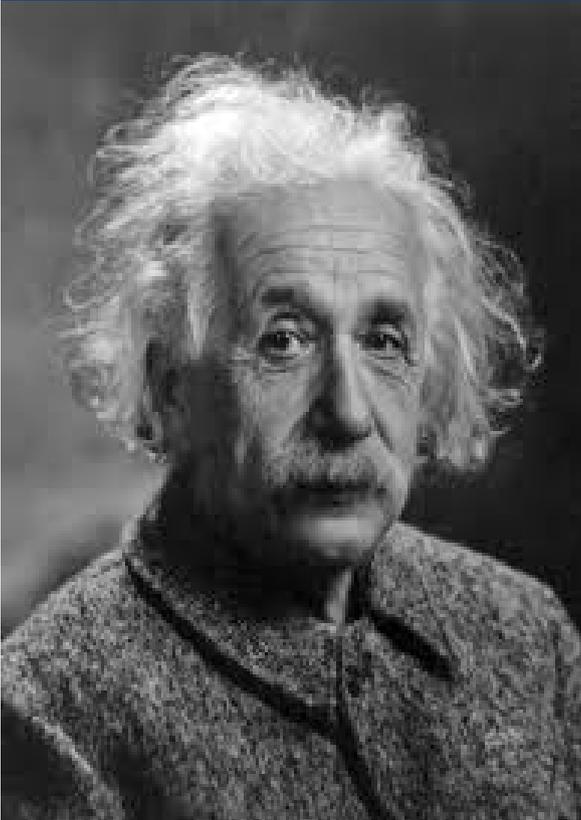


Chap. 10



Temps et relativité restreinte

I. Etude de documents

Voir l'extrait de « La magie du cosmos »

II. Notions de relativité restreinte

1. Postulats d'Einstein

2. Définition

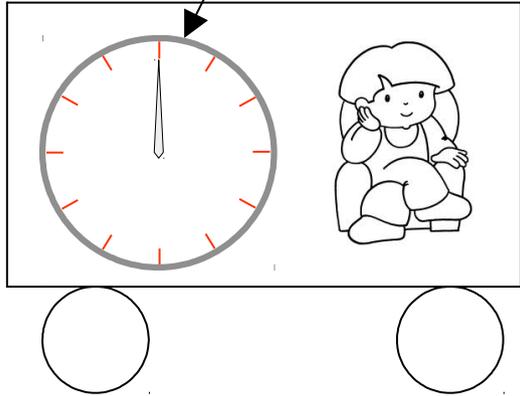
Pour introduire et illustrer ces notions de façon très qualitative et introduire progressivement le vocabulaire, on a imaginé la situation suivante.....

Un enfant a acheté un film pour le regarder pendant un trajet en voiture.
Sur la jaquette, il est indiqué : « durée du film : 1 heure ».

Le « contrat » parents-enfant : le voyage commence au début du film et on fera une pause à la fin du film.

Source : <http://slideplayer.fr/user/1165566/>
Alexandrie Prat

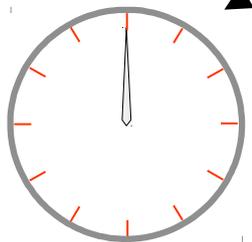
Horloge du tableau de bord de la voiture



Évènement 1 : début du film.

Évènement 2 : Fin du film.

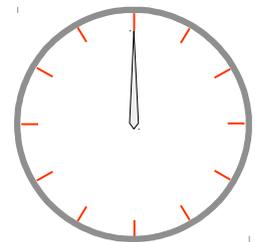
Horloges des villes traversées



Ville A



Ville B

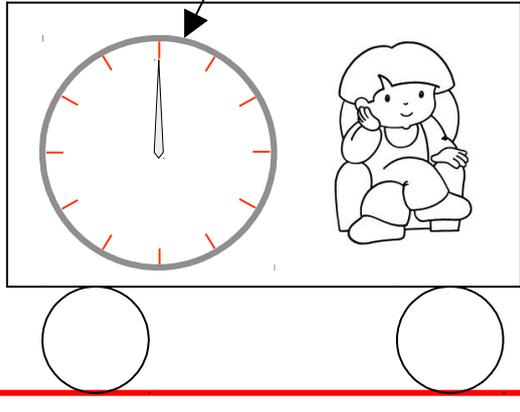


Ville C

Référentiel voiture

Attachons un référentiel à la voiture

Horloge du tableau de bord de la voiture



Évènement 1 : début du film.

Évènement 2 : Fin du film.

On part.... La voiture roule à vitesse constante.

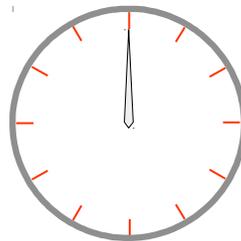
Attachons un référentiel aux villes traversées

Référentiel terrestre

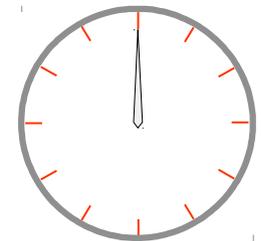
Horloges des villes traversées



Ville A



Ville B



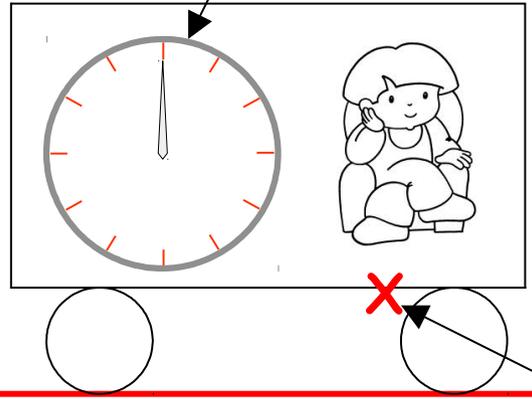
Ville C

Évènement 1 : début du film.

Évènement 2 : Fin du film.

Référentiel voiture

Horloge du tableau de bord de la voiture



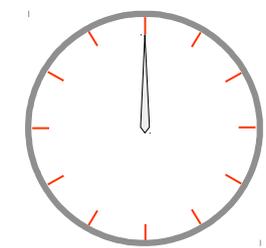
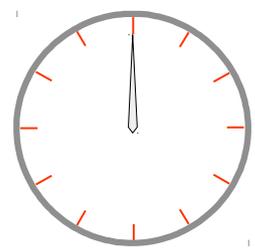
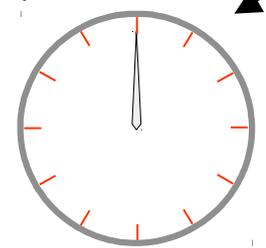
Repérons la position de l'évènement 1 dans le référentiel lié à la voiture

Repérons la position de l'évènement 1 dans le référentiel terrestre

Référentiel terrestre

Horloges des villes traversées

Départ : 12h



Ville A

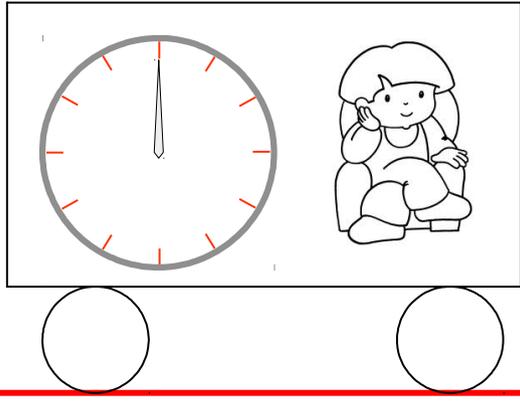
Ville B

Ville C

Évènement 1 : début du film.

Évènement 2 : Fin du film.

Référentiel voiture



On part.....

