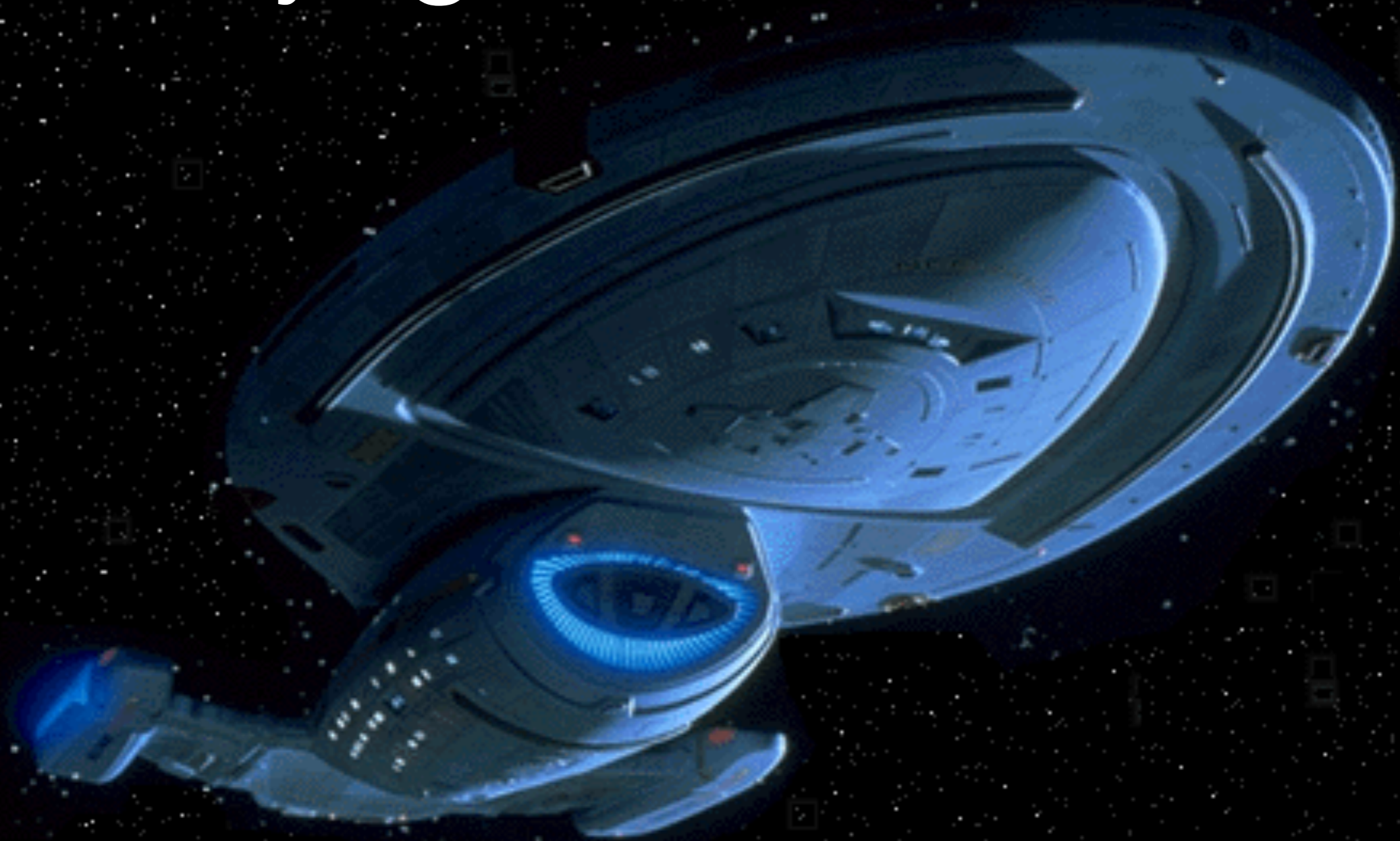


Géométrie et voyage interstellaire



Roland Lehoucq - CEA Saclay
Département d'astrophysique

Des distances considérables

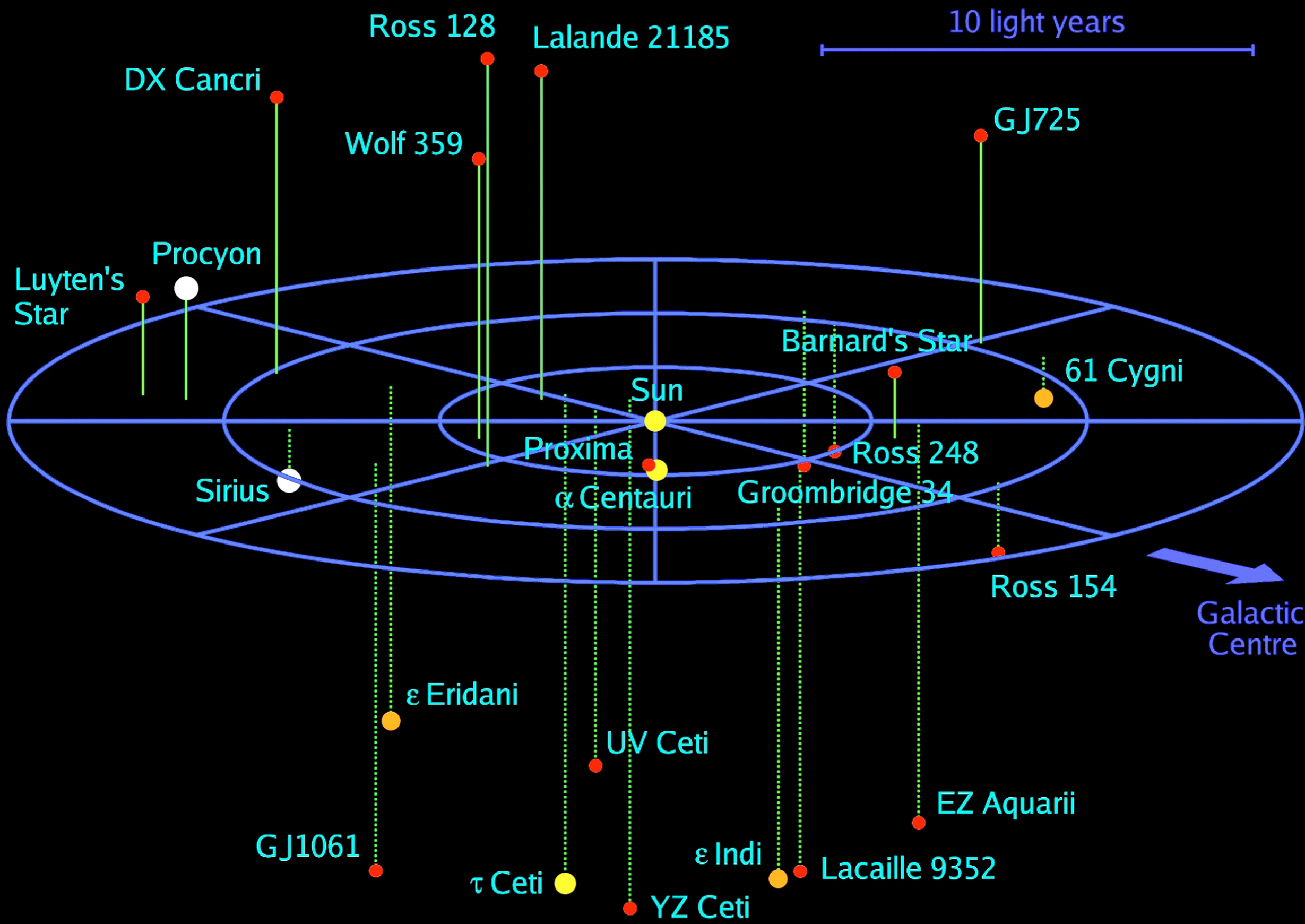
Échelle de distance non respectée.



Le Soleil a un diamètre de 1,4 million de km.

S'il est réduit à la taille d'une bille de 1 cm :

- La Terre est un point de 0,1 mm située à 1 m ;
- Neptune se situe à 30 m ;
- Proxima du Centaure est distante de 269 km ;
- La lumière progresse de 2 mm par seconde...



Status: January 2003

Jusqu'où sommes-nous allés ?

	Pioneer 10	Pioneer 11	Voyager 2	Voyager 1	New Horizons
Distance au Soleil (UA)	133,13	111,12	132,81	159,36	55,54
Vitesse relative (km/s)	11,898	11,173	15,290	16,942	13,747
Vitesse relative (UA/an)	2,510	2,357	3,226	3,574	2,901
Distance à la Terre (UA)	133,264	111,407	133,123	159,221	55,900
Distance (heure-lumière)	18,47	15,44	18,45	22,07	7,75
Date de lancement	3/3/1972	6/4/1973	20/8/1977	5/9/1977	19/1/2006

Vitesse de la lumière = 300 000 km/s (63 300 UA/an)

Nos sondes se déplacent à environ $c/20\,000$...

Les effets d'un voyage rapide

Quand la vitesse approche celle de la lumière, il faut tenir compte de la relativité restreinte d'Einstein !

1. Dilatation des durées : la durée d'un phénomène dépend de l'observateur.
2. Effet Doppler : la fréquence perçue diffère de celle émise.
3. Aberration des angles : la direction d'une source est modifiée.



A. Einstein (1905)

Deux postulats fondamentaux...

