

# PHYS137

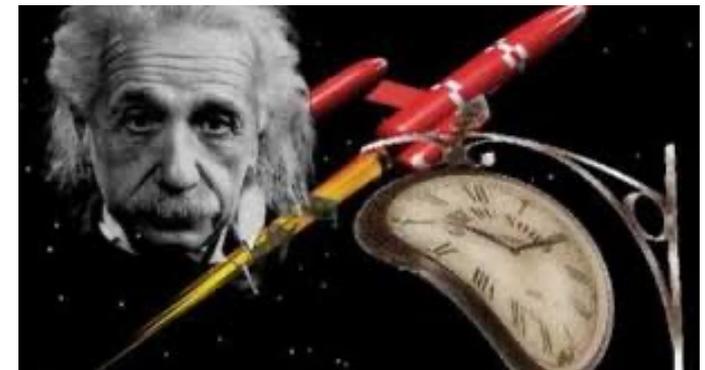
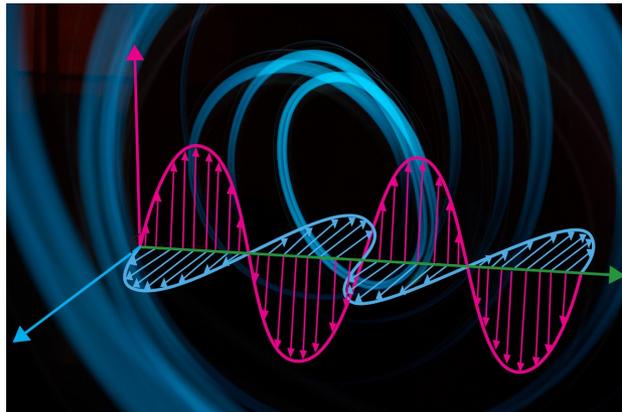
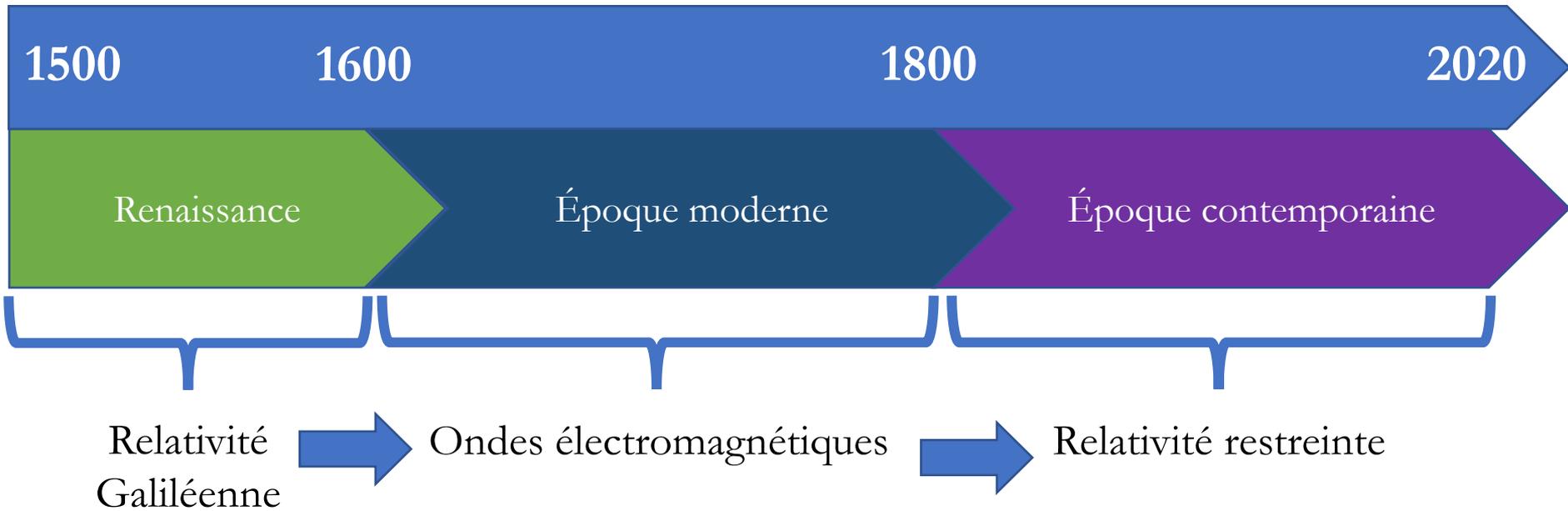
## Cours 4 :

### La relativité restreinte

Dr. Barbara PERRI

[barbara.perri@universite-paris-saclay.fr](mailto:barbara.perri@universite-paris-saclay.fr)

# Introduction



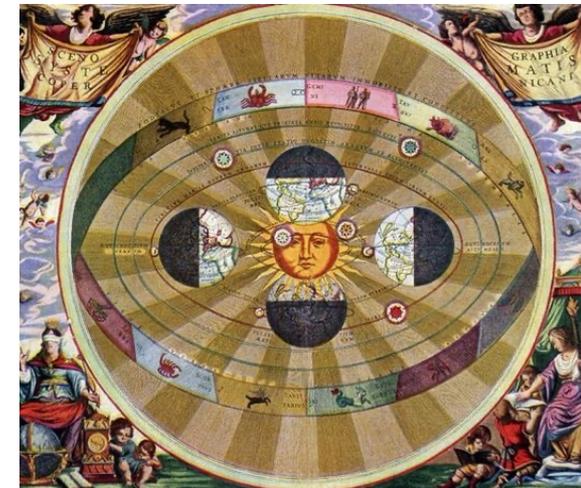
An illustration of Galileo Galilei, a man with a long white beard and hair, wearing a dark blue robe with a white collar. He is holding a telescope to his eye with his left hand and pointing his right hand towards a bright star in the sky. The background is a dark blue space filled with many small white stars and several larger, bright white stars with four-pointed diffraction patterns. The title 'La Relativité Galiléenne' is written in a large, black, serif font across the center of the image.

# La Relativité Galiléenne

# Débat sur les systèmes



Deux visions de l'Univers s'opposent :



**Systeme géocentrique (Ptolémée) :**

La Terre est au centre

**Systeme héliocentrique (Copernic) :**

Le Soleil est au centre

→ **Argument des géocentristes :**

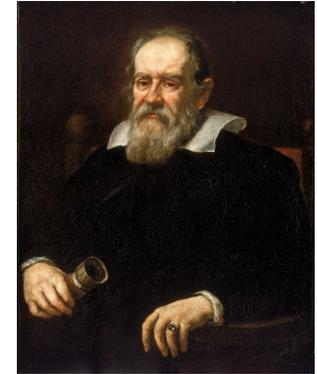
Si la Terre était en mouvement, cela aurait une influence sur le mouvement des objets (ex : la chute d'un stylo)

