

# Club sciences

Philippe Ribiere

ribierep@orange.fr

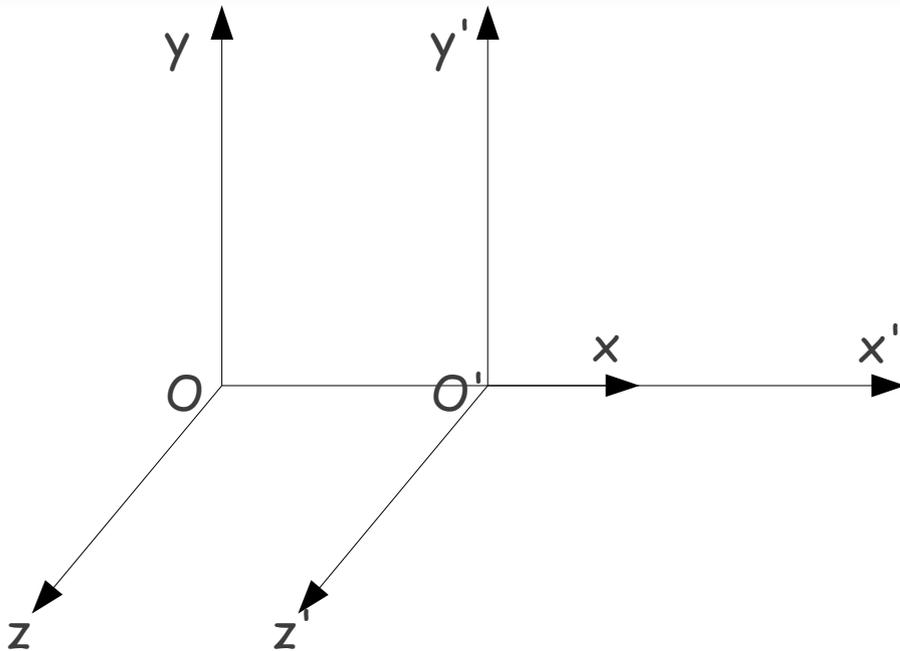
Mardi 22 Janvier et 5 Février 2013

Quelques idées sur ...  
la relativité restreinte 2

# La relativité restreinte

## 1. La relativité avant Einstein, relativité galiléenne.

Changement de référentiel galiléen, transformation de Galilée



$$t' = t$$

$$x' = x - u.t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$v'_x = v_x - u$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

# La relativité restreinte

## 2. La relativité restreinte d'Einstein, 1905.

Des équations de Maxwell (1864), les physiciens déduisent que la lumière se propage à la vitesse de la lumière

Einstein généralise le principe de relativité de Galilée:

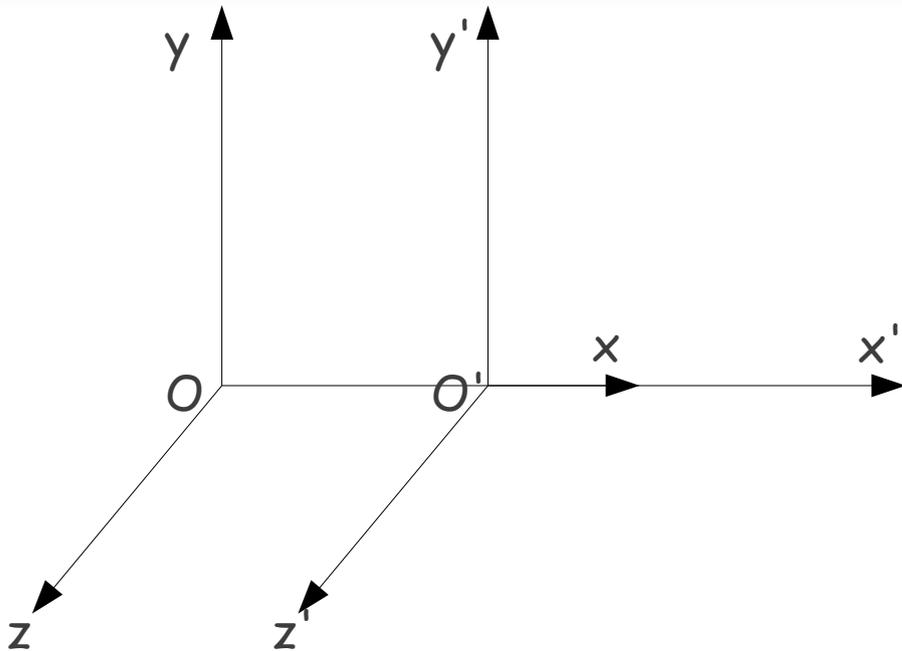
Toutes les lois de la physique ont même formulation dans tous les référentiels galiléens

(Toutes les lois de la physique sont covariantes lors des changements de référentiels galiléens)

# La relativité restreinte

## 2. La relativité restreinte d'Einstein, 1905.

Conséquence: la vitesse de la lumière est  $c$  dans tous les référentiels galiléens.

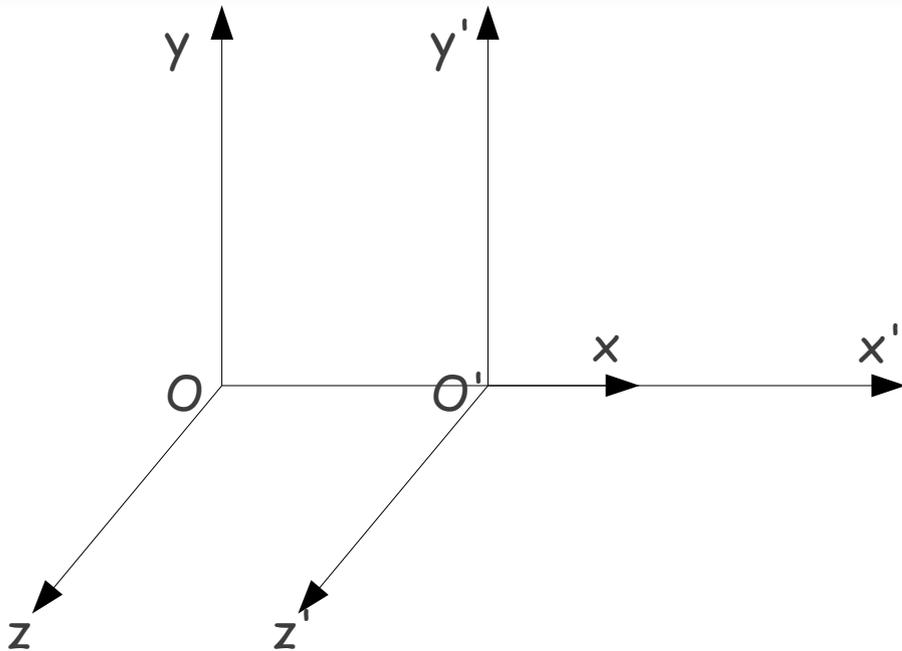


Vitesse de la lumière:  
 $c$  dans  $R$   
 $c$  dans  $R'$

# La relativité restreinte

## 2. La relativité restreinte d'Einstein, 1905.

Conséquence: la vitesse de la lumière est  $c$  dans tous les référentiels galiléens.



Vitesse de la lumière:  
 $c$  dans  $R$   
 $c$  dans  $R'$

Et non pas  $c' = c - u$

# La relativité restreinte

## 2. La relativité restreinte d'Einstein, 1905.

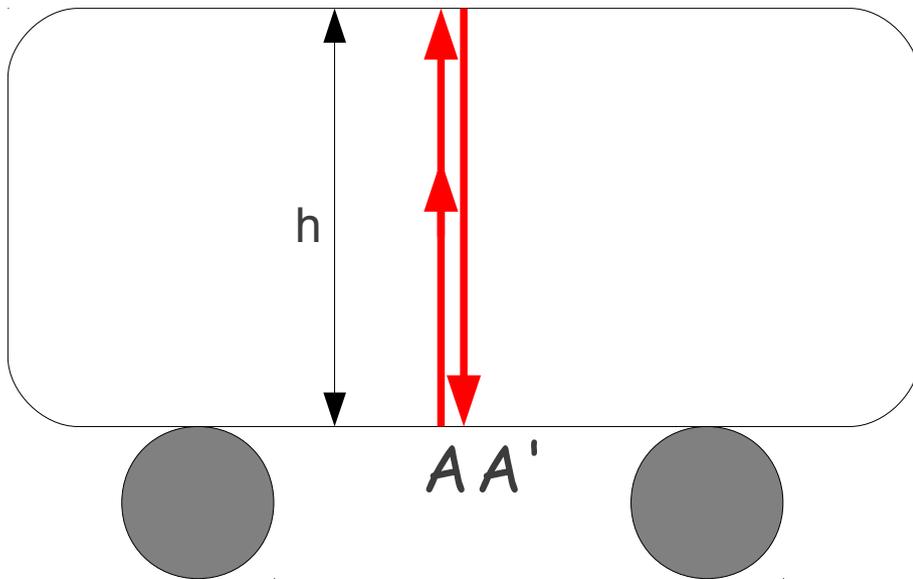
La transformation de Galilée n'est plus vraie.