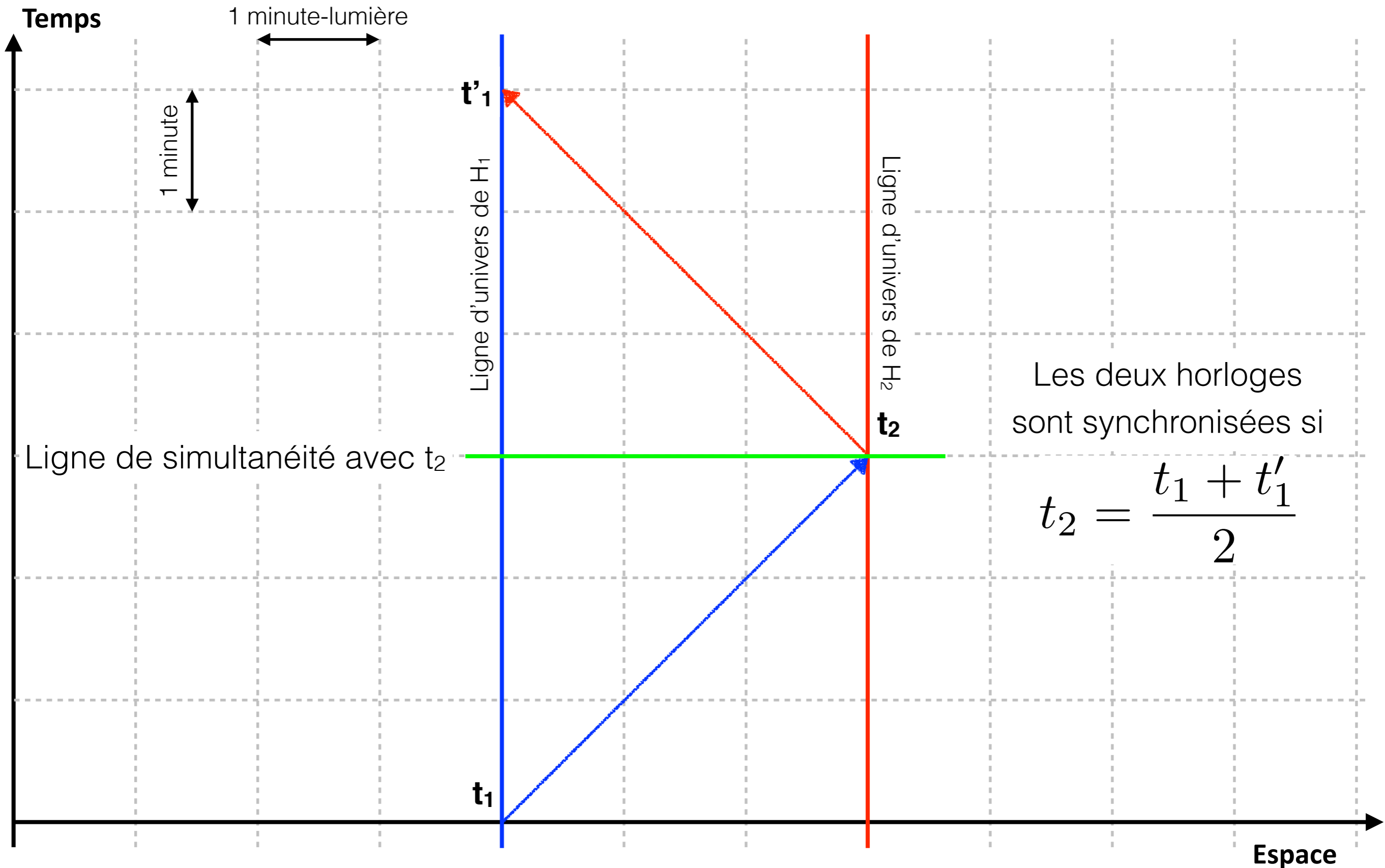
Des exemples similaires, tout comme l'essai infructueux de confirmer le mouvement de la Terre relativement au « médium de la lumière », nous amène à la supposition [...] que dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont vraies, les équations électrodynamiques et optiques équivalentes sont également vraies [...]. Dans le texte qui suit, nous élevons cette conjecture au rang de postulat (que nous appellerons dorénavant « principe de relativité ») et introduisons un autre postulat — qui au premier regard est incompatible avec le premier — que la lumière se propage dans l'espace vide, à une vitesse V indépendante de l'état de mouvement du corps émetteur.

...et deux conséquences étonnantes.

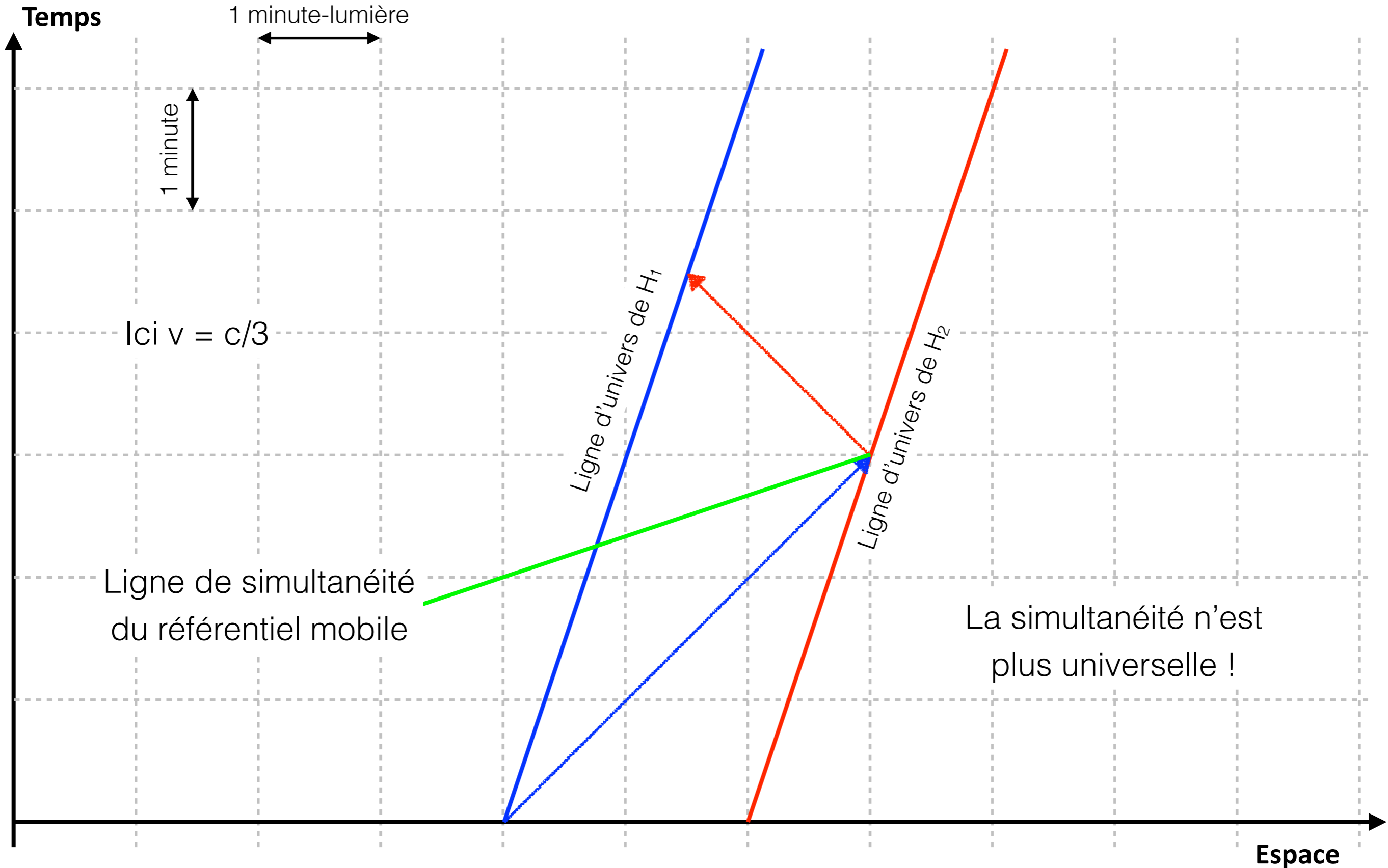
Nous en concluons que nous ne pouvons pas attacher une signification absolue au concept de simultanéité. Dès lors, deux événements qui sont simultanés lorsque observés d'un système ne seront pas simultanés lorsque observés d'un système en mouvement relativement au premier. [...]

Si à A, il y a deux horloges synchronisées et si nous déplaçons l'une d'elles à une vitesse constante selon une courbe fermée qui revient à A [...] alors à son arrivée à A, cette dernière retardera [...] sur l'horloge immobile.

Simultanéité : synchroniser 2 horloges



Et avec des horloges mobiles ?



Dilatation des durées

Horloge à lumière = 2 miroirs face à face.

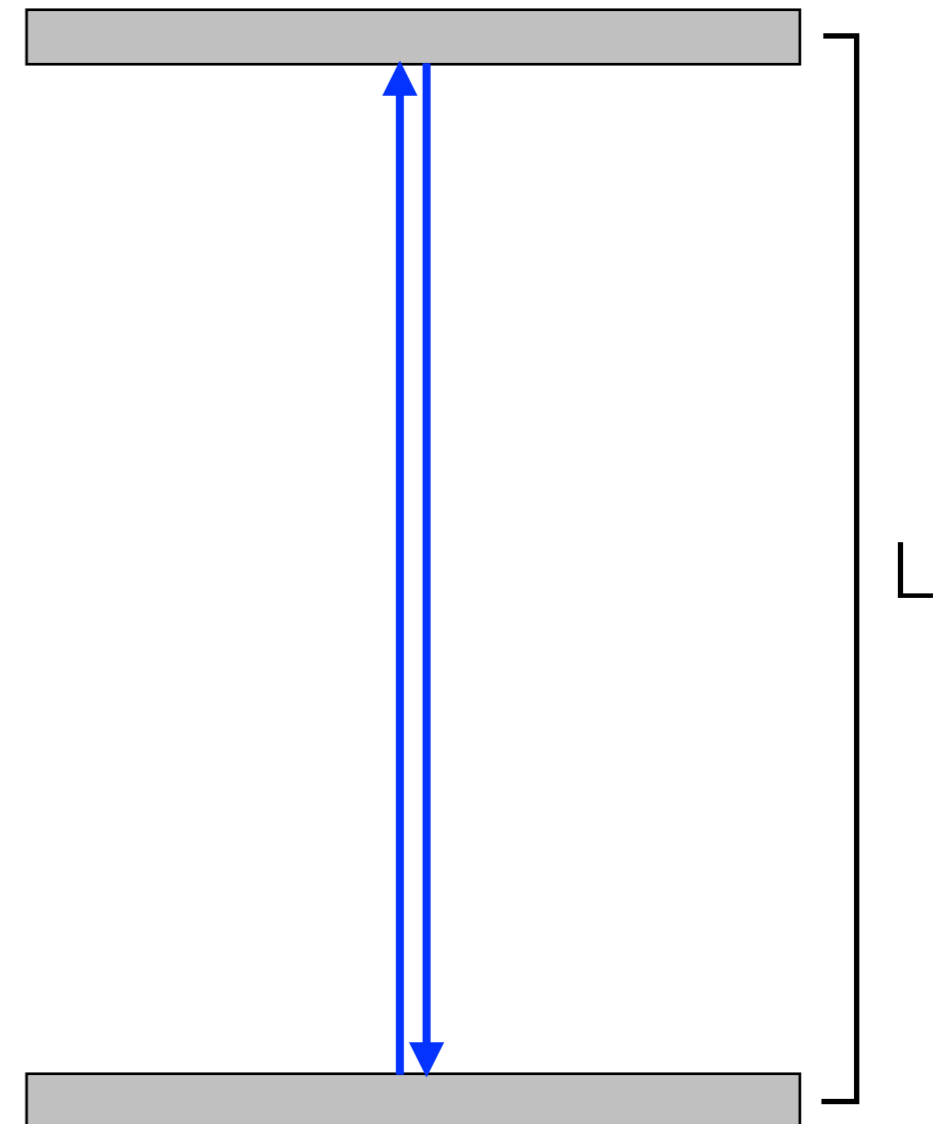
E_1 : départ du rayon lumineux.

E_2 : retour du rayon après une réflexion.

Quelle durée sépare ces deux événements ?

$$\Delta t = 2 L/c$$

Δt est une durée *propre*, elle sépare deux événements se produisant au même endroit.

