière de la barge B atteindra la poupe et la proue de B en même temps, au bout d'une demi-seconde, c'est-à-dire à midi et une demi-seconde aux

horloges de B. Ces deux événements, pour B, seront parfaitement simultanés. Si je me place maintenant du point de vue du capitaine A, la lumière de la barge A, de même, atteindra la poupe et la proue de A au bout d'une demi-seconde, à midi et une demi-seconde aux horloges de A.

EINSTEIN : En effet, en effet... Mais si le capitaine d'une barge observe ce qui se passe dans l'autre barge...

GALILÉE : ... Le capitaine A, sur sa barge immobile, voit passer la barge B à 150 000 kilomètres par seconde par rapport à lui. Leurs deux lanternes se sont allumées au même moment, l'une face à l'autre. Mais une demi-seconde plus tard, la poupe de B a avancé de 75 000 kilomètres. Elle est désormais à 225 000 kilomètres de la source du flash lumineux. Le capitaine A en déduit donc logiquement qu'elle n'a pas encore atteint la proue de B à midi et une demi-seconde – alors qu'elle a atteint la sienne.

EINSTEIN : Mais pour le capitaine B, quand l'horloge affiche midi et une demi-seconde, la lumière arrive.

GALILÉE : Je comprends : quand le capitaine A voit midi et une demi-seconde à sa montre, le capitaine B voit midi et un quart de seconde... Autrement dit, si la vitesse de la lumière est immuable, la même dans tous les référentiels alors il faut admettre que le temps de B n'est plus le même que le temps de A !

EINSTEIN : Exactement.

GALILÉE : Et deux événements qui sont simultanés aux yeux du capitaine B – "la lumière atteint la poupe de B", "la lumière atteint la proue de B" – ne le sont plus aux yeux du capitaine de A : ils lui apparaissent décalés dans le temps.

EINSTEIN : Parfaitement !

GALILÉE : C'est extraordinaire ! J'avais donc eu raison de croire que les lois physiques correspondent à des énoncés qui contredisent ce qui nous semble évident. Elles ne ressemblent pas nécessairement aux phénomènes que, pourtant, elles expliquent. En 1604, déjà, j'avais entrepris de ridiculiser certaines des simili-vérités qui s'imposent spontanément à notre esprit. En me servant comme vous d'une expérience de pensée, peut-être la première jamais inventée<sup>1</sup>,

1. Galilée raconta cette expérience de pensée par l'intermédiaire de Salviati, l'un des personnages des *Discours concernant deux sciences nouvelles* : "S'il est vrai qu'une grande pierre se meut, par exemple, avec huit degrés de vitesse et une plus petite avec quatre degrés, il s'ensuivra, si on les attache, que l'ensemble se mouvra avec une vitesse inférieure à huit degrés. Or, les deux pierres, une fois réunies, forment une pierre plus grande que celle qui se mouvait avec huit degrés de vitesse, et que la plus grande se meut par conséquent moins vite que la plus petite, ce qui va contre votre supposition. Vous voyez donc comment, si vous supposez qu'un mobile plus grave se meut plus vite qu'un mobile moins grave, j'en conclus, de mon côté, qu'un mobile plus grave se meut moins vite." Galilée montrait ainsi, sans en faire l'expérience concrète, qu'il y a une contradiction interne dans la loi qui voudrait que les corps lourds tombent plus vite que les légers, contradiction que l'observation directe ne permet pas de relever (sauf si la chute a lieu dans le vide, chose impossible à réaliser à son époque).

Extrait de « Le pays qu'habitait Albert Einstein »,  
par Etienne Klein, éditions Actes Sud Sciences Humaines, 2016

Poupe (Po)

Proue (Pr)

**A**

$(x, t)$   
 $v = 0$



300 000 km

$t = 0$  s

**B**

$(x', t')$   
 $v = c/2$



$c/2$

**Emission du flash :**

Horloges synchronisées à  
 $t = 0$

$t = 0, x = 0$

$t' = 0, x' = 0$

$\beta = v/c = 1/2$

$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} = 2/\sqrt{3}$

**A**



$1/2$  s  
150 000 km

$t = 1/2$  s

**B**



225 000 km

**Réception vue de A :**

$t = 1/2$  s

Dans A, réception pour  
Po et Pr

Dans B, Po dépassée, Pr  
pas atteinte : réception  
pas simultanée dans B, vu  
de A.

