

# Évolution des idées sur l'Univers

*III – Les incohérences du système géocentrique (suite)*

*IV – Pourquoi les planètes se meuvent-elles ?*

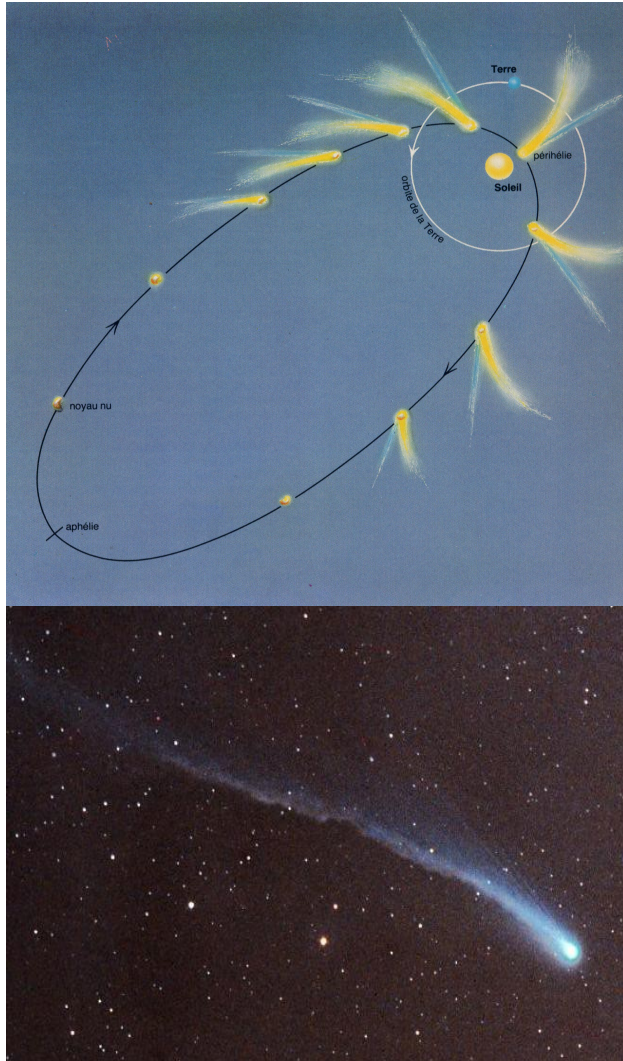
**Gilles Theureau**

LPC2E/CNRS-Orléans

Et

Observatoire de Paris

# Le ciel n'est pas immuable : T. Brahe et la comète de 1577



Comètes : phénomènes  
atmosphériques (Aristote), donc  
sphère sub-lunaire

Mesures Danemark et Prague  
1577 : parallaxe  $< 1'$

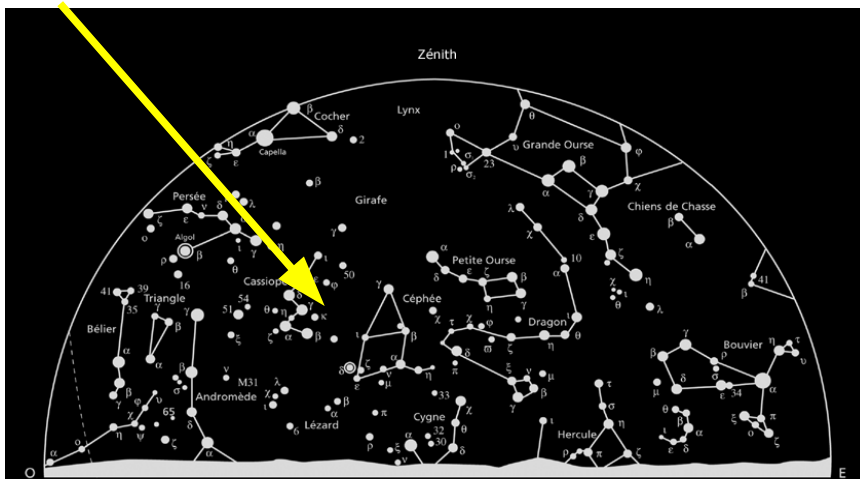
→ distance au moins (6-7)Y  
distance Terre-Lune

Conclusion : la comète fait partie du  
monde supra-lunaire



Contradiction à l'idée d'un  
monde supra lunaire sans  
génération ou corruption !

# Le ciel n'est pas immuable : T. Brahe et la supernova de 1572

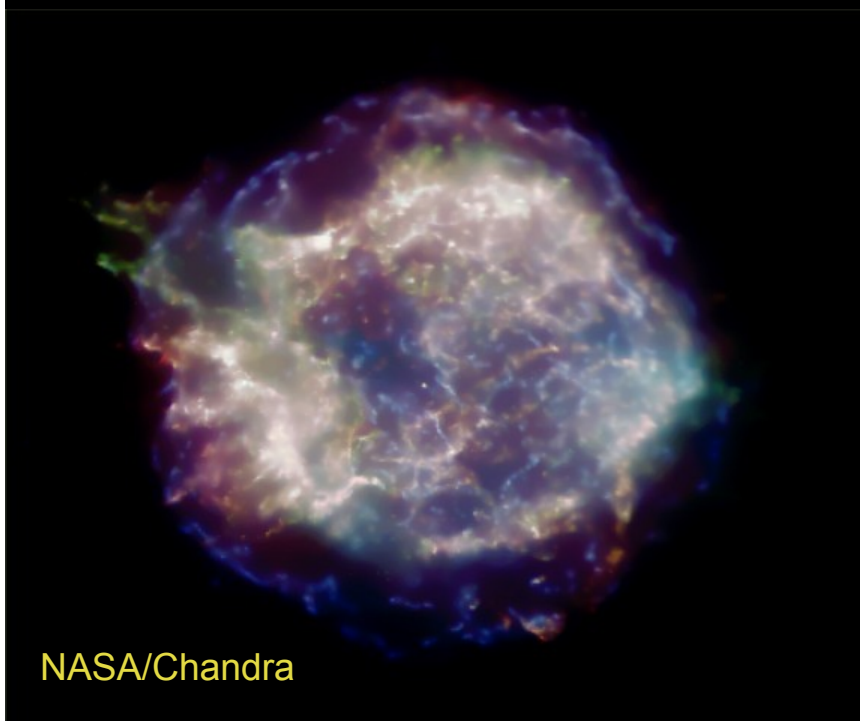


Apparition brusque d'une « étoile nouvelle » brillante dans la constellation Cassiopée: « un miracle qui n'a jamais été vu avant, depuis le début du monde »

Deviens de plus en plus brillante (→ Vénus) pendant quelques semaines, change de couleur, s'affaiblit et disparaît en mars 1574

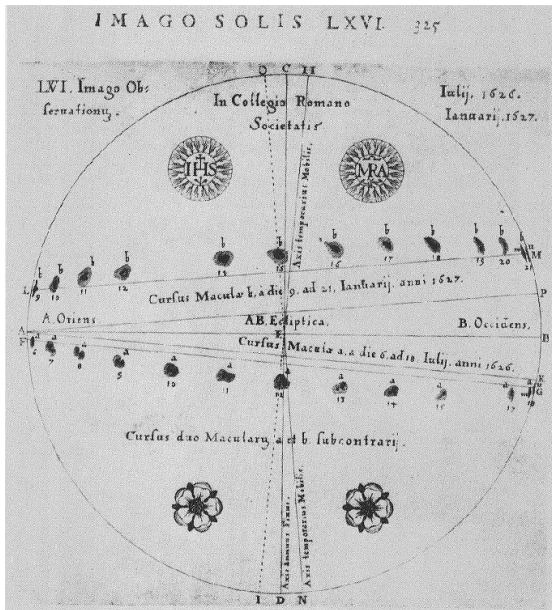
Mesure de la parallaxe (plusieurs mois d'intervalle) : aucun mouvement par rapport aux étoiles → distance stellaire

L' « étoile nouvelle » fait partie du monde supra-lunaire, bien que phénomène transitoire !



NASA/Chandra

# Le ciel n'est pas immuable : les taches solaires (1611)

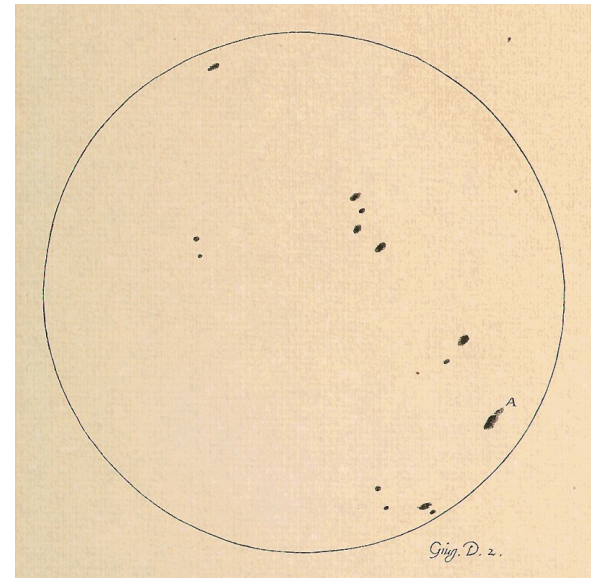


Scheiner, 21 mars 1611

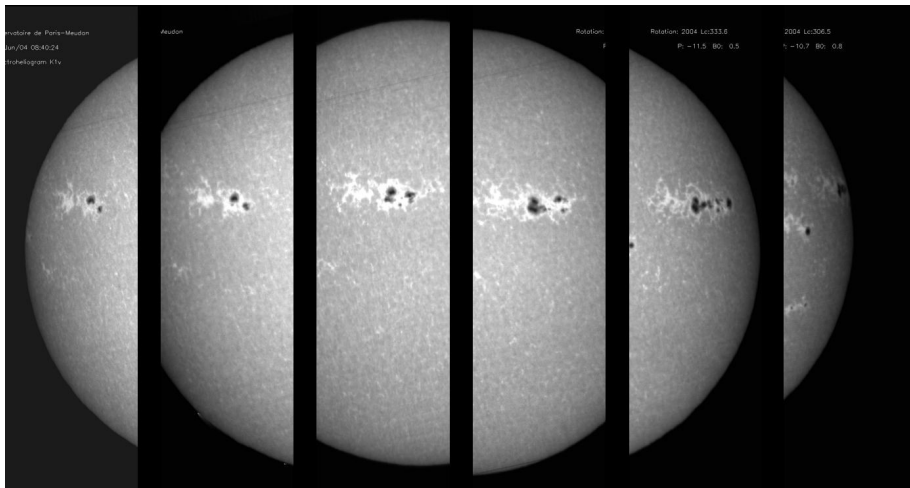
Deux interprétations :

Corps en orbite autour du Soleil (C. Scheiner, Jésuites)

Galilée (*Dialogo*): phénomènes à la surface du Soleil



Galilée, 2 juin 1611



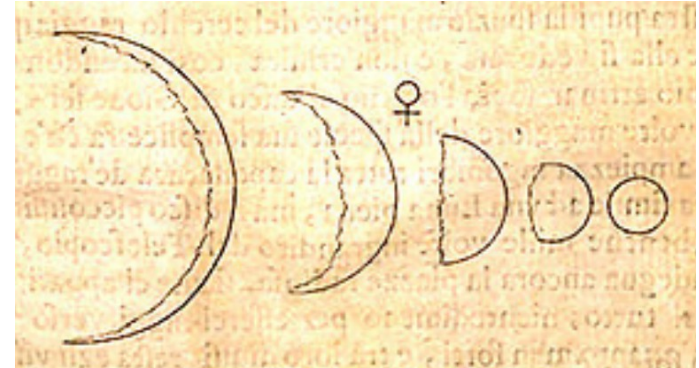


# Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



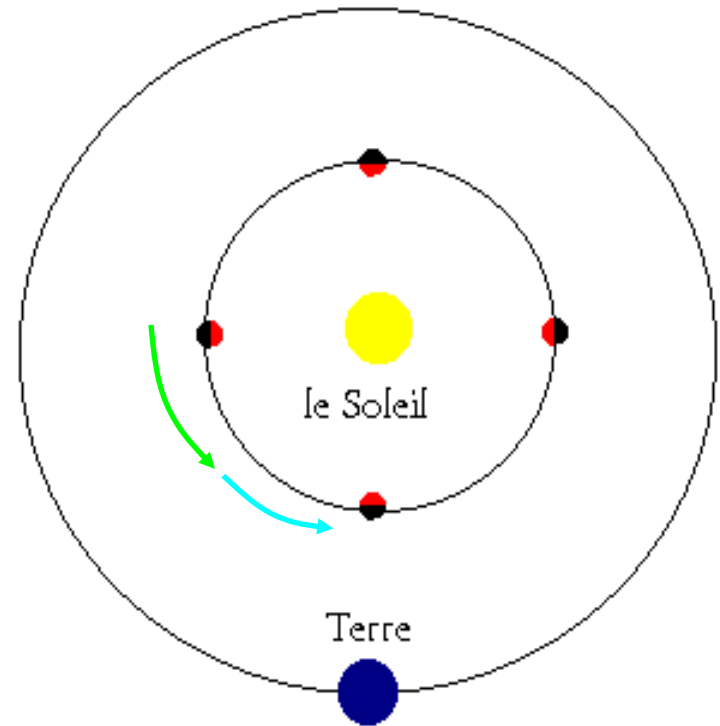
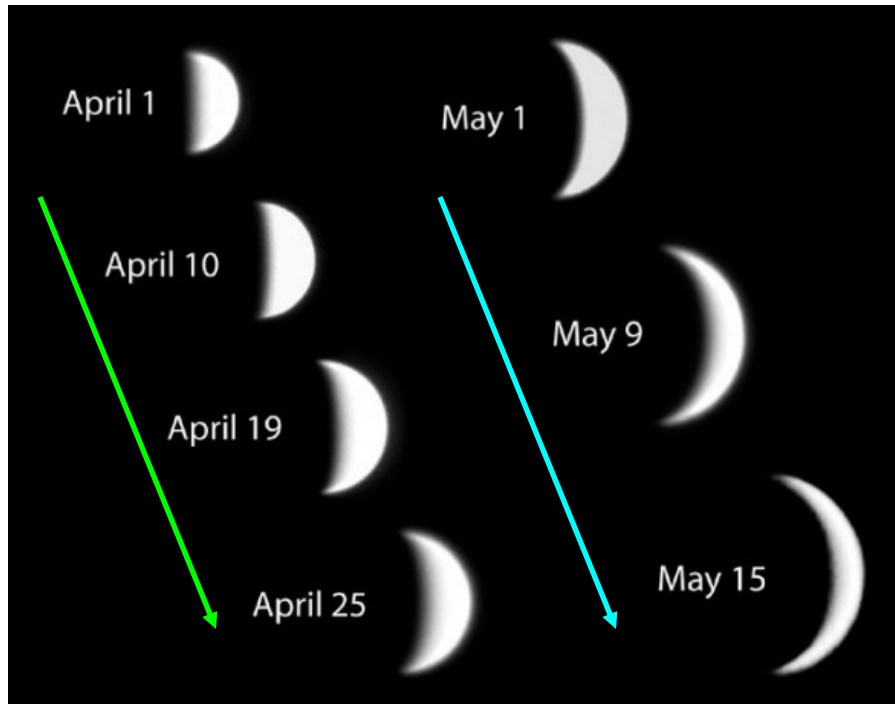
Les observations (Galilée, lettre à B. Castelli, 30/12/1610)

