



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

24 octobre 2008
cours de la semaine # 6

Bienvenue au



EPFL - LABORATOIRE
D'ASTROPHYSIQUE

Cours de physique générale

Physique I pour étudiants de première année
en section de mathématiques

Prof. Georges Meylan

Laboratoire d'astrophysique

Site web du laboratoire et du cours :

<http://lastro.epfl.ch>

Exercices

Les mêmes que l'année dernière, mais ...

Les exercices et corrigés
de l'année académique 2006-2007
seront mis à votre disposition sur la page web du cours
dans le fichier [exo_hiver2006_07.pdf](#)

Exercices corrigés (facultatifs) : voir à la bibliothèque centrale

«Engineering Mechanics, Dynamics», Hibbeler

«Engineering Mechanics», McLean & Nelson (série Schaum)

«Mécanique générale», Spiegel (série Schaum)

«Lagrangian Dynamics», Wells (série Schaum)

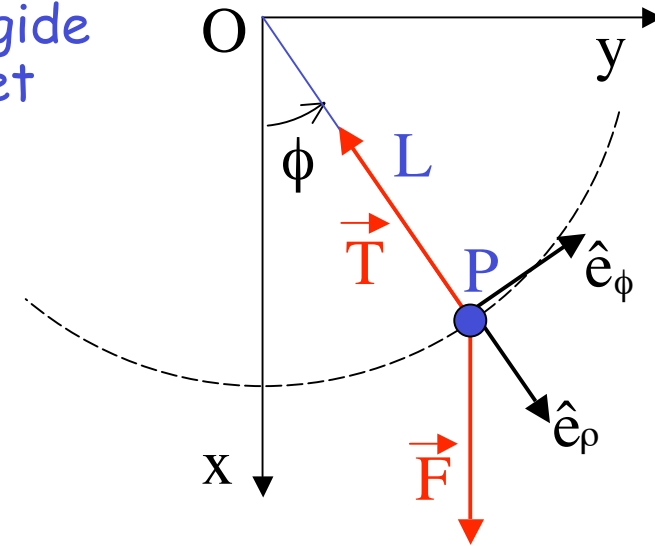
Pendule mathématique

Démo : Mesure de la force de tension T sur le fil d'un pendule # 701

- Point matériel P attaché à une tige rigide de longueur L , soumis à son poids F et oscillant dans un plan vertical
- Référentiel (fixe) : $Oxyz$
- Repère (en mouvement) : $P\hat{e}_\rho\hat{e}_\phi\hat{e}_z$ (coordonnées cylindriques)
- Contraintes (ou liaisons) :

$$\begin{cases} \rho = L = \text{constante} \Rightarrow \dot{\rho} = \ddot{\rho} = 0 \\ z = \dot{z} = \ddot{z} = 0 \end{cases}$$

- Accélération : $\vec{a} = -L\dot{\phi}^2 \hat{e}_\rho + L\ddot{\phi} \hat{e}_\phi$
- 2ème loi de Newton : $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{T}$
- Projections sur les axes du repère :



$$\begin{aligned} \vec{r} &= \rho \hat{e}_\rho + z \hat{e}_z \\ \vec{v} &= \dot{\rho} \hat{e}_\rho + \rho \dot{\phi} \hat{e}_\phi + \dot{z} \hat{e}_z \\ \vec{a} &= (\ddot{\rho} - \rho \dot{\phi}^2) \hat{e}_\rho + (\rho \ddot{\phi} + 2\dot{\rho} \dot{\phi}) \hat{e}_\phi + \ddot{z} \hat{e}_z \end{aligned}$$

$$\begin{cases} -mL\dot{\phi}^2 = F \cos\phi - T & \text{sur } \hat{e}_\rho \\ mL\ddot{\phi} = -F \sin\phi & \text{sur } \hat{e}_\phi \end{cases}$$

équation différentielle à résoudre pour $\phi(t)$ puis on peut tirer $T(t)$

Pendule mathématique (suite)

- Galilée observe que le mouvement d'un pendule (en particulier la période d'oscillation) ne dépend pas de la masse m :

⇒ pour que l'équation du mouvement soit indépendante de m , il faut que $F = mg$, où g est une constante !