En effectuant les calculs à l'aide de la transformation de Lorentz :

**Réception à la proue de B, vue de B :**

$$x' = 150\,000 \text{ km}$$

$$t' = 1/2 \text{ s}$$

La transformation de Lorentz donne,

**vu de A :**

$$t = 0,866 \text{ s}$$

$$x = 259\,808 \text{ km}$$

**Réception à la poupe de B, vue de B :**

$$x' = -150\,000 \text{ km}$$

$$t' = 1/2 \text{ s}$$

La transformation de Lorentz donne,

**vu de A :**

$$t = 0,28 \text{ s}$$

$$x = -86\,603 \text{ km}$$

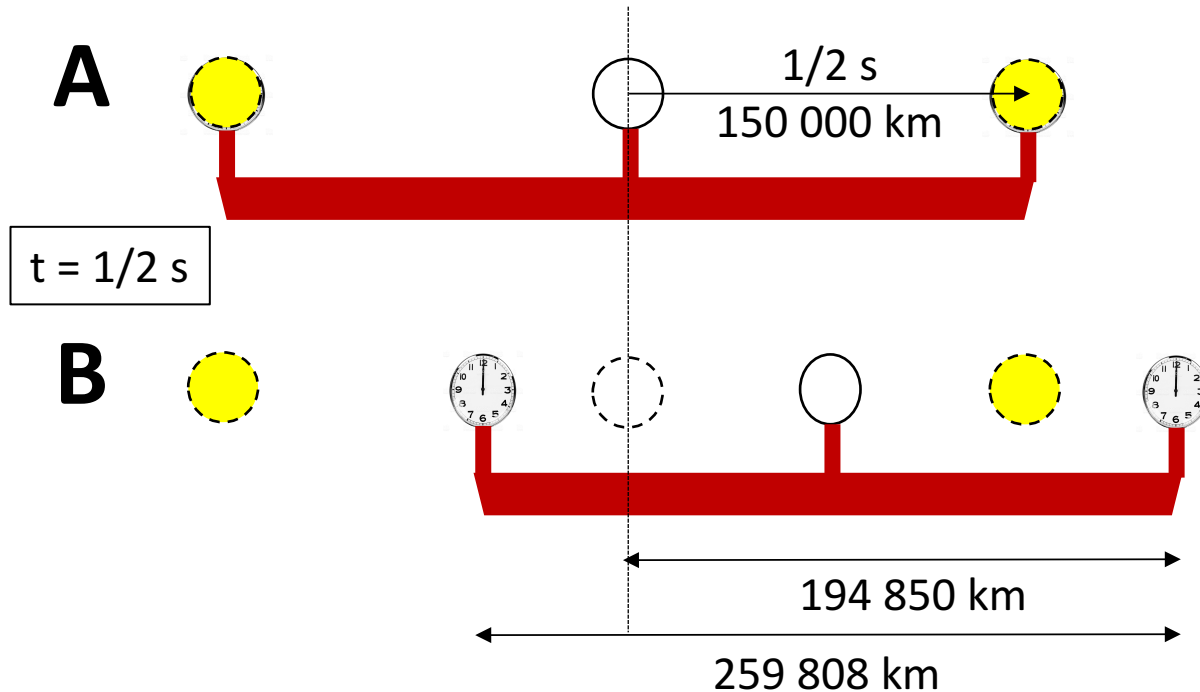
Idem, la réception simultanée dans B, vu de B, ne l'est pas quand elle est vue de A.

**Remarques et critiques concernant la description de cette expérience de pensée dans le livre :**

- **Erreur page 116** : c'est la proue et non la poupe qui est à 225 000 km du point de départ.
- Par ailleurs, le schéma page précédente, qui représente ce qui est décrit dans le texte, n'est en réalité pas juste. Cela illustre la non-simultanéité. Mais il faut tenir compte de la contraction de la barge B vue de A, d'un facteur  $1/\gamma = 0,866$  et donc **les distances ne sont pas celles indiquées**.
- Voir le « bon » schéma page suivante.

## Version corrigée « complète » (avec contraction des longueurs) :

Avec la contraction des longueurs, vu de A :



La lumière arrive, vu de A, à la proue de B quand :

$$x(\text{Proue de B}) = 150\,000 / \gamma + (c/2)t = x(\text{lumière}) = ct, \text{ soit } t = 0,866 \text{ s}$$

On retrouve le résultat précédent.

A tout instant ( $t = 0$  compris)  $t$ , vu de A, la barge B a la longueur  $300\,000 / \gamma = 259\,808 \text{ km}$