M. Clavelin, *Galilée Copernicien*, Albin Michel 2004



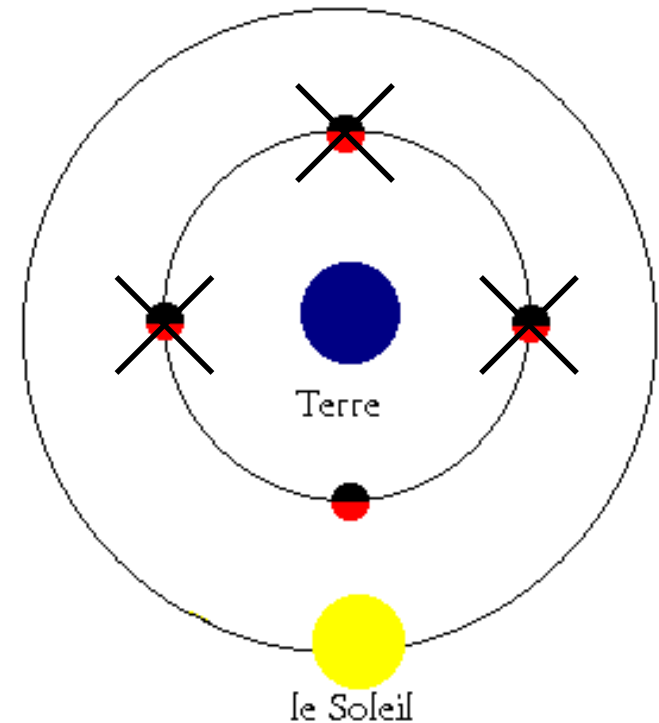
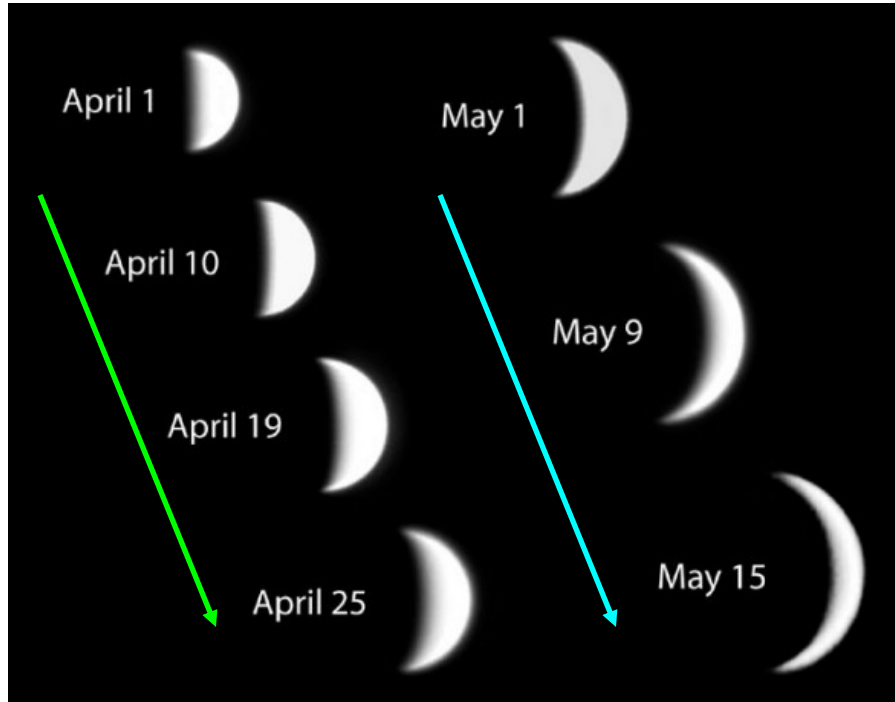
- 1<sup>ère</sup> apparition Vénus le soir : ronde & petite
- Approche depuis quadrature (ici vers 01/04) : la moitié de Vénus tournée vers Soleil est éclairée, sa taille apparente augmente
- Puis (10 avril-15 mai): corne de plus en plus prononcée, taille augmente

# Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



Interprétation héliocentrique actuelle : Vénus à l'intérieur de l'orbite de la Terre, les positions relatives Terre-Vénus-Soleil permettent de représenter toutes les observations.

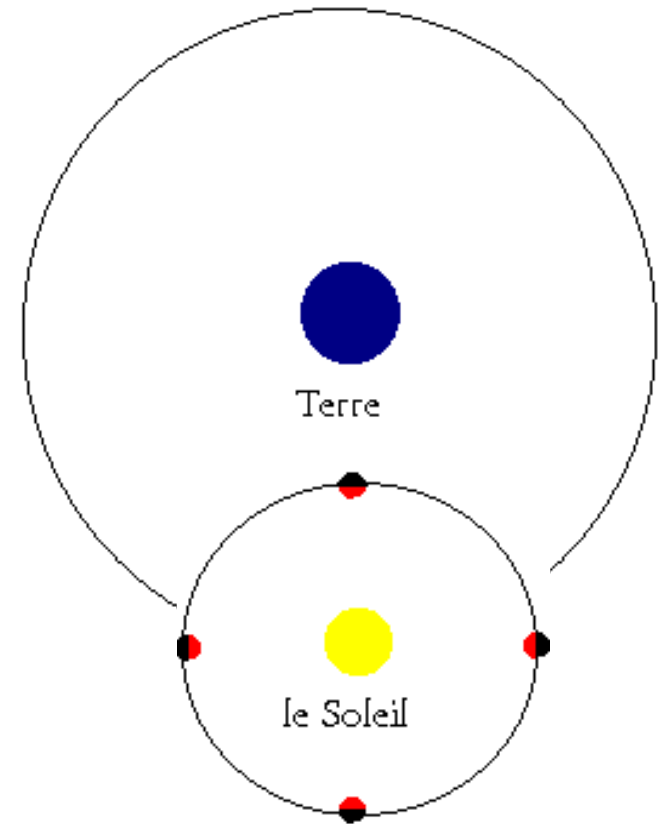
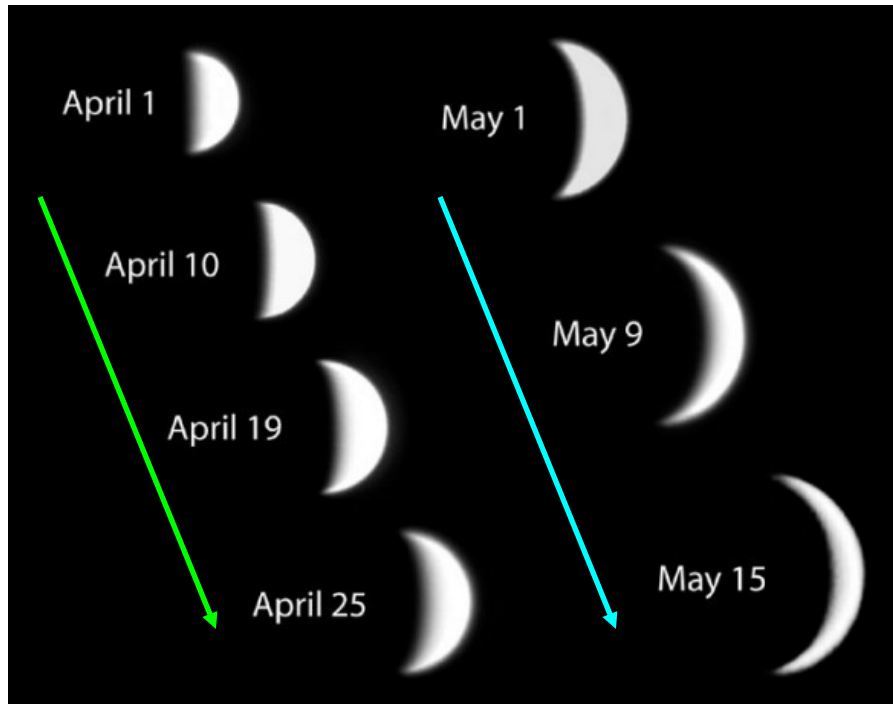
# Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



Interprétation géocentrique impossible : Vénus n'est jamais observée loin du Soleil; configurations géocentriques Terre-Vénus-Soleil ne permettent pas de voir différents éclairages de la planète !  
(opposition et conjonction sont inversées en termes de phases)

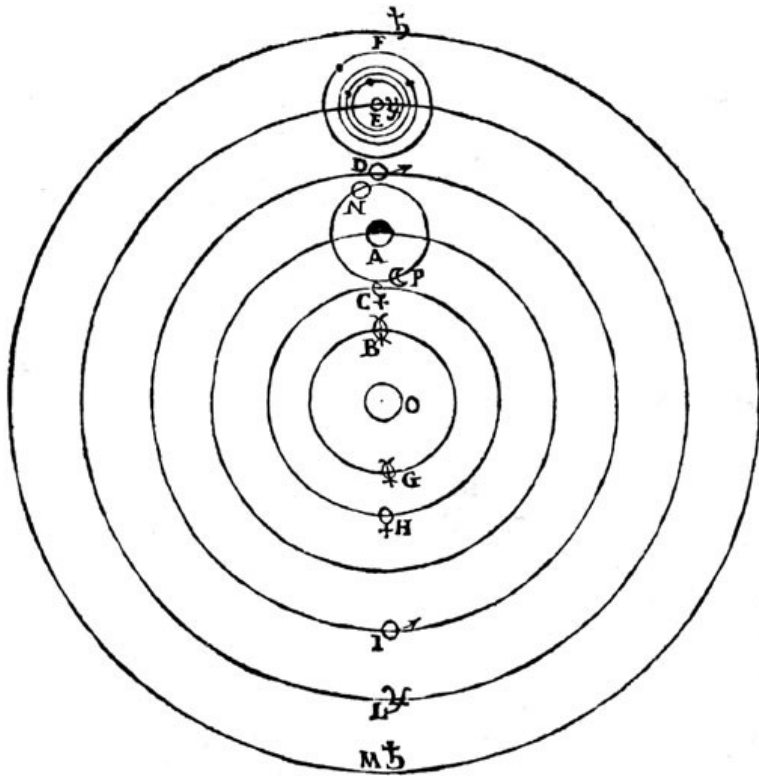


# Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



Une preuve du modèle héliocentrique ? Non, car un modèle géocentrique à la Tycho Brahe représente aussi les observations. Mais pas le modèle de Ptolémée !

# Le système solaire selon Galilée



Soleil au centre

Terre + Lune

Jupiter et ses satellites

Mais : les orbites  
circulaires ne permettent  
pas de rendre compte des  
observations (Kepler) !

# IV Pourquoi les planètes se meuvent-elles ?

## Développement des idées sur la gravitation

Pourquoi les planètes se meuvent-elles ? Le point de vue de la philosophie ancienne (antiquité, moyen-âge)

Abandon des orbites circulaires: les lois de Kepler

L'évolution de la dynamique - nouvelles idées de la Renaissance:

- pourquoi les planètes tournent-elles autour du Soleil ?
- la nature de la pesanteur

La gravitation universelle de Newton

- succès
- problèmes - la réponse d'Einstein

Avons-nous compris la gravitation ?

# **Pourquoi les planètes se meuvent-elles ?**

Rappel des idées de l'Antiquité

# Astronomie et physique de l'antiquité : deux mondes bien séparés

- Monde sub-lunaire :
  - 4 éléments terre, eau, air, feu
  - Génération & corruption
  - Mouvement « naturel » rectiligne vers le haut/bas à partir du centre
  - Physique (mécanique) : chute des corps, jets
  
- Monde supra-lunaire :
  - 5<sup>ème</sup> espèce de matière
  - Immuabilité
  - Mouvement « naturel » circulaire (éternel, objets sans pesanteur, car aucun mouvement « vers le centre »)
  - Astronomie : description des mouvements des planètes

# Astronomie et physique de l'antiquité : deux mondes bien séparés

**La physique « démontre » que la Terre se situe au centre du monde :**

- **Pesanteur** : on pense que les corps pesants (terre, eau; monde sub-lunaire) chutent vers le centre du monde, avec une **vitesse** dont on pense qu'elle **croît avec la masse du corps**.  
  
→ L'élément terre étant le plus lourd, il devrait donc chuter plus vite que les autres - **la Terre** devrait chuter sous nos pieds, si elle n'était pas **fixe au centre du monde !**
- **Les orbites circulaires** des astres n'ont pas de composante de leur mouvement dirigée vers le centre du monde - ils ne sont **pas soumis à la pesanteur** (principe violé après Aristote par l'introduction des épicycles et orbites excentriques pour « sauver les phénomènes »!).

# Evolution des idées jusqu'à la Renaissance

- **Philopon, Averroès, Maïmonide, Buridan, Oresme ...** (moyen âge) : critique de la mécanique d'Aristote, des hypothèses du modèle géocentrique (excentriques, épicycles, immobilité de la Terre).
- **Problèmes de l'abandon du modèle géocentrique :**
  - comment comprendre la chute des corps s'ils ne chutent pas vers le centre de l'univers ?
  - Comment remplacer l'idée que les astres ne sont pas soumis à la chute des corps parce que leurs orbites n'impliquent pas de mouvement « vers le centre » ?

→ L'abandon de l'image géocentrique implique la nécessité de réconcilier astronomie et physique.

# Evolution des idées jusqu'à la Renaissance

- **Copernic (1473-1543)**: système héliocentrique = nouvelle description mathématique; pesanteur = propriété matérielle des corps (au lieu d'être une conséquence de leurs orbites).  
Un modèle plus esthétique, une explication naturelle des rétrogradations, mais centre = centre de l'orbite terrestre ( $\neq$  soleil) et requiert la combinaison de 34 mouvements circulaires et uniformes !
- **Kepler (1571-1630)**: analyse d'observations (Brahe); trois lois empiriques sur les mouvements des planètes; tentatives de dynamique.
- **Galilée (1564-1642)**: expériences sur la chute des corps; description mathématique de la dynamique des corps terrestres; formulation de la loi d'inertie.



# Evolution des idées jusqu'à la Renaissance

## L'héliocentrisme et l'Église :

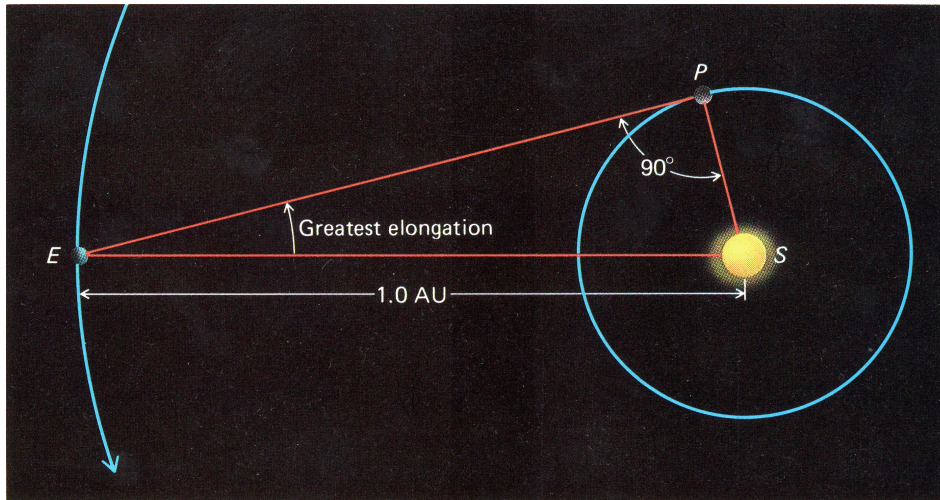
l'Homme perd sa position au centre de l'univers

→ Dieu a nécessairement peuplé les autres planètes

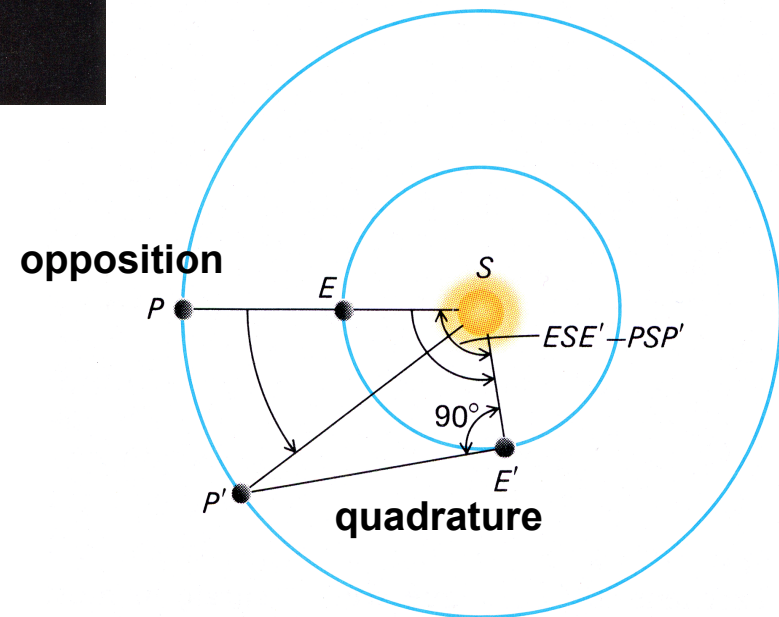
→ ces êtres ne descendent pas d'Adam et Ève et n'ont pas connu Jésus Christ

→ pas de possibilité d'aller au paradis (au Ciel) ! → problème du Salut de l'âme

# Distance des planètes selon Copernic



détermination de la distance d'une planète **inférieure** en fonction de la distance Terre-Soleil

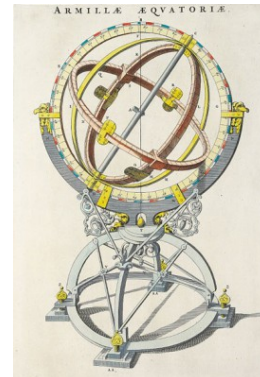


détermination de la distance d'une planète **supérieure** en fonction de la distance Terre-Soleil

# Tycho Brahe (1546-1601) : observations les plus précises du mouvement des planètes



- Apogée des instruments pré-télescopiques (grand quadrant, sextant, monture équatoriale, ...)
- Précision / taille : parallaxe stellaire  $< 1''$  (pour comparaison, diamètre Lune :  $30''$ )
- Plusieurs observateurs, besoin de personnel pour l'exploitation des données