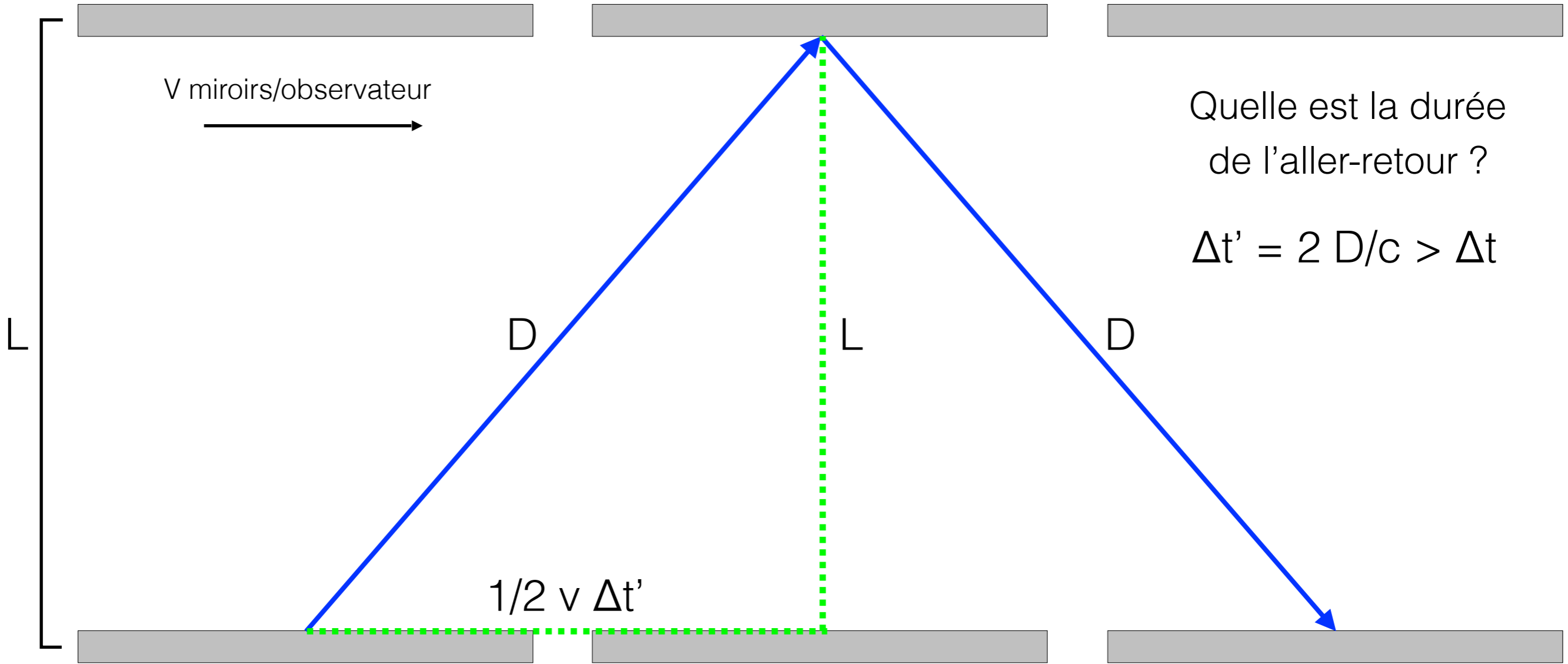


Observateur fixe par rapport aux miroirs.

Dilatation des durées

Observateur « fixe »

v miroirs/observateur



Quelle est la durée de l'aller-retour ?

$$\Delta t' = 2 D/c > \Delta t$$

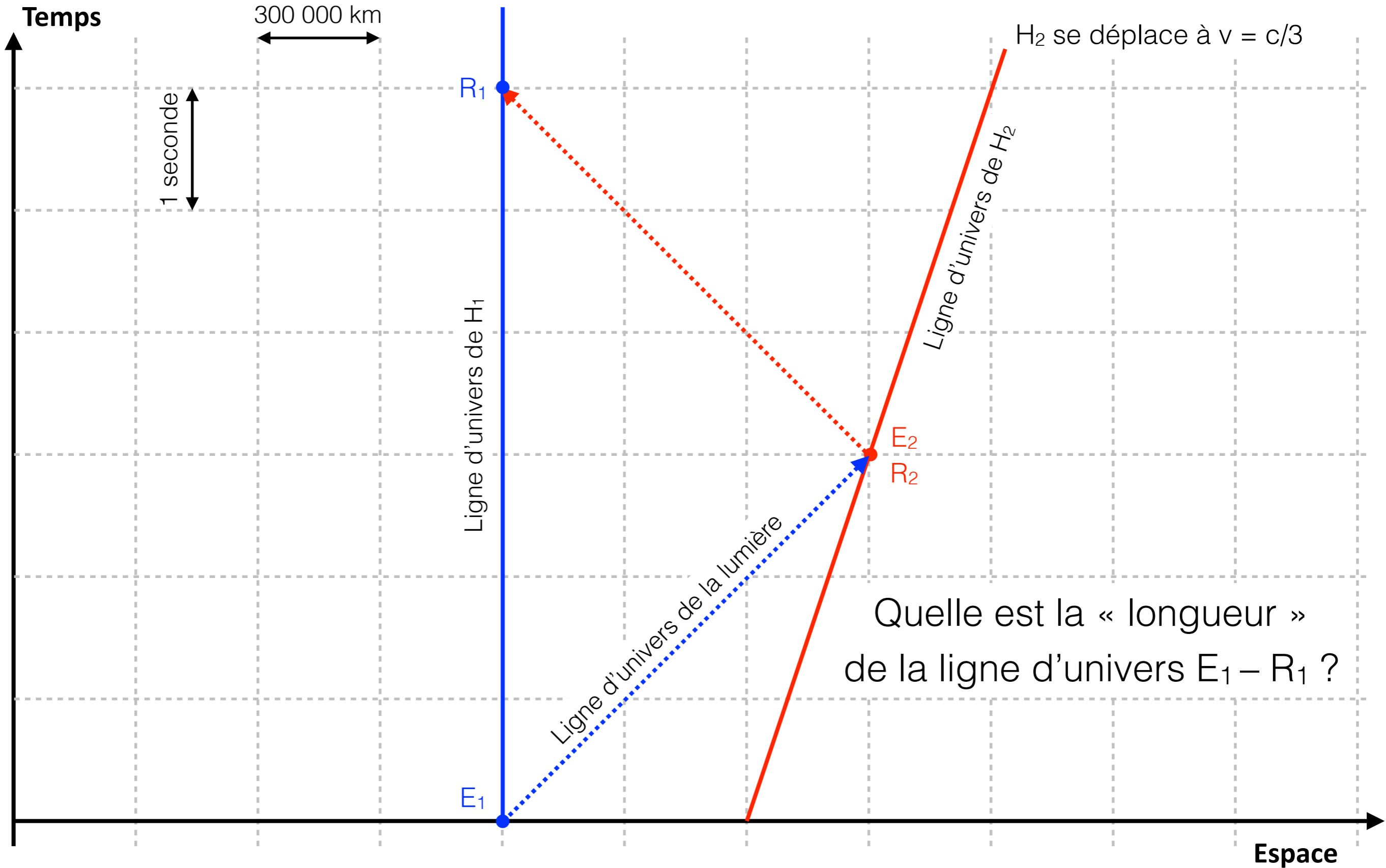
$$\Delta t' = \gamma \Delta t \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$\Delta t'$ n'est pas une durée propre, car les deux événements ne se produisent pas au même lieu.

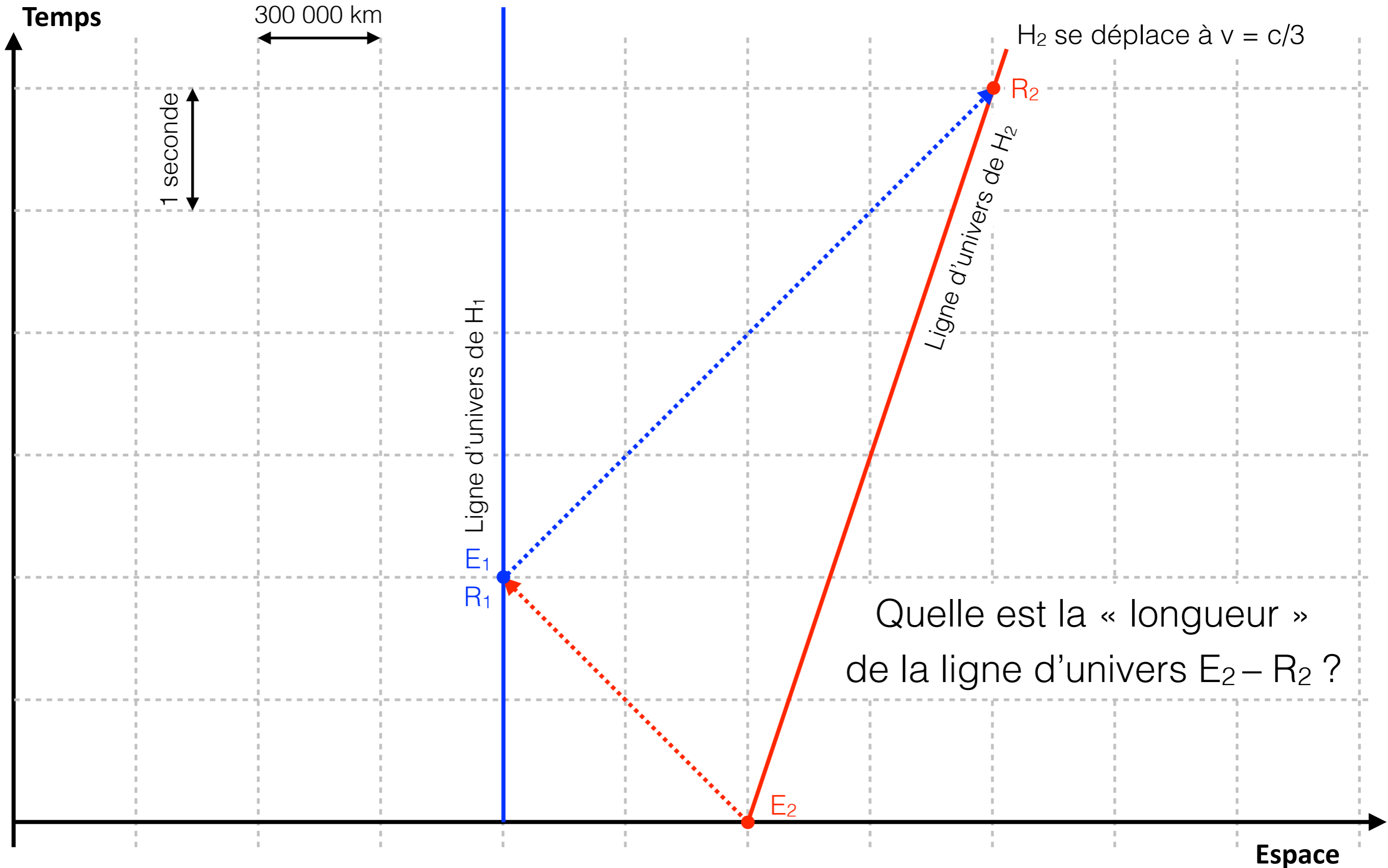
La durée dépend de l'observateur !

Et c joue le rôle d'une vitesse limite...

Espace-temps & ligne d'univers



Espace-temps & ligne d'univers



Les jumeaux de Langevin (1911)

Alice reste **immobile** sur Terre.

Bob fait un **aller** – **retour** dans l'espace.

Bob se déplace à $4/5$ de la vitesse de la lumière.

