

INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE

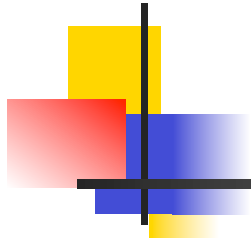


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





ESPACE ET TEMPS

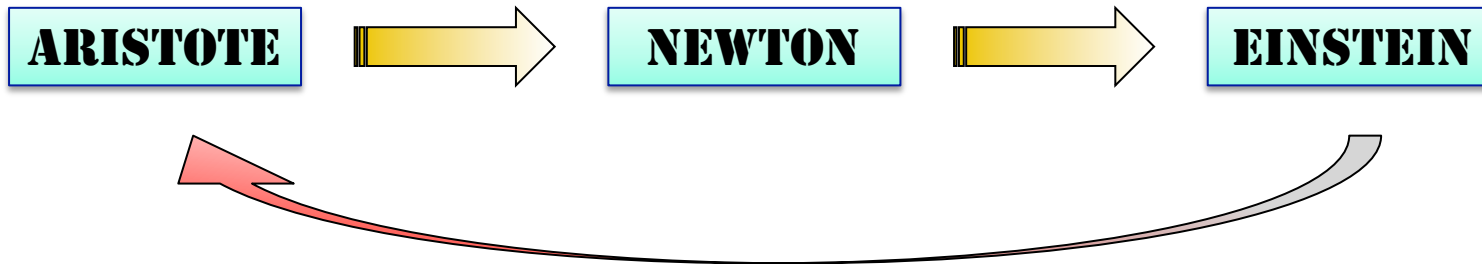
Espace et temps, mouvement et gravitation

- Les notions

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

- 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

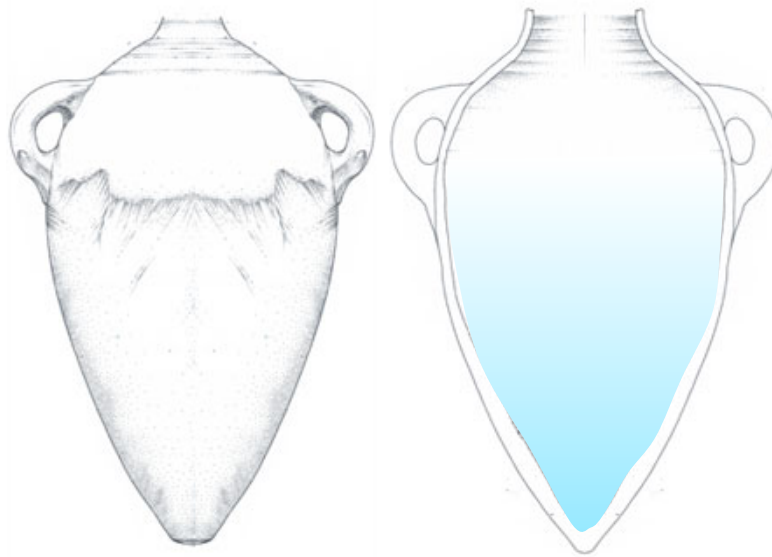


- Mais elles n'ont RIEN d'évident !

Le lieu et l'espace (Aristote, Physique IV)

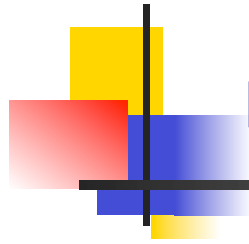
■ Lieu

- 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 ...



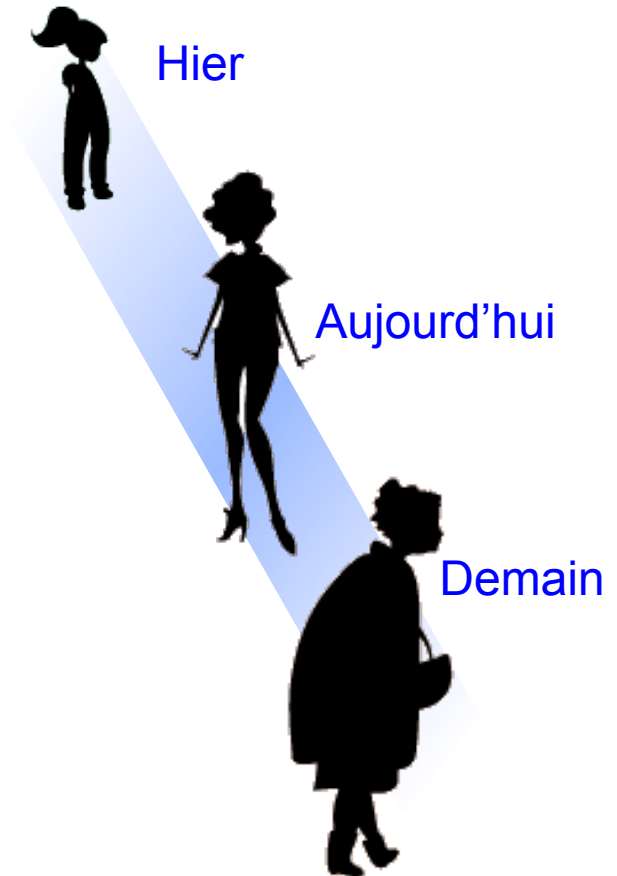
L'espace

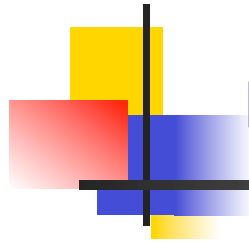
et le temps

- Cadre ?



- Cadre ?