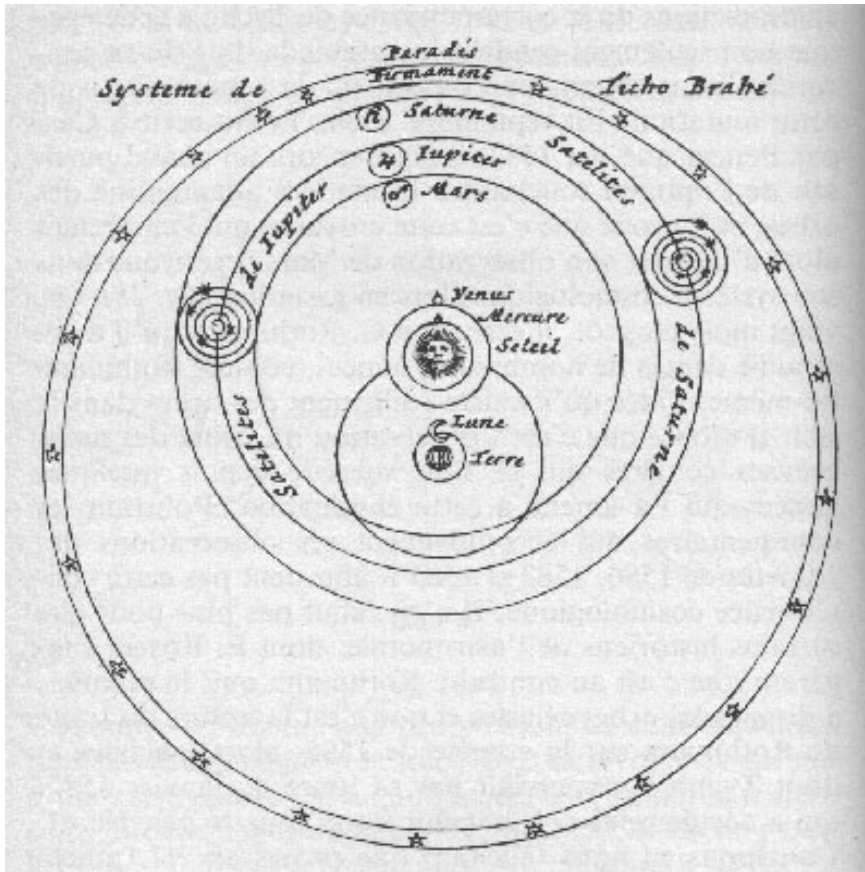


# Tycho Brahe (1546-1601) : observations les plus précises du mouvement des planètes

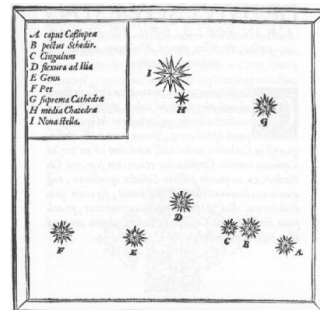
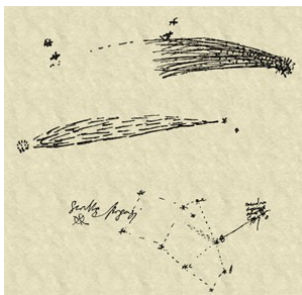
## Un programme de mesures systématiques

- 1) constituer un système de référence de positions célestes :  
30 étoiles aux mesures très précises et répétées
- 2) établir la position de 1000 étoiles, avec une précision  
10 fois supérieure à celle d'Hipparque et Ptolémée
- 3) mesurer continuellement les positions des 5 planètes,  
de la Lune et du Soleil pour obtenir leur trajectoire complète

# Tycho Brahe (1546-1601) : observations les plus précises du mouvement des planètes



- **Catalogue** précis de 1000 étoiles + positions régulières de planètes
- **Parallaxes**
  - sphère des fixes  $> 8\,000\,000 R_{\text{Terre}}$
  - comètes au-delà de la Lune et traversent les orbites des planètes
- **Expériences chute des corps & balistique**
  - Terre immobile
- **Modèle cosmologique hybride**
  - soutien de l'Église
- **Collaboration avec Kepler à Prague**
  - Kepler interprète les observations de l'orbite de Mars



# Les orbites des planètes

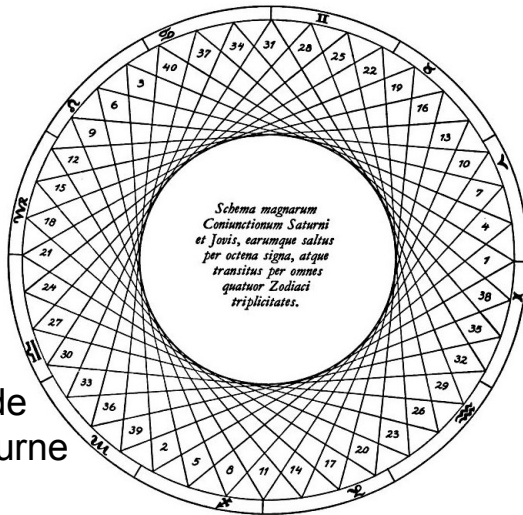
L'abandon des orbites circulaires :  
Johannes Kepler

# La démarche de Kepler

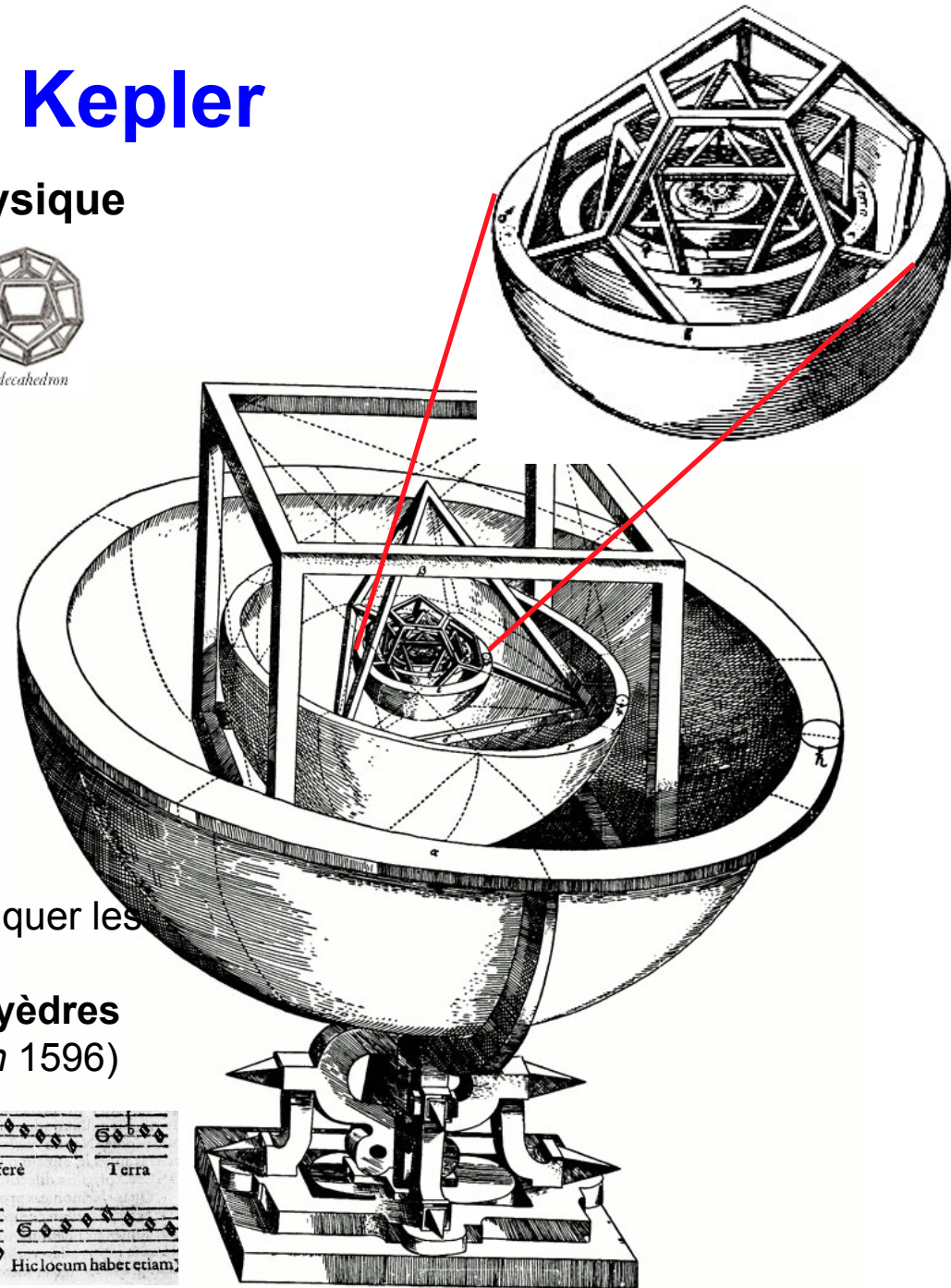
- **Pourquoi 6 planètes ?**
- **Y a-t-il une relation entre distances au Soleil et périodes de révolution ?**
- **Quelles sont les causes du mouvement ?**

# La démarche de Kepler

- Entre Platon et l'astronomie physique



Dessin des  
conjonctions  
successives de  
Jupiter et Saturne



- Début de son activité : tentative d'expliquer les distances des planètes (au Soleil) par l'inscription des **orbites dans des polyèdres réguliers** (*Mysterium Cosmographicum* 1596)

- Des variations de vitesse angulaire selon les notes de la gamme harmonique



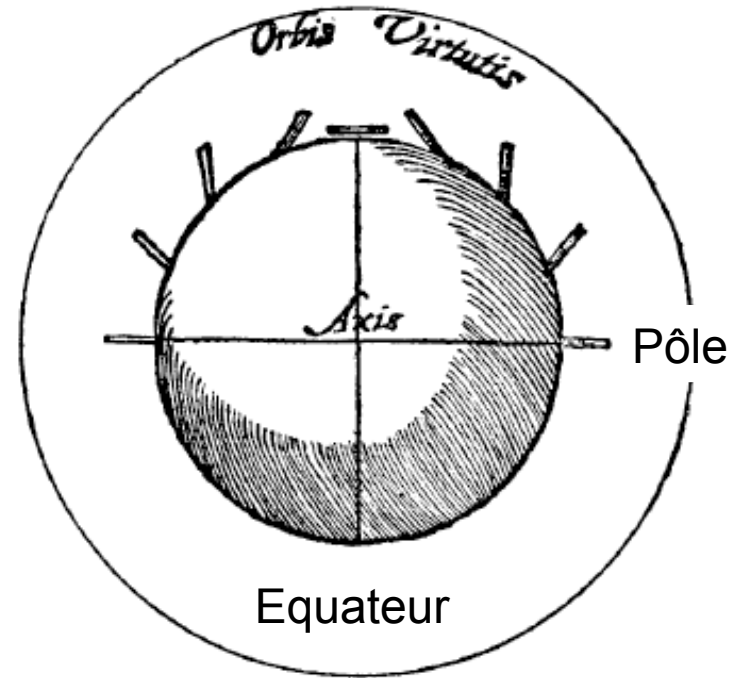


# La démarche de Kepler

- « *Mon objectif est de montrer que la machine céleste n'est pas une sorte d'être divin, mais quasiment un mécanisme d'horloge, dans la mesure où presque toute la multitude de mouvements est engendrée par une seule force physique, de nature magnétique, comme un simple poids engendre tous les mouvements d'une horloge.* » (**Kepler, Astronomia Nova, 1609**)
- Influencé par les **travaux de William Gilbert** sur le magnétisme de la Terre (1600)

# William Gilbert (1544-1603) : le magnétisme de la Terre

- Médecin anglais (Elisabeth 1<sup>ère</sup>)
- Etude aimants, comportement lors du chauffage, magnétisme induit, électricité ... (*De Magnete*, 1600).
- Expériences avec une Terre magnétisée à l'échelle réduite : l'aiguille pointe vers le pôle magnétique, avec une inclinaison par rapport à l'horizontale qui dépend de la latitude.
- Il conclut que l'aiguille de la boussole pointe vers le nord parce que la Terre est un aimant (il ajoute : elle possède une âme).



**Figure 4.** Inclination of a compass needle near the surface of the terrella depends on its position: vertical at the poles (on the magnetic axis), horizontal on the equator. The "Orb of Virtue" is Gilbert's term for "sphere of influence." (*De Magnete* [Gilbert, 1600, book V, chapter 2]).

D.P. Stern 2002, *Reviews of Geophysics* 40, 3

# Kepler, *Astronomia Nova* (1609): abandon des orbites circulaires

- Tentatives, décrites en détail, de **réconcilier les mesures de Mars (Brahe) avec les orbites circulaires** parcourues à vitesse constante selon Ptolémée, Brahe et Copernic.
- **Abandon du postulat de la vitesse constante** : Kepler considère comme plausible le fait que la planète se *meut plus vite* quand elle est *plus près* du Soleil (idée sous-jacente : vitesse liée à la force, qui devrait être plus grande près du Soleil - idée aristotélicienne !)

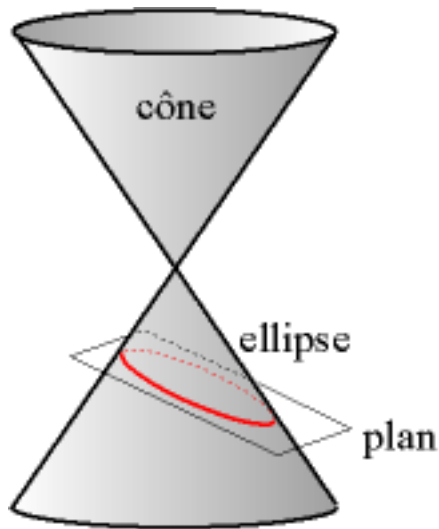
« *Tendez l'oreille, vous autres physiciens ! Car on s'apprête à entreprendre une incursion dans votre domaine.* »

→ ***physique du ciel*** :

tentatives d'interprétation par des « forces magnétiques ».

- **Kepler écarte finalement les orbites circulaires.**

# Les lois de Kepler

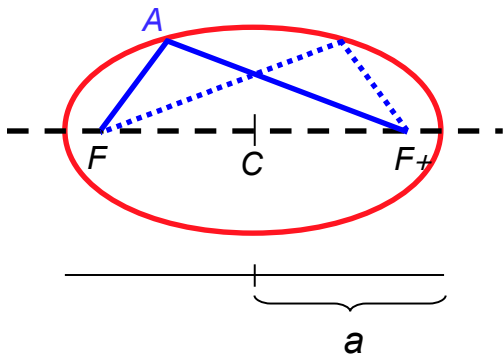


1) Les orbites des planètes sont des ellipses.  
Le Soleil est immobile dans l'un des foyers.