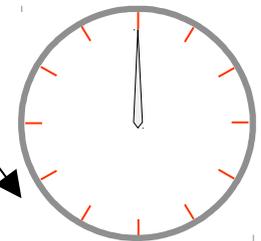
Repérons la position de l'évènement 2 dans le référentiel lié à la voiture

Repérons la position de l'évènement 2 dans le référentiel terrestre

Référentiel terrestre

Départ : 12h

Horloges des villes traversées

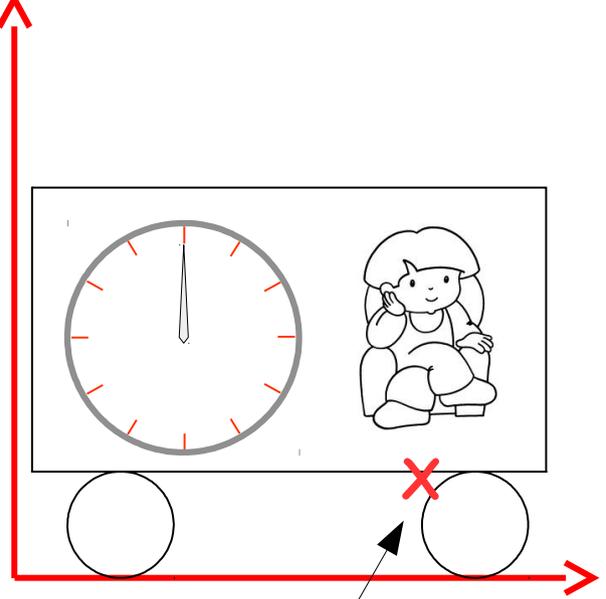


Ville A

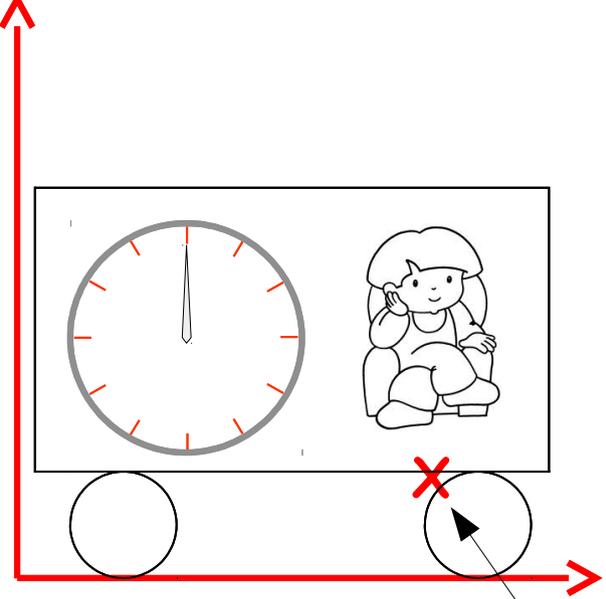
Ville B

Ville C

Référentiel voiture



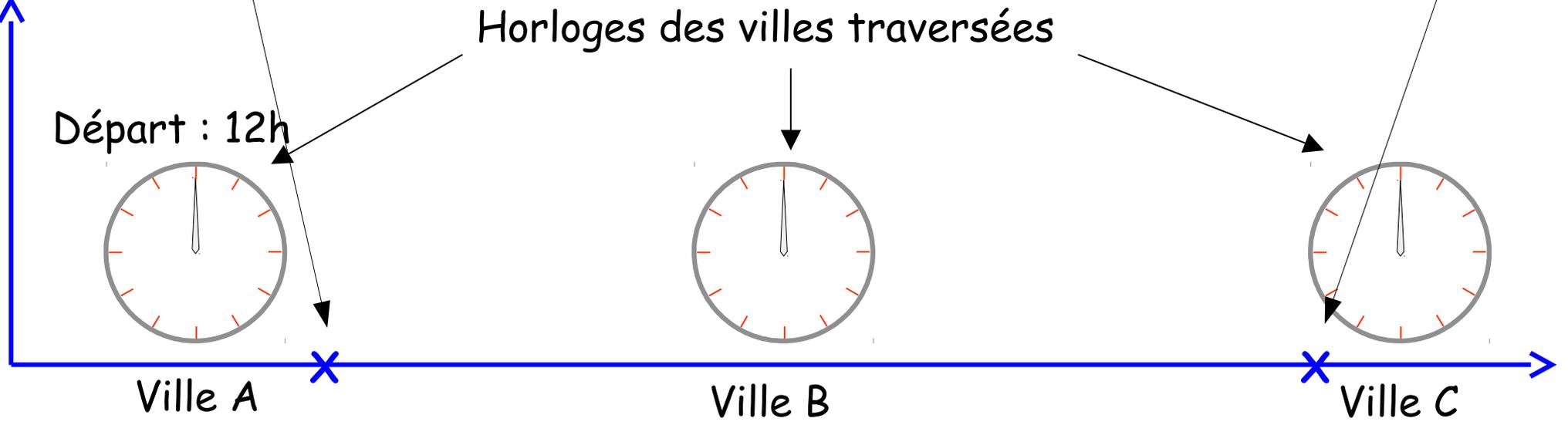
Référentiel voiture



Évènement 1 : début du film.

Évènement 2 : Fin du film.

Référentiel terrestre



→ Ce phénomène est appelé « dilatation des durées ».

$$\Delta t_{\text{mesurée}} = \frac{\Delta t_{\text{propre}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

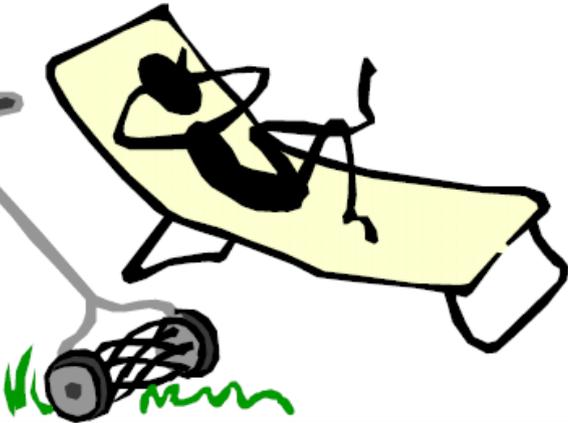
$$\Delta t_{\text{mesurée}} > \Delta t_{\text{propre}}$$

■ Prolongements

- ↳ Dans la situation proposée, est-il pertinent de prendre en compte le caractère relatif du temps ?
- ↳ Dans quelles situations, est-il pertinent de prendre en compte le caractère relatif du temps ?

Calculer le facteur gamma : γ dans les 5 cas suivants :

