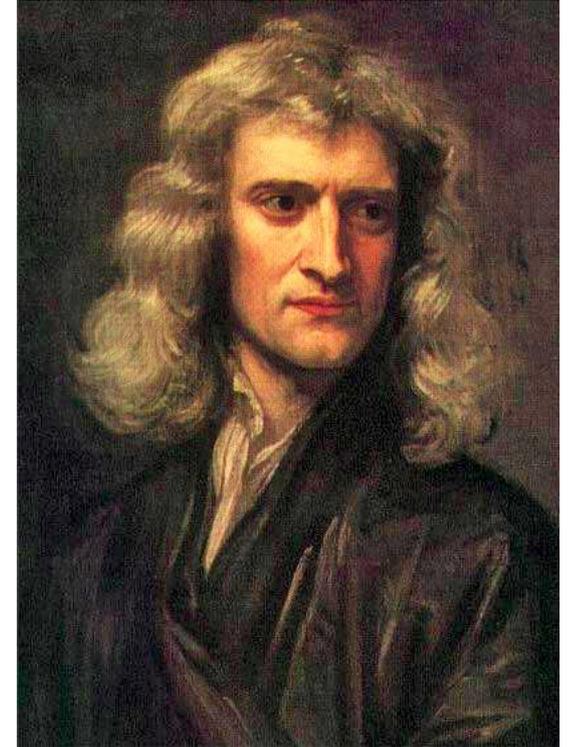


# La mécanique classique

- Dite « classique » par opposition à la mécanique quantique et la relativité
  - = « Mécanique newtonienne »
- Éléments théoriques
- Lois de Kepler
- Lois de Newton
- Temps newtonien et référentiels galiléens



Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées  
Images : Wikipedia sauf mention contraire

Notions utilisées :  
1. Introduction

PHILOSOPHIÆ  
N A T U R A L I S  
P R I N C I P I A  
M A T H E M A T I C A .

Autore ꝑ S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos  
Professore Lucafiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.  
S. P E P Y S, Reg. Soc. P R Æ S E S.  
Julii 5. 1686.

L O N D I N I,

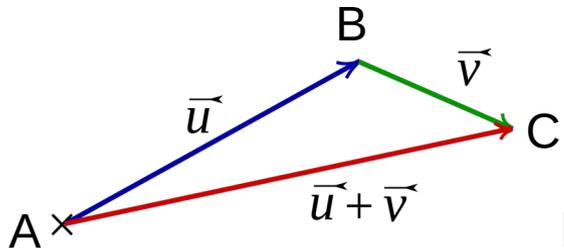
Juffu Societatis Regiæ ac Typis ꝑofephi Streater. Proftat apud  
plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

# Les lois du mouvement de Newton

- Énoncées en 1687 dans son ouvrage *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (« *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* »)
- Principes à la base de la théorie concernant le mouvement des corps