- Ellipse : section d'un cône
- $F, F'$  : foyers
- $a$  : demi-grand axe
- Pour chaque point A sur l'ellipse :

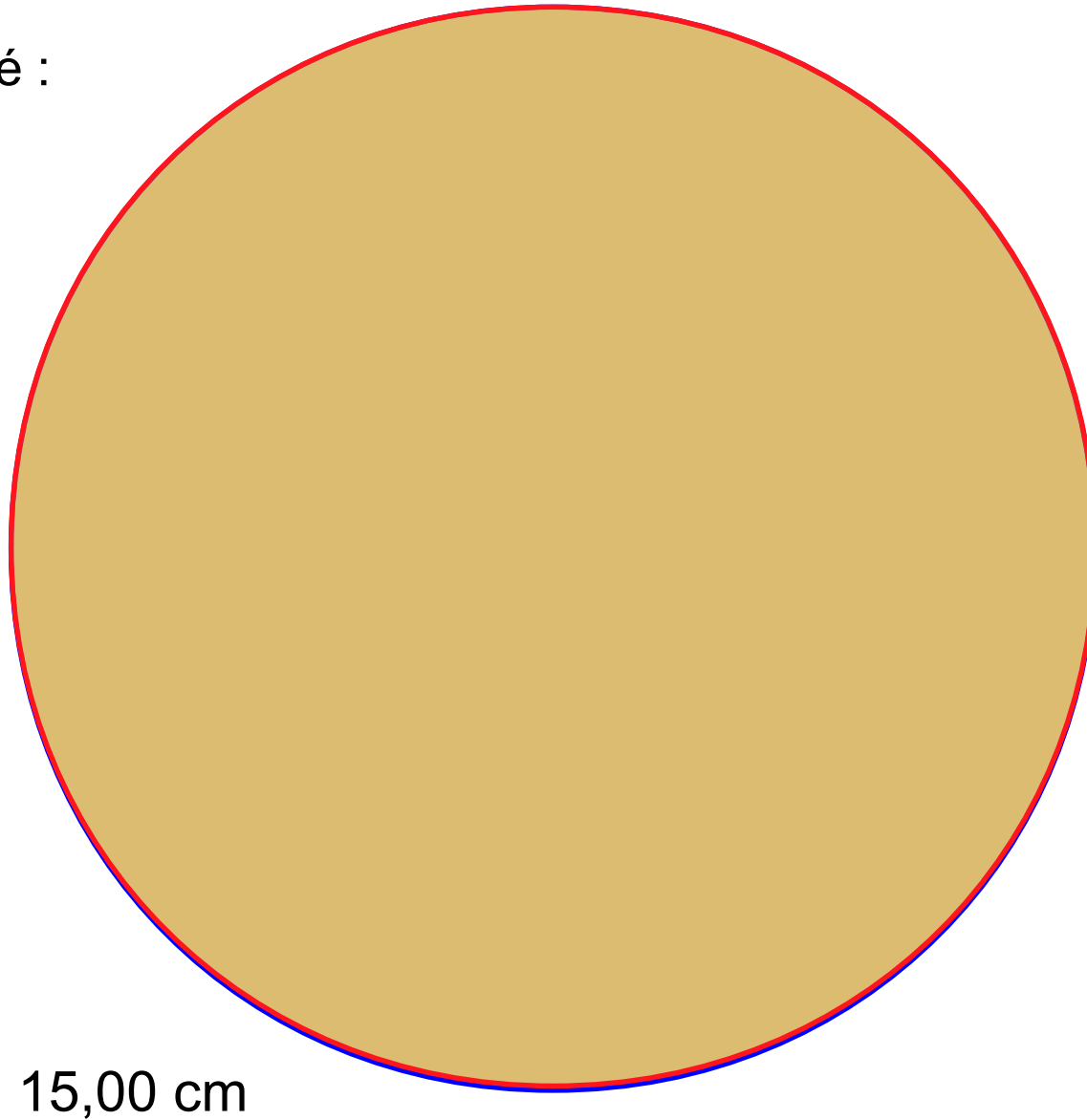
$$AF + AF' = 2a$$

- Excentricité :  $\varepsilon = CF/a$
- Cercle :  $F = F' = C, a = \text{rayon}, \varepsilon = 0$

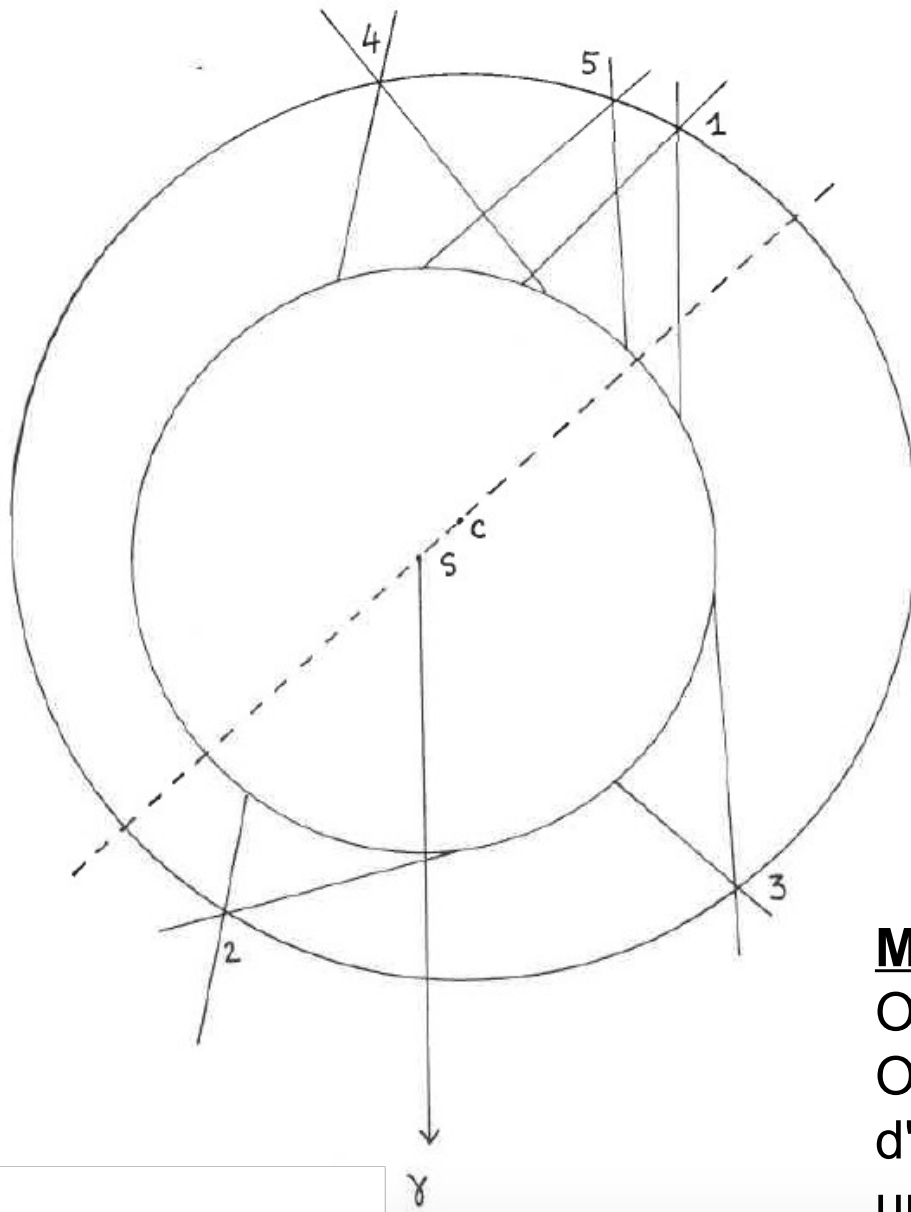


# L'orbite de Mars : une ellipse

Excentricité :  
 $\varepsilon = 0,0934$



# L'orbite de Mars : une ellipse



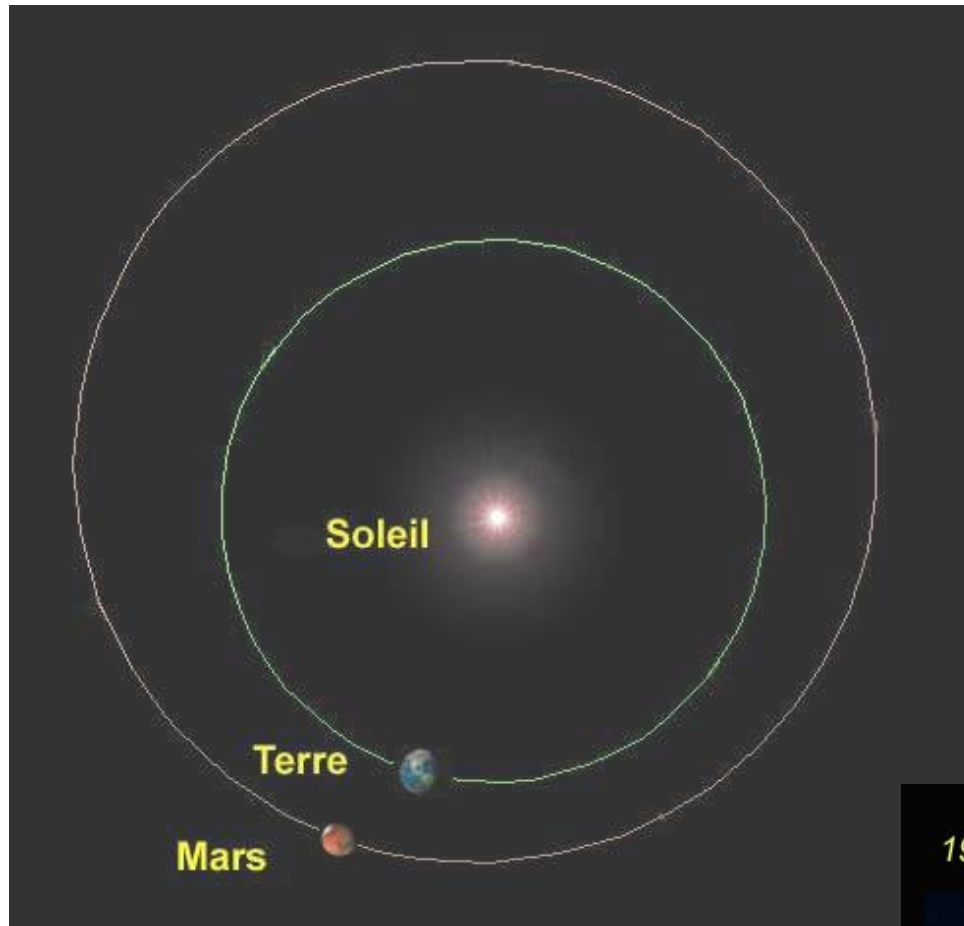
Période synodique 780 j

Période sidérale 687 j

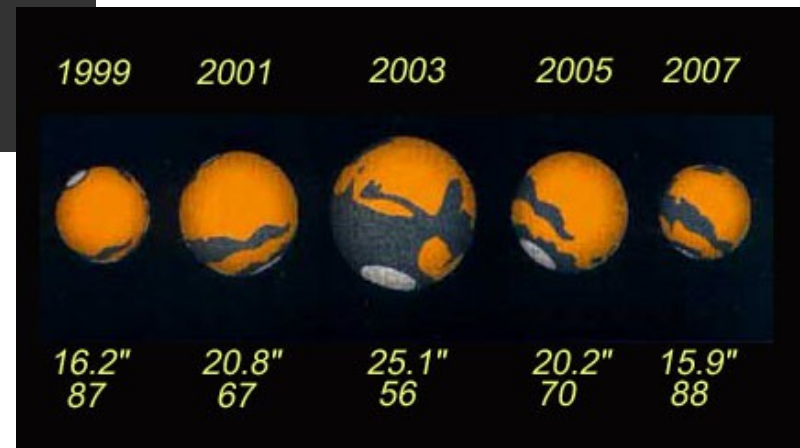
## Méthode :

On suppose l'orbite terrestre circulaire.  
On repère des couples de dates  
d'observation séparées par  
une période sidérale de la planète

# L'orbite de Mars : une ellipse



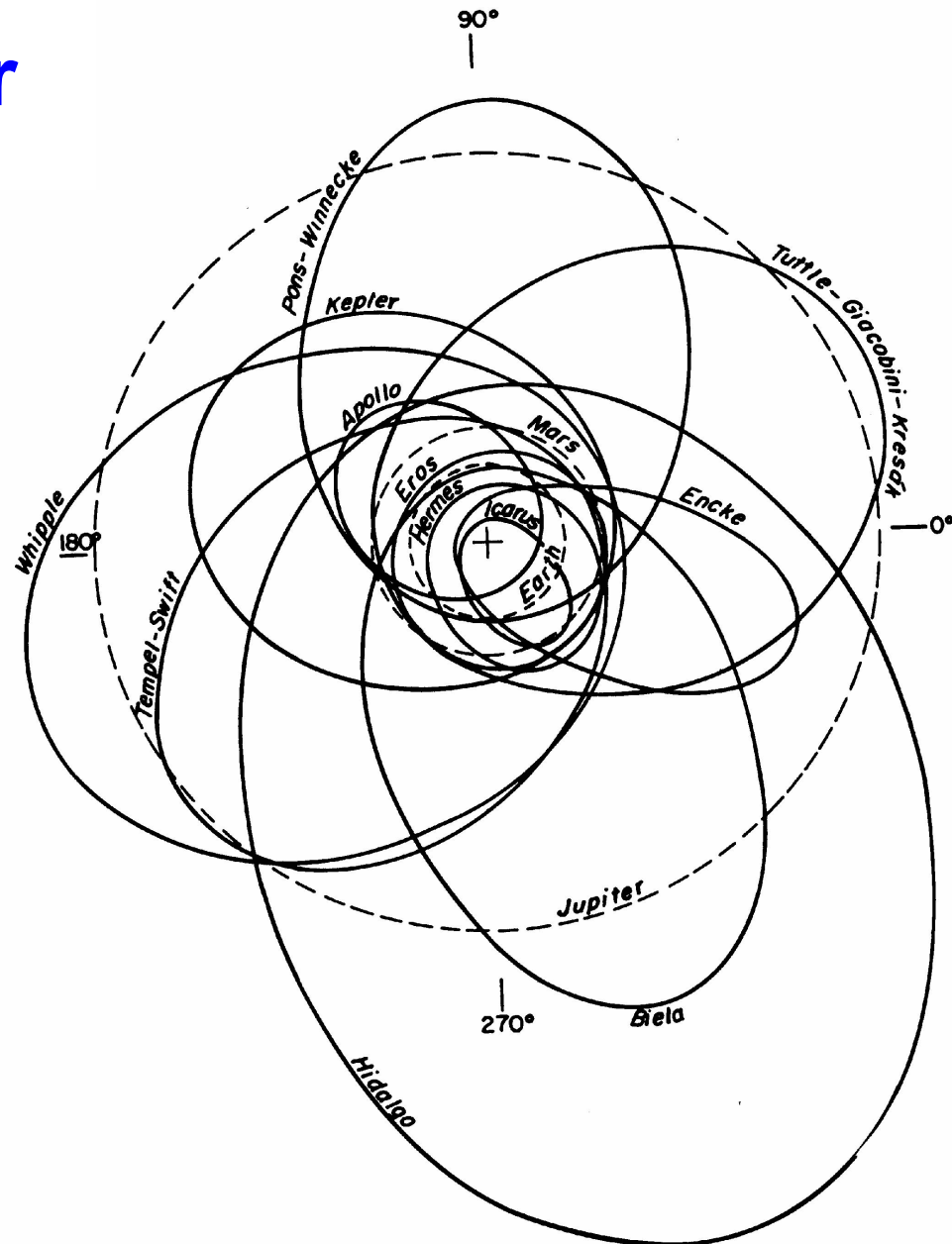
Variation de taille apparente  
Lors de différentes oppositions



Crédit <http://www.astrosurf.com>

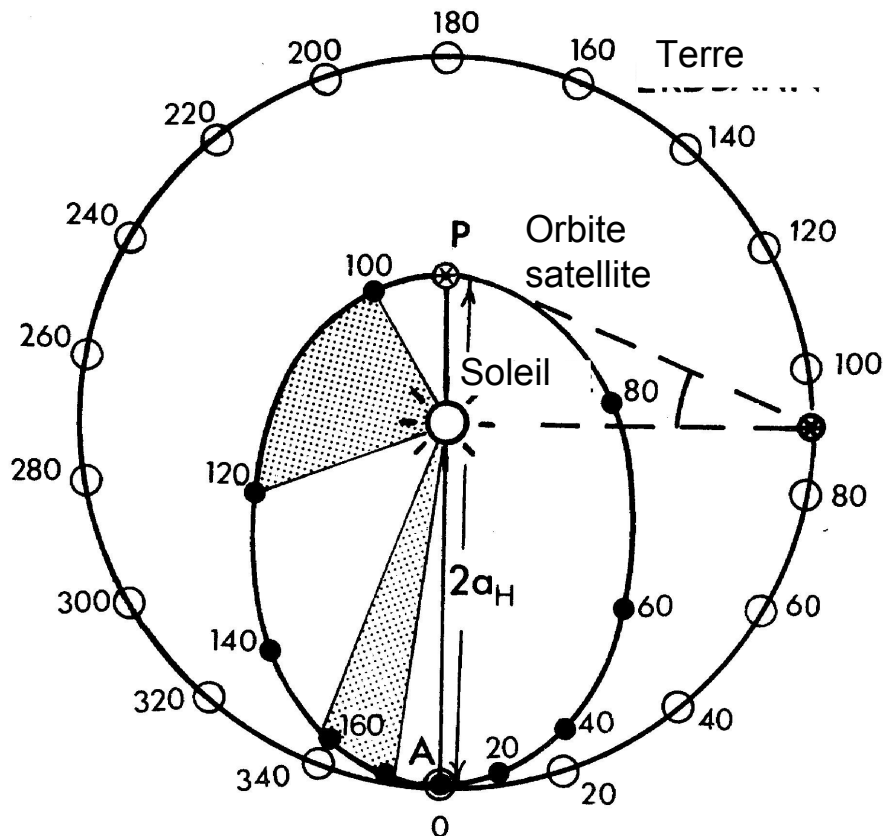
# Les lois de Kepler

- **Planètes :**  
ellipses de faible excentricité
- **Astéroïdes, comètes :**  
fortes excentricités
- **Conséquence de la 1<sup>ère</sup> loi :**  
la position excentré du corps principal (Soleil) acquiert une signification mathématique et physique, par rapport à la signification purement ad-hoc des cercles excentriques et épicycles de Ptolémée et Copernic.





# Les lois de Kepler



## 2) La droite Soleil-planète balaie dans des temps égaux des surfaces égales

⇒ planète plus rapide au périhélie P, plus lente à l'aphélie A - solution du problème de l'inégalité des saisons.

## 3) (Période orbitale)<sup>2</sup>

$$\propto (\text{demi-grand axe})^3$$

Illustration : Orbite d'un satellite artificiel

Source: R.H. Giese, *Einführung in die Astronomie*

# Les lois de Kepler

## Illustration de la 3<sup>ème</sup> loi : planètes du système solaire

	$P$ [an]	$a$ [UA]	$P^2/a^3$
Mercure	0,241	0,387	1,002
Vénus	0,615	0,723	1,001
Terre	1,000	1,000	1,000
Mars	1,881	1,524	1,000
Jupiter	11,862	5,203	0,999
Saturne	29,457	9,555	0,995

# L'évolution de la dynamique

Une nouvelle question : pourquoi les planètes tournent-elles autour du Soleil ?

