

L'espace et le temps pour tous

I do not define time, space, place and motion, as being well know to all.
Isaac Newton (1642-1726), Principia

Jean-Philippe UZAN



Notions « communes »

Nous avons une représentation intuitive de l'espace et du temps.

Philosophie

Qu'est-ce que l'espace? Qu'est-ce que le temps?

Physique (*philosophie naturelle*)

Comment décrit-on l'espace et le temps?

Comment mesure-t-on des distances, des durées?

Ces questions sont un des grands fils rouges de l'histoire des sciences

Antiquité

Arpentage : géométrie

Cycles lunaire/solaire – développement des calendriers –
importance pour l'agriculture

Renaissance

Newton

Moderne

Einstein et les 2 relativités

Notions « communes »

L'espace et le temps sont des concepts abstraits constitués à partir de l'expérience des sens et du raisonnement scientifique.

Leur formalisation s'est imposée par la rencontre de la géométrie et de la mécanique.

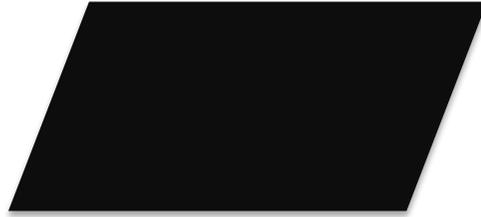
L'espace

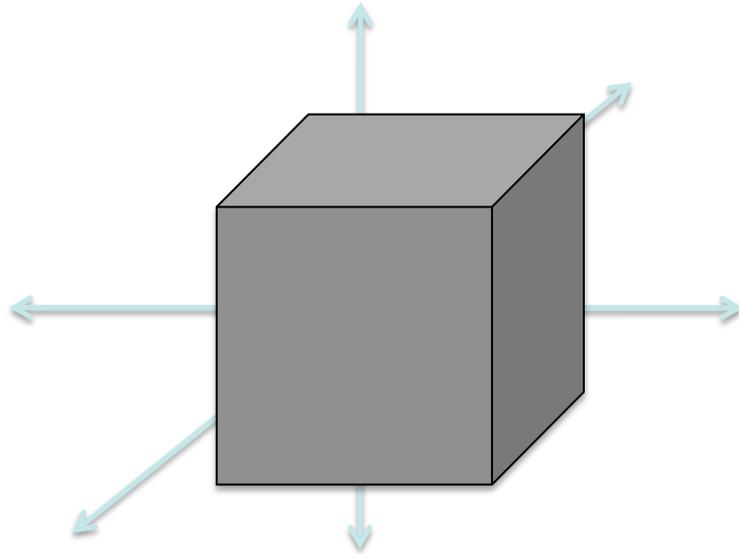
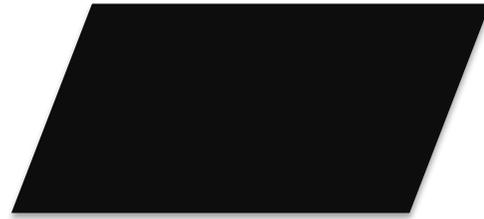
Propriétés de l'espace

L'espace a 3 dimensions









?

Propriétés de l'espace

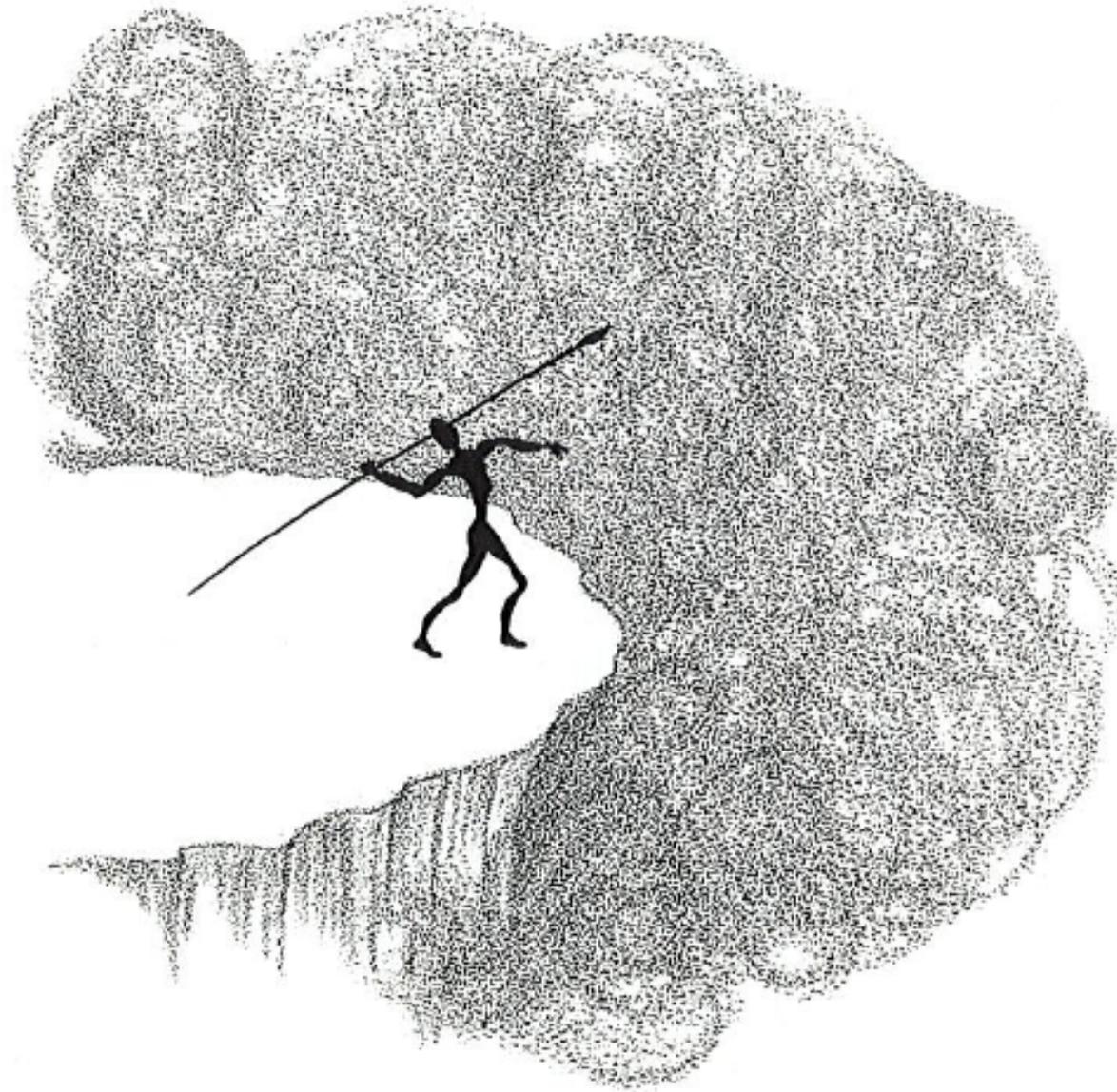
L'espace a 3 dimensions

Est-ce que l'espace a 3 dimensions?

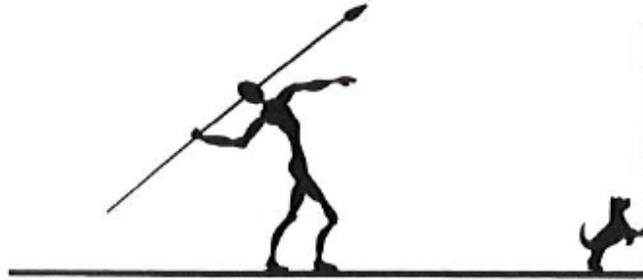
Pourquoi avons-nous l'impression qu'il n'y en a que 3?