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du train  $B$  Ref  $R$



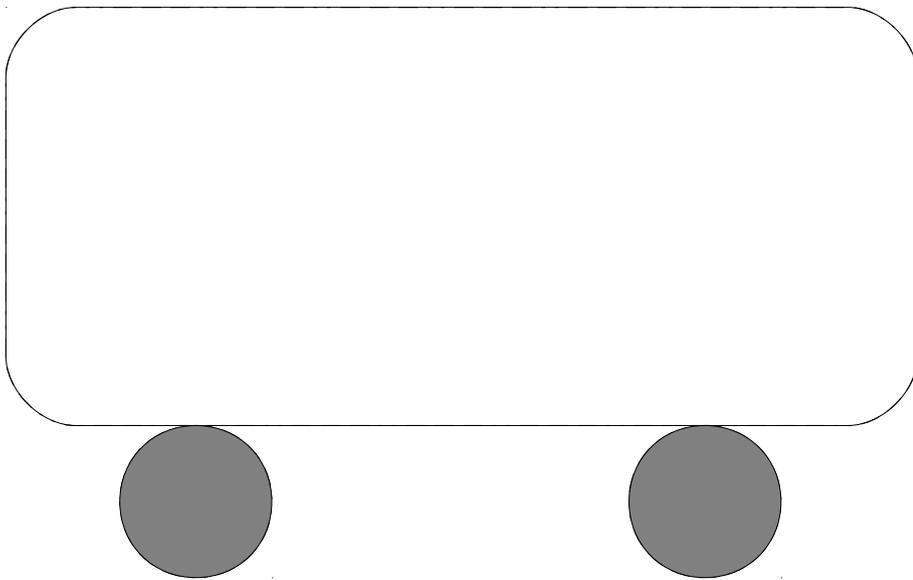
# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du quai

Ref  $R'$



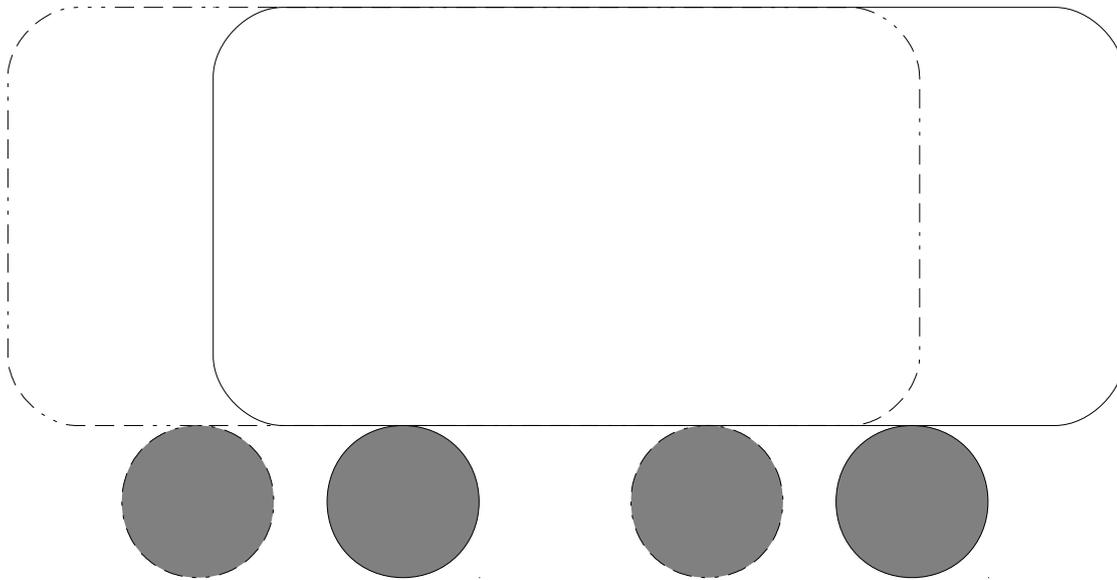
# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du quai

Ref  $R'$



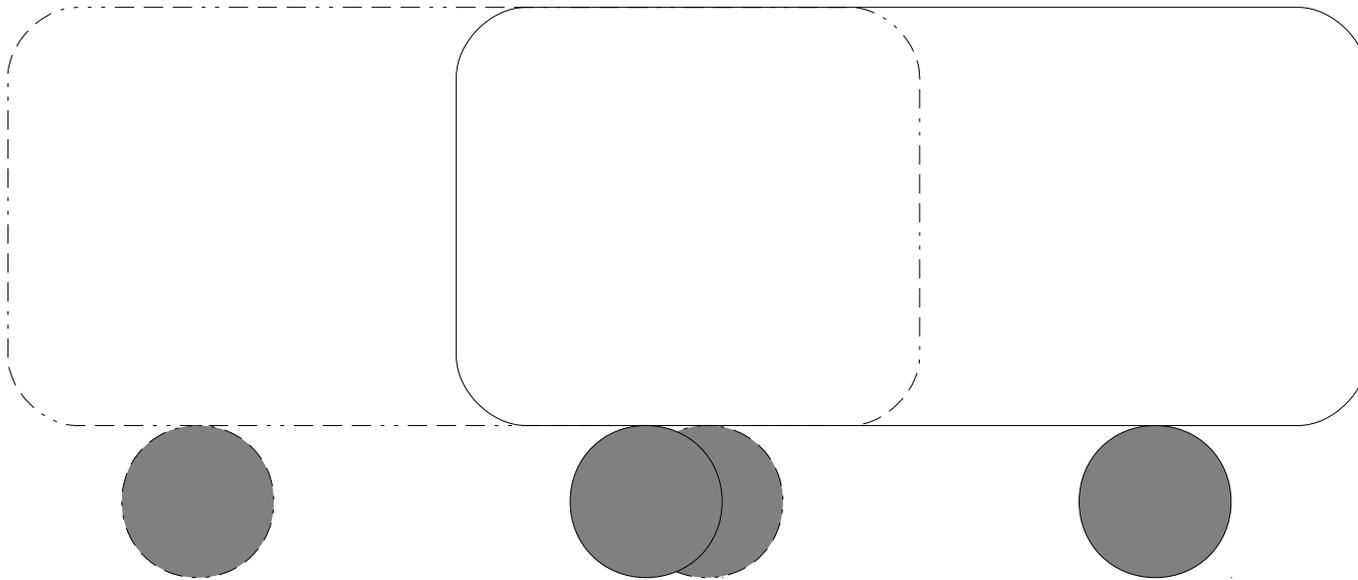
# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du quai

Ref  $R'$



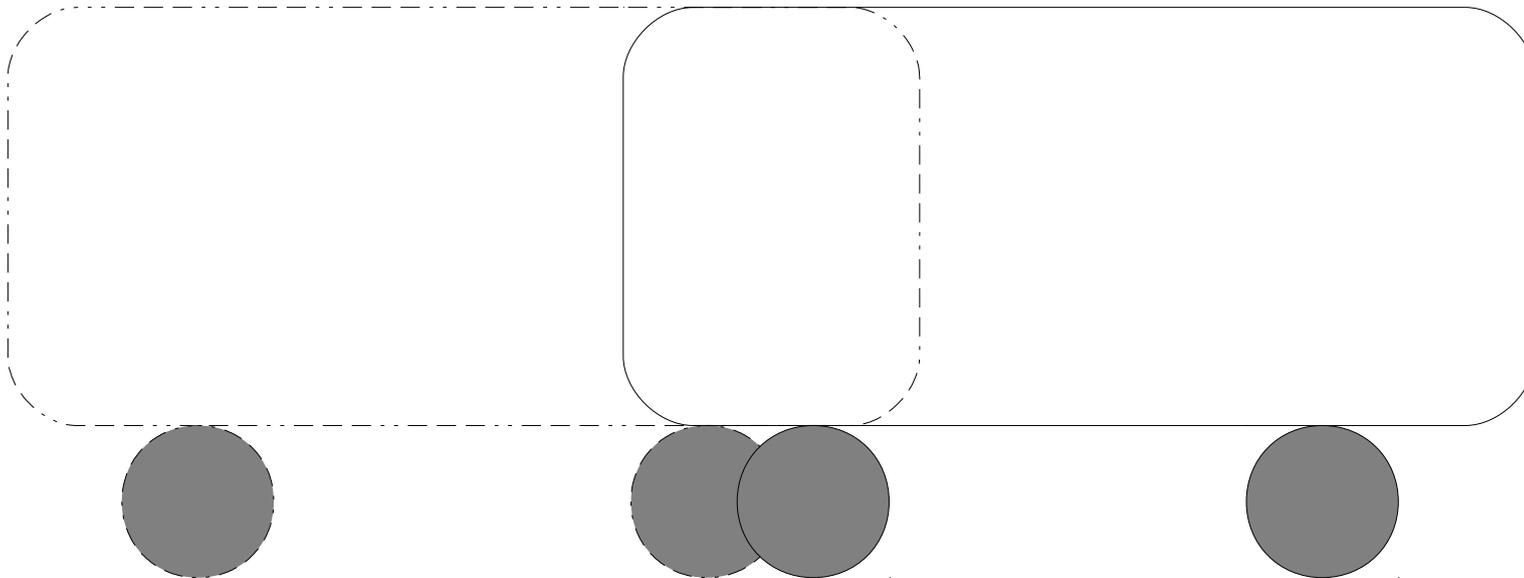
# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du quai