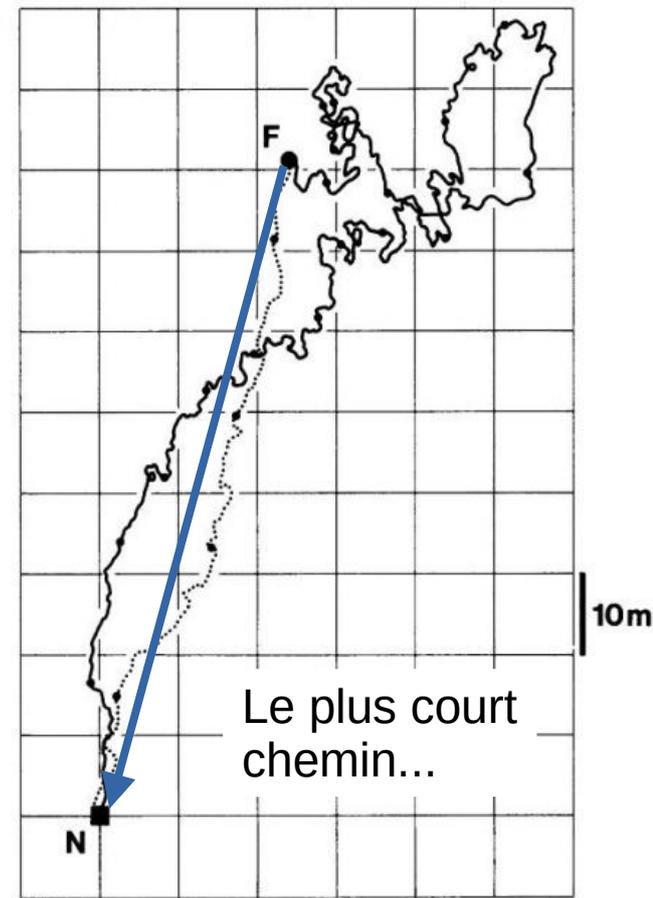
# Les vecteurs

- **Vecteur** = objet mathématique possédant
  - Une **norme** (longueur), une **direction** (droite qui le porte) et un **sens**
  - Utilisé pour représenter une **translation**
- En physique :
  - Sert à représenter une grandeur comme un **déplacement**/une **position**, une **force**, une **vitesse**, une **accélération**, un **champ électrique/magnétique**, ...
  - A un **point d'application**
    - L'impact d'une force dépend de son point d'application



Somme vectorielle

Relation de Chasles :  $\vec{AB} + \vec{BC} = \vec{AC}$

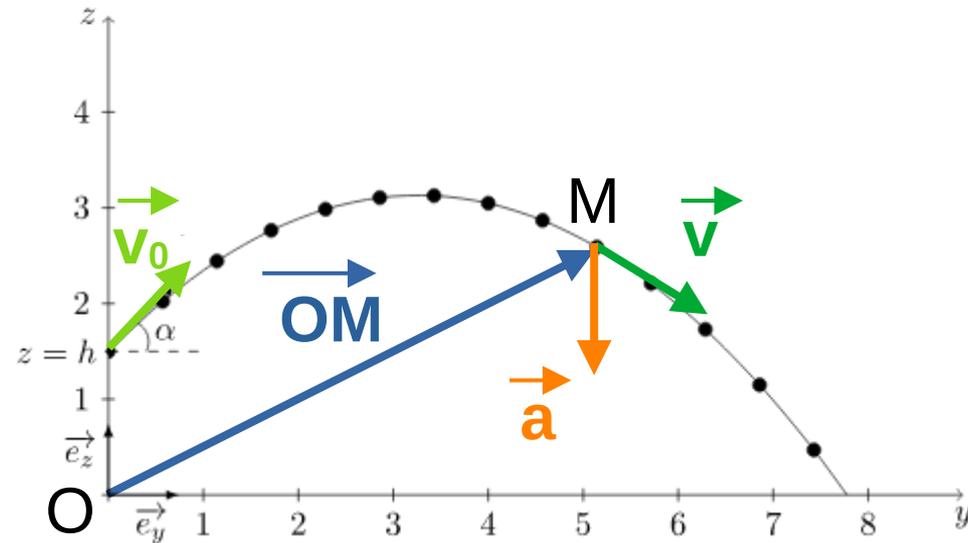


Les fourmis savent faire des sommes vectorielles !

<https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.85.14.5287>

# Position, vitesse, accélération

- Le vecteur **position**  $\vec{OM}$  décrit où se trouve l'objet (unité : [m])
- Le vecteur **vitesse**  $\vec{v}$  décrit comment la **position** varie (unité : [m.s<sup>-1</sup>])
  - Pointe vers la **position suivante** de l'objet
  - **Tangent** à la trajectoire
- Le vecteur **accélération**  $\vec{a}$  décrit comment la **vitesse** varie (unité : [(m.s<sup>-1</sup>).s<sup>-1</sup>] = [m.s<sup>-2</sup>])
  - La vitesse s'oriente de plus en plus vers le bas

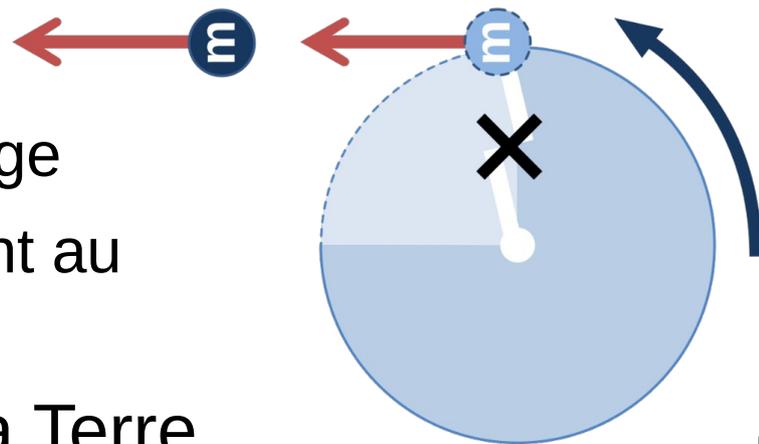
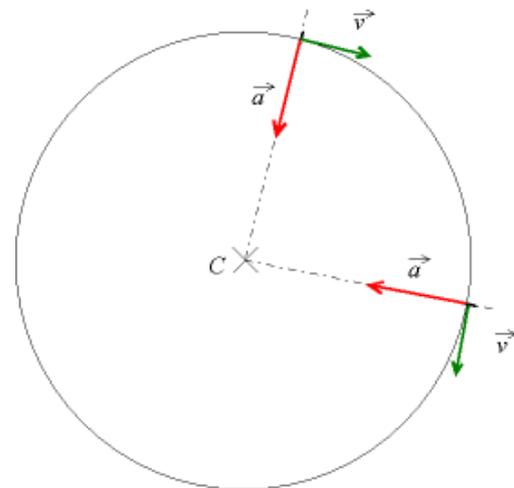