L'espace est continu

Propriétés de l'espace



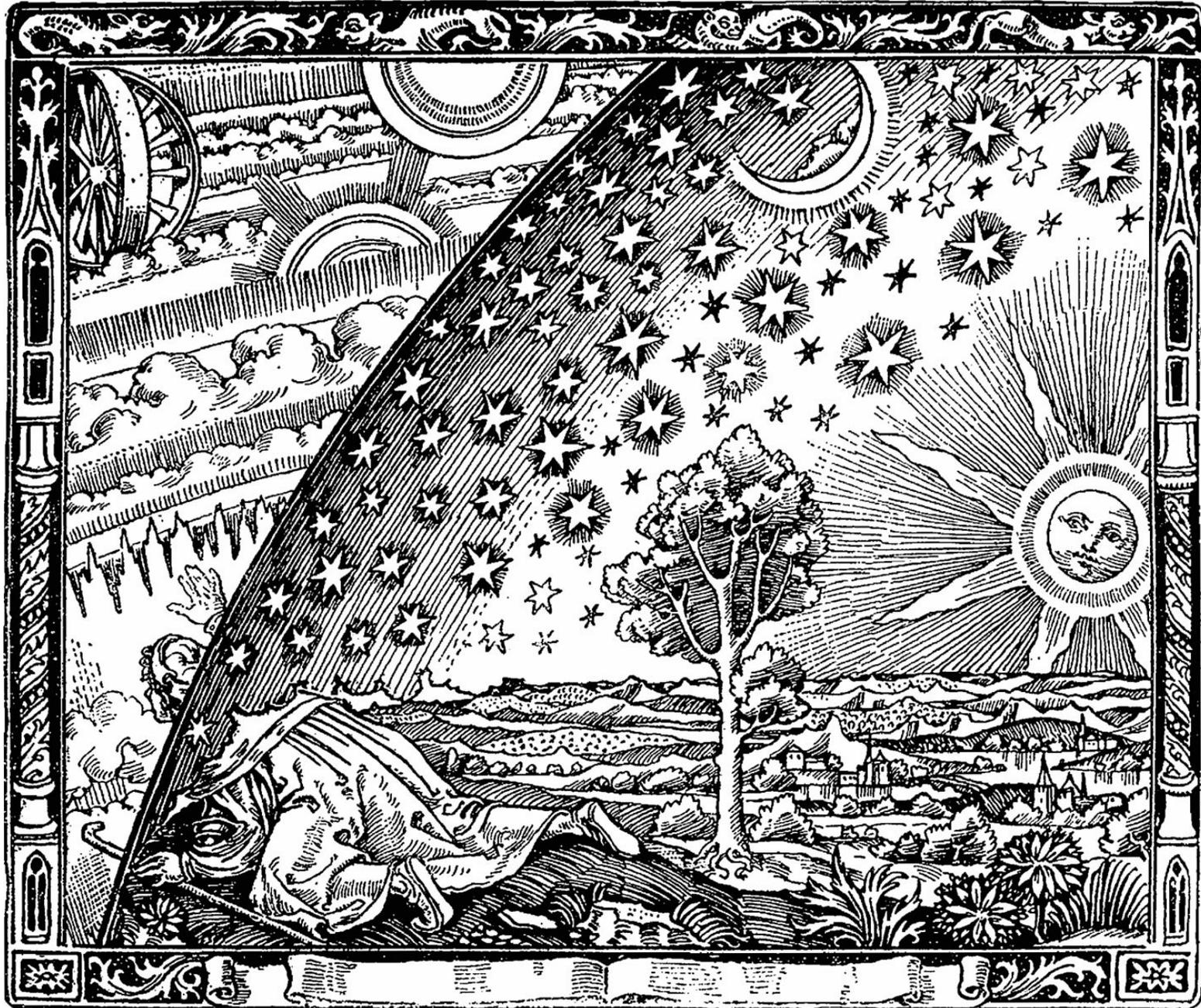
Propriétés de l'espace



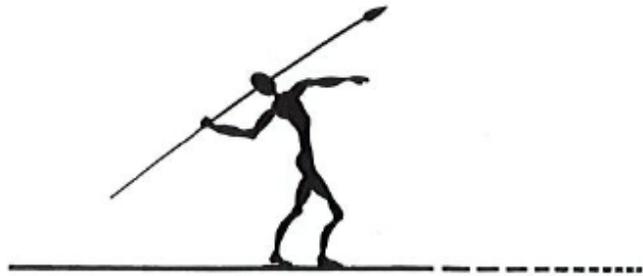
Exemple de mondes à bord



Propriétés de l'espace



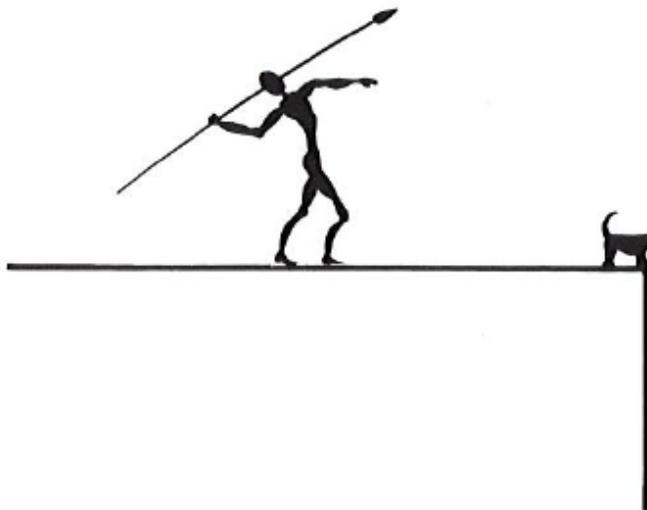
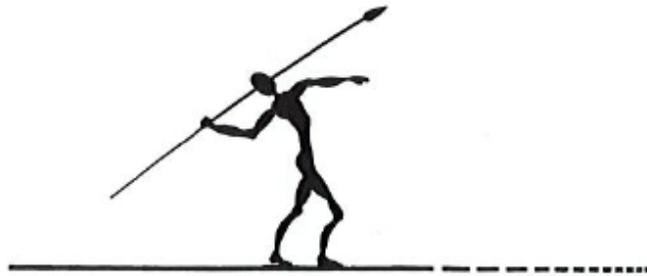
Propriétés de l'espace

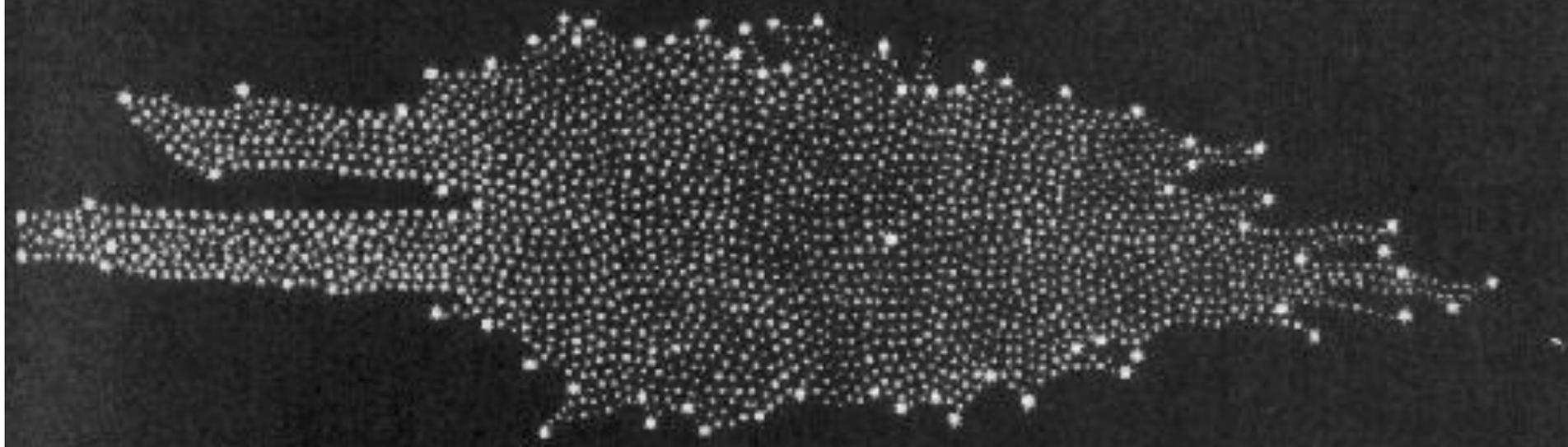
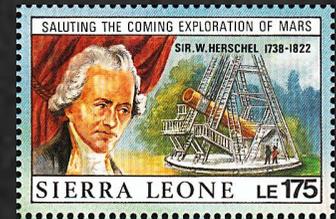


Propriétés de l'espace



Propriétés de l'espace





Propriétés de l'espace

L'espace a 3 dimensions

Est-ce que l'espace a 3 dimensions?

Pourquoi avons-nous l'impression qu'il n'y en a que 3?

L'espace est continu

Il n'a pas de trous

Il n'a pas de bord

Est-il infini ou fini?

L'espace est homogène et isotrope

Propriétés de l'espace

L'espace a 3 dimensions

Est-ce que l'espace a 3 dimensions?

Pourquoi avons-nous l'impression qu'il n'y en a que 3?

L'espace est continu

Il n'a pas de trous

Il n'a pas de bord

Est-il infini ou fini?

L'espace est homogène et isotrope

Il est statique et immuable

A-t-il une origine? Une fin?

Géométrie

Toutes ces intuitions vont être formalisées par une géométrie.

La géométrie naît de la pratique concrète de mesure (des champs etc...) à Babylone, Egypte, Grèce.

Elle va tenter de s'abstraire de sa relation au monde physique, pour se donner l'aura de mathématiques

Euclide, Le Eléments

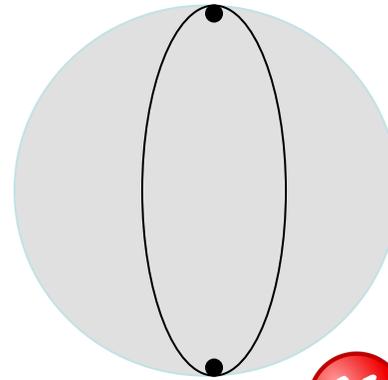
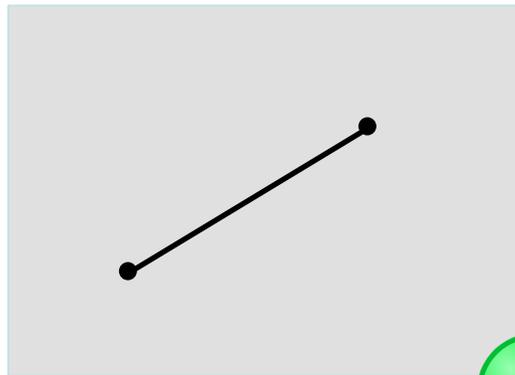
Euclide avec un compas dans "l'Ecole d'Athènes de 'Stanze di Raffaello'"



Les postulats de la géométrie euclidienne

5 postulats des *Eléments*:

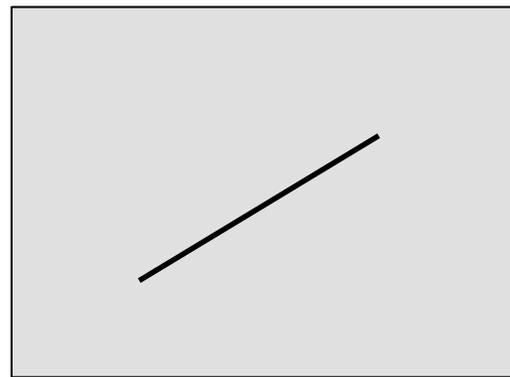
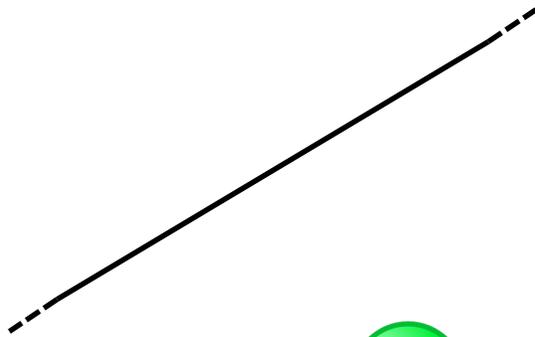
1. Il existe un unique segment joignant 2 points



Les postulats de la géométrie euclidienne

5 postulats des *Eléments*:

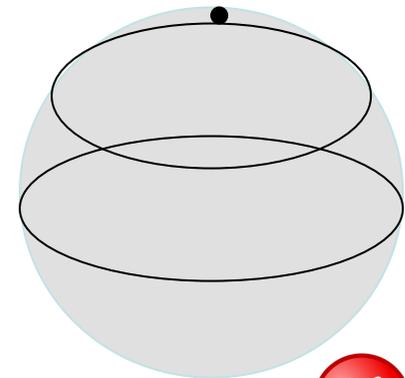
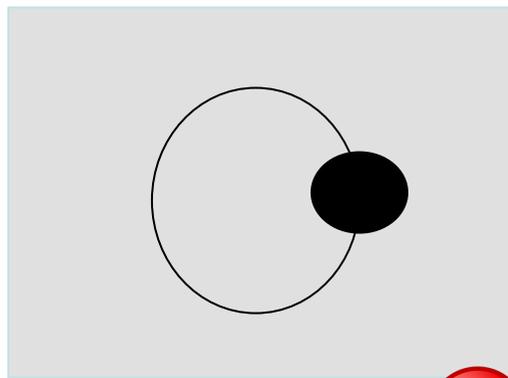
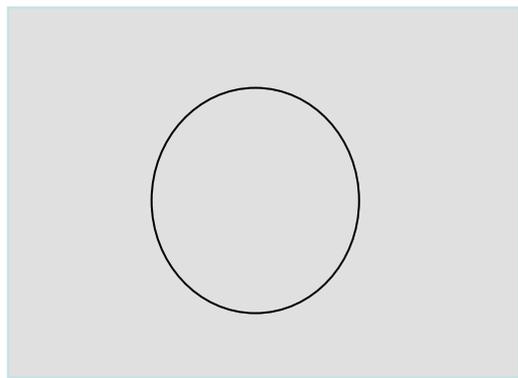
1. Il existe un unique segment joignant 2 points
2. On peut prolonger continûment et sans limite tout segment de droite



Les postulats de la géométrie euclidienne

5 postulats des *Eléments*:

1. Il existe un unique segment joignant 2 points
2. On peut prolonger continûment et sans limite tout segment de droite
3. Il existe un cercle pour tout rayon et tout centre



Les postulats de la géométrie euclidienne

5 postulats des *Eléments*:

1. Il existe un unique segment joignant 2 points
2. On peut prolonger continûment et sans limite tout segment de droite
3. Il existe un cercle pour tout rayon et tout centre
4. Égalité de tous les angles droits

Les postulats de la géométrie euclidienne

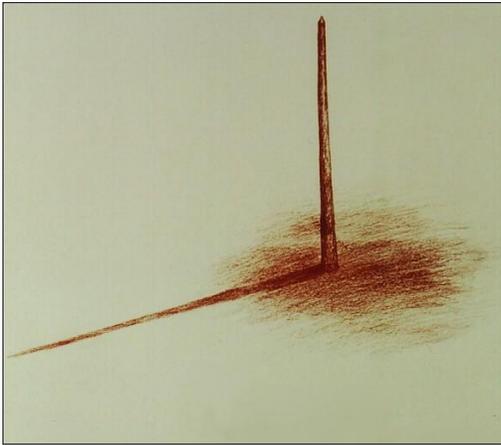
5 postulats des *Eléments*:

1. Il existe un unique segment joignant 2 points
2. On peut prolonger continûment et sans limite tout segment de droite
3. Il existe un cercle pour tout rayon et tout centre
4. Egalité de tous les angles droits
5. *Postulat des parallèles*: 2 droites en coupant une troisième de telle sorte que la somme des angles intérieurs est inférieure à 180° doivent se rencontrer.