1600

Renaissance

1500

# Les expériences de Galilée



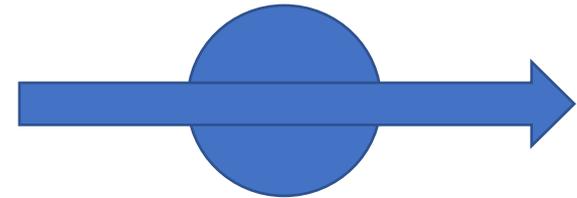
Galilée est un Copernicien convaincu

→ il étudie la **chute des corps** pour réfuter le géocentrisme



Si on ne touche pas un objet immobile

→ il reste immobile

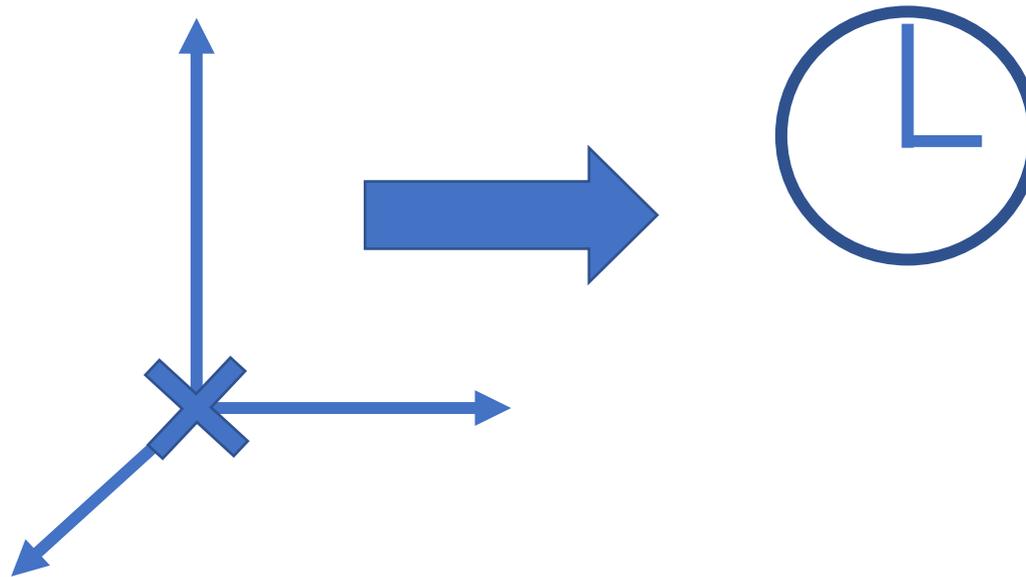
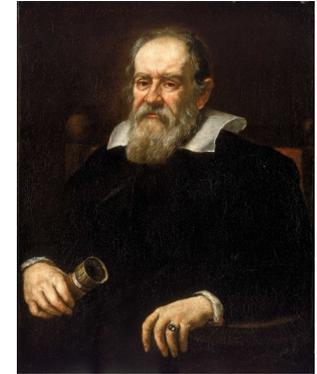


Si on ne touche pas un objet en translation rectiligne uniforme

→ il reste en translation rectiligne uniforme

→ L'état de mouvement est en fait pareil à celui de repos !

# Notion de référentiel



Galilée définit pour la première fois la notion de référentiel :

- origine (observateur),
- axes (espace en 3D),
- vitesse (mouvement),
- horloge (temps).

$$\rightarrow R : (x, y, z, t)$$

1600

1500

Renaissance

# Principe de relativité (par Galilée)

## Principe de relativité :

Si deux référentiels sont animés d'un mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre, alors les lois de la physique sont les mêmes dans les deux



- Les vitesses n'ont pas de sens absolu, elles sont relatives
  - Ceci annule l'argument des géocentristes
- (à condition que la Terre ait un mouvement rectiligne uniforme)

1800

1600 1630

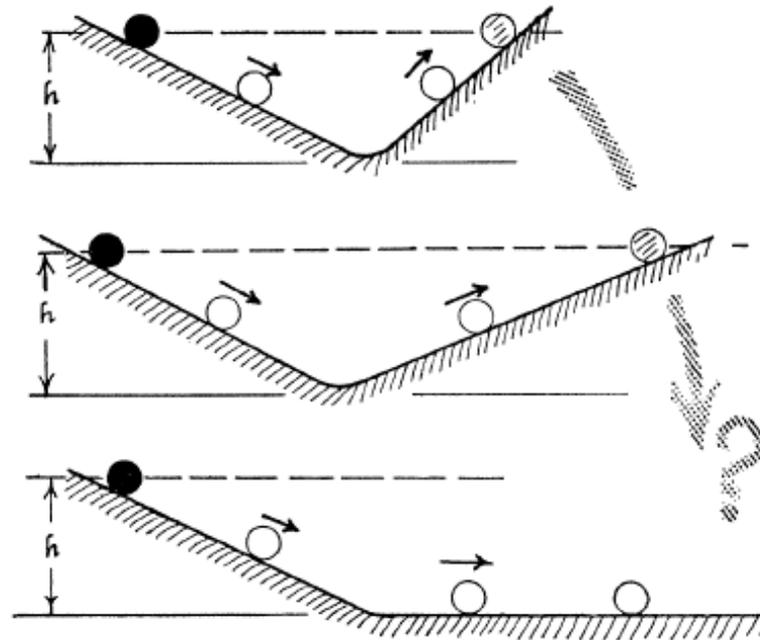
Époque moderne

# Le principe d'inertie

## Principe d'inertie :

Un corps soumis à aucune force est :

- soit au repos,
- soit en translation rectiligne uniforme.



- Ce qui est important, c'est la quantité de mouvement ( $p = mv$ )
- Ce sera la base pour la mécanique classique de Newton (3 lois)

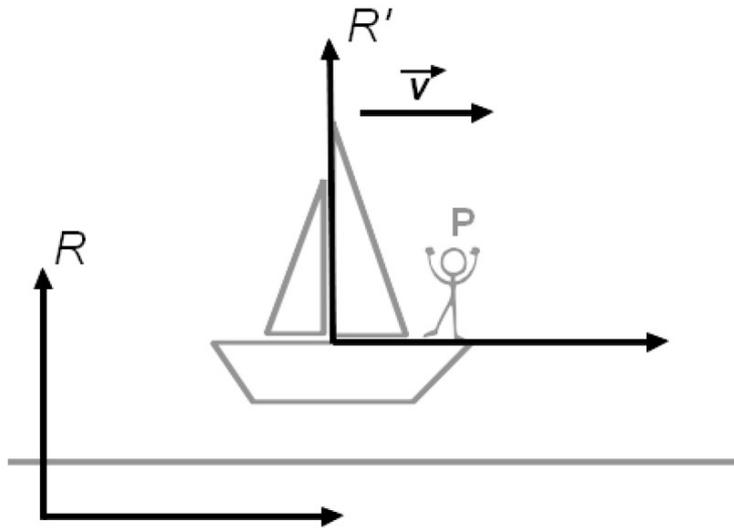
1800

Époque moderne

1600 1630

# La transformation de Galilée

Comment passer d'un référentiel à un autre ?  
 → la transformation de Galilée

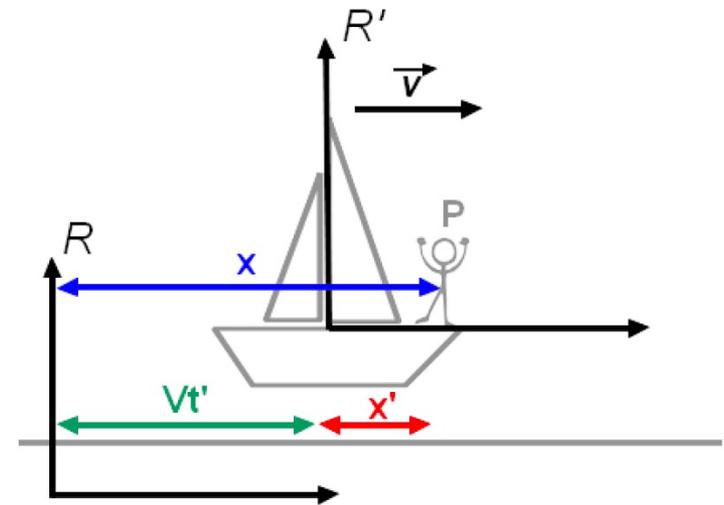


Référentiel  $R$  fixe

Référentiel  $R'$  à vitesse  $v$

$P : (x, y, t)$  dans  $R$ ,  $(x', y', t')$  dans  $R'$

→ comment relier  $x$  et  $x'$  ?