Rapprochements avec la physique.

# Nicolas Copernic (1473-1543): notion de gravité

- **Abandon des orbites « naturelles » des astres autour de la Terre au centre de l'Univers ⇒ nouvelles questions :**
  - Pourquoi les corps chutent-ils vers la Terre ?
  - Pourquoi les astres ont-ils les orbites qu'ils ont (stabilité sans chute; mouvement sous l'influence de quelle force) ?
- *« Il me semble que la pesanteur n'est qu'une tendance naturelle que le créateur a donnée à des parties des corps afin d'assembler la Terre sous la forme d'une sphère et pour ainsi contribuer à leur unité et entité. Nous sommes autorisés à croire que cette propriété appartient aussi au soleil, à la lune et aux planètes de façon à ce qu'elles gardent leur forme sphérique ... »*
- A noter : **des éléments aristotéliens** (postulat de sphéricité, croyance que la nature est faite avec un but - ici celui de créer des sphères), **des éléments annonciateurs de Newton** (la pesanteur comme propriété de la matière) !

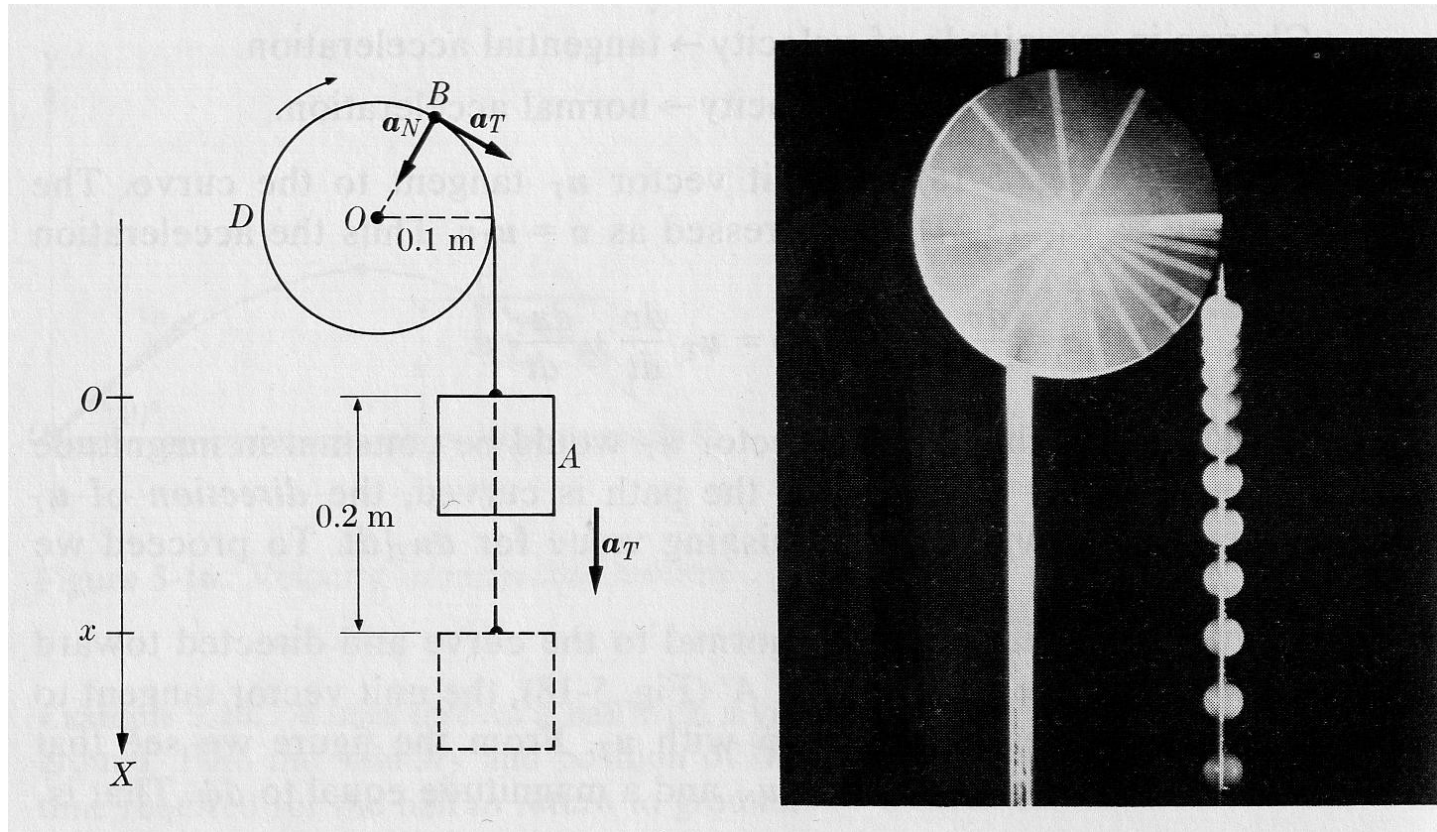
# Johannes Kepler (1571-1630): tentatives de dynamique

## Les orbites des planètes déterminées par une force émanant du Soleil

- **premiers écrits : notion *anima* → planètes mues autour du Soleil** comme un bateau à pagaie dans l'eau (il y a encore la notion aristotélicienne qu'un mouvement n'existe pas sans force !).
- ***approche tardive : une seule cause* → planètes = aimants** (Gilbert 1600: *De magnete*).

Idée Kepler : la rotation du Soleil entraîne un mouvement orbital circulaire, la répulsion/attraction planète-Soleil déforme le cercle en ellipse (toujours la conception aristotélicienne de la force nécessaire pour maintenir le mouvement ! ).

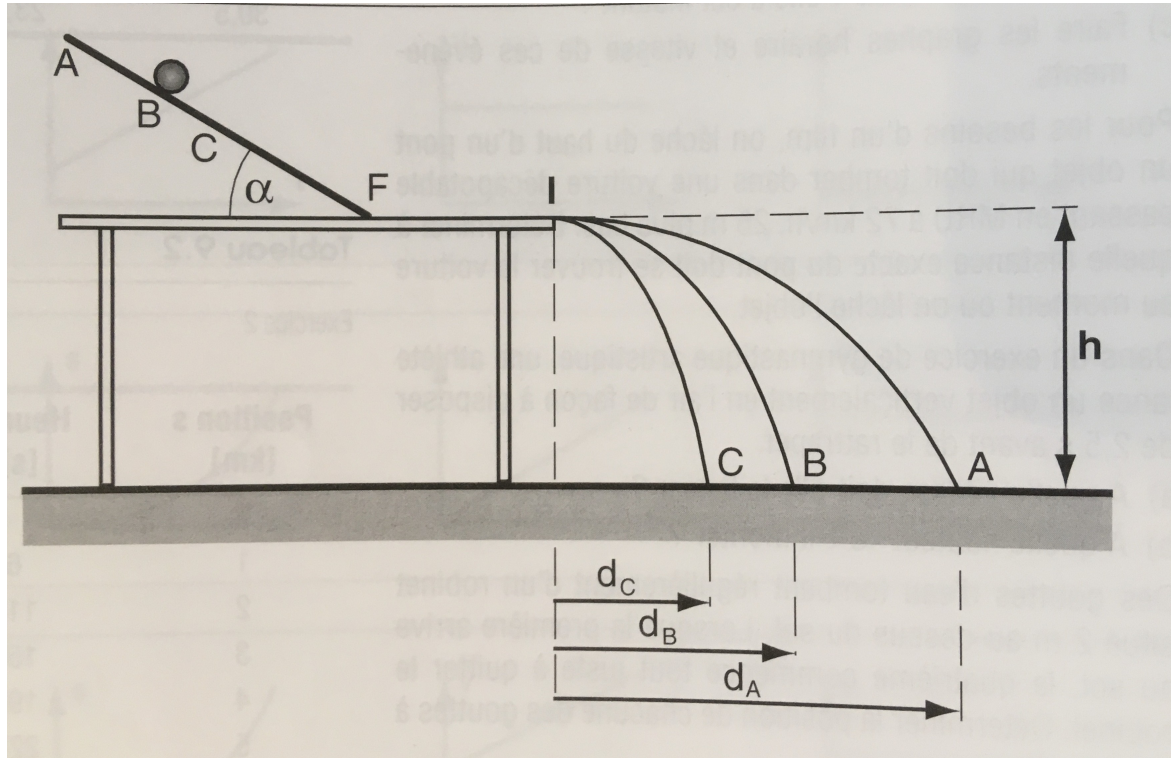
# Galileo Galilée (1564-1642): études de dynamique



Chute : éclairage à intervalles réguliers d'un corps en chute libre; au cours du temps, la distance parcourue par intervalle de temps augmente;

Source : Alonso & Finn, *Fundamental University Physics I*

# Galileo Galilée (1564-1642): études de dynamique



## Approche expérimentale du mouvement balistique :

« J'imagine qu'un mobile a été lancé sur un plan horizontal d'où l'on a écarté tout obstacle ; [...] le mobile que j'imagine d'une certaine gravité, parvenu à l'extrémité du plan et continuant sa course, ajoutera à son précédent mouvement uniforme et indélébile la tendance vers le bas que lui confère la gravité : le résultat sera ce mouvement composé d'un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas... »

# Galileo Galilée (1564-1642): études de dynamique

→ Description mathématique des mouvements

**Galilée fait des expériences et trouve que :**

- le mouvement de chute est uniformément accéléré ; distance parcourue pendant un laps de temps  $t$  :  $s = 1/2 a t^2$  (Fig. ci-dessus)
- la vitesse de chute est indépendante de la masse du corps
- **Le mouvement relatif** (voir Oresme) : ne change pas lorsqu'il est superposé à un mouvement commun
- **Le principe d'inertie** :  $m^{vt}$  continu s'il n'est pas contré par une force (voir *impetus* chez Philopon et Buridan)



# Galileo Galilée (1564-1642): les difficultés de la mesure

- **Comment mesurer le temps lors d'une chute si rapide que ce qu'on observe ?**

- **Pour ralentir le mouvement :**

Galilée remplace la chute verticale d'un corps par le roulement d'une boule dans un canal creusé dans une pièce de bois, qu'il incline.

- **Mesure du temps :**

*« à l'aide d'un grand seau plein d'eau, suspendu à une certaine hauteur, d'où sortait, par un fin tuyau soudé sur le fond, un mince filet d'eau reçu dans un petit verre durant tout le temps de la descente - totale ou partielle - de la boule. Les quantités d'eau recueillies étaient pesées chaque fois sur une balance très exacte donnant par la différence et proportion de leurs poids la différence et proportion des temps. Et cela avec une telle justesse que, comme on l'a dit, les opérations maintes et maintes fois répétées ne donnèrent jamais de différences notables pour chacun des temps. » Galilée, d'après A. Koyré, Etudes d'histoire de la pensée scientifique, Gallimard, 1973, p. 294*



# Galileo Galilée (1564-1642): les difficultés de la mesure

- Comment mesurer le temps lors d'une chute si rapide que ce qu'on observe ?

- Pour ralentir le mouvement :

Galilée remplace la chute verticale d'un corps par le roulement d'une boule dans un canal creusé dans une pièce de bois.

- Mesure du temps :

« à l'aide d'un verre »

**A. Koyré :** « Il est évident que les expériences de Galilée sont complètement dénuées de valeur : la perfection même de leurs résultats est une preuve rigoureuse de leur inexactitude. »

... sur le fond, un verre pendant tout le temps - totale ou partielle - de la boule. Les résultats obtenus étaient pesés chaque fois sur une balance très exacte donnant par la différence et proportion de leurs poids la différence et proportion des temps. Et cela avec une telle justesse que, comme on l'a dit, les opérations maintes et maintes fois répétées ne donnèrent jamais de différences notables pour chacun des temps. » Galilée, d'après A. Koyré, Etudes d'histoire de la pensée scientifique, Gallimard, 1973, p. 294



# Giovanni Battista Riccioli (1598 -1671) :

## les difficultés de la mesure

- **Le pendule** a une période d'oscillation qui ne dépend ni de la masse ni de l'amplitude de l'oscillation  $\Rightarrow$  compter les périodes d'un pendule pour mesurer le temps.

→ Riccioli veut construire un pendule dont la période vaut exactement 1 seconde.

Comment déterminer la période du pendule ?

- Comparaison avec une clepsyde : 900 oscillations en 15 minutes.
- Comparaison avec un cadran solaire : 21706 oscillations en 6 heures (un peu plus qu'attendu)
- Comptage pendant 24 heures successives, avec 9 autres observateurs, utilisant un autre pendule - toujours trop, erreur de 1,6%, Riccioli n'est toujours pas satisfait. Quelques autres tentatives ...

→ Mais la valeur exacte de la période du pendule importe peu - l'essentiel est qu'on puisse la convertir en secondes.

- Comment appliquer cela à la mesure du temps que met un corps à chuter sur une certaine distance ?

# Giovanni Battista Riccioli (1598 -1671): les difficultés de la mesure



Tour Asinelli, Bologna (97 m)

- Chute d'objets sphériques du haut de la tour et de différents étages. Comptage du temps requis pour arriver au sol (« horloge humaine »):
  - les corps lourds tombent plus vite que les corps légers, du fait de la résistance de l'air
  - La relation entre temps de chute et distance parcourue est celle préconisée par Galilée:  $s=1/2at^2$

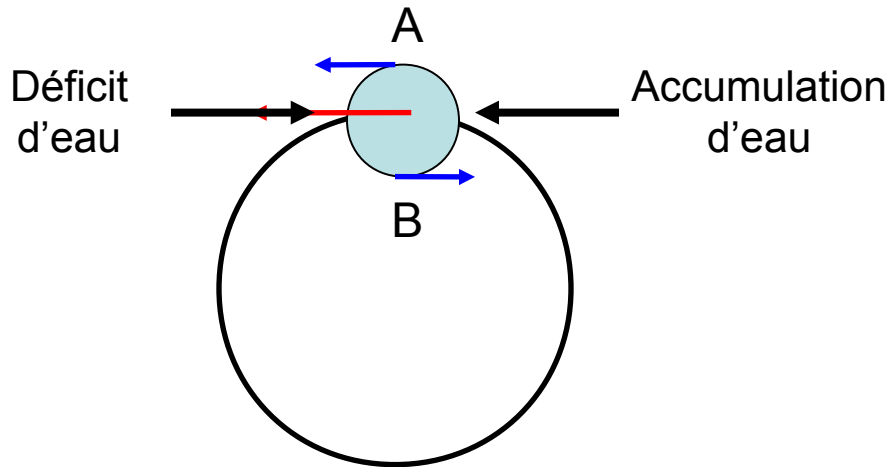
**A. Koyré** : « *Les résultats concordent dans tous les détails. Leur accord est en fait si parfait... qu'il est tout à fait évident que les expérimentateurs ont été convaincus de sa vérité avant même d'avoir commencé leurs essais. ... Pourtant, même si nous admettons, comme nous devons le faire, que les bons Pères corrigèrent quelque peu les résultats concrets de leurs mesures, nous devons néanmoins constater que ces résultats sont d'une précision surprenante.* »

# L'évolution de la dynamique

Les difficultés à comprendre la nature de la pesanteur et l'interaction à distance :

**Galilée, Descartes**

# Galilée : la (fausse) théorie des marées et la difficulté de comprendre la gravitation



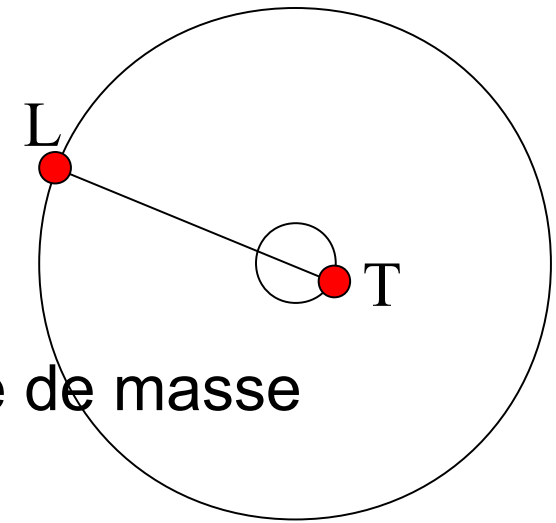
Galilée (lettre au cardinal Orsini, 1616)<sup>(1)</sup> : marées = conséquence des deux mouvements de la Terre :

- (i) rotation autour de son axe,
- (ii) révolution autour du Soleil

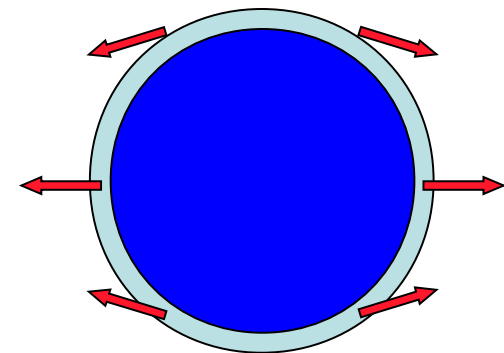
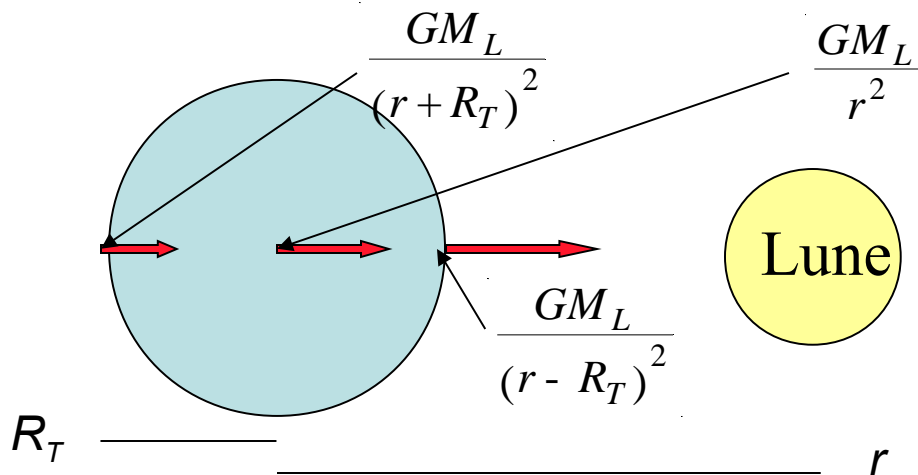
- Alternance vitesse totale élevée (A) - faible (B) d'un point donné sur la surface terrestre
- Marées = réponse de l'eau, analogue à un réservoir d'eau sur une barque qui se met en mouvement (eau poussée vers l'arrière) ou freine (eau poussée vers l'avant) - notion d'inertie / *impetus*
- Théorie prédisant intervalle de 12 h entre marées haute/basse en un endroit - Galilée : s'y ajoute la période, variable selon l'endroit, du retour d'eau à l'équilibre, pour expliquer intervalle observé de 6 h (argument cachant mal l'incapacité de Galilée d'expliquer cet intervalle !)