Premières applications

Outils de mesure

Cette géométrie plus quelques outils simples va permettre d'arpenter la Terre et le système solaire.



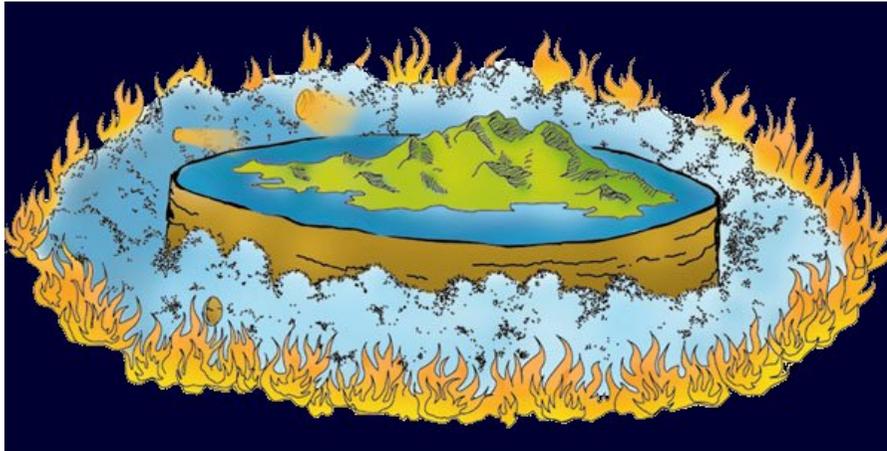
La forme de la Terre



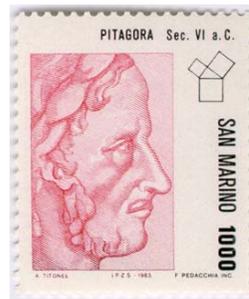
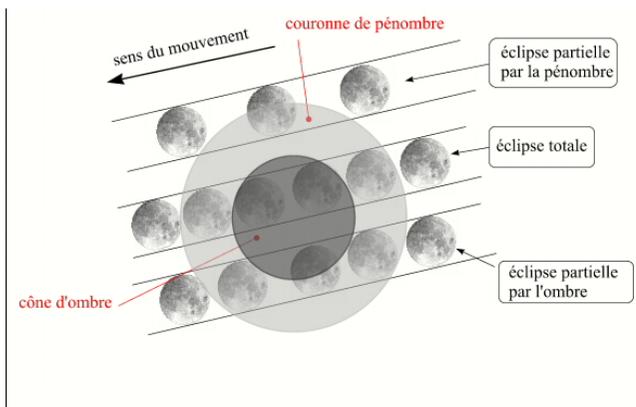
Anaximandre (611-446 AVJC)

Plate ou non ?

La forme de la Terre



Anaximandre (611-446 AVJC)



582 – 497 AVJC

14

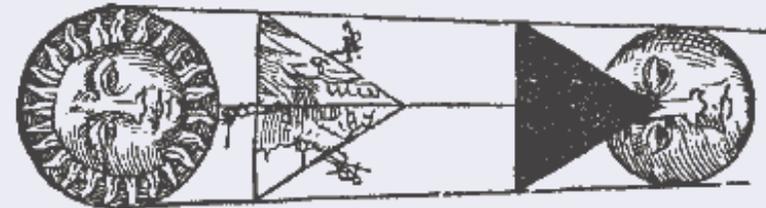
Premier Partie de la
Ceste Figure demonstre que la Terre est ronde.



Si la Terre estoit quarree, l'ombre d'icelle paroistroit de ceste mesme forme en l'Éclipse de la Lune.



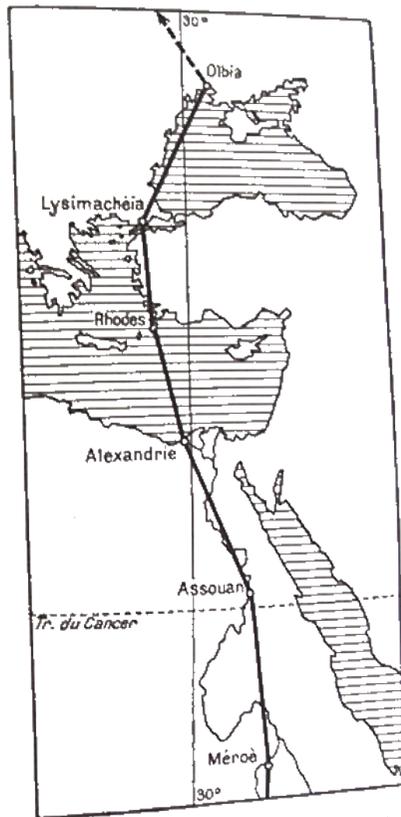
Si la Terre estoit triangulaire, l'ombre d'icelle seroit aussi en l'Éclipse triangulaire.



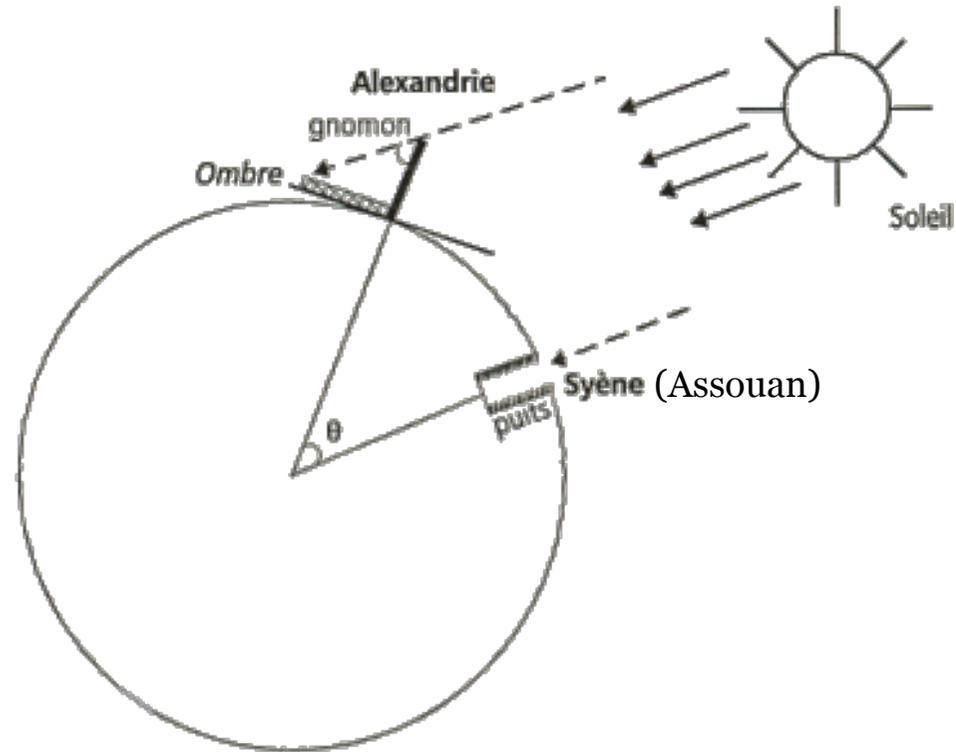
Si la Terre auoit six anglez, son ombre en l'Éclipse de la Lune, seroit de la mesme forme.



Quelle est la taille de la Terre ?



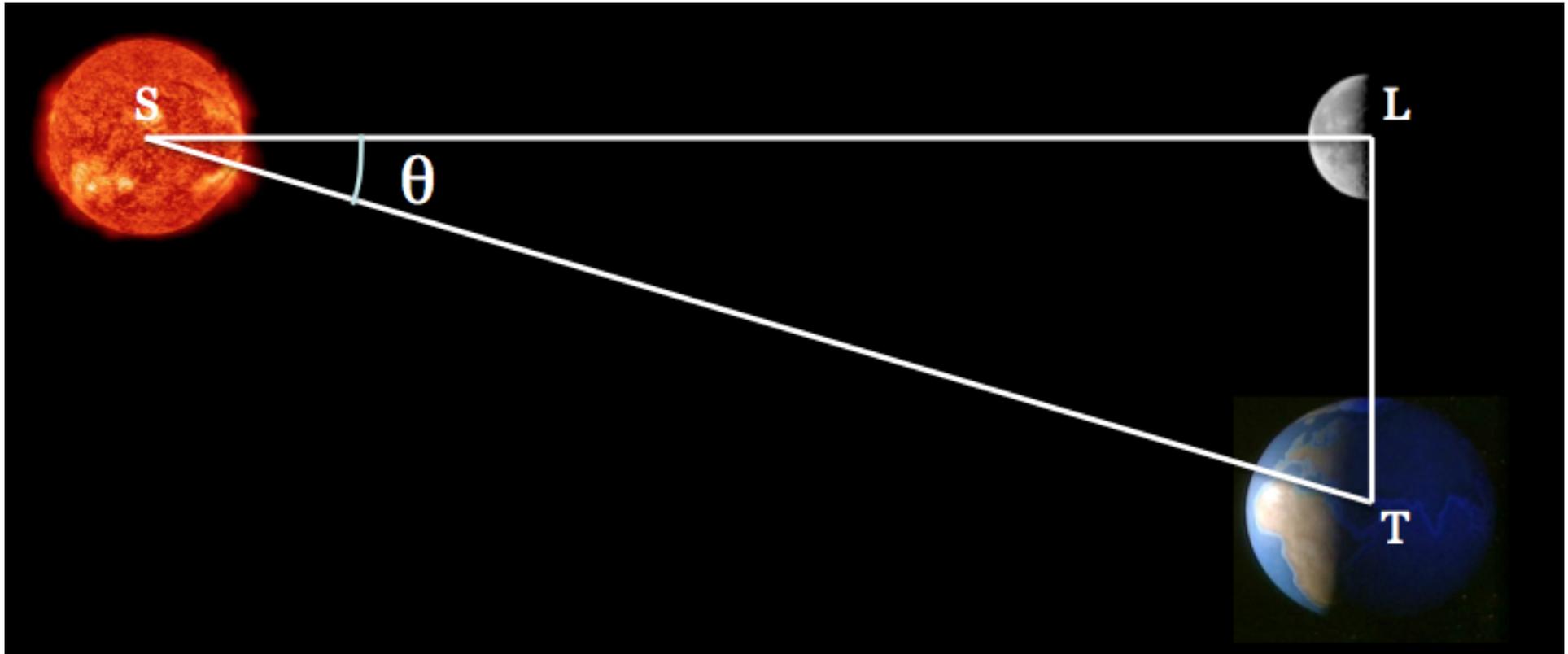
LE MÉRIDIEN D'ALEXANDRIE
d'après Ératosthène



