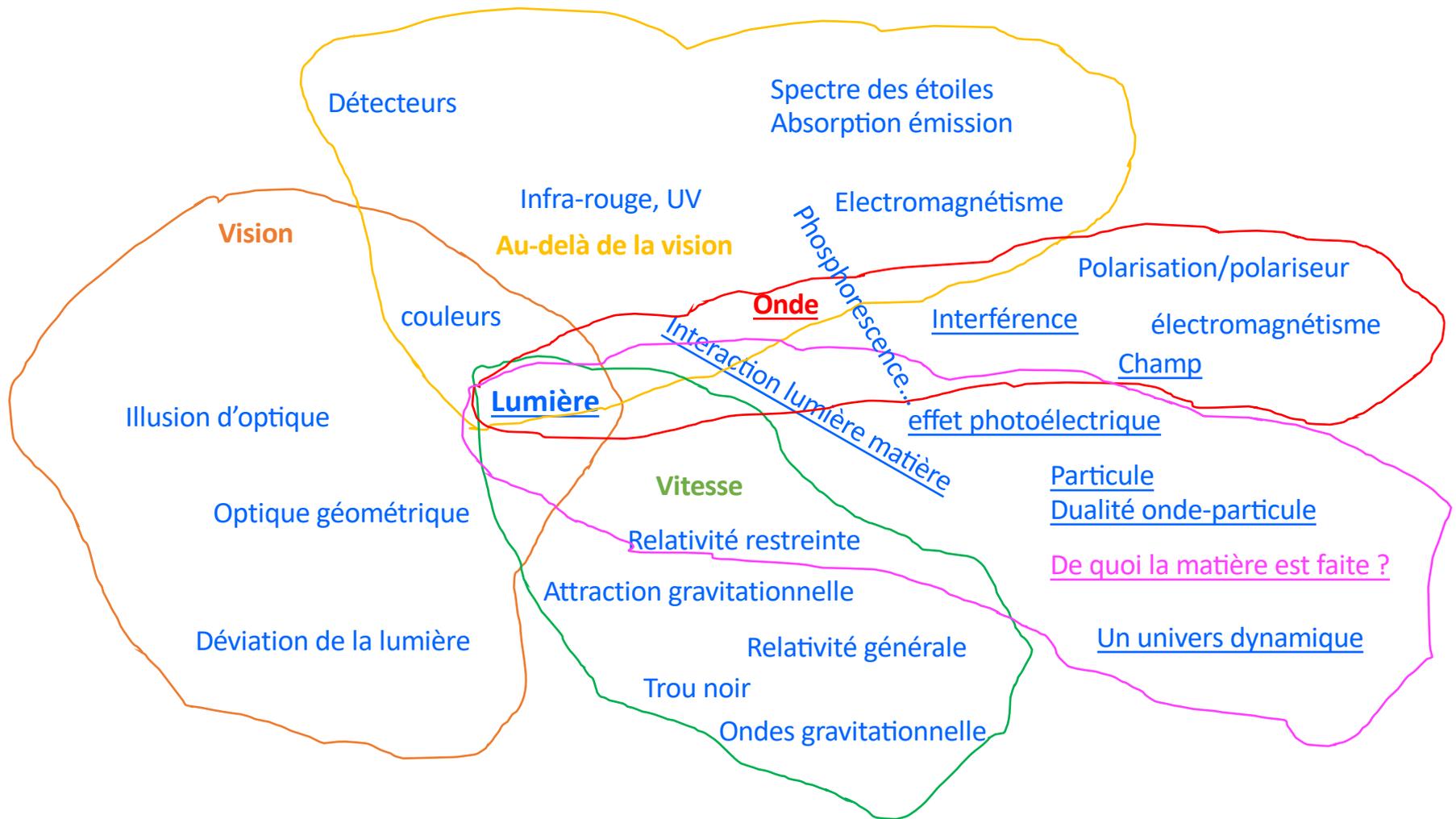


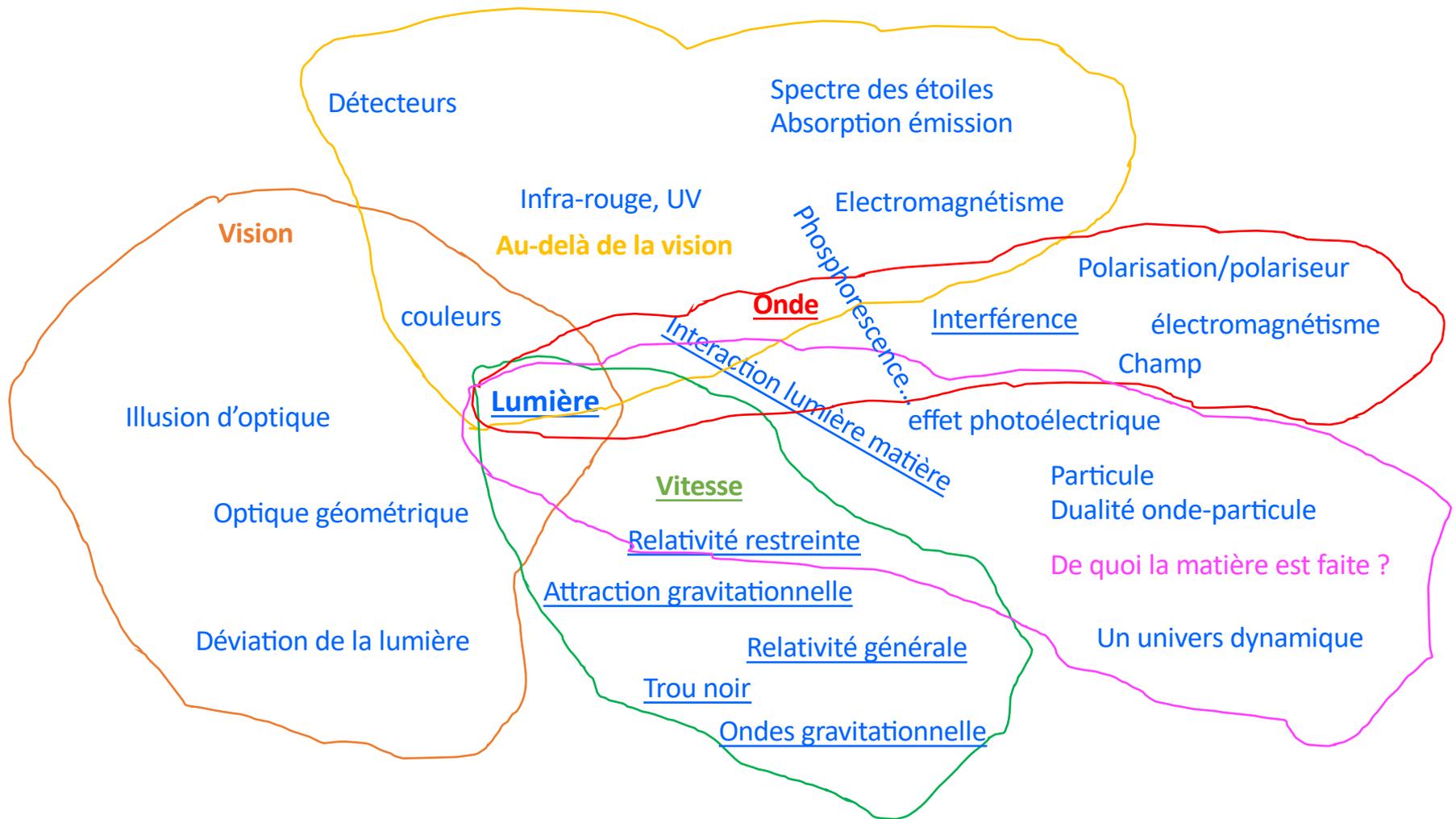
# Physique pour Tous !

Site web : <http://physiquepourtous.unistra.fr>  
Mail: [physiquepourtous@unistra.fr](mailto:physiquepourtous@unistra.fr)

# Mon nuage de mots

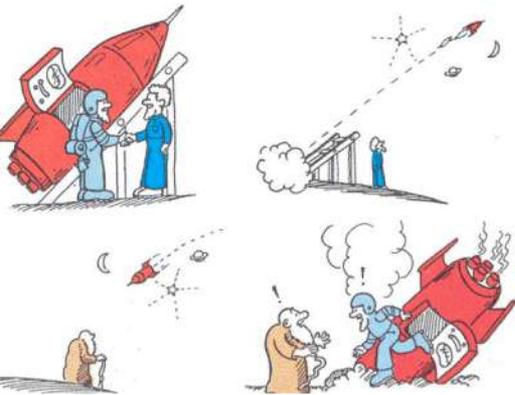


# Mon nuage de mots



# Cours 5 – Lumière & Vitesse

Un monde (pas si) tordu !



**Mardi 21 Mai – Amphi. Fresnel (Institut de Physique)**

**18h30 → 20h - Ouvert à tous, entrée libre & gratuite**

# But et plan de ce cours

---

- Comprendre intuitivement la relativité et pourquoi elle nous semble si contre-intuitive
  - Mise en jambe
  - Historique
  - Relativité selon Galilée et Einstein
    - Comparaison
    - Difficultés
    - Nouvelle vision du monde
  - Relativité générale
    - Principe et géométrie
    - Quelques effets
    - Re-nouvelle vision du monde

# Mise en jambe

---

- A quelle vitesse bip-bip doit-il courir pour échapper au coyote qui court sur le train ?



# Mise en jambe

- A quelle vitesse bip-bip doit-il courir pour échapper au coyote qui court sur le train ?

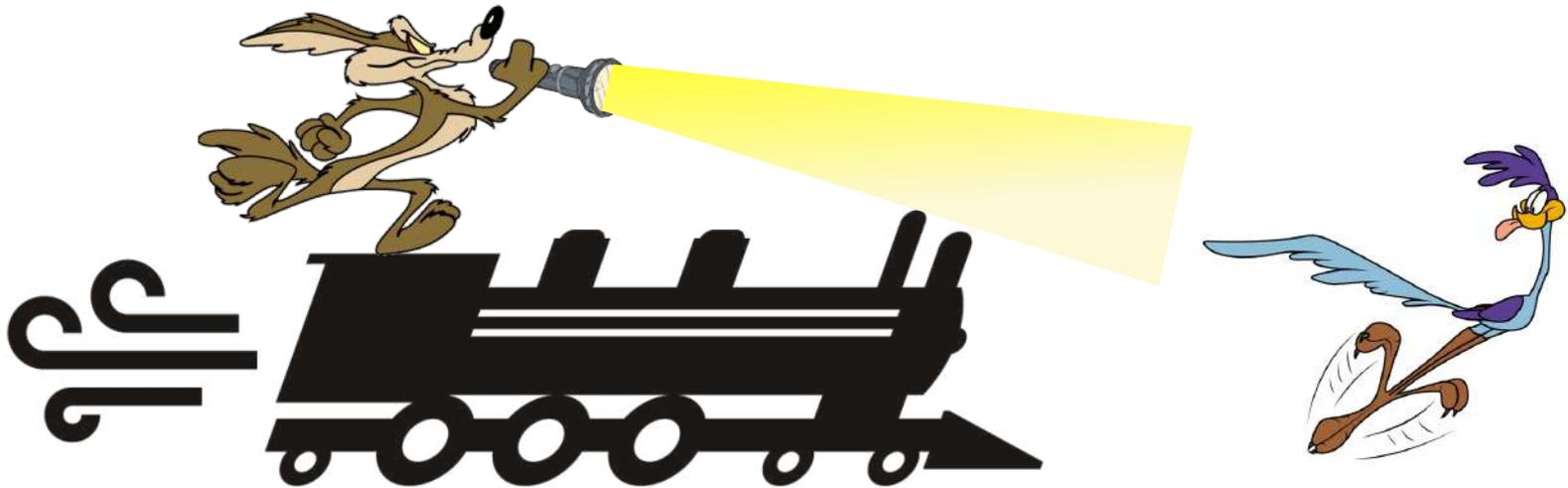
La somme des vitesses  
du train  
du coyote  
( $v_T + v_C$ )



# Mise en jambe

---

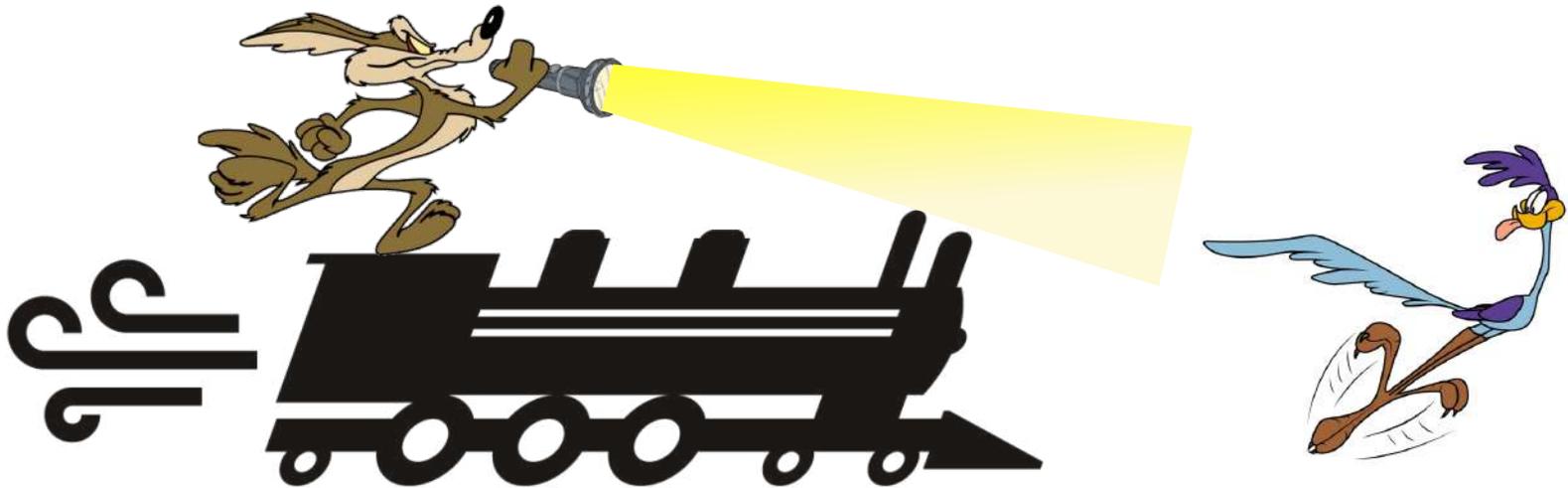
- A quelle vitesse bip-bip doit-il courir pour échapper au faisceau lumineux ?



# Mise en jambe

- A quelle vitesse bip-bip doit-il courir pour échapper au faisceau lumineux ?

La somme des vitesses  
du train  
du coyote  
de la lumière  
( $v_T + v_C + v_L$ )

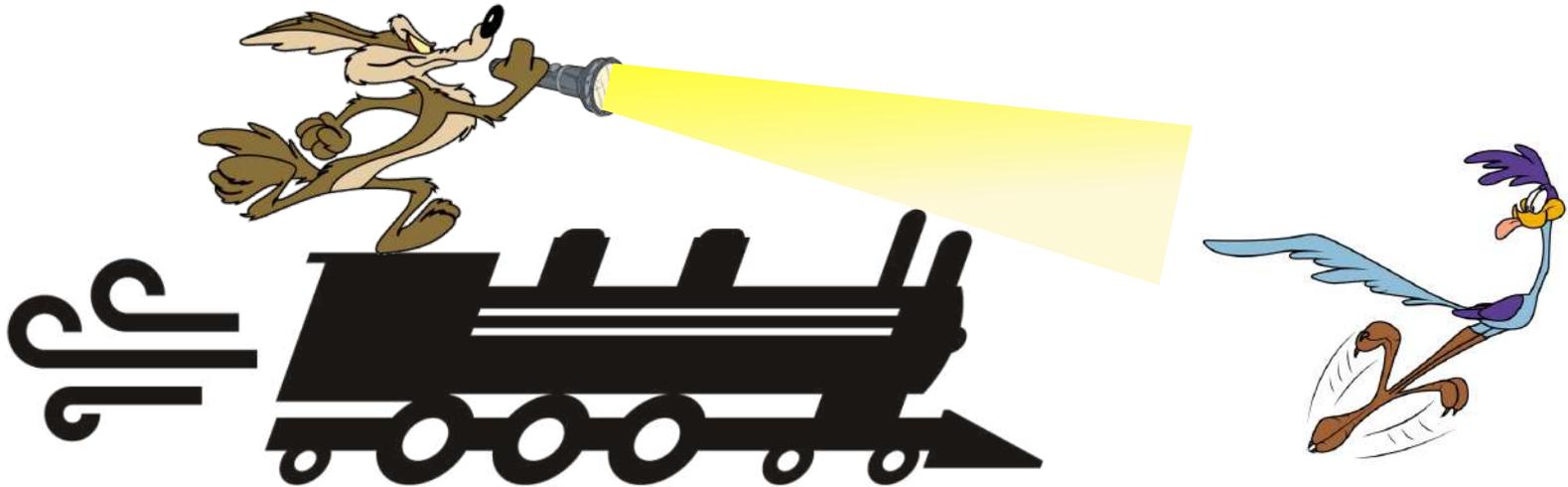


# Mise en jambe

- A quelle vitesse bip-bip doit-il courir pour échapper au faisceau lumineux ?

~~La somme des vitesses  
du train  
du coyote  
de la lumière  
( $v_T + v_C + v_L$ )~~

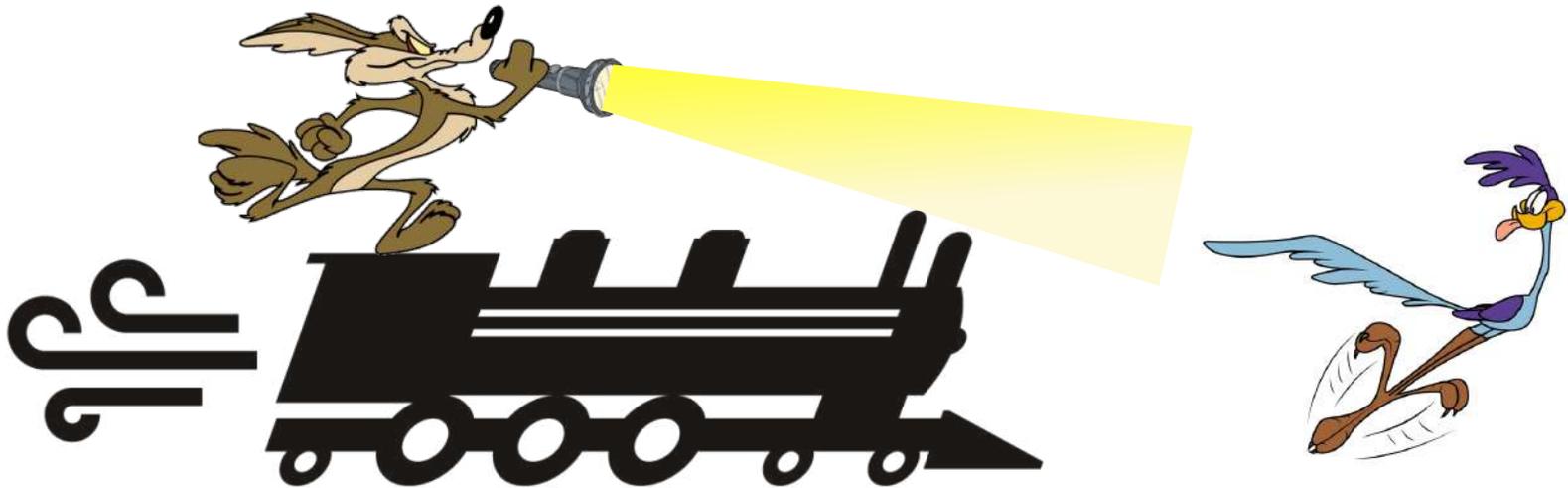
La vitesse de la lumière  
( $v_L = c$ )



# Mise en jambe

---

- Quelques mesures historiques de la vitesse de la lumière
- Comment peut on comprendre cette étrangeté ?
- Quelques conséquences ?