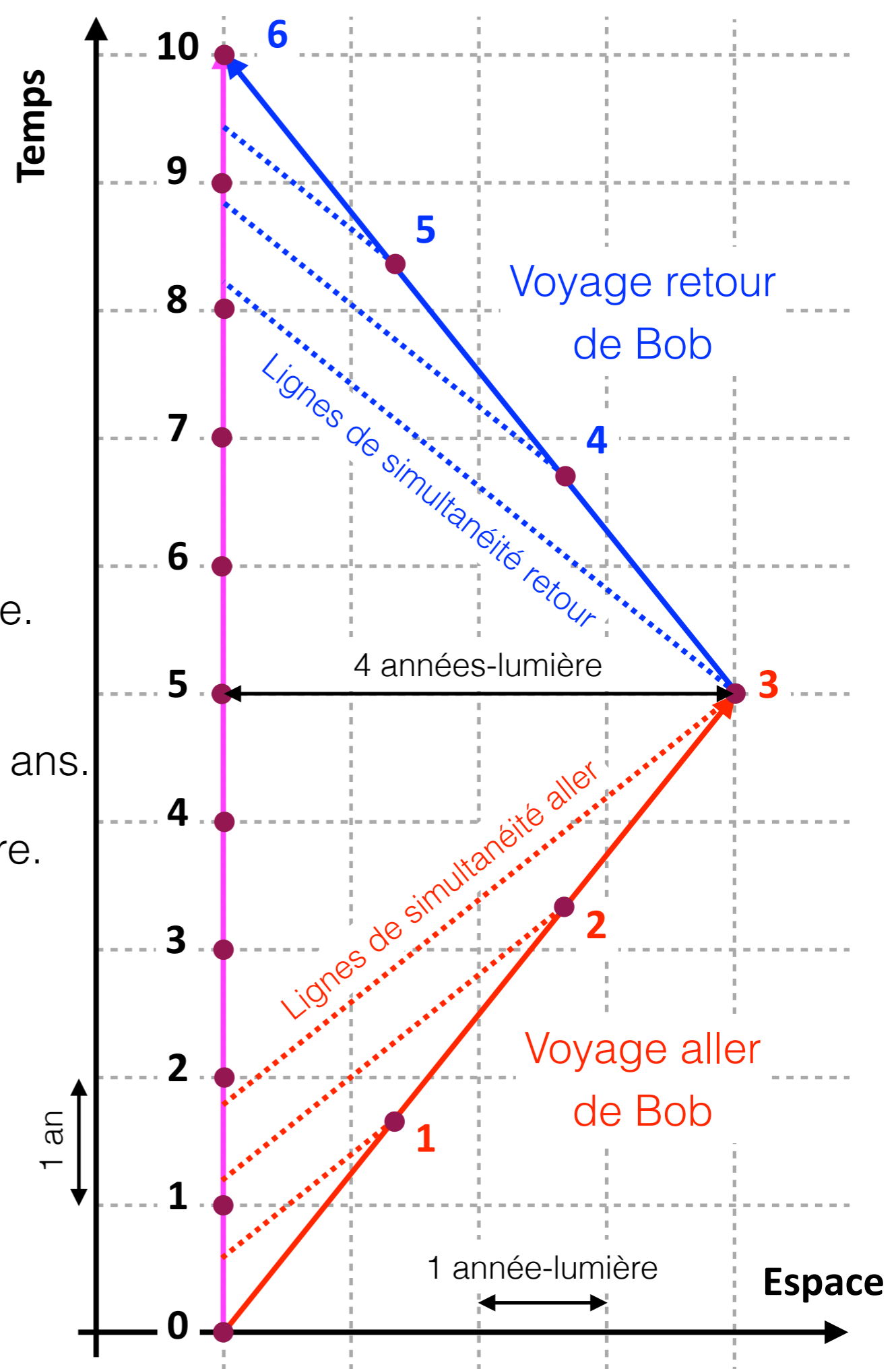
Son facteur γ vaut donc $5/3$.

La durée du voyage mesurée par Alice vaut 10 ans.

Bob a donc parcouru $5 \times 4/5 = 4$ années-lumière.

Pour Bob, le voyage dure $10 \times 3/5 = 6$ ans !

La durée *propre* mesure la longueur spatio-temporelle de la trajectoire suivie.





La Planète des singes (Franklin Schaffner, 1968)

« **In less than an hour** we'll finish our **6th month** out of Cape Kennedy.

Six month in deep space, by our time that is. According to Dr Hasslein theory of time, in a vehicle travelling nearly the speed of light the Earth has aged nearly **700 years** since we left it, while **we've aged hardly at all**.

Maybe so...

[...]

But seen from out here, everything seems different, time bends, space is boundless, it squashes a man's ego. I feel lonely. »

« Dans moins d'une heure nous terminerons notre 6^e mois de voyage depuis Cap Kennedy.

6 mois dans l'espace profond, selon notre temps. D'après la théorie sur le temps du Dr Hasslein, dans un vaisseau qui voyage à une vitesse proche celle de la lumière, la Terre a vieilli de 700 ans depuis que nous l'avons quittée, alors que nous-mêmes n'avons presque pas vieilli.

C'est sans doute ainsi...

[...]

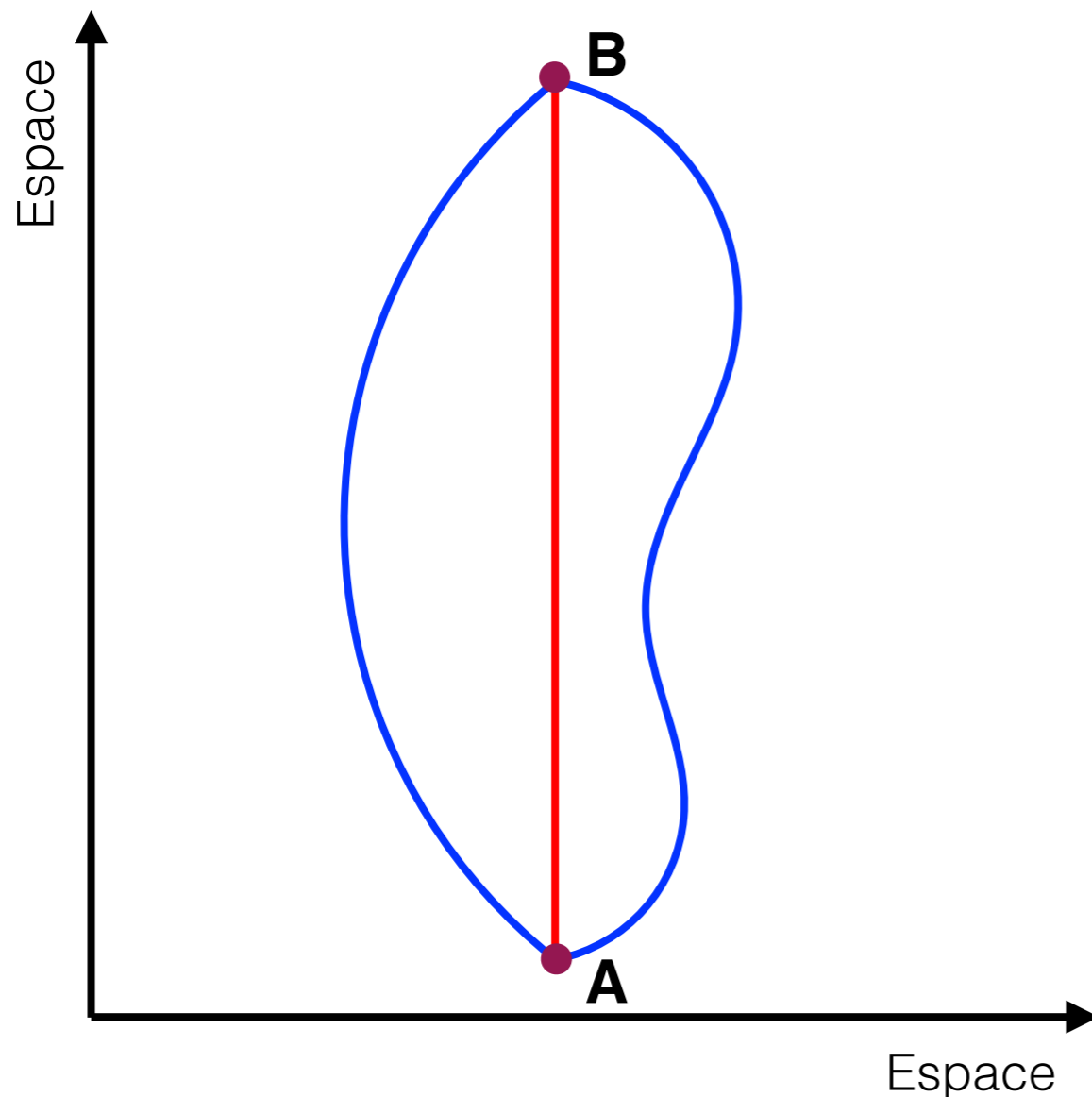
Vu d'ici, tout semble différent, le temps se courbe, l'espace est infini, de quoi écraser l'ego d'un d'homme. Je me sens seul. »

Géométrie

La distance qui sépare deux points A et B dépend du chemin qui les relie.

Il existe un chemin de plus *courte* longueur :

- la droite dans le plan euclidien ;
- une géodésique de l'espace dans le cas général.

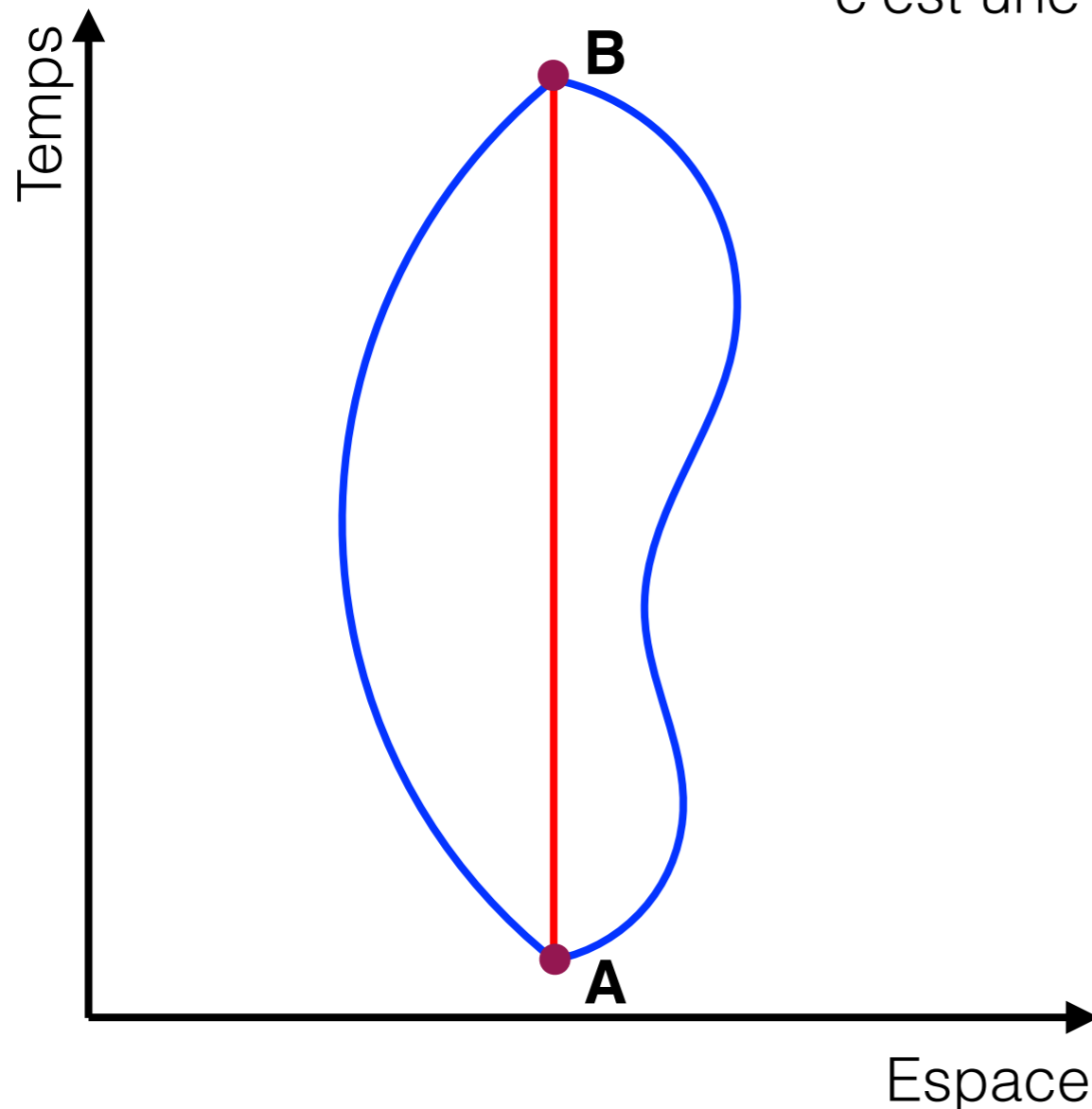


Un arpenteur sur une **courbe**
compte plus de mètres
qu'un arpenteur sur la **droite**.