(1) M. Clavelin, *Galilée Copernicien*, Albin Michel 2004

# Marées : explication actuelle



- Terre, Lune en orbites autour du centre de masse
- Centre Terre: équilibre gravitation - force centrifuge
- Mais: l'attraction gravitationnelle est différente selon la distance du point considéré sur la *surface* de la Terre à la Lune  $\Rightarrow$  accélération différentielle



# Marées : explication actuelle

- **Centre Terre :**

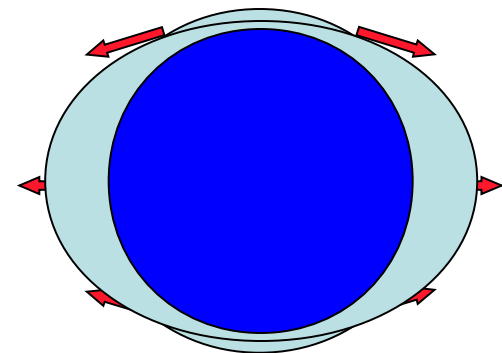
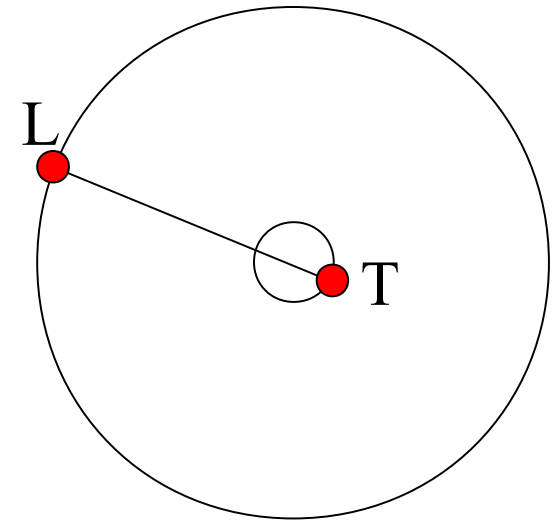
équilibre gravitation - force centrifuge ;

point sub-lunaire : excès gravitation ;

point opposé : déficit gravitation

- **Conséquence :**

bouffée de la Terre dans le plan de l'orbite de la Lune (de même :  
Soleil), surtout océans





# Galilée sur le rôle de la Lune dans les marées

**Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* :**  
(Éditions du Seuil 1992)

- Simplicio :

(représentant les idées traditionnelles, notamment de l'Église)

*« ... dernièrement un prélat a publié un petit traité dans lequel il dit que la Lune, errant dans le ciel, attire et soulève vers elle un paquet d'eau qui la suit continuellement et de telle sorte que la haute mer se situe toujours dans la partie qui est soumise à la Lune; et comme la montée des eaux se reproduit pourtant quand la Lune est au-dessous de l'horizon, il déclare que le seul moyen de sauver cet effet, c'est de dire que non seulement la Lune possède en elle par nature cette faculté, mais a dans ce cas la puissance de la donner au degré du zodiaque qui lui est opposé. ... »*

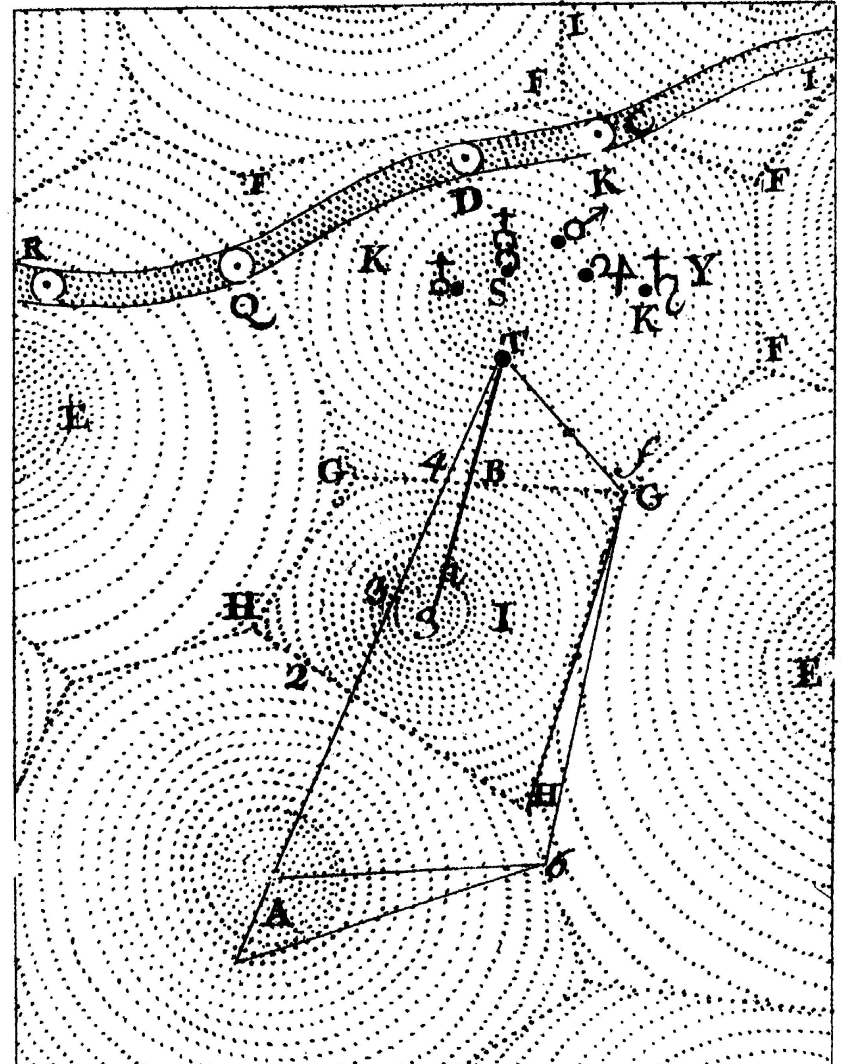
# Galilée sur le rôle de la Lune dans les marées

**Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde***  
(Éditions du Seuil 1992) :

- Salviati (représentant Galilée):  
« *Mais de tous les grands hommes qui ont philosophé sur cet effet si étonnant de la nature, c'est Kepler qui m'étonne le plus : cet esprit libre et pénétrant avait à sa disposition les mouvements attribués à la Terre, il a pourtant prêté l'oreille et donné son assentiment à un empire de la Lune sur l'eau, des propriétés occultes et autres enfantillages du même genre. »*
- **Problème** (non résolu à l'époque des Galilée, et même à celle de Newton) : comment comprendre l'interaction à distance (par laquelle la Lune soulève l'eau ou par laquelle le Soleil agit sur les planètes) ?

# Réflexions dynamiques chez René Descartes (1590-1650)

- **Le vide n'existe pas** → l'univers infini est rempli d'une matière corpusculaire en agitation permanente
- Mouvement en l'absence de forces : ligne droite → **esquisse du principe d'inertie**
- **Forces transmises par collisions**  
(idée : boules élastiques; évite le problème de l'interaction à distance !)  
→ **conservation de la quantité de mvt**
- **La matière du ciel en rotation continue autour du Soleil** → les planètes emportées par rotation du ciel (analogie: brins d'herbe emportés par tourbillons dans l'eau)
- **Multitude de systèmes planétaires**  
(« pluralité des mondes »; voir Fontenelle)



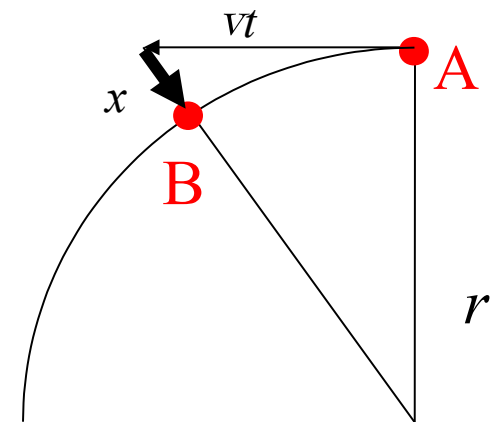
# **La gravitation universelle selon Newton**

# Vers la notion de force centrale - la force centripète (Huygens, Newton)

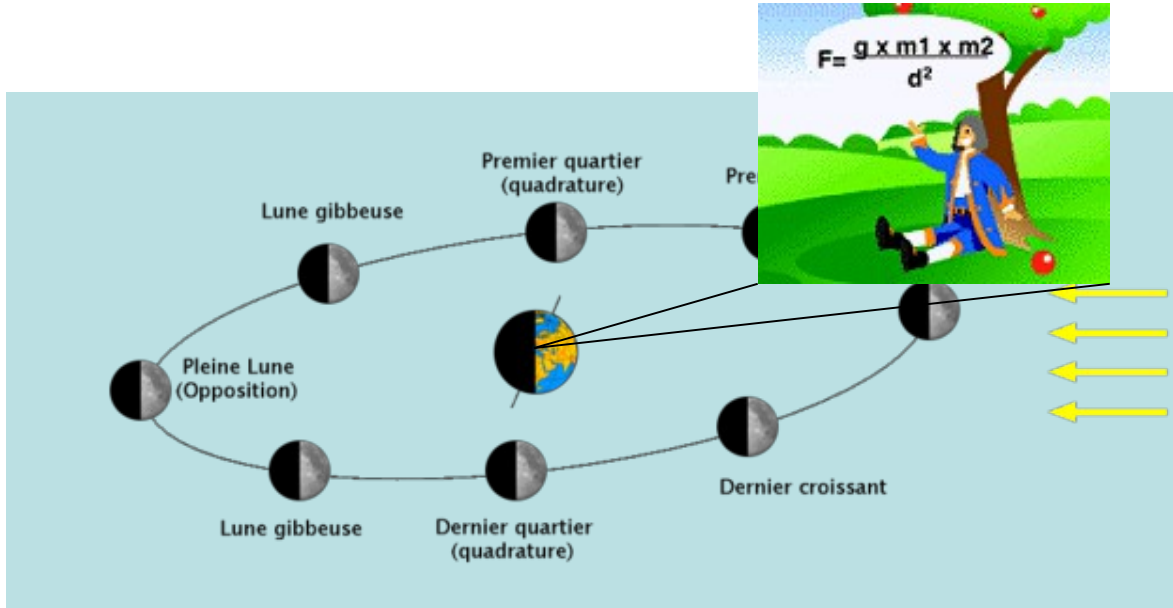
- Vers milieu 17<sup>ème</sup> siècle : **force** → **changement vitesse**  
(rappel : pour Aristote, force → vitesse)
- Un objet se mouvant le long d'un arc de cercle a un changement de vitesse en direction du rayon : force centripète (vers le centre du rayon; C. Huygens, 1629-1695).

→ **Conséquence pour Newton :**

- pour maintenir une orbite autour du Soleil, la planète doit subir une force dirigée vers le Soleil (« force centrale »).
- les planètes n'ont plus besoin d'une force le long de leur trajectoire, elles la poursuivent par inertie.



# Vers la notion de force centrale - la force centripète (Huygens, Newton)



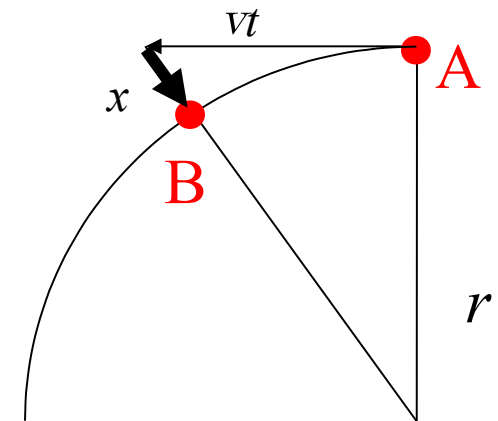
**La même force fait :**

- 1) tomber la pomme
- 2) tourner la Lune en orbite autour de la Terre

→ Rupture d'avec la physique d'Aristote !

**Conséquence pour Newton :**

- pour maintenir une orbite autour du Soleil, la planète doit subir une force dirigée vers le Soleil (« force centrale »).



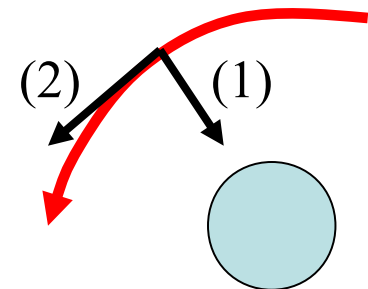
# L'orbite d'une planète (ou d'un satellite naturel ou artificiel)



- 1) Tous les corps chutent vers la Terre, à la même vitesse (force centripète).
- 2) La station spatiale et tout son contenu effectuent un mouvement rectiligne à vitesse constante (inertie).

© NASA, <http://spaceflight.nasa.gov/station/>

La combinaison des deux mouvements est la trajectoire elliptique du satellite.



# Isaac Newton (1642-1727) :

## Les lois fondamentales de la dynamique

- **Tout corps persiste dans son état** de repos ou de mouvement uniforme selon une ligne droite, sauf quand il est obligé de changer d'état par des forces qui agissent sur lui (loi déjà essentiellement établie par Galilée).
- **Le changement du mouvement** (= de la vitesse) est proportionnel à la force impartie et a lieu le long de la ligne droite selon laquelle cette force agit.  $F = m.a$  (loi qui avait été suggérée par l'observation des collisions de corps élastiques).
- **A chaque action s'oppose toujours une réaction** ; exprimé autrement : les actions mutuelles de deux corps sont toujours égales et ont des directions opposées (exemple : force d'attraction du Soleil vers la Terre et vice versa).

