

ASTROPHYSIQUE

2 – ESPACE, TEMPS, MOUVEMENT



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



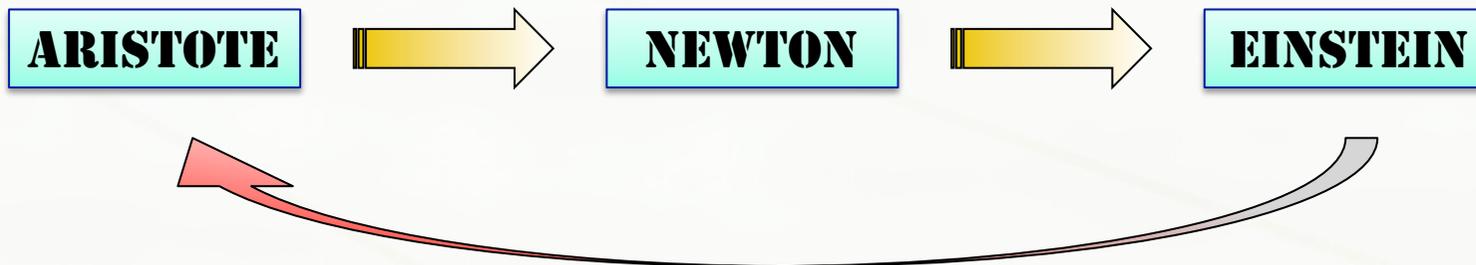
ESPACE, TEMPS, MOUVEMENT ET GRAVITATION

- Les notions

- d'espace
 - de temps
 - et de gravitation
- } → mouvement

- sont étroitement liées

- dans leurs usages dans la physique moderne (la relativité générale en particulier)
- mais aussi dans leur lente maturation réciproque au cours des siècles

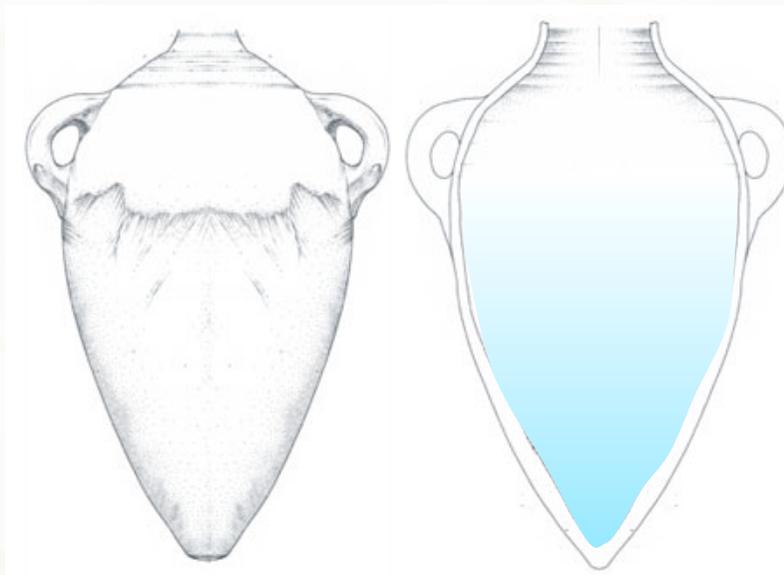


- Mais elles n'ont RIEN d'évident !

LE LIEU ET L'ESPACE (ARISTOTE, *PHYSIQUE IV*)

■ Lieu

- Le lieu d'un objet n'est pas un objet, puisque des objets différents peuvent se succéder en un même lieu
- Il est comme le vase vis-à-vis de son contenu
- Le lieu d'un objet est l'enveloppe de cet objet



■ Espace

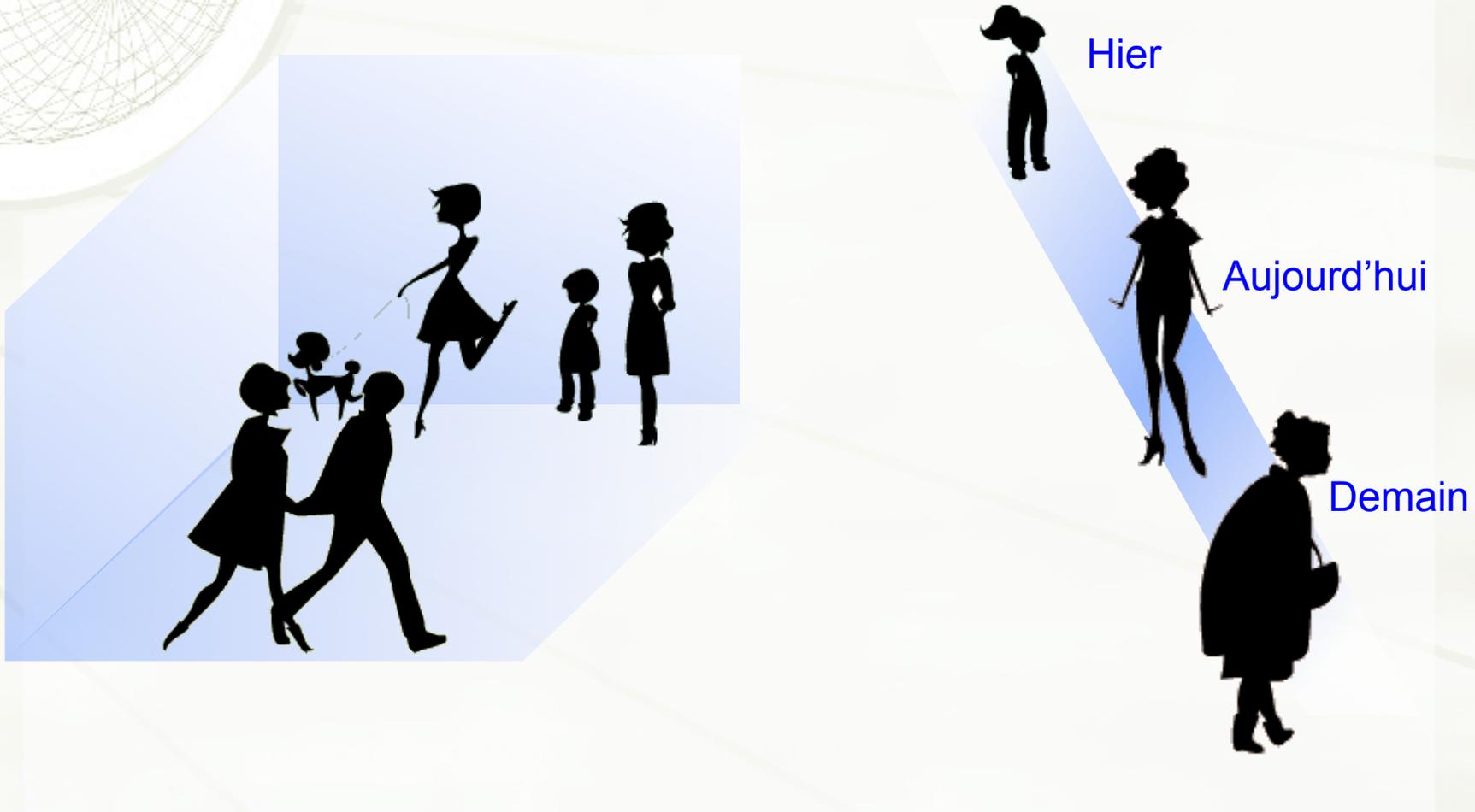
- L'espace est la réunion des lieux de tous les corps
- Il est donc dépendant des corps, et il les influence à son tour
 - Il n'est pas **isotrope**: le haut diffère du bas
 - Il n'est pas **homogène**: le centre (la Terre) diffère de la périphérie (les astres)
- L'étude de l'espace n'a de sens qu'en raison du **mouvement**
- Le mouvement implique le temps, « le nombre du mouvement »
- **Physique de l'espace et géométrie de l'espace suivent pendant 2000 ans des chemins parallèles ...**

L'ESPACE

- Cadre ?