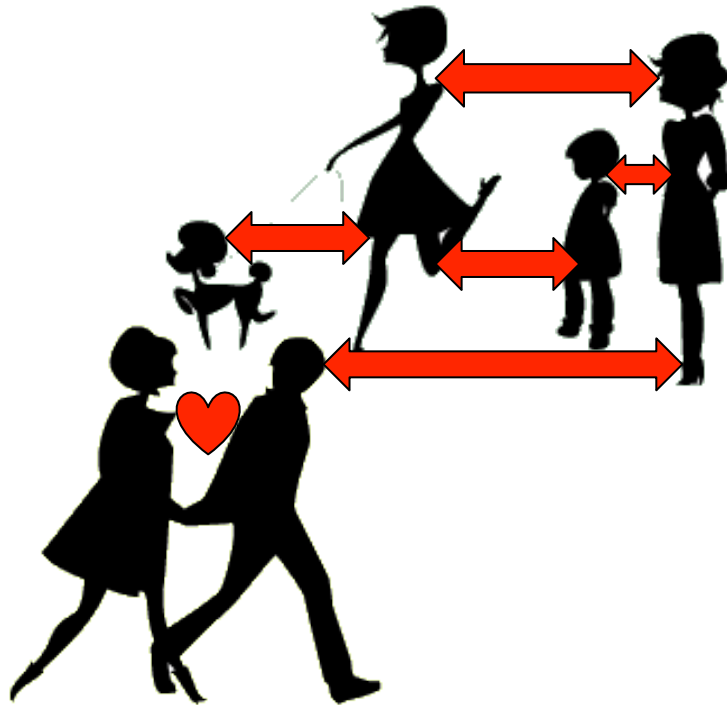




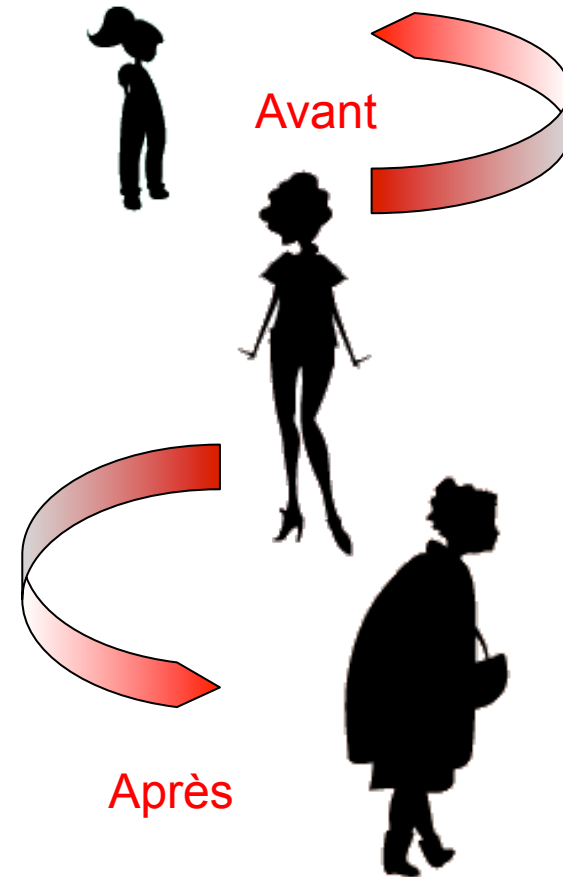
L'espace

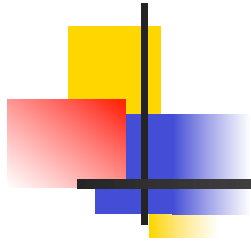
et le temps

- Relation ?



- Relation ?





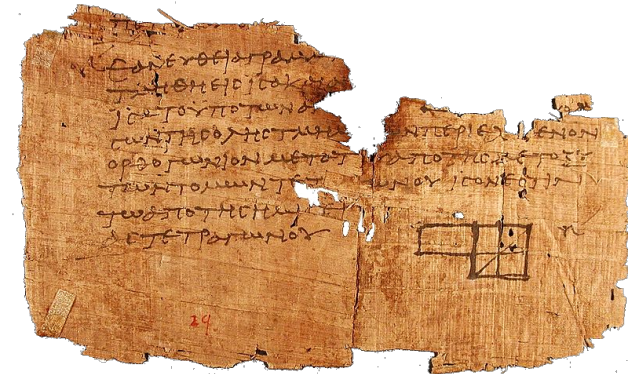
ESPACE ET GÉOMÉTRIE

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
 - 3 – un cercle peut avoir n'importe quel centre ou rayon
 - 4 – tous les angles droits sont égaux
 - 5 – postulat des parallèles

(\Rightarrow l'espace est infini)



■ Théologiens médiévaux

- l'espace est une forme de Dieu

■ \Rightarrow Newton

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

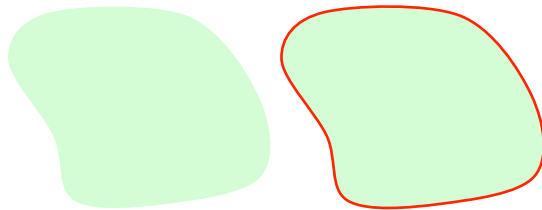
■ Gauss, Bolyai, Lobatchevsky, Riemann : géométries non-euclidiennes



Géométrie

- Topologie

- Notion d'ouvert et de fermé



- Notion de voisinage



plan \neq cylindre

- Espaces avec des bords
- Espaces avec des trous

- Métrique

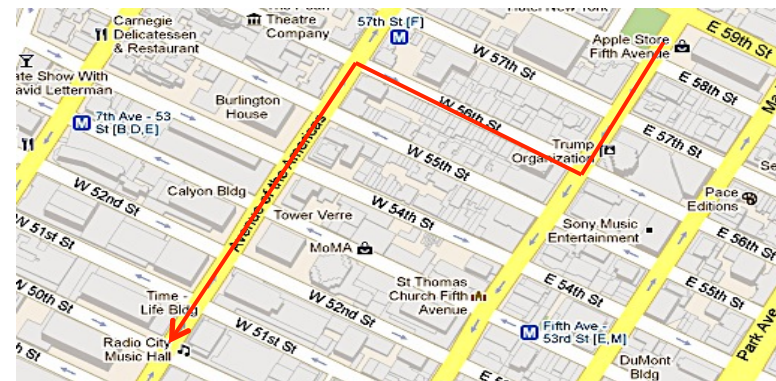
- Notions de distance et d'angle
plan = cylindre

- Distances

- Sur un terrain de foot



- À Manhattan



Coordonnées et dimension(s) de l'espace

- Coordonnées (Oresme, Descartes)

- un point \Leftrightarrow une valeur numérique
- $N \quad Z \quad R \quad C \dots$
- 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^o étage.
 - L'horloge indique 10:03.
- 2 nombres \Leftrightarrow 2 dimensions
 - **Plan**
 - Nous sommes au coin de la 5^o avenue et de la 41^o rue.
 - **Cylindre**
 - **Sphère**
 - Nous sommes situés par 49,829^o de latitude nord et 2,381^o de longitude est.