Eratosthène: 39 785 km
Aujourd'hui: 40 075 km

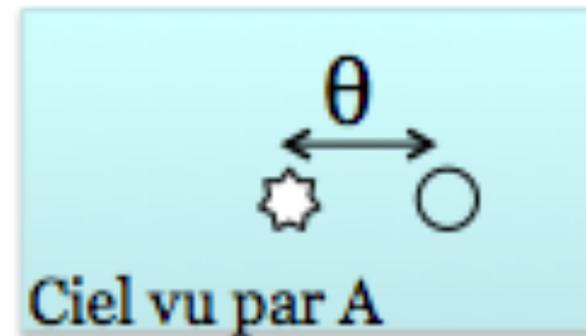
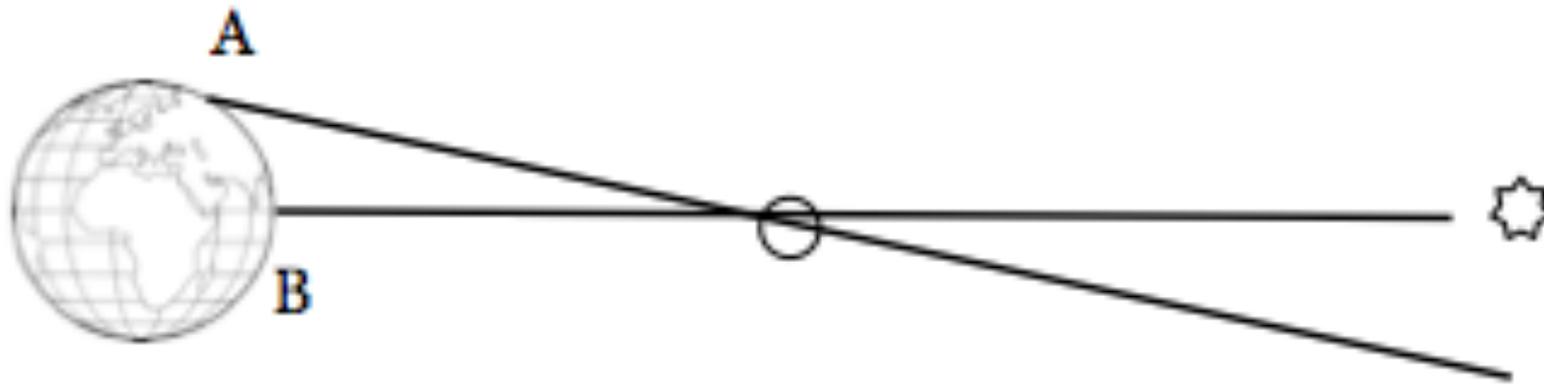
Distance de la Lune

Distance de la Lune

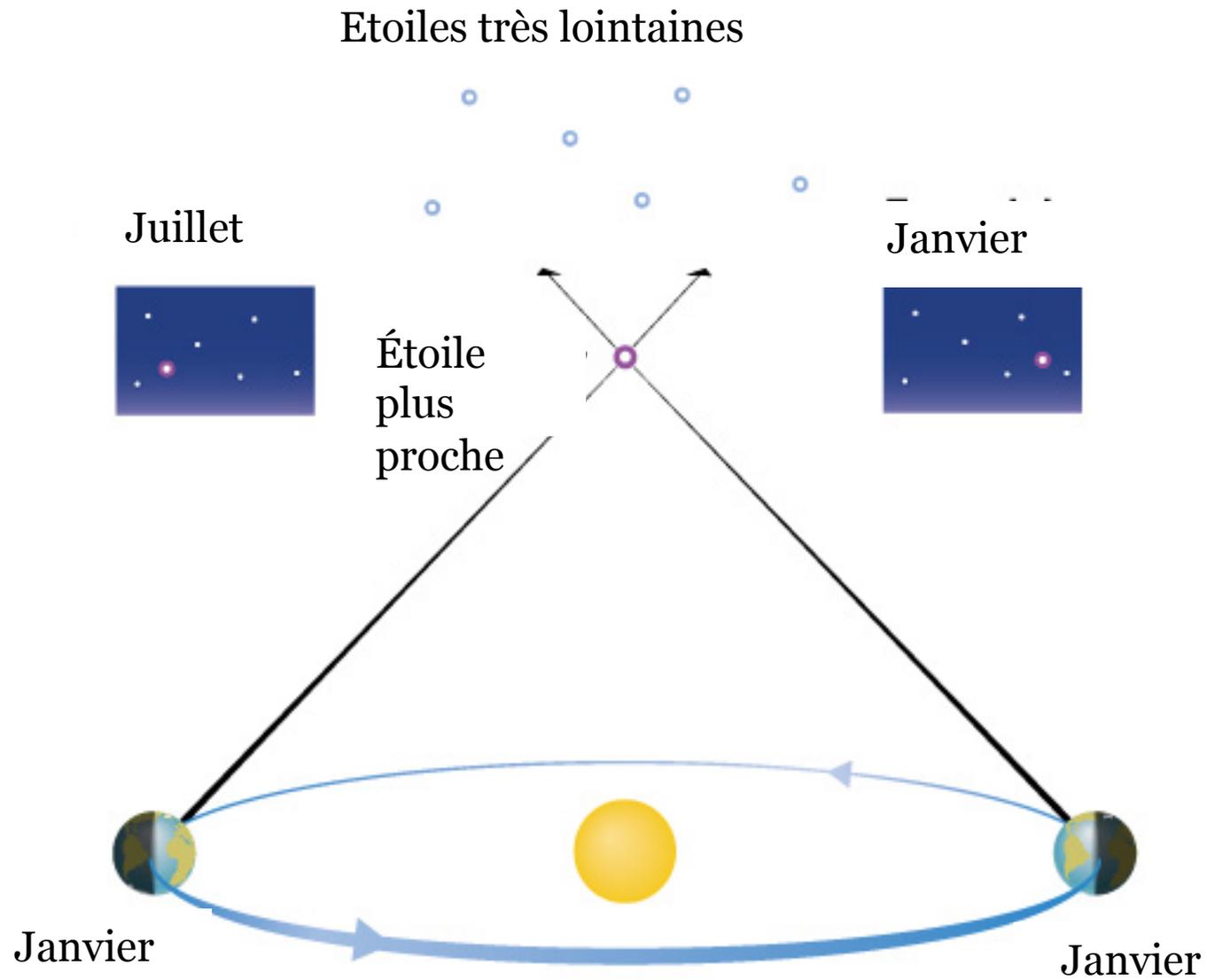


Aristarque de Samos

Distance des planètes/étoiles

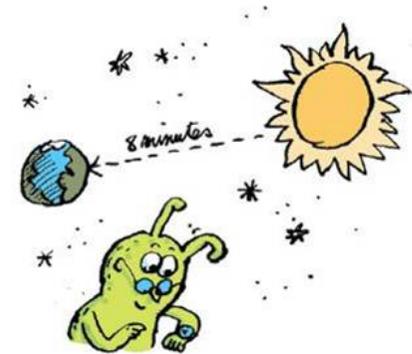


Parallaxe...



...qui permet de mesurer la distance d'une étoile

Alors... On doit voir les étoiles proches bouger !



1838: l'étoile Cigni-61 se déplace
dans le ciel!

Elle se trouve à 100.000 milliards de km

L'étoile la plus proche se trouve à 40.000 milliards de km

Le temps

Représentation du temps

Nous avons une représentation intuitive de la notion de temps :

- une dimension
- « coule » continument
- a une direction (on ne sait/peut(?) pas remonter le temps.

Comment le mesurer ?

Comment le représenter ?

Maîtriser le temps



Mesure du temps

Premiers calendriers

2.000 AVJC

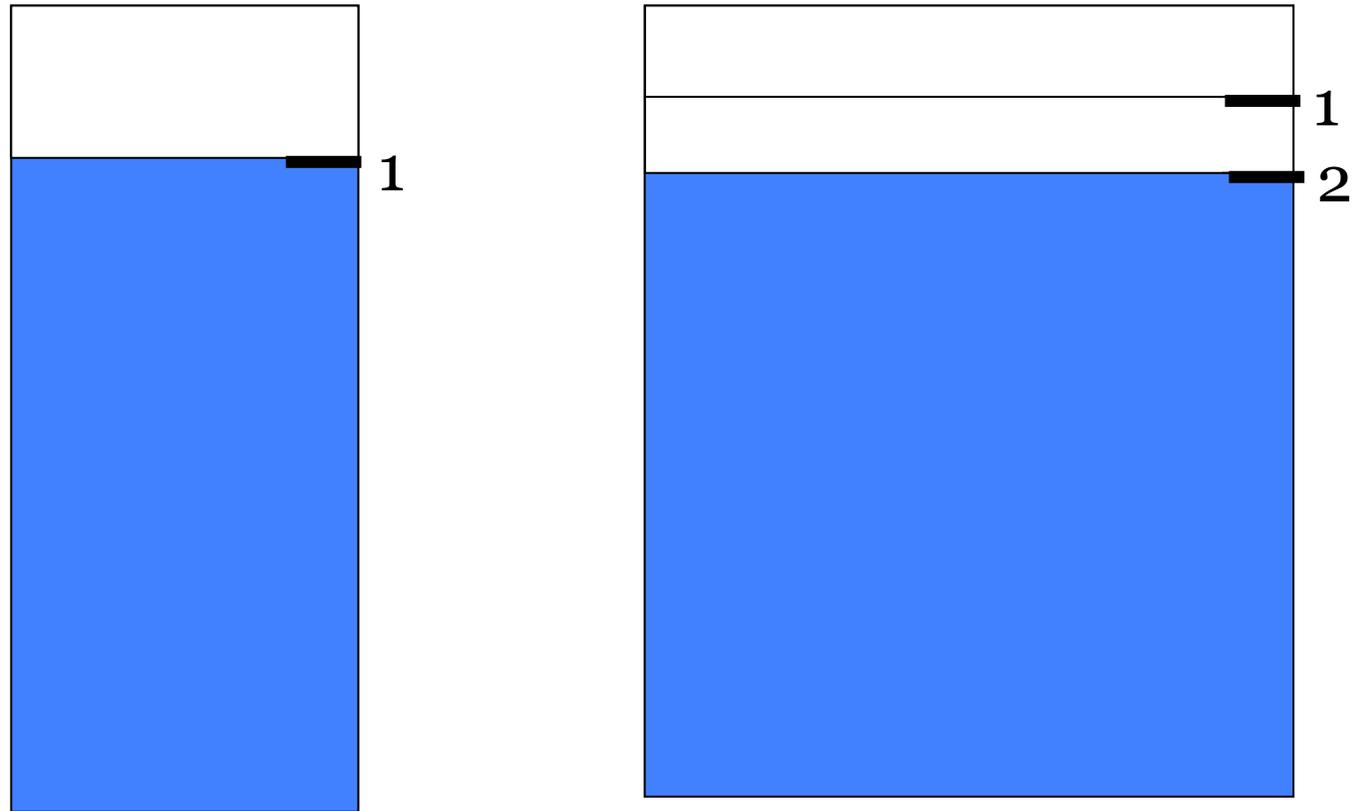
Comment construire la première horloge ?

Comment construire la première horloge ?

Horloge: phénomène périodique
permet la mesure du temps

Mais comment savoir si un phénomène est périodique si on ne sait pas comment mesurer le temps ?