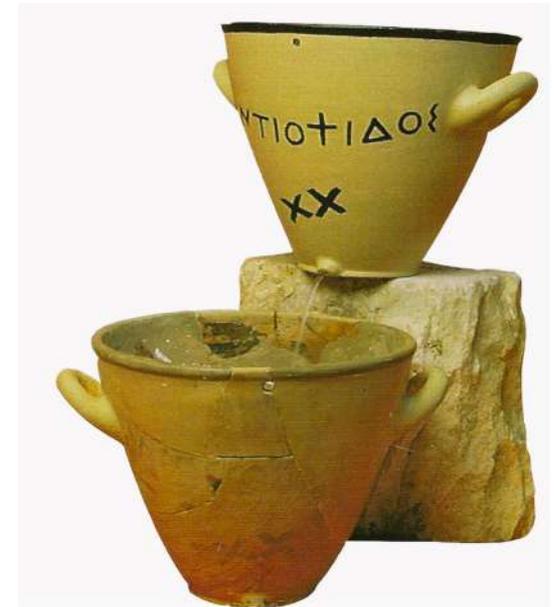
# Historique

- Descartes (1596-1650)

pense que la lumière voyage instantanément d'un point à un autre... Mais propose des expériences pour en mesurer la vitesse lors d'éclipses de soleil

- Galilée (1564-1642)

tente une mesure en 1638. Il conclut : « Si elle ne se propage pas instantanément, elle est extraordinairement rapide. » Bien plus rapide que le son.



# Historique

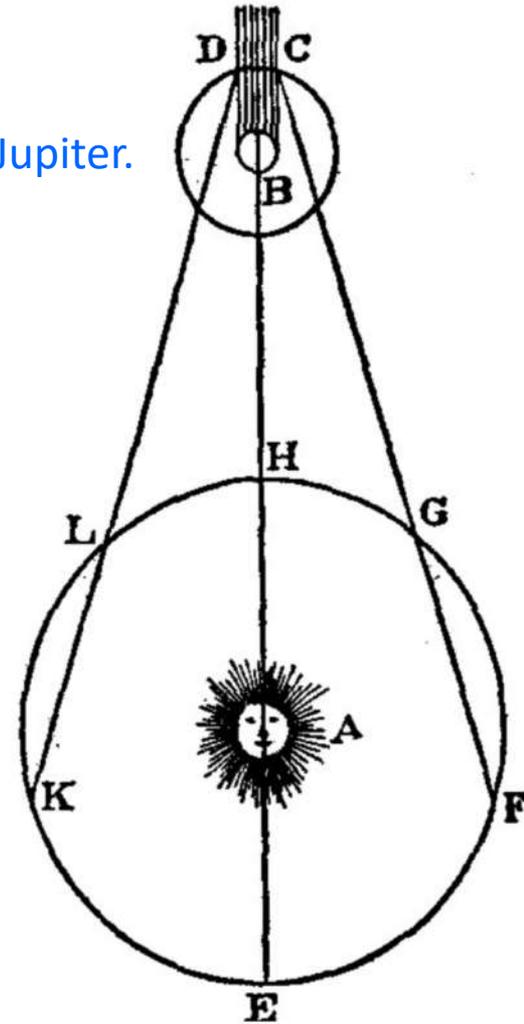
- Rømer (1644-1710)

1676 : mesure la vitesse de la lumière grâce aux satellites de Jupiter.

- **Obtient  $c = 220\,000\text{ km/s}$**   
(73% de la valeur actuelle)

- Ne connaissait pas précisément le diamètre de l'orbite terrestre

- Les éclipses des lunes de Jupiter permettaient aux géographes de déterminer les longitudes



**Figure 1:** Schéma accompagnant le mémoire de Rømer. Les immersions sont observées quand la Terre se rapproche de Jupiter, allant de F vers G. Les émergences sont observées quand la Terre s'éloigne de Jupiter, allant de L vers K.

# Historique

- Bradley (1693-1762)

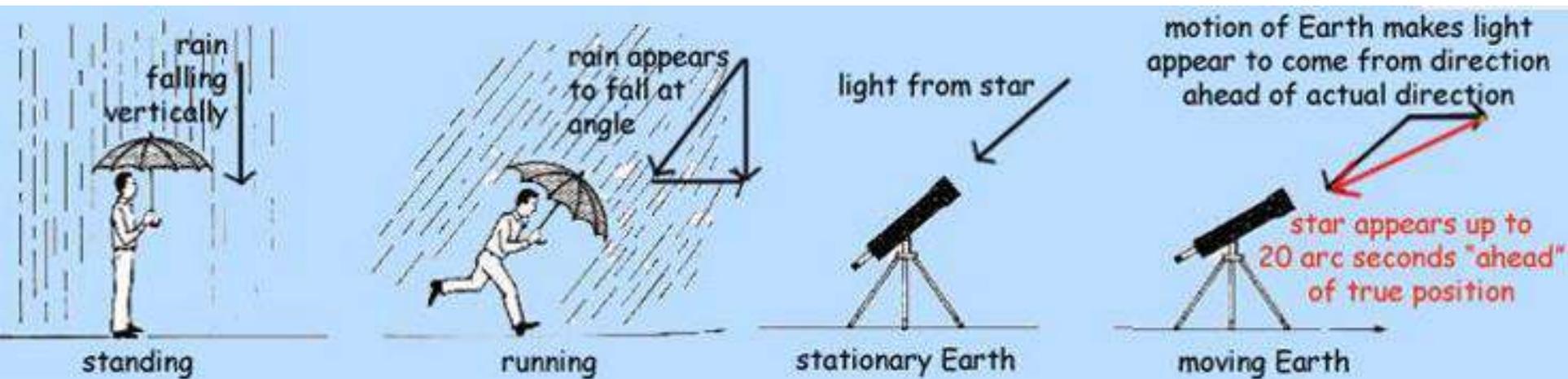
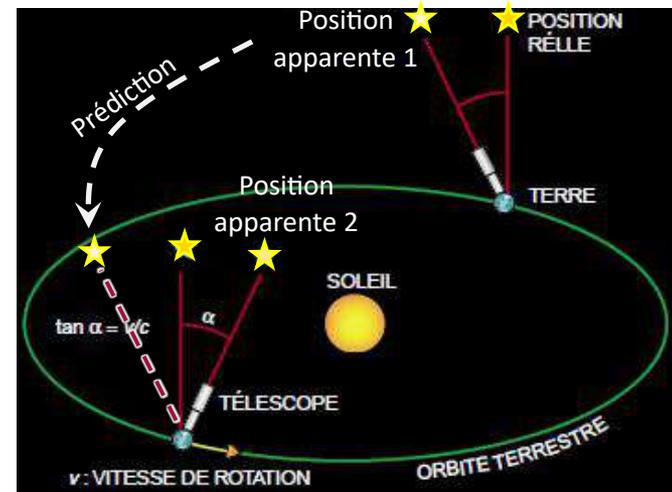
1727 : confirme expérimentalement la rotation de la terre autour du soleil grâce à l'aberration de la lumière.

- **$c = 301000 \text{ km/s}$**   
(100,4 % de la valeur actuelle)

10 210 fois plus rapide  
que la Terre

Note: 20 secondes d'arc

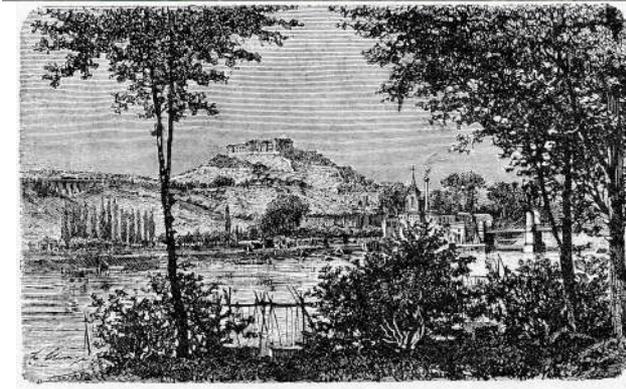
~ 1/100 taille apparente de la Lune



# Historique

- Fizeau (1819-1896)

1849 : mesure la vitesse de la lumière entre Montmartre et le Mont Valérien



SURESNES ET LE MONT VALÉRIEN.

Henri Corbel, Petite histoire du Bois de Boulogne, Albin Michel, 1931. (Henri Corbel, 1868-1942)

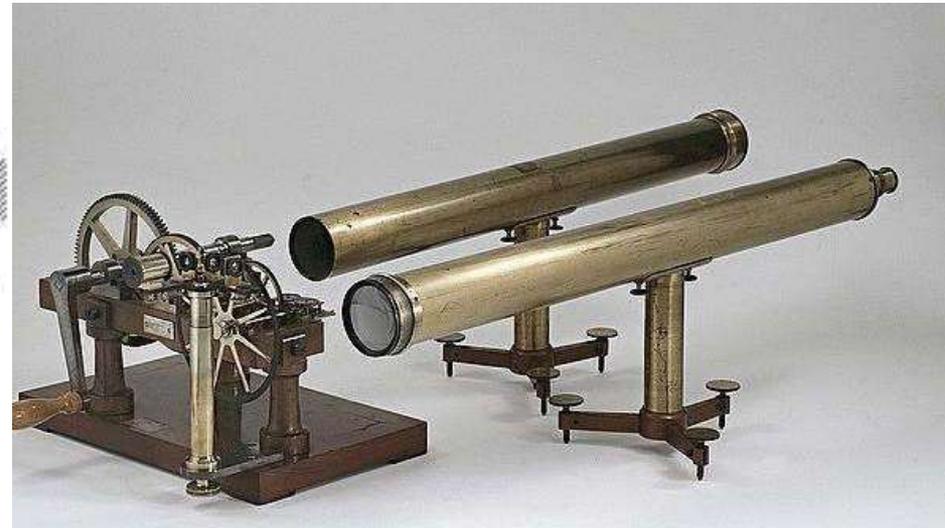
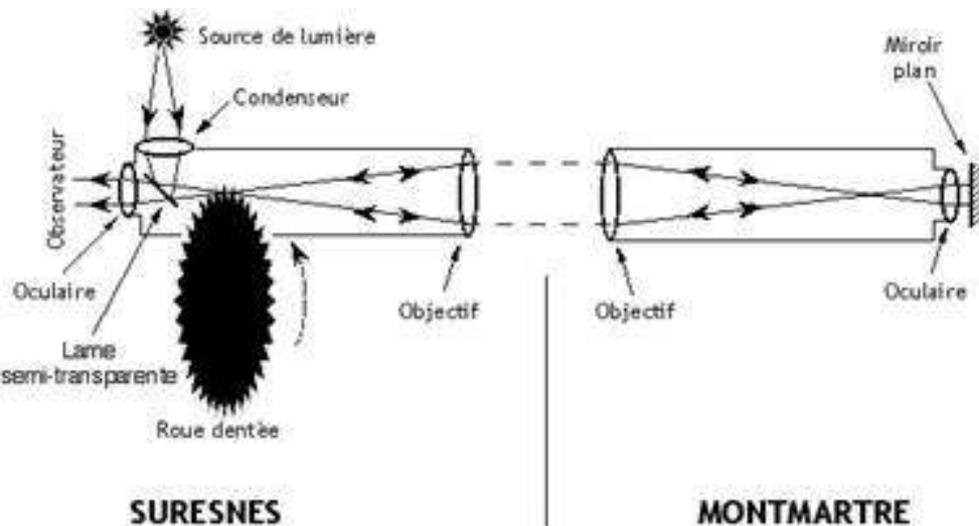
# Historique

- Fizeau (1819-1896)

1849 : méthode de mesure de la vitesse de la lumière utilisant une roue dentée

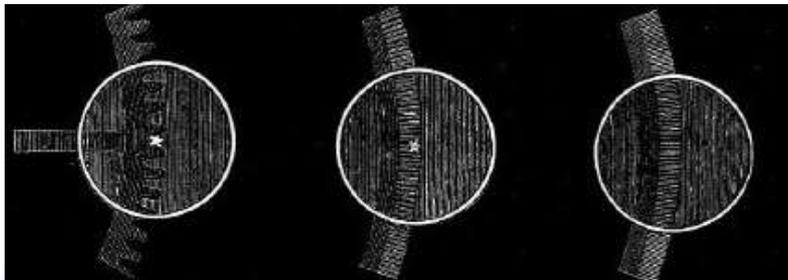
- $c = 313,300 \text{ Km/s}$

(104,5 % de la valeur actuelle)



*M. Fizeau avait placé la lunette à oculaire [à droite de la photo] dans le belvédère d'une maison située à Suresnes sur le mont Valérien, et la lunette à réflexion [au-dessus de la précédente] sur la hauteur de Montmartre, à une distance approximative de 8633 mètres. Le disque [à gauche de la photo], portant sept cent vingt dents, était monté sur un rouage mû par des poids ».*

*(Image Bibliothèque de l'Ecole polytechnique, inventaire général ministère de la Culture)*



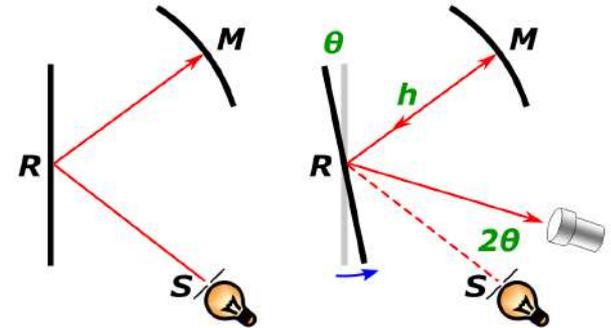
# Historique

- Foucault (1819-1868)

1850 : méthode de mesure avec un miroir tournant

- $c = 298000 \text{ km/s}$

(99,4 % de la valeur actuelle)



## Foucault's Spinning Mirror Device

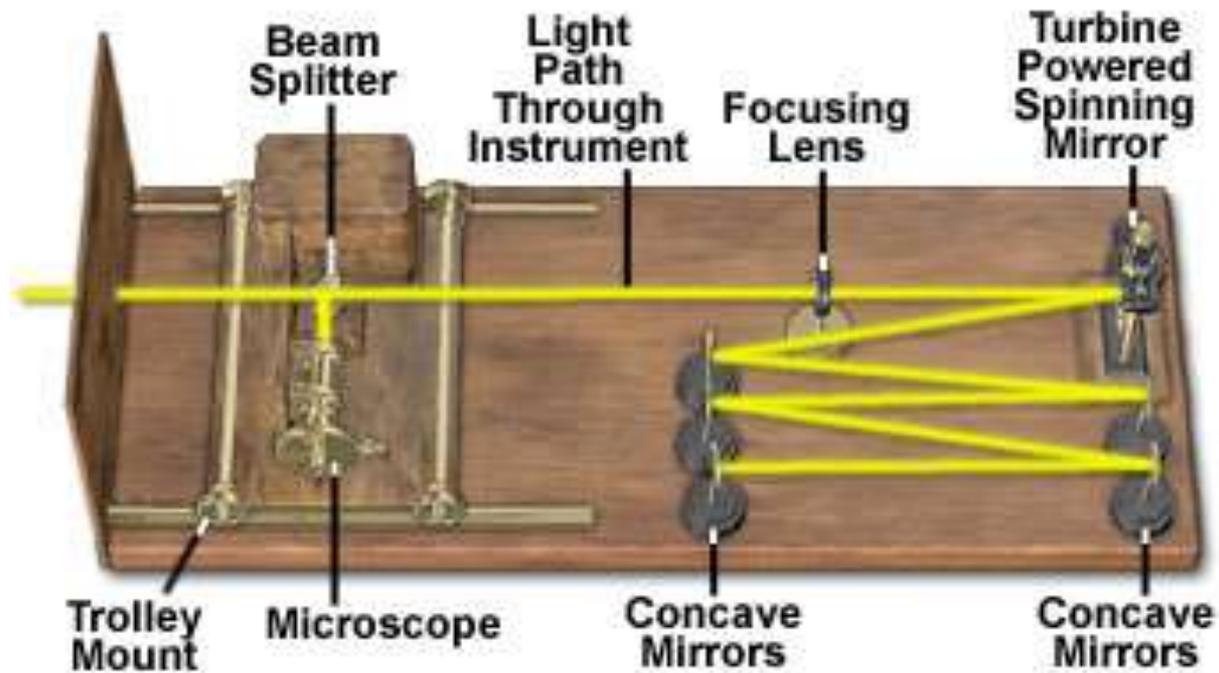


Figure 4

# Parenthèse éthérée

---

- La propagation d'information, d'onde, de force au travers d'un vide absolu est une question qui perturbe les physiciens et reste d'actualité. Pour y répondre, ils ont, à plusieurs reprises, fait appel à une substance hypothétique (l'Éther) qui remplirait l'espace
- Pour la lumière, la question de l'éther est vivement débattue depuis Descartes jusqu'à Maxwell. Au 19<sup>ème</sup> siècle, les prédictions théoriques et les tests expérimentaux sont nombreux.
- **Une de prédictions de la théorie de l'Éther** : la vitesse de la lumière doit être définie par rapport à l'Éther et si la Terre bouge dans cet Éther...  
**La vitesse de la lumière mesurée sur Terre devrait dépendre du mouvement de la Terre.**