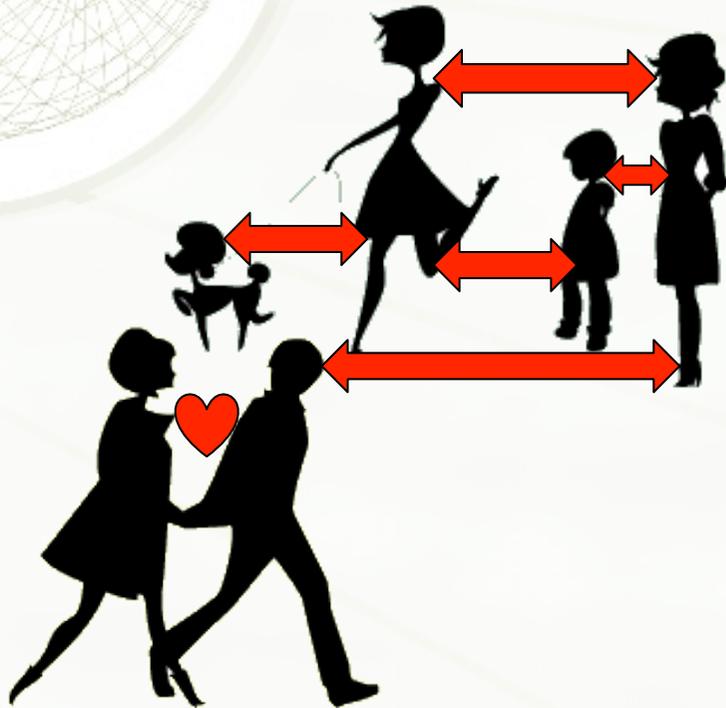
ET LE TEMPS

- Cadre ?



L'ESPACE

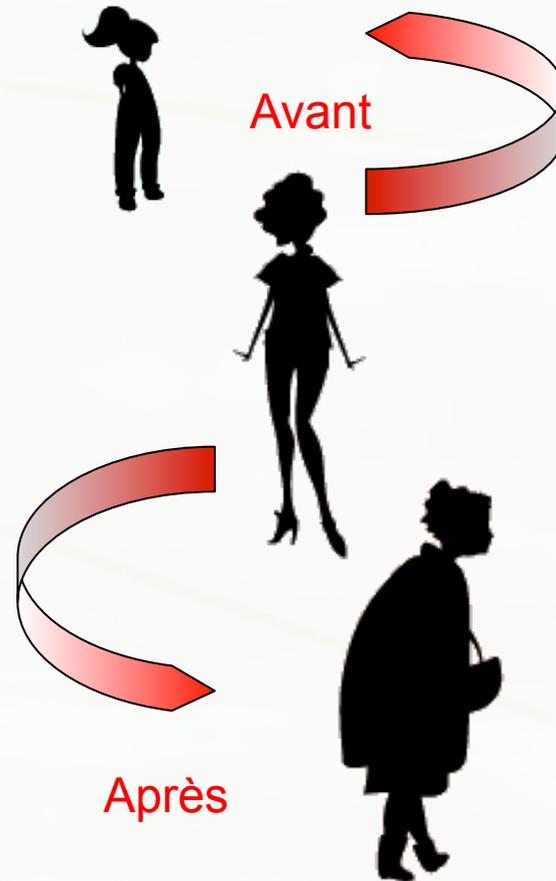
- Relation ?

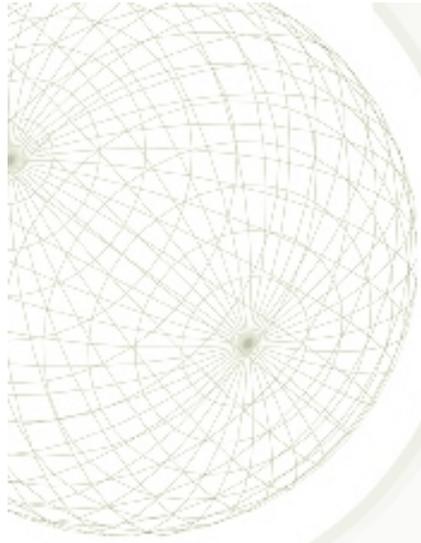


- Une espace sans corps est une phrase sans mot

ET LE TEMPS

- Relation ?





ESPACE ET GÉOMÉTRIE

UN LONG CHEMINEMENT...

- Euclide

- Toute la géométrie (**plane**) se déduit de 5 postulats (+ règles de la logique)

- 1 – il est toujours possible de relier 2 points par une droite
- 2 – une droite peut toujours être prolongée (**⇒ l'espace est infini**)
- 3 – un cercle peut avoir n'importe quel centre ou rayon
- 4 – tous les angles droits sont égaux
- 5 – **postulat des parallèles**

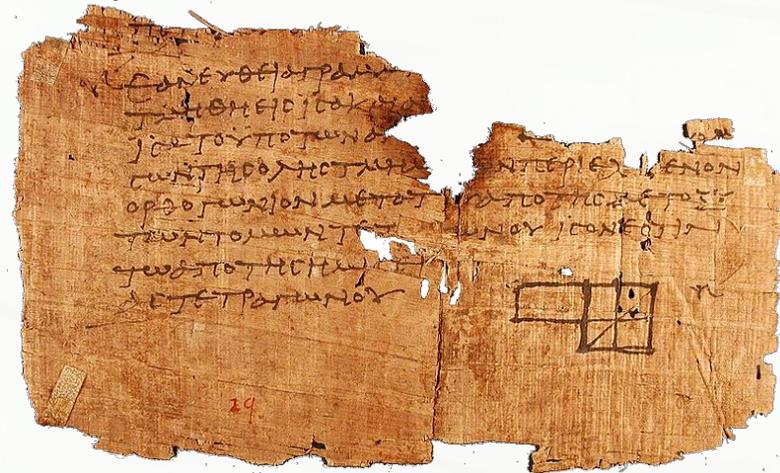
- Théologiens médiévaux

- l'espace est une forme de Dieu

- ⇒ Newton

- espace absolu, contenant universel et *sensorium Dei*
- Kant : forme *a priori* de la perception → l'espace ne peut être qu'euclidien et absolu

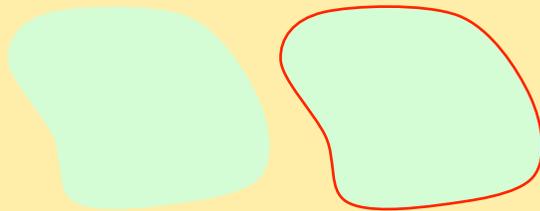
- Gauss, Bolyai, Lobatchevsky, Riemann : géométries non-euclidiennes