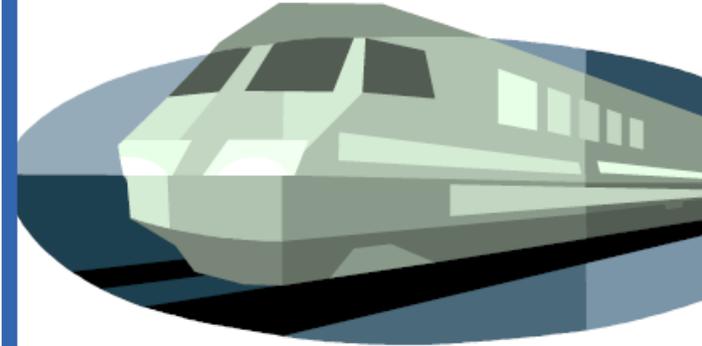
Au repos $v = 0$



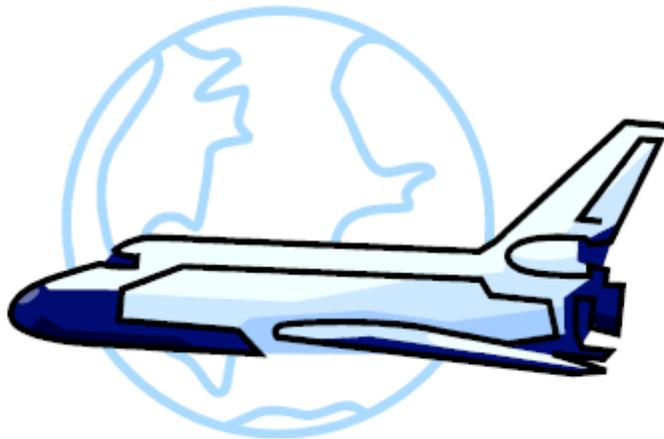
Vélo $v = 20 \text{ km/h}$



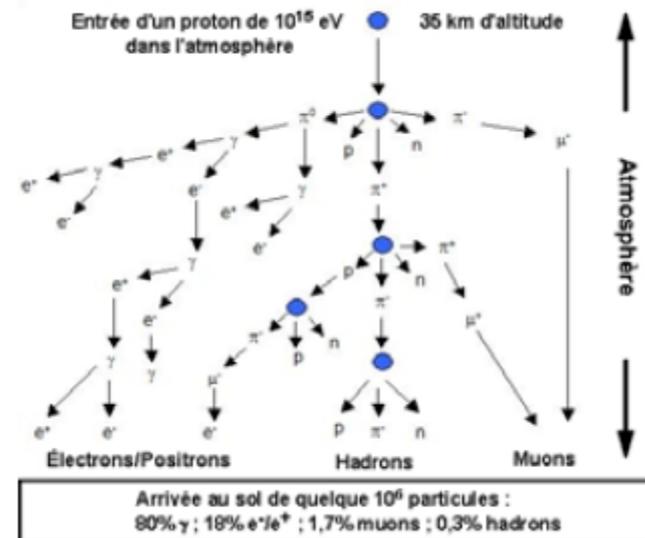
TGV $v = 300 \text{ km/h}$



Navette spatiale $v = 7,7 \text{ km/s}$



Muons cosmiques : $v = 0,993c$



Exemple 1:

On donne deux durées de vie pour une même particule : $1,2 \times 10^{-8}$ s et $6,0 \times 10^{-8}$ s.

1. Laquelle correspond à la durée de vie propre de la particule ?
2. Calculer la vitesse de la particule.

Exemple 2:

Dans un accélérateur de particules, une particule se déplace à la vitesse $v_1 = 0,98.c$. Les scientifiques mesurent une durée de vie de $4,5 \times 10^{-10}$ s.

1. Identifier deux référentiels adaptés au problème. Quel est le référentiel propre ?
2. La durée de vie de $4,5 \times 10^{-10}$ s correspond-elle à une durée propre ?
3. Calculer la durée de vie propre de la particule.

III. Etude de la dilatation des durées

1^{er} exemple : expérience de la lanterne sur le mât du bateau.