Chrono-géométrie

La longueur de la ligne d'univers qui sépare deux événements est mesurée par la durée propre mise pour la parcourir. Elle dépend du chemin suivi.

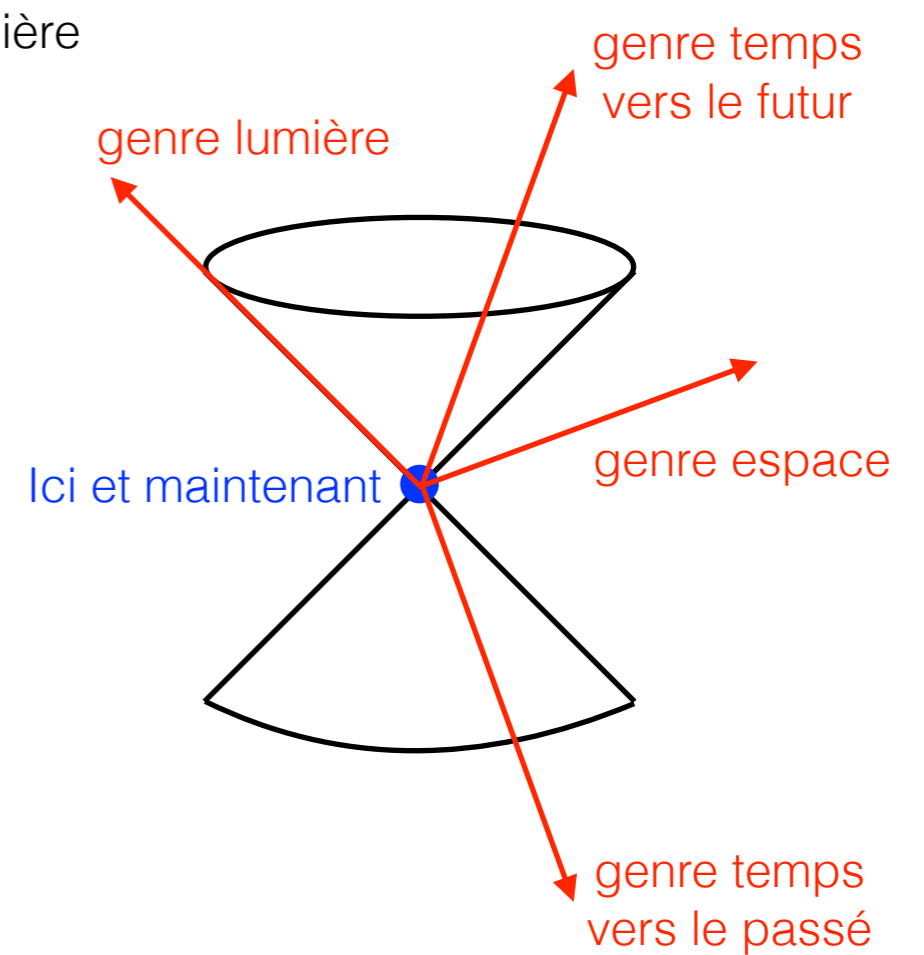
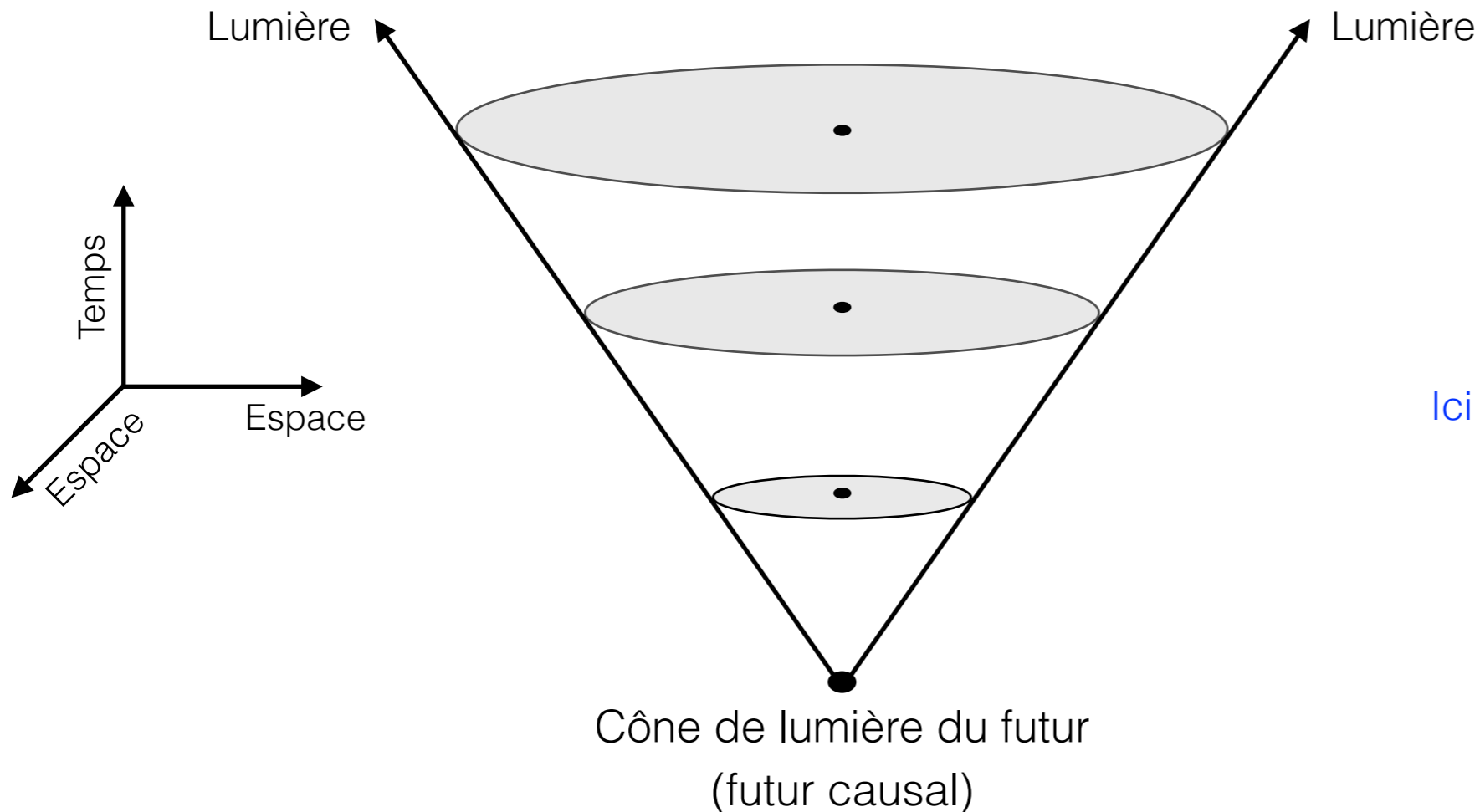
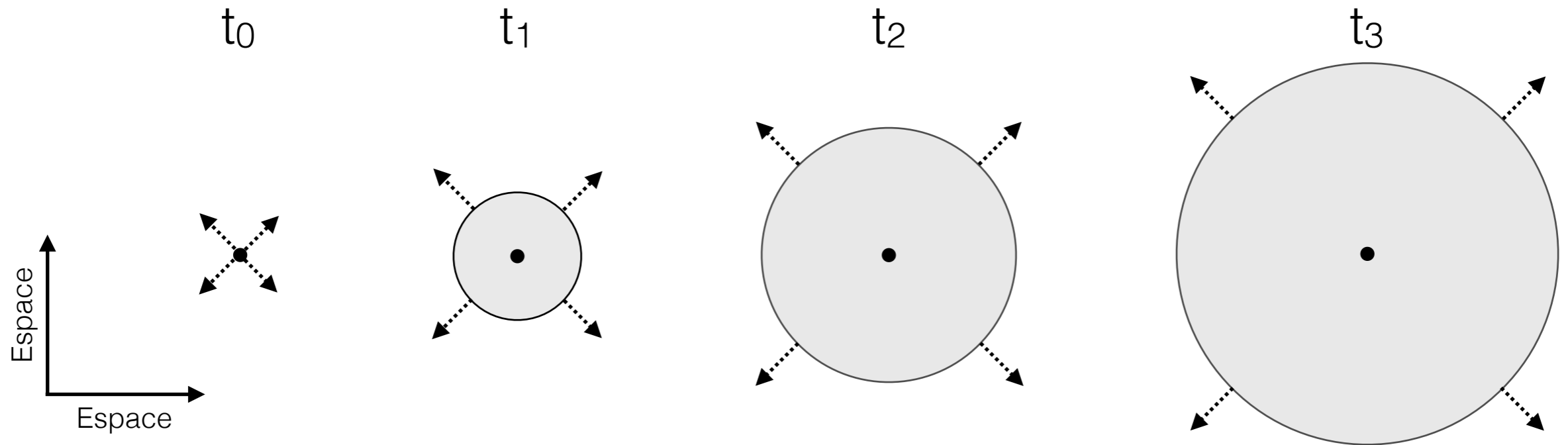
Il existe un chemin de plus *longue* durée propre :
- le mouvement rectiligne à vitesse constante (inertiel) ;
- c'est une géodésique de l'espace-temps.



Un voyageur sur la **droite** compte plus de secondes qu'un voyageur sur la **courbe**.

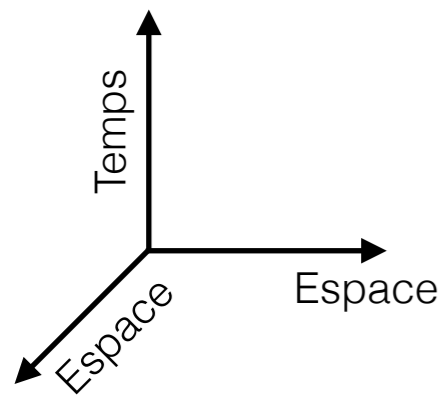
Mais les secondes de l'un sont identiques aux secondes de l'autre !