On voit que  $y = y'$

On suppose que  $t = t'$

→  $x = vt + x'$

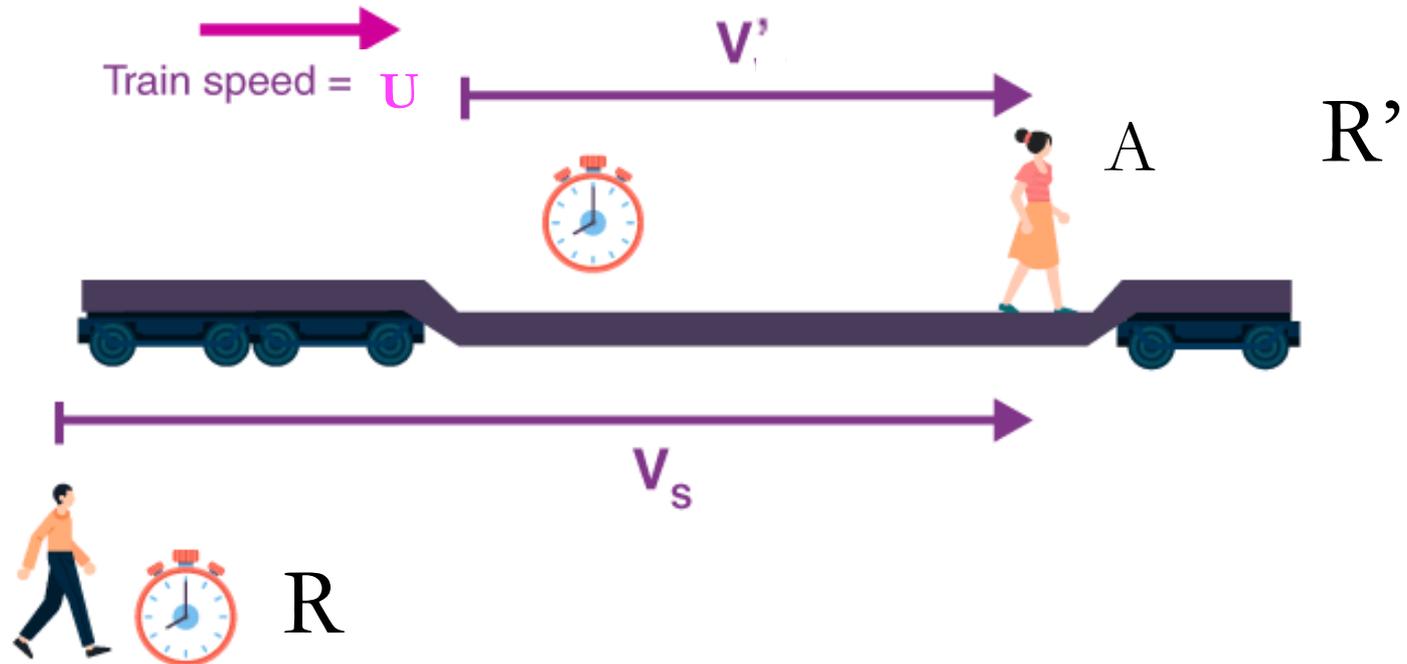
1800

Époque moderne

1600 1630

# L'addition des vitesses

Une autre conséquence du principe de relativité est l'addition des vitesses



Si  $A$  se déplace à la vitesse  $V'$  dans  $R'$ , et que  $R'$  est en translation rectiligne uniforme à la vitesse  $U$  par rapport à  $R$  :

$$\rightarrow \text{vitesse } V \text{ de } A \text{ dans } R = V' + U$$

1800

Époque moderne

1600 1630

# Conclusions de Galilée

Résumé des principales conclusions de Galilée :

Quantité	Propriété
Lois physiques	Identiques dans référentiels galiléens
Changement de référentiel	Transformation de Galilée
Vitesses	Relatives + Additives
Distances	Invariantes
Durées	Invariantes

→ Tout ceci forme la base de la mécanique classique (ou newtonienne)