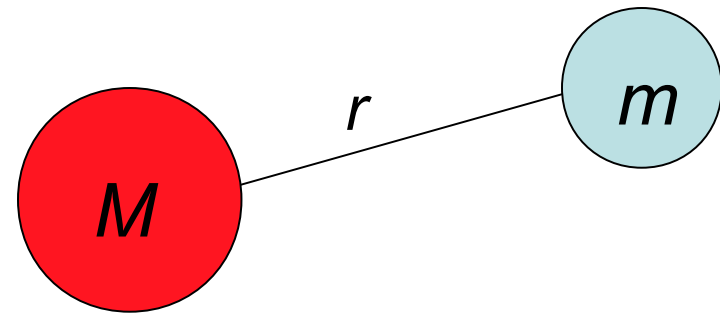


# Isaac Newton (1642-1727) :

## La loi de la gravitation universelle

- **Gravitation = force centrale**  $\Rightarrow$  acc.  $a$  vers Soleil
- **Force = masse  $\times$  accélération**  
 $\Rightarrow$  force de gravitation exercée sur corps de masse  $m$  proportionnelle à  $m$
- **Analogie : force exercée par  $m$  sur  $M$**
- **3ème loi de Kepler  $P^2 \propto r^3$**

$$F = \frac{GmM}{r^2}$$

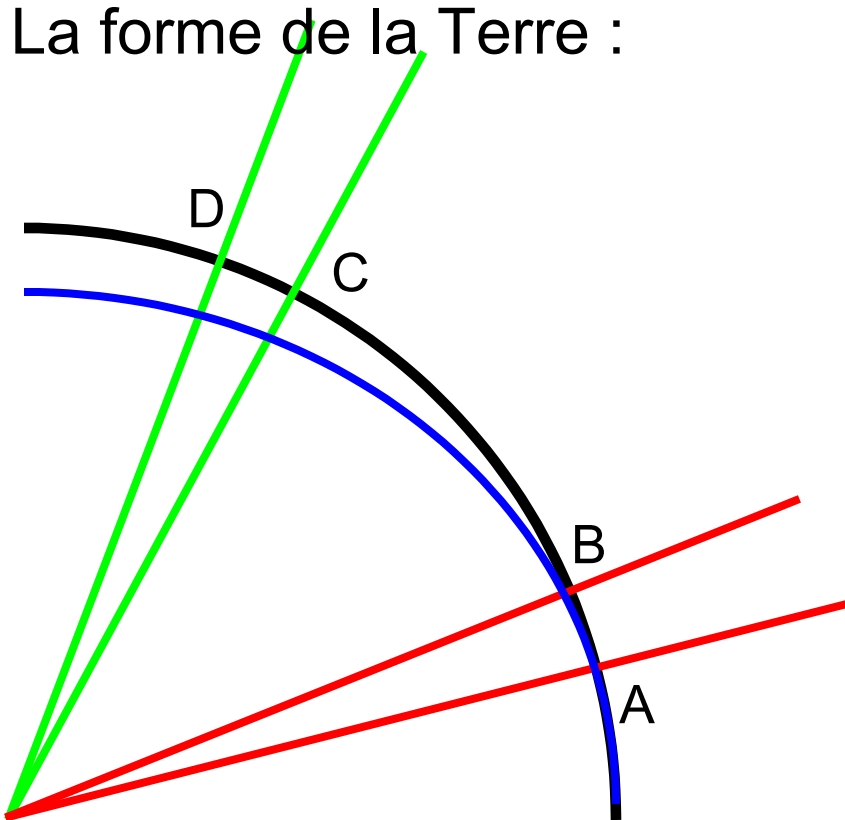


# Les succès de la théorie newtonienne

- Dédution et généralisation des lois de Kepler : les orbites sous l'effet de la gravitation peuvent être des ellipses, des paraboles ou des hyperboles
- Détermination de la constante de proportionnalité de la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler  $P^2 \propto r^3$
- Action = réaction : le Soleil n'est pas immobile au foyer de l'orbite d'une planète.
- L'aplatissement de la Terre (gravitation + force centrifuge due à la rotation)

# Les succès de la théorie newtonienne

La forme de la Terre :



- Mesurer la distance séparant deux endroits sur la même méridienne, distants de  $1^\circ$  en latitude géographique : AB ou CD
- Si la terre était une sphère (courbe noire), cette distance serait la même à toutes les latitudes :  $AB=CD$
- Si la Terre était aplatie aux pôles (courbe bleue), cette distance augmenterait avec la latitude :  $AB < CD$
- Deux expéditions :  
Laponie 1736-37, Pérou 1735-42

# Les succès de la théorie newtonienne

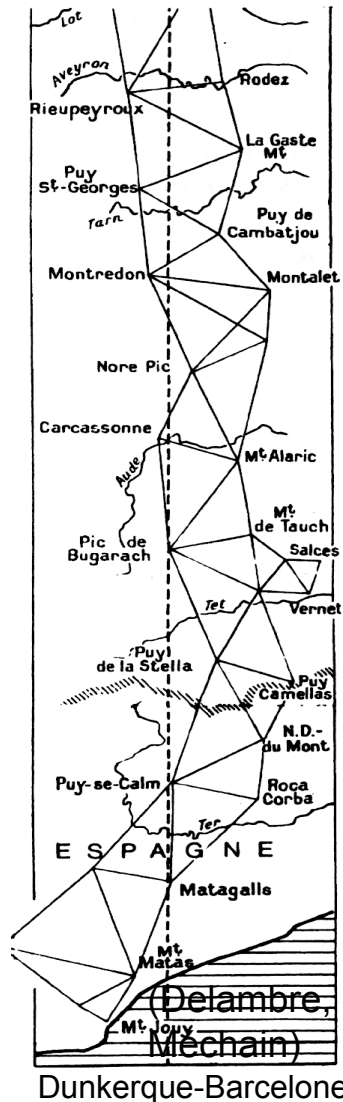
Académie  
des Sciences  
de Paris : 1°

= 57 422 toises  
(Laponie)

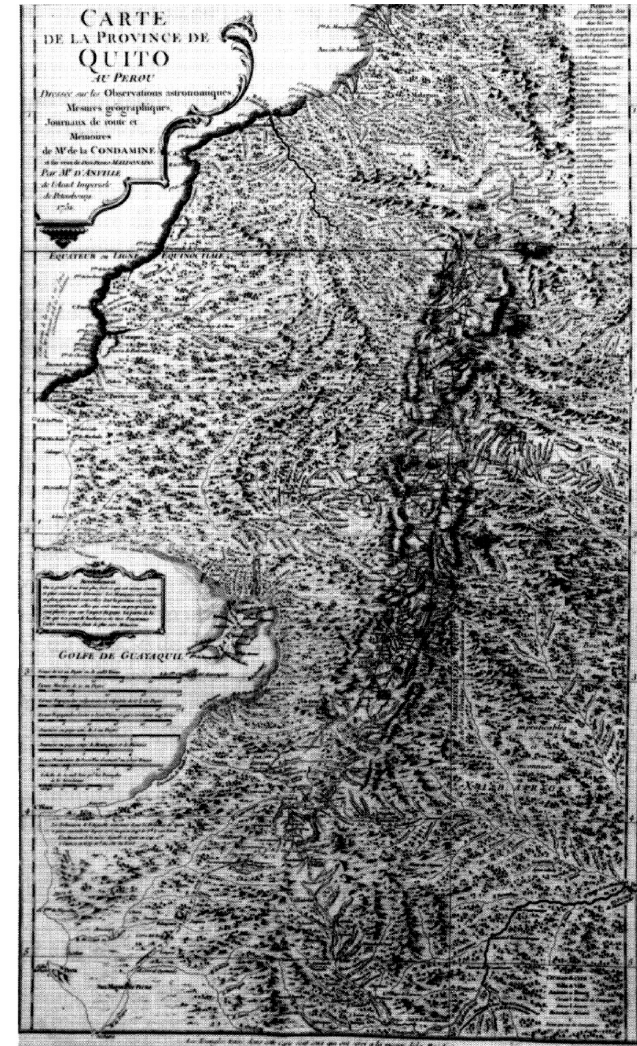
= 57 060 toises  
(Paris)

= 56 753 toises  
(Pérou)

⇒ aplatissement



Carte de la triangulation en Laponie



Carte de la triangulation au Pérou (La Condamine, 1751)

Voltaire:

« Vous avez confirmé dans des lieux pleins d'ennui ce que Newton connut sans sortir de chez lui »

# Les succès de la théorie newtonienne

- **Théories planétaires** : le retour de la comète de Halley (1758)  
découverte Neptune (Adams / Le Verrier 1846)
- **Succès persistants** de la théorie de Newton aux 20<sup>ème</sup>, 21<sup>ème</sup> siècles :  
navigation spatiale, découverte de planètes extrasolaires ....

⇒ La théorie de Newton s'impose grâce à ses succès.

- La théorie de Newton est toujours utilisée pour comprendre des phénomènes liés à la gravitation, mais elle est fondée sur un certain nombre de **postulats qui paraissent arbitraires** (temps et espace absolus, l'interaction à distance dans le vide) et ne peuvent pas être maintenus.

# **La gravitation universelle selon Newton**

Problèmes de la théorie de  
Newton - la solution proposée par  
Einstein

# Les problèmes de la théorie newtonienne : l'interaction à distance

- **Comment l'interaction gravitationnelle se propage-t-elle ?**  
(l'analogie des collisions chez Descartes était séduisante pour la compréhension, mais fausse). Dans l'espace vide ? « absurde » (Huygens), « qualité occulte de l'espace » (Leibniz). Voir aussi commentaire violent de Salviati/Galilée sur l'explication des marées par Kepler.
- **Newton :**  
« *hypotheses non fingo* ». La physique doit produire des modèles aboutissant à des prévisions menant à la confirmation ou à l'invalidation par l'expérience ou l'observation.  
  
+ arguments à caractère théologique  
(dessein d'un être tout-puissant)

# Les problèmes de la théorie newtonienne : espace & temps absolus

Référentiel inertiel - comment le définir ?

*« un référentiel galiléen, ou inertiel, se définit comme un référentiel dans lequel le principe d'inertie est vérifié, c'est-à-dire que tout corps ponctuel libre est en mouvement de translation rectiligne uniforme, ou au repos »*

Que révèlent les forces d'inertie, par exemple la force centrifuge ?

Un changement de vitesse par rapport à quoi ?

*« Dans un référentiel non inertiel, qui est animé d'un mouvement accéléré par rapport à un référentiel galiléen, il faut faire intervenir les forces d'inertie. Ces forces se distinguent de celles prises en compte dans un référentiel galiléen, car elles ne sont pas associées à une interaction entre le corps dont on étudie le mouvement et un autre corps. »*

→ **Newton** : « il existe un temps et un espace absolus, sans référence à des objets matériels ».

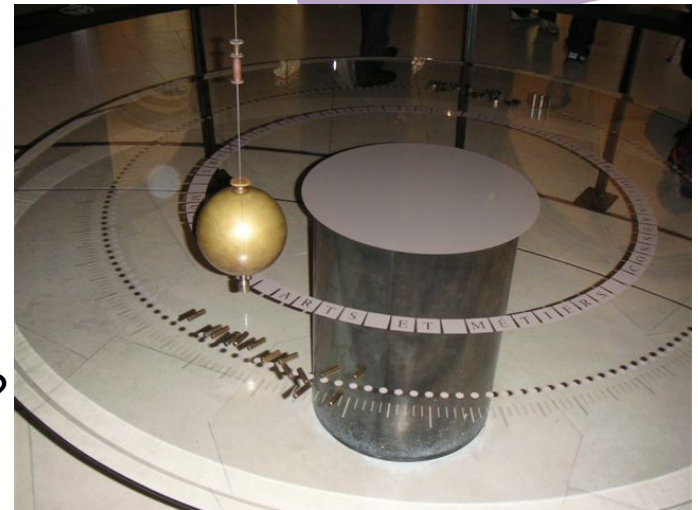
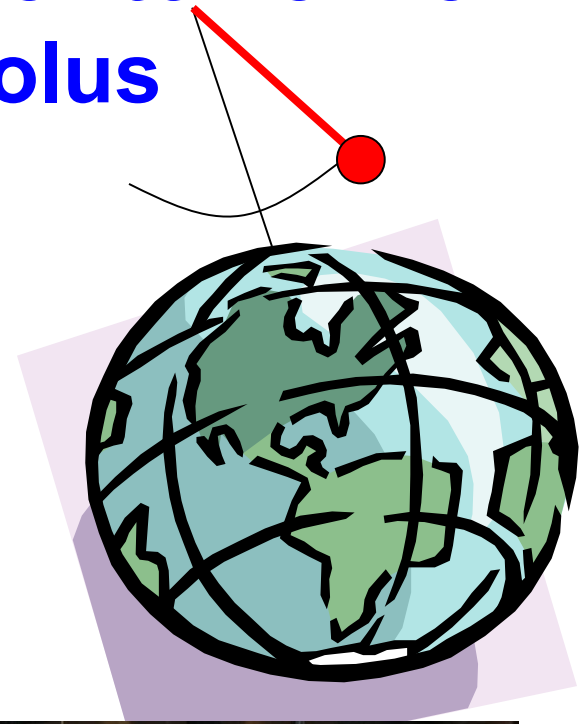
***Qu'est-ce que c'est, cet « espace absolu » ???***



# Les problèmes de la théorie newtonienne : espace & temps absolus

## Le pendule de Foucault

- Plan d'oscillation du pendule maintenu, tandis que la Terre tourne  
hypothèse :  
toutes forces perturbatrices sont éliminées ; force de Coriolis.
- Observation : le plan du pendule tourne par rapport à la Terre.  
→ Preuve de rotation de la Terre.
- Rotation par rapport à quel référentiel ?  
Système planétaire ? Ensemble des étoiles ?  
Newton : *espace absolu*.



# Les problèmes de la théorie newtonienne : espace & temps absolus

## Critique du *temps absolu* :

le temps dépend du référentiel de celui qui le mesure (relativité restreinte, Einstein 1905). Conséquence de la découverte que la vitesse de la lumière est identique pour tous, indépendamment de leur mouvement.

⇒ Un temps absolu n'existe pas.

# Les problèmes de la théorie newtonienne : espace & temps absolus

## **Critique du *temps absolu* :**

le temps dépend du référentiel de celui qui le mesure (relativité restreinte, Einstein 1905). Conséquence de la découverte que la vitesse de la lumière est identique pour tous, indépendamment de leur mouvement.

⇒ Un temps absolu n'existe pas.

## **Critique de l'*espace absolu*** (notamment Mach, fin 19<sup>ème</sup> siècle) :

aucune autre manifestation de l'espace absolu que les forces d'inertie qu'il est censé expliquer ⇒ notion à bannir !

Seulement les mouvements relatifs comptent.

*Les seules expériences mécaniques que nous pouvons faire mettent en jeu les mouvements par rapport à l'ensemble de la matière de l'Univers (étoiles, galaxies lointaines - principe de Mach).*

# Encore une fois : la chute des corps



- Tous les corps chutent à la même vitesse vers le centre de la Terre, indépendante de leur masse (astronaute, boîte conserves, ...).

$$F = ma$$

- 

$$F = \frac{GmM}{r^2}$$

- Même  $m$  ? Si oui :  $a = \frac{GM}{r^2}$

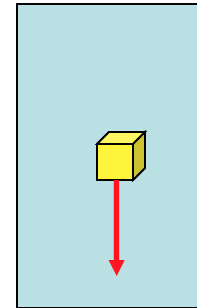
indépendante de  $m$

- Masse inerte = masse pesante.  
Un hasard ?

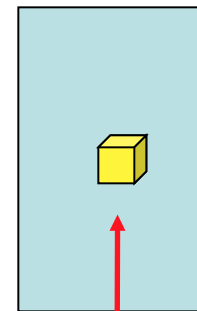
# Gravitation et accélération

**Quelle différence** entre les deux expériences suivantes faites par un observateur enfermé dans un ascenseur ou un vaisseau spatial ?

- 1) la chute d'un corps vers la Terre, accélération  $-g$ , *ascenseur au repos*.
- 2) corps en l'absence de toute gravitation (très loin d'objets comme la Terre...)  
+  
mouvement accéléré de l'ascenseur ( $g$ ) en direction du même corps.