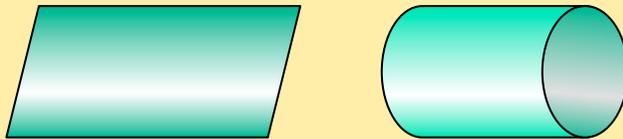
GÉOMÉTRIE

Topologie

- Notion d'ouvert et de fermé



- Notion de voisinage



- Plan \neq cylindre
- Espaces avec des bords
- Espaces avec des trous

Métrique

- Notions de distance et d'angle

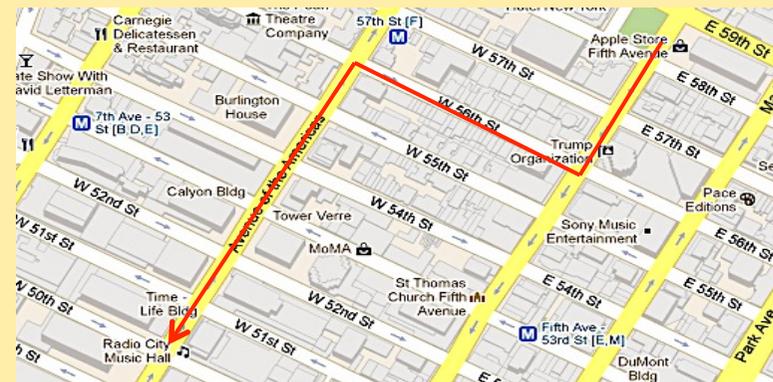
- Plan = cylindre

- Distances

- Sur un terrain de foot



- À Manhattan



COORDONNÉES ET DIMENSION(S) DE L'ESPACE

- Coordonnées (Oresme, Descartes)

- un point \Leftrightarrow une valeur numérique
- N Z R C ...
- ou plusieurs valeurs numériques

- \Rightarrow notion de dimension de l'espace

- 1 nombre \Leftrightarrow 1 dimension

- Je suis en panne sur la N7 au km 54.
- J'habite au 6^e étage.
- L'horloge indique 08:45.

- 2 nombres \Leftrightarrow 2 dimensions

- **Plan**

- Nous sommes au coin de la 5^e avenue et de la 41^e rue.

- **Cylindre**

- **Sphère**

- Nous sommes situés par 49,829° de latitude nord et 2,381° de longitude est.

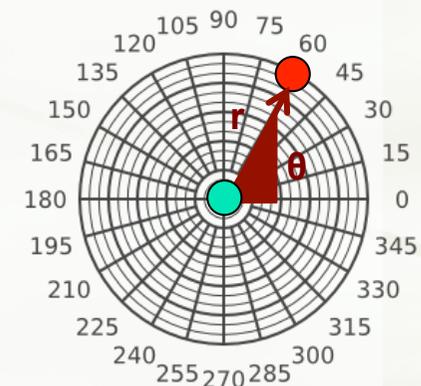
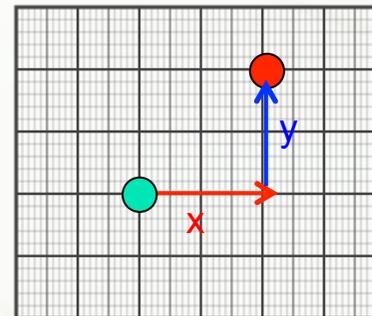
- **Plan, cylindre, sphère (ou papier froissé) sont localement identiques**

- Généralisable à 3, 4... N dimensions

- et généralisable à des « espaces » très différents (espaces de fonctions par ex.)

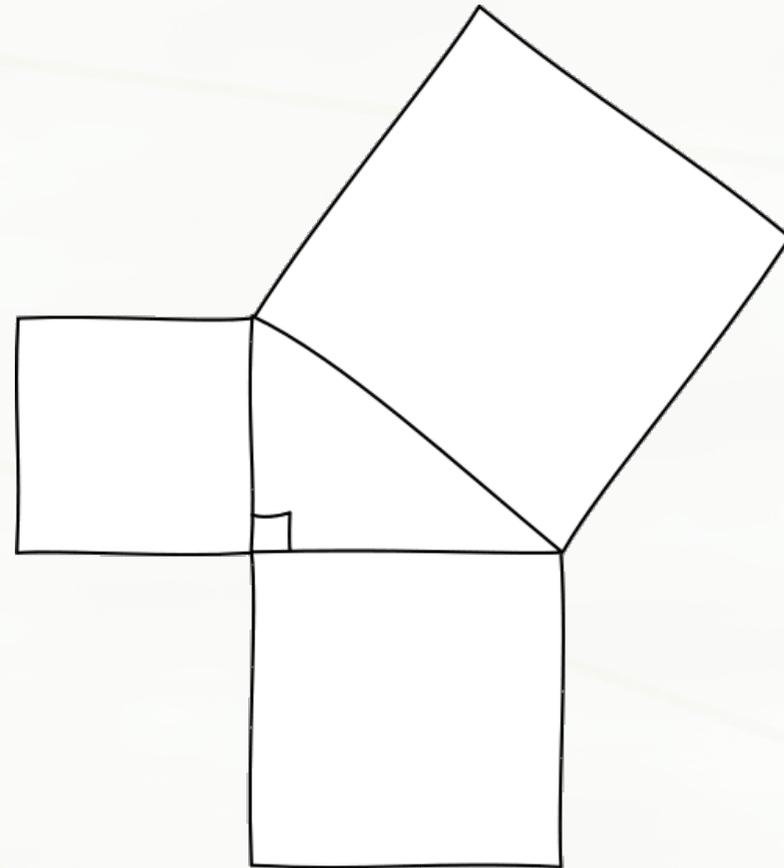
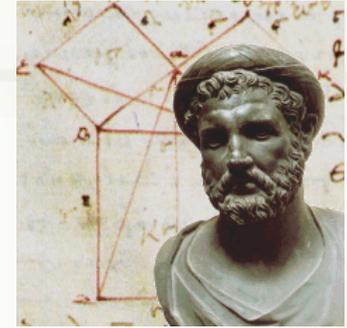
- Changement de coordonnées

- cartésien \Rightarrow polaire



PYTHAGORE

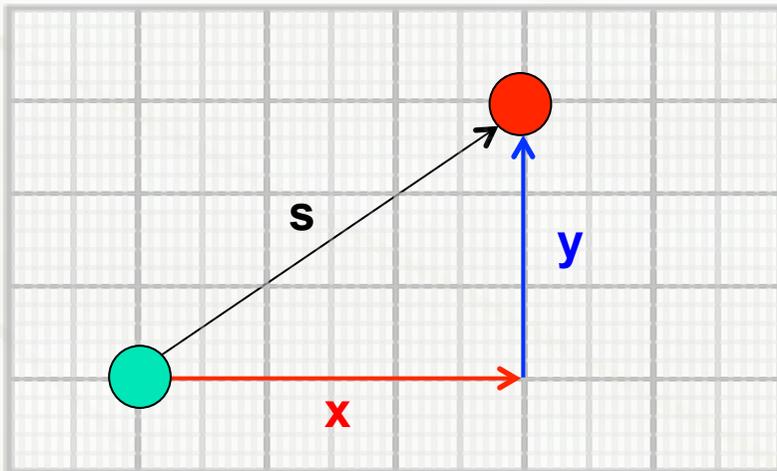
Théorème de Pythagore : dans un triangle rectangle, le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés



PYTHAGORE ENCORE...

- Théorème de Pythagore : dans un triangle rectangle, le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés
- \Leftrightarrow distance entre deux points

$$s^2 = x^2 + y^2$$



- Généralisable en 3 dimensions

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

ou 4 , ou 5, ou N...

- L'expression dépend du choix des coordonnées

$$\partial s^2 = \partial x^2 + \partial y^2 \quad \text{cartésiennes}$$

$$\partial s^2 = \partial r^2 + r^2 \partial \theta^2 \quad \text{polaires}$$

- Mais pas la valeur **numérique** de la distance !

PYTHAGORE, ENCORE... ET TOUJOURS

Courbure !