# Eppur si muove !

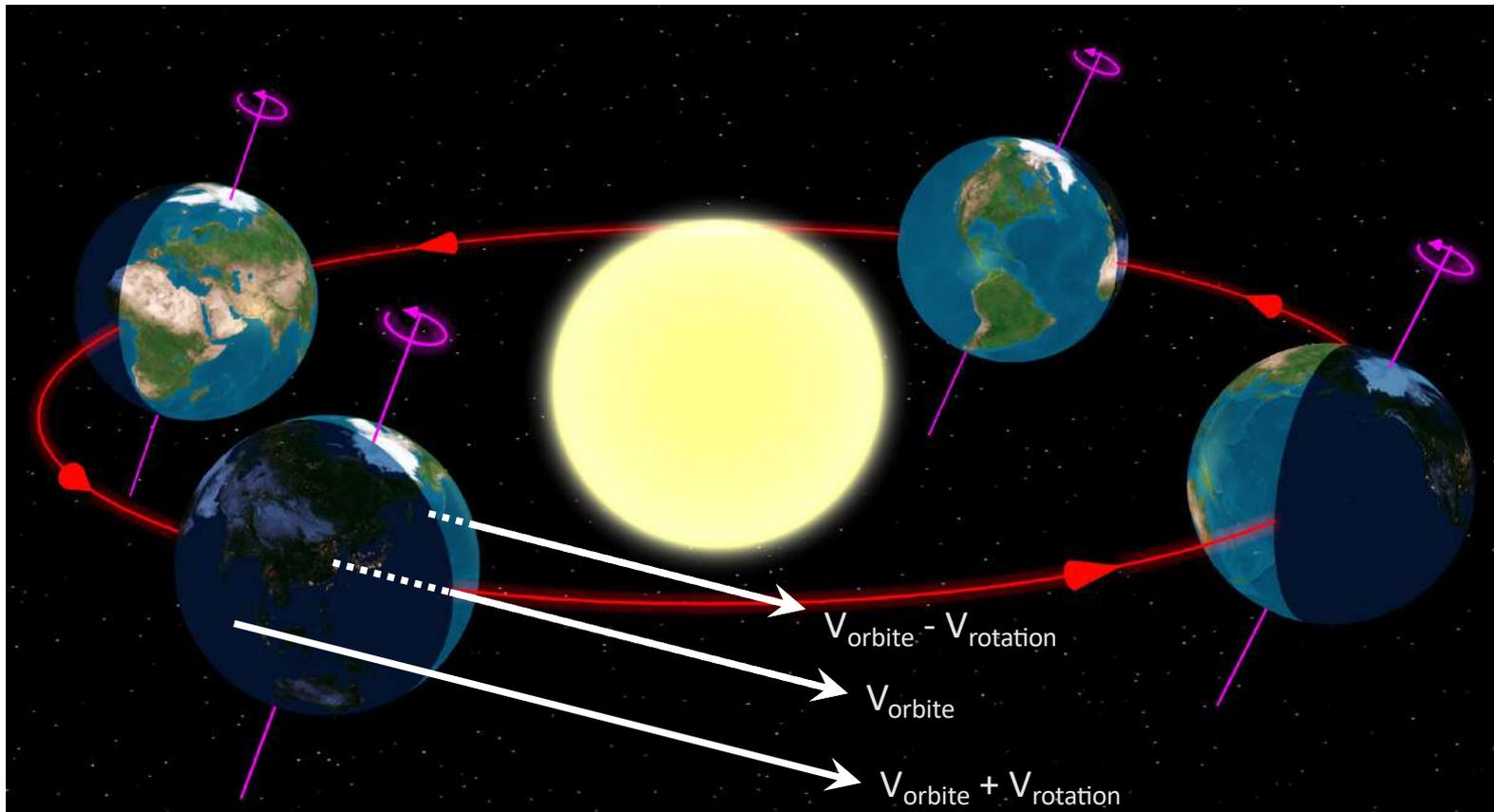
---



# Eppur si muove !

$V_{\text{rotation}}$	$\sim$	0,4 km/s	$c \sim 300\,000$ km/s
$V_{\text{orbite}}$	$\sim$	29,9 km/s	$V_{\text{orbite}} / c \sim 0,01\%$

Si la vitesse de la lumière «  $c$  » était définie par rapport à l'Ether,  
→ Sur Terre, la mesure de «  $c$  » devrait varier d'environ 0,01%



# Historique

- Michelson (1852-1931) & Morley (1838-1923)  
1889 : mesurent la différence de vitesse de la lumière dans deux directions perpendiculaires

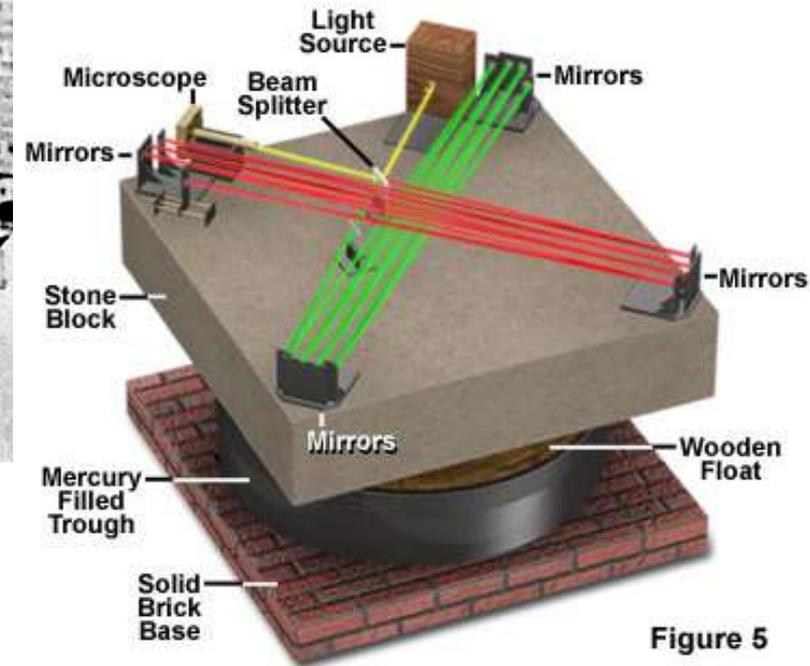
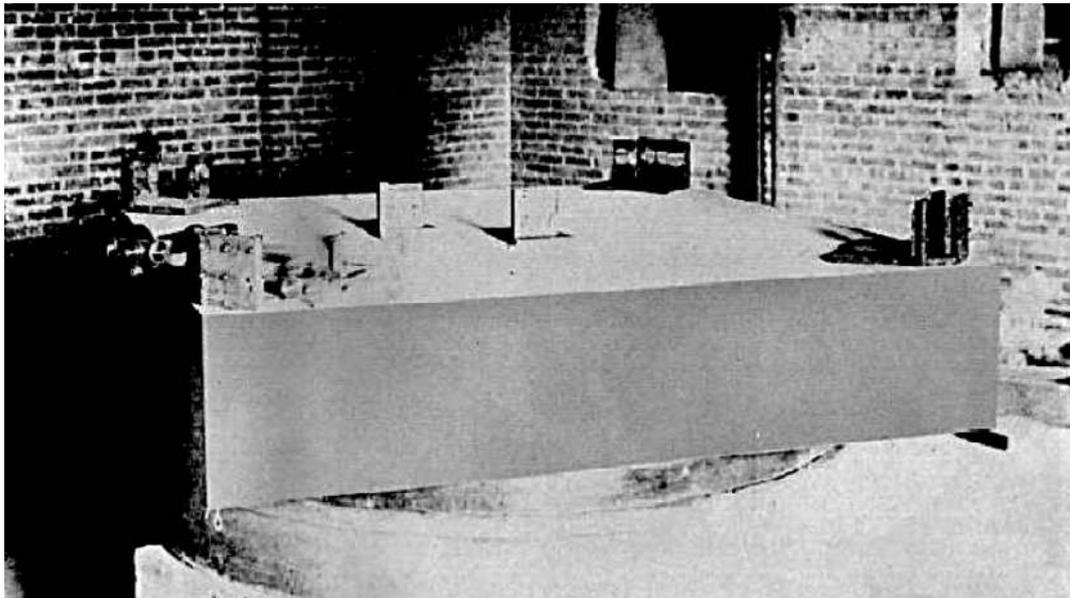
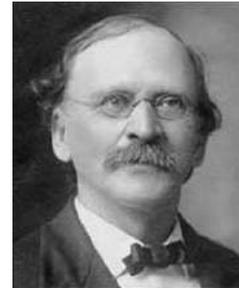
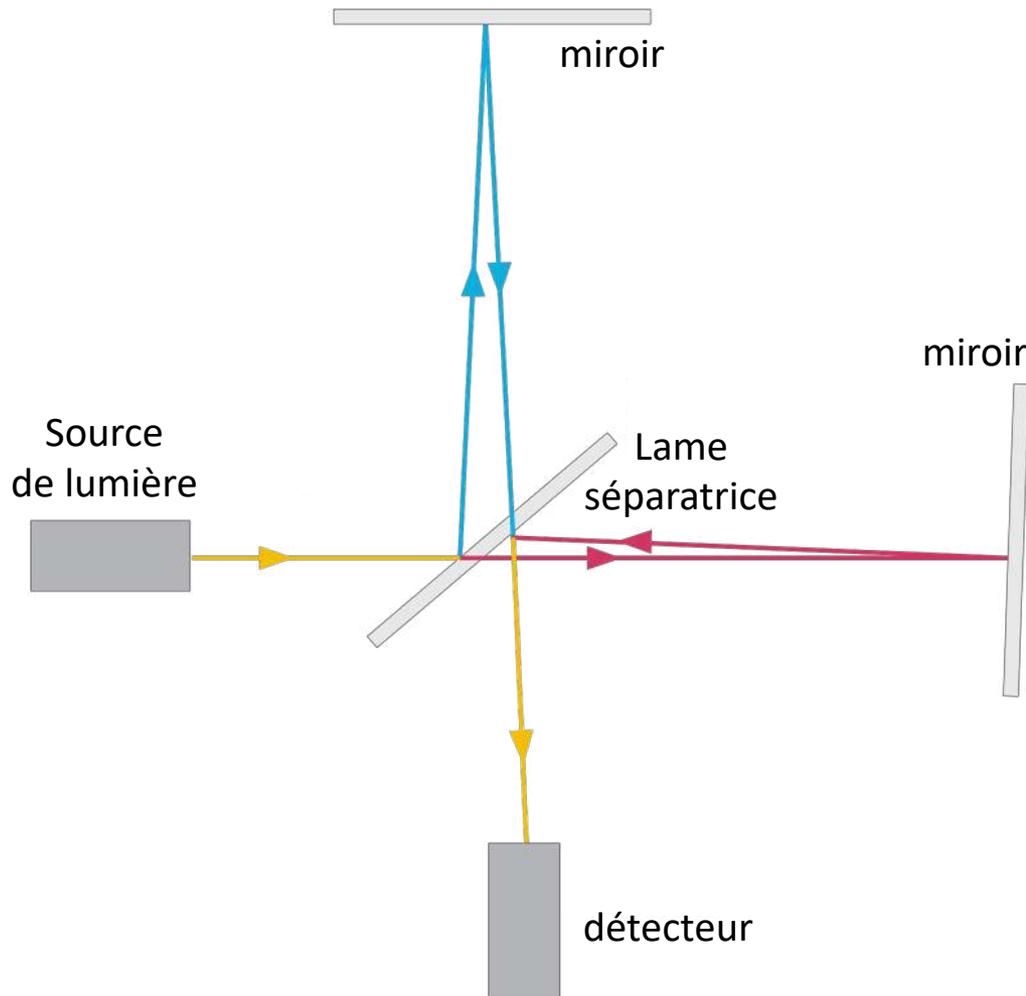


Figure 5

# Historique

- Principe de l'expérience de Michelson-Morley



Supposons que l'Ether est immobile et que la Terre tourne dans cet Ether à 30 km/s

- Un AR de la lumière dans le sens de la marche de la Terre prend:

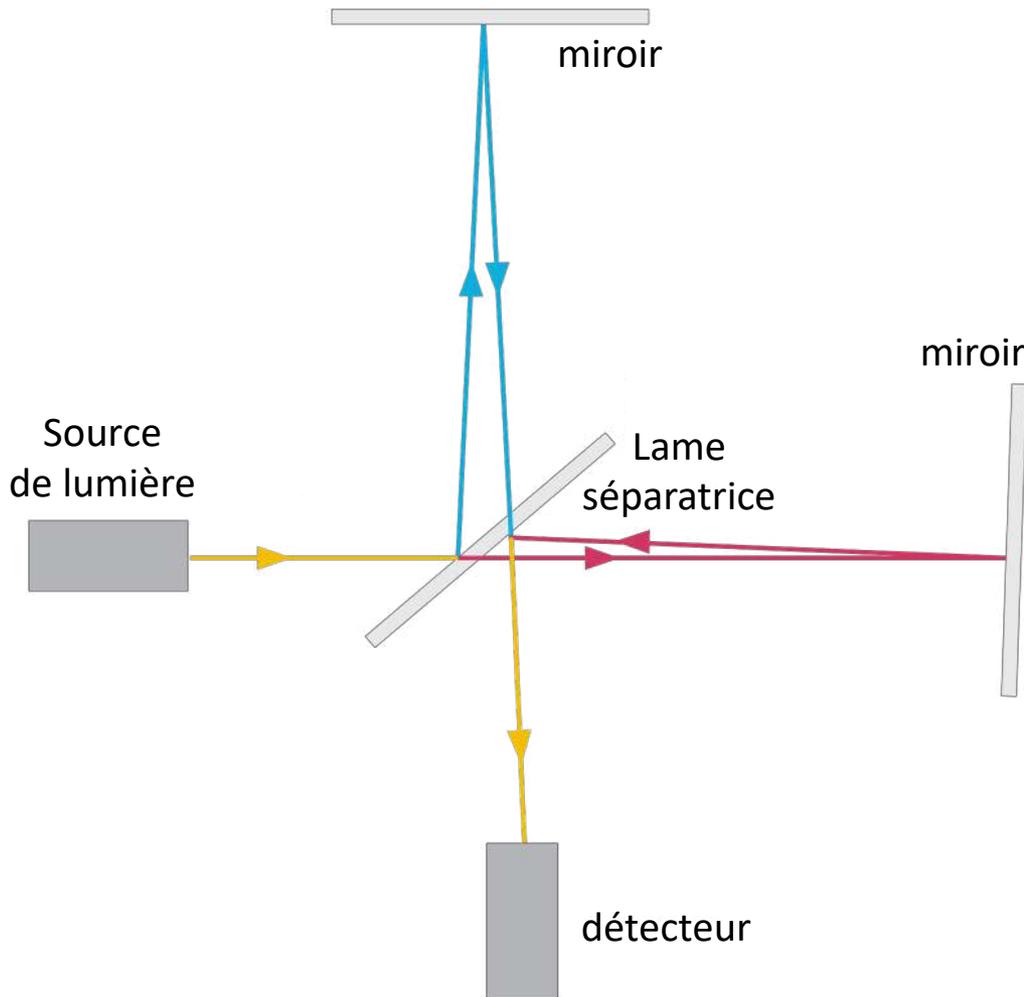
$$t_1 = \frac{D}{c-v} + \frac{D}{c+v} = \frac{2D \cdot c}{c^2 - v^2} \\ \sim \frac{2D}{c} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

- Un AR perpendiculaire à la marche prend

$$t_2 = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} \sim \frac{2D}{c} \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} \right)$$

# Historique

- Principe de l'expérience de Michelson-Morley



Supposons que l'Ether est immobile et que la Terre tourne dans cet Ether.

- La différence de temps entre les deux parcours est de :

$$\Delta t = t_1 - t_2 = D \frac{v^2}{c^3}$$

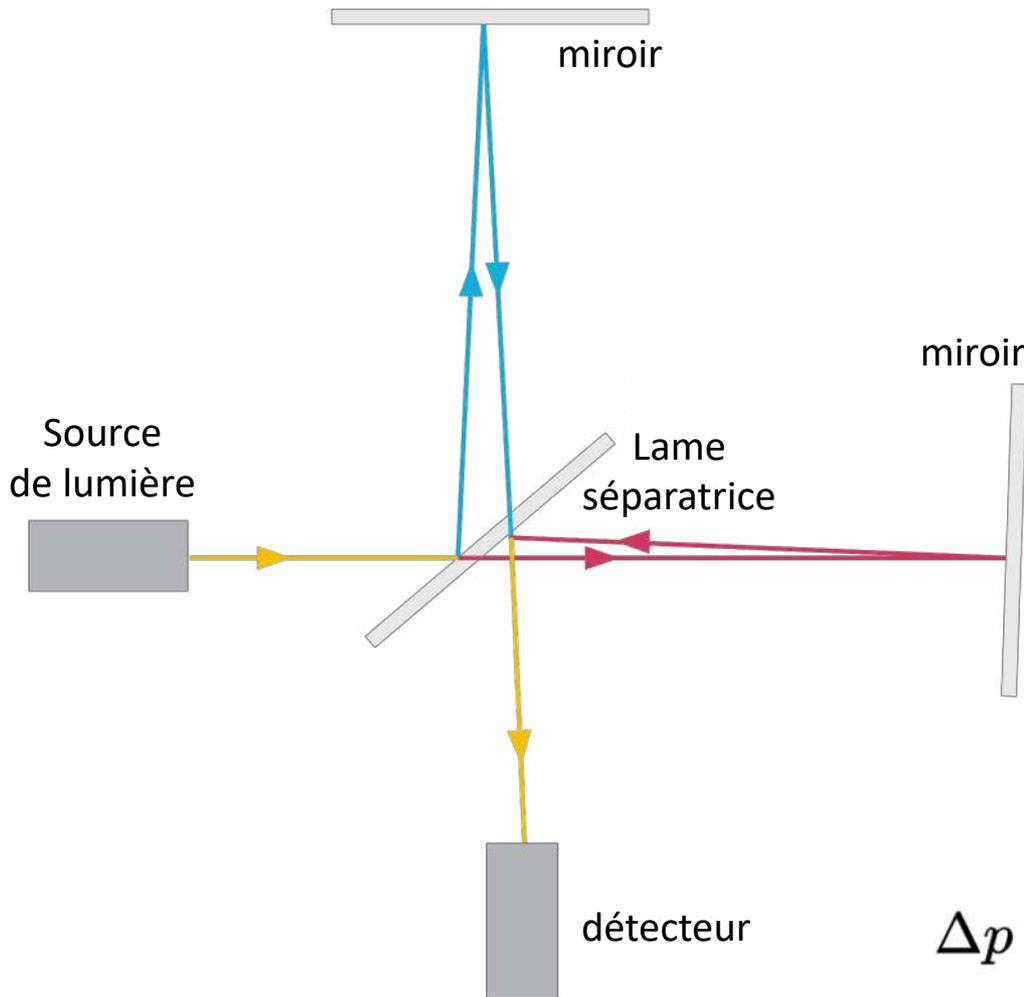
avec  $D \sim 10$  mètres  
 $v \sim 30$  km/s  
 $c \sim 300\,000$  km/s

On attend

$$\Delta t : \sim 10^{-15} \text{ s}$$

# Historique

- Principe de l'expérience de Michelson-Morley



Supposons que l'Ether est immobile et que la Terre tourne dans cet Ether.