La première horloge



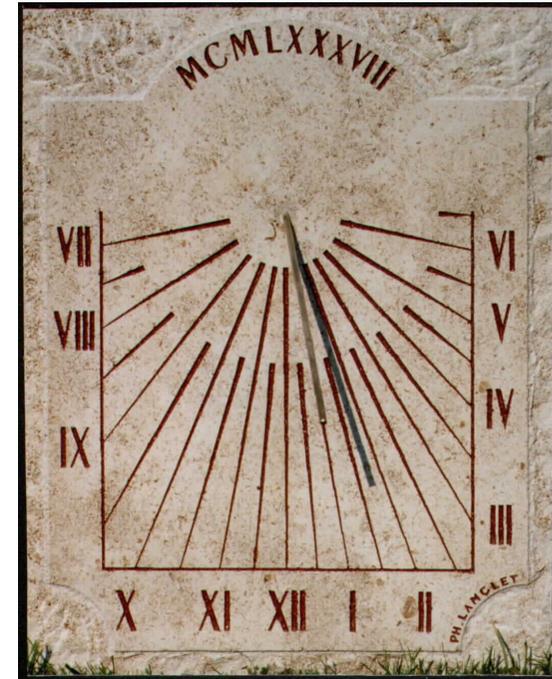
Et on continue....

La première horloge

Il faut donc 2 phénomènes physiques *reproductibles* mais pas nécessairement *réguliers*!

Lois physiques *universelles*: les mêmes en tout temps et tout lieu...

Mesure du temps

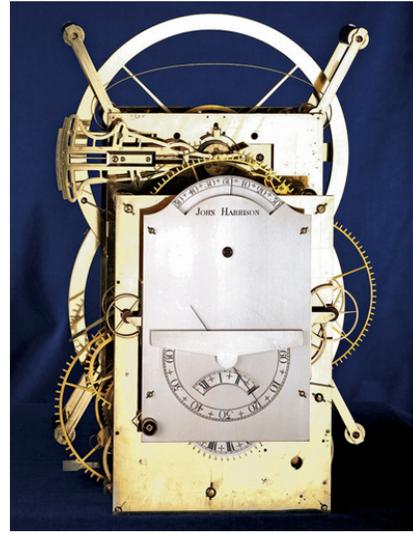
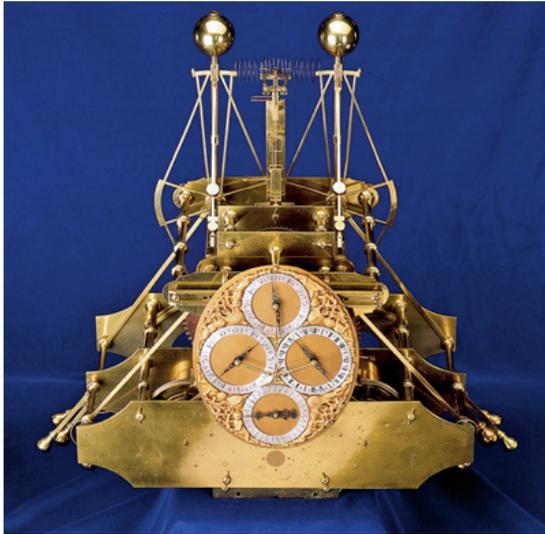


Mesure du temps

Premiers calendriers	2.000 AVJC
Gnomon Stonehenge Cadran solaire Clepsydre	1.500 AVJC
Sablier	1.200 AVJC

Mesure du temps

Premiers calendriers	2000 AVJC
Gnomon Stonehenge Cadran solaire Clepsydre	1500 AVJC
Sablier	1200 AVJC
Horloge à foliot Horloge à balancier	1.658
On commence à mesurer les secondes	1690
Mesure des fractions de secondes	1770



Mesure du temps

Premiers calendriers	2000 AVJC
Gnomon Stonehenge Cadran solaire Clepsydre	1500 AVJC
Sablier	1200 AVJC
Horloge à foliot Horloge à balancier	1.658
On commence à mesurer les secondes	1690
Mesure des fractions de secondes	1770
Premières montres	1823
Horloges à quartz	1930
Horloges atomiques	1955
GPS	2000

Mesure du temps

Premiers calendriers	2000 AVJC
Gnomon Stonehenge Cadran solaire Clepsydre	1500 AVJC
Sablier	1200 AVJC
Horloge à foliot Horloge à balancier	1.658
On commence à mesurer les secondes	1690
Mesure des fractions de secondes	1770
Premières montres	1823
Horloges à quartz	1930
Horloges atomiques	1955
GPS	2000

La mesure du temps passe par sa spatialisation

Newton

L'espace-(temps) de la physique newtonienne

« Les termes (...) de *temps*, d'*espace*, de *lieu* & de *mouvement* sont connus de tout le monde ; mais il faut remarquer que pour n'avoir considéré ces quantités que par leurs relations à des choses sensibles, on est tombé dans plusieurs erreurs. Pour les éviter il faut distinguer le temps, l'espace, le lieu & le mouvement, en *absolus* & *relatifs*, *vrais* & *apparens*, *mathématiques* & *vulgaires*. »

Isaac Newton, in *Principia*, Londres, 1687

Traduction de la Marquise du Châtelet, Paris, 1759

« Le temps *absolu*, *vrai* et *mathématique*, qui est *sans relation* à quoi que ce soit d'extérieur, en lui-même et de sa nature coule uniformément ; on l'appelle aussi « durée. »

Isaac Newton, in *Principia*, Londres, 1687

Espace absolu

« L'espace **absolu**, qui est sans relation à quoi que ce soit d'extérieur, de par sa nature demeure toujours **semblable** et **immobile**. »

En physique newtonienne espace et lieux « relatifs, apparents et vulgaires » sont représentés par un **ensemble mathématique** de *points* appelé *espace absolu*. Chaque point est caractérisé par un triplet de nombres réels, ses *coordonnées*, qui définissent sa *position*.

Cette représentation de l'espace est **bonne** si, à la précision des mesures, toutes les propriétés euclidiennes des figures sont vérifiées

Temps

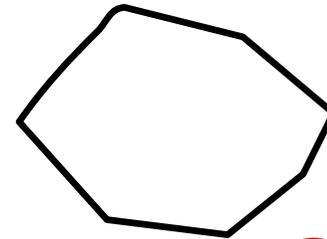
Le temps « apparent » est quant à lui représenté par un nombre réel, le *temps absolu* que l'on associe à chaque point de l'espace absolu.

Le temps est décrit par une variable mathématique continue à **une** dimension

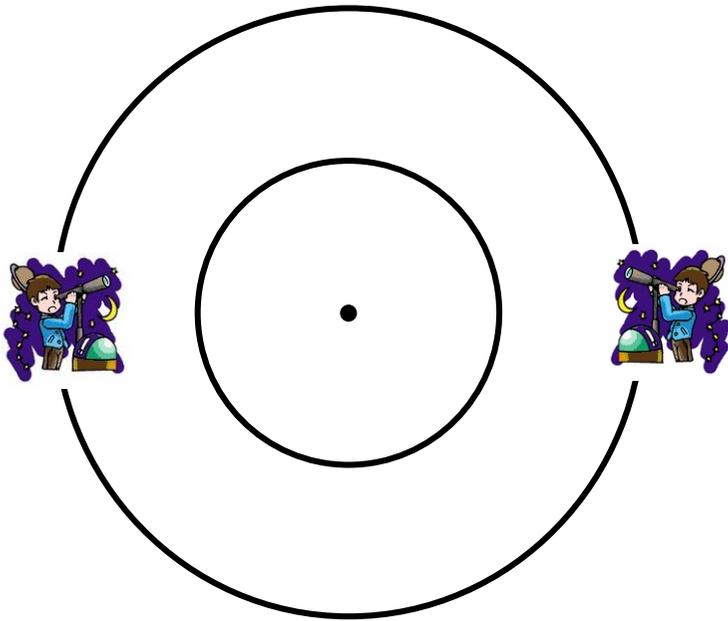
On a donc deux possibilités:



ou

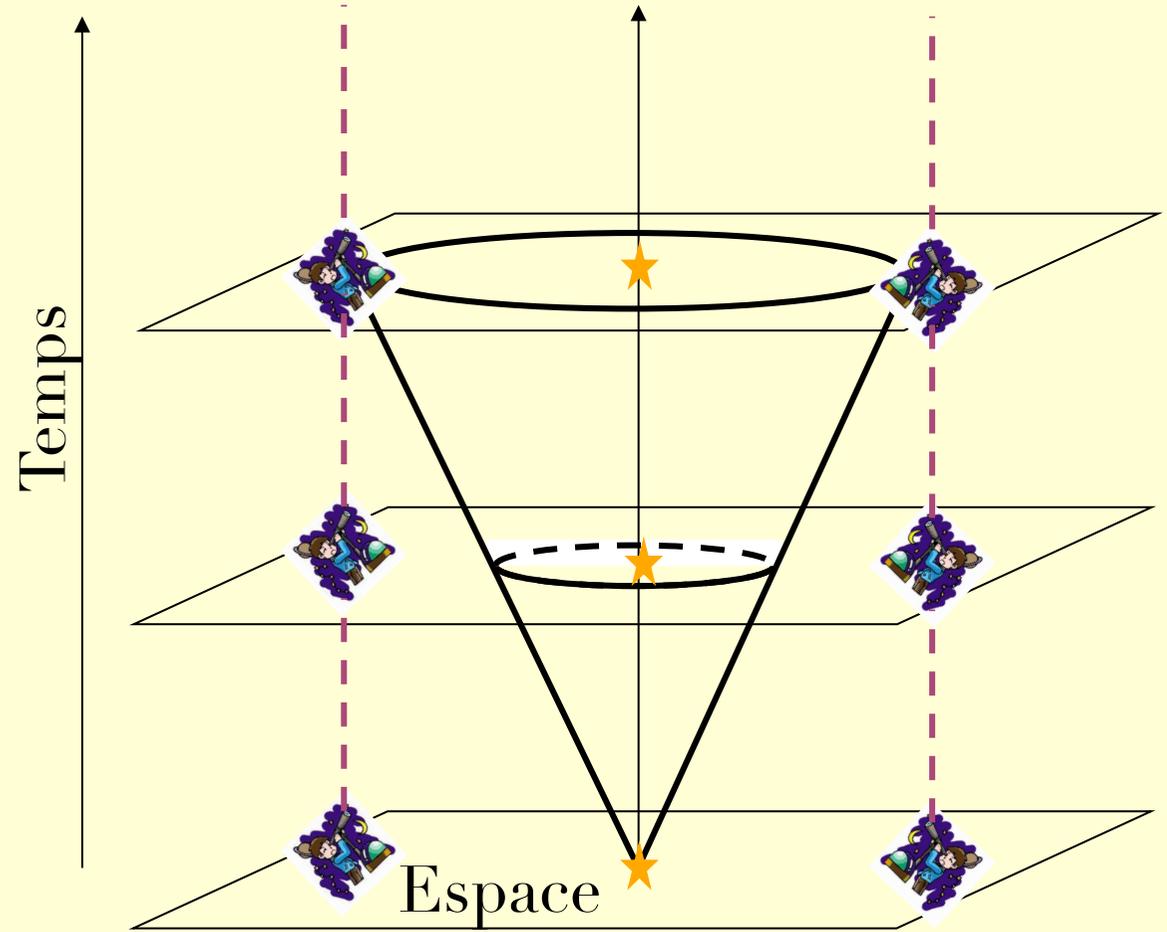
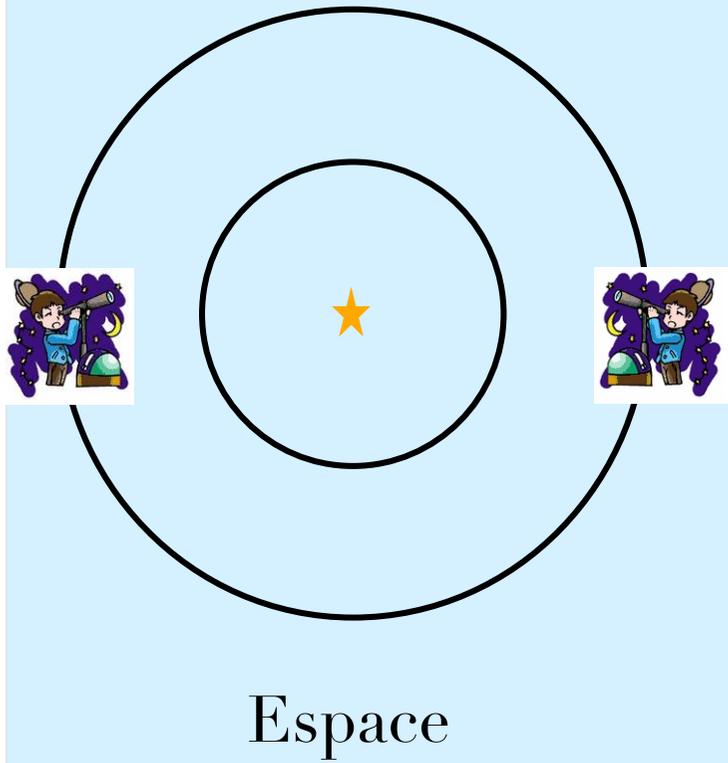