1800

Époque moderne

1630

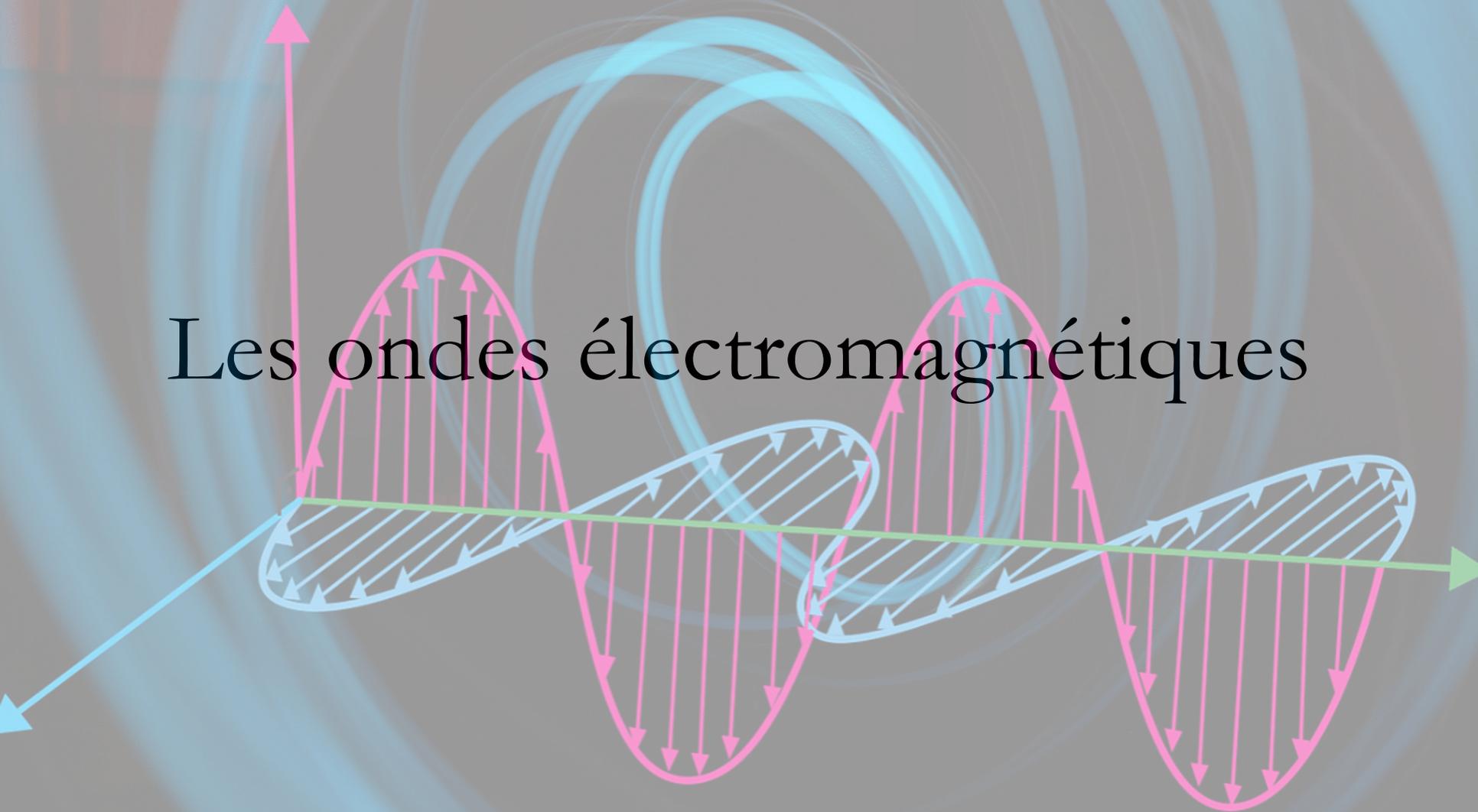
1600



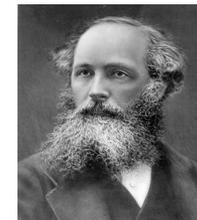
# Exercices et TDs



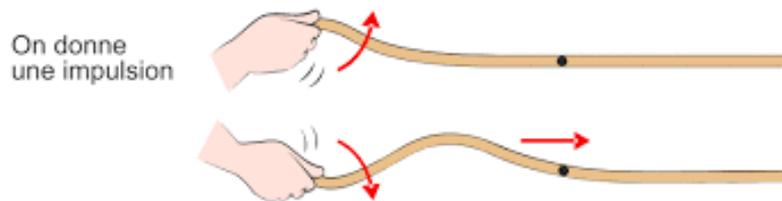
# Les ondes électromagnétiques



# Les ondes de Maxwell



Maxwell interprète les champs électriques et magnétiques sous la forme d'ondes



Source sonore :  
Diapason

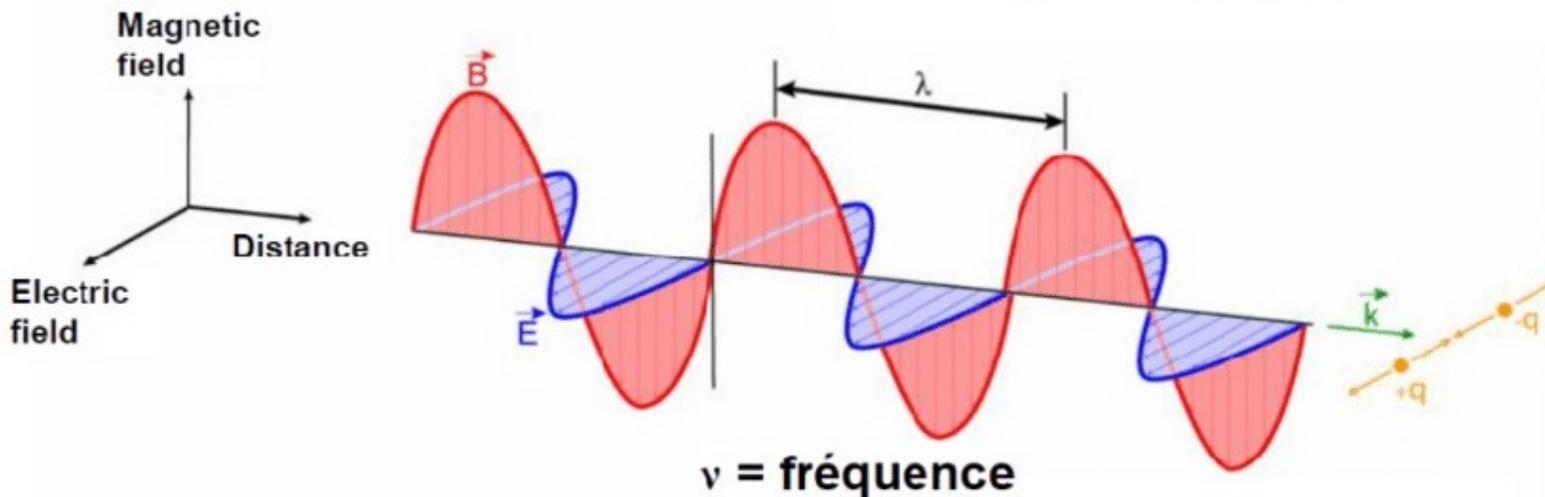
Propagation du son

Récepteur :  
oreille + tympan

sensation  
d'intensité  
sonore

$\lambda =$  longueur d'onde

La se



→ Il prédit que leur vitesse sera celle de la lumière :  $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$

→ En revanche il pense qu'il leur faut un milieu de propagation = éther

2020

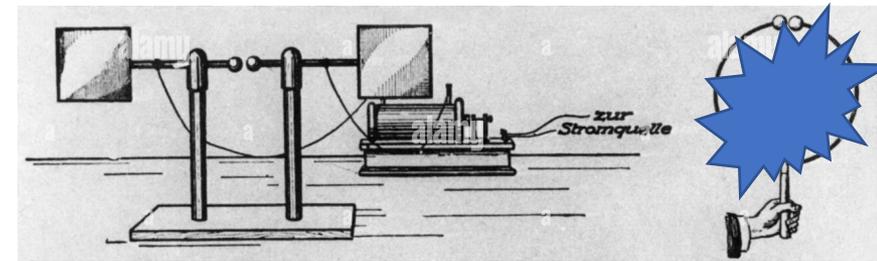
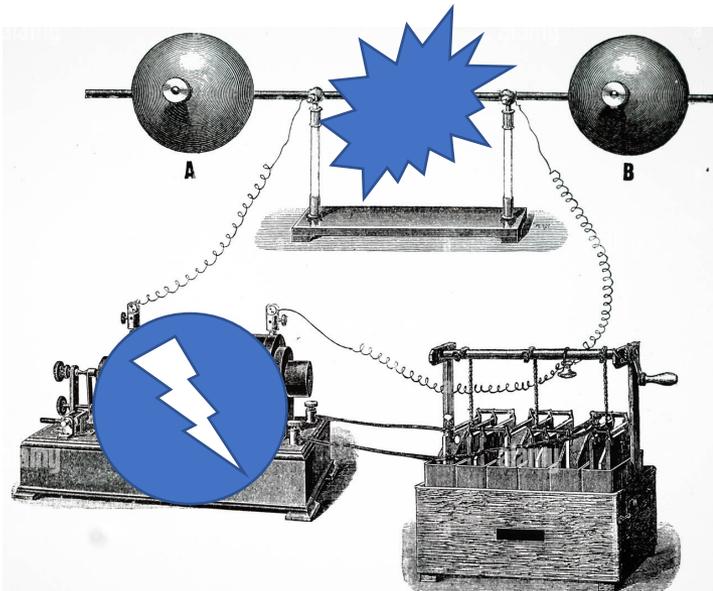
1860

1800

Époque contemporaine

# L'expérience de Hertz

C'est Heinrich Hertz qui va prouver l'existence des ondes électromagnétiques



- Il démontre que ce sont bien des ondes, car elles ont les mêmes propriétés que les ondes lumineuses (réflexion sur un miroir, polarisation, diffusion...)
- Il démontre que ces ondes voyagent bien à la vitesse de la lumière

2020

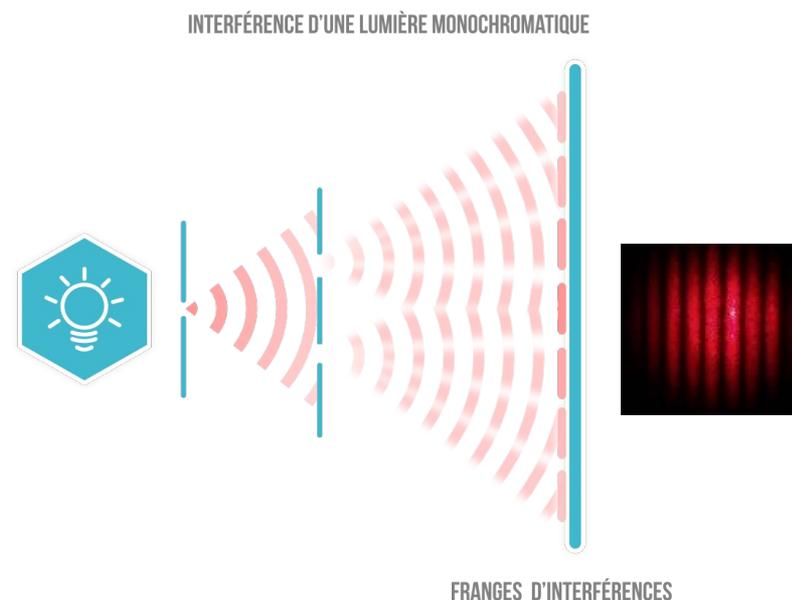
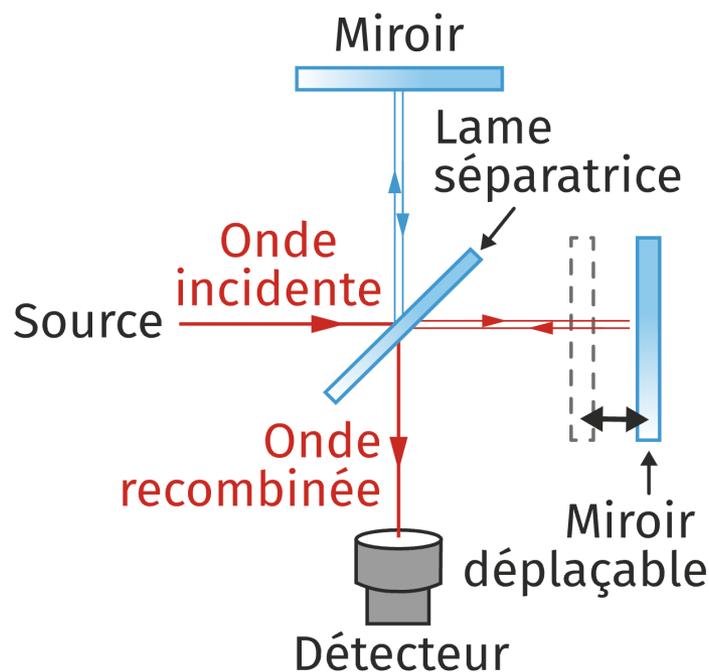
1880

1800

Époque contemporaine

# Principe d'interféromètre

Un interféromètre permet de mesurer le décalage entre deux ondes lumineuses



→ En mesurant l'écart entre les franges d'interférence, on peut en déduire l'écart de temps entre les deux ondes, et donc leur vitesse