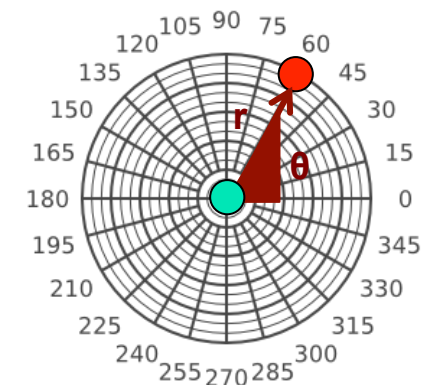
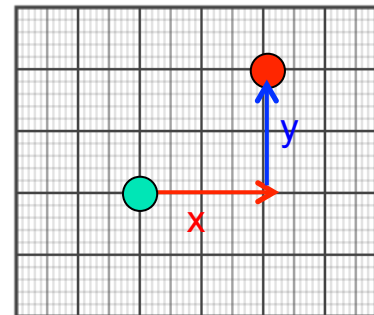
- Plan, cylindre, sphère (ou papier froissé) sont **localement** identiques

- Généralisable à 3, 4... N dimensions

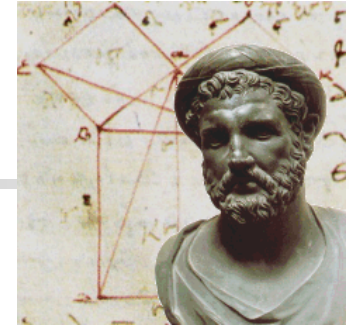
- et généralisable à des « espaces » très différents (espaces de fonctions par ex.)

- Changement de coordonnées

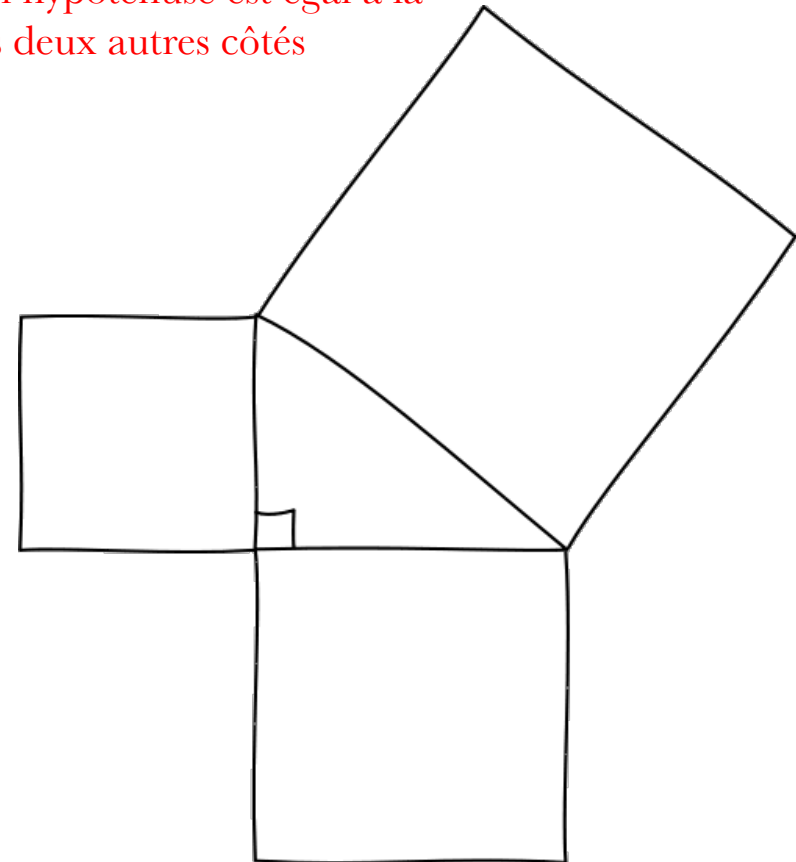
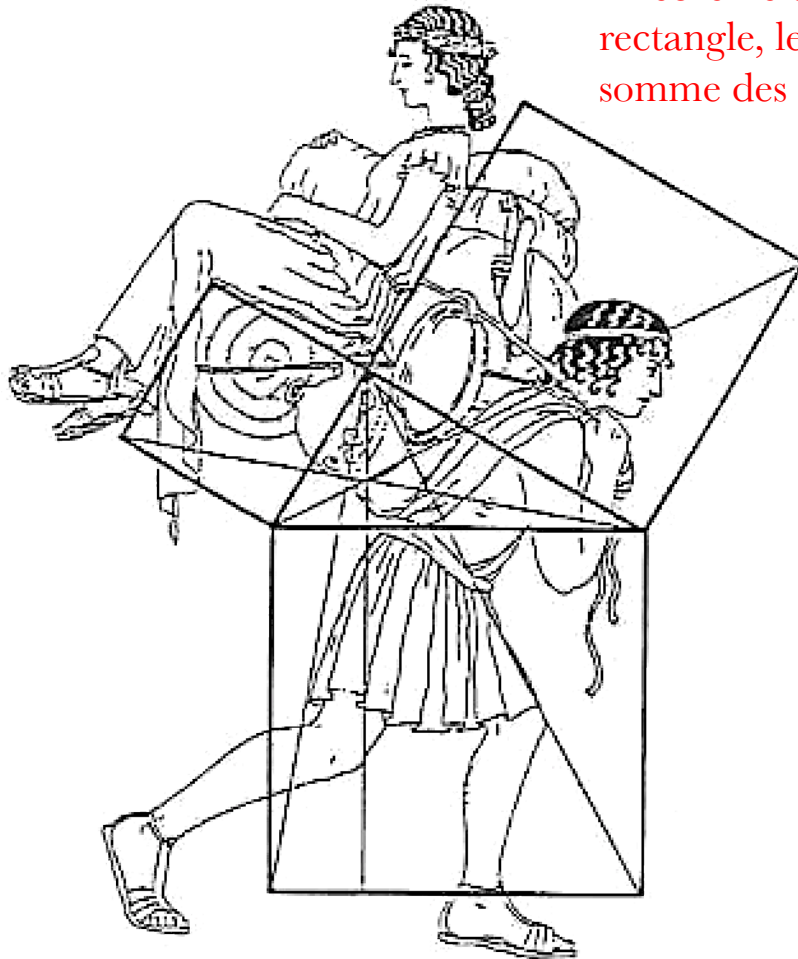
- cartésien \Rightarrow polaire



Pythagore



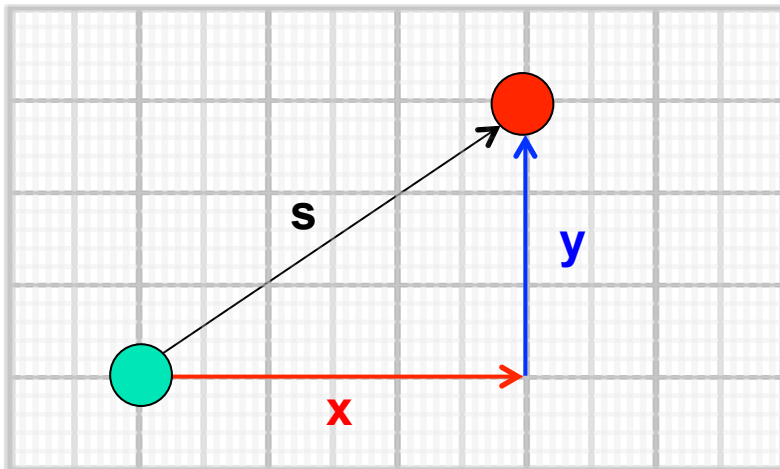
Théorème de Pythagore : dans un triangle rectangle, le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés



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 dimensions

- L'expression dépend du choix des coordonnées

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

- $\partial s^2 = \partial r^2 + r^2 \partial \theta^2$ polaires

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

Pythagore, encore... et toujours

- Courbure !
- Généralisons le théorème de Pythagore

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



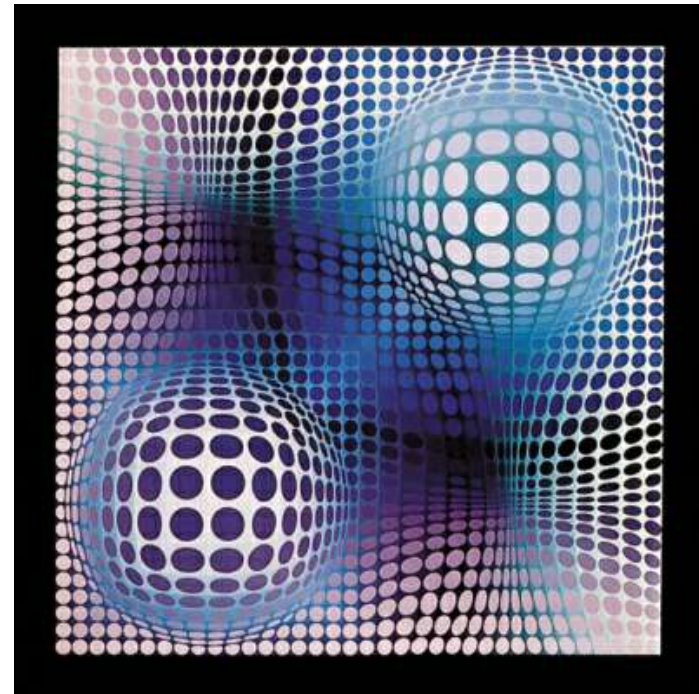
- pour qu'il devienne

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

- ou plus généralement

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

- \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

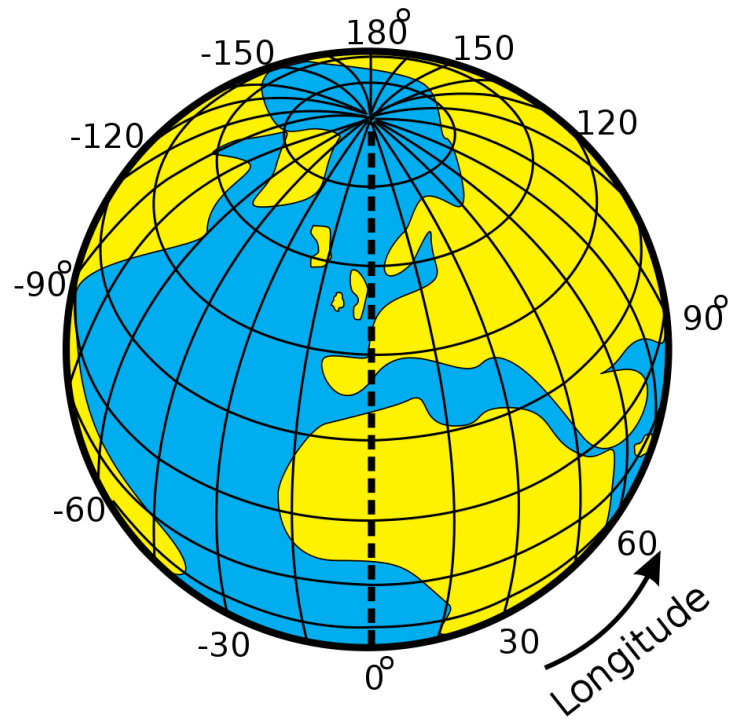
ex: **Pôle Nord** – **Libreville** - **Singapour**

- Il existe des cercles dont le périmètre n'est égal qu'à **4** fois le rayon (et non 2π)
- Par exemple 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

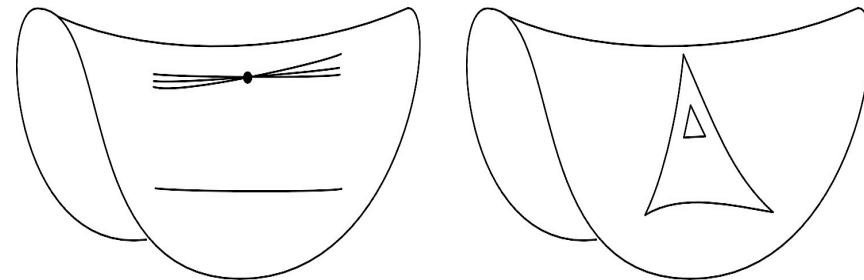


Espaces de courbure variée

- Courbure positive



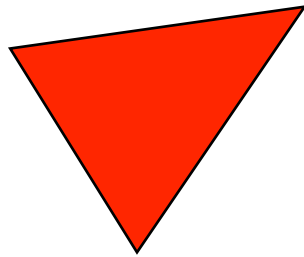
- Courbure négative



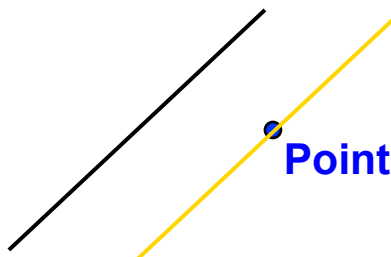
Espaces courbes

■ Géométrie euclidienne

- somme des angles = 180°

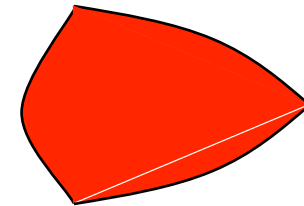
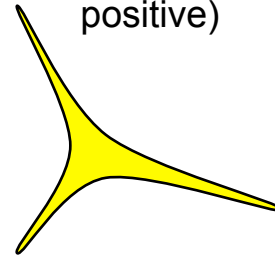


- périmètre d'un cercle $P = 2\pi R$
- une seule parallèle à une droite par un point extérieur



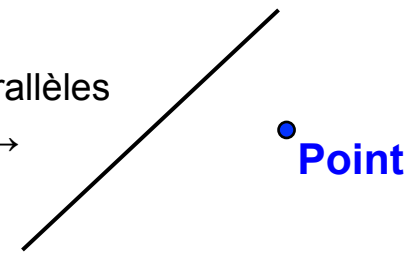
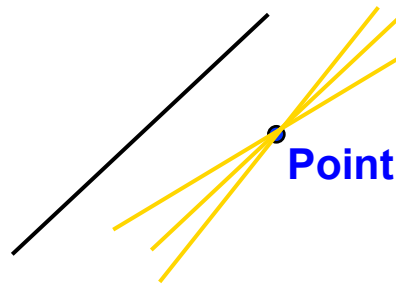
■ Géométrie riemannienne

- 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*

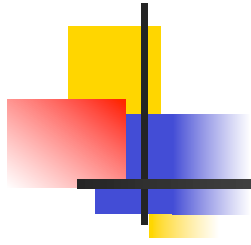
← une infinité de parallèles
ou aucune →





Mais aura-t-on le temps de parler du temps ?