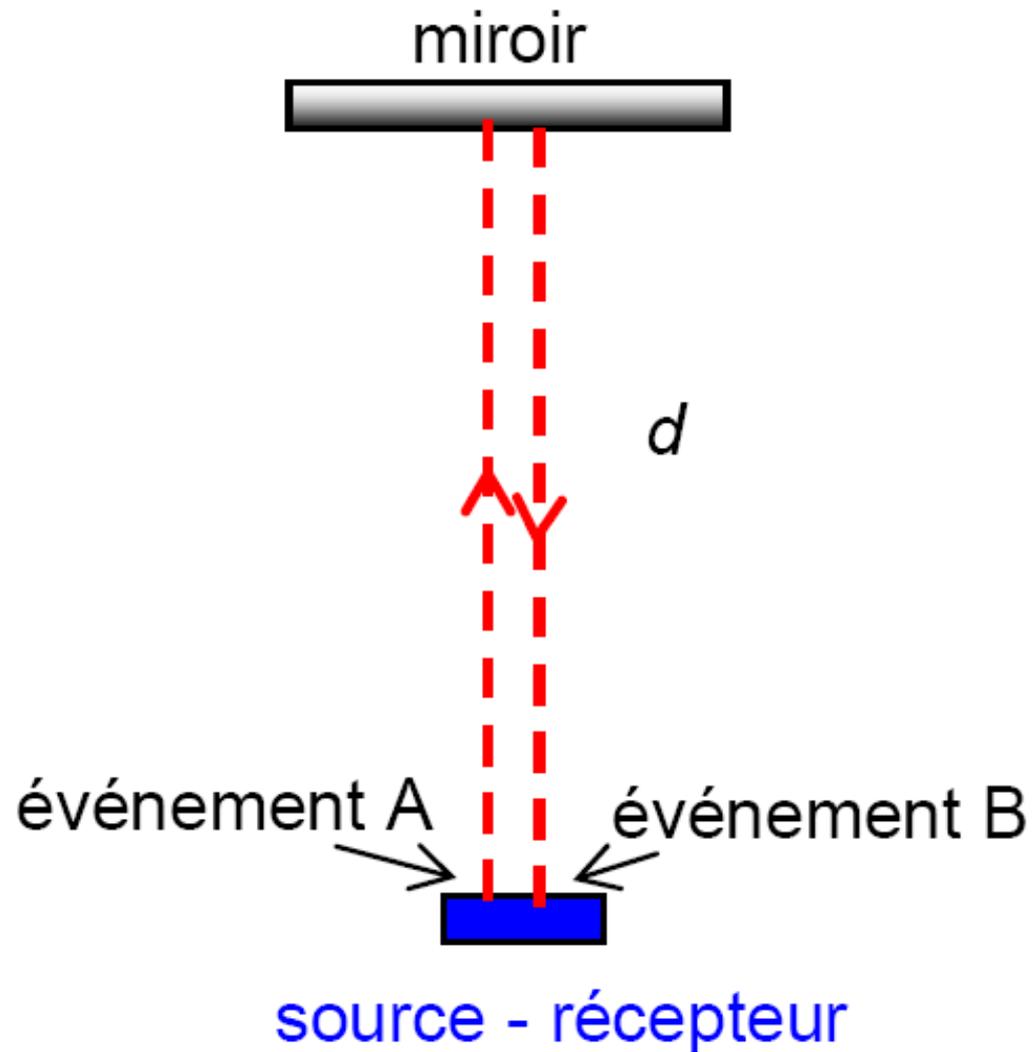
Référentiel lié au bateau

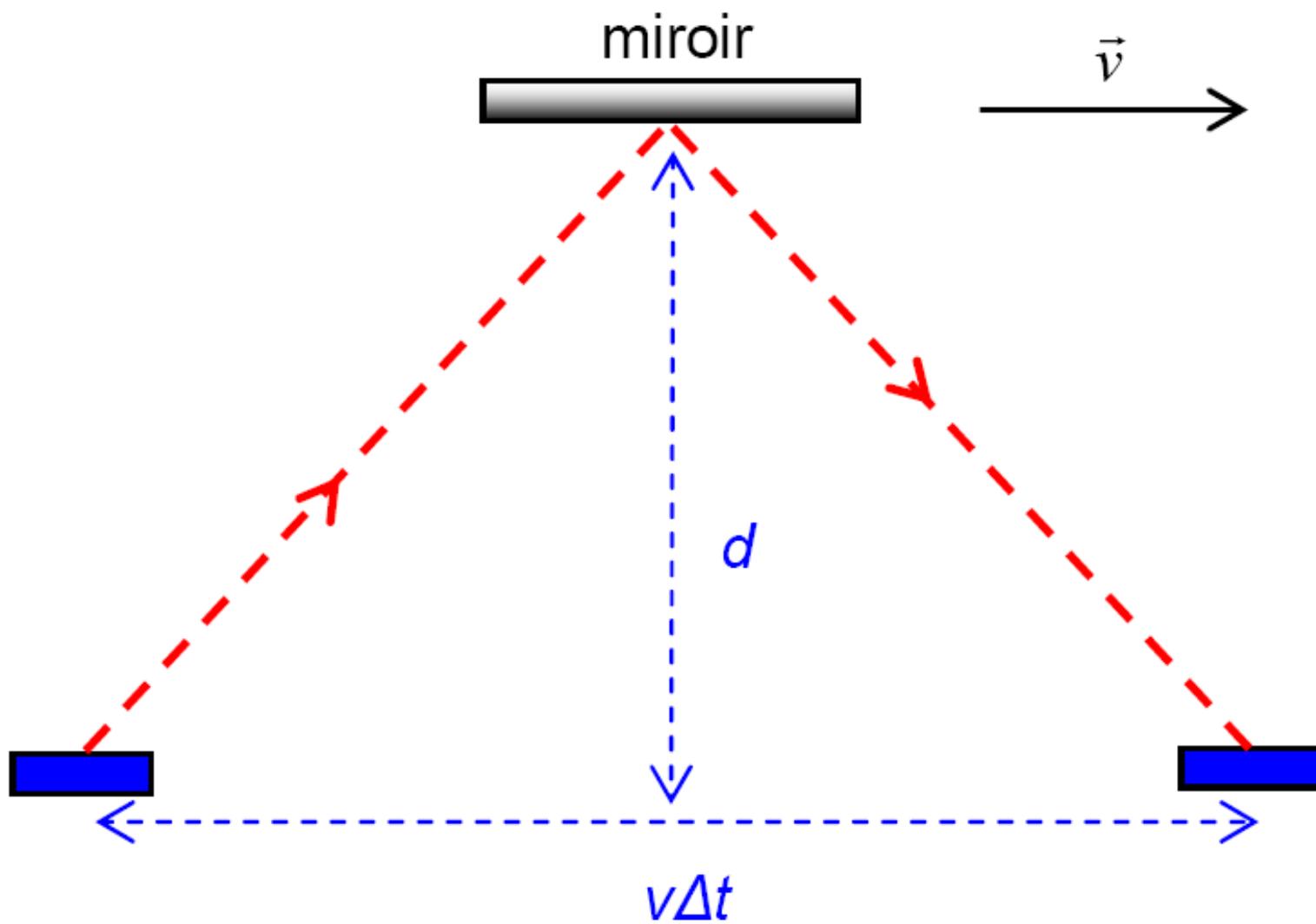


Référentiel lié à la berge



2^{ème} exemple : horloge de lumière



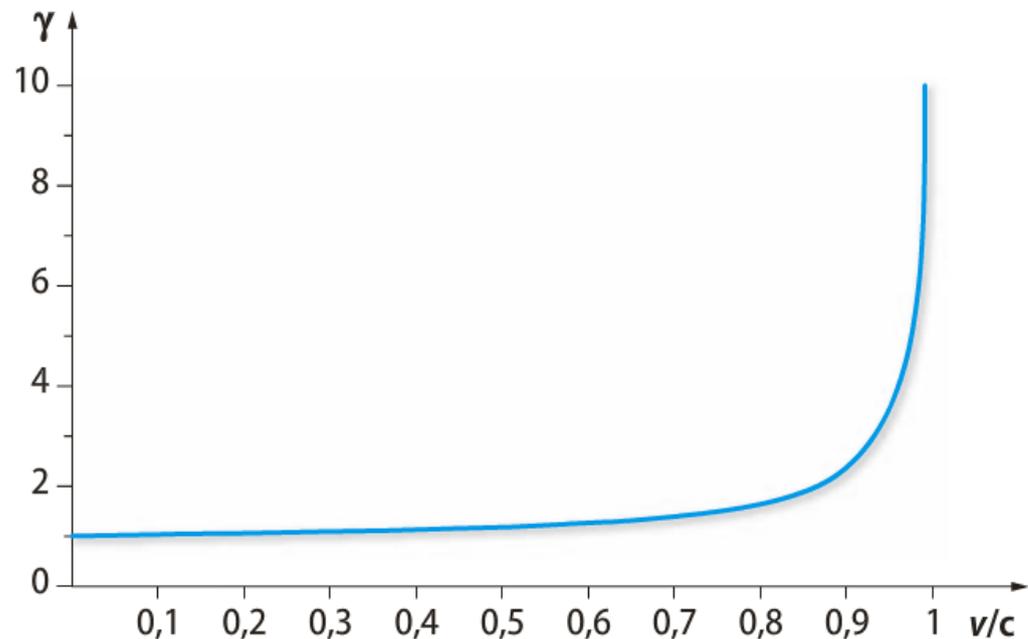


IV. Confirmations expérimentales

20 Le coefficient de Lorentz

On considère un objet en mouvement de translation uniforme à une vitesse v par rapport à un observateur stationnaire.

La représentation graphique qui suit traduit l'évolution du coefficient de Lorentz γ en fonction du rapport v/c .



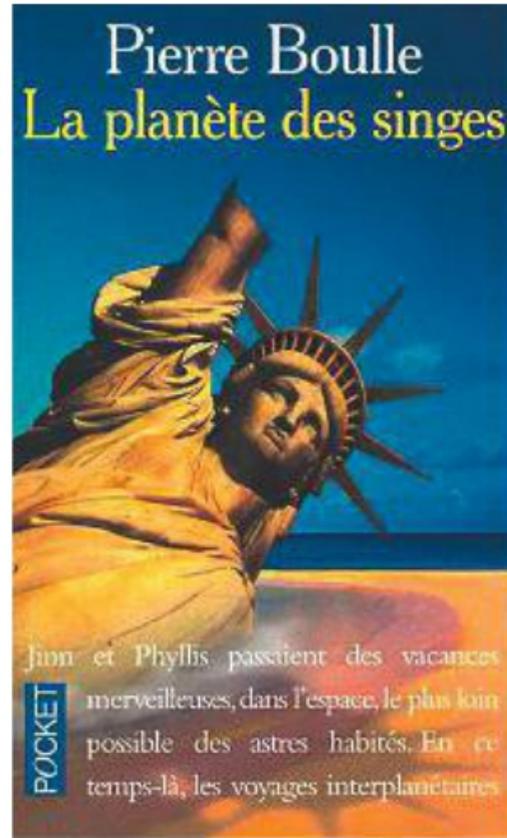
- a.** Que remarque-t-on quand le rapport v/c tend vers 1 ?

b. Que cela traduit-il au niveau de l'horloge associée à l'objet en mouvement ?
- a.** Quelle doit être la valeur du coefficient de Lorentz pour dilater le temps par 2 au niveau de l'horloge associé à l'objet en mouvement ?

b. Quelle est alors la vitesse de l'objet ?

22 « La Planète des singes »

Dans son célèbre roman de science-fiction, *La Planète des singes* (1963), Pierre Boule décrit un vaisseau qui emmène les héros de son histoire vers une étoile du nom de Bételgeuse, située à 300 années de lumière de la Terre. L'auteur écrit : « Grâce à ses fusées perfectionnées [...] 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*. »



À cette vitesse, le voyage ne dure que deux ans pour les passagers du vaisseau.

- 1. a.** Pour une personne restée sur Terre, combien de temps dure le voyage de la Terre à Bételgeuse ?
b. Comment expliquer la différence importante avec la durée perçue par les voyageurs du vaisseau ?
- 2.** Dédurre de cette différence de durée la vitesse du vaisseau, puis la comparer à celle donnée par l'auteur du roman.

26 ★ L'énigme des muons

Les muons sont des particules créées dans la haute atmosphère terrestre à 20 km de hauteur, lors de la collision de protons (provenant du rayonnement cosmique issu de la mort d'une étoile) avec les atomes de l'atmosphère.



Les muons sont très instables et leur durée de vie propre n'est que de $2,2 \mu\text{s}$. Ils se déplacent à une vitesse de $0,9997 c$, proche donc de celle la lumière.

- 1.** En raisonnant en physique classique, c'est-à-dire sans tenir compte de la relativité, montrer que la distance parcourue par les muons ne devrait être que de quelques centaines de mètres. Pourtant, ces muons peuvent être détectés au niveau du sol.
- 2.** En raisonnant en physique relativiste :
 - a.** déterminer la valeur du coefficient de Lorentz ;
 - b.** en déduire la durée de vie d'un muon mesurée par un observateur terrestre ;
 - c.** justifier que les muons atteignent effectivement le sol.