2020

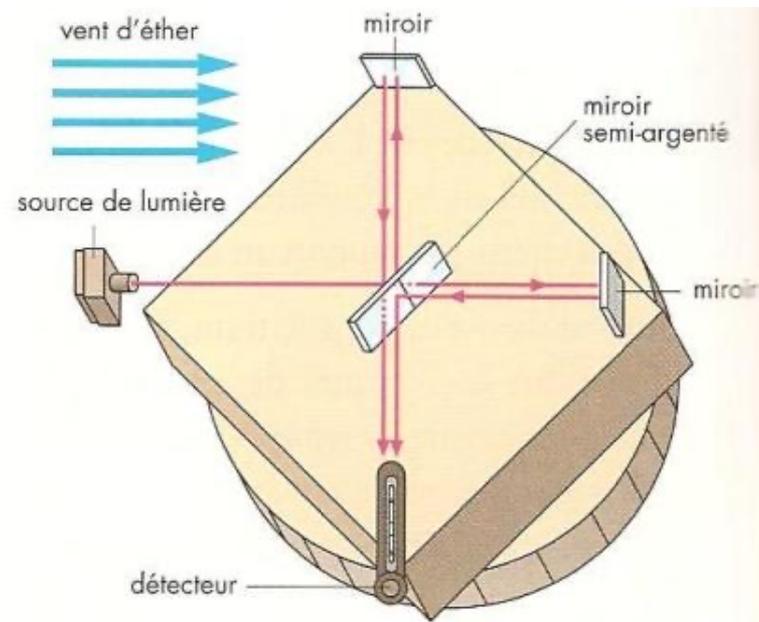
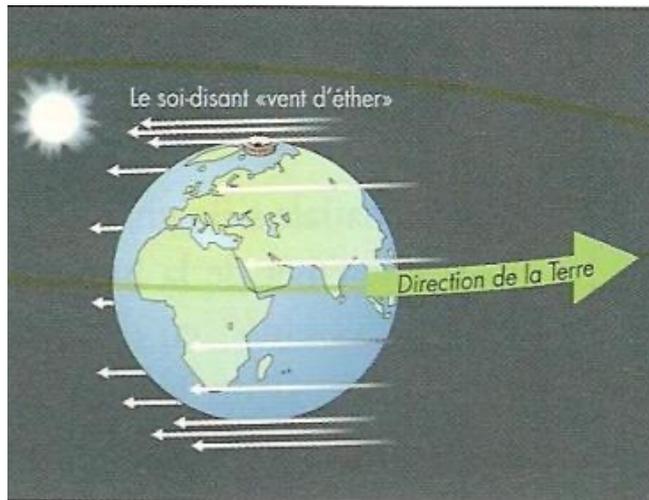
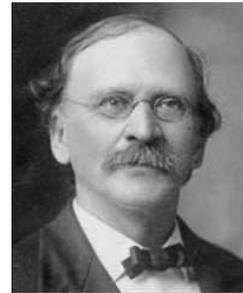
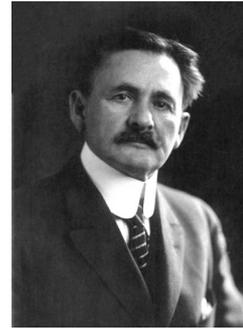
1880

1800

Époque contemporaine

# L'expérience de Michelson et Morley

Michelson et Morley veulent démontrer l'existence de l'éther  
 → ils supposent que la vitesse de la lumière sera différente en fonction de la direction du vent d'éther



→ Problème : la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions !  
 → L'éther n'existe pas ! (résultat négatif célèbre)

2020

1880

1800

Époque contemporaine

# Conclusions de Michelson et Morley

Michelson et Morley démontrent qu'il est impossible de dépasser la vitesse de la lumière

→ Ils contredisent directement la loi d'additivité des vitesses de Galilée !

Quantité	Propriété (Galilée)	Propriété (M&M)
Lois physiques	Identiques dans référentiels galiléens	Identiques dans référentiels galiléens
Changement de référentiel	Transformation de Galilée	Transformation de Galilée
Vitesses	Relatives + Additives	Vitesse de la lumière absolue
Distances	Invariantes	Invariantes
Durées	Invariantes	Invariantes

→ Il faut une nouvelle théorie physique pour expliquer cela

2020

1880

1800

Époque contemporaine



# La Relativité Restreinte

# Transformation de Lorentz

Lorentz tente d'interpréter le résultat négatif de Michelson et Morley en introduisant un nouveau facteur



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right) \\ x' = \gamma (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

→ Quand  $v \ll c$ , on retrouve la transformation de Galilée

→ Quand un objet s'approche de la vitesse de la lumière, sa propagation dans l'éther lui ferait subir une contraction :

$$L = \frac{1}{\gamma} L' \qquad T = \gamma T'$$

→ Lorentz introduit également une dilatation du temps pour compenser !

2020

1900

1800

Époque contemporaine

# Conclusions de Lorentz

Quantité	Propriété (Galilée)	Propriété (M&M)	Propriété (Lorentz)
Lois physiques	Identiques dans référentiels galiléens	Identiques dans référentiels galiléens	Identiques dans référentiels galiléens
Changement de référentiel	Transformation de Galilée	Transformation de Galilée	<b>Transformation de Lorentz</b>
Vitesses	Relatives + Additives	<b>Vitesse de la lumière absolue</b>	Relatives + Additives
Distances	Invariantes	Invariantes	<b>Relatives</b>
Durées	Invariantes	Invariantes	<b>Relatives</b>

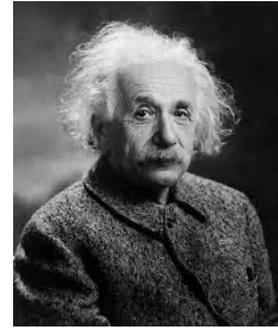
2020

1900

1800

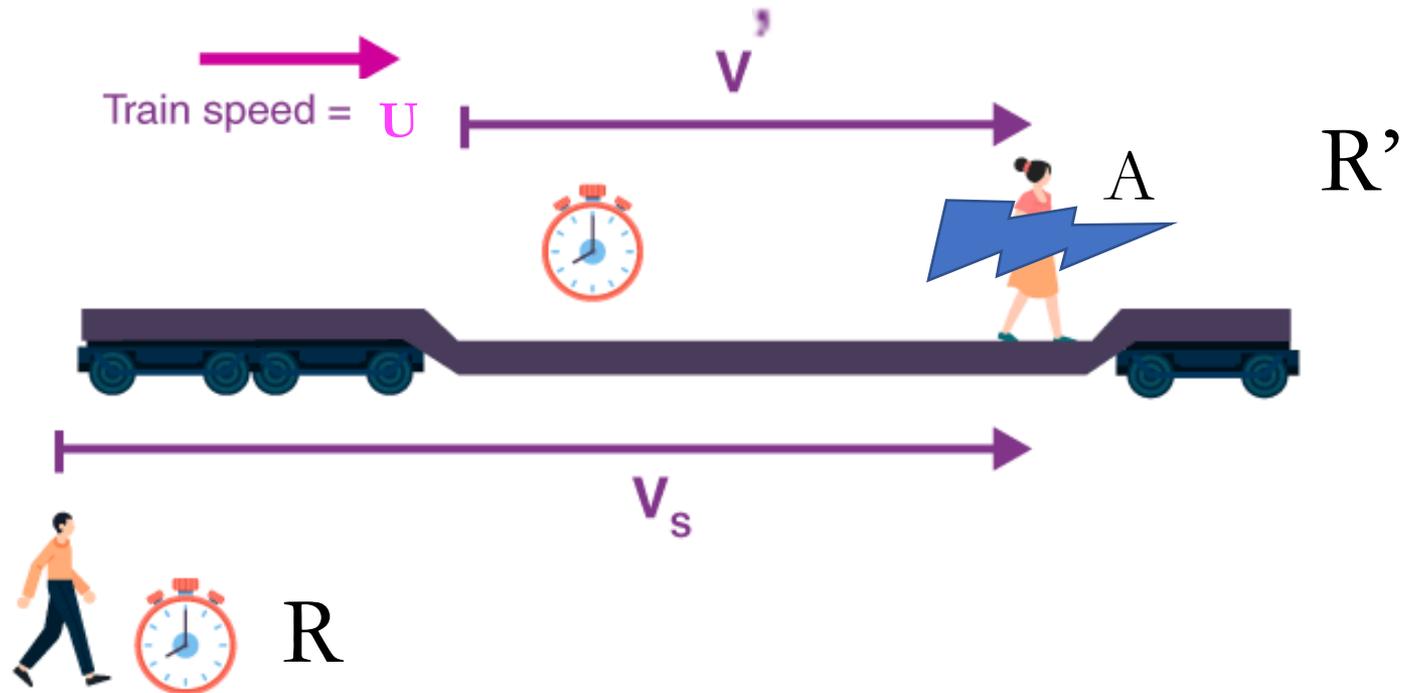
Époque contemporaine

# Principe de relativité (par Einstein)



Einstein repart des travaux de Lorentz  
pour fonder une nouvelle théorie

= la relativité restreinte (*De l'électrodynamique des corps en mouvement*)