Démo : Pendule simple # 483

$$\ddot{\phi} = -\frac{F}{mL} \sin\phi = -\frac{g}{L} \sin\phi$$

- Solution :

- Mouvement périodique, mais pas de solution analytique simple (intégrale elliptique)
- La période dépend de l'amplitude !

Démo : Influence de l'amplitude d'un pendule (gravité) sur la fréquence # 16

- Approximation dans le cas de petites oscillations :

$$\sin\phi \cong \phi \Rightarrow \ddot{\phi} \cong -\frac{g}{L} \phi$$

⇒ oscillateur harmonique de pulsation $\sqrt{\frac{g}{L}}$ et de période $2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

Energie d'un pendule (sans frottement)

$$\ddot{\phi} = -\frac{g}{L} \sin\phi \Rightarrow \ddot{\phi}\dot{\phi} = -\frac{g}{L} \sin\phi \dot{\phi} \Rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\dot{\phi}^2\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{g}{L} \cos\phi\right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - \frac{g}{L} \cos\phi \text{ est une constante (intégrale première)}$$

Donc:

$$\underbrace{\frac{1}{2}mL^2\dot{\phi}^2}_{\frac{1}{2}mv^2} - \underbrace{mgL\cos\phi}_{+mg(-x)} = \text{constante}$$

énergie cinétique + énergie potentielle = énergie mécanique totale

énergie potentielle dans le champ de pesanteur = $mg \times \text{hauteur}$

Cas général

Mouvement à une dimension d'un point matériel P soumis à une force ne dépendant que de la position (force conservative \Leftrightarrow énergie totale de P conservée)

$$m\ddot{x} = F(x) \Rightarrow m\ddot{x}\dot{x} = F(x)\dot{x} \Rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}m\dot{x}^2\right) = \frac{d}{dt}\left(\int F(x) dx\right)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + V(x) = \text{constante} \quad \text{où } V(x) = -\int F(x)dx, \quad F(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$

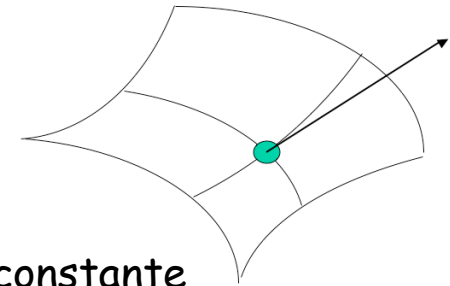
énergie cinétique + énergie potentielle = énergie mécanique totale

(Exemple : oscillateur harmonique)

$$F(x) = -kx \Rightarrow V(x) = \frac{1}{2}kx^2 + V(0)$$

Contraintes et forces de liaison

- Point matériel astreint à se déplacer sur une courbe ou une surface lisse, fixe ou en mouvement.



- Exemples :

- Pendule mathématique, contraint à rester à une distance constante d'un point fixe (i.e. sur une surface sphérique centrée sur ce point)
- Wagonnet d'un « grand huit », qui ne doit pas dérailler
- Goutte d'eau coulant sur le pare-brise d'une voiture
- Bille dans un anneau en rotation