Trajectoire « **ballistique** »

- **Dérivation** :  $\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt}$  et  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{OM}}{dt^2}$

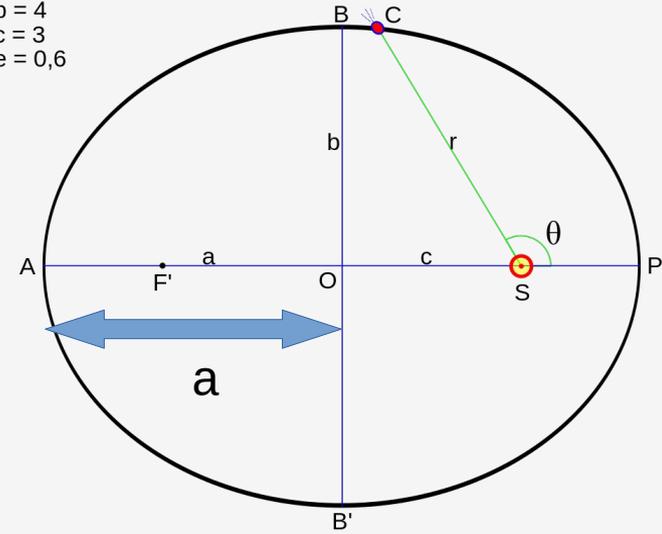
# Le mouvement circulaire uniforme

- Cas particulier de mouvement :
  - sur un **cercle** avec une **vitesse constante** en norme
- La vitesse est « **tangentielle** » à la trajectoire
- L'accélération est **centripète**
  - = orientée **vers le centre du cercle**
  - Produite par un fil, une masse, une charge
  - Si elle cesse, l'objet part tangentiellement au cercle (fronde)
- Mouvement des satellites autour de la Terre