Ref  $R'$



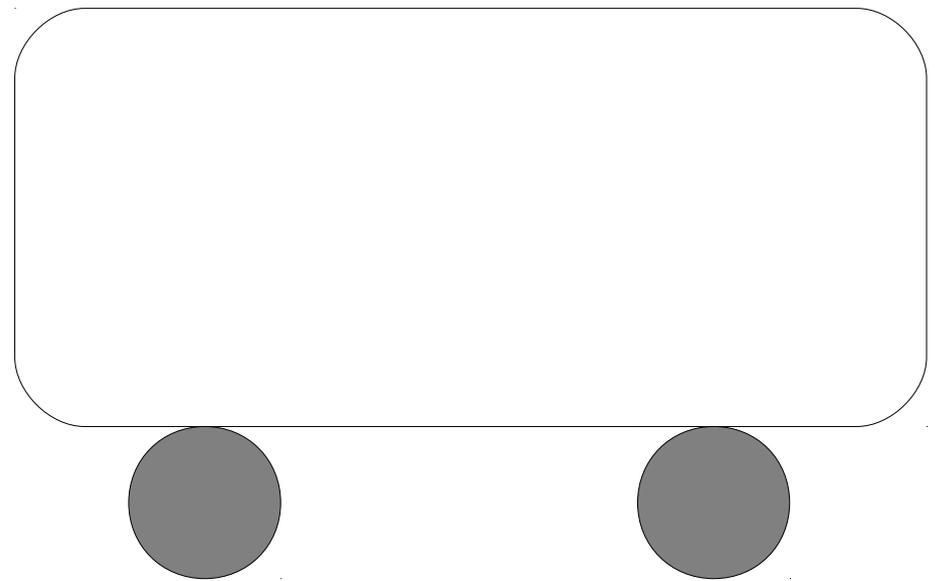
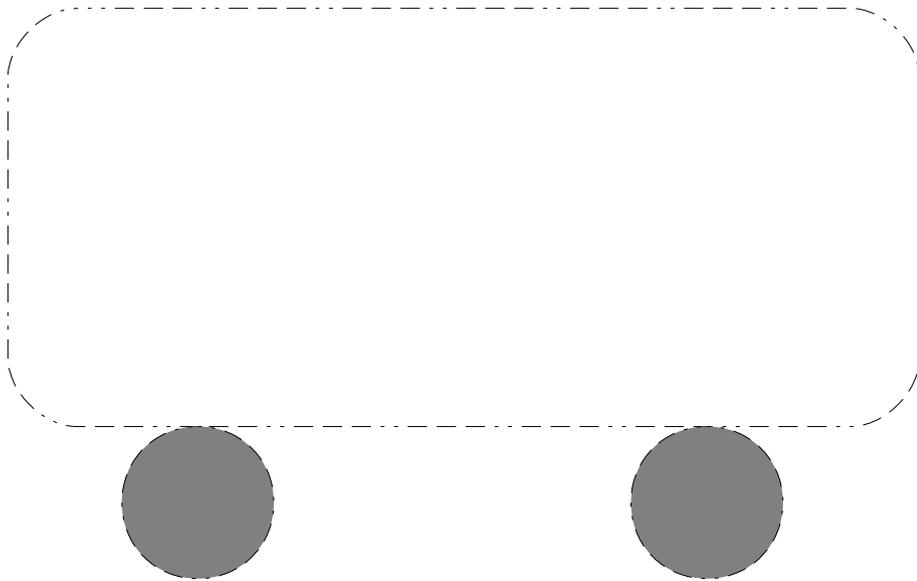
# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du quai

Ref  $R'$



# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

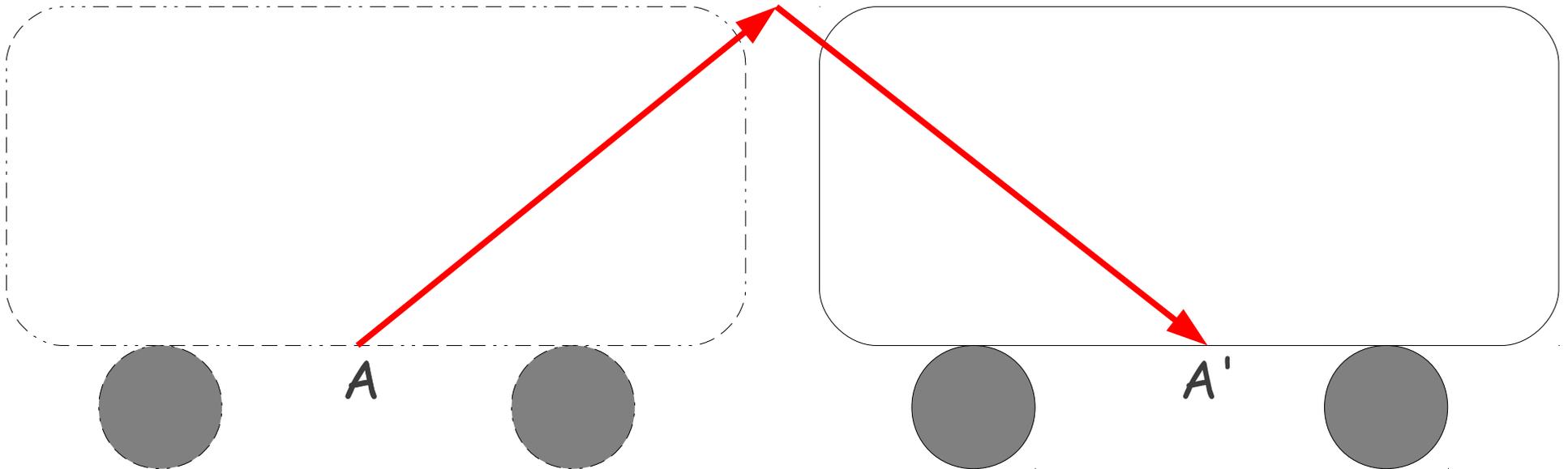
Vue du quai

Ref  $R'$

B

A

A'

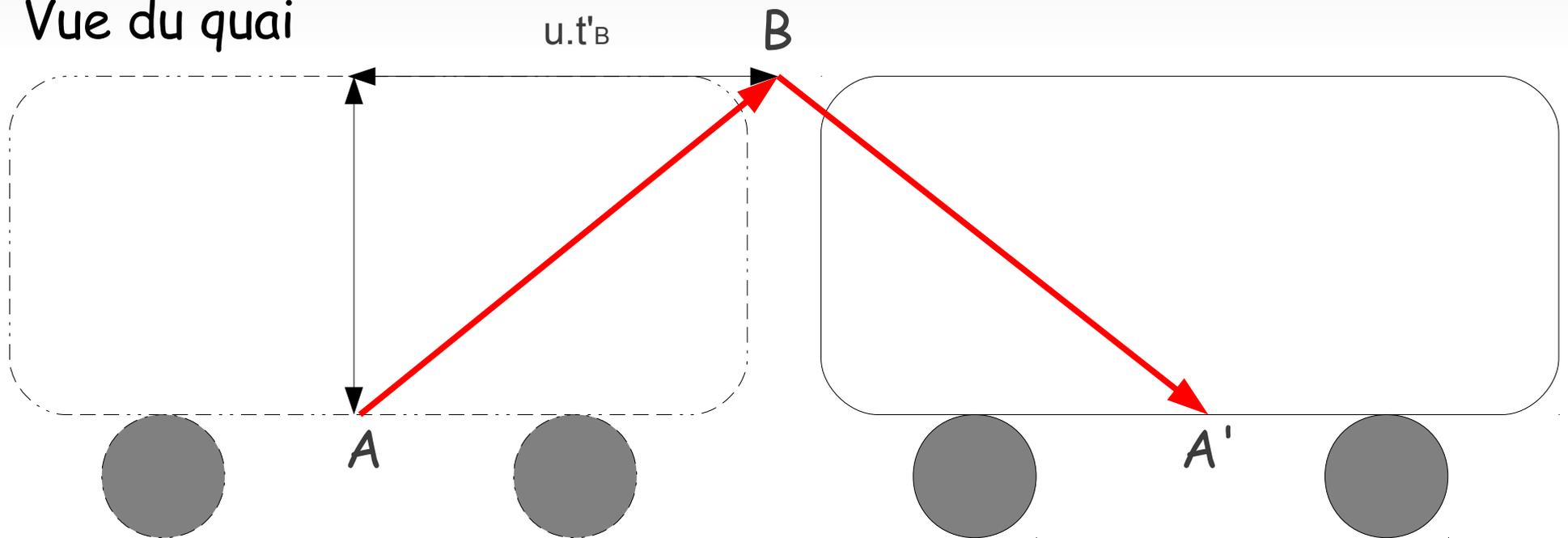


# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

Vue du quai



# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train en translation rectiligne uniforme.

$$t'_{A'} = \gamma \cdot t_A \text{ avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Vue du quai

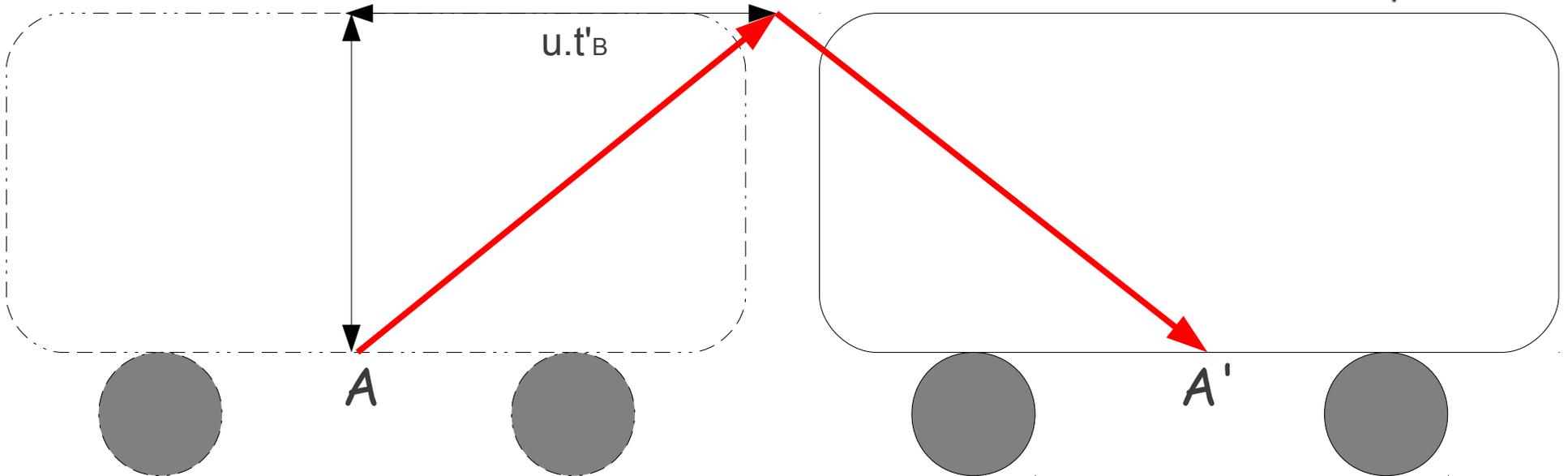
Ref R'

B

$u \cdot t_B$

A

A'



# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train (ref R) en translation rectiligne uniforme par rapport au quai (ref R')

$$t'_{A'} = \gamma \cdot t_A \text{ avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Le temps pour l'observateur sur le quai (dans R') semble s'écouler plus lentement que le temps pour l'observateur dans le train (ref R).