- Généralisons le théorème de Pythagore

$$\partial s^2 = \partial x^2 + \partial y^2$$



pour qu'il devienne

$$\partial s^2 = F(x,y) \partial x^2 + G(x,y) \partial y^2$$

- ou plus généralement

$$\partial s^2 = \sum g_{\mu\nu}(x_\rho) \partial x_\mu \partial x_\nu$$

- \Leftrightarrow lorsqu'on se déplace sur la surface la relation entre coordonnées et longueurs varie de place en place
- On dit que la surface est courbe



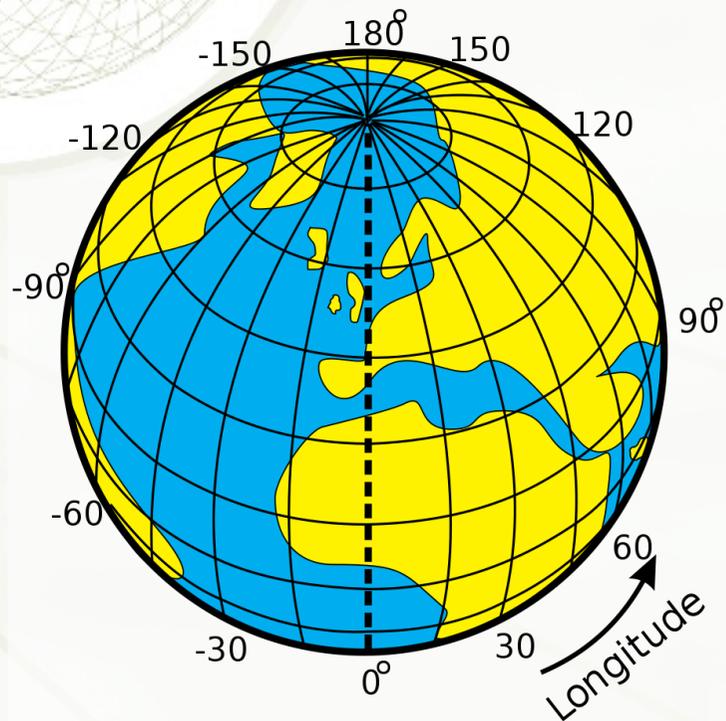
GÉOMÉTRIE SPHÉRIQUE : LA TERRE

- Les lignes droites (= arcs de grand cercle) se **referment** sur elles-mêmes
- Il existe des triangles ayant **trois** angles droits
- ex: **Pôle Nord** – **Libreville** - **Singapour**
- Il existe des cercles dont le périmètre n'est égal qu'à **4** fois le rayon (et non 2π)
- ex: l'Équateur
 - cercle centré sur le pôle Nord
 - de 10 000 km de rayon
 - et de 40 000 km de périmètre
- Le périmètre d'un cercle peut *diminuer* quand le rayon *augmente*
 - cercle centré sur le pôle Nord, de 20 000 km de rayon
 - → périmètre quasi nul

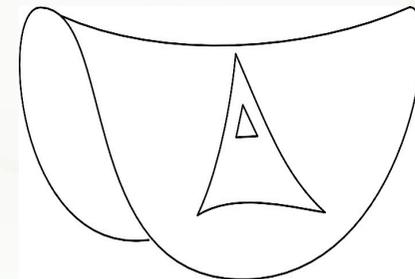
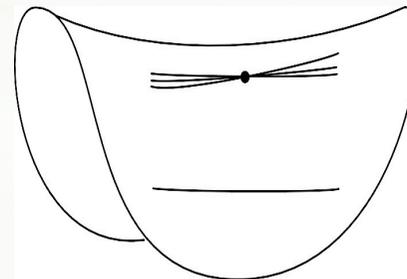


ESPACES DE COURBURE VARIÉE

- Courbure positive



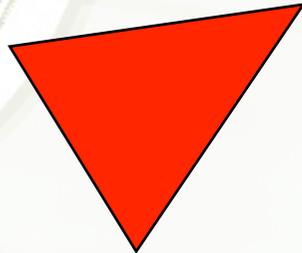
- Courbure négative



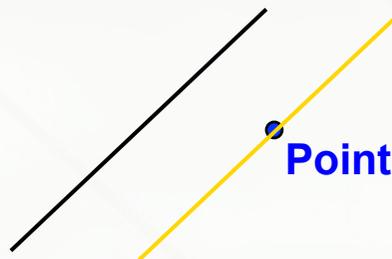
ESPACES COURBES

- Géométrie euclidienne

- somme des angles = 180°

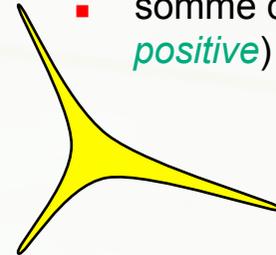


- périmètre d'un cercle $P = 2\pi R$
- *une seule* parallèle à une droite par un point extérieur

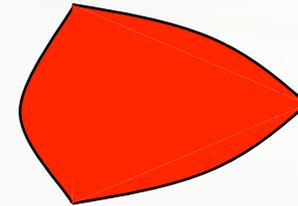


- Géométrie riemannienne

- somme des angles $< 180^\circ$ (courbure *négative*)
- somme des angles $> 180^\circ$ (courbure *positive*)

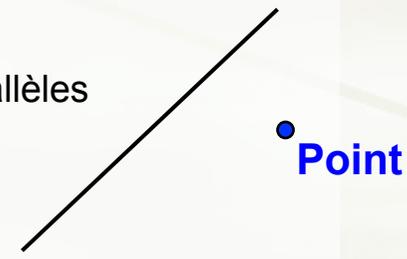
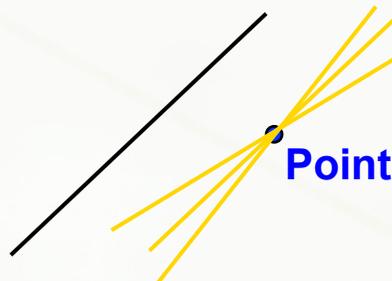


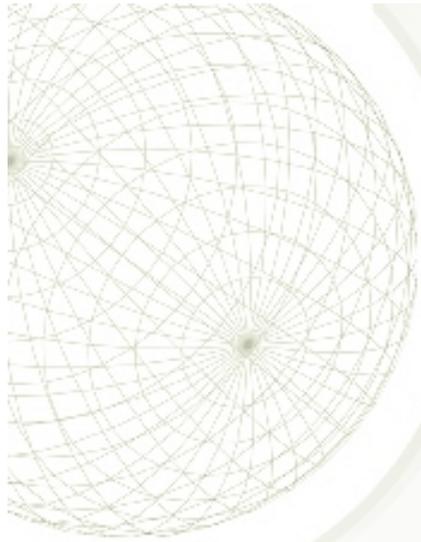
- périmètre d'un cercle $P > 2\pi R$ (courbure *négative*)
- périmètre d'un cercle $P < 2\pi R$ (courbure *positive*)



- **écart proportionnel à la surface**

← une infinité de parallèles
ou aucune →





TEMPS ET MOUVEMENT

LE TEMPS

- Temps

- Linéaire : passé – présent - avenir
- Cyclique : éternel retour
- Irréversible

- Aristote

Le temps est le nombre du mouvement selon l'antérieur et le postérieur

- *Wikipedia: article Temps*

Le temps est un concept développé par l'être humain pour appréhender le changement dans le monde.

- Mesure : seconde

- minute – heure – jour – semaine – mois – année – lustre – siècle – ère – éon ...