- La différence de temps attendue entre les deux parcours est de :

$$\Delta t \sim 10^{-15} \text{ s}$$

- Trop petit pour être mesurée... Mais... La différence de phase entre les deux ondes est:

$$\Delta p = \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{c \cdot \Delta t}{\lambda} \sim 0.2 \text{ frange,}$$

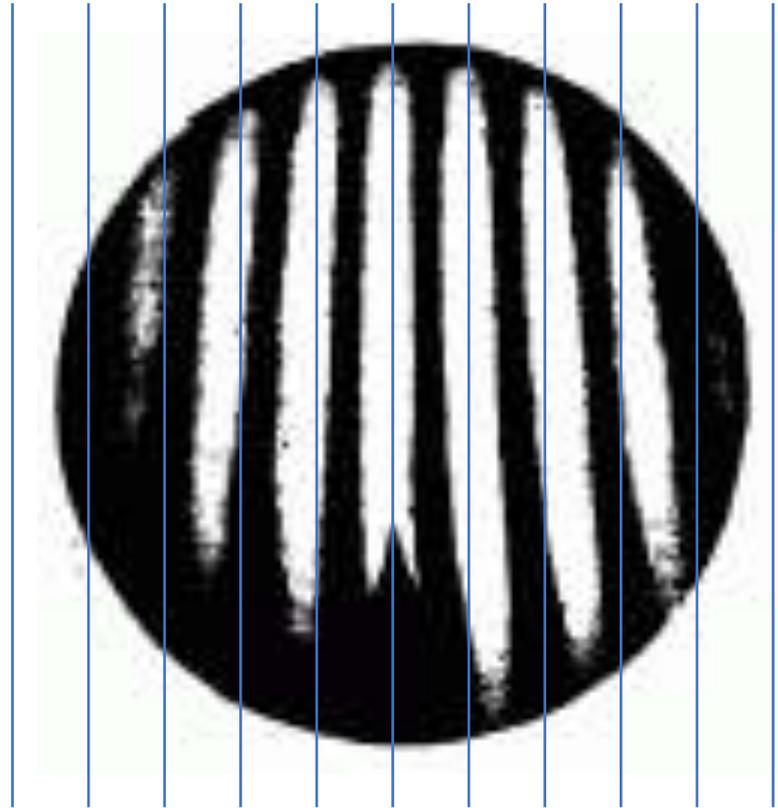
pour  $\lambda = 500 \text{ nm}$

# Historique

---

- Principe de l'expérience de Michelson-Morley

$$\Delta p = \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{c \cdot \Delta t}{\lambda} \sim 0.2 \text{ frange,}$$

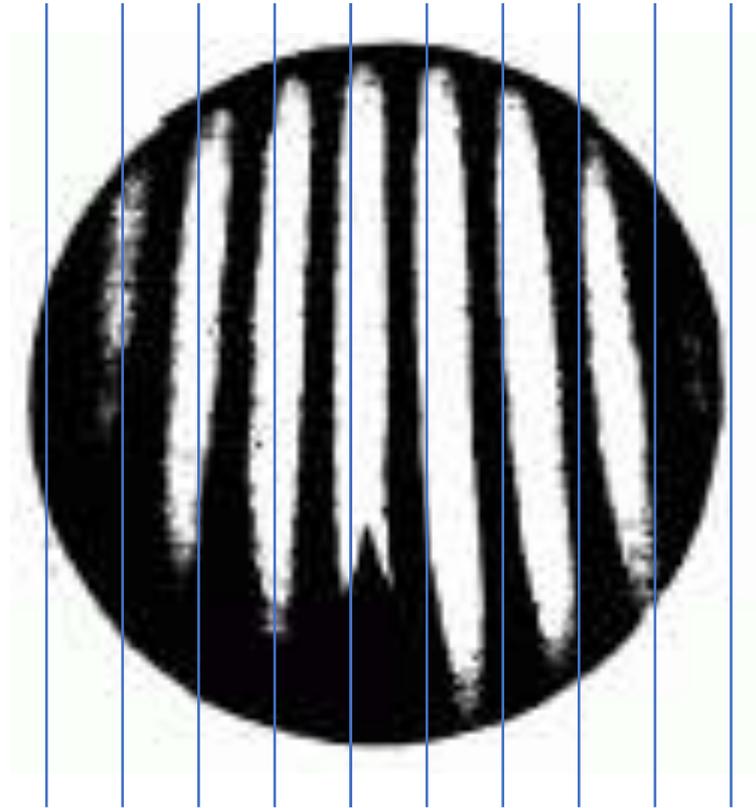


# Historique

---

- Principe de l'expérience de Michelson-Morley

$$\Delta p = \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{c \cdot \Delta t}{\lambda} \sim 0.2 \text{ frange,}$$

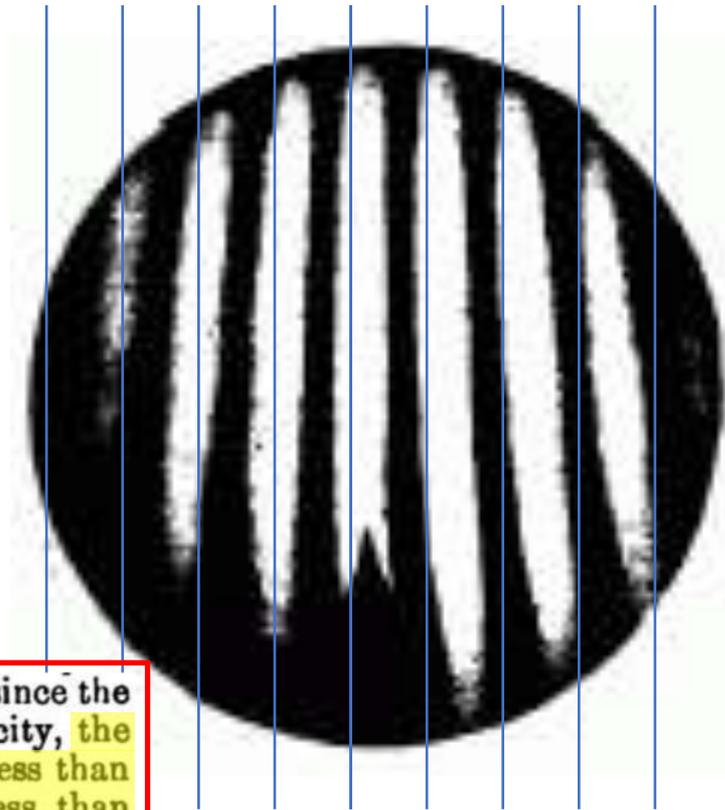


# Historique

- Principe de l'expérience de Michelson-Morley

$$\Delta p = \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{c \cdot \Delta t}{\lambda} \sim 0.2 \text{ frange,}$$

- Aucun déplacement n'est observé...



of this, and probably less than the fortieth part. But since the displacement is proportional to the square of the velocity, the relative velocity of the earth and the ether is probably less than one-sixth the earth's orbital velocity, and certainly less than one-fourth.

# Historique

---

- Einstein (1879-1955)

1905 : Zur Elektrodynamik bewegter Körper

(*De l'électrodynamique des corps en mouvement*)

Examples of this sort, together with the **unsuccessful attempts to discover any motion of the earth relatively to the "light medium,"** suggest that the phenomena of electrodynamics as well as of mechanics possess no properties corresponding to the idea of absolute rest. They **suggest rather that, as has already been shown to the first order of small quantities, the same laws of electrodynamics and optics will be valid for all frames of reference for which the equations of mechanics hold good.**<sup>1</sup> **We will raise this conjecture (the purport of which will hereafter be called the "Principle of Relativity") to the status of a postulate, and also introduce another postulate,** which is only apparently irreconcilable with the former, namely, that **light is always propagated in empty space with a definite velocity  $c$  which is independent of the state of motion of the emitting body.** These two postulates suffice for the attainment of a simple and consistent theory of the electrodynamics of moving bodies based on Maxwell's theory for stationary bodies.

# Historique

---

- Einstein (1879-1955)

1905 : Zur Elektrodynamik bewegter Körper

*(De l'électrodynamique des corps en mouvement)*

2 postulats :

- *Tous les repères inertiels sont également valables. Les lois physiques y sont les mêmes. (principe de relativité)*
- *la vitesse de la lumière doit être identique dans tous les référentiels inertiels.*

La théorie de la relativité restreinte

→ Vérité théâtrale et loi intersidérale

Étienne Klein et Jacques Perry-Salkow, *Anagrammes renversantes* (Flammarion)

# Le principe de relativité

---

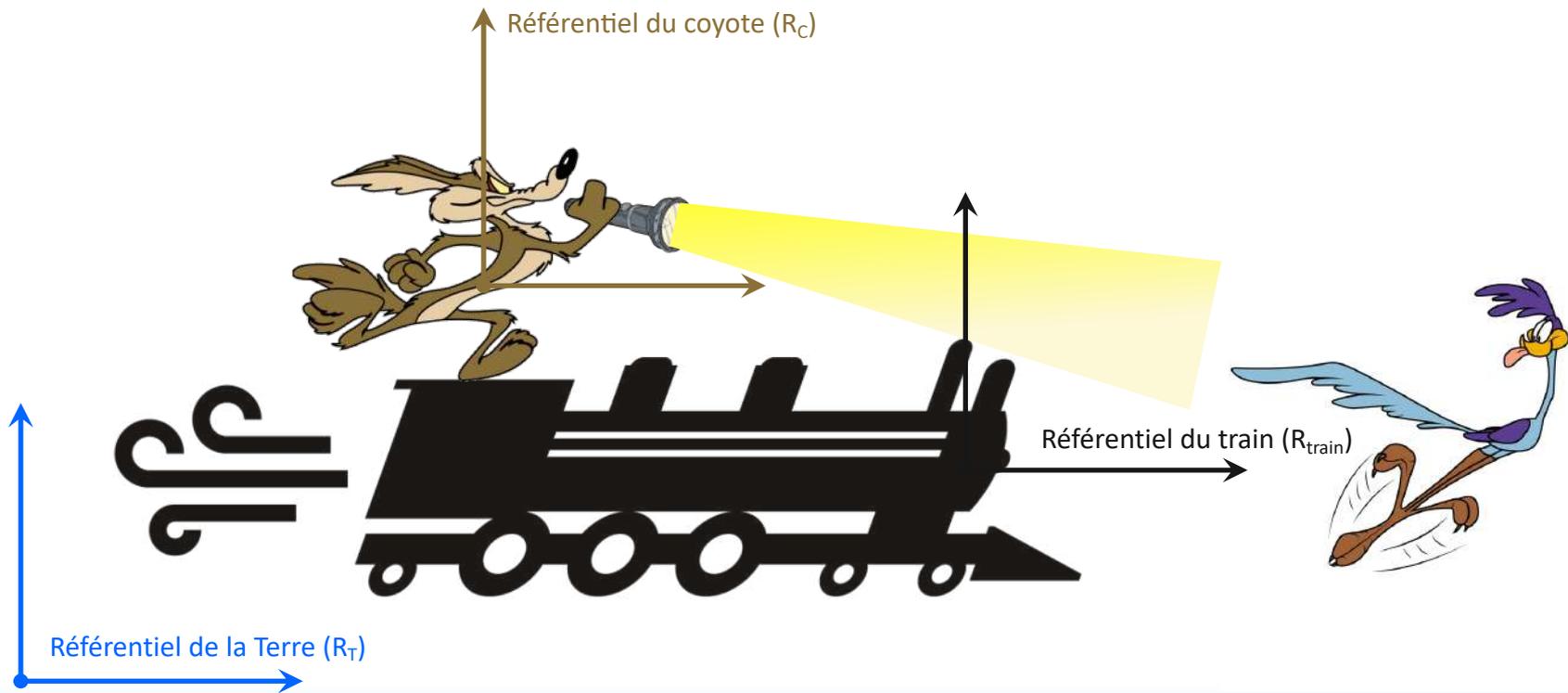
- Gedankenexperiment... Expérience de pensée... Imaginez



# Le principe de relativité

- Selon Galilée

- $V_{\text{coyote}}(R_T) = V_{\text{coyote}}(R_{\text{train}}) + V_{\text{train}}(R_T)$
- $c(R_T) = c(R_{\text{coyote}}) + V_{\text{coyote}}(R_T)$

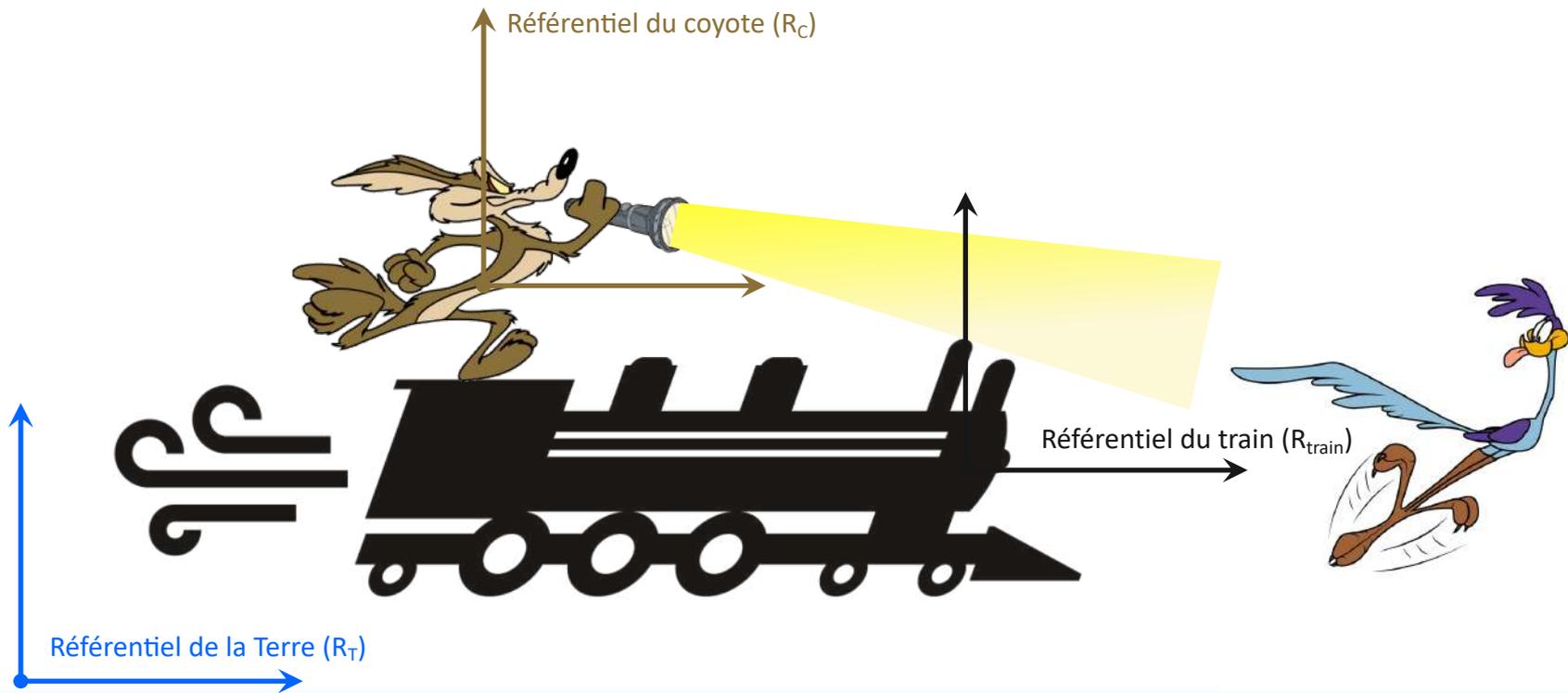


# Le principe de relativité

- Selon Galilée

- $V_{\text{coyote}}(R_T) = V_{\text{coyote}}(R_{\text{train}}) + V_{\text{train}}(R_T)$

- $c(R_T) = c(R_{\text{coyote}}) + V_{\text{coyote}}(R_T) > c(R_{\text{coyote}})$

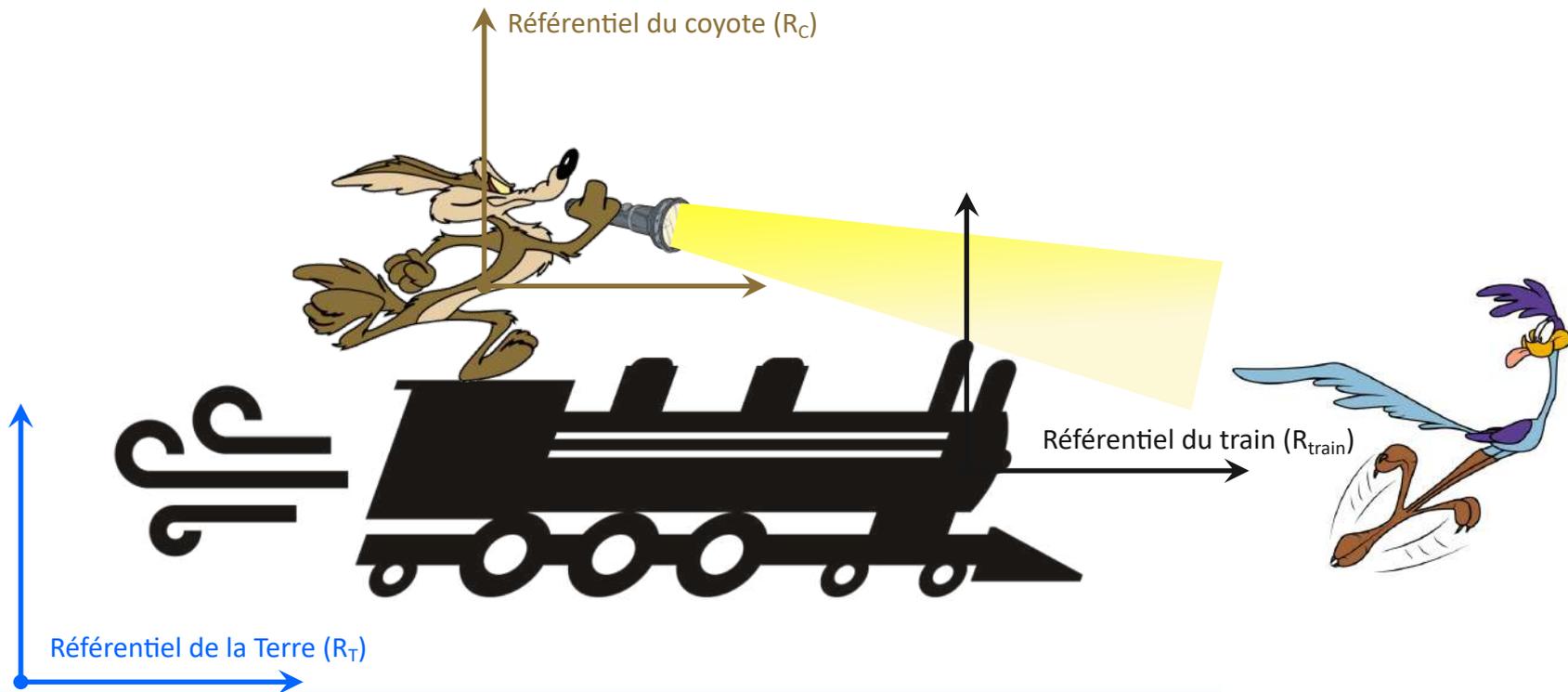


# Le principe de relativité

## • Selon Galilée

- ~~$V_{\text{coyote}}(R_T) = V_{\text{coyote}}(R_{\text{train}}) + V_{\text{train}}(R_T)$~~
- ~~$c(R_T) = c(R_{\text{coyote}}) + V_{\text{coyote}}(R_T) > c(R_{\text{coyote}})$~~

Incompatible avec  
les observations et  
le 2<sup>ème</sup> postulat  
d'Einstein



# Le principe de relativité

---

- Galilée et notre intuition nous disent:
  - On additionne des distances, des temps, des vitesses...
- On fait le raisonnement suivant. Après un temps donné ( $t$ ),
  - le train avance de
    - $D_{\text{train},T} = V_{\text{train},T} * t$
  - Le coyote avance par rapport au train de
    - $D_{\text{coyote,train}} = V_{\text{coyote,train}} * t$
  - Le déplacement du coyote par rapport à la Terre est donc
    - $D_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote,train}} + D_{\text{train},T}$   
 $= (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t$
  - Et la vitesse du coyote par rapport à la Terre est donc
    - $V_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote},T}/t = (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t/t$   
 $= V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}$

# Le principe de relativité

- Galilée et notre intuition nous disent:
  - On additionne des distances, des temps, des vitesses...
  - On fait le raisonnement suivant. Après un temps donné ( $t$ ),
    - le train avance de
      - $D_{\text{train},T} = V_{\text{train},T} * t$
    - Le coyote avance par rapport au train de
      - $D_{\text{coyote,train}} = V_{\text{coyote,train}} * t$
    - Le déplacement du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $D_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote,train}} + D_{\text{train},T}$   
 $= (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t$
    - Et la vitesse du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $V_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote},T} / t = (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t / t$   
 $= V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}$



Où est  
l'erreur ?