TEMPS ET MOUVEMENT

Le temps

« 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

- 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 ...



Le temps est ce qui évite que tout arrive en même temps



© <http://abstrusegoose.com/407>

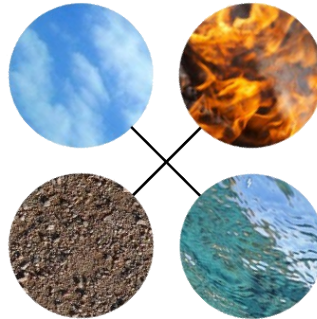
Aristote et le mouvement

■ Mouvement naturel

- **linéaire** pour les 4 éléments fondamentaux

vers le haut (air et feu)

ou vers le bas (eau et terre)

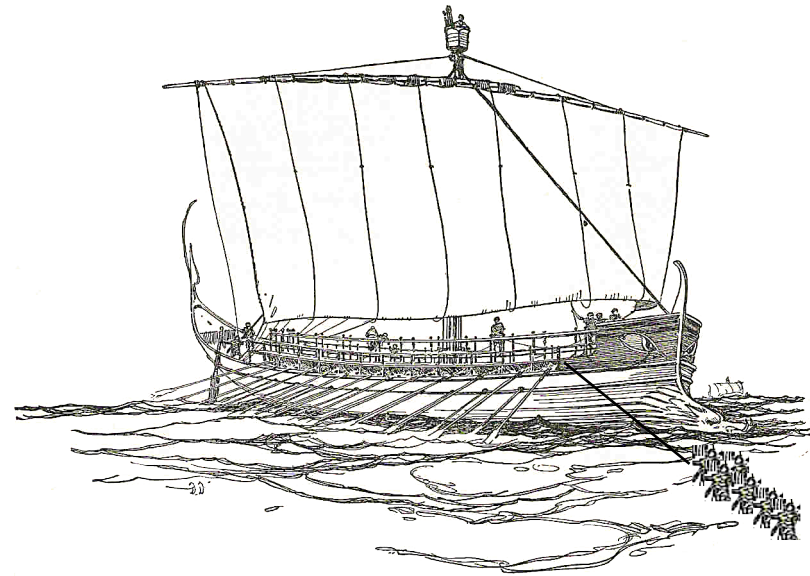


- **circulaire** pour le 5^e, la quintessence, expliquant le mouvement des astres



■ Mouvement forcé

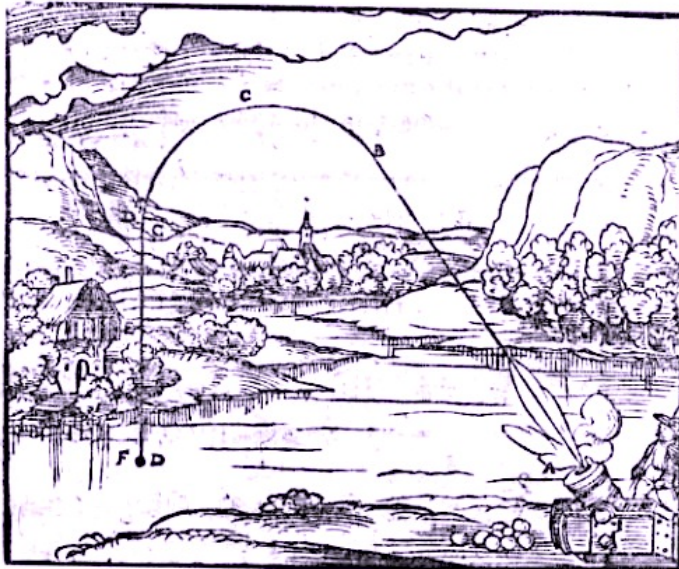
- pas de force \Leftrightarrow pas de mouvement
- vitesse \Leftrightarrow force ?



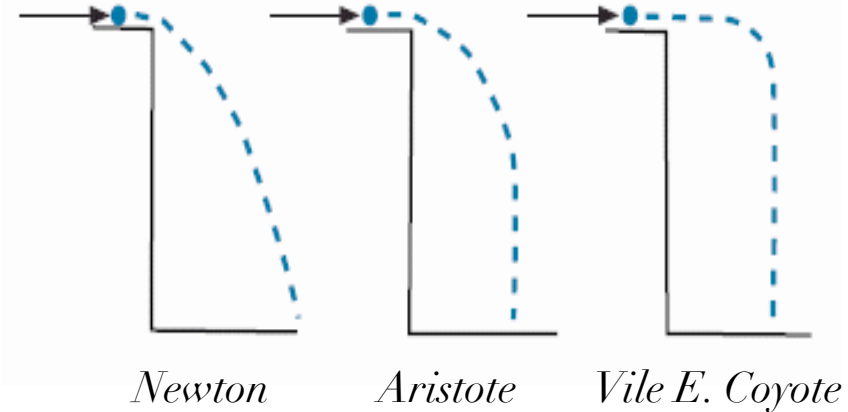
- notions de **vitesse** et d'**accélération** non différenciées
- celles de **force** et d'**impulsion** non plus