Qu'est-ce donc que le temps? Si personne ne m'interroge, je le sais; si je veux répondre à cette demande, je l'ignore. *Saint Augustin*

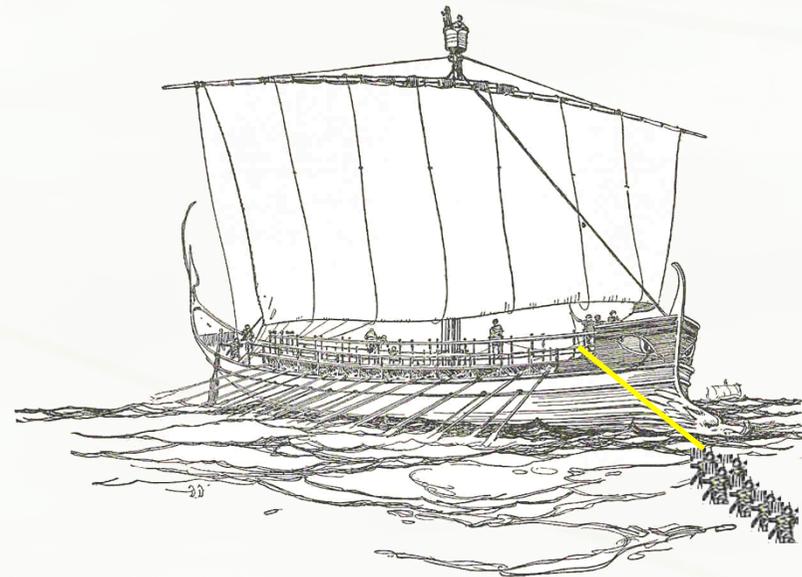


ARISTOTE ET LE MOUVEMENT

- **Mouvement naturel**
- **Linéaire** pour les 4 éléments
 - vers le **haut** (air et feu)
 - ou vers le **bas** (eau et terre)
- **Circulaire** pour le 5^e, la *quintessence*, expliquant le mouvement des astres



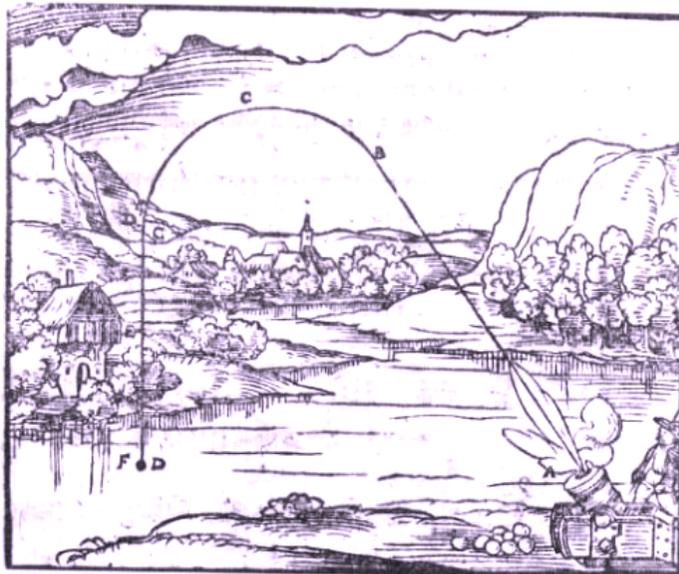
- **Mouvement forcé**
 - pas de force \Leftrightarrow pas de mouvement
 - vitesse \Leftrightarrow force ?



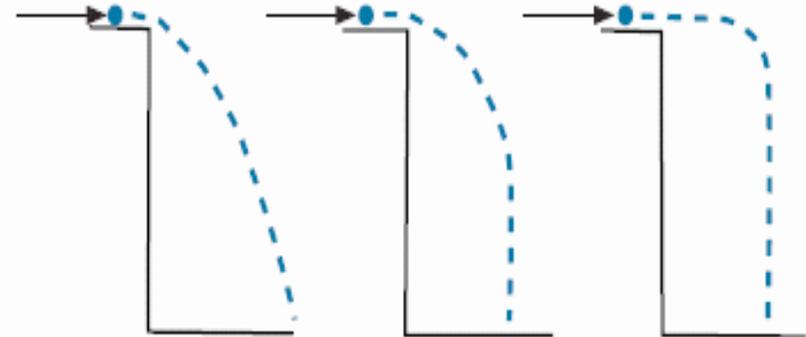
- Notions de **vitesse** et d'**accélération** non différenciées
- Celles de **force** et d'**impulsion** non plus

IMPETUS

- Pourquoi la flèche se déplace-t-elle *après* avoir quitté l'arc?
- Aristote : hum, hum!
- Philoponus (490-570) : la flèche reçoit un *impetus* de la part de l'arc, et elle le consomme au cours de son trajet
- Galilée: le mouvement n'a pas besoin de cause, c'est son *changement* qui en nécessite une
- Puis vint Newton...
- Quand on saute d'une falaise, selon