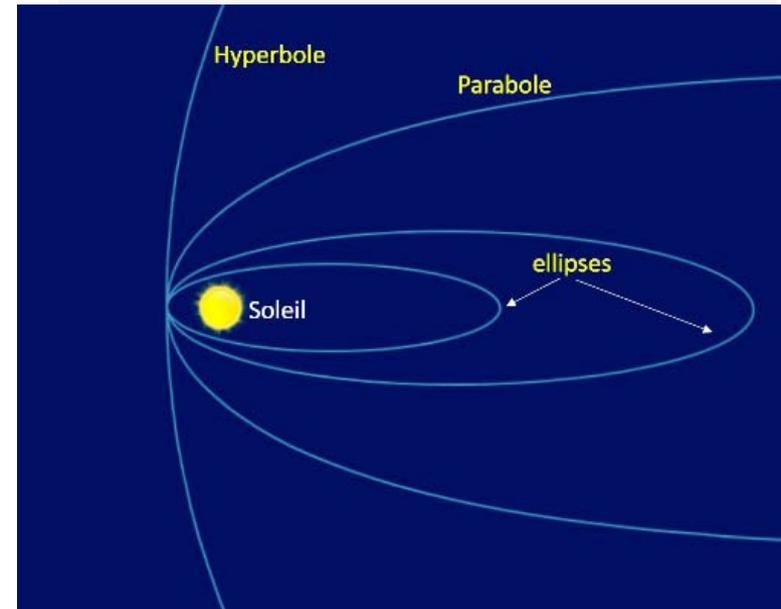


# La première loi de Kepler

$a = 5$   
 $b = 4$   
 $c = 3$   
 $e = 0,6$

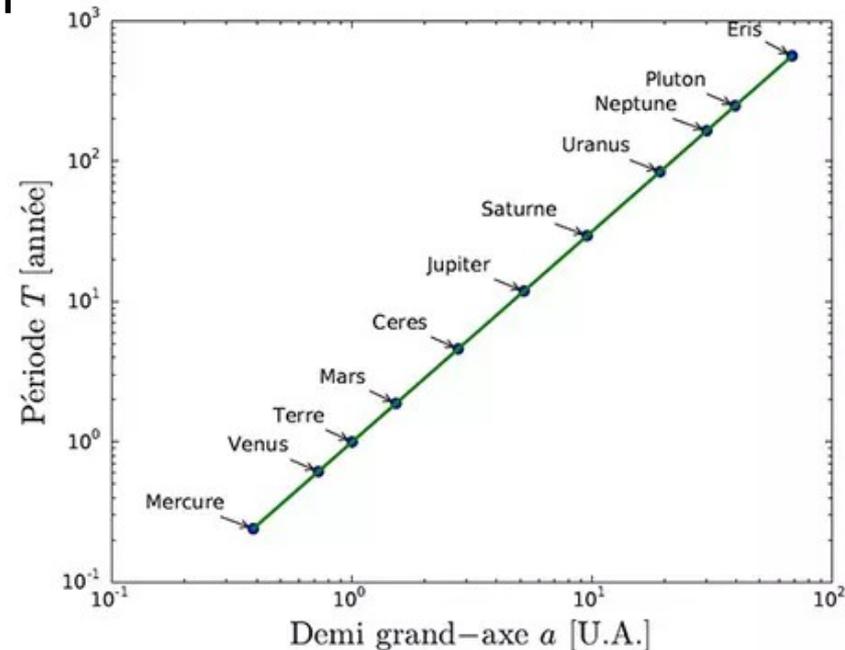
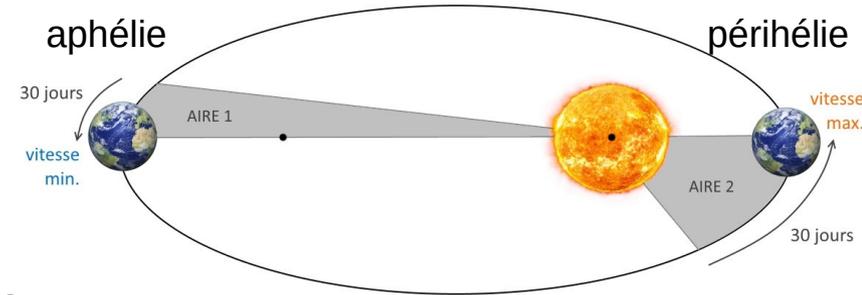


- Les lois de Kepler sont des lois **empiriques** établies en 1609 et 1618
- Les planètes du Système solaire décrivent des **trajectoires elliptiques** dont le Soleil occupe l'un des **foyers**
  - une ellipse est définie par son **excentricité** (pour la Terre,  $e = 0,016$ ,  $\sim$  cercle)
- Plus généralement des « **coniques** » dont le Soleil est un foyer.
  - Dans le cas des comètes, on peut même avoir des trajectoires **non fermées**, **paraboliques** ou **hyperboliques**



# Les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> lois de Kepler

- Deuxième loi (« **loi des aires** ») : des aires égales sont balayées dans des temps égaux
  - Vitesse **pas constante** lors de la rotation
- Troisième loi :  $T^2$  proportionnel à  $a^3$ 
  - $T$  = **période sidérale** d'un astre (temps entre deux passages successifs devant une étoile donnée)
  - $a$  = demi-**grand axe** de la trajectoire (~rayon si excentricité faible)



# Première loi de Newton

- Ou « **principe d'inertie** »
- Formulation originelle :
  - Tout corps persévère dans l'état de repos ou de **mouvement rectiligne uniforme** dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état
- Formulation moderne :
  - Dans un **référentiel galiléen**, le **vecteur vitesse** du **centre d'inertie** d'un système est constant si et seulement si **la somme des vecteurs forces** qui s'exercent sur le système est un **vecteur nul**

# Deuxième loi de Newton

- ou « **principe fondamental de la dynamique** » (PFD/RFD)
- L'accélération d'un corps est
  - **Proportionnelle aux forces** auxquelles il est soumis
    - « Plus on pousse, plus vite ça se met en mouvement »
  - **Inversement proportionnelle à sa masse**
    - Plus c'est lourd, plus c'est difficile à mettre en mouvement »



$$\vec{a} = \frac{1}{m} \sum \vec{F} \quad \text{ou} \quad \sum \vec{F} = m \vec{a}$$

# Troisième loi de Newton

- Ou « **loi des actions réciproques** »
- **L'action est toujours égale à la réaction** : tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'**intensité égale**, de **même direction** mais de **sens opposé** exercée par le corps B.
  - Nous attirons autant la Terre à nous qu'elle nous attire à elle
  - La Terre est « autant » « tombée » vers la pomme que la pomme est tombée vers la Terre...