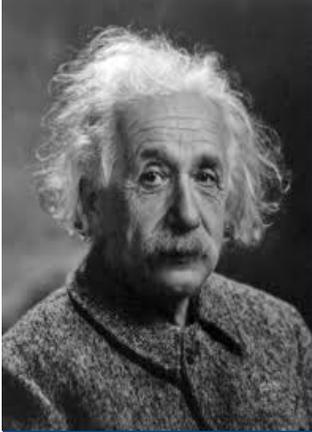
16 Voyage vers l'étoile la plus proche

L'étoile la plus proche de la Terre, après le Soleil, est Proxima du Centaure, qui se trouve à 4,2 années de lumière de la Terre. On admet qu'il soit possible de concevoir un vaisseau spatial voyageant à une vitesse de $0,80c$ pour effectuer le trajet vers cette étoile.

Donnée. L'année de lumière est la distance parcourue par la lumière en un an.

1. Quelle serait la durée du voyage pour un observateur resté sur Terre ?
2. **a.** Quelle serait la durée du voyage pour les passagers ?
b. Que faudrait-il faire, en théorie, pour diviser par 2 la durée du voyage pour les passagers ?

Chap. 10



Temps et relativité restreinte

Albert Einstein né le 14 mars 1879 à Ulm, Wurtemberg, et mort le 18 avril 1955 à Princeton, New Jersey est un physicien théoricien qui fut successivement allemand, puis apatride (1896), suisse (1901), et enfin sous la double nationalité helvético-américaine (1940)¹.

Il publie sa théorie de la relativité restreinte en 1905, et une théorie de la gravitation dite relativité générale en 1915. Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et de la cosmologie, et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique². Son travail est notamment connu du grand public pour l'équation $E=mc^2$, qui établit une équivalence entre la matière et l'énergie d'un système.

I. Etude de documents

Voir l'extrait de « La magie du cosmos »

Film environ 12 minutes

Lorsque deux personnes sont immobiles, elles ont le même temps.

Lorsqu'une des personnes se déplace, l'autre la voit bouger au ralenti : c'est la dilatation du temps.

Ccl : la notion de temps est relative. Elle dépend du référentiel dans lequel on se trouve.

II. Notions de relativité restreinte

1. Postulats d'Einstein

2. Définition

1. Postulats :

Les lois de la physique s'écrivent de la même façon dans tous les référentiels galiléens.

La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur c quelles que soient les circonstances (mouvement, observateur).

2. Définitions :

Le fait que le temps est une notion relative introduit de nouvelles notions :

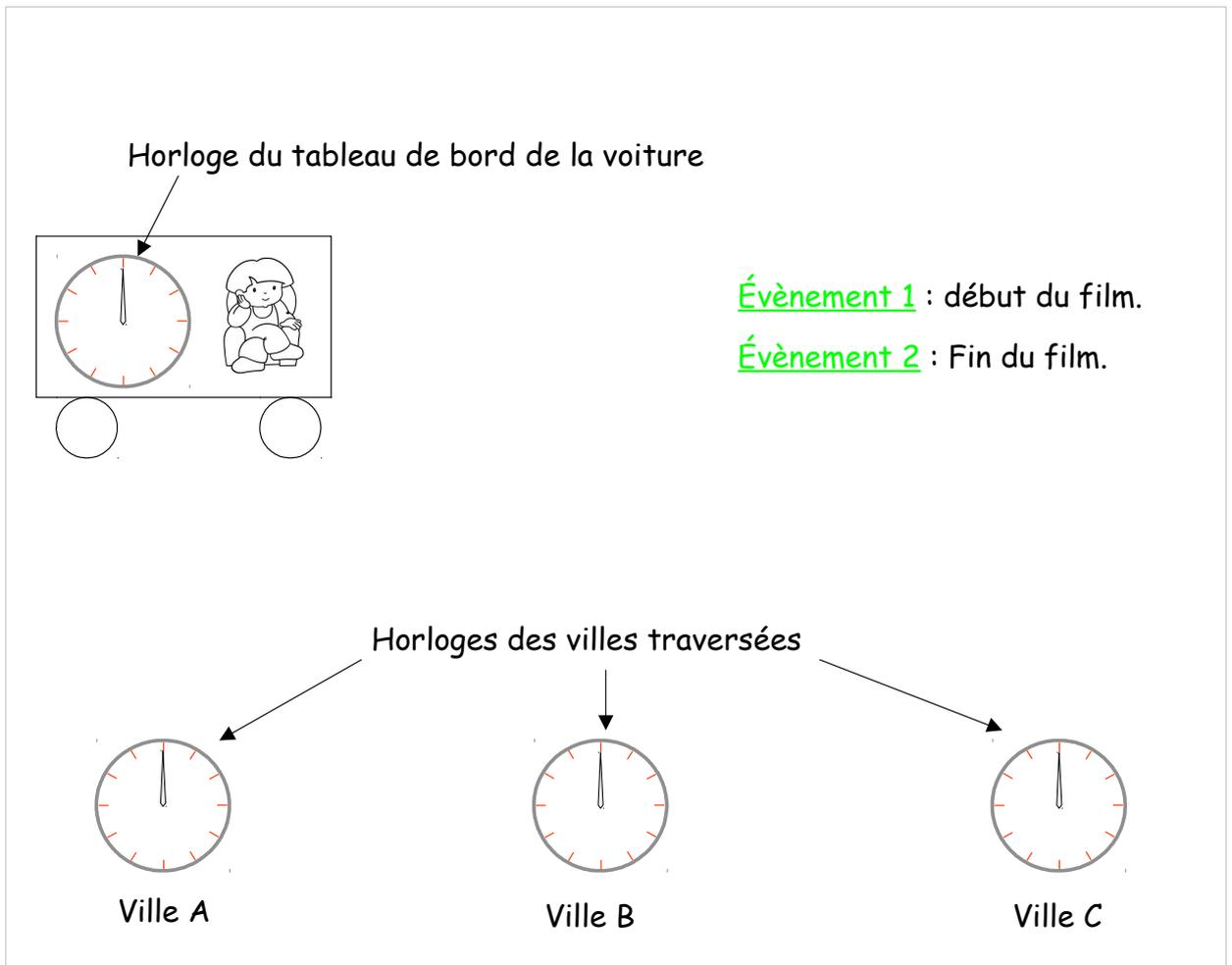
- La notion d'événement
- La notion de temps propre
- La dilatation des durées

Pour introduire et illustrer ces notions de façon très qualitative et introduire progressivement le vocabulaire, on a imaginé la situation suivante.....