Visualiser l'espace-temps

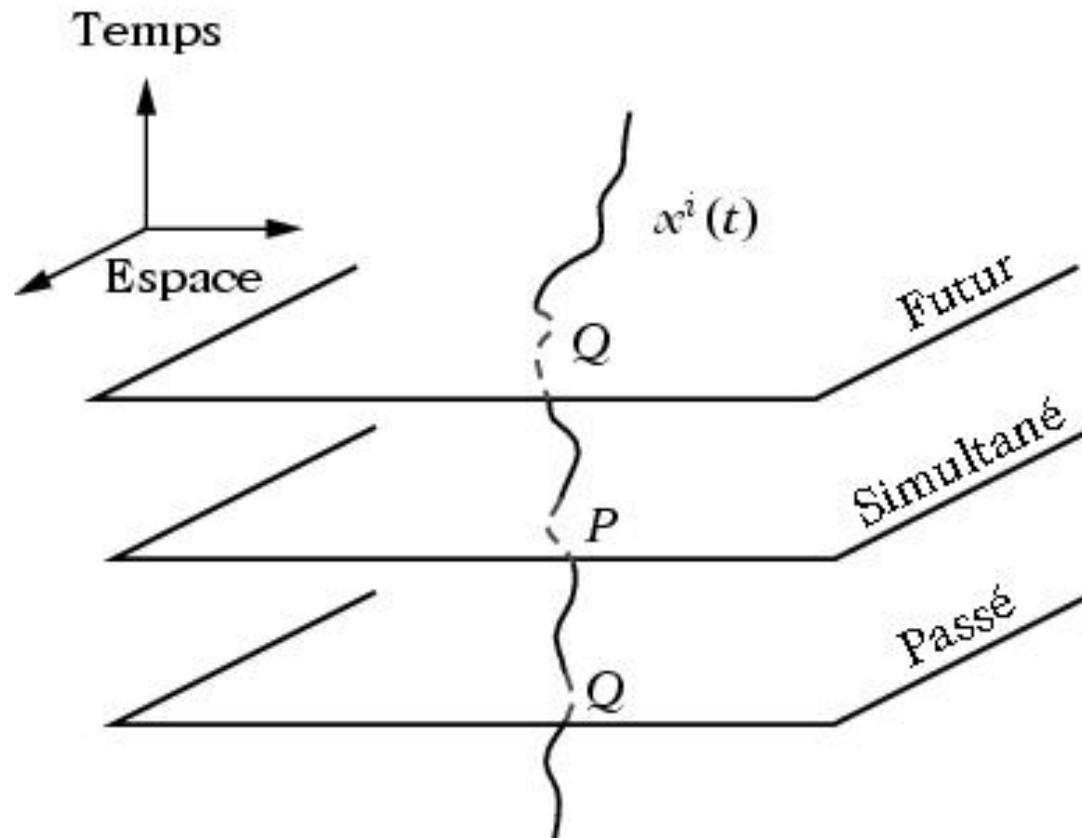


Espace

Visualiser l'espace-temps



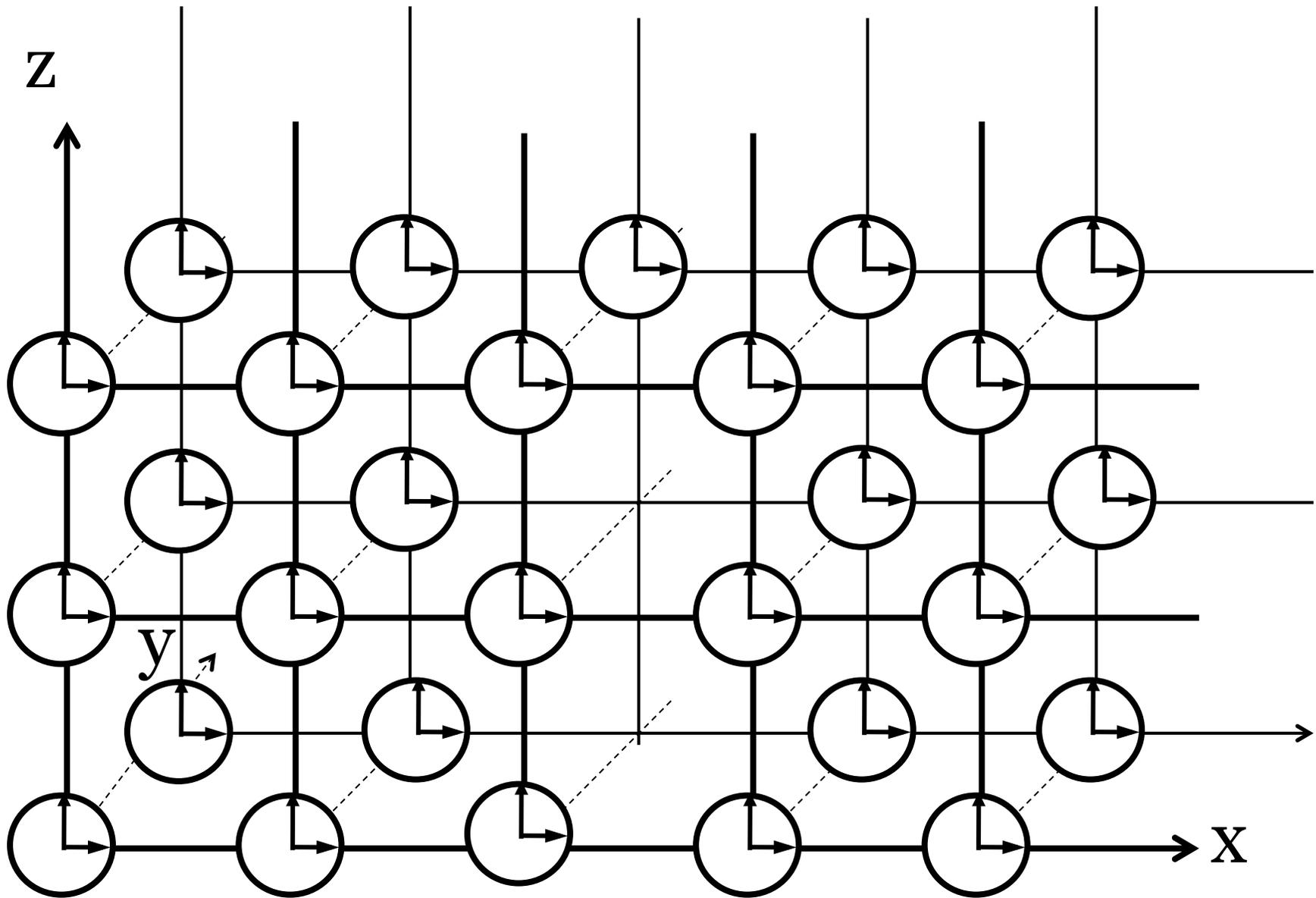
L'espace et le temps de Newton



Une « **bonne** » horloge mesure, quel que soit le mouvement dont elle est affectée, des durées en conformité avec les prédictions des lois dynamiques écrites en fonction du temps absolu

Conséquence: le temps de voyage mesuré par deux observateurs empruntant des chemins différents est le même qu'elle que soit leur trajectoire.

1- L'espace et le temps de Newton



Problèmes

Galilée « Le mouvement est comme rien »

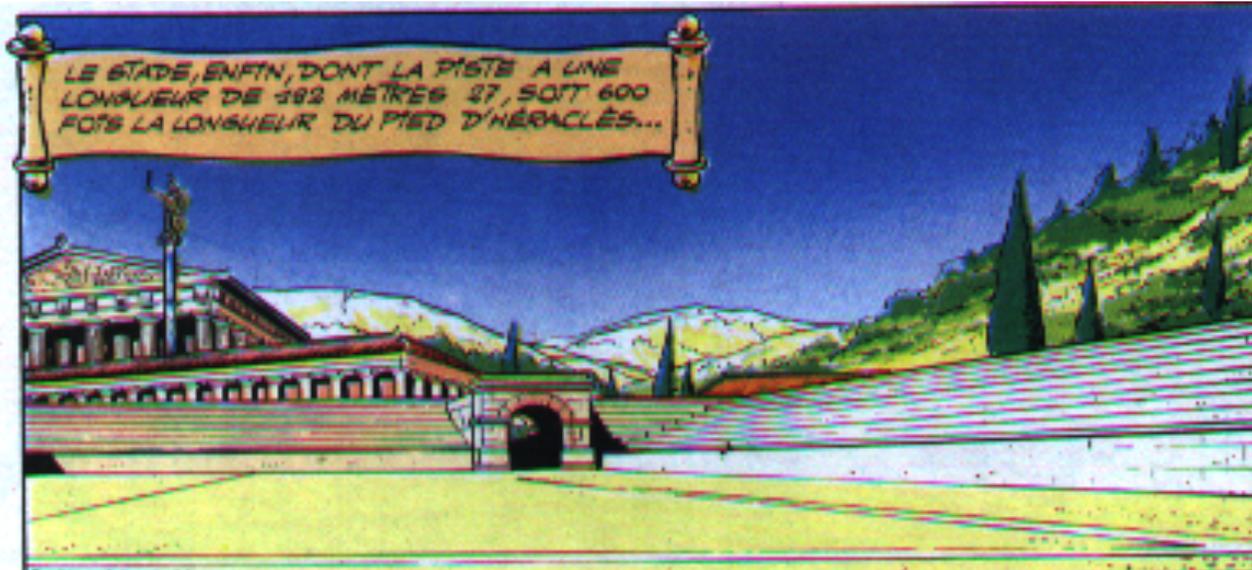
Horloges et voyage

Mesurer le monde

(*unités*)

Combien vaut 1 mètre

Les systèmes d'unités sont initialement anthropomorphiques.



Ils dépendent d'une personne de référence
varient d'une région à l'autre, source de confusion...

