

ETUDE D'UN EXERCICE DE CINEMATIQUE RELATIVISTE **PROPOSE AUX ELEVES DE TS**

1. Introduction

Tous les ouvrages de physique de Terminale S conformes au nouveau programme 2012 consacrent un chapitre à la relativité restreinte dont le contenu manque considérablement de rigueur. Pour le montrer nous allons décortiquer ici un exercice et la solution proposée.

2. Sujet de l'exercice

Une fusée émet des flashes toutes les secondes. Cette fusée se déplace à une vitesse de $0,8c$.

1. Quelle est la vitesse de la lumière par rapport à la fusée ?
2. Quelle est la durée propre entre deux flashes ?
3. Quelle est la durée mesurée entre ces deux flashes pour un observateur extérieur ?

3. Analyse de l'énoncé

*L'introduction de l'exercice ne fait référence à aucun repère. On y introduit une vitesse sans aucune précision, ce qui conforte implicitement dans l'esprit de l'élève l'idée que la vitesse a un caractère absolu. Eventuellement cet élève pourra penser que la référence absente est en réalité constituée par lui-même. Mais on peut se rendre compte facilement de l'incomplétude de cette présentation si on réfléchit à une affirmation analogue qui dirait : « cette maison est au Nord ». Dans ce cas la plupart d'entre nous va se demander : « au Nord de quoi ? » mais ceux qui ne se poseront pas la question penseront implicitement : « au Nord **de moi** ». Nous avons ici le même fonctionnement¹ d'un raisonnement inconscient qui va modifier la phrase en la complétant avec : « une vitesse de $0,8c$ **par rapport à moi (sur Terre)** ». Malheureusement, en physique, il est toujours dangereux de s'appuyer sur des données implicites car elles ne sont pas toujours justifiées et peuvent induire des conclusions totalement erronées.*

On peut faire une seconde remarque sur cette introduction : en indiquant que les flashes sont émis toutes les secondes l'exercice ne précise pas dans quel référentiel ces intervalles de temps sont mesurés. Là encore le lecteur va compléter inconsciemment avec « dans un référentiel lié à la fusée » mais il peut très bien se tromper et il est indispensable de bien préciser les choses.

La première question ne donne pas lieu à critique mais la suivante peut être discutée dans sa formulation car il aurait été important, après avoir défini deux événements constitués par l'envoi de deux flashes successifs,

¹ Avec la différence que dans le cas de notre exercice c'est la majorité des élèves qui va inconsciemment ajouter à la phrase le bloc terminal « ... par rapport à la Terre » du fait que l'on a affaire à une fusée qui ne « pouvait partir que de notre planète ».

de demander auparavant dans quel référentiel l'intervalle de durée propre entre ces deux événements était mesuré et de justifier son choix.

La troisième question est la plus contestable. Qu'est ce qu'un observateur extérieur ? Quel est son mouvement par rapport à la fusée, par rapport à la Terre ? On n'en saura rien. La aussi on compte sur une réflexion implicite : « l'observateur extérieur lié à la Terre ». Mais il n'y a aucune raison que ce soit le cas. On peut imaginer un autre observateur dans une autre fusée se déplaçant avec une certaine vitesse définie soit par rapport à la Terre, soit par rapport à la première fusée.

Pour cette dernière question apparaît également la difficulté liée à la définition d'une durée mesurée – durée impropre dans la terminologie universellement acceptée de la relativité restreinte – qui est, la plupart du temps, maltraitée dans tous les ouvrages disponibles de TS. Dans celui dont est tiré cet exercice on peut lire : « **On parle de durée mesurée pour un observateur en mouvement par rapport aux événements observés** ». Il est difficile de comprendre comment un mouvement peut être déclaré par rapport à des événements ! Un mouvement s'effectue par rapport à un référentiel et un événement est défini par ses coordonnées dans un référentiel. Comment peut-on définir un mouvement par rapport à un(des) point(s) de l'espace-temps ?

Pour cela on peut poser qu'il existe deux types de référentiels :

- Dans le premier (**R**) les événements² $E_1(x_1, t_1)$ et $E_2(x_2, t_2)$ sont tels que nous avons $x_1 = x_2$, c'est à dire que E_1 et E_2 se produisent au même endroit et t_1 et t_2 sont mesurés par la même horloge H . (**R**) est donc le référentiel propre de H et on y mesure l'intervalle propre entre E_1 et E_2 .
- Dans le second (**R'**) nous avons, pour les mêmes événements, $x_1 \neq x_2$ et il est nécessaire de disposer de deux horloges H_1 et H_2 pour connaître l'intervalle de temps entre les deux événements qui est alors dit impropre.