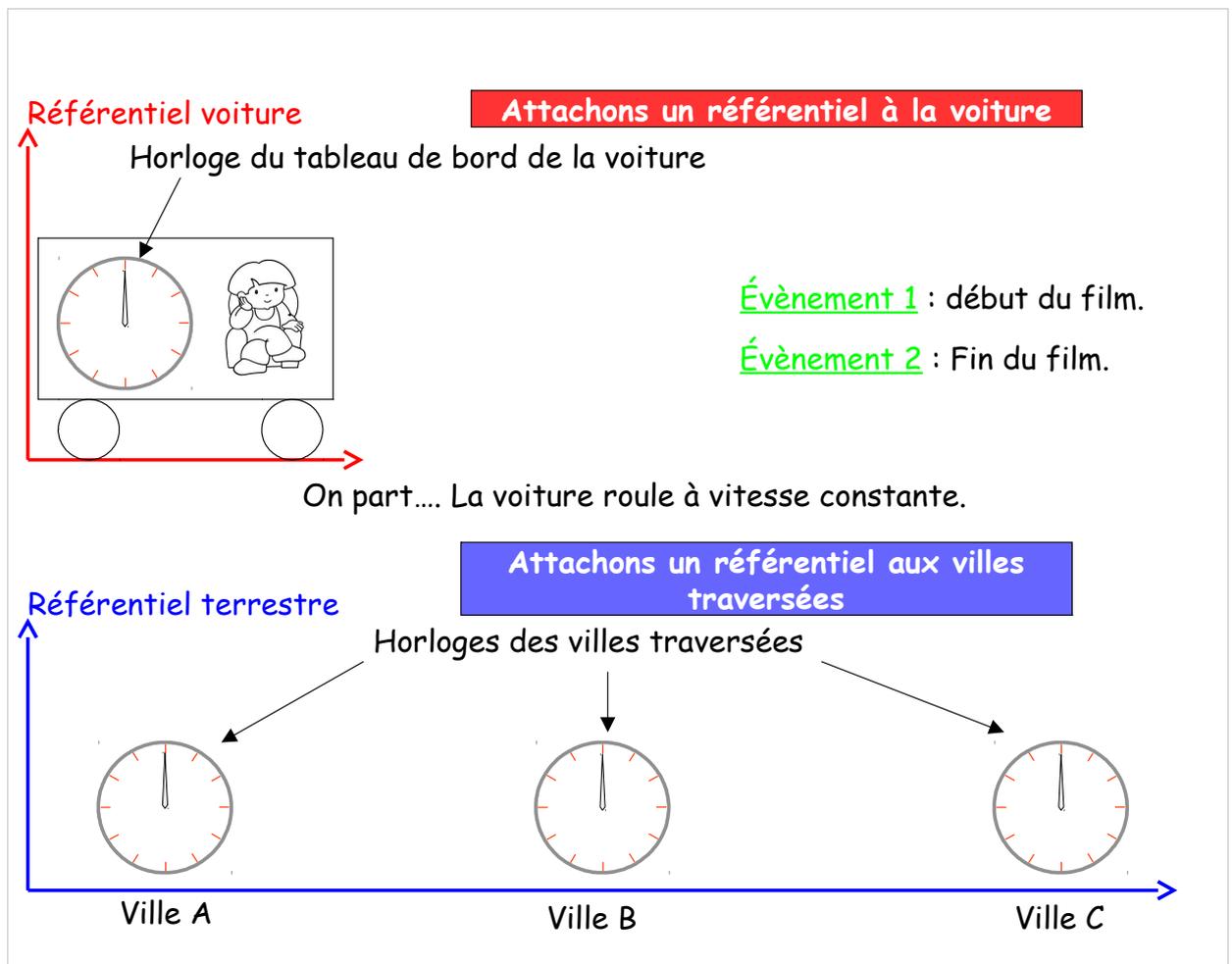
Un enfant a acheté un film pour le regarder pendant un trajet en voiture.
Sur la jaquette, il est indiqué : « durée du film : 1 heure ».

Le « contrat » parents-enfant : le voyage commence au début du film et on fera une pause à la fin du film.

*Source : <http://slideplayer.fr/user/1165566/>
Alexandrie Prat*



Un événement est un phénomène qui se produit en un point de l'espace à un instant unique dans le temps.



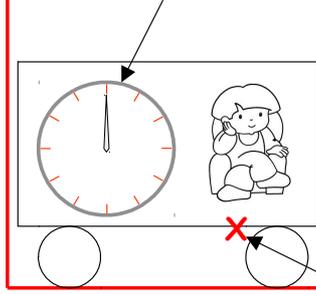
Un référentiel est galiléen s'il est en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel galiléen.

Évènement 1 : début du film.

Évènement 2 : Fin du film.

Référentiel voiture

Horloge du tableau de bord de la voiture

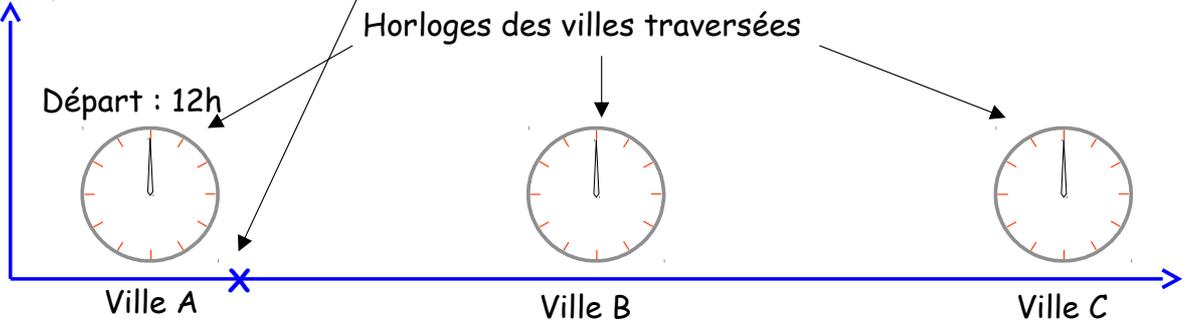


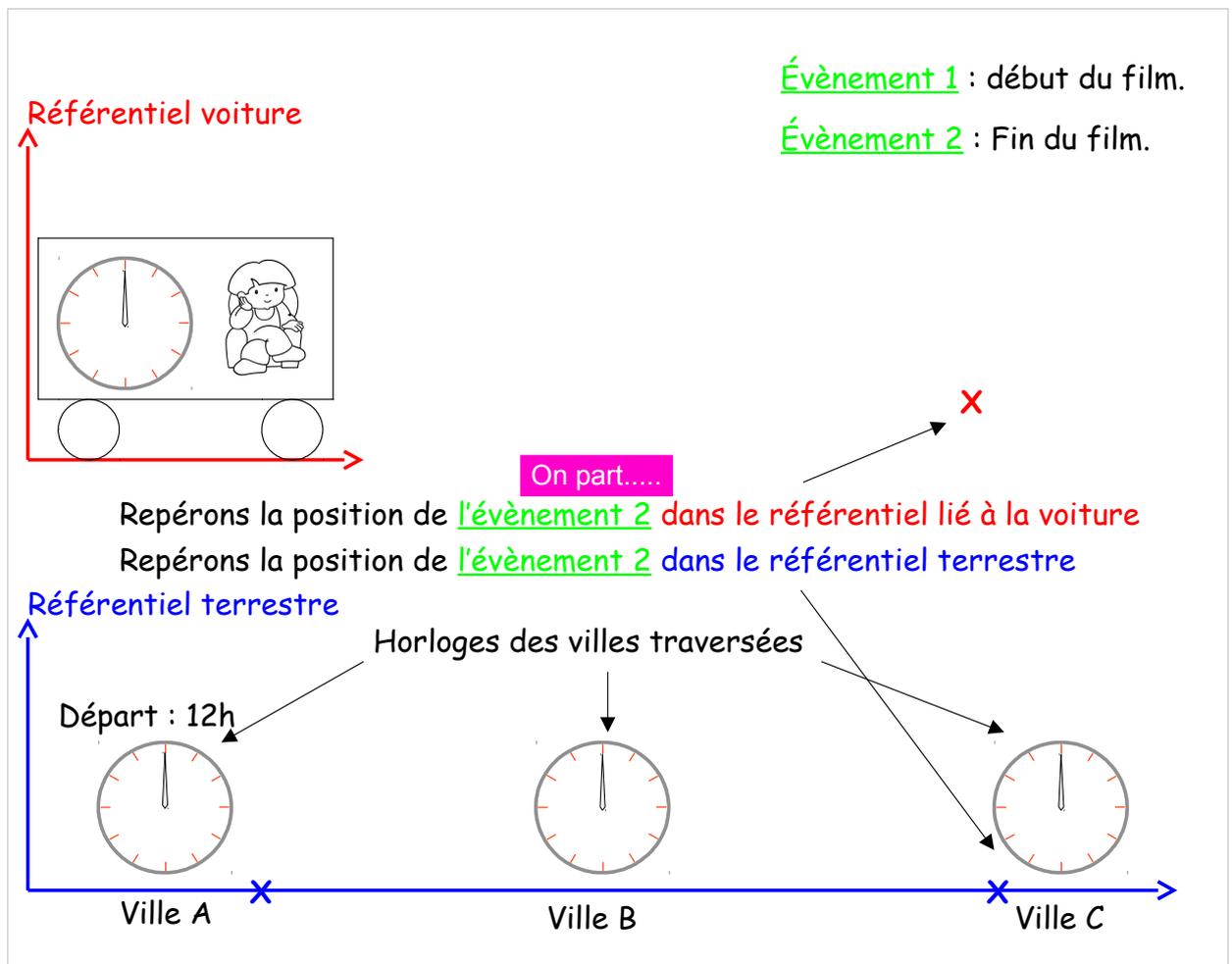
Repérons la position de l'évènement 1 dans le référentiel lié à la voiture