Le temps pour l'observateur sur le quai est dilaté d'un facteur relativiste  $\gamma$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Pourquoi privilégier ce sens d'interprétation?

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Pourquoi privilégier ce sens d'interprétation?

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train (ref R) où les évènements A et A' ont lieu au même endroit ( $x=0$ )

Intervalle de temps  $t_{A'} - t_A$  est le *temps propre*

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Pourquoi privilégier ce sens d'interprétation?

Etude d'une "horloge" lumineuse dans un train (ref R) où les évènements A et A' ont lieu au même endroit ( $x=0$ )

Intervalle de temps  $t_{A'} - t_A$  est le *temps propre*

Dans tous les référentiels R' en translation par rapport à R, le temps semble dilater

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Dans le TGV, Paris La Rochelle, je vieillis de 3h.

Cet intervalle de temps de 3h, en supposant le TGV en translation rectiligne uniforme à la vitesse  $u=100\text{m/s}$ , correspond à un temps de 3h et 1,8ms pour une personne restée à La Rochelle

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Le Muon (charge  $-e$ , masse  $207.m_e$ )

Formé dans les hautes couches de l'atmosphère par interaction avec le rayonnement cosmique, il se déplace à la vitesse de la lumière ( $0,995.c$  soit  $\gamma=10$ ) et est détecté à la surface de la terre.

Durée de vie  $T_0$  en labo de  $2,2.10^{-6} s$

Distance parcourue avant désintégration de  $c.T_0=660m$

???? Comment le détecte-t-on sur terre ???????

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Le Muon (charge  $-e$ , masse  $207.m_e$ )

Formé dans les hautes couches de l'atmosphère par interaction avec le rayonnement cosmique, il se déplace à la vitesse proche de la lumière et est détecté à la surface de la terre.

Durée de vie  $T_0$  en labo (muon immobile) de  $2,2.10^{-6}$  s

Durée de vie du muon mobile dans le référentiel du labo:

$T = \gamma T_0$  et donc la distance parcourue est  $c.T = 6,6$  km

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Le Paradoxe des Jumeaux

Un jumeau fait un voyage spatial (à une vitesse proche de celle de la lumière). Le second jumeau l'attend sur terre.

A son retour, le premier jumeau a moins vieilli que le second

????????????????

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Le Paradoxe des Jumeaux

Un jumeau fait un voyage spatial (à une vitesse proche de celle de la lumière). Le second jumeau l'attend sur terre.

A son retour, le premier jumeau a moins vieilli que le second

Problème mal posé.

Comment revenir tout en restant en translation rectiligne uniforme?

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Le "Paradoxe" du TGV La Rochelle Paris.

Les horloges atomiques transportées doivent être corrigées après leur transport pour éviter toutes les erreurs.

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

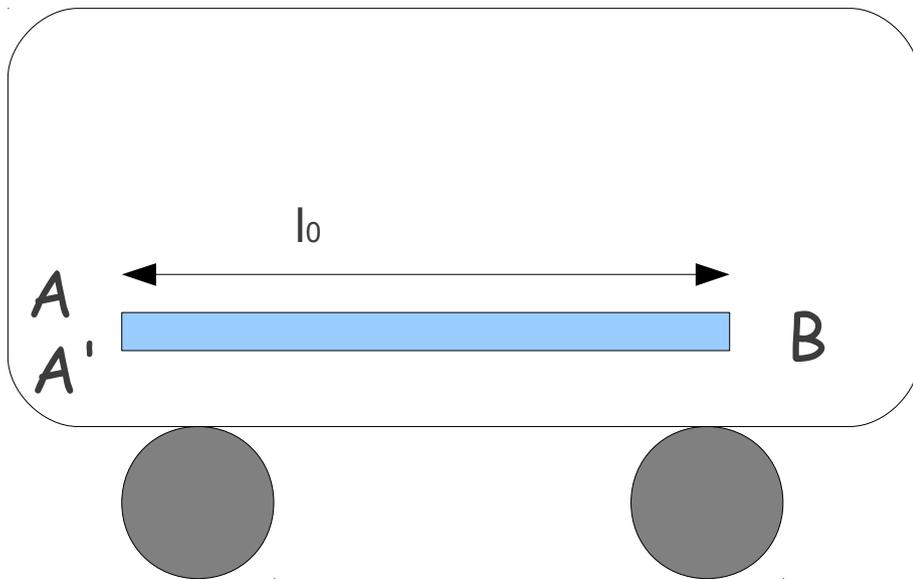
Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Vue du train      Ref R



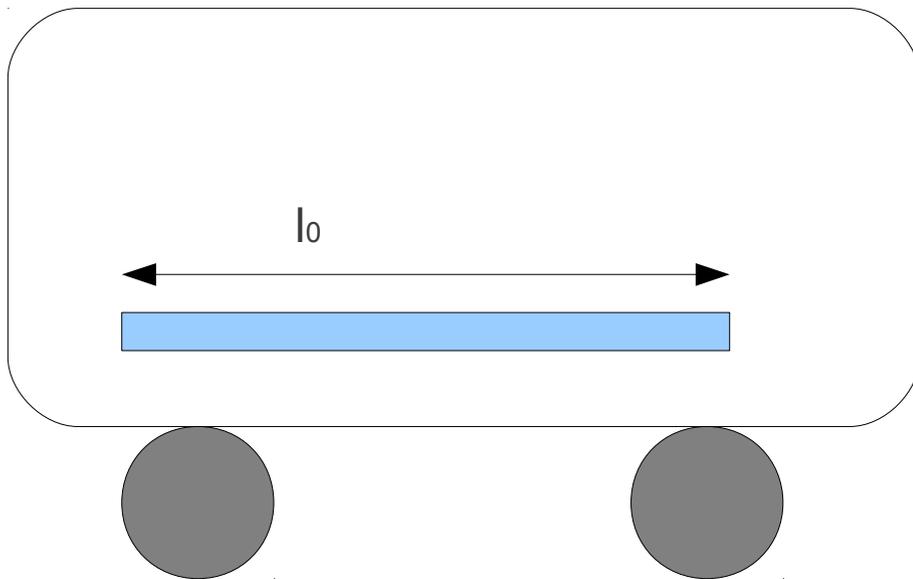
$$\Delta t = \frac{2.l_0}{c}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Vue du quai      Ref R'



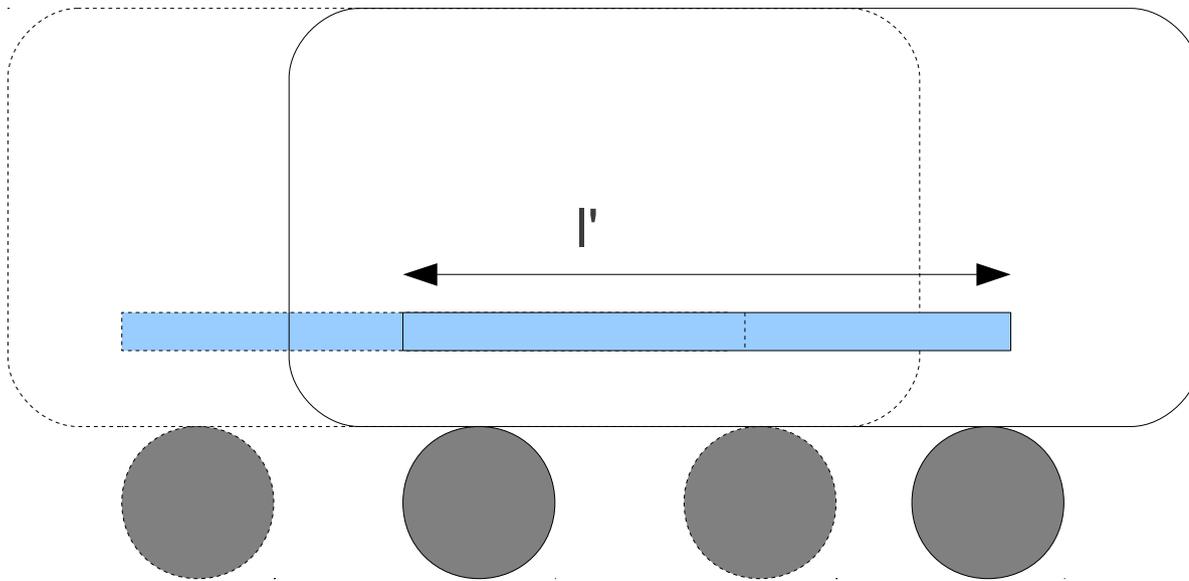
$$\Delta t' = \Delta t'_{\text{aller}} + \Delta t'_{\text{retour}}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Vue du quai      Ref R'