Pour passer de la phrase citée, donnée dans un ouvrage, à notre interprétation il faut déjà bien maîtriser les concepts de la RR ce qui n'est pas le cas de nos élèves !

4. Correction proposée

1. La vitesse de la lumière dans le vide est $c = 3.10^8$ m/s dans tout référentiel selon le postulat d'Einstein sur l'invariance de la vitesse de lumière.
2. Les flashes sont émis toutes les 1 s. Donc la durée propre Δt_p entre deux émissions est de 1 s.
3. On détermine le coefficient de Lorentz pour calculer la dilatation du temps :

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} \longrightarrow \gamma = 1/(1 - (0,8c/c)^2)^{1/2} \longrightarrow \gamma = 1,67$$

² On considère ici que l'axe Ox ($O'x'$) est le seul de pertinent ici mais, bien évidemment, le raisonnement peut être généralisé aux 3 axes.

Pour l'observateur extérieur, les durées se dilatent et la durée mesurée entre deux émissions est de 1,67 s. ($\Delta t_M = \gamma \cdot \Delta t_P$)

5. Analyse de la correction

Il y a peu de commentaire à faire sur la réponse à la première question mais là encore il est indispensable d'insister sur cette invariance de la vitesse de la lumière dans n'importe quel référentiel galiléen.

La critique de la deuxième réponse porte essentiellement sur l'emploi de la conjonction de coordination « donc ». Il n'y a aucune raison qu'on puisse déduire de la seule valeur de la période d'émission des flashes la durée propre entre deux impulsions lumineuses. Il n'est possible de proposer cette conclusion uniquement si les impulsions produites dans la fusée le soit toutes les secondes mesurées sur une seule horloge H attachée à la fusée.

La troisième question a été rédigée simplement pour mettre en œuvre une formule sans chercher à en vérifier la compréhension profonde chez les élèves. La référence à un observateur extérieur – qualificatif éminemment flou et totalement étranger à la RR – est reprise sans plus de détail que dans la question et n'apporte rien à un calcul « automatique » sans intérêt.

6. Réécriture de l'exercice et de sa solution

6.1 Enoncé

*Une fusée se déplace à une vitesse de $0,8c$ dans un référentiel **(R)** lié à la Terre que nous considérerons comme galiléen. Le pilote de cette fusée émet des flashes toutes les secondes, mesurées sur son horloge H' au repos dans son référentiel **(R')**.*

- 1. Quelle est la vitesse de la lumière dans le référentiel **(R')** lié à la fusée ?*
- 2. Dans quel référentiel est mesurée la « durée propre » entre l'émission de deux flashes consécutifs et quelle est sa valeur ?*
- 3. Un observateur terrestre mesure dans son référentiel **(R)** l'intervalle de temps entre les émissions consécutives de deux de ces flashes. Pourquoi appelle t'on cet intervalle entre deux émissions « durée mesurée » et quelle est sa valeur ?*

6.2 Correction

- 1. Le principe, posé par Albert Einstein en 1905, de la constance de la vitesse de la lumière quelque soit le référentiel considéré permet de dire que $v_{lumière} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ en particulier dans le référentiel **(R)** de la lumière.*
- 2. La durée propre mesurée entre l'émission de deux flashes consécutifs ne peut l'être que dans un référentiel où les deux événements se déroulent en un même lieu à des instants lus sur une même horloge.*

Dans notre cas ce référentiel ne peut être que celui de la fusée, c'est-à-dire **(R')**. Sa valeur est donc celle fournie par l'horloge H' : $\Delta t'_p = 1 \text{ s}$.

3. Sur Terre, attaché au référentiel **(R)**, l'observateur terrestre a besoin de deux horloges au repos pour dater ces flashes : H₁ placée à l'endroit où passe la fusée à l'instant t₁ (émission du flash de rang n) et H₂, un peu plus loin, à l'endroit où passe la fusée à l'instant t₂ (émission du flash de rang n+1). L'intervalle (t₂ - t₁) est donc une durée impropre ou, selon la terminologie particulière du programme de TS, une durée mesurée Δt_M avec :

$$\Delta t_M = \gamma \cdot \Delta t'_p$$

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} \longrightarrow \gamma = 1/(1 - (0,8c/c)^2)^{1/2} \longrightarrow \gamma = 1,67$$

$$\Delta t_M = 1,67 \times 1 = 1,67 \text{ s}$$

Pierre MAGNIEN
(mars 2013)