Repérons la position de l'évènement 1 dans le référentiel terrestre

Référentiel terrestre

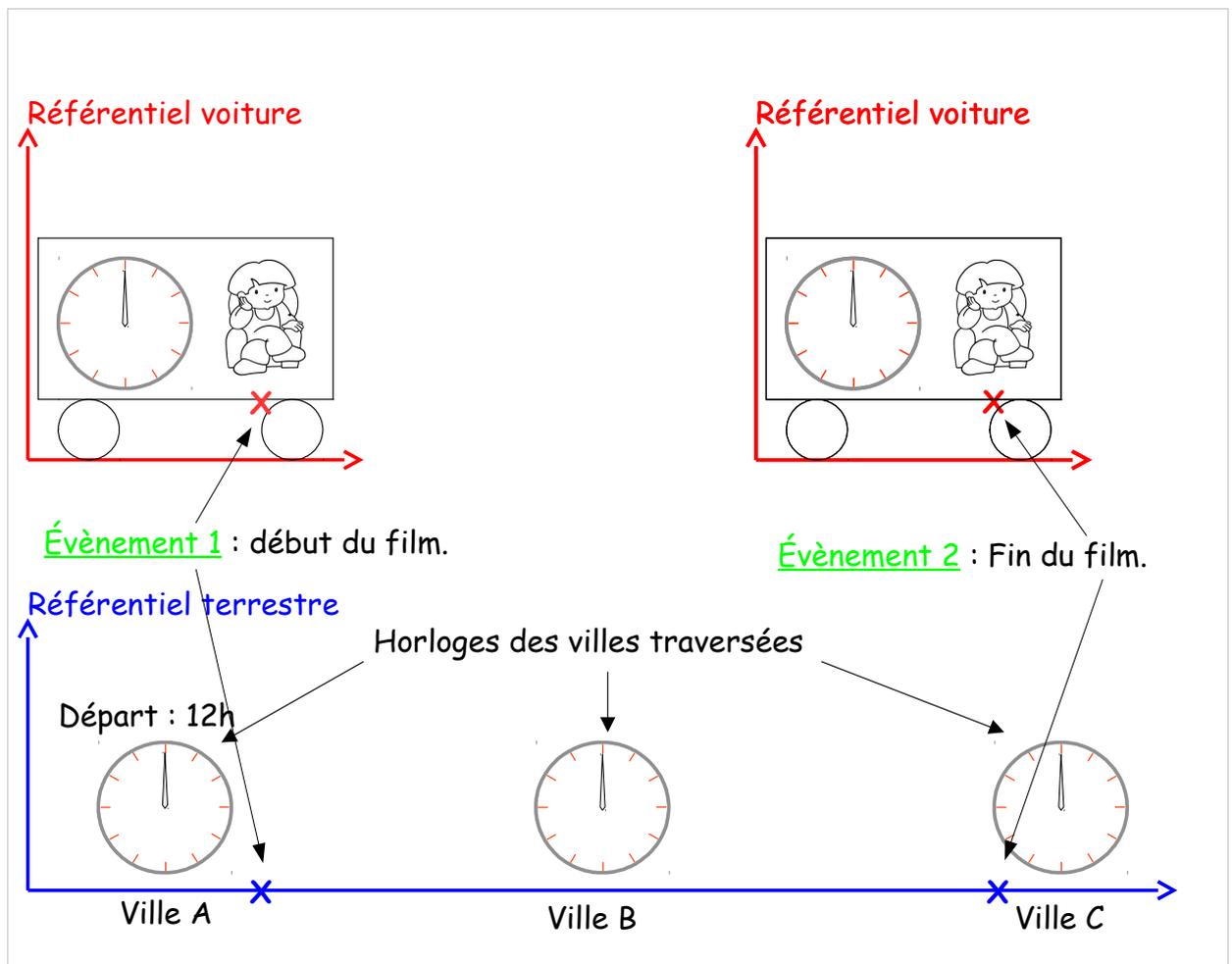
Horloges des villes traversées





Dans le référentiel de la voiture : les deux événements ont lieu au même point du référentiel : c'est un référentiel propre.

Dans le référentiel terrestre, les deux événements ont lieu à de endroits différents : c'est un référentiel impropre.



Dans le référentiel propre, la durée est mesurée au même endroit : c'est la durée propre : Δt_p .

Dans le référentiel impropre, la durée est mesurée à des endroits différents : c'est la durée impropre : Δt_i , parfois on l'appelle aussi la durée mesurée : Δt_m .

Elle est toujours supérieure à la durée propre : c'est le phénomène de dilatation des durées.

→ Ce phénomène est appelé « dilatation des durées ».

$$\Delta t_{\text{mesurée}} = \frac{\Delta t_{\text{propre}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$\underline{\Delta t_{\text{mesurée}} > \Delta t_{\text{propre}}}$$

▪ *Prolongements*

↳ Dans la situation proposée, est-il pertinent de prendre en compte le caractère relatif du temps ?

↳ Dans quelles situations, est-il pertinent de prendre en compte le caractère relatif du temps ?

On appelle facteur gamma :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

On a donc : $\Delta t_m = \gamma \times \Delta t_p$

c est une vitesse limite donc :

$$v < c$$
$$1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 < 1$$
$$\gamma > 1$$

Calculer le facteur gamma : γ dans les 5 cas suivants :

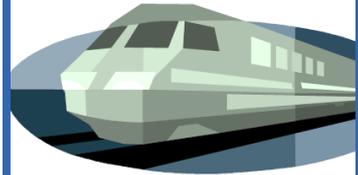
Au repos $v = 0$



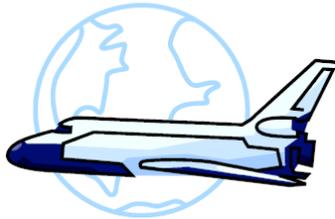
Vélo $v = 20 \text{ km/h}$



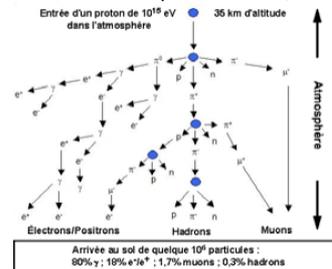
TGV $v = 300 \text{ km/h}$



Navette spatiale $v = 7,7 \text{ km/s}$



Muons cosmiques : $v = 0,993c$



Exemple 1:

On donne deux durées de vie pour une même particule : $1,2 \times 10^{-8} \text{ s}$ et $6,0 \times 10^{-8} \text{ s}$.

1. Laquelle correspond à la durée de vie propre de la particule ?
2. Calculer la vitesse de la particule.

Exemple 2:

Dans un accélérateur de particules, une particule se déplace à la vitesse $v_1 = 0,98.c$. Les scientifiques mesurent une durée de vie de $4,5 \times 10^{-10}$ s.

1. Identifier deux référentiels adaptés au problème. Quel est le référentiel propre ?
2. La durée de vie de $4,5 \times 10^{-10}$ s correspond-elle à une durée propre ?
3. Calculer la durée de vie propre de la particule.

III. Etude de la dilatation des durées

1^{er} exemple : expérience de la lanterne sur le mât du bateau.