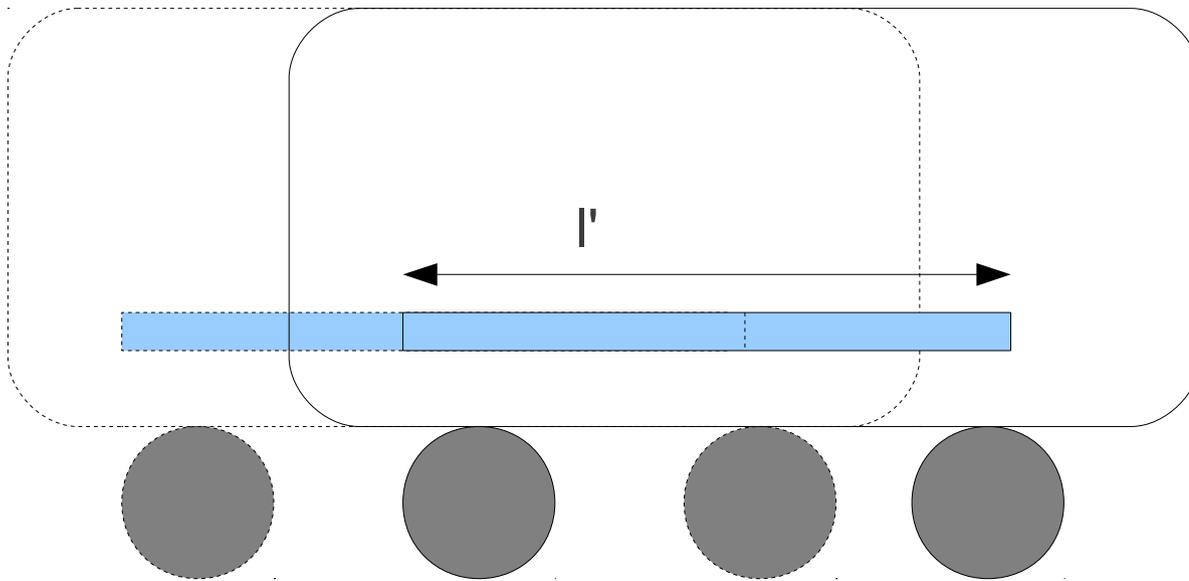
$$\Delta t' = \Delta t'_{\text{aller}} + \Delta t'_{\text{retour}}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Vue du quai      Ref R'



$$\Delta t' = \Delta t'_{\text{aller}} + \Delta t'_{\text{retour}}$$

$$\Delta t'_{\text{aller}} = \frac{l' + u \cdot \Delta t'_{\text{aller}}}{c}$$

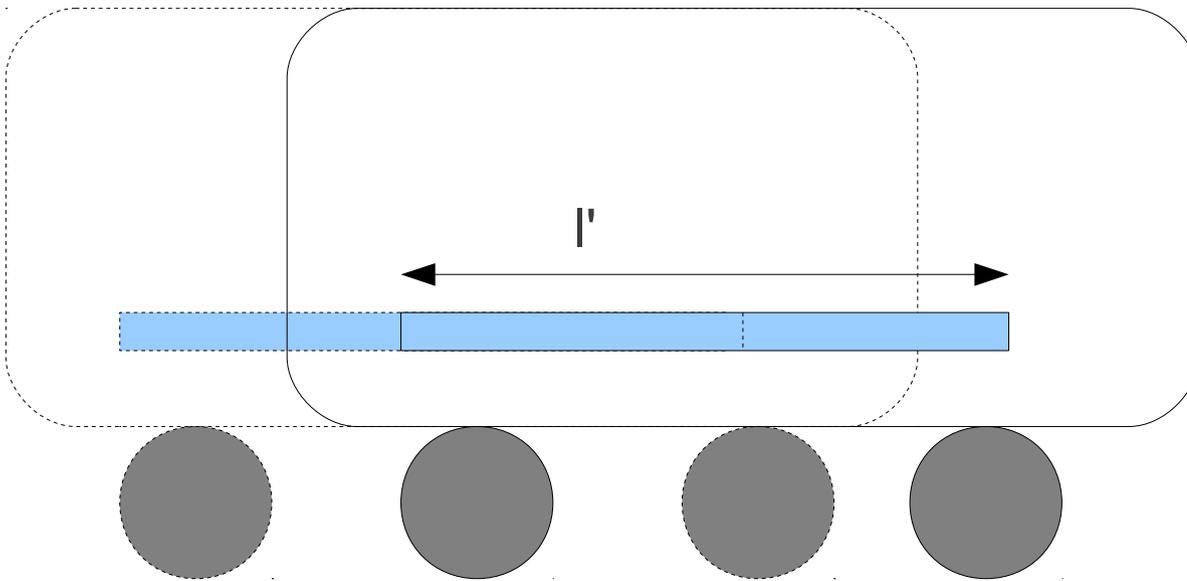
$$\Delta t'_{\text{aller}} = \frac{l'}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Vue du quai      Ref R'



$$\Delta t' = \Delta t'_{\text{aller}} + \Delta t'_{\text{retour}}$$

$$\Delta t'_{\text{retour}} = \frac{l' - u \cdot \Delta t'_{\text{retour}}}{c}$$

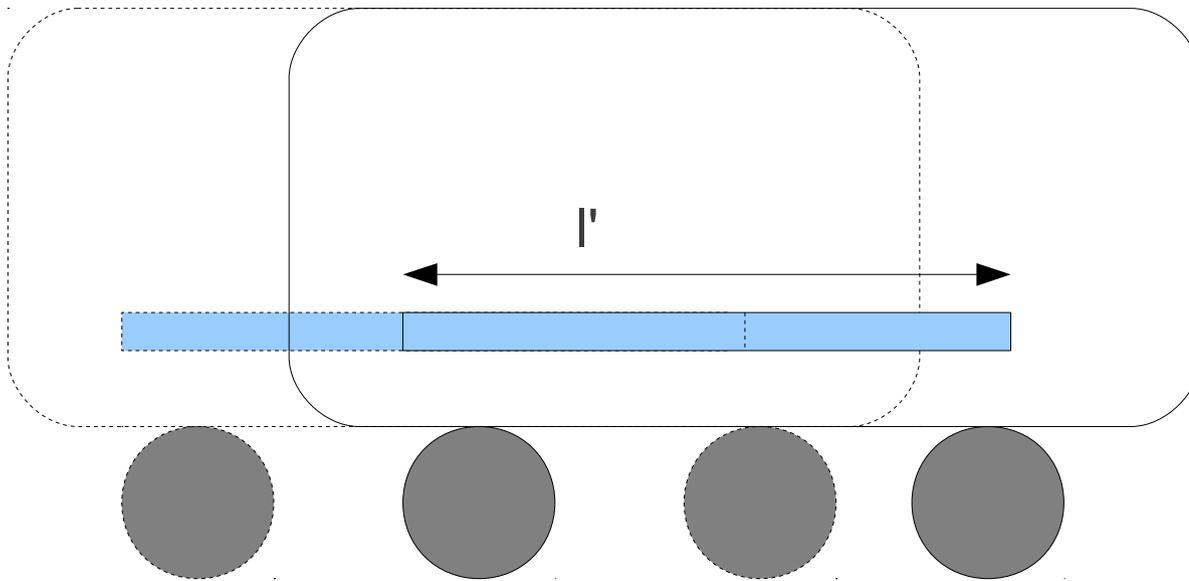
$$\Delta t'_{\text{retour}} = \frac{l'}{c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Vue du quai      Ref R'



$$\Delta t' = \Delta t'_{\text{aller}} + \Delta t'_{\text{retour}}$$

$$\Delta t' = \frac{l'}{c} \cdot \left( \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} + \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \right)$$

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

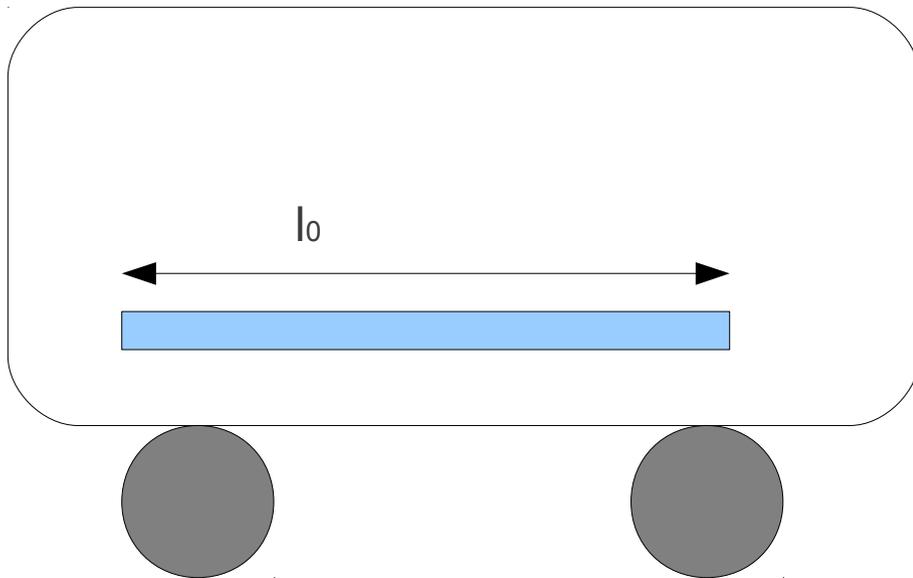
$$\Delta t' = \frac{l'}{c} \cdot \gamma^2$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

Comparaison des résultats



$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

$$\frac{2.l'}{c} \cdot \gamma^2 = \gamma \frac{2.l_0}{c}$$

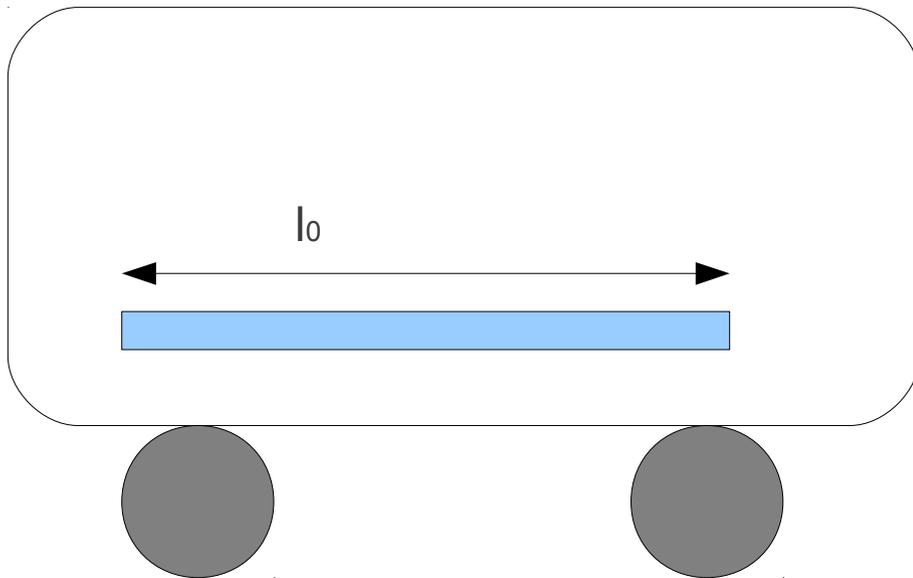
$$l' = \frac{1}{\gamma} \cdot l_0 \text{ avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Etude des longueurs dans le sens du mouvement.