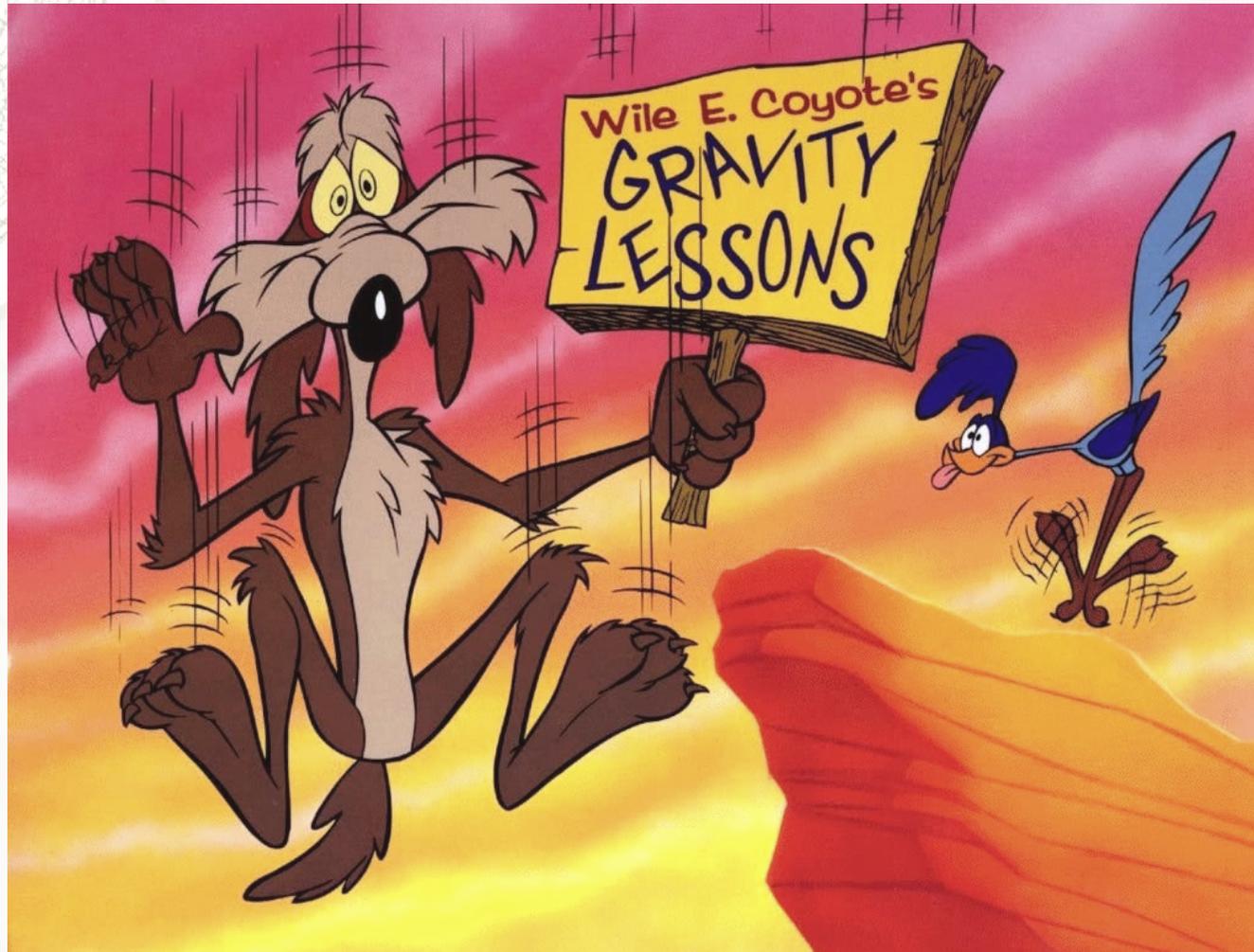
D. Ufano, *Tratado de Artilleria*, 1613



Newton

Aristote

Vile E. Coyote



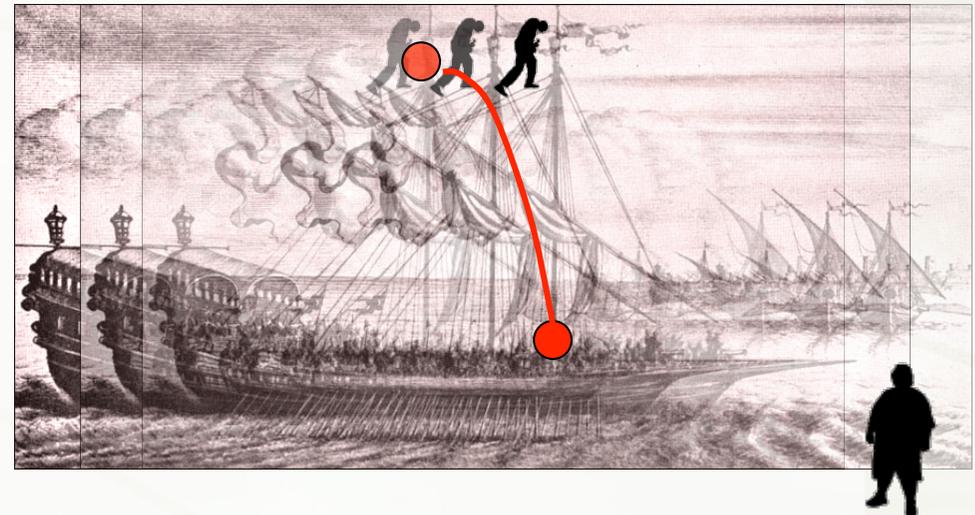
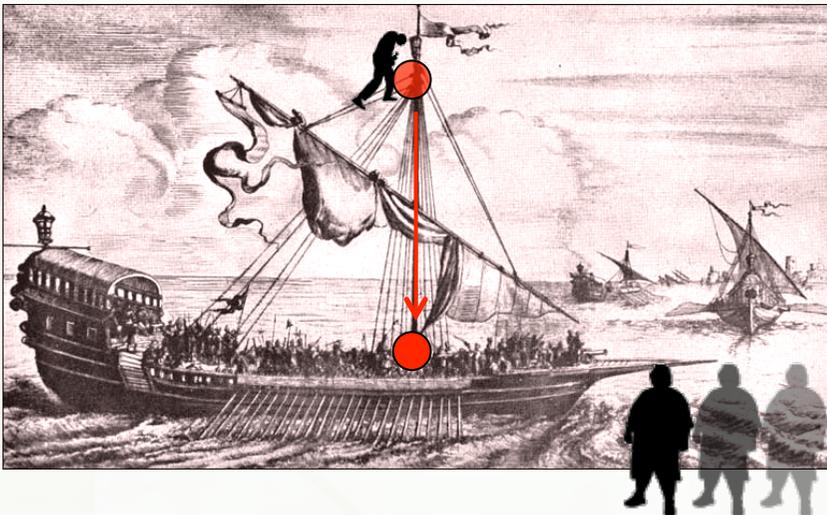
INVARIANCE GALILÉENNE

- Un objet lâché du haut du mât d'une galère tombe au pied de ce mat, **que la galère soit en mouvement ou non**
- \Rightarrow il est impossible de détecter le mouvement absolu de la galère
- \Rightarrow la position de la galère est sans importance
- \Rightarrow **l'espace est indifférencié**



Attention : ceci n'est vrai **que** pour un mouvement à vitesse constante (uniforme)

- Les lois physiques sont identiques par *transformation de Galilée*
 - $x \rightarrow x + V t$
 - $t \rightarrow t$



ESPACE ABSOLU

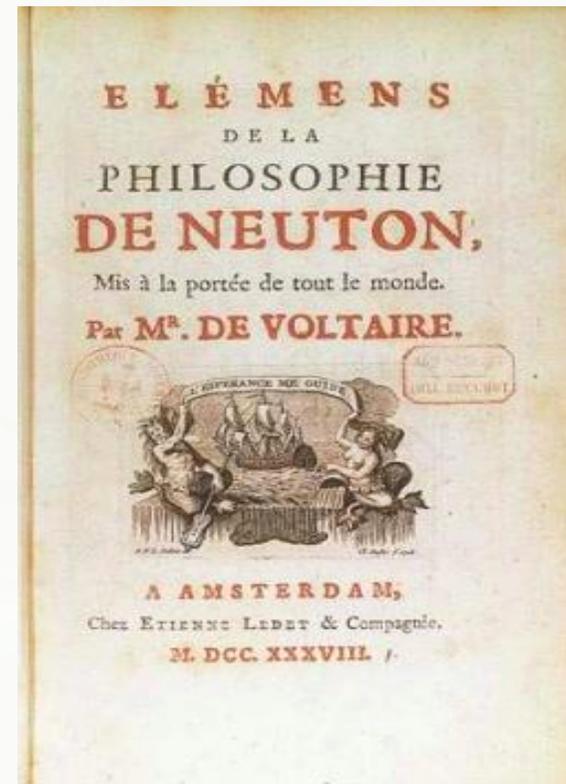
- L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire & immobile.

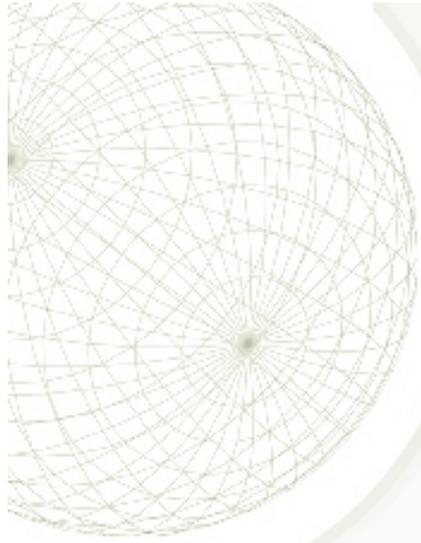
[Newton, *Principia*]

- Idée inspirée des mystiques sur l'omniprésence de la divinité et la théologie de la lumière divine
- ⇔ L'espace n'a aucune structure
 - Espace illimité sans origine
 - Isotrope
 - Homogène
- ⇔ **C'est un pur contenant**

TEMPS ABSOLU

- Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, & s'appelle durée.