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$$



# Loi universelle de la gravitation

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12}$$

- Loi décrivant la **gravitation** comme une **force responsable de l'attraction entre des corps ayant une masse**
  - chute des corps & mouvement des corps célestes
  - permet **d'expliquer** les trois lois de Kepler
- À proximité de la surface de la Terre :

$$F_{\text{Terre} \rightarrow \text{corps}} = G \cdot \frac{M_T \cdot m_{\text{corps}}}{r_{T^2}} = m_{\text{corps}} \cdot G \cdot \frac{M_T}{r_{T^2}} = m_{\text{corps}} \cdot g$$

$$P = m \cdot g$$

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  : accélération de la pesanteur à la surface de la Terre

$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  : constante gravitationnelle

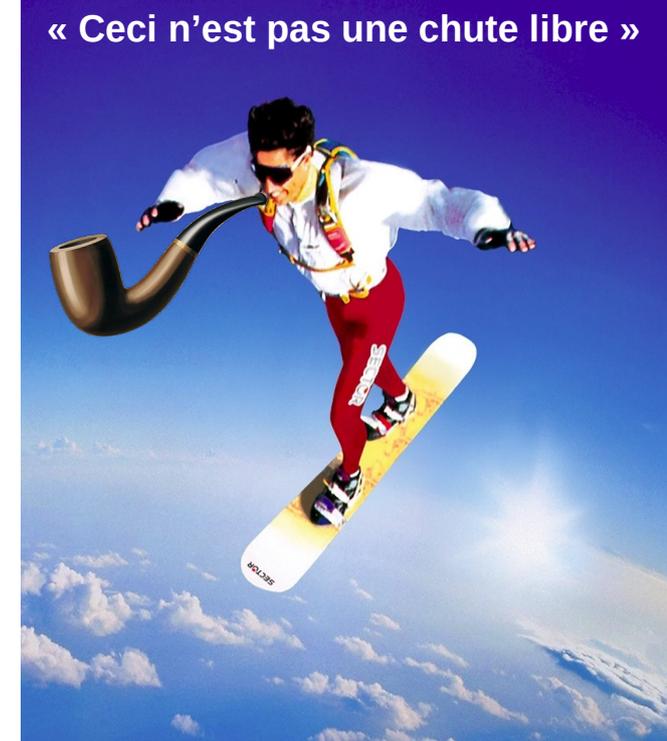
Record du monde de saut :  
**58,80 mètres**



<https://www.francesoir.fr/culture-medias/record-du-monde-de-plongeon-de-haut-vol-5880-metres-video>

# La chute libre

C'est le mouvement d'un objet **uniquement soumis à la pesanteur** (dans le vide)



Termes « **apesanteur** » & « **0 g** » impropres car nous sommes toujours soumis à la gravité terrestre

# L'énergie mécanique

- = **Énergie cinétique** + **Énergie potentielle (gravitationnelle)**

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{G \cdot M_T \cdot m}{r} \quad \left( \vec{F} = -G \cdot \frac{M_T \cdot m}{r^2} \vec{e} = -\vec{\nabla} E \right)$$

- L'énergie potentielle est **négative** et **augmente avec r**
- L'énergie mécanique
  - Est constante en l'absence de frottements
    - Conversion énergie cinétique ↔ énergie potentielle (comme dans un ressort)
  - Est **négative** pour un **système lié** (objets en orbite)
- En pratique, il existe des frottements :
  - L'énergie mécanique **diminue**