La longueur dans  $R'$  semble contractée d'un facteur  $\gamma$  par rapport à la longueur dans le référentiel propre.



$$l' = \frac{1}{\gamma} \cdot l_0 \text{ avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Peut on cacher une navette spatiale de longueur 4m dans un tunnel de longueur 2m?

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Peut on cacher une navette spatiale de longueur 4m dans un tunnel de longueur 2m?

????????????????????????????????

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Peut on cacher une navette spatiale de longueur 4m dans un tunnel de longueur 2m?

Oui, si la navette spatiale est rapide.

Exemple: la vitesse de la navette est  $u=0,995.c$  ( $\gamma=10$ )

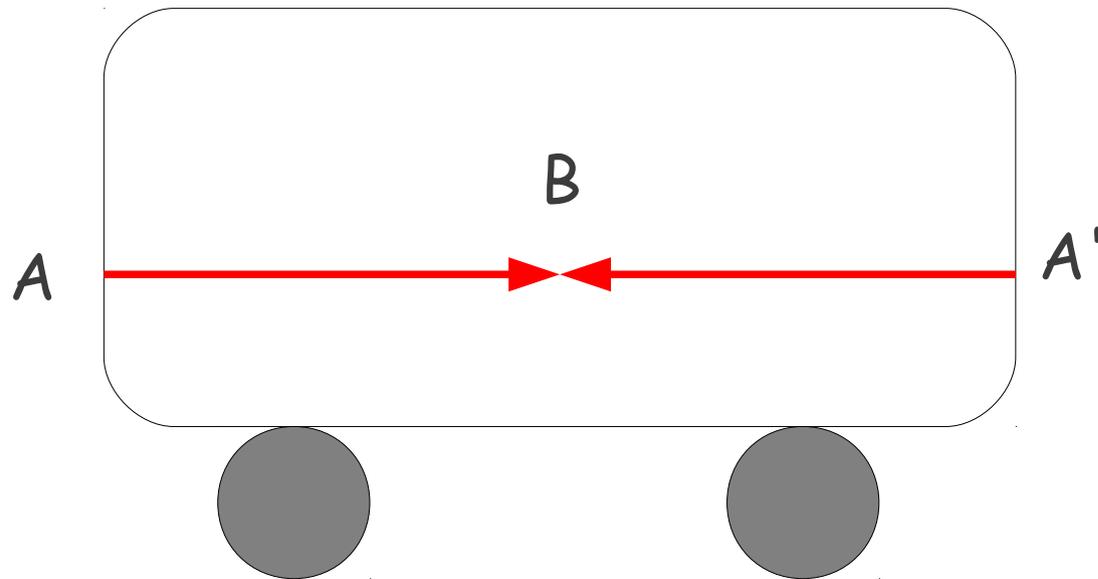
le tunnel mesure 4m dans son référentiel propre et dans ce même référentiel la navette mesure  $2m/\gamma=0,2m$ . Donc, elle peut s'y cacher! (... un court instant!)

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Problème d'interprétation, problème de Non Simultanéité:

Dans le référentiel R du train



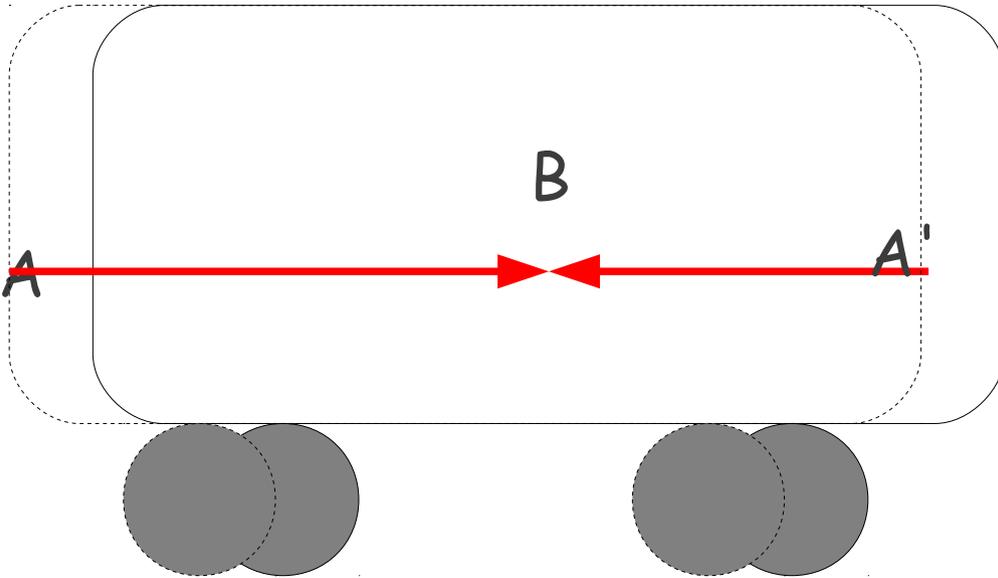
La lumière est reçue en B  
au même instant  
A et A' se sont donc allumés  
simultanément

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Problème de Non Simultanéité:

Dans le référentiel  $R'$  du quai



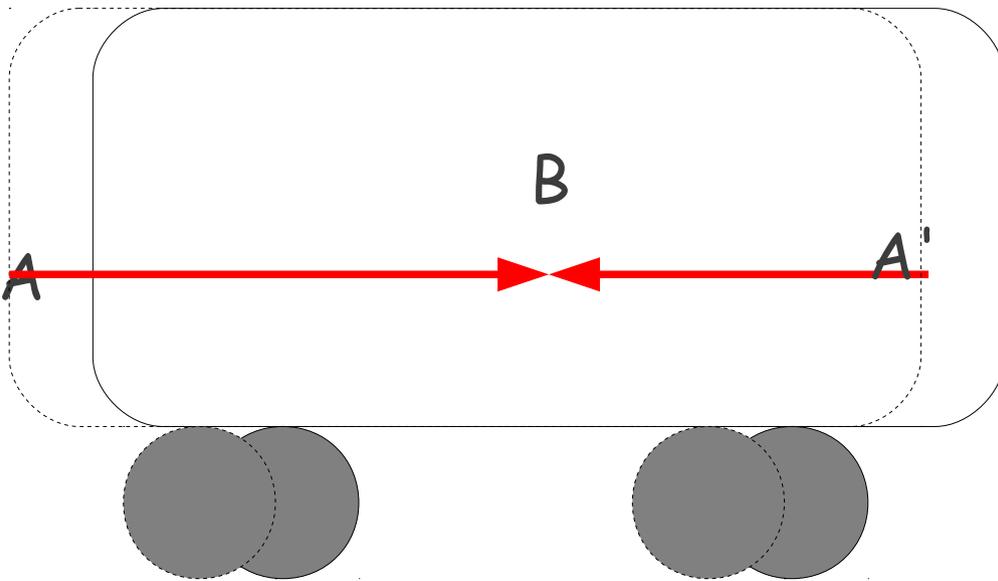
La lumière est reçue en B  
au même instant  
A s'est allumé avant A'

# La relativité restreinte

## 4. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Problème de Non Simultanéité:

Dans le référentiel  $R'$  du quai



La lumière est reçue en B  
au même instant  
A s'est allumé avant A'

Deux évènements A et A' qui ont lieu à deux endroits différents  
peuvent être simultanés dans R et non dans R'

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Peut on cacher une navette spatiale de longueur 4m dans un tunnel de longueur 2m?

Oui, si la navette spatiale est rapide.

Exemple: la vitesse de la navette est  $u=0,995.c$  ( $\gamma=10$ )

le tunnel mesure 4m dans son référentiel propre et dans ce même référentiel la navette mesure  $2m/\gamma=0,2m$ . Donc, elle peut s'y cacher! (... un court instant!)

Entrée et sortie pas simultanée dans les deux référentiels

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Deux évènements peuvent être simultanés dans référentiel  $R$   
et pas dans le référentiel  $R'$

La simultanéité dépend du référentiel.

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Deux évènements peuvent être simultanés dans référentiel  $R$   
et pas dans le référentiel  $R'$

La simultanéité dépend du référentiel.

# La relativité restreinte

## 4. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Deux évènements peuvent être simultanée dans référentiel R  
et pas dans le référentiel R'

La simultanéité dépend du référentiel.

Peut on encore faire de la physique?

# La relativité restreinte

## 3. La transformation de Lorentz en relativité restreinte

Deux évènements peuvent être simultanée dans référentiel  $R$   
et pas dans le référentiel  $R'$

La simultanéité dépend du référentiel.

Peut on encore faire de la physique?

Oui, la relation cause-conséquence est préservée en relativité!