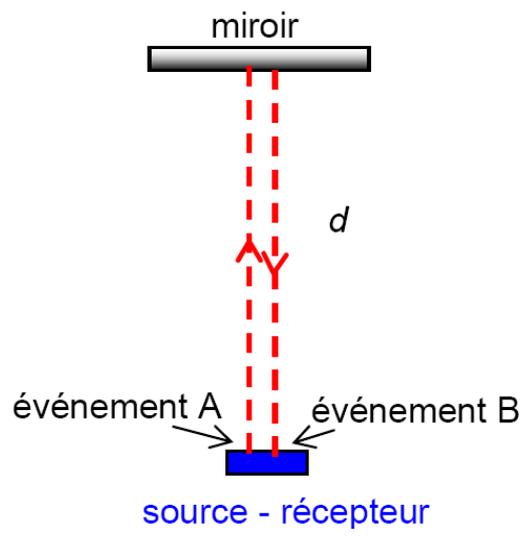
Référentiel lié au bateau

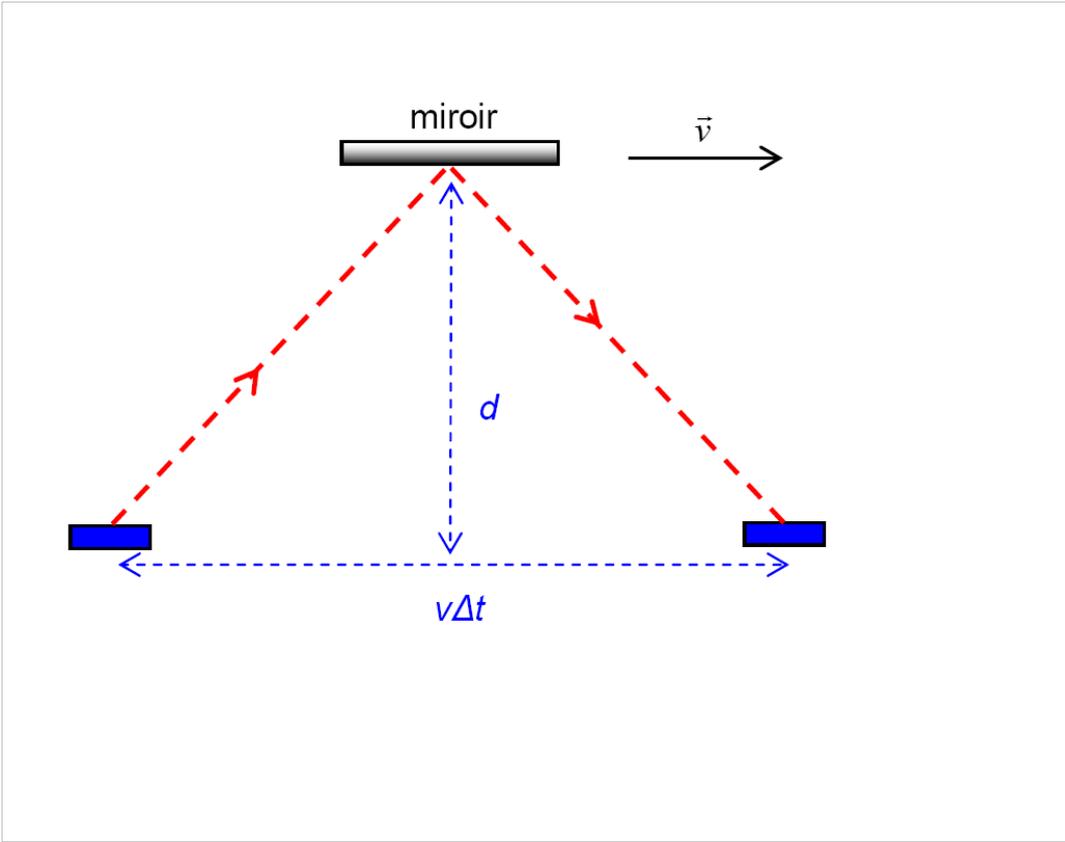


Référentiel lié à la berge



2^{ème} exemple : horloge de lumière





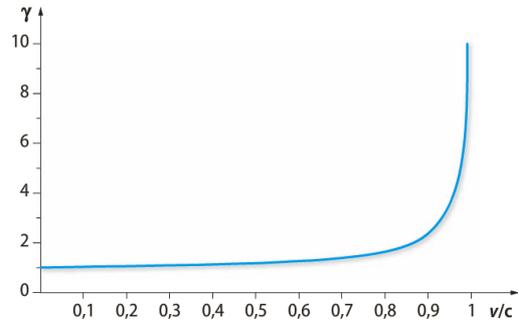
IV. Confirmations expérimentales

- La dilatation du temps a été vérifiée expérimentalement à l'aide d'horloges atomiques embarquées dans des avions. ! Lorsque la vitesse est $\ll c$, il faut des horloges de très grande précision pour mesurer la dilatation du temps.
- Pour les particules de vitesse proche de c (muons, particules dans les accélérateurs), on mesure une durée de vie supérieure à leur durée de vie propre.
- Pour les mesures avec un GPS, la précision est telle qu'il faut prendre en compte les effets de la relativité.

20 Le coefficient de Lorentz

On considère un objet en mouvement de translation uniforme à une vitesse v par rapport à un observateur stationnaire.

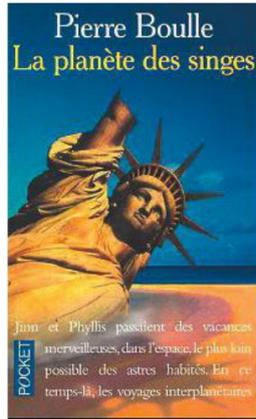
La représentation graphique qui suit traduit l'évolution du coefficient de Lorentz γ en fonction du rapport v/c .



1. **a.** Que remarque-t-on quand le rapport v/c tend vers 1 ?
b. Que cela traduit-il au niveau de l'horloge associée à l'objet en mouvement ?
2. **a.** Quelle doit être la valeur du coefficient de Lorentz pour dilater le temps par 2 au niveau de l'horloge associée à l'objet en mouvement ?
b. Quelle est alors la vitesse de l'objet ?

22 « La Planète des singes »

Dans son célèbre roman de science-fiction, *La Planète des singes* (1963), Pierre Boule décrit un vaisseau qui emmène les héros de son histoire vers une étoile du nom de Bételgeuse, située à 300 années de lumière de la Terre. L'auteur écrit : « Grâce à ses fusées perfectionnées [...] 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 ϵ . »



À cette vitesse, le voyage ne dure que deux ans pour les passagers du vaisseau.

- a.** Pour une personne restée sur Terre, combien de temps dure le voyage de la Terre à Bételgeuse ?
b. Comment expliquer la différence importante avec la durée perçue par les voyageurs du vaisseau ?
- 2.** Dédire de cette différence de durée la vitesse du vaisseau, puis la comparer à celle donnée par l'auteur du roman.

26 ★ L'énigme des muons

Les muons sont des particules créées dans la haute atmosphère terrestre à 20 km de hauteur, lors de la collision de protons (provenant du rayonnement cosmique issu de la mort d'une étoile) avec les atomes de l'atmosphère.



Les muons sont très instables et leur durée de vie propre n'est que de $2,2 \mu\text{s}$. Ils se déplacent à une vitesse de $0,9997 c$, proche donc de celle la lumière.

1. En raisonnant en physique classique, c'est-à-dire sans tenir compte de la relativité, montrer que la distance parcourue par les muons ne devrait être que de quelques centaines de mètres. Pourtant, ces muons peuvent être détectés au niveau du sol.
2. En raisonnant en physique relativiste :
 - a. déterminer la valeur du coefficient de Lorentz ;
 - b. en déduire la durée de vie d'un muon mesurée par un observateur terrestre ;
 - c. justifier que les muons atteignent effectivement le sol.

16 Voyage vers l'étoile la plus proche

L'étoile la plus proche de la Terre, après le Soleil, est Proxima du Centaure, qui se trouve à 4,2 années de lumière de la Terre. On admet qu'il soit possible de concevoir un vaisseau spatial voyageant à une vitesse de $0,80c$ pour effectuer le trajet vers cette étoile.

Donnée. L'année de lumière est la distance parcourue par la lumière en un an.

- 1.** Quelle serait la durée du voyage pour un observateur resté sur Terre ?
- 2. a.** Quelle serait la durée du voyage pour les passagers ?
b. Que faudrait-il faire, en théorie, pour diviser par 2 la durée du voyage pour les passagers ?