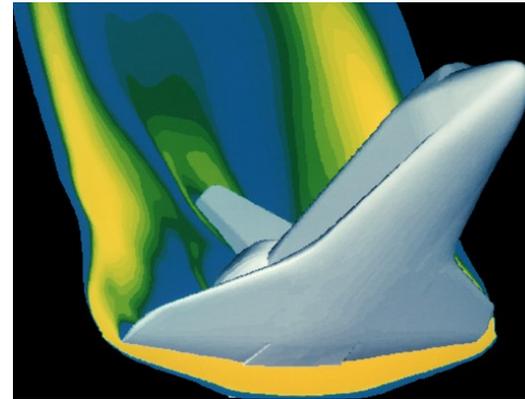
# Corps en orbite

- Les lois de la gravitation donnent  $E_c = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{2r}$  et donc

$$E_m = -\frac{G \cdot M_T \cdot m}{2r}$$

- L'énergie cinétique **diminue avec r** !
  - Plus l'orbite est basse, plus la vitesse est élevée
- L'énergie mécanique
  - Est **négative et augmente avec r**
    - $E_p$  augmente plus vite qu' $E_c$  ne diminue
- En pratique, il y a frottements :
  - L'énergie mécanique **diminue** – il faut de l'énergie pour maintenir les orbites
  - **Altitude diminue et vitesse augmente**
  - → entrée dans l'atmosphère ( $v \sim 11$  km/s)

Navette BOR-5

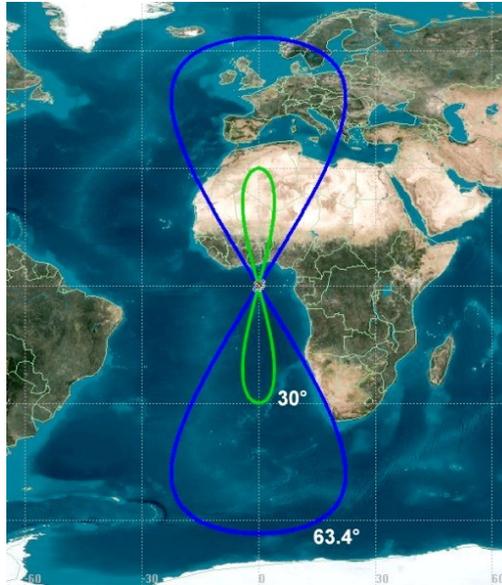


Représentation par un ordinateur de la rentrée atmosphérique de la Navette spatiale américaine