FORCE ÉNERGIE PUISSANCE

NEWTON : LES LOIS DU MOUVEMENT

- La loi de l'inertie

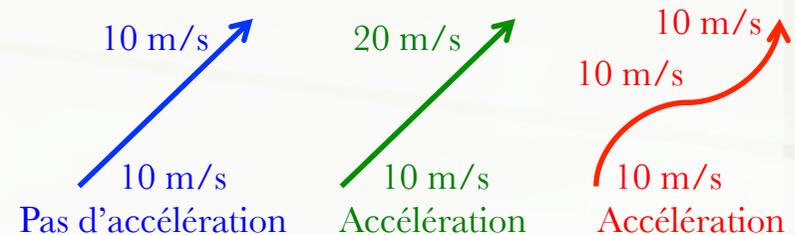
Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.

- $F = m \gamma$

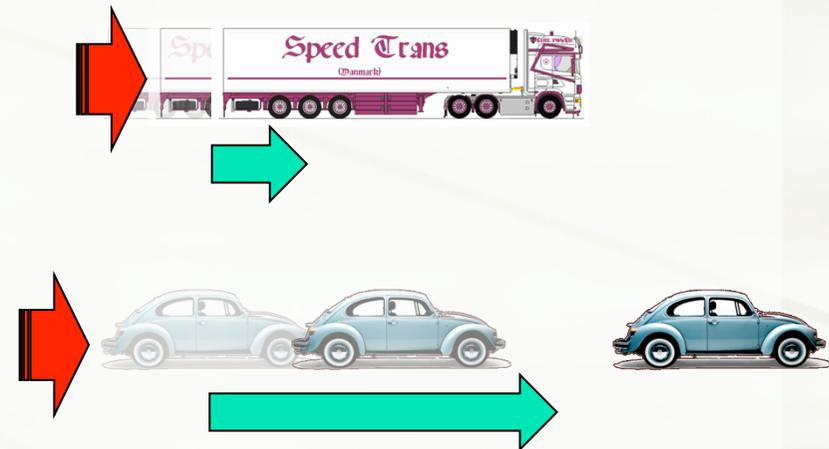
Les changements qui arrivent dans le mouvement [accélération] sont proportionnels à la force motrice et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force est appliquée.

- Les actions réciproques de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et dirigées en sens opposés.

- Une accélération γ est un changement dans l'intensité OU dans la direction de la vitesse

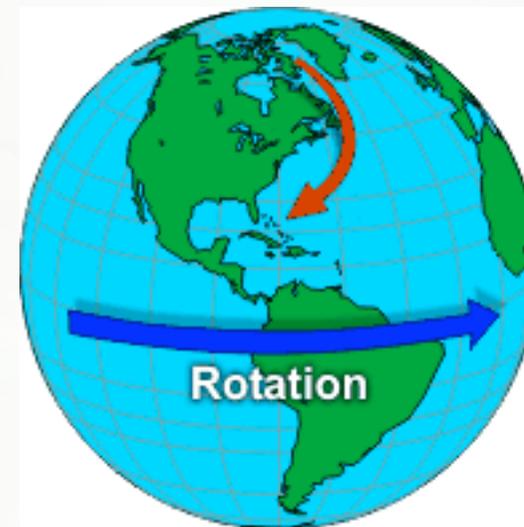
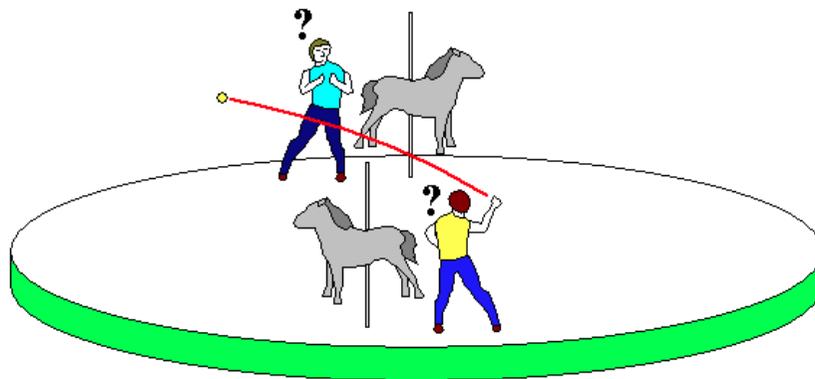


- Même force, masses différentes



FORCES D'INERTIE

- La loi fondamentale de la dynamique, $F = m \gamma$, n'est vérifiée que dans un repère immobile, ou en translation uniforme par rapport à l'espace absolu
- Dans un repère accéléré (en rotation par ex.) apparaissent des forces fictives, les **forces d'inertie**
- Force de Coriolis
 - Un observateur en rotation a l'impression qu'un mobile qui s'éloigne de l'axe de rotation est soumis à une force de sens opposé à la rotation
 - Sur Terre, les vents acquièrent ainsi un sens de rotation (opposé dans chaque hémisphère)



ÉNERGIE : UNE FORCE QUI VA

(VICTOR HUGO, *HERNANI*)

- L'énergie est ce qu'une force produit – ou consomme – quand son point d'application est en mouvement
- Exemple :
 - Soulever un poids de 1 kg dans le champ de pesanteur terrestre (accélération $10 \text{ m/s}^2 \Leftrightarrow$ force de $10 \text{ kg.m/s}^2 = 10 \text{ N}$)
 - Déplacement (vertical !) de 1 m \Leftrightarrow énergie = $10 \text{ N.m} = 10 \text{ joules} = 10 \text{ J}$
- Ordres de grandeur
 - Énergie contenue dans une pile électrique LR6 $\Leftrightarrow 10\,000 \text{ J} = 10 \text{ kJ}$
 - Barre chocolatée $\Leftrightarrow 10$ millions de joules (10 mégajoules = $10 \text{ MJ} = 10^7 \text{ J}$)
 - Combustion de 1 kg de pétrole $\Leftrightarrow 42 \text{ MJ}$
 - Énergie *consommée par an en France par habitant* $\Leftrightarrow 100\,000 \text{ MJ} = 100 \text{ GJ} = 10^{11} \text{ J}$
 - Fission de 1 kg d'uranium 235 $\Leftrightarrow 80$ millions de mégajoules (80 térajoules = 80 TJ)
 - Énergie *annuellement* produite par une centrale nucléaire $\Leftrightarrow 50\,000 \text{ TJ}$
 - Énergie libérée *chaque seconde* par le Soleil $\Leftrightarrow 3,827 \times 10^{26} \text{ J}$
 - Explosion d'une supernova $\Leftrightarrow 10^{44} \text{ J}$

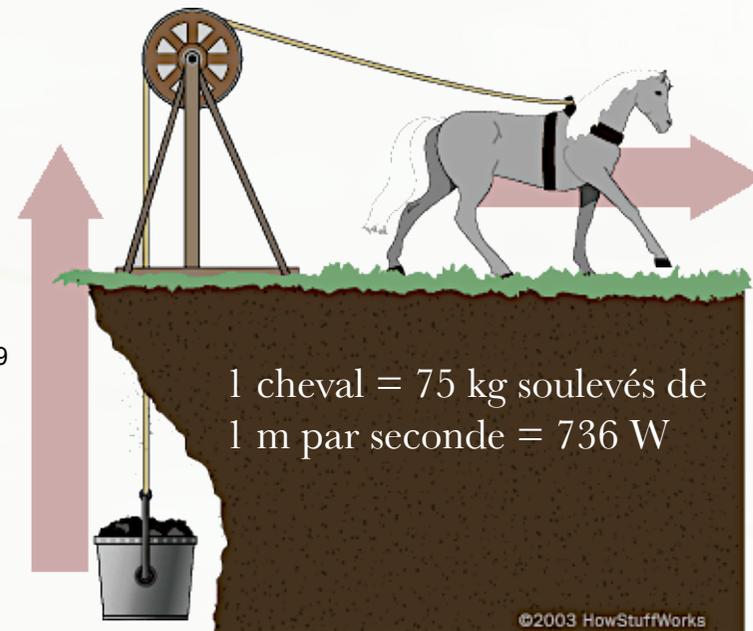
PUISSANCE : UNE ÉNERGIE PAR UNITÉ DE TEMPS