# Le principe de relativité



- Galilée et notre intuition nous disent :
  - On additionne des distances, des temps, des vitesses...  
**On sait qu'il existe des quantités qui ne s'additionnent pas comme cela**
  - On fait le raisonnement suivant. Après un temps donné ( $t$ ),
    - le train avance de
      - $D_{\text{train},T} = V_{\text{train},T} * t$
    - Le coyote avance par rapport au train de
      - $D_{\text{coyote,train}} = V_{\text{coyote,train}} * t$
    - Le déplacement du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $D_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote,train}} + D_{\text{train},T}$   
 $= (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t$
    - Et la vitesse du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $V_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote},T} / t = (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t / t$   
 $= V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}$

# Le principe de relativité



- Galilée et notre intuition nous disent :
  - On additionne des distances, des temps, des vitesses...

On sait qu'il existe des quantités qui ne s'additionnent pas comme cela
  - On fait le raisonnement suivant. Après un temps donné ( $t$ ),
    - le train avance de
      - $D_{\text{train},T} = V_{\text{train},T} * t$       OK, cela ressemble à la définition de la vitesse 😊
    - Le coyote avance par rapport au train de
      - $D_{\text{coyote,train}} = V_{\text{coyote,train}} * t$       OK...
    - Le déplacement du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $D_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote,train}} + D_{\text{train},T}$   
 $= (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t$
    - Et la vitesse du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $V_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote},T} / t = (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t / t$   
 $= V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}$       OK...

# Le principe de relativité



- Galilée et notre intuition nous disent :
  - On additionne des distances, des temps, des vitesses...

On sait qu'il existe des quantités qui ne s'additionnent pas comme cela
  - On fait le raisonnement suivant. Après un temps donné ( $t$ ),
    - le train avance de
      - $D_{\text{train},T} = V_{\text{train},T} * t$  OK, cela ressemble à la définition de la vitesse ☺
    - Le coyote avance par rapport au train de
      - $D_{\text{coyote,train}} = V_{\text{coyote,train}} * t$  OK...
    - Le déplacement du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $D_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote,train}} + D_{\text{train},T}$   
 $= (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t$ 

Peut-on additionner des distances mesurées dans des référentiels différents ?
    - Et la vitesse du coyote par rapport à la Terre est donc
      - $V_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote},T}/t = (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t/t$   
 $= V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}$  OK...

# Le principe de relativité



- Galilée et notre intuition nous disent :

- On additionne des distances, des temps, des vitesses...

On sait qu'il existe des quantités qui ne s'additionnent pas comme cela

- On fait le raisonnement suivant **Après un temps donné (t),** Peut-on définir un tel temps « t » partout ?

- le train avance de

- $D_{\text{train},T} = V_{\text{train},T} * t$  OK, cela ressemble à la définition de la vitesse 😊

- Le coyote avance par rapport au train de

- $D_{\text{coyote,train}} = V_{\text{coyote,train}} * t$  OK...

- Le déplacement du coyote par rapport à la Terre est donc

- $D_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote,train}} + D_{\text{train},T}$   
 $= (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t$  Peut-on additionner des distances mesurées dans des référentiels différents ?

- Et la vitesse du coyote par rapport à la Terre est donc

- $V_{\text{coyote},T} = D_{\text{coyote},T} / t = (V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}) * t / t$   
 $= V_{\text{train},T} + V_{\text{coyote,train}}$  OK...

# Le principe de relativité restreinte (Rappel)

---

- Einstein (1879-1955)

1905 : Zur Elektrodynamik bewegter Körper

*(De l'électrodynamique des corps en mouvement)*

2 postulats :

- *Tous les repères inertiels sont également valables. Les lois physiques y sont les mêmes. (principe de relativité)*
- *la vitesse de la lumière doit être identique dans tous les référentiels inertiels. Quel que soit le mouvement de la source.*

→ Le temps n'est plus absolu

→ Les distances de deux référentiels ne peuvent s'additionner simplement.

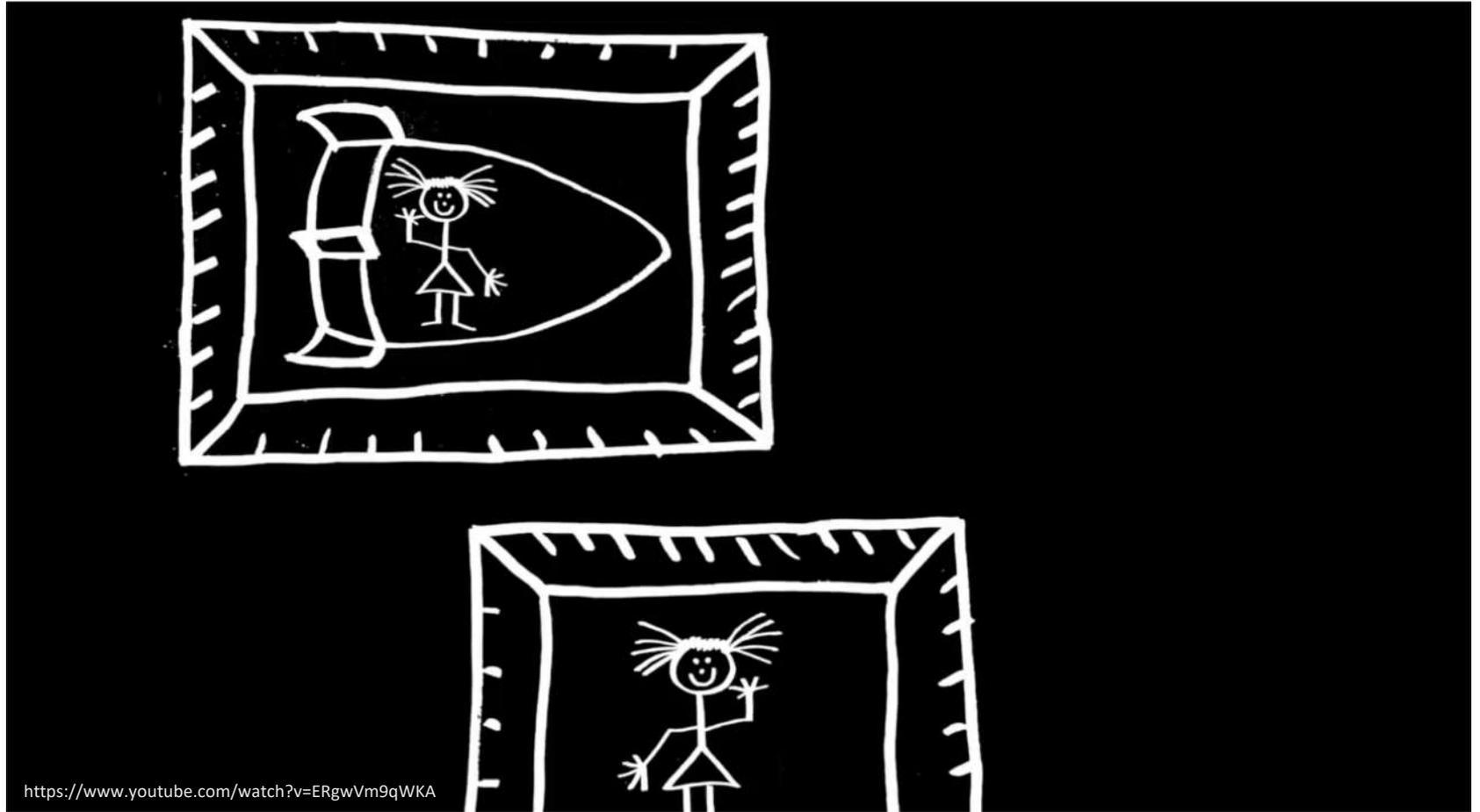
La théorie de la relativité restreinte

→ Vérité théâtrale et loi intersidérale

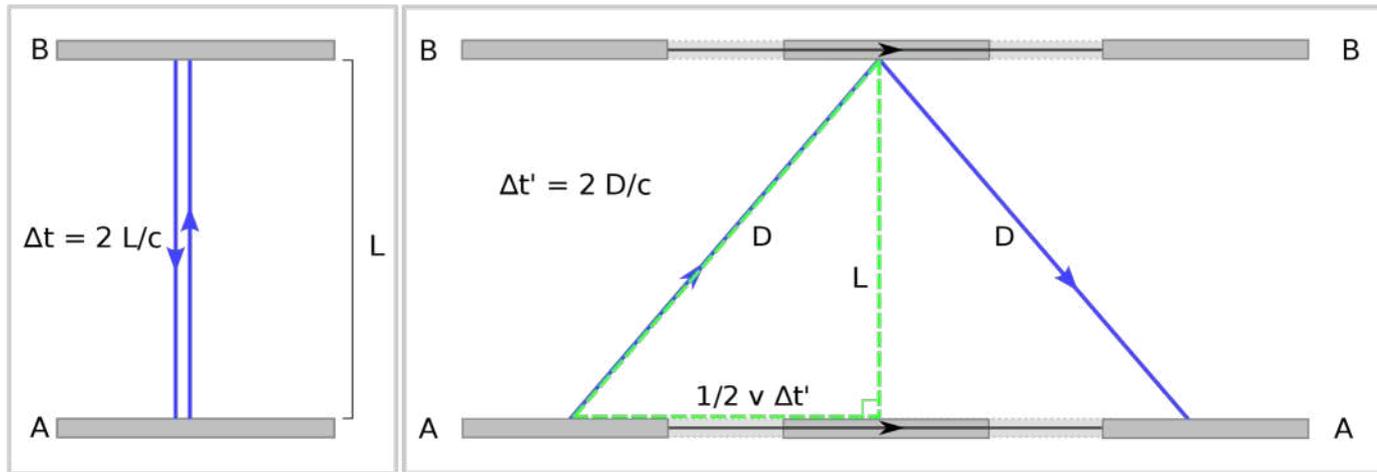
Étienne Klein et Jacques Perry-Salkow, *Anagrammes renversantes* (Flammarion)

# Dilatation du temps

---



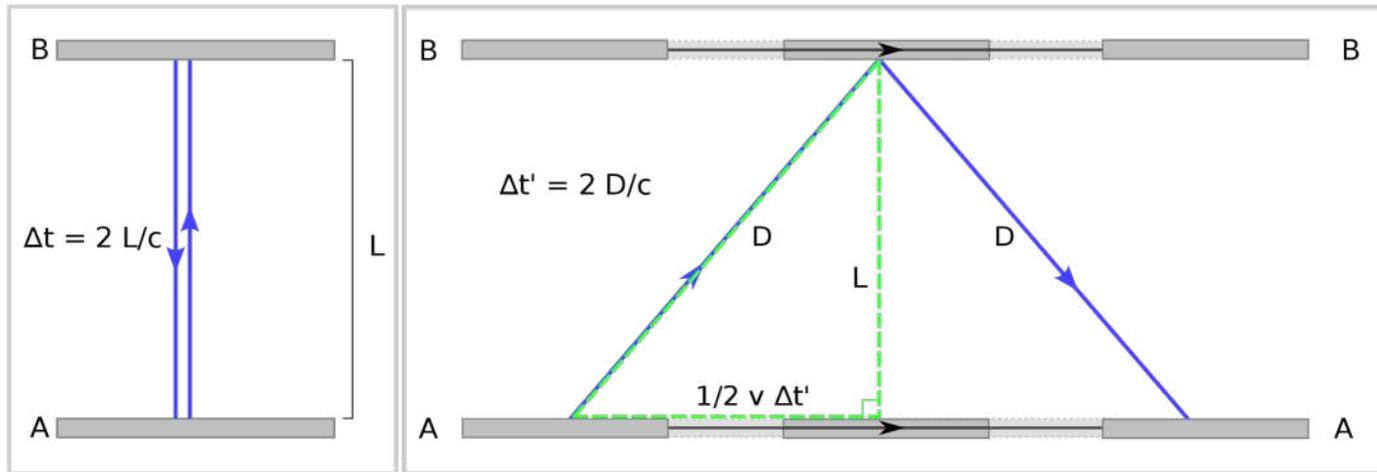
# Dilatation du temps



- L'observateur Terrestre a l'impression que le temps passe plus lentement pour l'astronaute

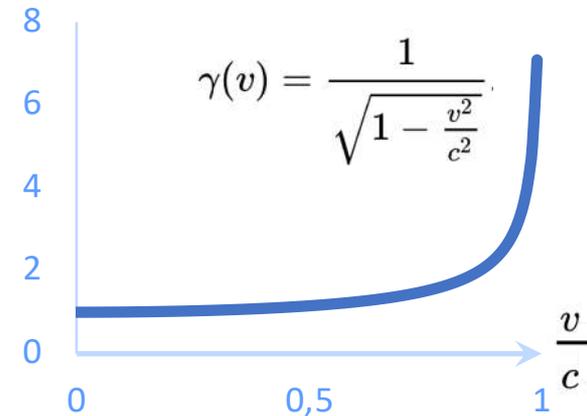
$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t \Rightarrow \Delta t' \geq \Delta t$$

# Dilatation du temps



- L'observateur Terrestre a l'impression que le temps passe plus lentement pour l'astronaute

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t \Rightarrow \Delta t' \geq \Delta t$$



# Paradoxe des jumeaux

---

- L'observateur Terrestre a l'impression que le temps passe plus lentement pour l'astronaute
- L'inverse est-il vrai ?

# Paradoxe des jumeaux

---

- L'observateur Terrestre a l'impression que le temps passe plus lentement pour l'astronaute
- L'inverse est-il vrai ?

Oui... Tant que les référentiels  
sont inertiels.

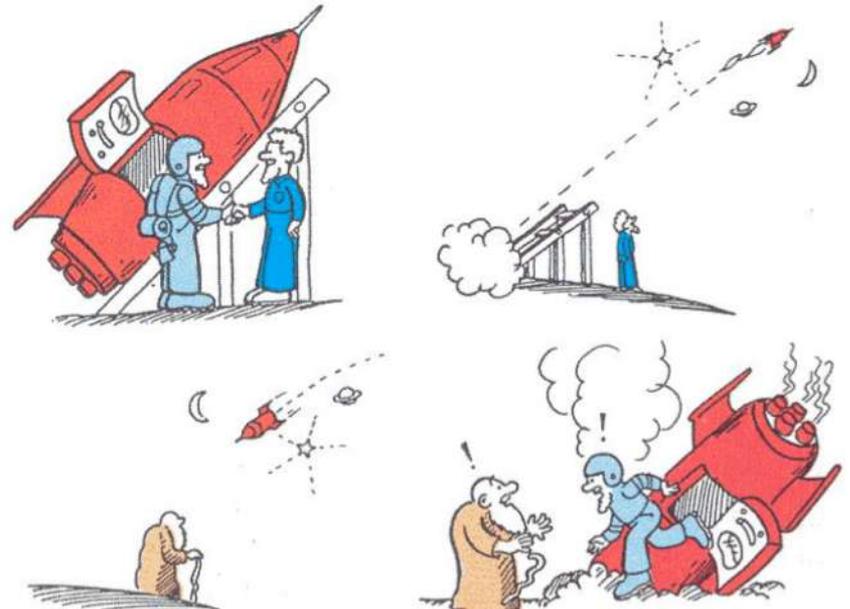
# Paradoxe des jumeaux

- L'observateur Terrestre a l'impression que le temps passe plus lentement pour l'astronaute
- L'inverse est-il vrai ?

Oui... Tant que les référentiels sont inertiels.

Le référentiel de l'astronaute doit être accéléré et n'est donc pas inertiel.

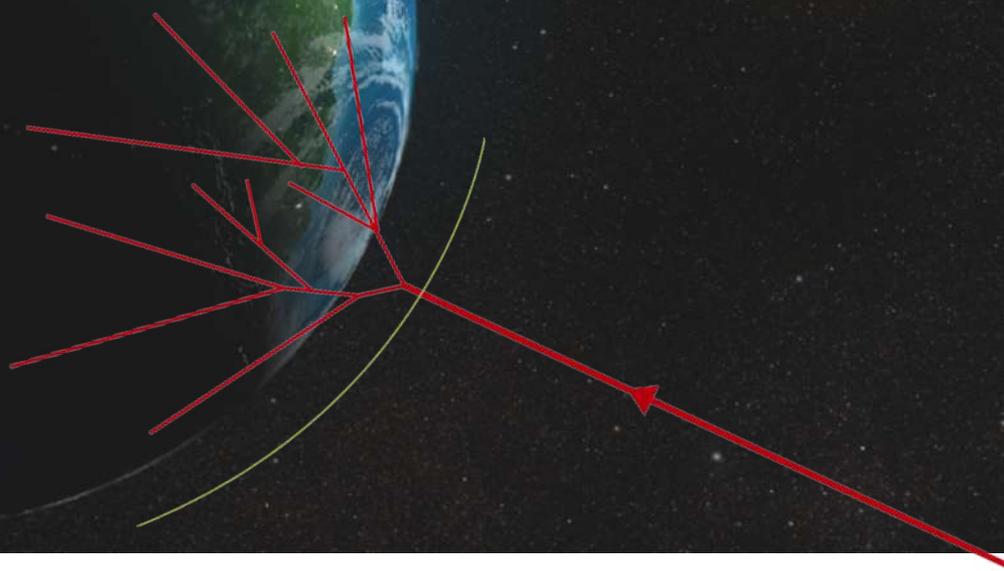
On peut montrer que c'est lui qui revient plus jeune. Il n'y a pas de paradoxe.



# ~~Paradoxe des jumeaux~~ Flux de muons



200 fois plus lourd que l'électron.  
Ne vit que 2 microsecondes  
et ne devrait parcourir qu'environ 600 mètres !  
Une centaine vous traversent chaque seconde

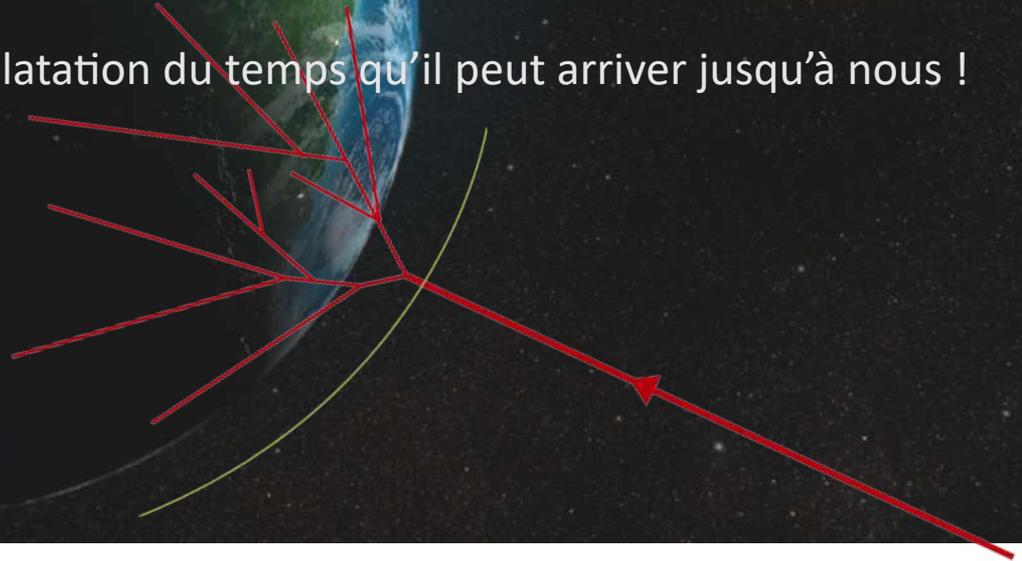


# ~~Paradoxe des jumeaux~~ Flux de muons



200 fois plus lourd que l'électron.  
Ne vit que 2 microsecondes  
et ne devrait parcourir qu'environ 600 mètres !  
Une centaine vous traversent chaque seconde

C'est grâce à la dilatation du temps qu'il peut arriver jusqu'à nous !