# La relativité restreinte

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

Transformation  
de Galilée

$$t' = t$$

$$x' = x - u.t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Transformation  
de Lorentz

$$c.t' = \gamma.(c.t - x.\frac{u}{c})$$

$$x' = \gamma.(x - c.t.\frac{u}{c})$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

# La relativité restreinte

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

Transformation  
de Galilée

$$t' = t$$

$$x' = x - u.t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Transformation  
de Lorentz

$$c.t' = \gamma.(c.t - x.\frac{u}{c})$$

$$x' = \gamma.(x - c.t.\frac{u}{c})$$

$$y' = y$$

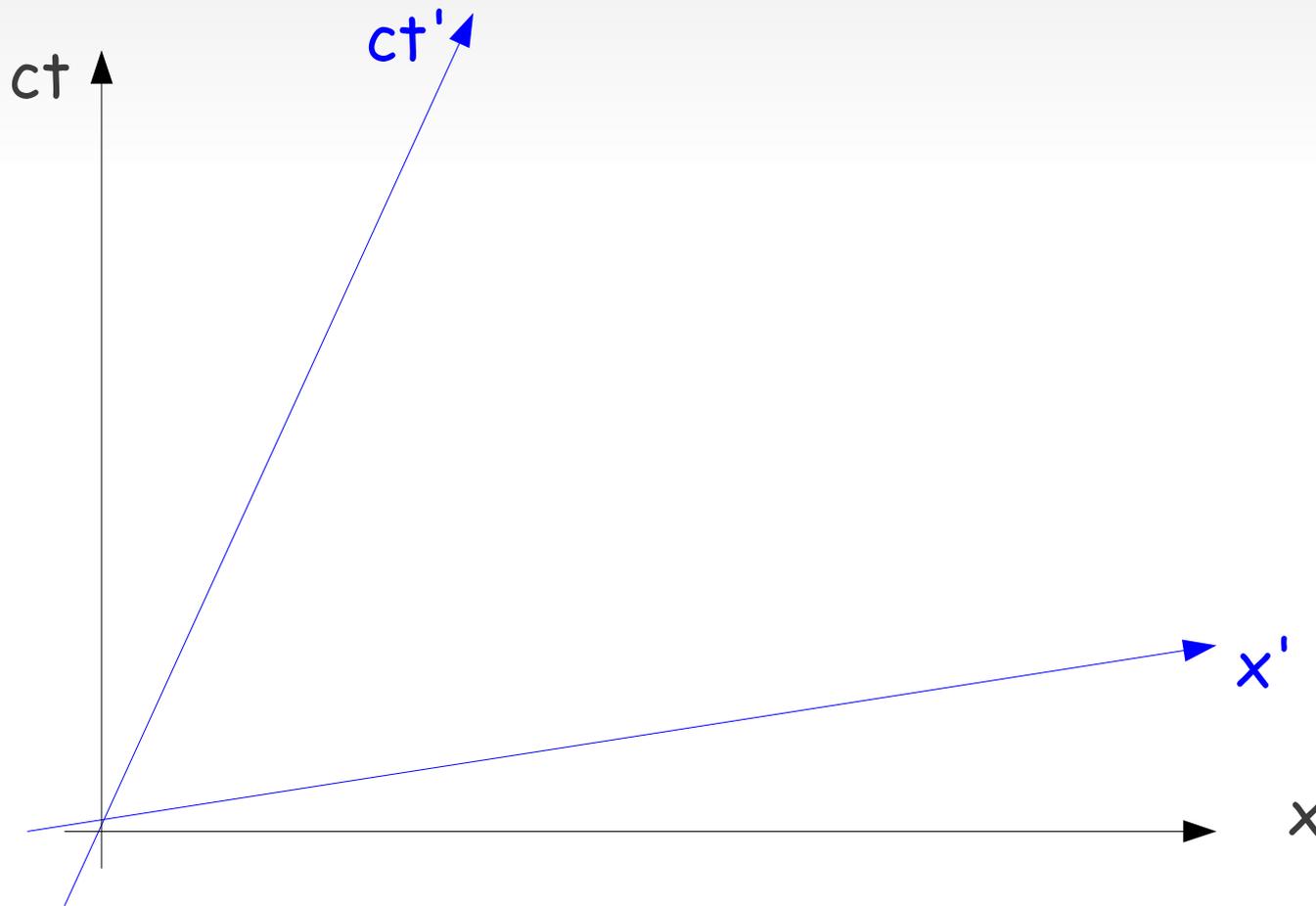
$$z' = z$$

Si  $\gamma \ll 1$ , alors les deux transformations donnent les mêmes résultats

# Vers la relativité générale

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

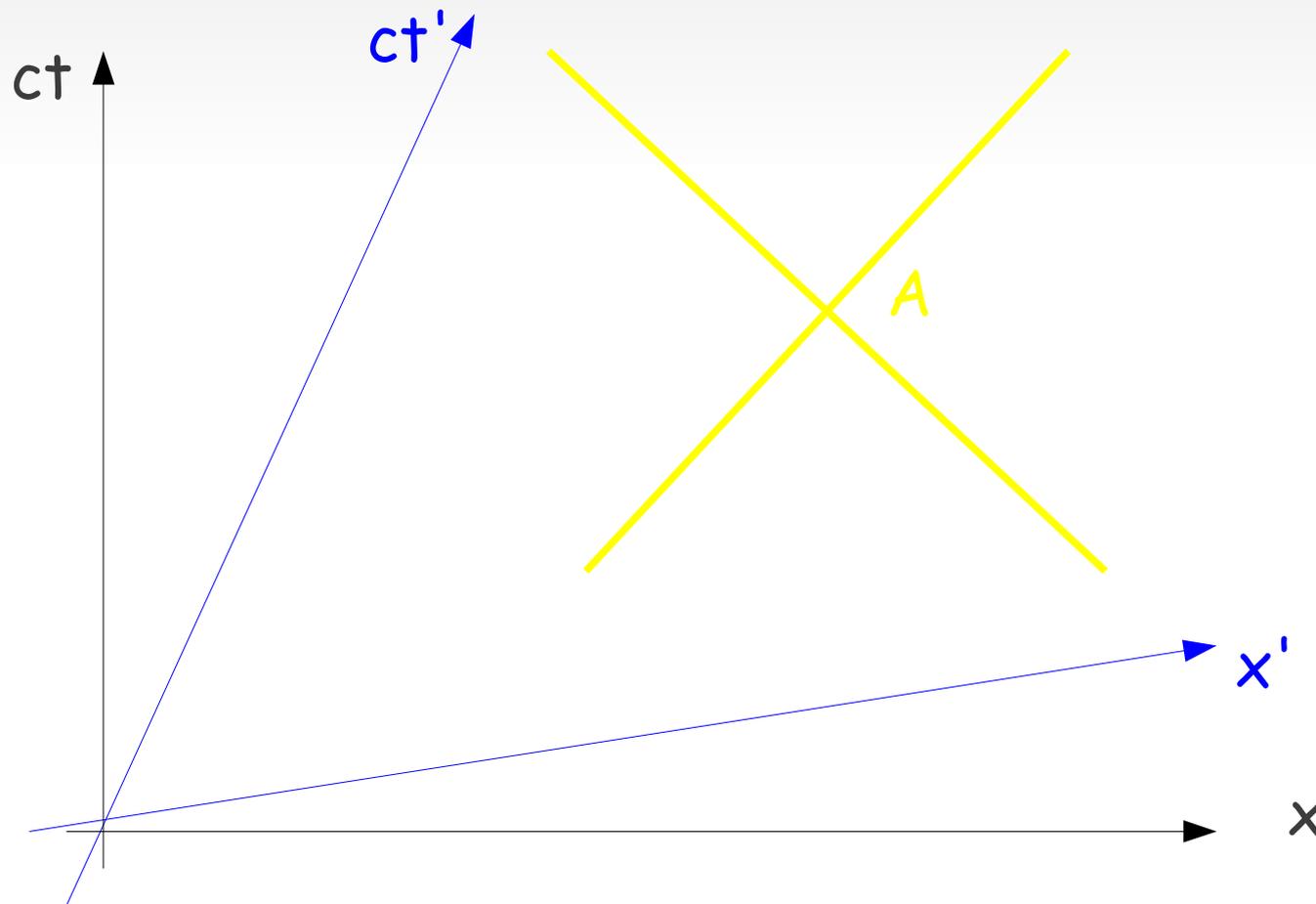
L'espace temps en relativité restreinte:



# Vers la relativité générale

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

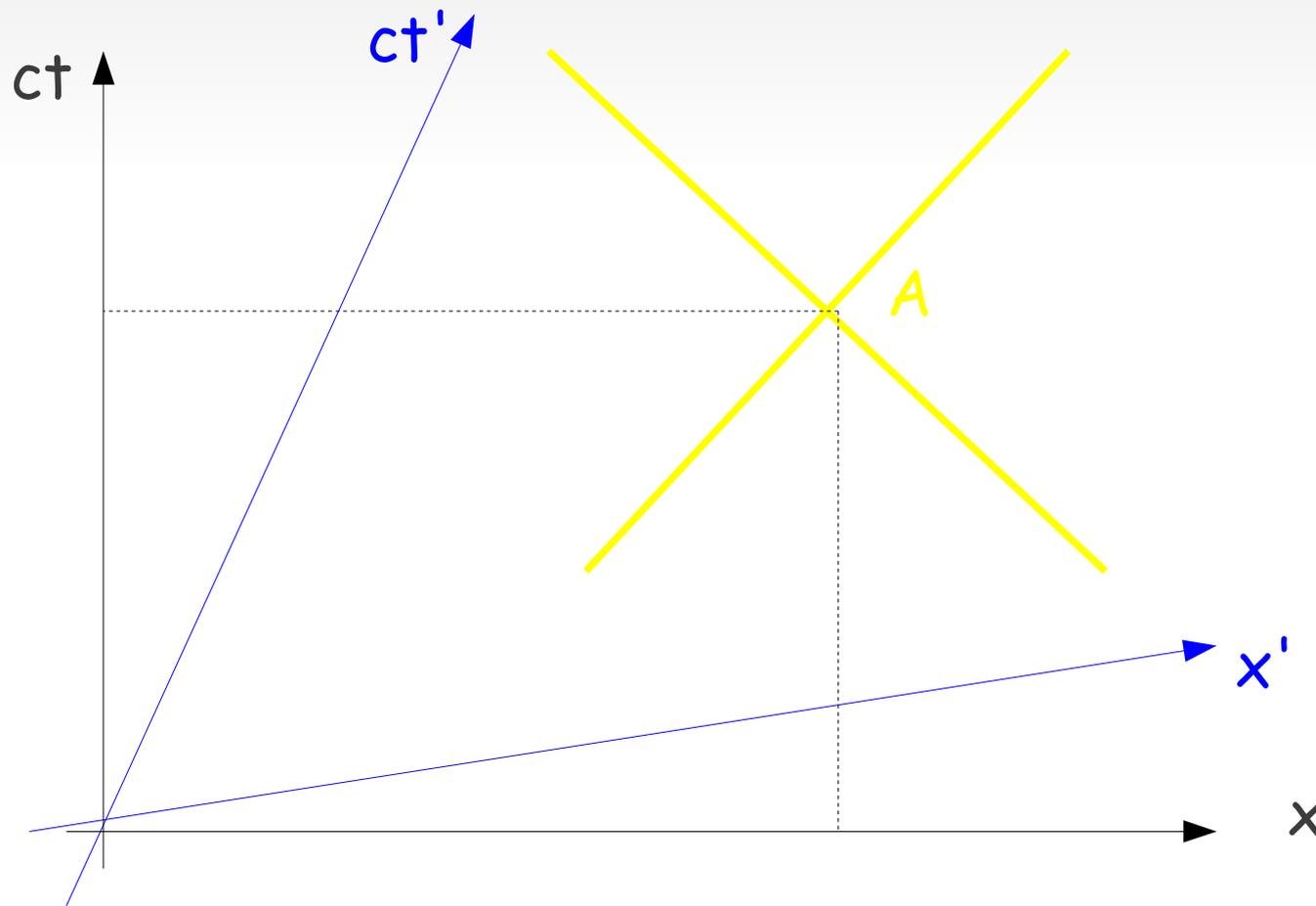
L'espace temps en relativité restreinte:



# Vers la relativité générale

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

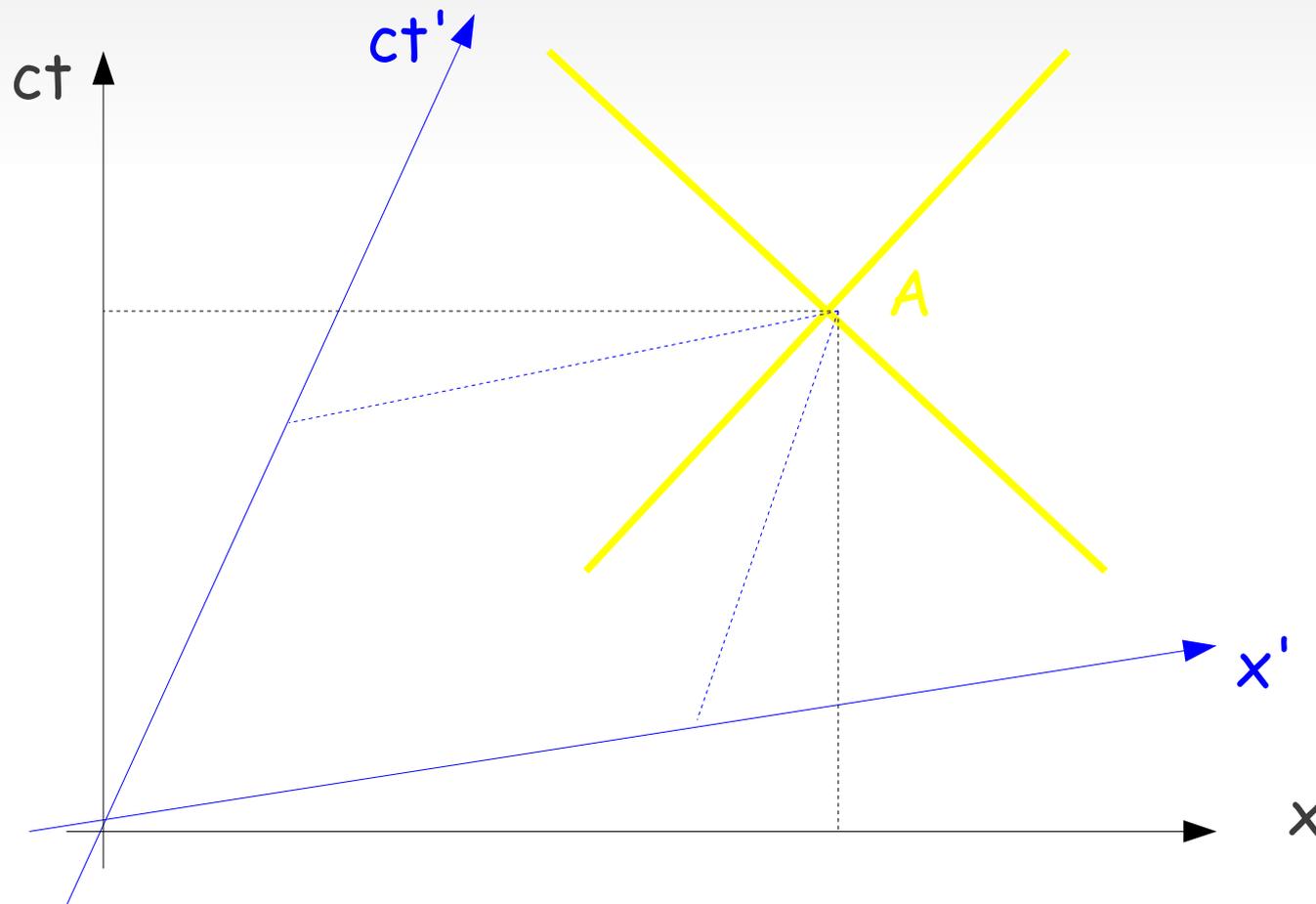
L'espace temps en relativité restreinte:



# Vers la relativité générale

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

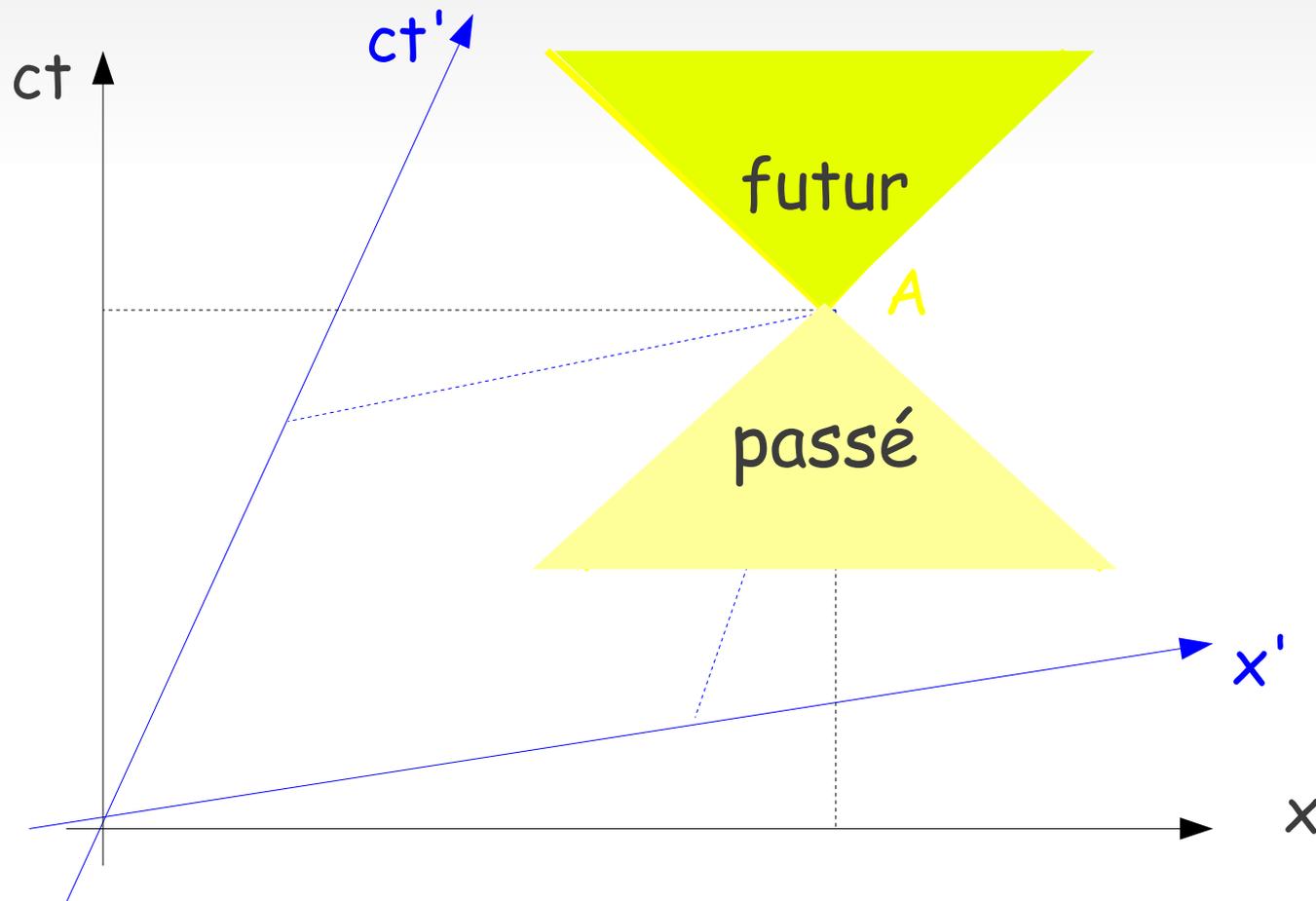
L'espace temps en relativité restreinte:



# Vers la relativité générale

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

L'espace temps en relativité restreinte:



# La relativité restreinte

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

Possible voyage interstellaire:

Pour Proxima du Centaure ( $\alpha$  Centauri)

Distante de 4 année lumière de la Terre.

A la vitesse  $u=0,995.c$ , l'astronome ne vieillirait que de 5 mois

# La relativité restreinte

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

Composition des vitesses:

$$v' = \frac{v - u}{1 - \frac{v \cdot u}{c^2}}$$

# La relativité restreinte

## 4. Conséquence de la transformation de Lorentz

Composition des vitesses:

$$v' = \frac{v - u}{1 - \frac{v \cdot u}{c^2}}$$

Si  $v=c$ , alors  $v'=c$

Si  $v$  et  $u \ll c$  alors  $v'=v-u$