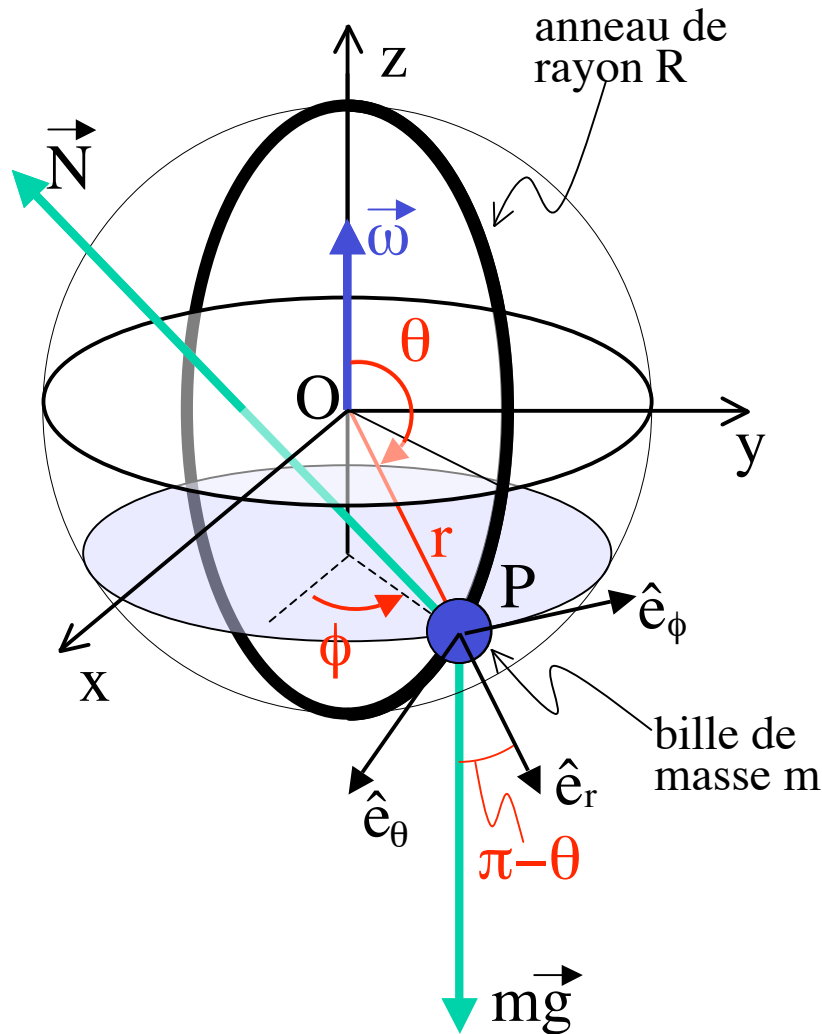
Démo : Glissière hémisphérique sur tige # 457

- Force de liaison = force exercée sur le point matériel pour qu'il obéisse à la contrainte géométrique

- toujours perpendiculaire à la courbe ou à la surface
- jamais de composante tangente à la courbe ou la surface (c'est-à-dire dans une direction où le point matériel peut bouger)
- la force de liaison devient nulle \Leftrightarrow la contrainte disparaît
 - Souvent on ne spécifie pas le mécanisme qui exerce la contrainte (tout ce passe comme si la surface ou la courbe exerçait la force de liaison)
 - Le force de liaison est a priori inconnue ; elle fait partie du problème à résoudre
 - La surface ou la courbe peut exercer une force tangente, mais ce n'est pas une force de liaison (par exemple force de frottement)

Bille dans un anneau en rotation

Démo : Glissière hémisphérique sur tige # 457



Référentiel fixe dans le laboratoire

Repère lié au référentiel: $Oxyz$

Vitesse angulaire de l'anneau : $\vec{\omega} = \omega \hat{z}$

Coordonnées sphériques : r, θ, ϕ

Contrainte : la bille reste sur l'anneau

$$\begin{cases} r = R, & \dot{r} = 0, & \ddot{r} = 0 \\ \dot{\phi} = \omega, & \ddot{\phi} = 0 \end{cases}$$

Si bille en équilibre : $\dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0$

Repère en mvt avec la bille : $P\hat{e}_r\hat{e}_\theta\hat{e}_\phi$

Forces s'exerçant sur la bille :

$$\begin{cases} \text{poids de la bille } m\vec{g} = -mg \hat{z} \\ \text{force de liaison } \vec{N} \text{ telle que } \vec{N} \cdot \hat{e}_\theta = 0 \end{cases}$$