Cône de lumière

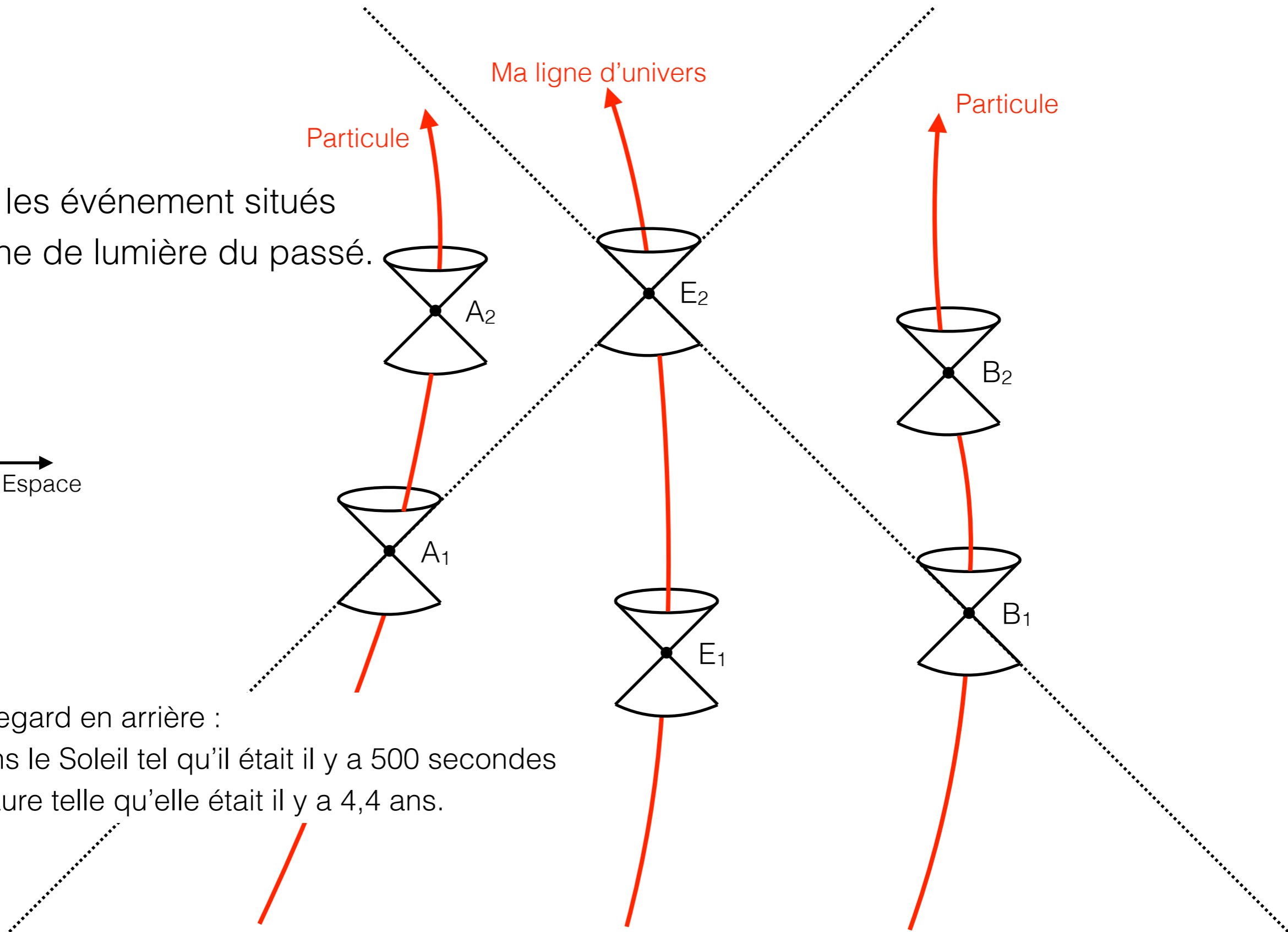


L'espace-temps « plat »

E_2 « voit » les événements situés dans son cône de lumière du passé.



Durée de regard en arrière :
nous voyons le Soleil tel qu'il était il y a 500 secondes
à du Centaure telle qu'elle était il y a 4,4 ans.



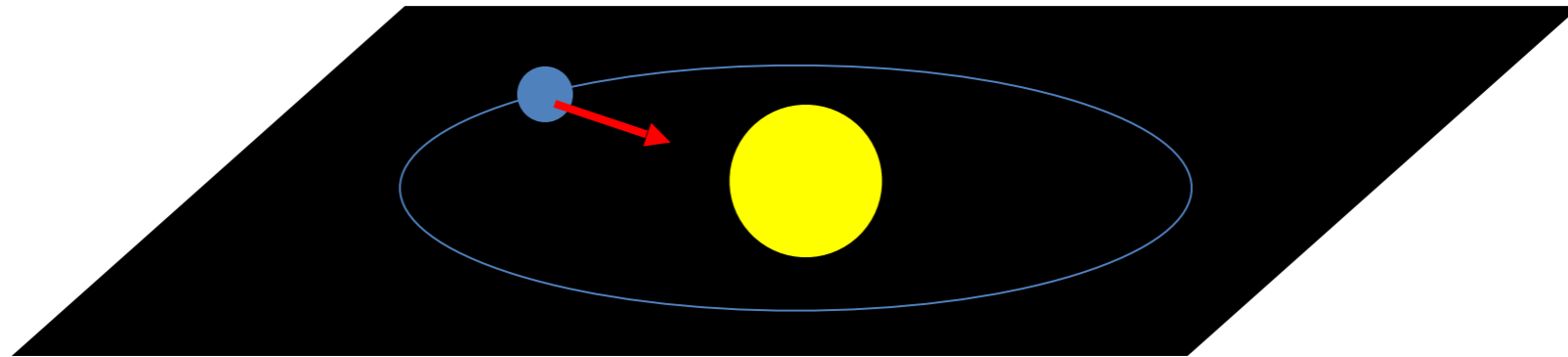
Jeu vidéo relativiste



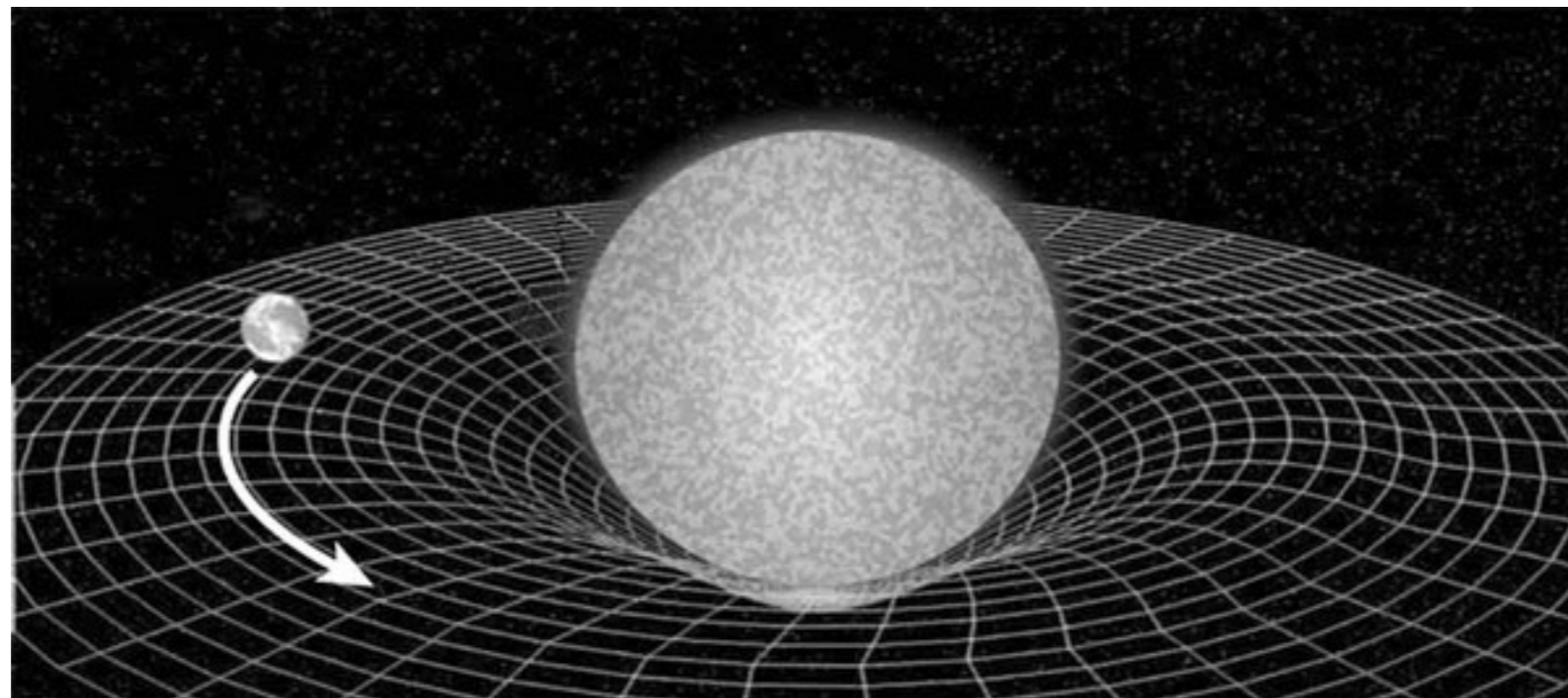
<http://gamelab.mit.edu/games/a-slower-speed-of-light/>

La relativité général (1915)

Pour **Newton** la gravité est une force qui agit *instantanément* entre corps massifs.



Pour **Einstein**, la gravité est une manifestation de la *courbure* de l'espace-temps imposée par la distribution & le flux de matière et d'énergie ; elle se *propage* à c .



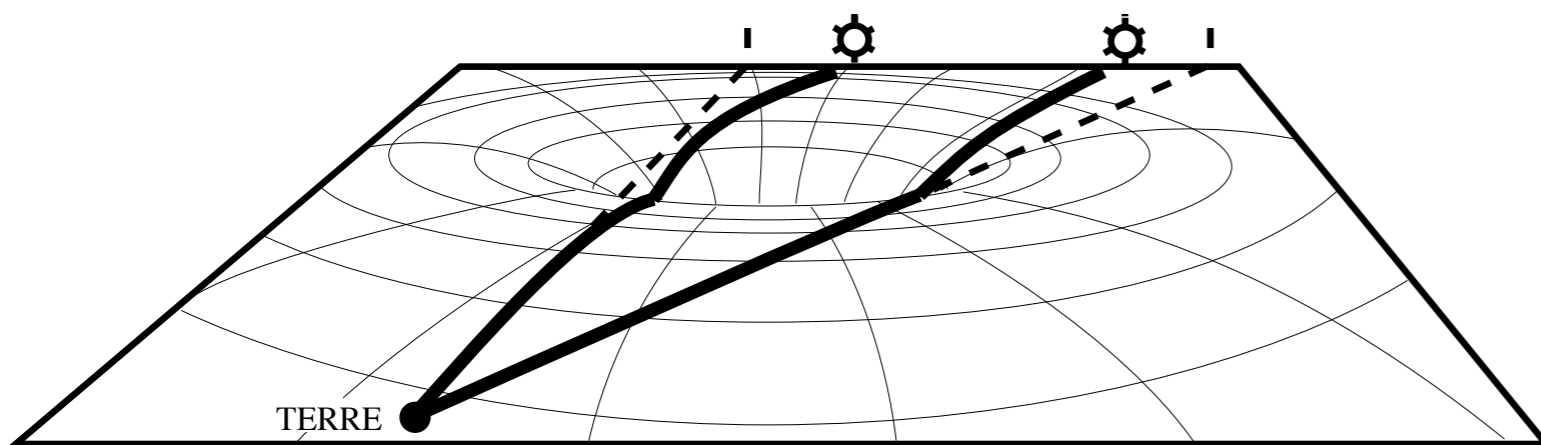
Déviatisation de la lumière

Prédiction : la trajectoire de la lumière est modifiée par la présence d'une masse.