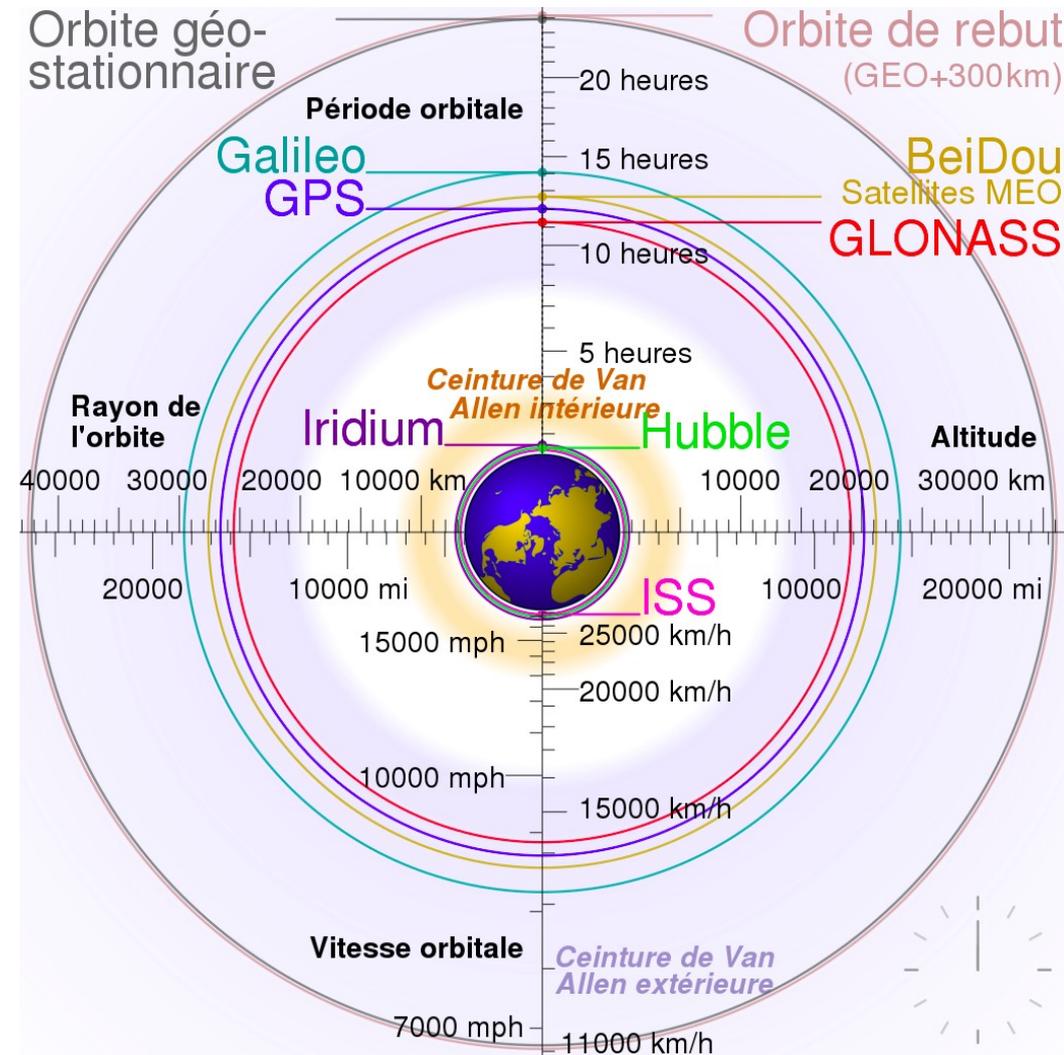


# Les orbites autour de la Terre

- orbite « géosynchrone » & orbite « géostationnaire »



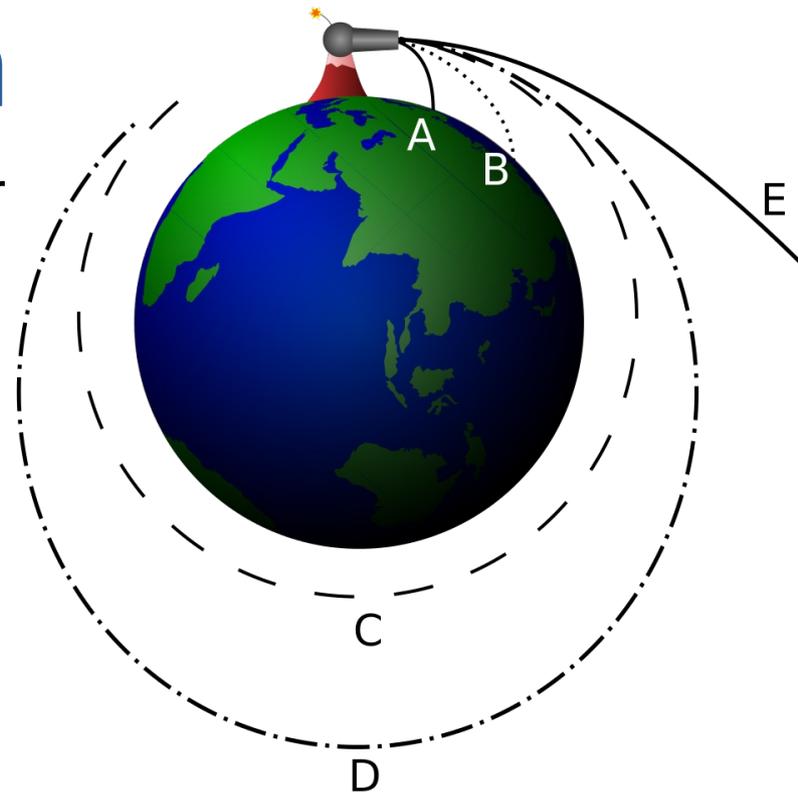
Traces au sol de deux orbites terrestres **géosynchrones** d'**excentricité nulle**, et ayant une **inclinaison** de  $30^\circ$  ou de  $63,4^\circ$ . Si l'inclinaison est de  $0^\circ$  la trace au sol est un point.



Plus on s'éloigne, plus la vitesse diminue (mais plus l'énergie mécanique augmente)