Révolution française

26 Mars 1791, sous l'impulsion de Charles Maurice Talleyrand, le **mètre** est défini comme $1/40,000,000$ de la longueur d'un méridien

Le mètre

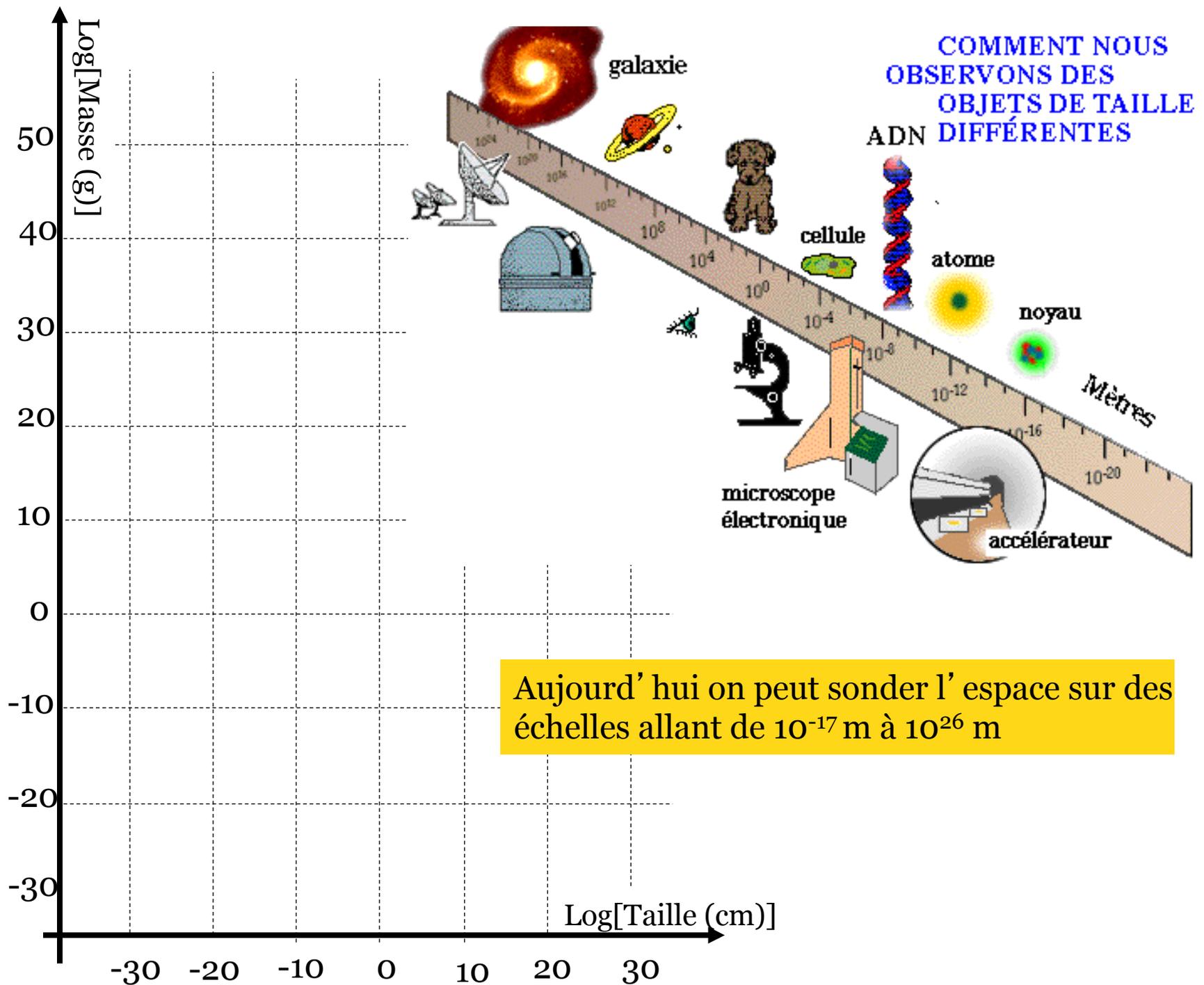


Contenant et contenu

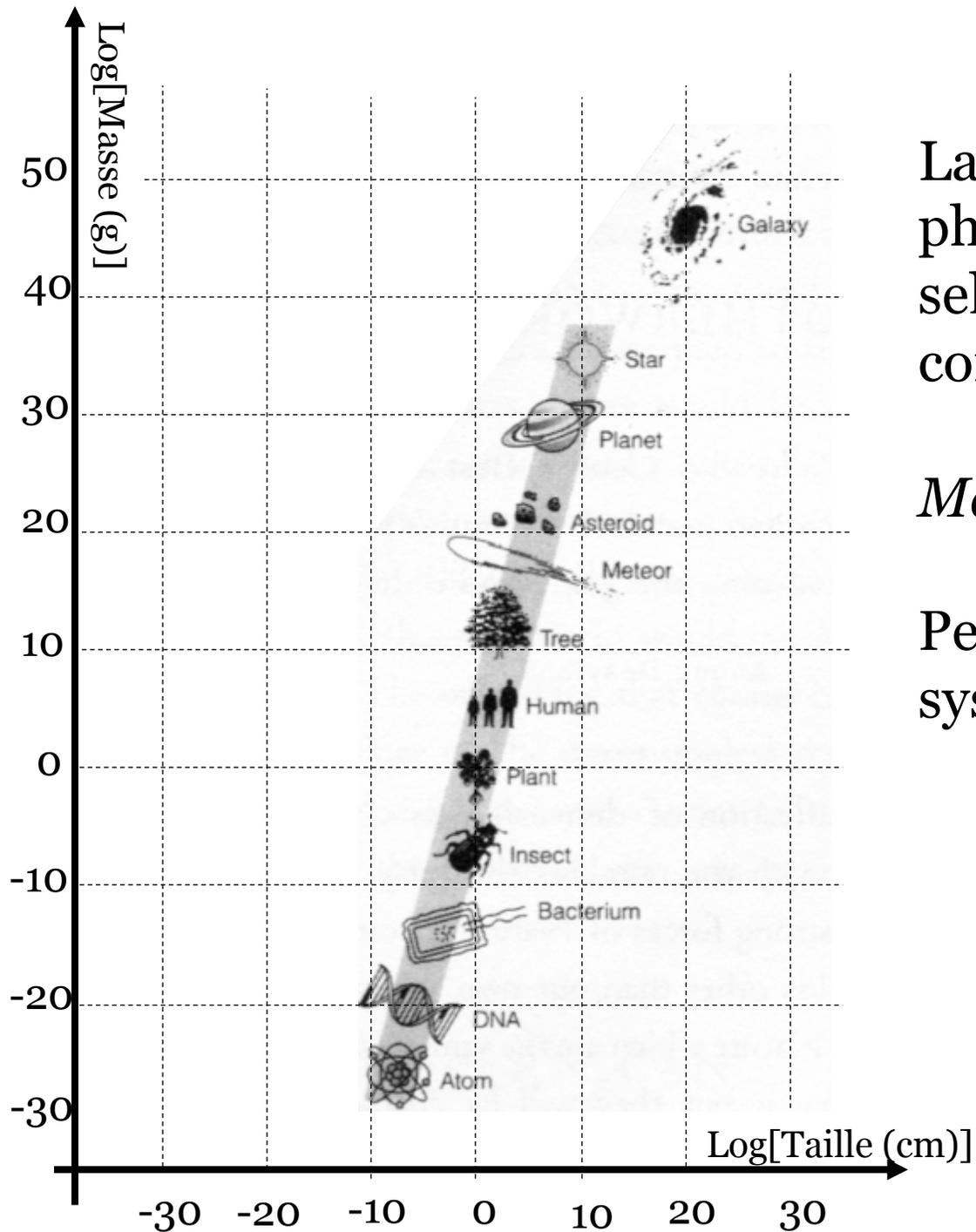
Atome < cellule
< organisme
< planète
< système planétaire
< galaxie
< amas
< univers

Age de Homo Sapiens

< âge des mammifères
< âge de la vie sur Terre
< âge de la Terre
< âge du Soleil
< âge de la galaxie
< âge de la production des éléments
< âge de l'univers



Aujourd' hui on peut sonder l' espace sur des échelles allant de 10^{-17} m à 10^{26} m



La plupart des systèmes physiques s'alignent selon un axe de densité constante

$$Masse/Taille^3 = constant$$

Peut-on imaginer des systèmes partout?

Tout cela est-il « vrai » ?



Non!

Aucune de
ces
propriétés ne
correspond
au monde
réel

Einstein 1

Retour sur nos problèmes

La lumière.

Dictionnaire:

La vitesse de la lumière vaut 299 792 458 m/s

Vous trouvez pas ça louche?

Retour sur nos problèmes

La lumière.

Dictionnaire:

La vitesse de la lumière vaut 299 792 458 m/s

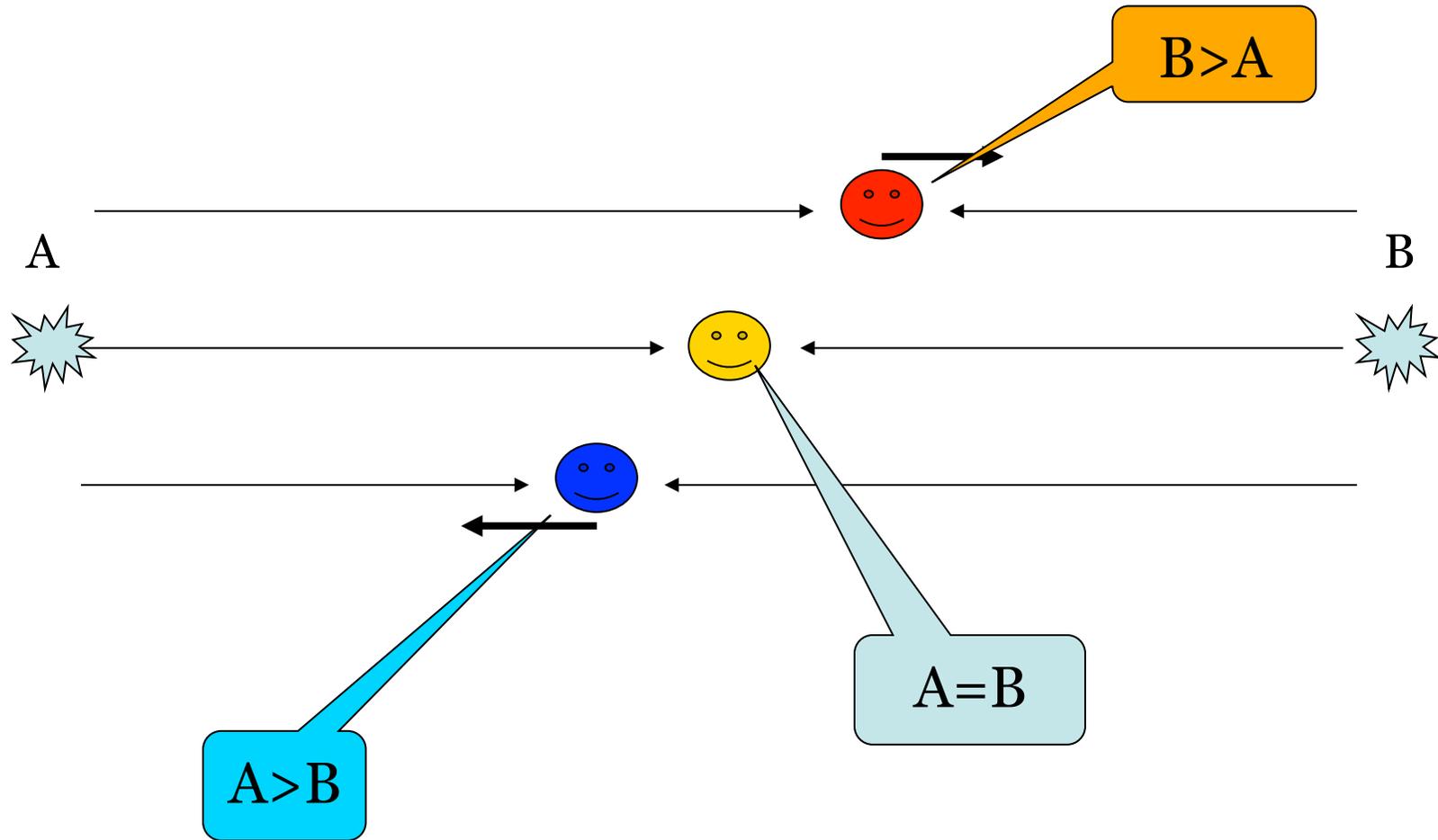
Vous trouvez pas ça louche?