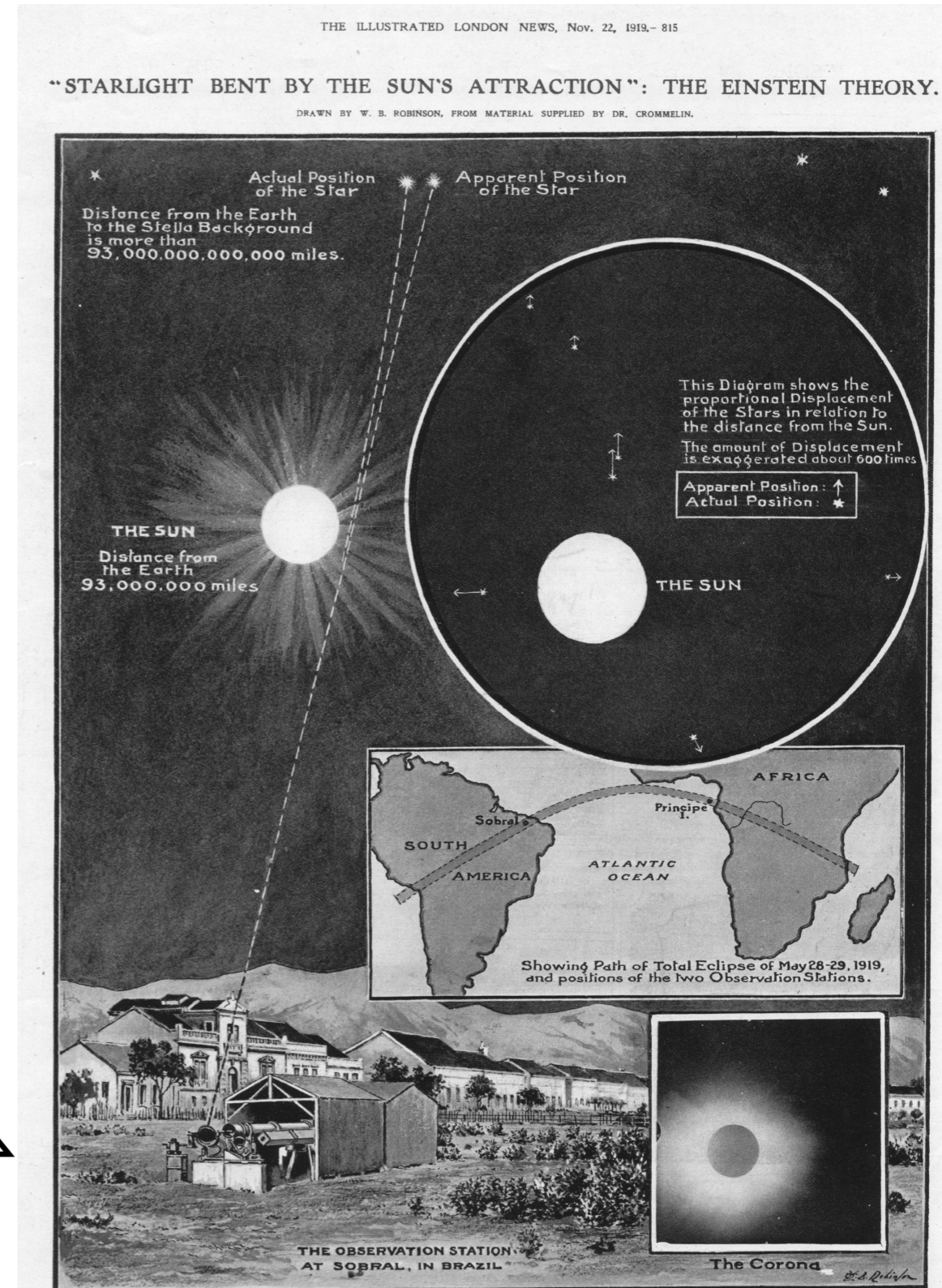
Angle de déviation $\alpha = \frac{4GM}{bc^2}$

Cas du Soleil $R_{\odot} = 696\,000\text{ km}$
 $\alpha \simeq 1.75''$

Pièce de 1 euro vue à 2,74 km



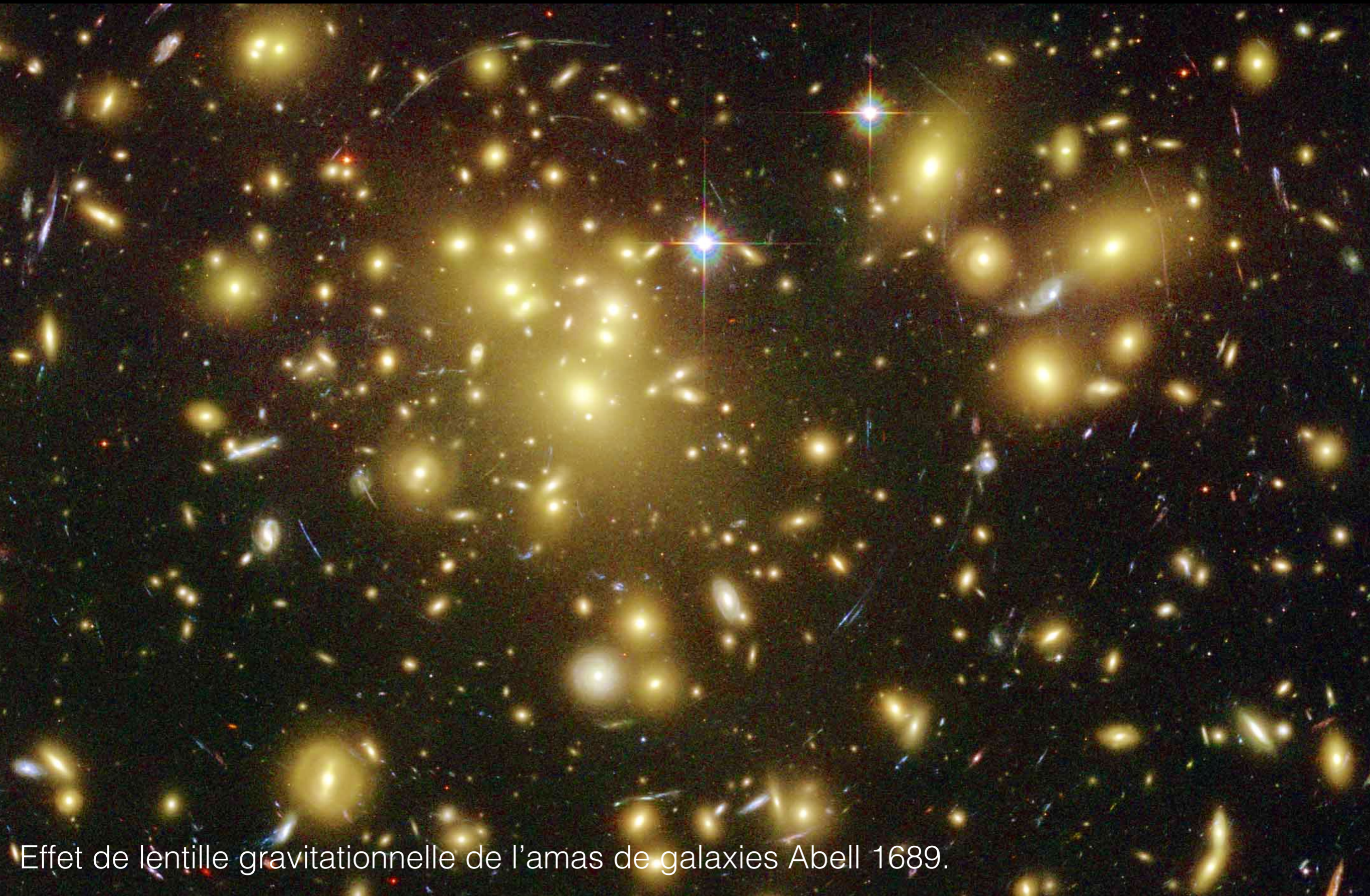
Couverture du *Illustrated London News*
 du 22 novembre 1919



THE CURVATURE OF LIGHT: EVIDENCE FROM BRITISH OBSERVERS' PHOTOGRAPHS AT THE ECLIPSE OF THE SUN.

The results obtained by the British expeditions to observe the total eclipse of the sun last May verified Professor Einstein's theory that light is subject to gravitation. Writing in our issue of November 15, Dr. A. C. Crommelin, one of the British observers, said: "The eclipse was specially favourable for the purpose, there being no fewer than twelve fairly bright stars near the limb of the sun. The process of observation consisted in taking photographs of these stars during totality, and comparing them with other plates of the same region taken when the sun was not in the neighbourhood. Then if the starlight is bent by the sun's attraction, the stars on the eclipse plates would seem to be pushed outward compared with those on the other plates. . . . The second Sobral camera and the one used at Principe agree in supporting (Einstein's theory). . . . It is of profound philosophical interest. Straight lines in Einstein's space cannot exist; they are parts of gigantic curves."—[Drawing Copyrighted in the United States and Canada.]

Lentille gravitationnelle



Effet de lentille gravitationnelle de l'amas de galaxies Abell 1689.

Ceci n'est pas une équation !