- Il reprend le principe de relativité de Galilée (tous les référentiels inertiels sont équivalents) MAIS avec une vitesse de la lumière absolue
- L'additivité des vitesses n'est plus possible

2020

1905

1800

Époque contemporaine

# Conclusions d'Einstein

Quantité	Propriété (Galilée)	Propriété (M&M)	Propriété (Lorentz)	Propriété (Einstein)
Lois physiques	Identiques dans référentiels galiléens			
Changement de référentiel	Transformation de Galilée	Transformation de Galilée	Transformation de Lorentz	Transformation de Lorentz
Vitesses	Relatives + Additives	Vitesse de la lumière absolue	Relatives + Additives	Vitesse de la lumière absolue
Distances	Invariantes	Invariantes	Relatives	Relatives
Durées	Invariantes	Invariantes	Relatives	Relatives

2020

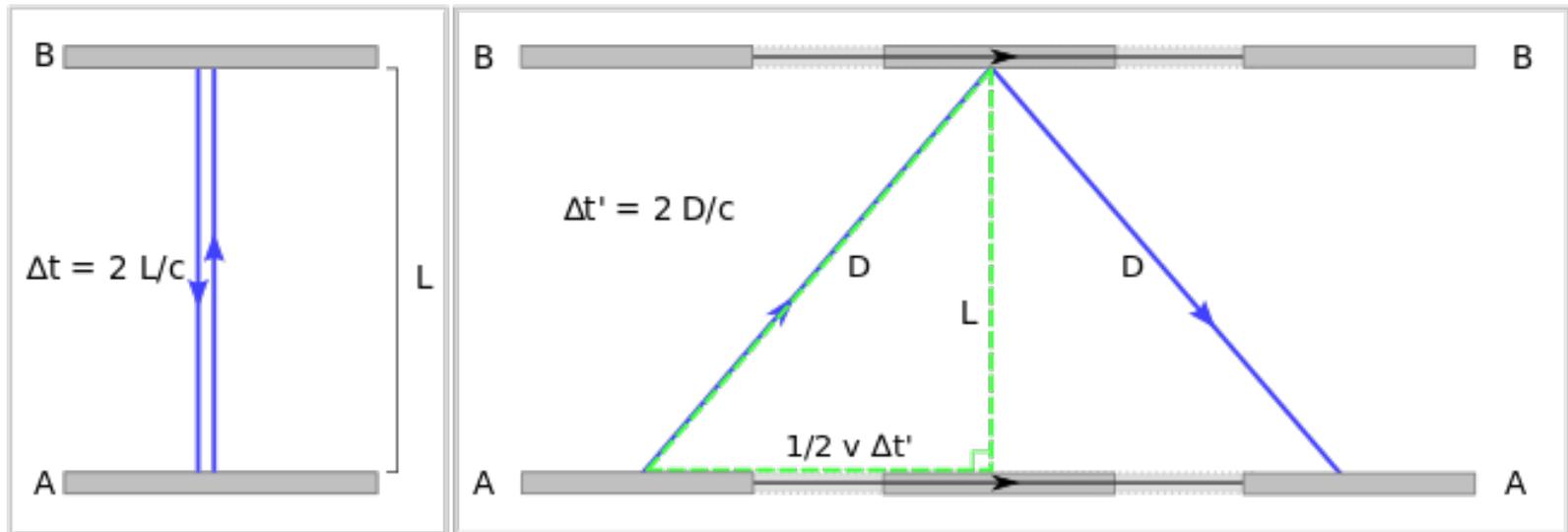
1905

1800

Époque contemporaine

# Dilatation du temps

Essayons de mesurer la durée d'un phénomène physique dans un train relativiste



- Les horloges ne sont plus synchronisées après le trajet
- Le temps s'écoule plus lentement quand on se déplace vite (ex : le Concorde)

2020

1905

1800

Époque contemporaine

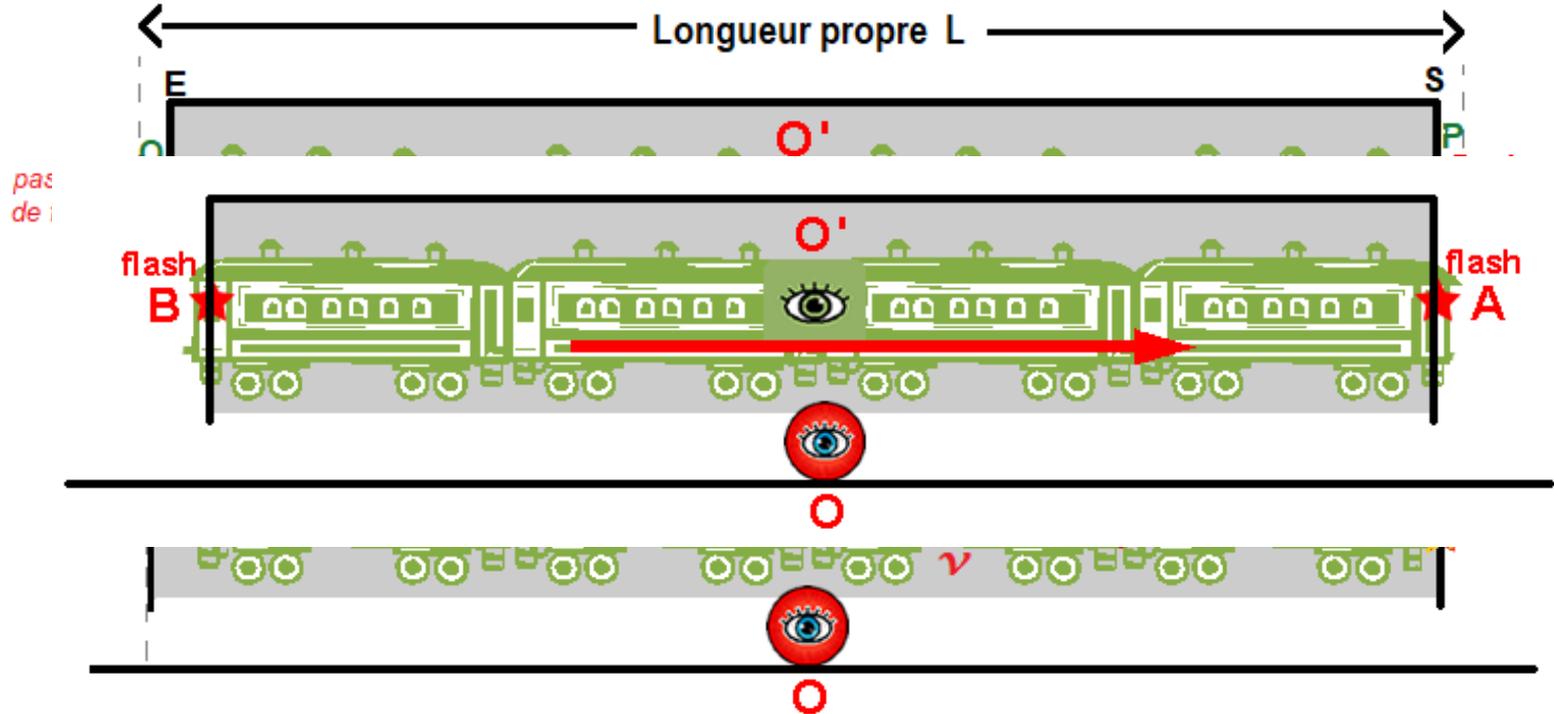
# Contraction des longueurs

Expérience de pensée avec un train relativiste qui passe dans un tunnel de même longueur (flash A quand le train sort, flash B quand il entre) :