Ascenseur  
au repos, l'objet chute



Objet flotte librement dans  
l'espace, puis ascenseur monte

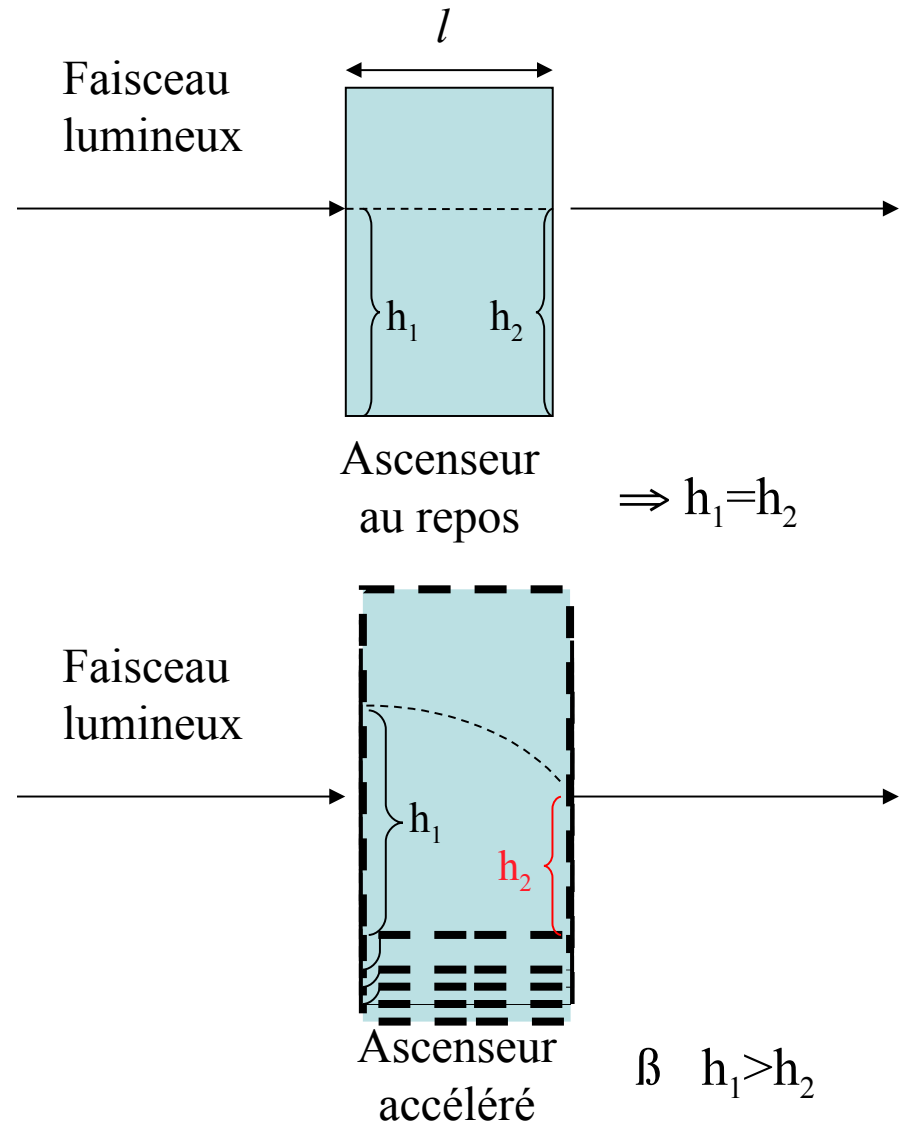
**⇒ aucune !** Et cela a une conséquence étonnante :

# Une expérience virtuelle

Rayon lumineux émis par un observateur en l'absence de gravitation

(1) Ascenseur au repos : obs. voit une trajectoire en ligne droite.

(2) Ascenseur accéléré : obs. voit que le faisceau entre dans un ascenseur (acc.  $a$ ) à la hauteur  $h_1$  à  $t=0$ , et le quitte à la hauteur  $h_2 = h_1 - 1/2 a t^2$ , où  $t=l/c$ .



# Une expérience virtuelle

Rayon lumineux émis par un observateur en l'absence de gravitation

(1) Ascenseur au repos : obs. voit une trajectoire en ligne droite.

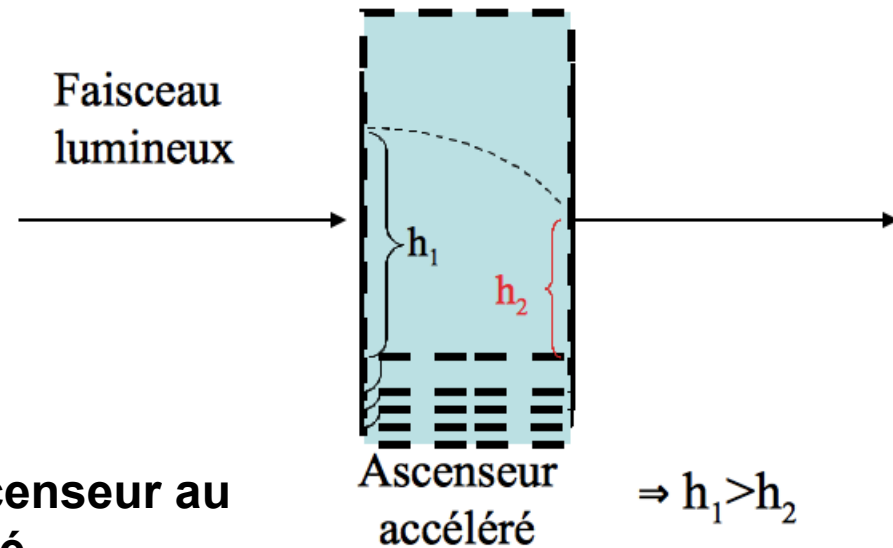
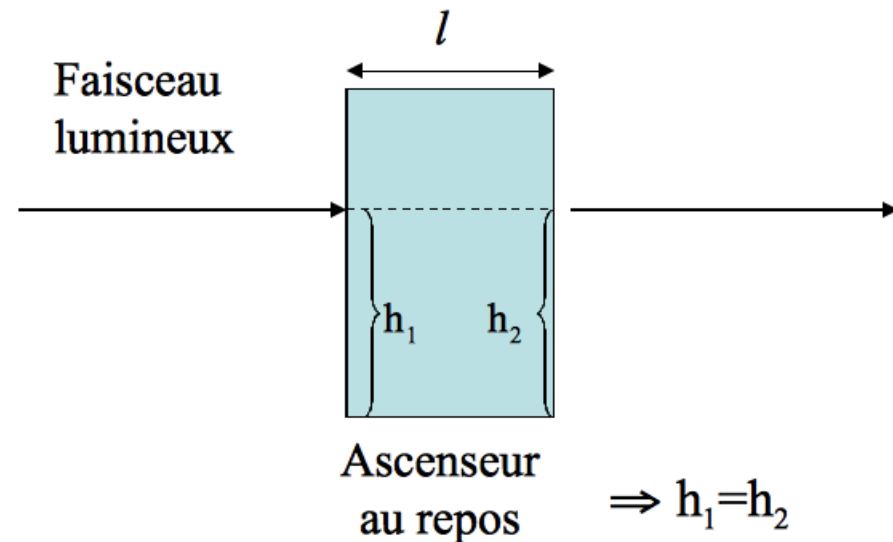
(2) Ascenseur accéléré : obs. voit que le faisceau entre dans un ascenseur (acc.  $a$ ) à la hauteur  $h_1$  à  $t=0$ , et le quitte à la hauteur  $h_2 = h_1 - 1/2 a t^2$ , où  $t=l/c$ .

Observateur dans l'ascenseur :

trajectoire droite du faisceau si ascenseur au repos, courbe si ascenseur accéléré.

Equivalence accélération - gravitation :

→ la gravitation courbe le trajet de la lumière.



# Gravitation et accélération

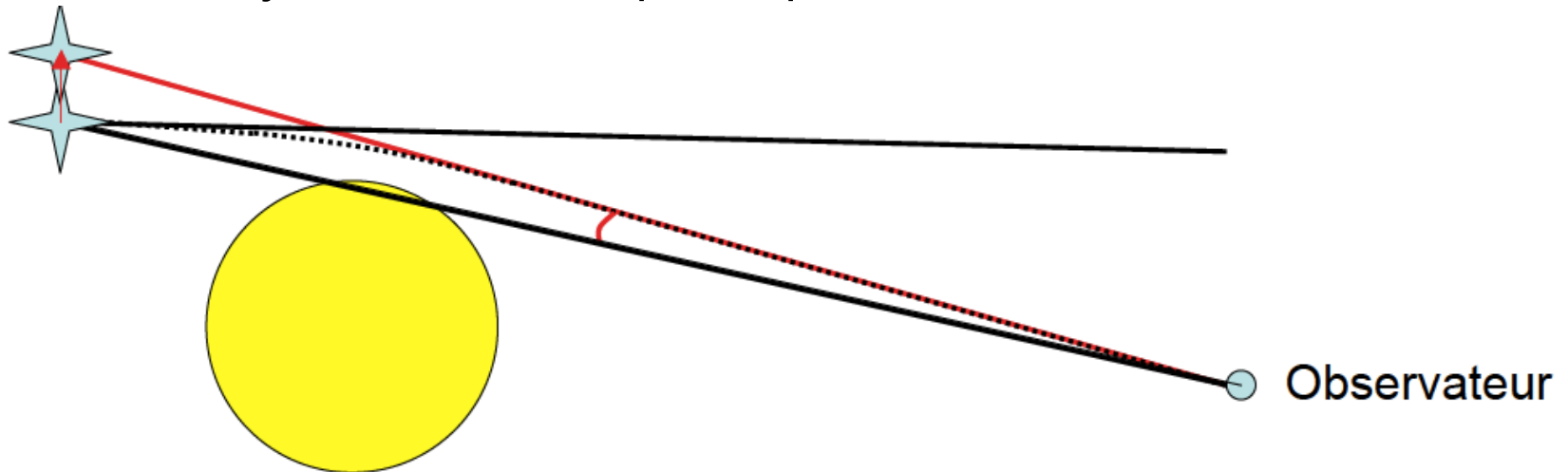
- **Principe d'équivalence** (A. Einstein 1907) : Il est impossible de distinguer entre l'action de la gravitation et celle de l'accélération d'un référentiel.
- Conséquence (entre autres) :  
**la gravitation courbe le trajet de la lumière !**



# La vérification par l'observation

- **Eclipse du soleil 1919 :**  
confirmation de la déviation de la lumière par la masse du Soleil

Vue d'une étoile lointaine,  
dont le trajet de la lumière passe près du Soleil :

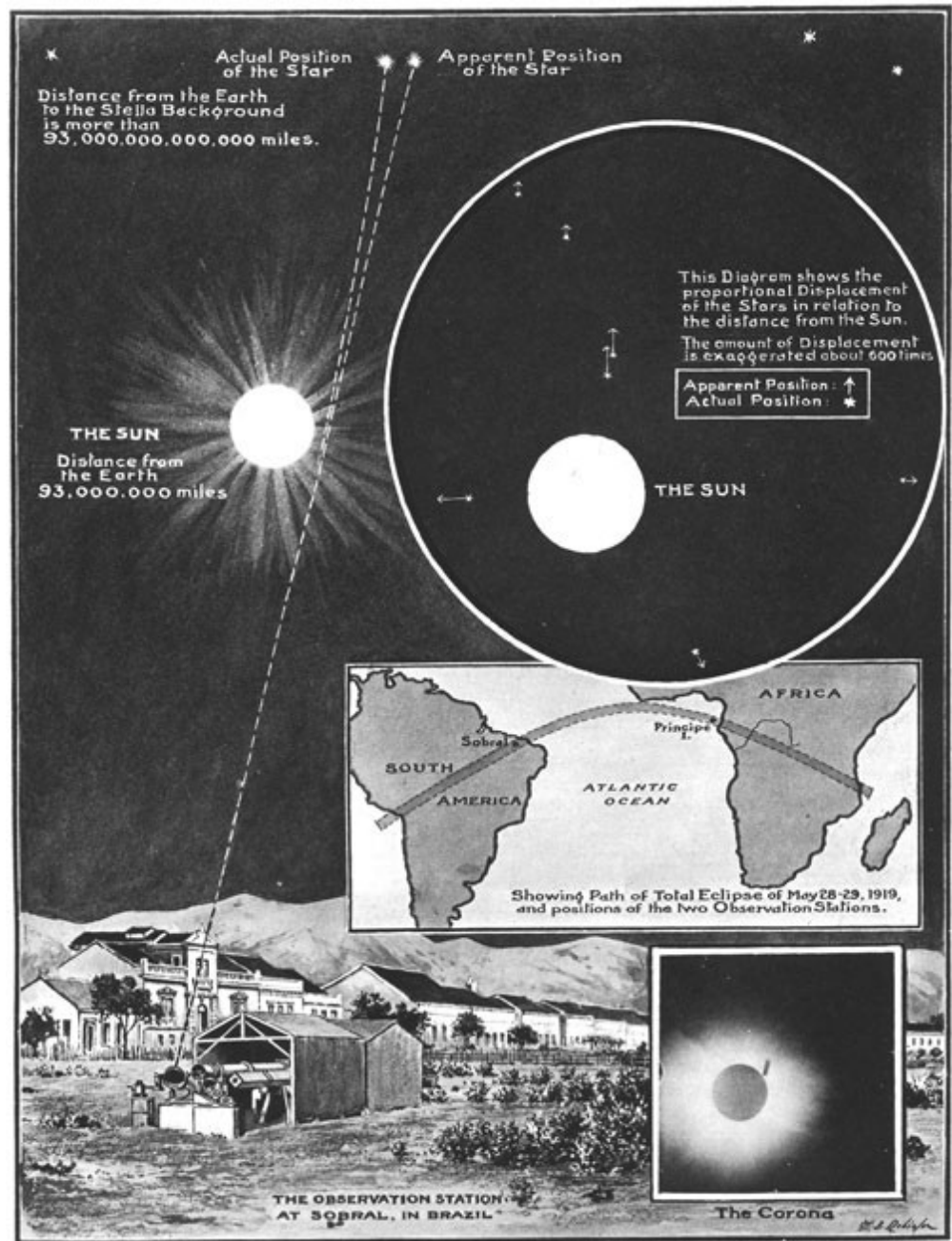


Ecart angulaire de la position des étoiles proches du Soleil - elles doivent paraître plus loin du Soleil lors de l'éclipse.

The original caption for the graphical explanation of the experiment on the facing page read as follows:

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 [1919], 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."

From the Illustrated London News of November 22, 1919.



# Gravitation et géométrie

- **Solution du problème de l'interaction à distance** : la gravitation déforme l'espace. Les planètes suivent les trajets les plus courts dans l'espace.
- Nécessité d'**abandonner des idées qui nous semblent familières** (parcours de lumière en ligne droite), mais qui se révèlent fausses quand on sort de notre domaine d'expérience (grandes distances, grandes masses).
- **Continuité** dans le développement des idées physiques (flottement libre de la Terre dans l'espace, au centre du monde ; gravitation universelle = force d'attraction à distance; ...)

# Avons-nous compris la gravitation ?

- **Selon Newton** : gravitation = force d'attraction
- **Mais Expansion de l'Univers** :
  - on voit que les galaxies s'éloignent les unes des autres;
  - la gravitation entre les galaxies devrait ralentir l'expansion (comme la vitesse d'un objet lancé vers le haut diminue graduellement sous l'effet de la gravitation de la Terre)
  - Or il semble que l'expansion de l'univers était plus *lente* dans le passé qu'aujourd'hui (prix Nobel 2011). Accélération de l'expansion ? Aspect répulsif de la gravitation ?

# Résumé :

## mouvements des planètes et gravitation

- **Abandon de la distinction** sub-/supra-lunaire  $\Rightarrow$  questions sur l'origine des mouvements planétaires.
- **Loi d'inertie** : le problème n'est pas le mouvement des planètes en tant que tel, mais l'écart à la ligne droite.
- **Newton** : force centrale, gravitation *universelle*.
- Conséquence : **compréhension des  $m^{vts}$  planétaires**, mais aussi : chute des corps, comètes, étoiles, galaxies ... (« universel »).
- **Des difficultés conceptuelles** de certains aspects de la théorie de Newton (espace et temps absolus, interaction à distance, masses inerte et pesante ...)  $\Rightarrow$  besoin d'une théorie plus générale de la gravitation.
- **Einstein** : théorie de la relativité générale. Gravitation newtonienne = cas limite pour des masses faibles.
- **La gravitation peut-elle avoir un aspect de répulsion ???**

# Isaac Newton (1642-1727) :

## La loi de la gravitation universelle (1)

- **Gravitation = force centrale**

$\beta$  acc.  $a$  vers Soleil

- **Mouvement circulaire**

(nous simplifions)<sup>(1)</sup>

$$\Rightarrow a = \frac{v^2}{r}$$

- **3<sup>ème</sup> loi de Kepler**  
(simplification<sup>(1)</sup>: orbite circulaire)  $P^2 \propto r^3$

$$v = \frac{2\pi r}{P}$$

$$\Rightarrow v^2 = 4\pi^2 \frac{r^2}{P^2} \propto \frac{r^2}{r^3} = \frac{1}{r}$$

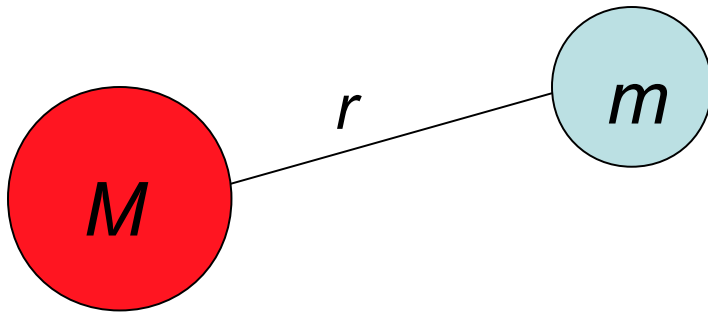
$$\Rightarrow a = \frac{v^2}{r} \propto \frac{1}{r^2}$$

(1) Newton traita le problème en toute généralité, pour une orbite elliptique, avec un effort mathématique bien supérieur à celui nécessaire pour une orbite circulaire.

# Isaac Newton (1642-1727) :

## La loi de la gravitation universelle (2)

- Force = masse  $\times$  accélération  
 $\Rightarrow$  force de gravitation exercée sur corps de masse  $m$  proportionnelle à  $m$
- Analogue: force exercée par  $m$  sur  $M$



$$F = ma_m \propto \frac{m}{r^2},$$

$$F = Ma_M \propto \frac{M}{r^2}$$

$$\Rightarrow F = \frac{GmM}{r^2}$$