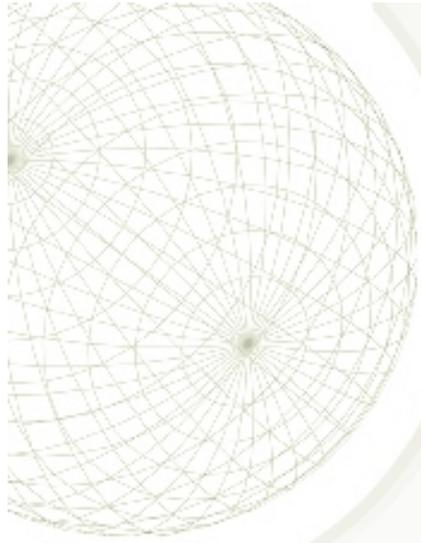
- Forte puissance \Leftrightarrow production rapide d'énergie
- Unité = joule/seconde = watt
- Exemple :
 - Soulever en une seconde un poids de 1 kg dans le champ de pesanteur terrestre \Leftrightarrow 10 W

- Autres exemples

- Four électrique = 1 kW
- Moteur de 100 « chevaux » = $100 \times 736 \text{ W} = 73,6 \text{ kW}$
- Centrale nucléaire = $1450 \text{ MW} = 1,45 \times 10^9 \text{ W}$

- NB : $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$





**ESPACE
+ TEMPS =
ESPACE-TEMPS**

ESPACE-TEMPS

■ Galilée, Newton

- Espace euclidien à 3 dimensions
- Temps euclidien à 1 dimension
- Espace-temps ? Sans intérêt !

- Invariance des lois de la physique par transformation de Galilée

$$x \rightarrow x + V t$$

$$t \rightarrow t$$

■ Maxwell : équations non-invariantes dans une transformation de Galilée

- \Rightarrow il serait possible de détecter un mouvement absolu via la lumière?
- \Rightarrow expérience **négative** de Michelson

■ Einstein

- \Rightarrow modification des lois de Newton
- *et de la transformation de Galilée*
- \Rightarrow transformation de Lorentz

$$x \rightarrow [x + V t] / \sqrt{(1-V^2/c^2)}$$

$$t \rightarrow [t + Vx/c^2] / \sqrt{(1-V^2/c^2)}$$

- Pour Einstein (en 1905), espace et temps demeurent des notions distinctes

■ Minkowski (1908)

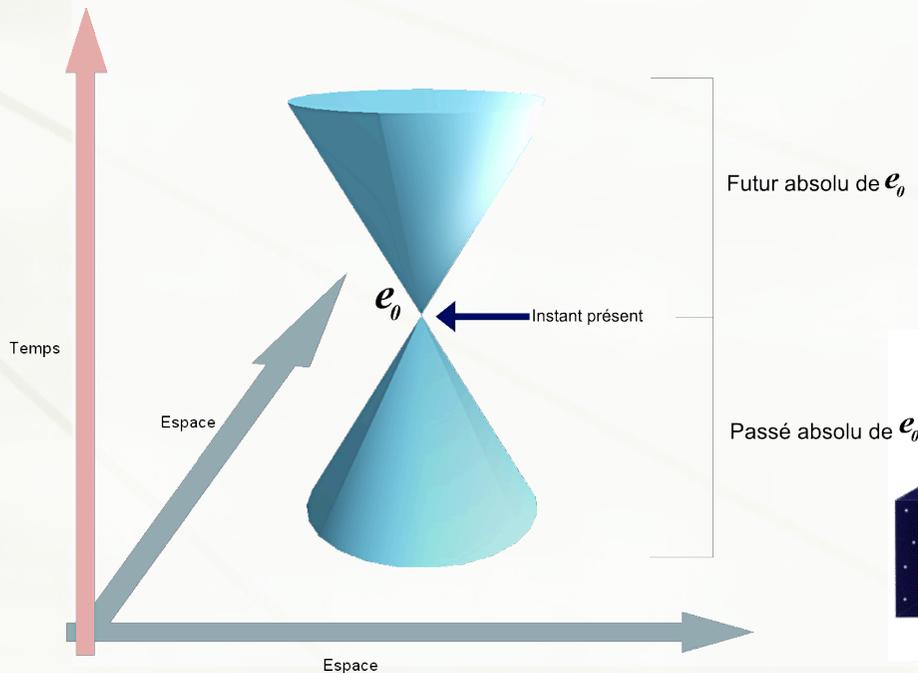
- espace + temps \rightarrow **espace-temps**
- 3 dim. + 1 dim. \rightarrow 4 dim.
- La transformation de Lorentz, en 4D, est semblable à une rotation banale dans l'espace 3D

COURBURE DE L'ESPACE-TEMPS

- Espace-temps de Minkowski
- Espace-temps sans courbure

$$\partial s^2 = c^2 \partial t^2 - [\partial x^2 + \partial y^2 + \partial z^2]$$

- \Rightarrow cône de lumière



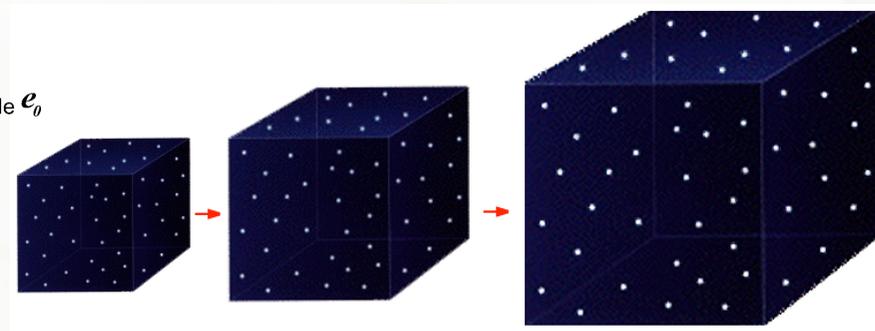
- Relativité générale
- Espace-temps courbe

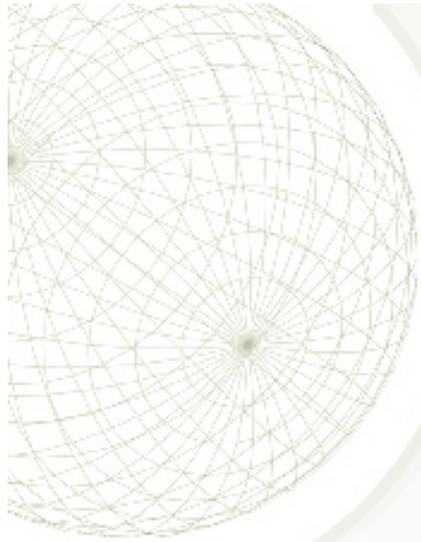
$$\partial s^2 = \Sigma g_{\mu\nu}(x) \partial x_\mu \partial x_\nu$$

- Cas très simple : le big bang

$$\partial s^2 = c^2 \partial t^2 - a^2(t) [\partial x^2 + \partial y^2 + \partial z^2]$$

- Les distances augmentent toutes **proportionnellement** avec le temps
 \Leftrightarrow expansion de l'univers





Merci de votre attention !