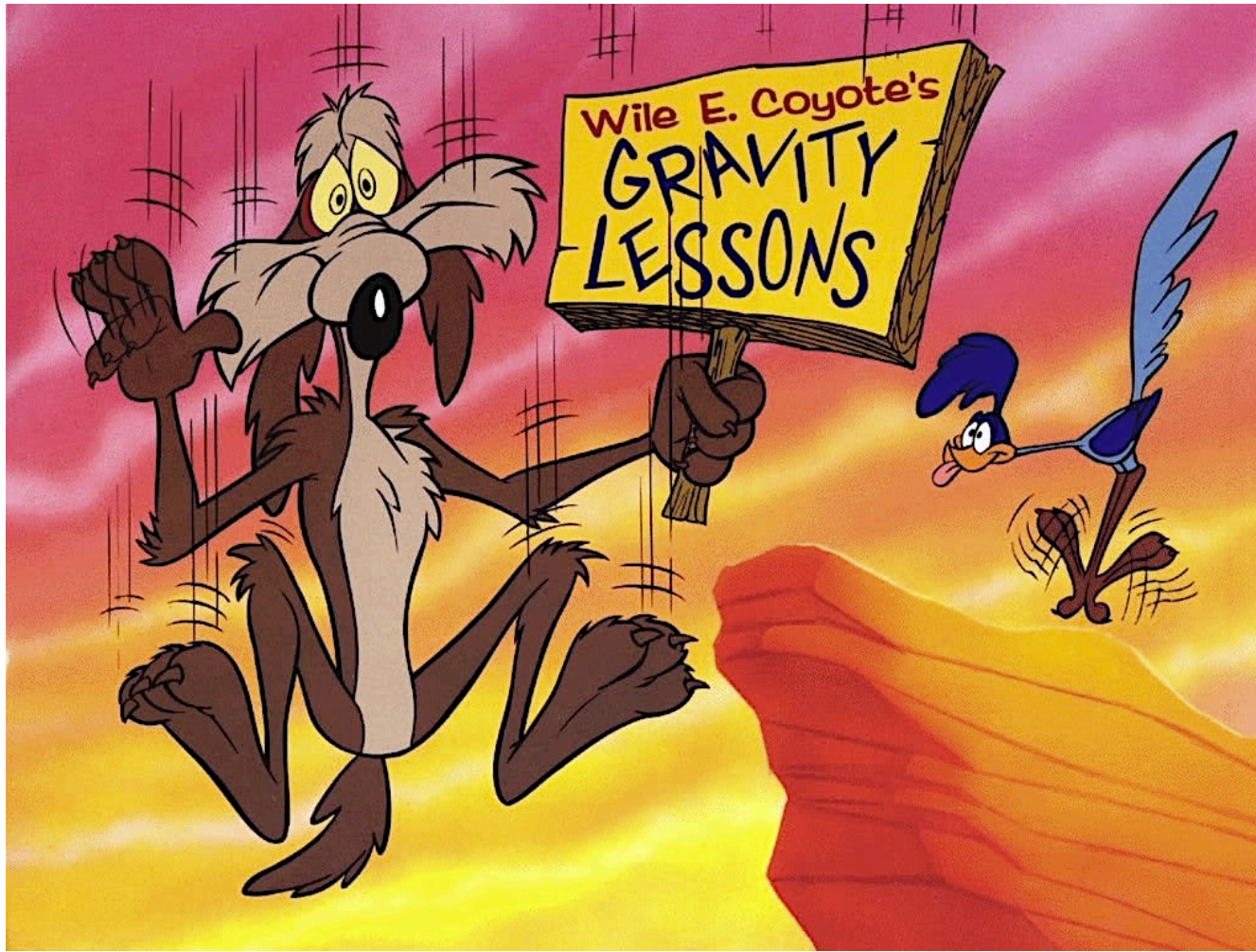
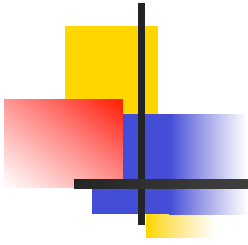
Impetus

- Pourquoi la flèche se déplace-t-elle après avoir quitté l'arc?
- Aristote ...
- 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...





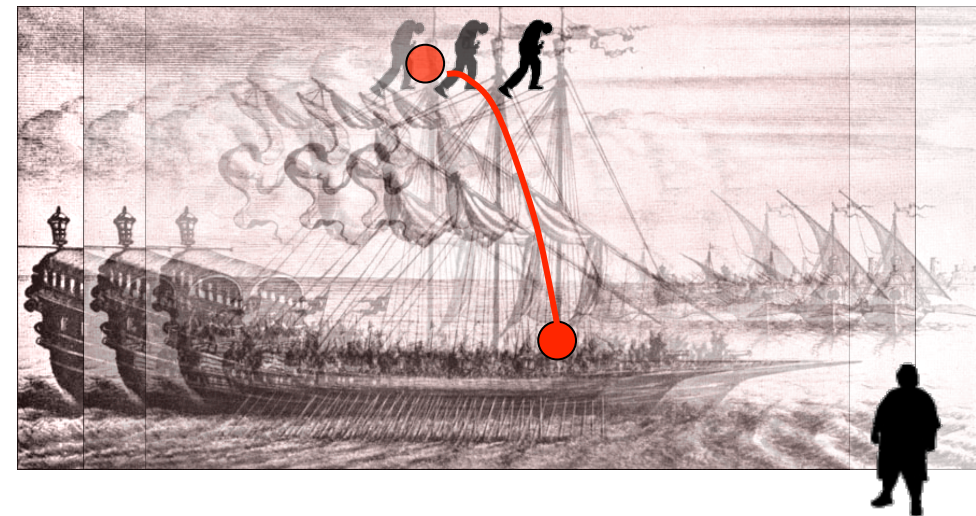
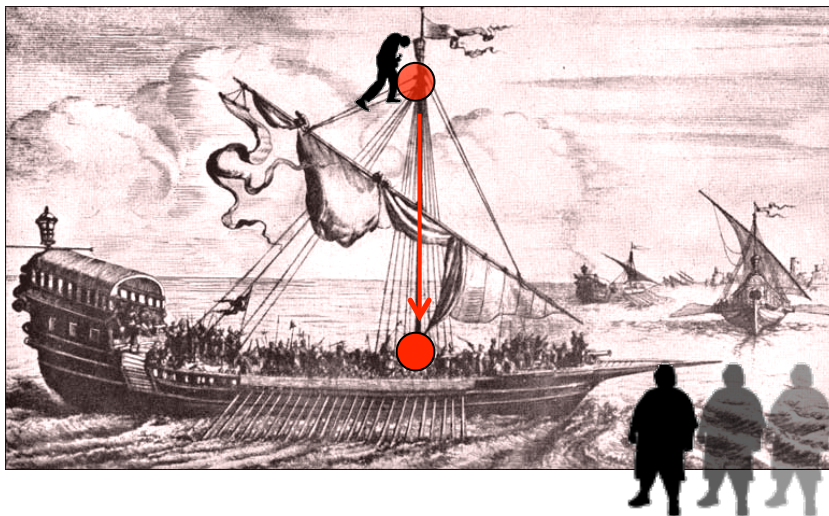
Invariance galiléenne

- 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)