# Contraction des longueurs

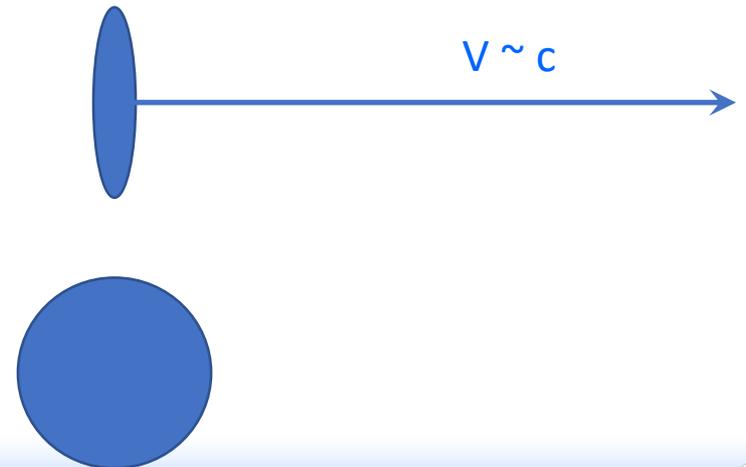
- On a vu la dilatation du temps:

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t \Rightarrow \Delta t' \geq \Delta t$$

- Il y a également contraction des longueurs

$$\Delta l'^2 = \Delta l^2 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) < \Delta l^2$$

Un corps en mouvement rapide  
paraît plus court  
que le même corps au repos



# Dilatation du temps



200 fois plus lourd que l'électron.  
Ne vit que 2 microsecondes  
et ne devrait parcourir qu'environ 600 mètres !  
Une centaine vous traversent chaque seconde

C'est grâce à la dilatation du temps qu'il peut arriver jusqu'à nous !  
(il nous semble vivre beaucoup plus longtemps)

# Contraction des longueurs



200 fois plus lourd que l'électron.

Ne vit que 2 microsecondes

et ne devrait parcourir qu'environ 600 mètres !

Une centaine vous traversent chaque seconde

C'est grâce à la dilatation du temps qu'il peut arriver jusqu'à nous !  
(il nous semble vivre beaucoup plus longtemps)

**Du point de vue du muon, c'est grâce à la contraction des longueurs !**  
L'épaisseur de l'atmosphère lui semble plus petite

# Relativité

- **Galilée**

- Addition des vitesses

$$\vec{w}' = \vec{w} + \vec{v}$$

- Temps absolu
- Distances conservées:

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

→ « c » devrait changer  
d'un repère à l'autre

- **Restreinte**

- Addition des vitesses

$$w'_x = \frac{w_x + v_x}{1 + (w_x v / c^2)} \quad \gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$w'_y = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{w_y}{1 + (w_x v / c^2)}$$

- Temps relatif
- « Distances » conservées :

$$s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

- « c » est une constante

# Relativité

## • Galilée

- Addition des vitesses

$$\vec{w}' = \vec{w} + \vec{v}$$

Si  $v \ll c$



- Temps absolu
- Distances conservées:

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

→ « c » devrait changer  
d'un repère à l'autre

## • Restreinte

- Addition des vitesses

$$w'_x = \frac{w_x + v_x}{1 + (w_x v / c^2)} \quad \gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$w'_y = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{w_y}{1 + (w_x v / c^2)}$$

- Temps relatif
- « Distances » conservées :

$$s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

- « c » est une constante

# Relativité

## • Galilée

- Addition des vitesses

$$\vec{w}' = \vec{w} + \vec{v}$$

- Temps absolu
- Distances conservées:

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

→ « c » devrait changer  
d'un repère à l'autre

## • Restreinte

- Addition des vitesses

$$w'_x = \frac{w_x + v_x}{1 + (w_x v / c^2)} \quad \gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$w'_y = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{w_y}{1 + (w_x v / c^2)}$$

- Temps relatif
- « Distances » conservées :

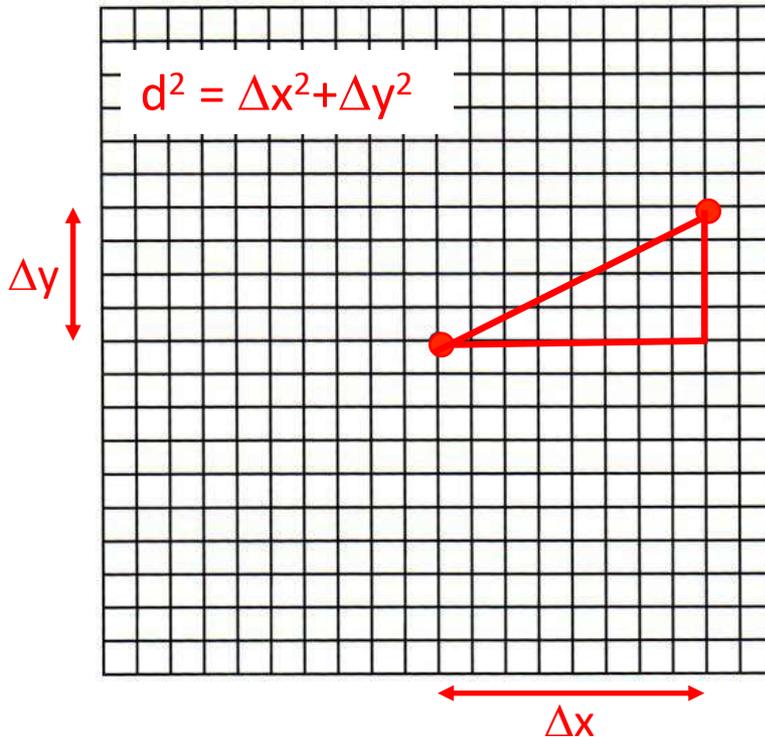
$$s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

- « c » est une constante

# Relativité et « métrique »

- Comment calculer la distance entre deux points ?

Exemple à **2** dimensions



**Galilée :**

espace à **3** dimensions

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

**Einstein :**

espace à **4** dimensions

$$s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

L'espace et le temps ne sont plus indépendants

# Vers la relativité générale

---



# Impesanteur ?



# Vers la relativité générale (Einstein, 1915)

The Foundation of the General Theory of Relativity

THE COLLECTED PAPERS OF

Albert Einstein

VOLUME 6

THE BERLIN YEARS: WRITINGS, 1914–1917

A. J. Kox, Martin J. Klein, and Robert Schulmann EDITORS

factitious cause  $R_1$ . Of all imaginable spaces  $R_1, R_2$ , etc., in any kind of motion relatively to one another, there is none which we may look upon as privileged *a priori* without reviving the above-mentioned epistemological objection. *The laws of physics must be of such a nature that they apply to systems of reference in any kind of motion.* Along this road we arrive at an extension of the postulate of relativity.

# Vers la relativité générale (Einstein, 1915)

---

- En relativité restreinte, certains référentiels sont considérés « meilleurs » que d'autres.
- Einstein ne veut pas se résoudre à cela... Il développe la théorie de la relativité générale et introduit le principe d'équivalence :

**localement, les effets d'un champ gravitationnel sont identiques aux effets d'une accélération du référentiel de l'observateur**

# Vers la relativité générale

---

- La théorie de la relativité générale repose sur des théories géométriques complexes...

first named—the “special theory of relativity,” which I assume to be known. The generalization of the theory of relativity has been facilitated considerably by Minkowski, a mathematician who was the first one to recognize the formal equivalence of space coordinates and the time coordinate, and utilized this in the construction of the theory. The mathematical tools that are necessary for general relativity were readily available in the “absolute differential calculus,” which is based upon the research on non-Euclidean manifolds by Gauss, Riemann, and Christoffel, and which has been systematized by Ricci and Levi-Civita and has already been applied to problems of theoretical physics. In section B of the present paper I developed all the necessary mathematical tools—which cannot be assumed to be known to every physicist—and I tried to do it in as simple and transparent a manner as possible, so that a special study of the mathematical literature is not required for the understanding of the present paper. Finally, I want to acknowledge gratefully my

# Vers la relativité générale

---

- La théorie de la relativité générale repose sur des théories géométriques complexes...

first named—the “special theory of relativity,” which I assume to be known. The generalization of the theory of relativity has been facilitated considerably by **Minkowski**, a mathematician who was the first one to recognize the formal equivalence of space coordinates and the time coordinate, and utilized this in the construction of the theory. **The mathematical tools that are necessary for general relativity were readily available in the “absolute differential calculus,”** which is based upon the research on **non-Euclidean manifolds by Gauss, Riemann, and Christoffel**, and which has been systematized by **Ricci and Levi-Civita** and has already been applied to problems of theoretical physics. In section B of the present paper I developed all the necessary mathematical tools—which cannot be assumed to be known to every physicist—and I tried to do it in as simple and transparent a manner as possible, so that a special study of the mathematical literature is not required for the understanding of the present paper. Finally, I want to acknowledge gratefully my

# Vers la relativité générale

---

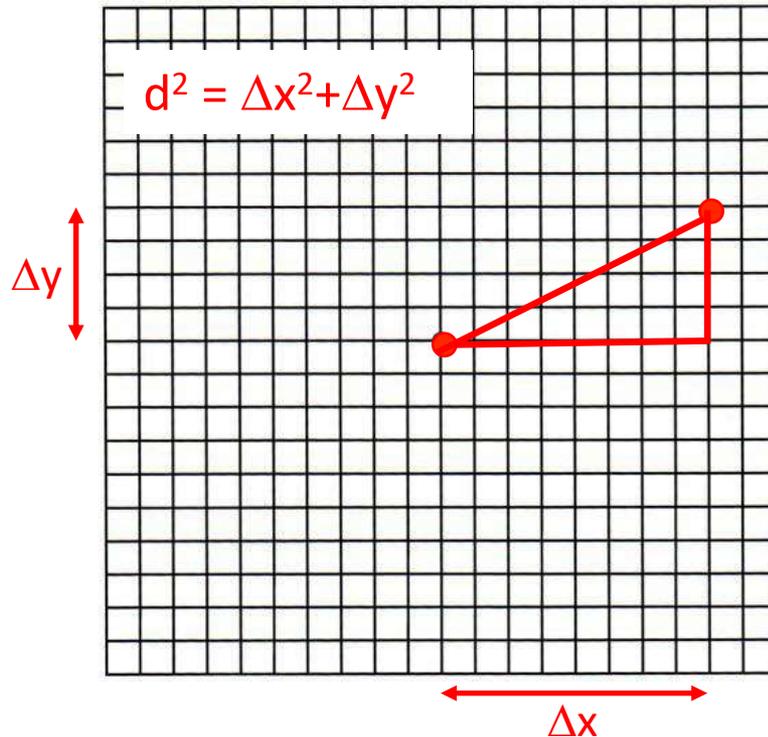
- La théorie de la relativité générale repose sur des théories géométriques complexes...

first named—the “special theory of relativity,” which I assume to be known. The generalization of the theory of relativity has been facilitated considerably by **Minkowski**, a mathematician who was the first one to recognize the formal equivalence of space coordinates and the time coordinate, and utilized this in the construction of the theory. **The mathematical tools that are necessary for general relativity were readily available in the “absolute differential calculus,”** which is based upon the research on **non-Euclidean manifolds by Gauss, Riemann, and Christoffel**, and which has been systematized by **Ricci and Levi-Civita** and has already been applied to problems of theoretical physics. **In section B of the present paper I developed all the necessary mathematical tools—which cannot be assumed to be known to every physicist**—and I tried to do it in as simple and transparent a manner as possible, so that a special study of the mathematical literature is not required for the understanding of the present paper. Finally, I want to acknowledge gratefully my

# Vers la relativité générale

- Rappel: Comment calculer la distance entre deux points ?

Exemple à **2** dimensions



**Galilée :**

espace à **3** dimensions

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

**Einstein :**

espace à **4** dimensions

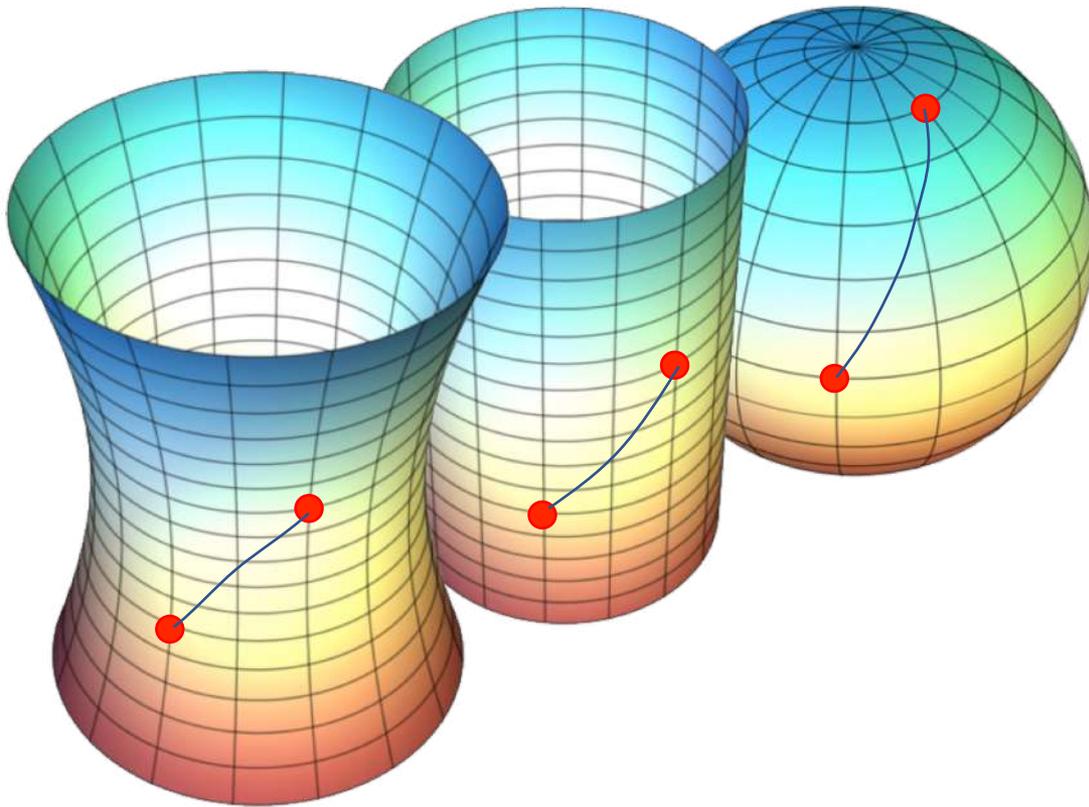
$$s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

**Minkowski,**

L'espace et le temps ne sont plus indépendants

# Vers la relativité générale

- En relativité générale: Comment calculer la distance entre deux points ?

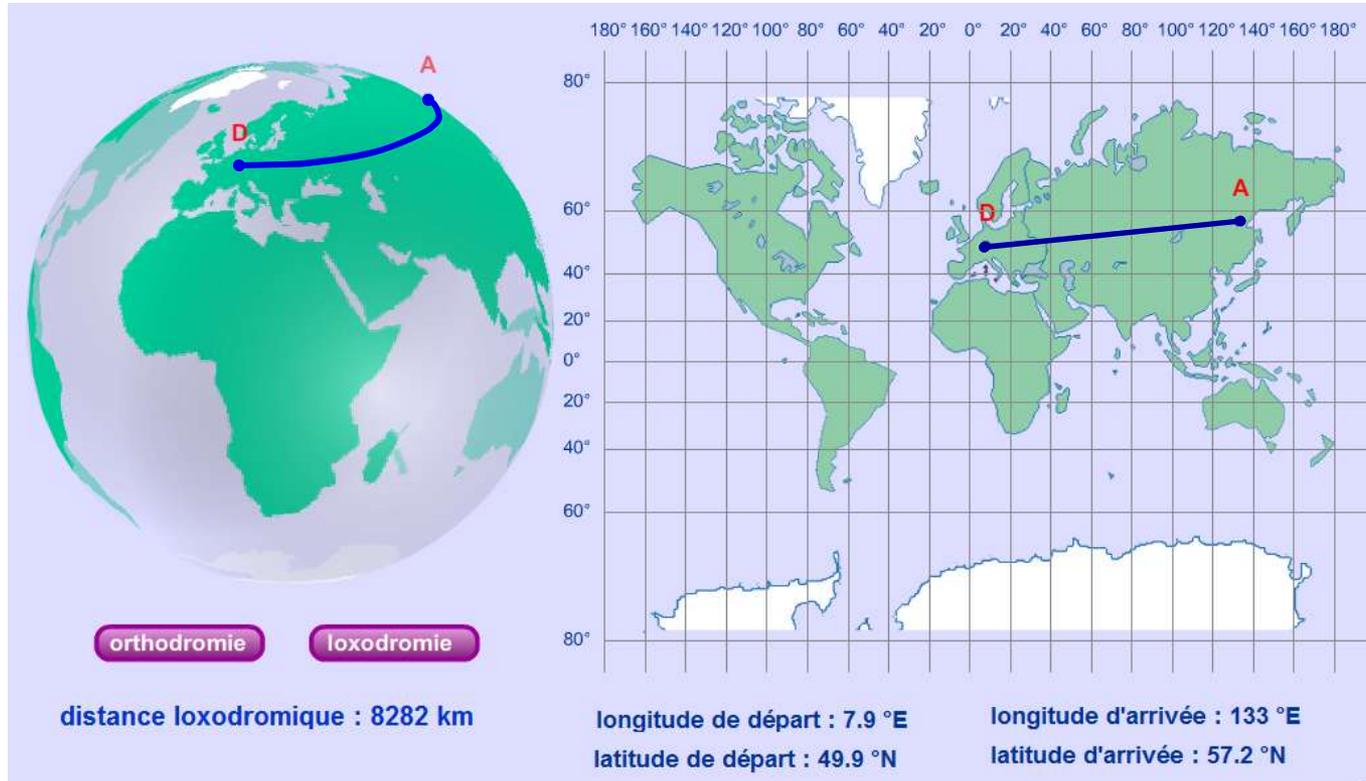


Sur une surface (2D)  
courbée dans l'espace

$$d^2 = f(x, y, \Delta x, \Delta y)$$

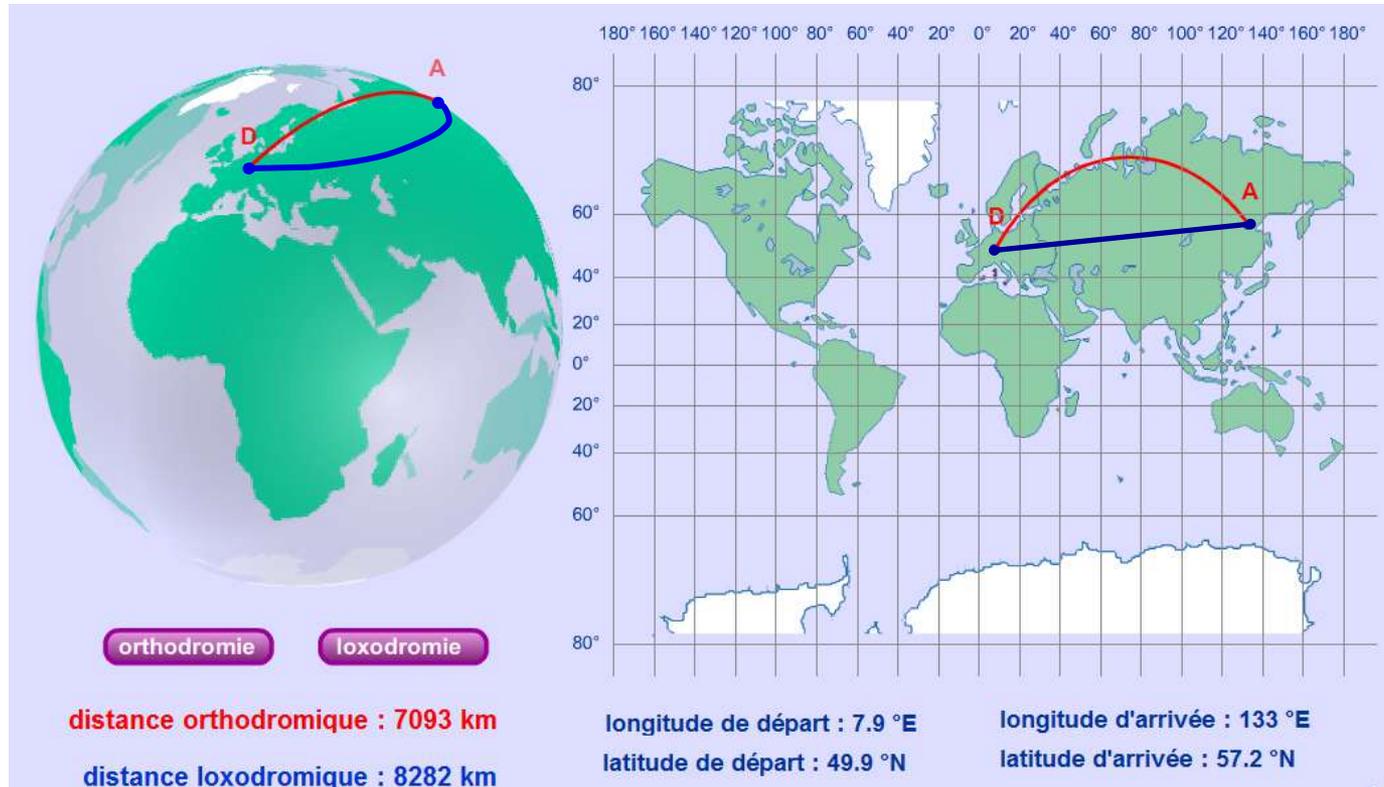
# Vers la relativité générale

## Trajet entre deux points sur le globe...



# Vers la relativité générale

## Trajet entre deux points sur le globe...



# Relativité générale

---

Notre espace-temps à 4 dimensions est « courbé »