→ non relativiste : A et B en même temps

→ vu du train : A puis B

→ vu du quai : B puis A



→ Vu du train : le tunnel paraît plus court que le train

→ Vu du quai : le train paraît plus court que le tunnel

2020

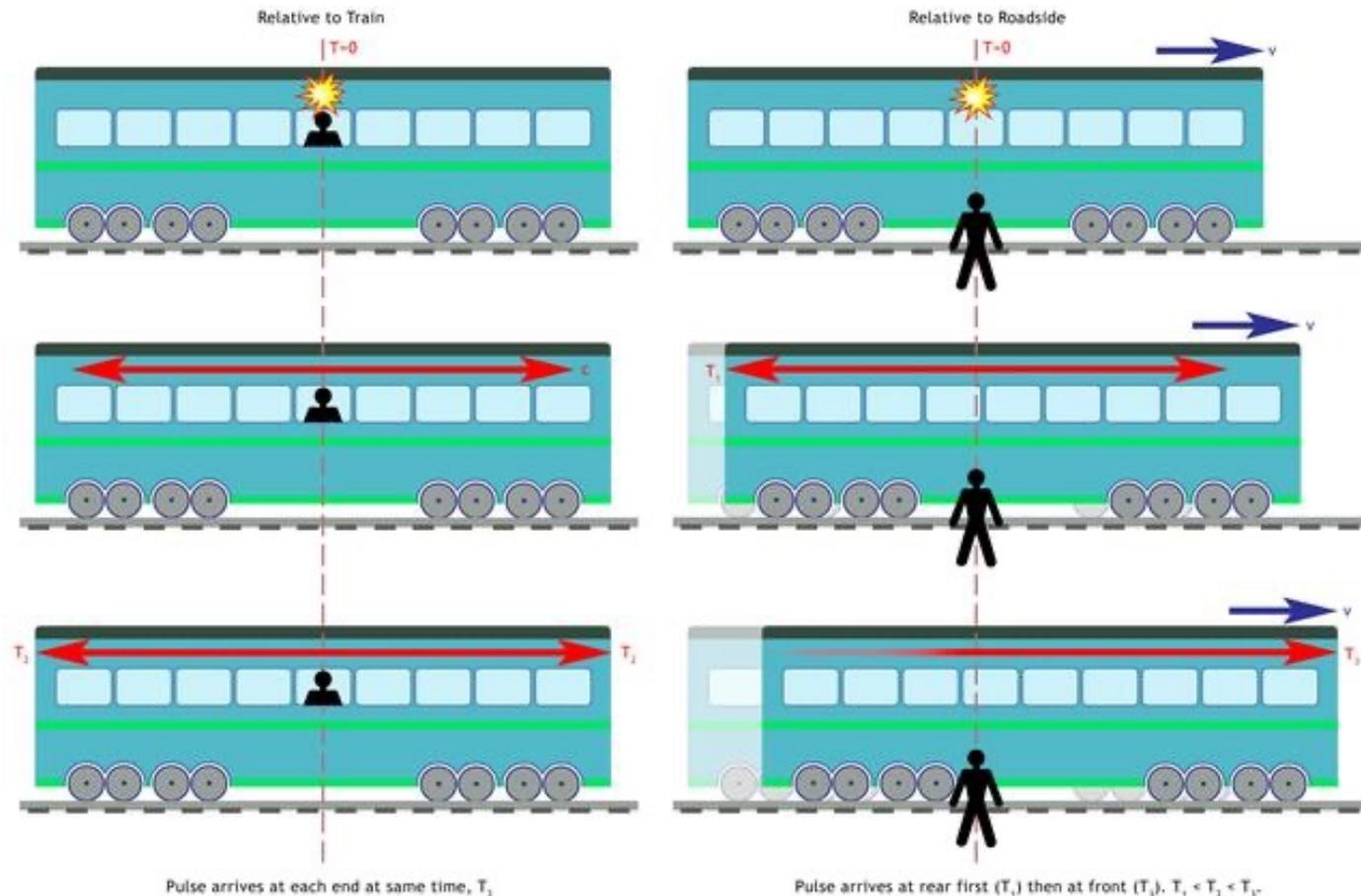
1905

1800

Époque contemporaine

# Perte de simultanéité

Imaginons un flash dans un train relativiste :



- Dans le train, la lumière arrive de manière simultanée, pas sur le quai
- La notion de simultanée devient relative, elle dépend du référentiel !

2020

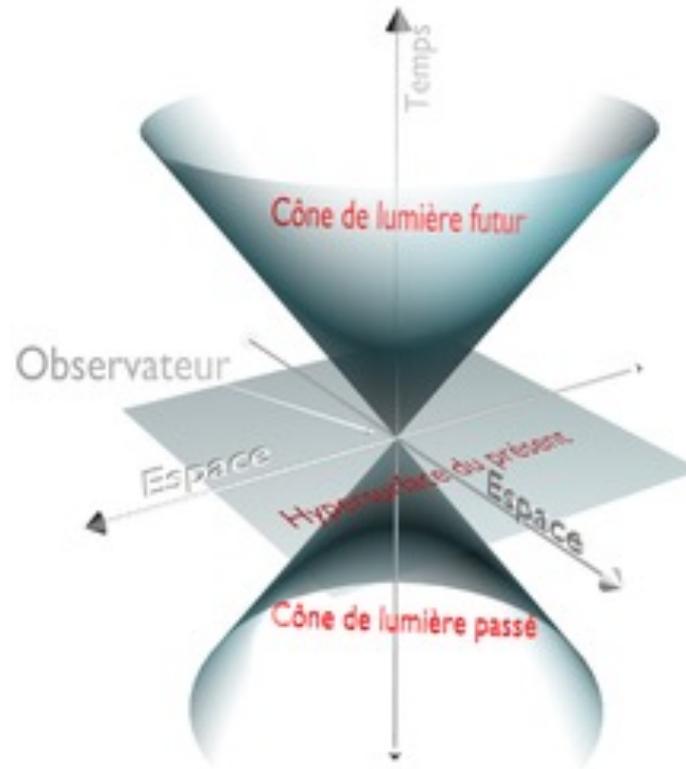
1905

1800

Époque contemporaine

# Représentation graphique

Hermann Minkowski invente une manière graphique de représenter la relativité restreinte



- L'espace-temps devient en quatre dimensions et dépend du référentiel
- Il n'est plus infini à cause de la finitude de la vitesse de la lumière

2020

1907

1800

Époque contemporaine



# Exercices et TDs

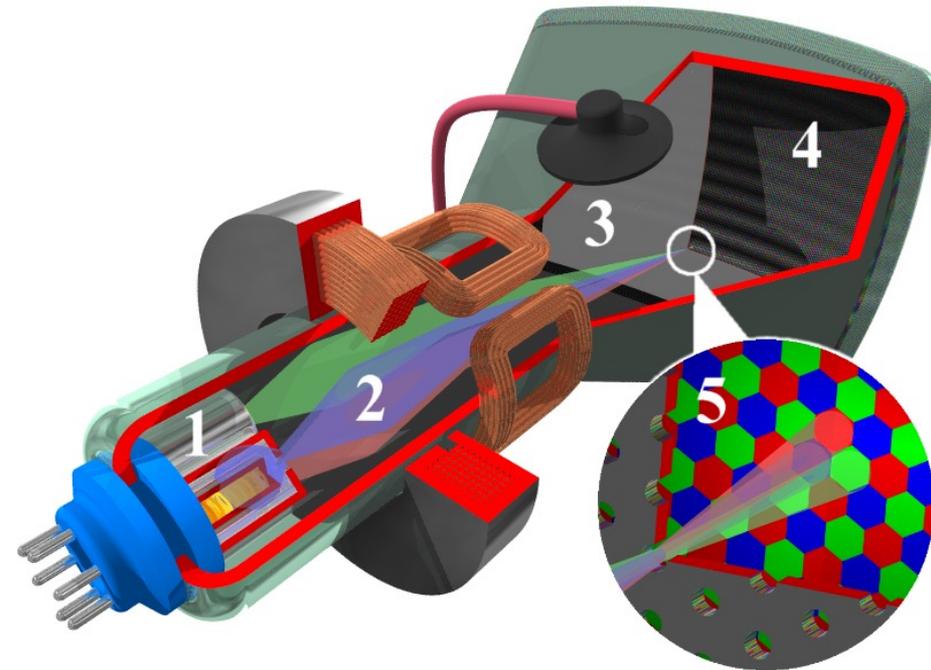




# Applications astrophysiques (mais pas que !)

# La télévision à tube cathodique

Les anciens téléviseurs utilisaient des corrections relativistes !



Les électrons sont accélérés à 30% de la vitesse de la lumière (90 000 km/s)  
 → il faut prendre en compte la contraction des longueurs  
 pour que les aimants dévient correctement les faisceaux !