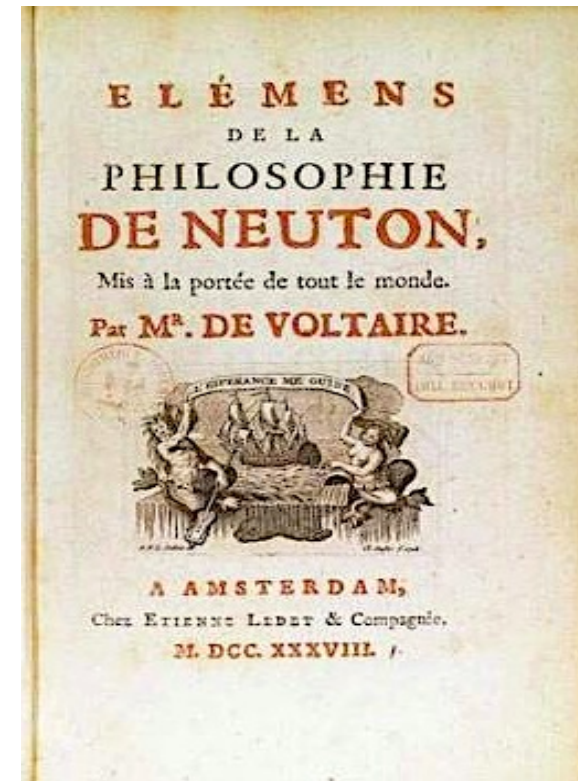
- Les lois physiques sont identiques par *transformation de Galilée*
 - $x \rightarrow x + V t$
 - $t \rightarrow t$

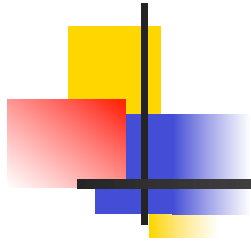


Espace absolu

et temps absolu

- *L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire & immobile. [Newton, Principia]*
- *Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, & s'appelle durée.*
- 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



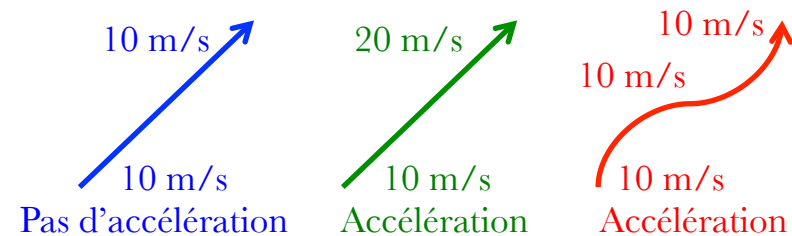


FORCE ÉNERGIE PUISSANCE

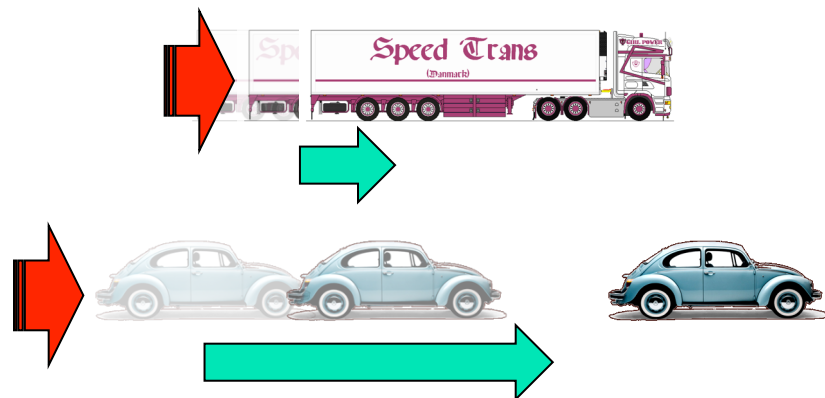
Newton : les 3 lois du mouvement

- 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.
- Action-réaction
 - 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

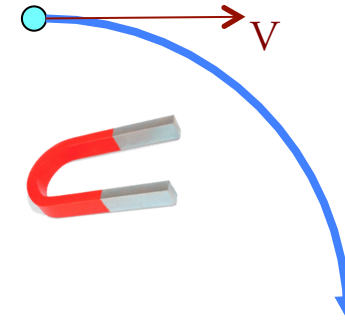


- Même force, masses différentes



Force

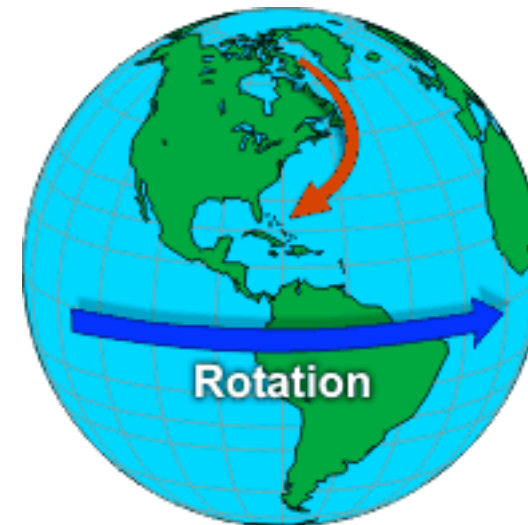
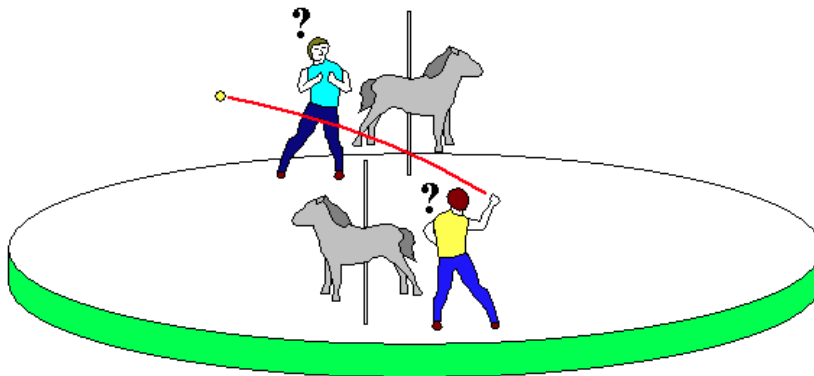
- Une **force** est ce qui produit une **accélération** sur une **masse** (inertielle)
 - force de gravitation
 - forces de frottement (en sens inverse du mouvement → freinage)
 - force de Coulomb (électrostatique)
 - force de Lorentz (magnétique) $F = q \mathbf{V} \times \mathbf{B} = m \boldsymbol{\gamma} \rightarrow \boldsymbol{\gamma} \perp \mathbf{V} \rightarrow$ mouvement circulaire
 - forces nucléaires
 - ...