- En un point donné, la courbure de l'espace-temps dépend de l'énergie et de la matière qui s'y trouve
- La courbure détermine le mouvement des objets
- La lumière suit toujours le chemin le plus court d'un point à un autre
  - Dans certains cas, il peut y avoir plusieurs chemins

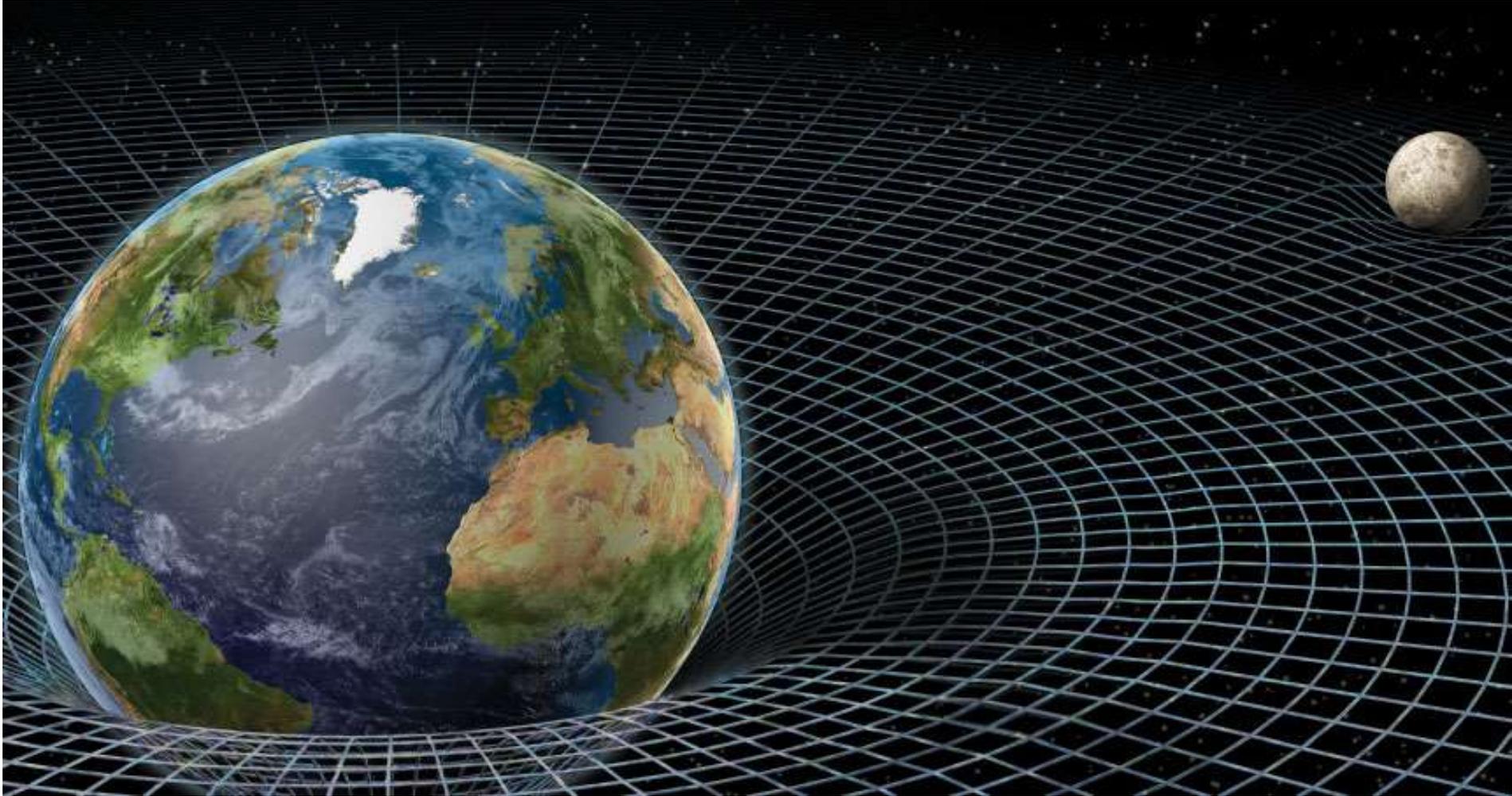
La courbure de l'espace-temps

→ Superbe spectacle de l'amour

Étienne Klein et Jacques Perry-Salkow, *Anagrammes renversantes* (Flammarion)

# Relativité générale

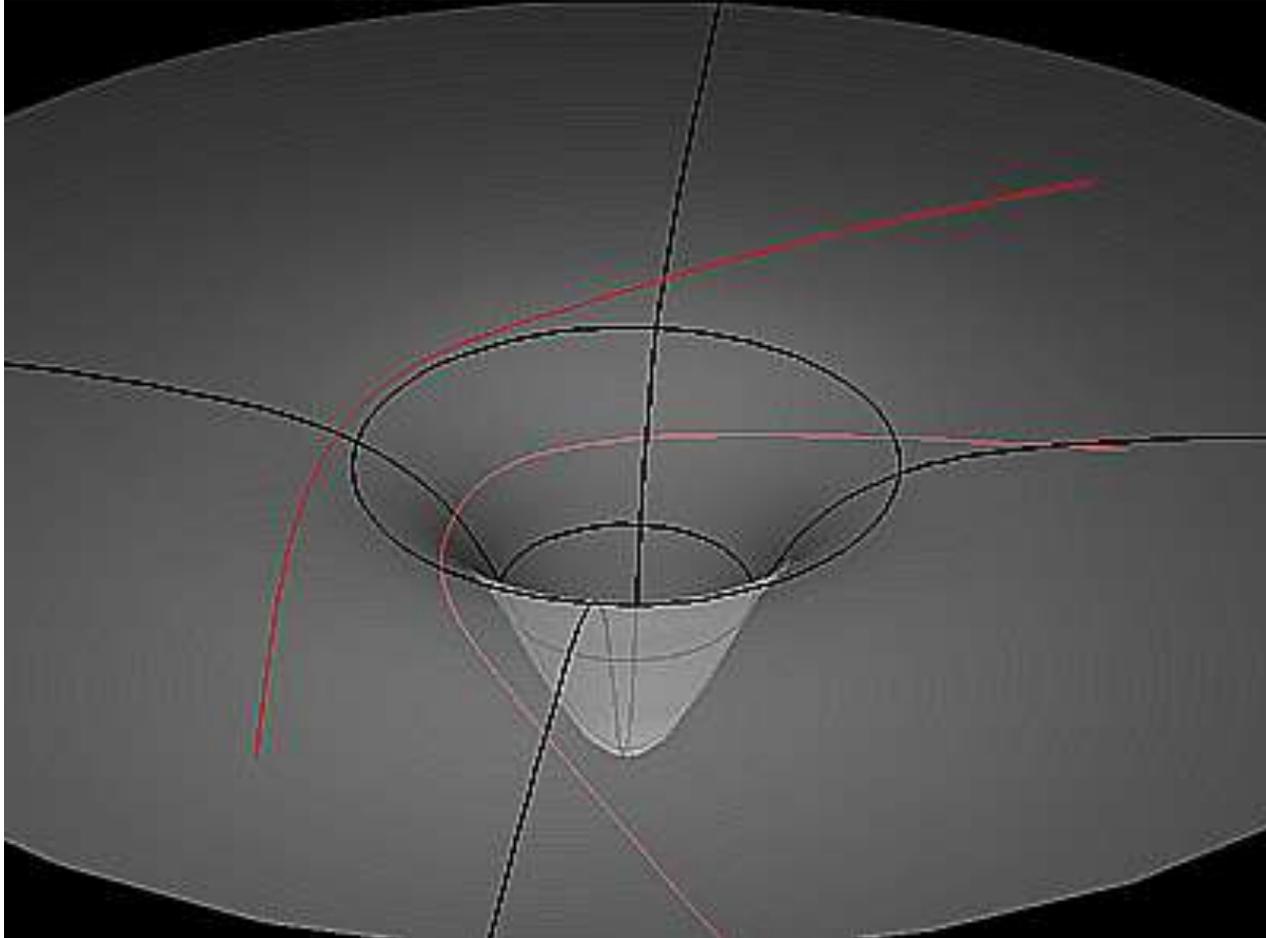
Déformation de l'espace-temps par la masse de la Terre et de la Lune (représentation imaginaire)



# Relativité générale

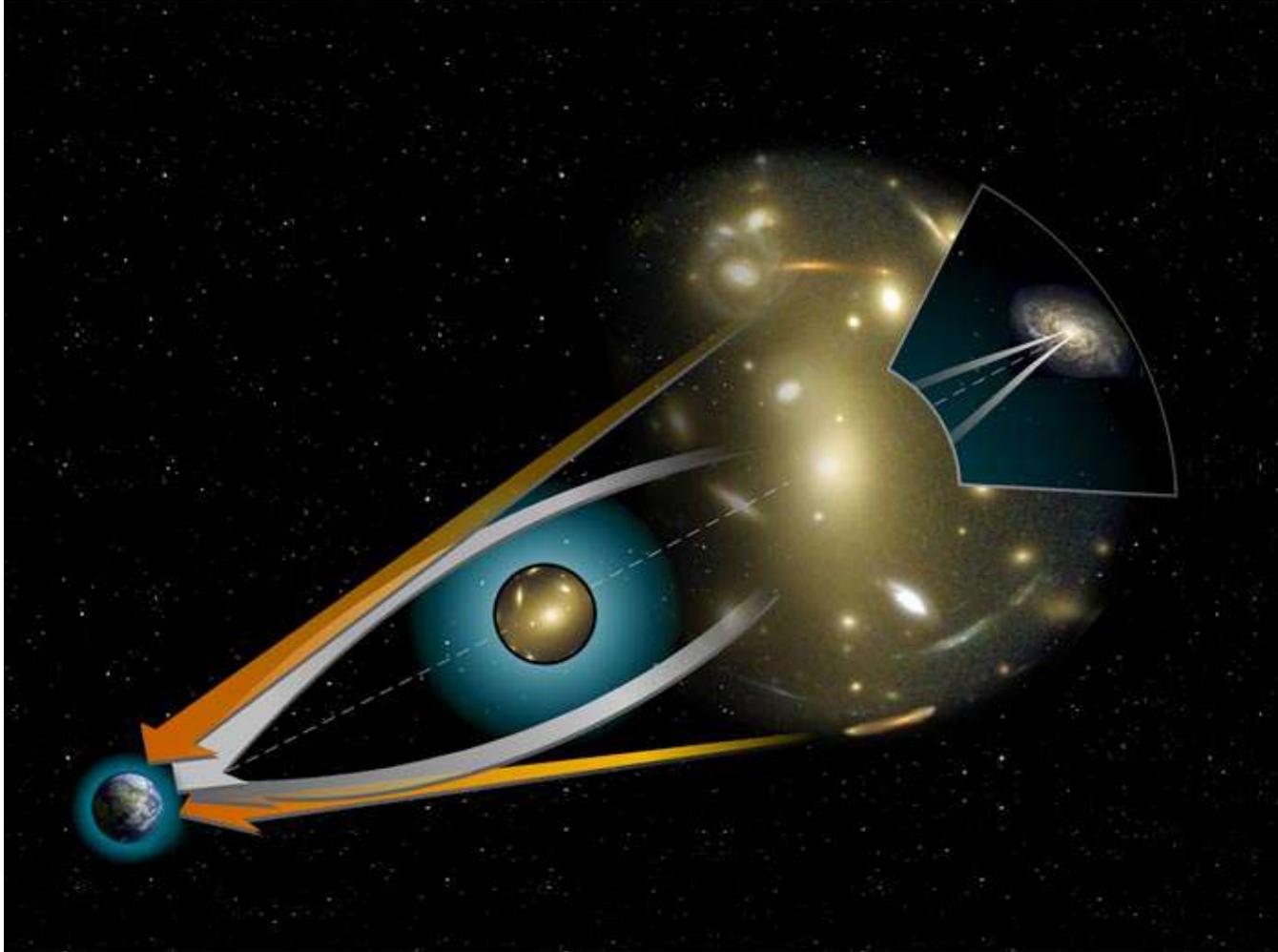
---

Trajectoires lumineuses possibles (Géodésique)  
dans un espace-temps courbé (représentation imaginaire)



# Relativité générale

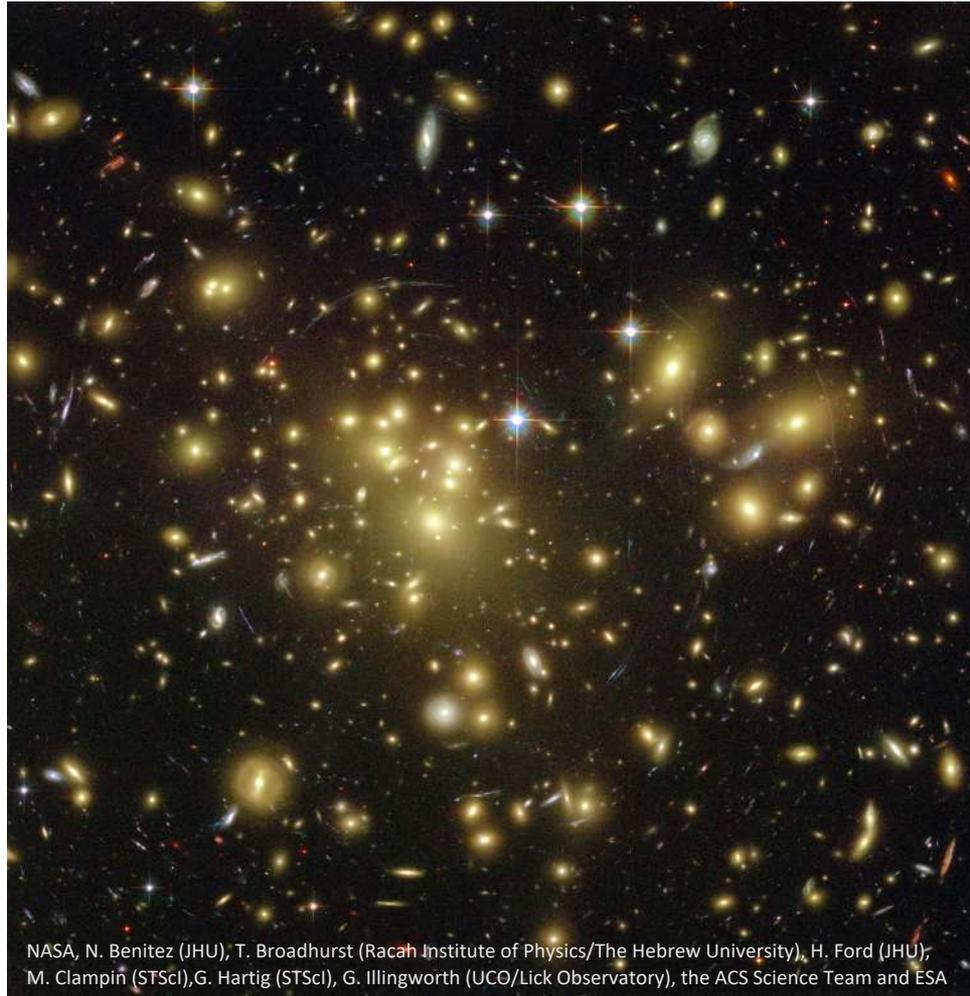
Effet de lentille gravitationnelle (représentation imaginaire)



# Relativité générale

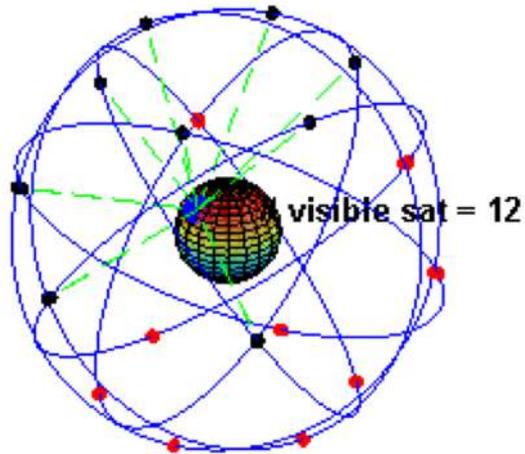
---

Effet de lentille gravitationnelle (Image prise par Hubble)



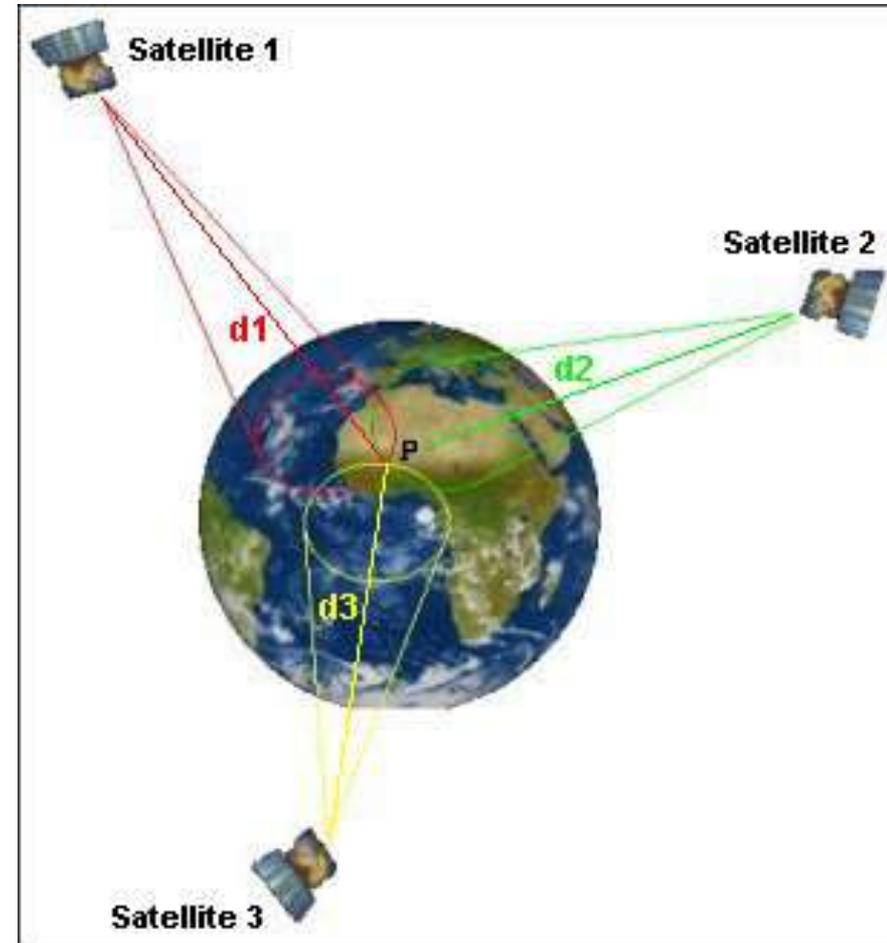
# Relativité générale et GPS

- Le principe:
  - Des satellites embarquent des horloges très précises
  - Ils transmettent l'heure par signal radio ( $c$ )
  - Notre téléphone capte...