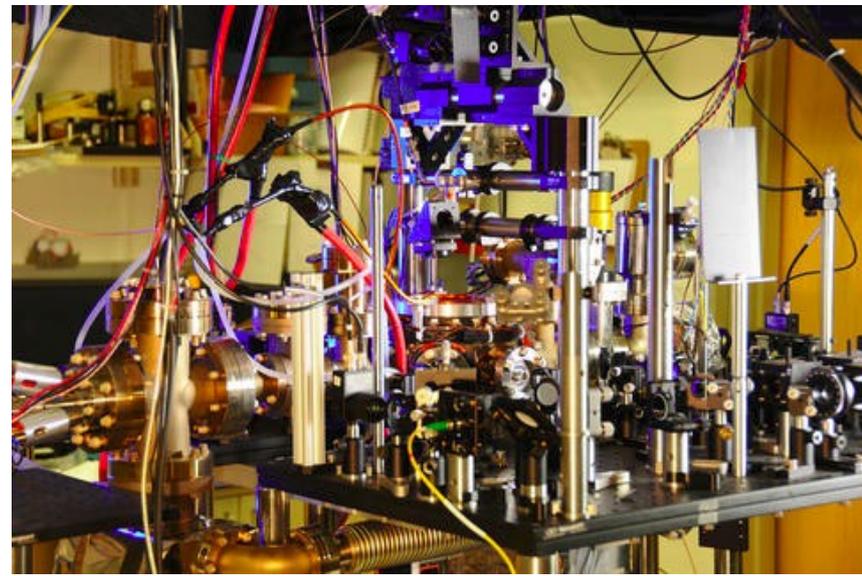
# La vitesse de libération

- À quelle **hauteur** dois-je lancer un objet pour qu'il échappe à la gravitation terrestre ?
- Ce n'est pas une question de hauteur, mais une question de **vitesse**
  - (Frottements de l'air négligés...)
  - A,B : vitesse faible, l'objet retombe
  - C, D :  $v >$  **vitesse de satellisation** minimale autour de la Terre, soit 8 km/s (28 000 km/h).
  - E :  $v >$  **vitesse de libération**, soit 11 km/s (40 000 km/h)
- Calcul : on écrit  $E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{r} > 0 \Leftrightarrow v > v_L = \sqrt{\frac{2GM}{R_T}}$
- Se calcule également pour les **trous noirs**



# Le temps newtonien

- Temps **absolu** : est le même en tout point de l'Univers et indifférent au mouvement
- Introduit par Isaac Newton en 1687 dans ses *Principia Mathematica*
- En 1905, Albert Einstein démontre que le temps physique n'est **pas newtonien**
  - → relativité restreinte & dilatation des durées



horloge atomique à l'ytterbium ( $^{70}\text{Yb}$ ), d'une précision de  $10^{-18}$



#1 Graff Diamond Hallucination  
55 000 000 \$

# Notion de référentiel



e-sushi.fr

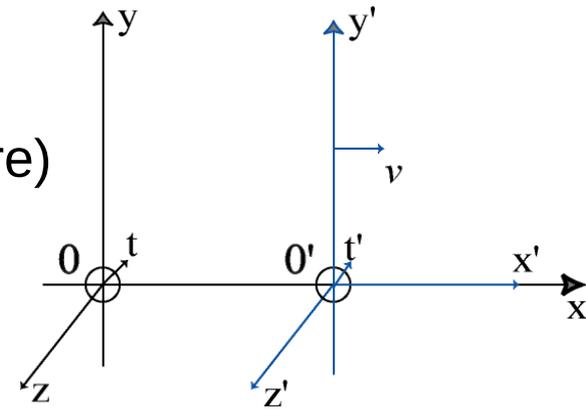
- Ensemble de points fixes entre eux par rapport auquel on repère une **position** ou un **mouvement**
- Exemples
  - **Terrestre** : lié à la surface de la Terre
  - **Géocentrique** : origine = centre de la Terre, les trois axes pointent vers des étoiles lointaines qui apparaissent fixes
  - **Héliocentrique** : origine = centre du Soleil
- **Nécessaire** pour qualifier une position ou un mouvement
  - Exemple : je marche à 5 km/h dans un TGV qui roule à 300 km/h : quelle est ma vitesse ?
- Notion de **vitesse** liée à la présence d'une **horloge**
  - (vitesse = distance/temps)  $v = \frac{dx}{dt}$



vercingetorix.mon-ent-occitanie.fr/  
lectureFichiergw.do?  
ID\_FICHER=1511990778948

# La transformation de Galilée

- Transformations des **coordonnées spatiales et temporelle** entre deux **référentiels galiléens**  
(en **translation à vitesse constante** l'un par rapport à l'autre)
- Une telle transformation
  - Laisse **invariants**
    - les équations de la mécanique newtonienne
    - Le temps newtonien (**absolu**)
  - Ne laisse pas **invariantes**
    - La vitesse de la lumière
    - Les équations de Maxwell
- **Nécessité d'un autre cadre théorique pour les « grandes » vitesses (quand  $v$  n'est plus petite /  $c$ ) = relativité restreinte**



Les vitesses s'additionnent

$$x' = x - v \cdot t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Les temps sont identiques

$$t' = t$$