- Masse en kilos, accélération en $\text{m/s}^2 \rightarrow$ force en newtons (N)
 - masse de 1 kg dans le champ de gravitation terrestre à Paris ($\rightarrow \boldsymbol{\gamma} = 9,81 \text{ m/s}^2$)
 - \Rightarrow poids = 9,81 N
 - turboréacteurs de l'Airbus A 380 : poussée 310 kN chacun
 - fusée Ariane 5 : moteur Vulcain poussée 1350 kN (+ boosters à poudre $2 \times 7000 \text{ kN}$)

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 100 g $\Leftrightarrow 450 \text{ kCal} = 1,9 \text{ millions de joules}$ (1 mégajoule = $1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$)
 - 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 $\Leftrightarrow 80 \text{ millions de mégajoules}$ (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 $\Leftrightarrow 10^{44} \text{ J}$

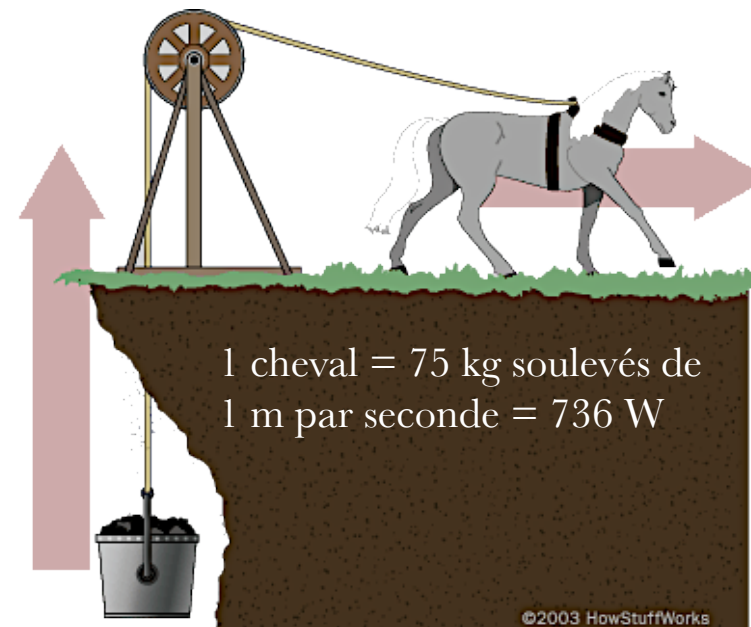
Puissance : une énergie par unité de temps

- Forte puissance \Leftrightarrow production/consommation 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 = $1450 \text{ MWe} = 1,45 \times 10^9 \text{ W}$

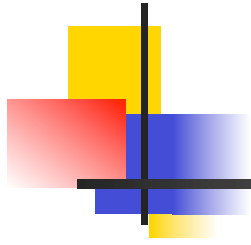
$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$





Mais on devait aussi parler d'espace-temps !





**ESPACE
+ TEMPS =
ESPACE-TEMPS**



Espace-Temps

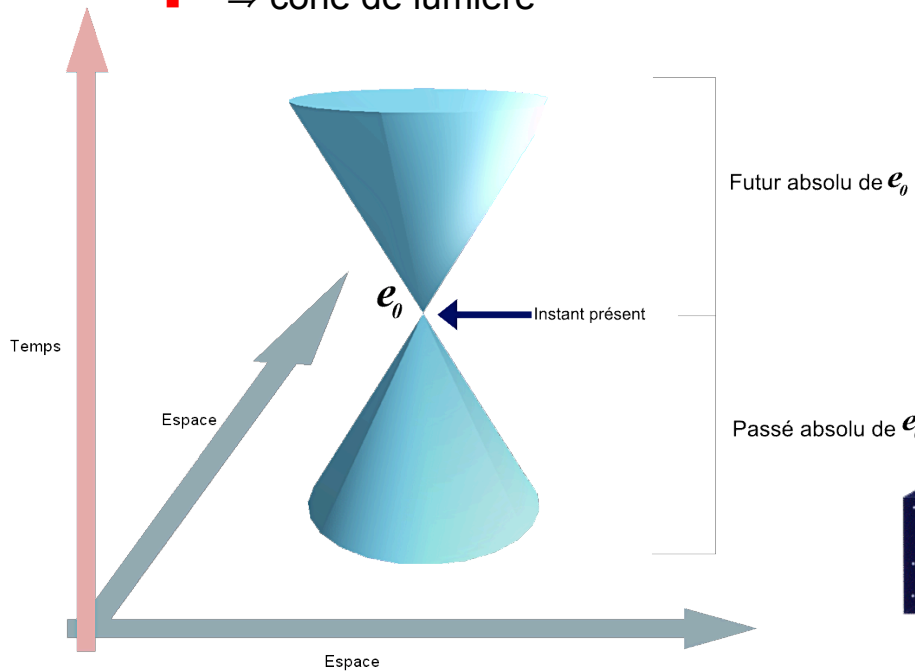
- Galilée, Newton
 - espace euclidien à 3 dimensions
 - temps euclidien à 1 dimension
 - notion d'espace-temps sans intérêt

 - invariance des lois de la physique par transformation de Galilée
 - $x \rightarrow x + V t$
 - $t \rightarrow t$
- Les équations de Maxwell ne sont **pas** 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.
 - transformation de Lorentz en 4D analogue à une rotation en 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

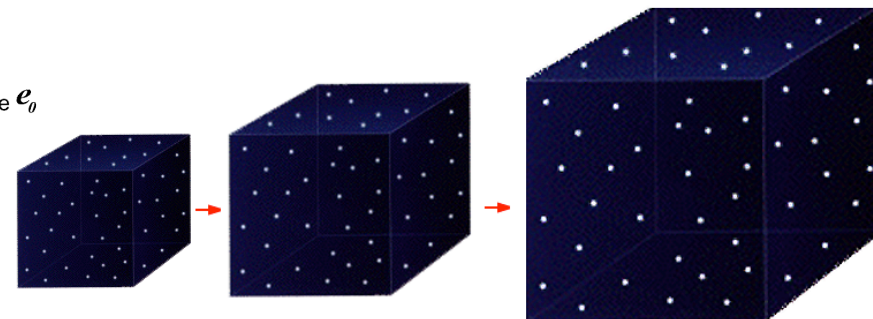
- Espace-temps courbe

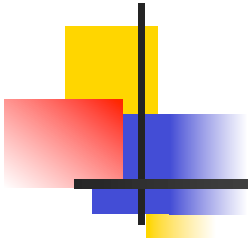
$$\partial s^2 = \Sigma g_{\mu\nu} (x) \partial x_{\mu} \partial x_{\nu}$$

- 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 avec le temps \Leftrightarrow expansion de l'univers





Merci de votre attention !