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$$

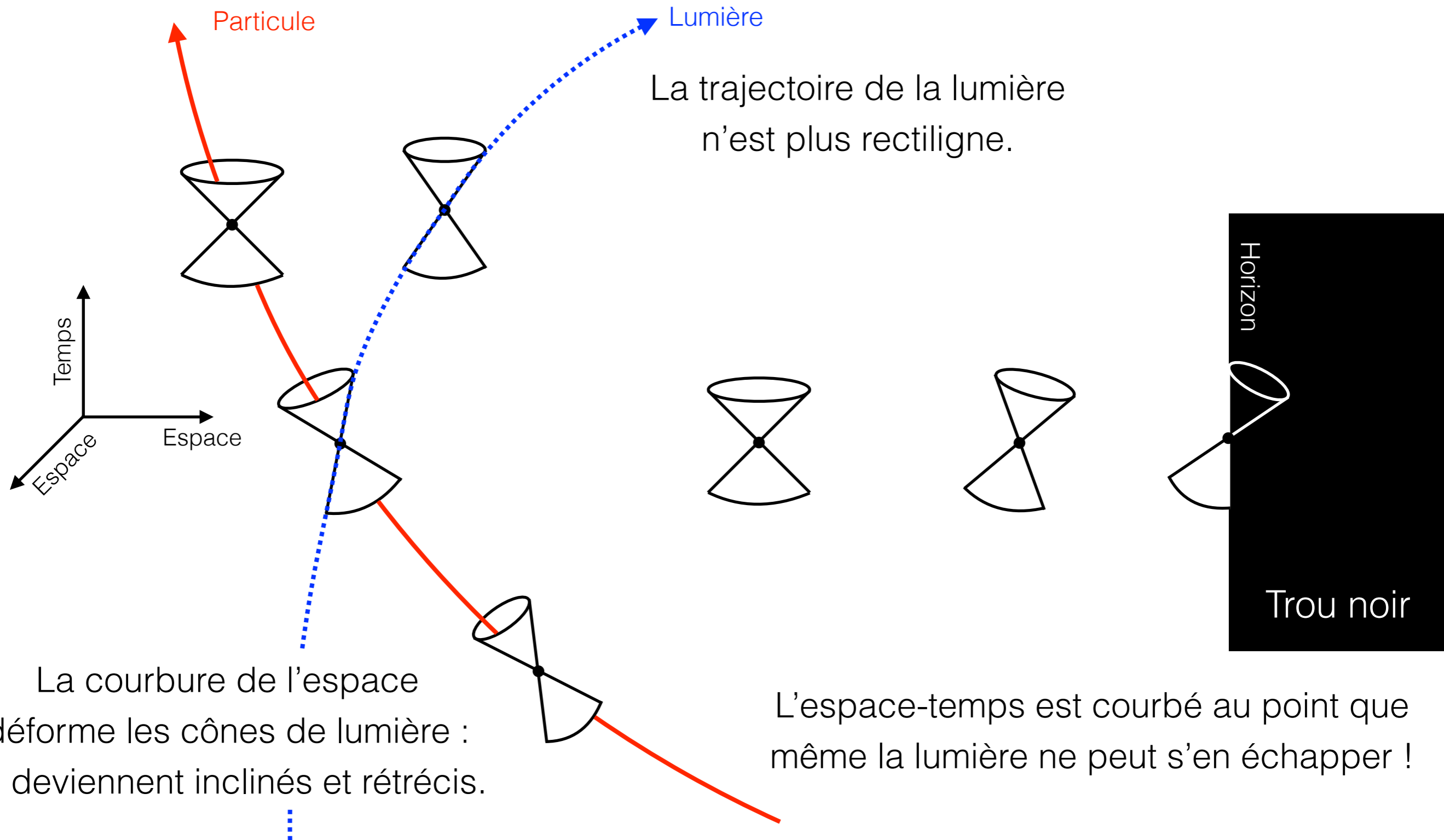
$$T_{\mu\nu} - \frac{8\pi G}{c^4}$$

Géométrie

Énergie-impulsion

Locomotive du cimetière de train de la ville d'Uyuni (Bolivie).

L'espace-temps courbé

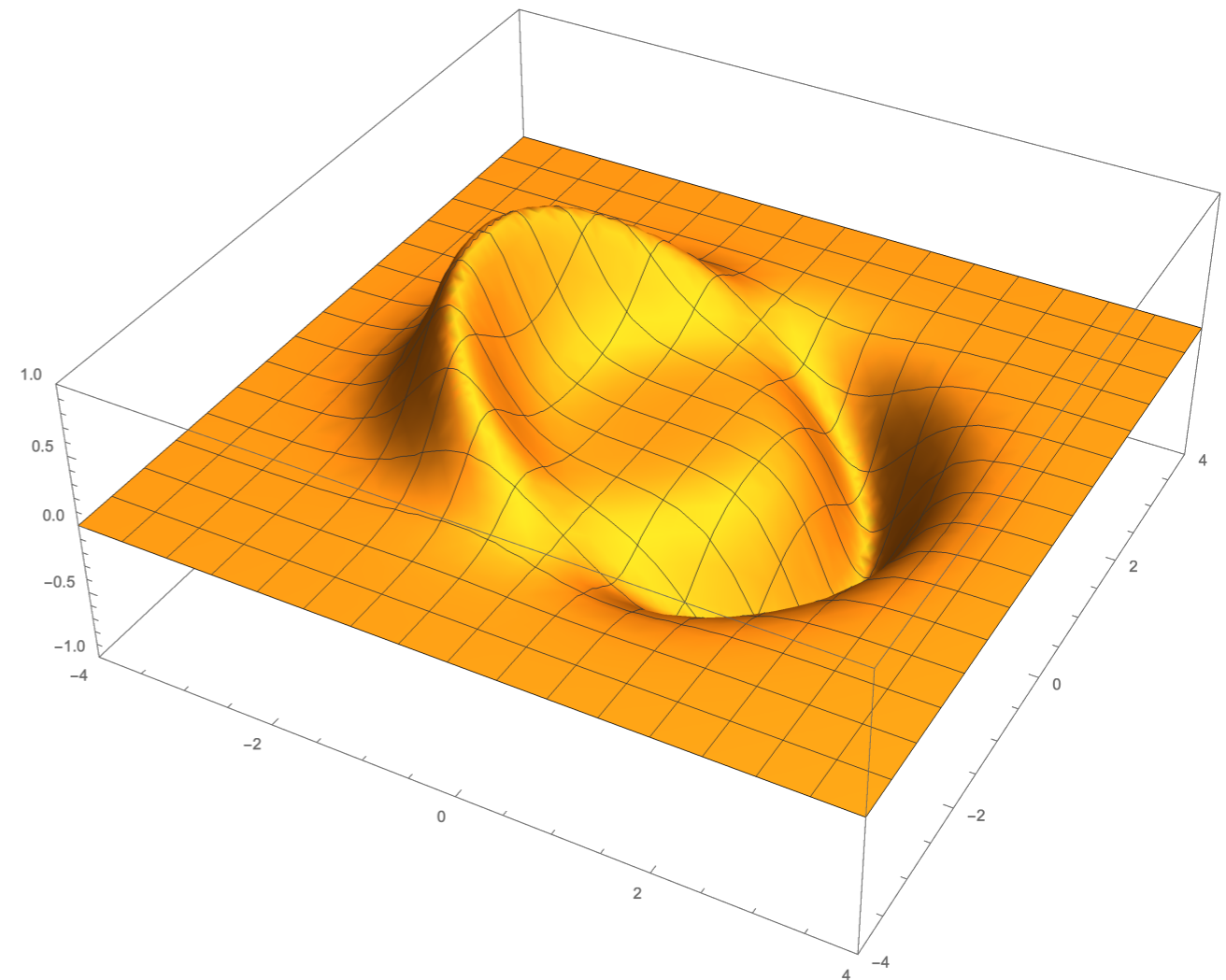
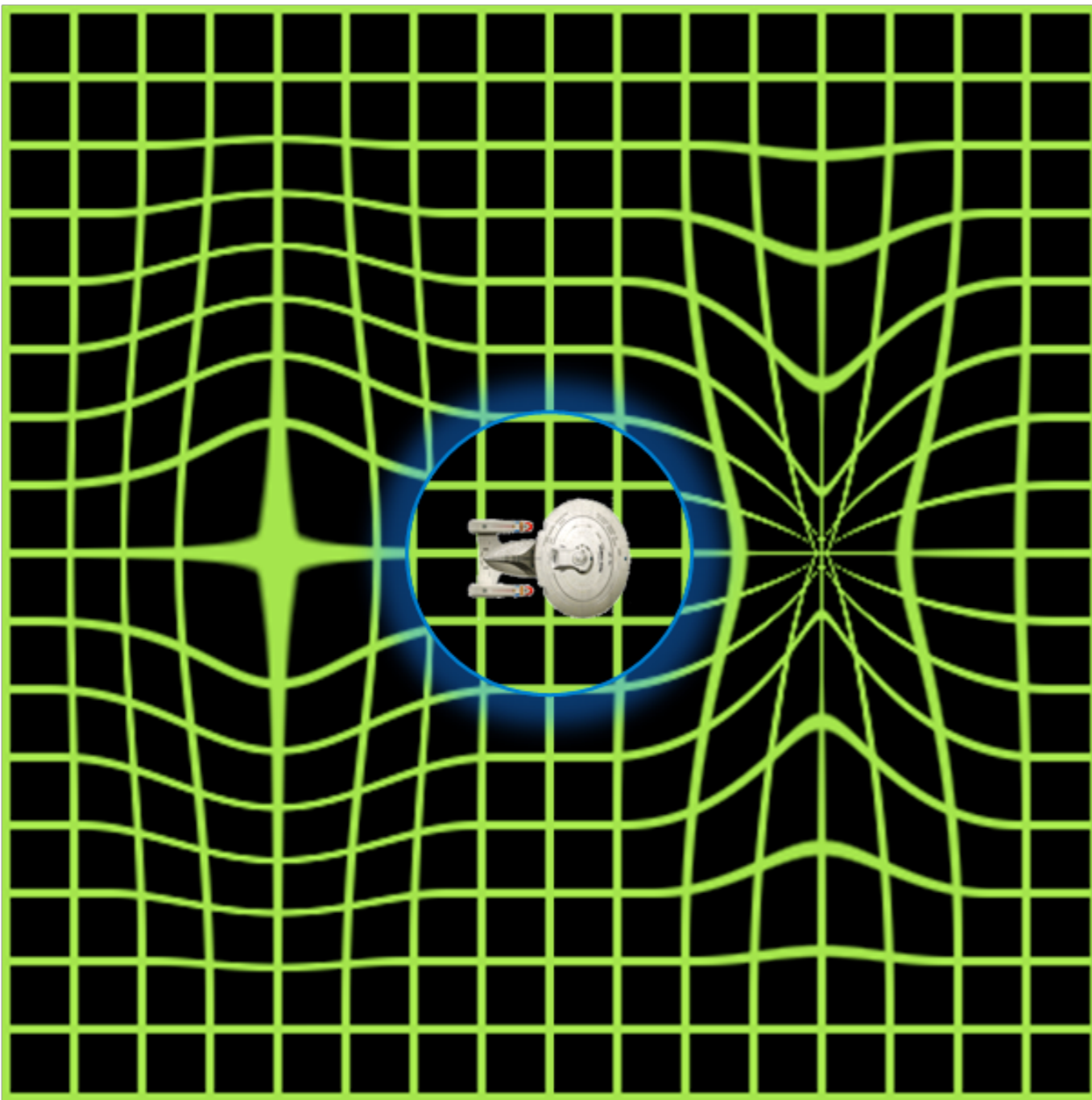


Se déplacer en pliant l'espace ?



Princesse Irulan : « [...] la substance la plus précieuse de l'univers est l'épice. L'épice prolonge la vie, l'épice élargit la conscience, l'épice est vitale pour les voyages dans l'espace. La Guilde Spatiale et ses Navigateurs, qui ont muté depuis plus de quatre mille ans, utilisent le gaz d'épice orange, qui leur donne la capacité de plier l'espace, c'est-à-dire de voyager dans n'importe quelle partie de l'univers sans se déplacer. »

Se déplacer en pliant l'espace !



Le warp drive d'Alcubierre (1994) : déformer l'espace-temps pour s'y déplacer...

Se déplacer en pliant l'espace !

Bon voyage !