2020

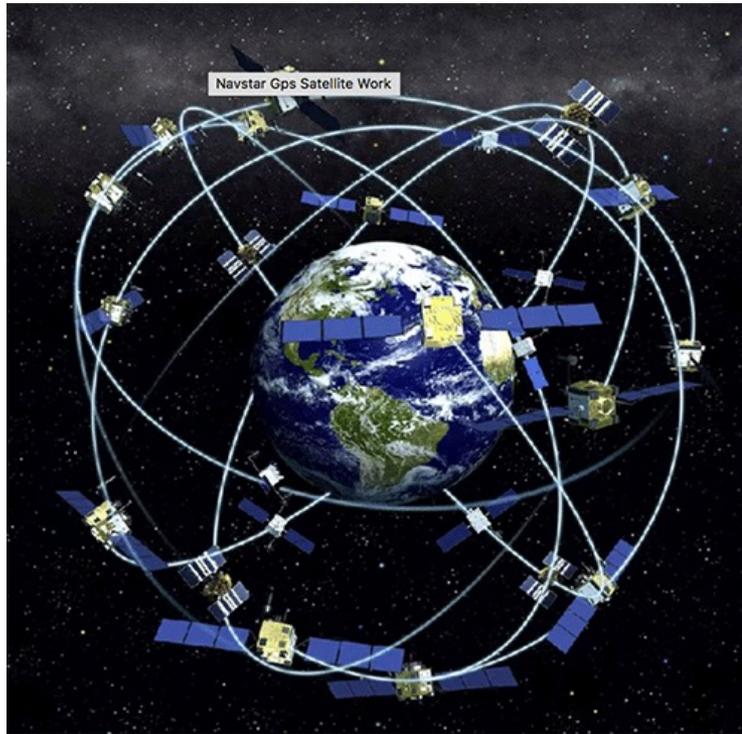
1940

Époque contemporaine

1800

# Les satellites GPS

Les satellites GPS ont également besoin de corrections relativistes



Les satellites orbitent à une vitesse de 14 000 km/h

→ seulement 1/100 de la vitesse de la lumière,

mais un ralentissement de 7 microsecondes par jour

→ erreur sur le positionnement de dix kilomètres par jour sans correction

2020

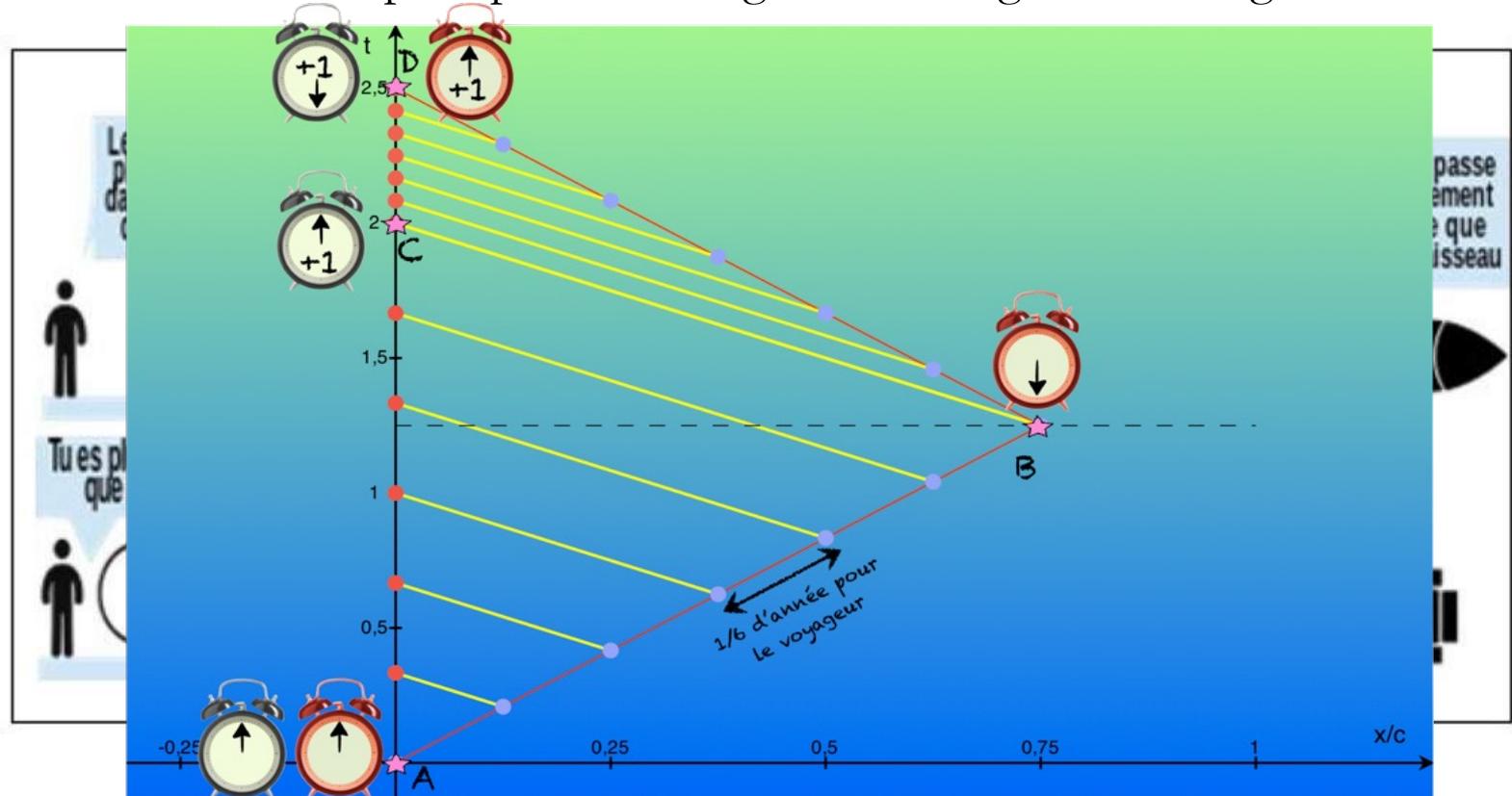
1970

1800

Époque contemporaine

# Le paradoxe des jumeaux

Expérience de pensée concernant le voyage dans l'espace  
 → Proposé par Paul Langevin au congrès de Bologne



→ Cela a des implications fortes si un jour on construit un vaisseau spatial capable de voyager à la vitesse de la lumière !

2020

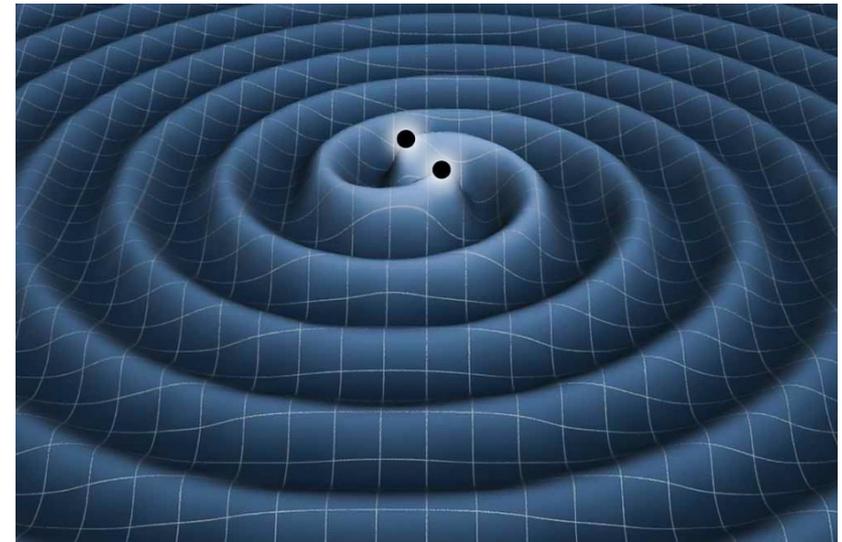
1911

1800

Époque contemporaine

# Détection des ondes gravitationnelles

On utilise encore l'interférométrie pour détecter de nombreuses ondes dans l'Univers → en 2016, détection des ondes gravitationnelles à l'aide du LIGO aux États-Unis (chaque bras fait 4 km de long !)

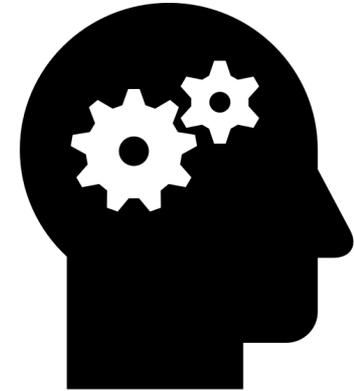


→ Cela confirme définitivement la théorie de la relativité générale d'Einstein (influence de la masse) avec une prédiction 100 ans plus tôt !

2016

Époque contemporaine

1800



# Exercices et TDs