# Relativité générale et GPS

- Le principe:
  - La position des satellites est connue très précisément
  - La distance entre nous et chaque satellite est calculée grâce aux signaux d'horloge
  - Une triangulation fournit notre position

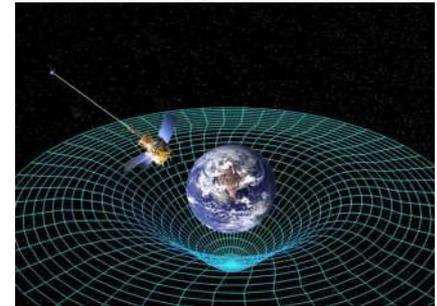


# Relativité générale et GPS

---

- Effets relativistes

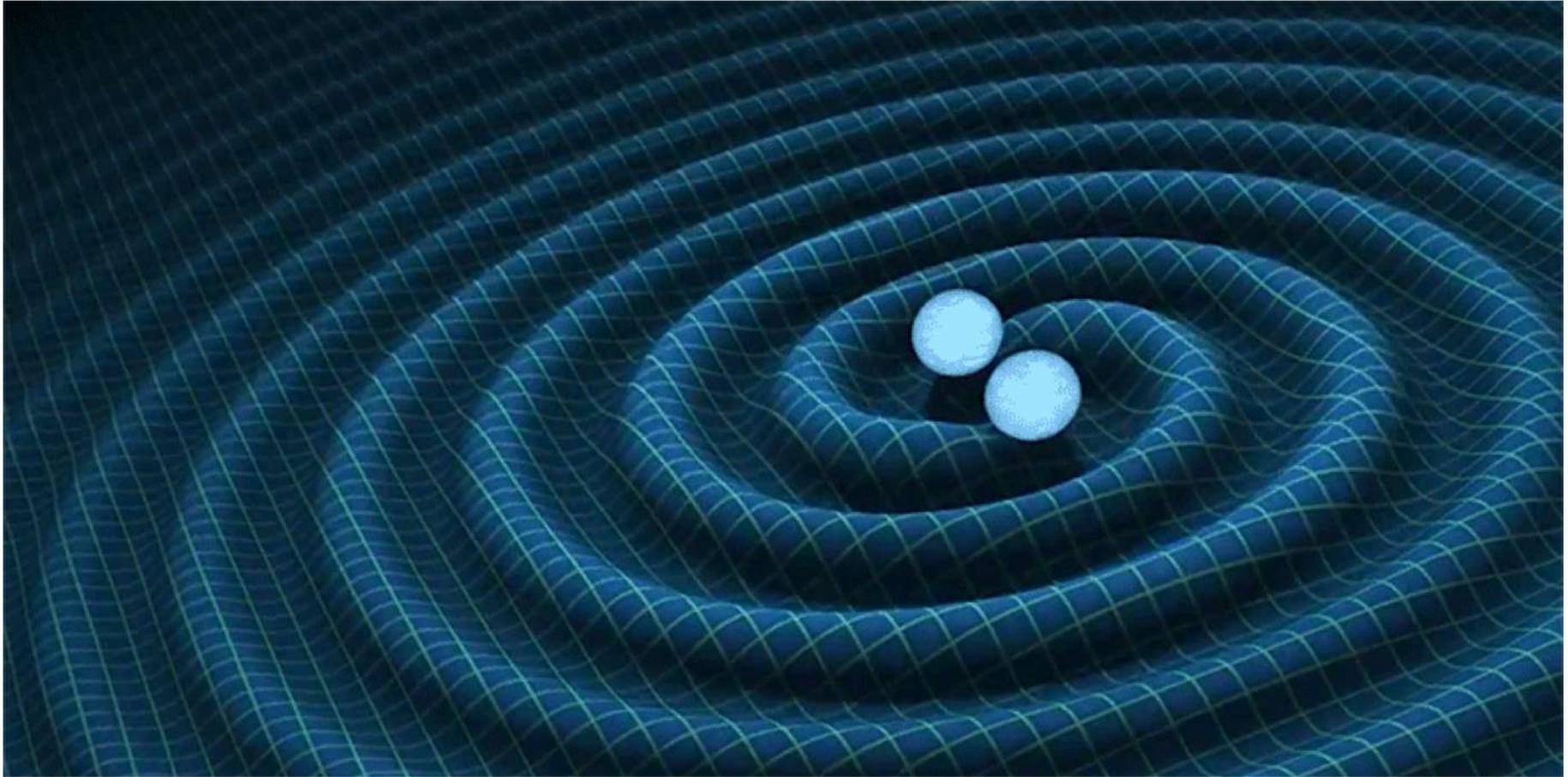
- La vitesse des satellites est d'environ 14000 km/h
- → le temps s'y écoule plus lentement de
  - 7 microsecondes par jour par rapport à nous
- Les satellites sont « loin » de la Terre. L'espace-temps y est moins déformé
- → le temps s'y écoule plus rapidement de
  - 45 microsecondes par jour
- **L'effet combiné est de 38 microseconde par jour ce qui donnerait une erreur sur la position de**
  - $38 \cdot 10^{-6} \text{ s} * 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 11400 \text{ mètres} = 11,4 \text{ km}$



# Ondes gravitationnelles

---

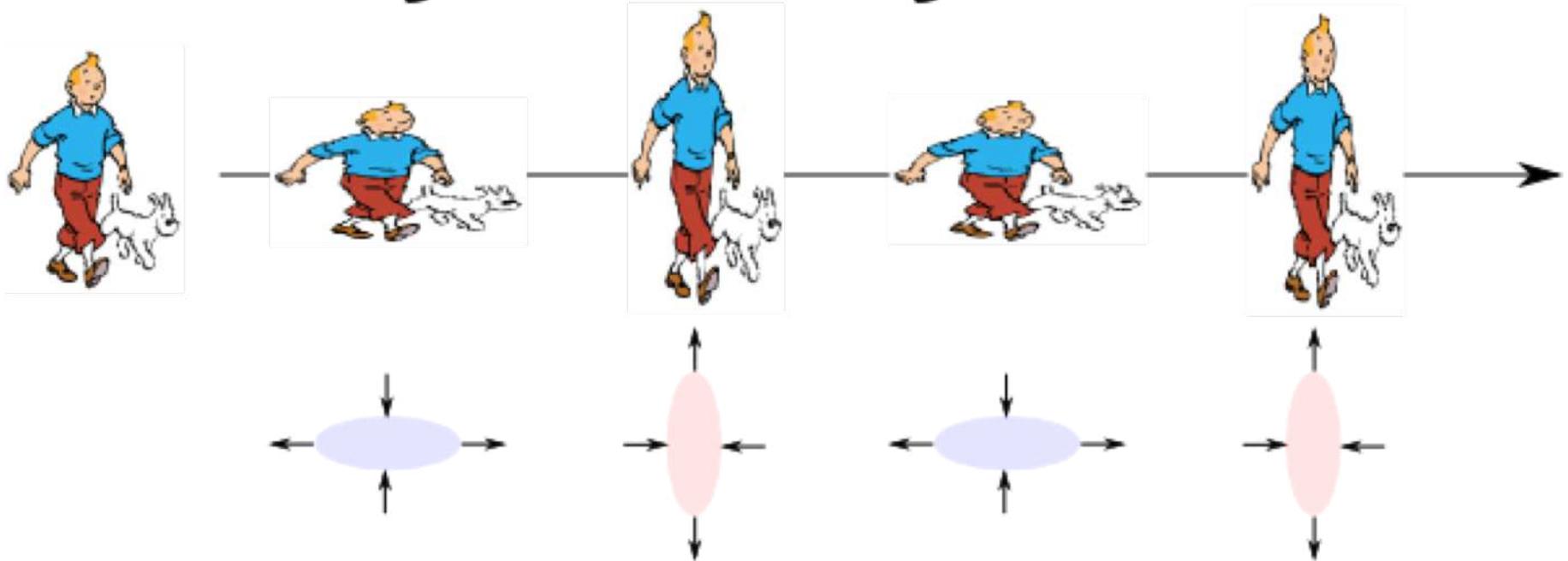
Déformation de l'espace-temps par deux masses qui tournent l'une autour de l'autre



# Ondes gravitationnelles

Déformation de l'espace-temps sur Terre... Un « peu » exagéré !

## Passage d'une onde gravitationnelle



# Ondes gravitationnelles

Interféromètre VIRGO et LIGO



LIGO-detector in Livingston, Louisiana



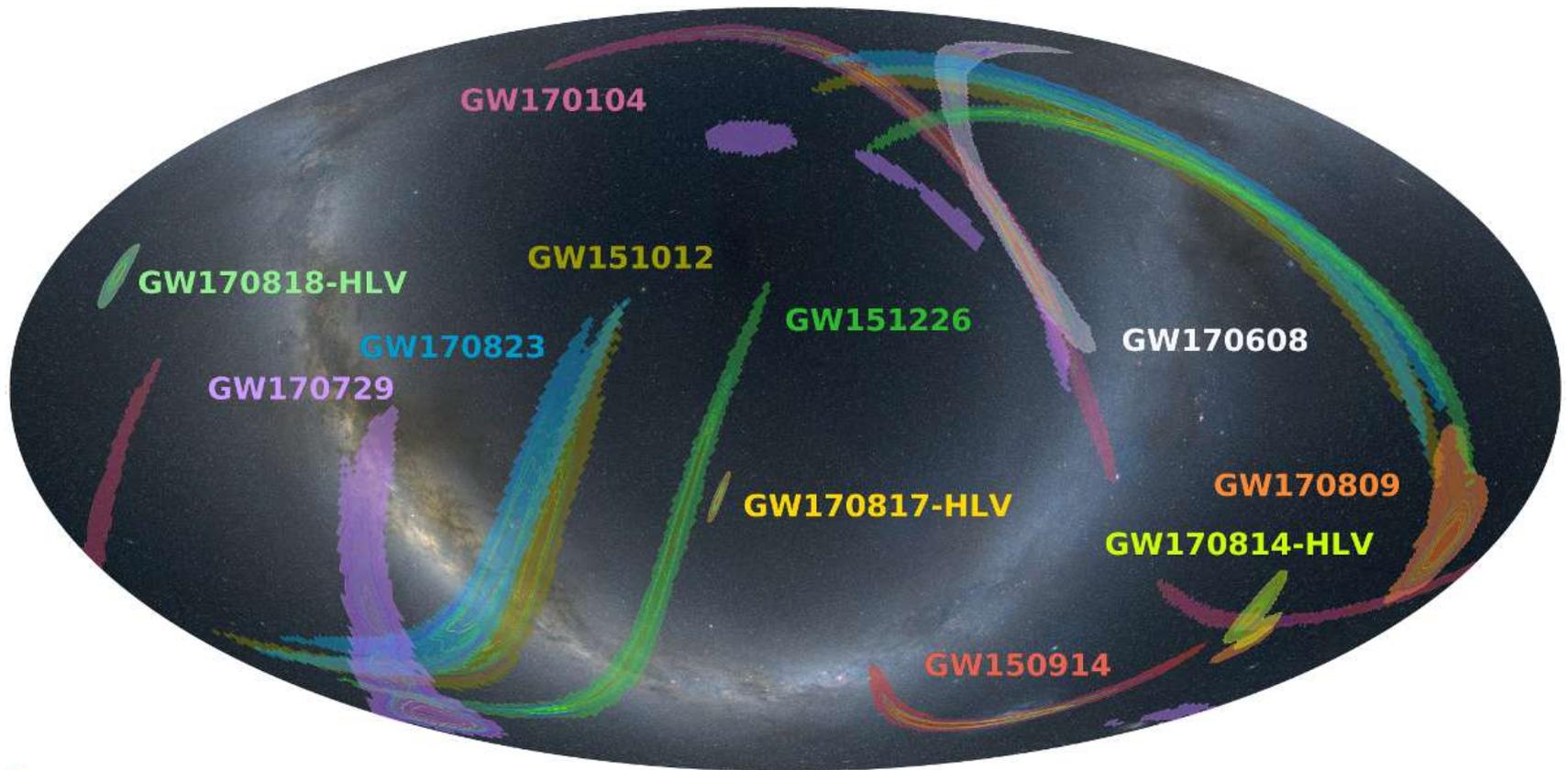
Virgo Observatory. Credit: The Virgo Collaboration/CCO 1.0

# Ondes gravitationnelles

Détection (au 31/12/2018)

10 systèmes binaires de trous noirs

1 Système binaire d'étoiles à neutron



# Quelques idées pour se divertir ou aller plus loin

---

- **BD:**
  - La Guerre éternelle (de Haldeman Joe (Auteur), Marvano (Illustrations))
  - Les BD de Jean-Pierre Petit et spécialement « Le Géométricon»: [https://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/free\\_downloads\\_transit.htm](https://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/free_downloads_transit.htm)
- **Livres:**
  - La couleur : Lumière, vision et matériaux (Sous la direction de Mady Elias et Jacques Lafait aux éditions « Echelles » chez Belin 2006)
  - Jeux de lumière : Les phénomènes lumineux du ciel (Francoise Suhagher et Jean-Paul Parisot aux éditions « CÊTRE »)
- **Artistes ou créateurs de médias inspirants**
  - Elise Alloin
  - Jonty Hurwitz: <https://www.jontyhurwitz.com/>
  - SUGIHARA Kokichi : <http://www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/Welcomee.html>
  - Raetz Markus
  - Richard Wiseman: <https://richardwiseman.wordpress.com/explore2/media-and-youtube/>
  - <https://www.cymascope.com/>

# Quelques idées pour se divertir ou aller plus loin

---

- Sites:

- Vulgarisation

- <https://toutestquantique.fr/>
    - <http://www.palais-decouverte.fr/fr/au-programme/expositions-permanentes/toutes-les-salles/salles-de-physique/les-exposes/>
    - <https://www.dailymotion.com/video/xqylnt>
    - <http://www.relativite.info/Relativite.htm>
    - <http://ideesfroides.blogspot.com/>
    - <https://theconversation.com/science-contre-fake-news-la-bataille-est-engagee-90161>
    - <https://sciencetonnante.wordpress.com/>
    - <https://www.nobelprize.org/education-network-nobel-prize-lessons/>
    - <https://www.nasa.gov/>
    - <https://videos.cern.ch/> (<https://videos.cern.ch/record/2307614>)
    - Physique à main levée: <http://phymain.unisciel.fr/>
    - <https://openclassrooms.com/fr/courses/1449256-la-physique-chimie-en-seconde>
    - [http://www.ymambrini.com/My\\_World/My\\_Home.html](http://www.ymambrini.com/My_World/My_Home.html)
    - Wikipedia...
    - <https://www.youtube.com/user/physicswoman/featured>  
(<https://www.youtube.com/watch?v=pnbJEg9r1o8&t=1s>)

- Instruments de mesure

- L'inventaire du patrimoine alsacien ( <http://gertrude.region-alsace.eu/> )
    - <https://www.polytechnique.edu/bibliotheque//fr/instruments-scientifiques>
    - <http://www.lecompendium.com/>
    - <https://www.crtsite.com/>

# Quelques idées pour se divertir ou aller plus loin

- Sites:

- Plus précis

- **ON THE ELECTRODYNAMICS OF MOVING BODIES** par Einstein  
<http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>
    - **The Foundation of the General Theory of Relativity** par Einstein:  
[https://web.archive.org/web/20120204074848/http://www.alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc30\\_English\\_pp146-200.pdf](https://web.archive.org/web/20120204074848/http://www.alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc30_English_pp146-200.pdf)
    - <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>
    - <http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/mnoptigeo.html>
    - <https://journals.openedition.org/bibnum/66>
    - <http://www.bibnum.education.fr/sites/default/files/romer-analyse-47.pdf>
    - <https://gallica.bnf.fr/accueil/fr/content/accueil-fr?mode=desktop> (<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b86069987>,  
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k55840n.image.f375.langEN>)
    - <https://www.persee.fr/disciplines> ([https://www.persee.fr/doc/pharm\\_0035-2349\\_2004\\_num\\_92\\_341\\_5598](https://www.persee.fr/doc/pharm_0035-2349_2004_num_92_341_5598) )
    - Rached Roshdi. Le « Discours de la lumière » d'Ibn al-Haytham (Alhazen). Traduction française critique. In: Revue d'histoire des sciences et de leurs applications, tome 21, n°3, 1968. pp. 197-224; doi :  
<https://doi.org/10.3406/rhs.1968.2560> [https://www.persee.fr/doc/rhs\\_0048-7996\\_1968\\_num\\_21\\_3\\_2560](https://www.persee.fr/doc/rhs_0048-7996_1968_num_21_3_2560)
    - The Historical Development of Quantum Theory *De Jagdish Mehra, Helmut Rechenberg, p25 and following*
    - [http://www.ymambrini.com/My\\_World/History\\_files/GP%20Thomson%20orginal%20paper.pdf](http://www.ymambrini.com/My_World/History_files/GP%20Thomson%20orginal%20paper.pdf)
    - <https://phys.org/physics-news/> (<https://phys.org/news/2009-04-years-moon-hazard-sun-elevation.html>)

- Archives

- <https://www.numistral.fr/fr> (<https://www.numistral.fr/ark:/12148/btv1b102191235.item>)