Vous devriez car, cela peut dire que

$$v + c = c !!!!$$

Cela porte en soit toute la relativité restreinte de 1905

Implication: simultanéité



Retour sur nos problèmes

Les montres.

Synchronisons nos montres et voyageons.

Qu'observons-nous?

Confirmations

Muons :

durée de vie dans référentiel propre: $2,2 \mu\text{s}$

durée de vie au CERN ($v/c=0,9994$): $63 \mu\text{s}$

Horloges atomiques :

J. Hafele et R. Keating, 1971: retard de 59 milliardièmes de secondes de l'horloge embarquée dans un avion.

Qu'est-ce que cela change.

L'espace et le temps ne peuvent plus être pensés indépendamment.

Espace-temps à 4D

On a accès qu'au futur.

30 cm=1 ns lumière

Année lumière

Changement de définition de la seconde en 1983.

Seule chose qui fasse sens ce que je mesure avec ma montre.

Comment mesurer une distance

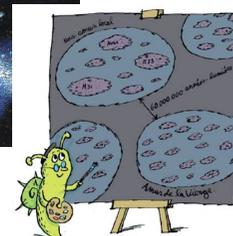
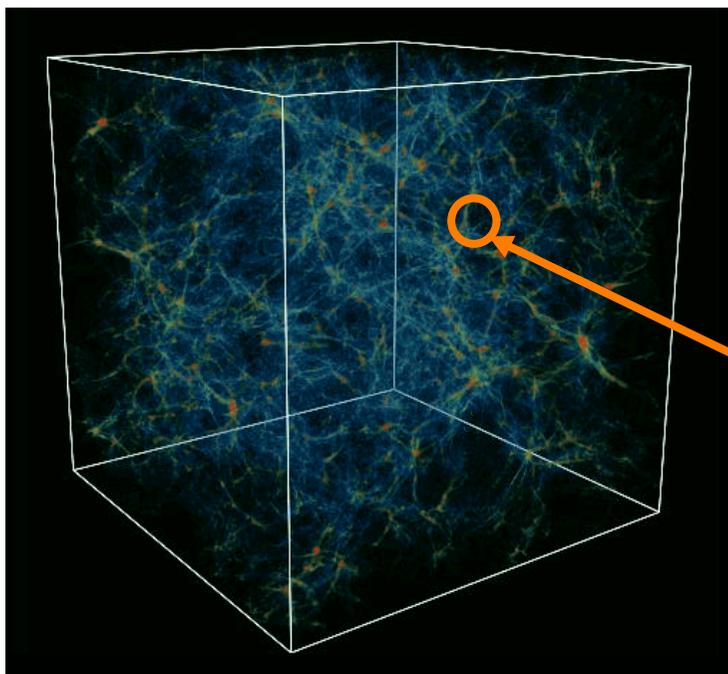
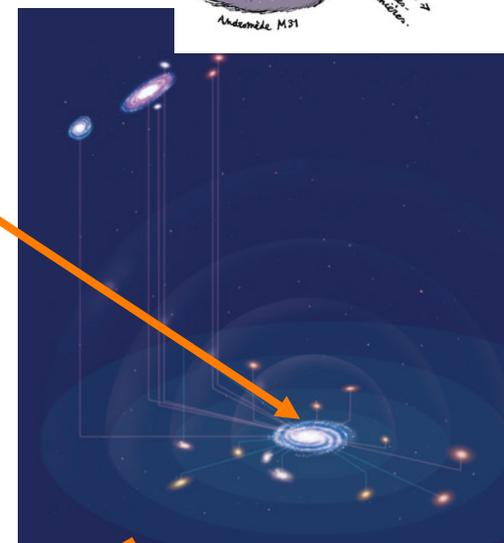
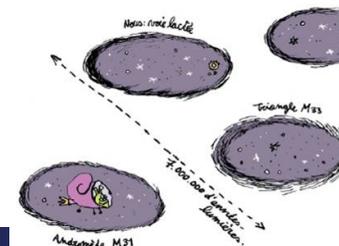
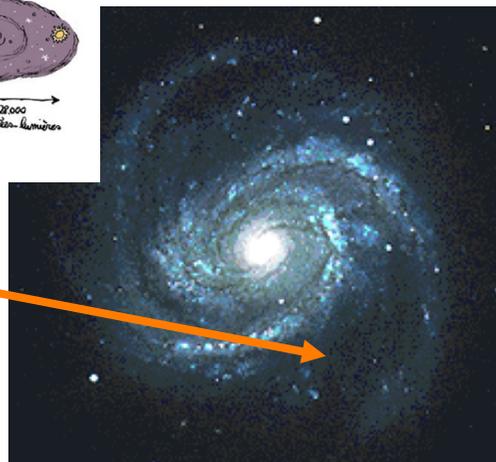
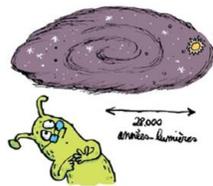
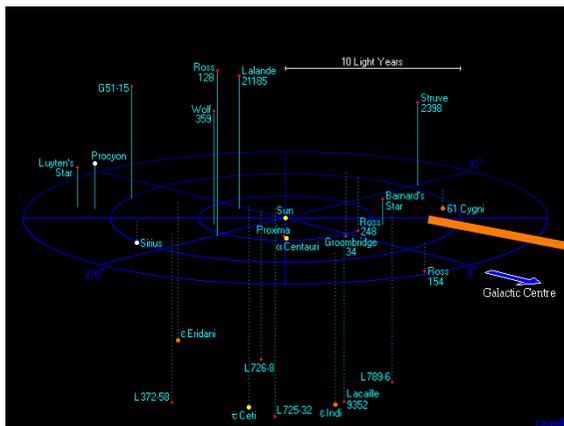
Einstein 2

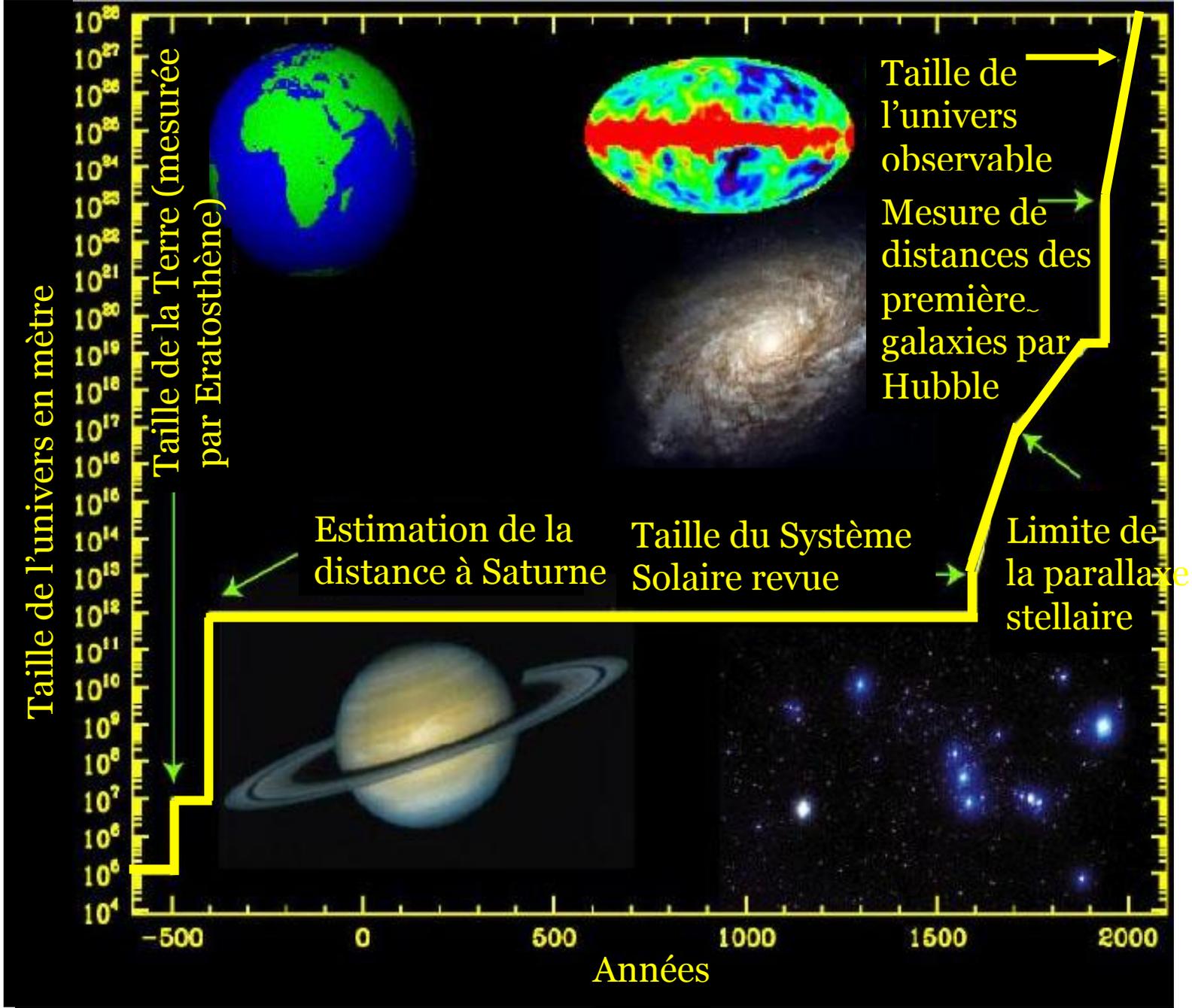
La relativité générale en 1 transparent

C'est la catastrophe.

- espace-temps courbe
 - pas de règles
 - horloges locales
- c'est quoi la géométrie ?
- Euclide est faux: toujours.
- L'espace n'est pas immuable: l'univers se dilate
- L'univers a des trous !!
- On ne peut pas prouver qu'il est infini
- Il a peut-être plus de 3 dimensions
- Il n'est peut-être pas continu

Image de l'univers





Conclusion

Quoi que vous pensiez, mettez le à l'épreuve.

C'est probablement faux.

Du moins si on regarde encore plus précisément.

Bon modèle : essence de la science

Ne jamais rien prendre pour acquis. Tout définir, même les choses les plus évidentes

Ne pas confondre un objet et sa description

Laissez les philosophes rêver tranquillement
(mais les lire et les écouter....)

Pas grave si l'image du monde semble contradictoire avec le sens commun.