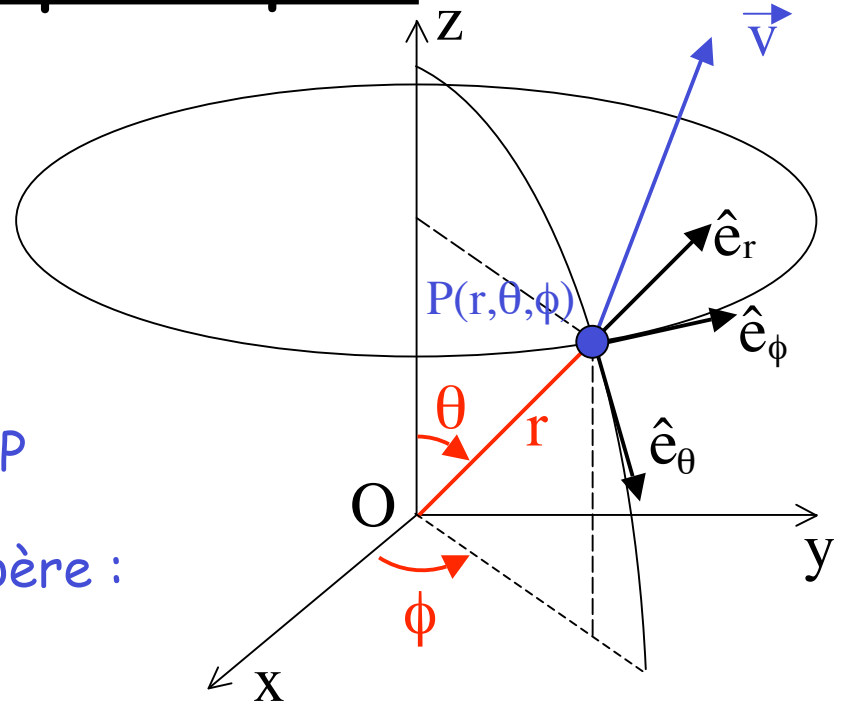
Vitesse et accélération en coordonnées sphériques

- Point matériel P en mouvement
- Coordonnées sphériques :

$$\begin{cases} r = r(t) \geq 0 \\ \theta = \theta(t) \in [0, \pi] \\ \phi = \phi(t) \in [0, 2\pi] \end{cases} \begin{cases} x = r \sin\theta \cos\phi \\ y = r \sin\theta \sin\phi \\ z = r \cos\theta \end{cases}$$

- On considère un repère lié au point P (repère associé) : $P\hat{e}_r\hat{e}_\theta\hat{e}_\phi$
- Vitesse angulaire de rotation du repère :

$$\vec{\omega} = \dot{\phi} \hat{z} + \dot{\theta} \hat{e}_\phi$$



- Preuve: en un temps dt , un vecteur fixe dans le repère subit :
 - une rotation infinitésimale d'angle $d\phi$ autour de l'axe z : $d\vec{r}_1 = d\phi \hat{z} \wedge \vec{r}$
 - une rotation infinitésimale d'angle $d\theta$ autour de e_ϕ : $d\vec{r}_2 = d\theta \hat{e}_\phi \wedge \vec{r}$
 d'où rotation infinitésimale totale : $d\vec{r} = d\vec{r}_1 + d\vec{r}_2 = (d\phi \hat{z} + d\theta \hat{e}_\phi) \wedge \vec{r}$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \underbrace{\left(\frac{d\phi}{dt} \hat{z} + \frac{d\theta}{dt} \hat{e}_\phi \right)}_{\vec{\omega}} \wedge \vec{r}$$

Vitesse et accélération en coordonnées sphériques (suite)

- Vitesse angulaire de rotation du repère :

$$\vec{\omega} = \dot{\phi} \hat{z} + \dot{\theta} \hat{e}_\phi$$

- Dérivées des vecteurs de base :

$$\dot{\hat{e}}_r = \vec{\omega} \wedge \hat{e}_r = \dot{\theta} \hat{e}_\theta + \dot{\phi} \sin\theta \hat{e}_\phi$$

$$\dot{\hat{e}}_\theta = \vec{\omega} \wedge \hat{e}_\theta = -\dot{\theta} \hat{e}_r + \dot{\phi} \cos\theta \hat{e}_\phi$$

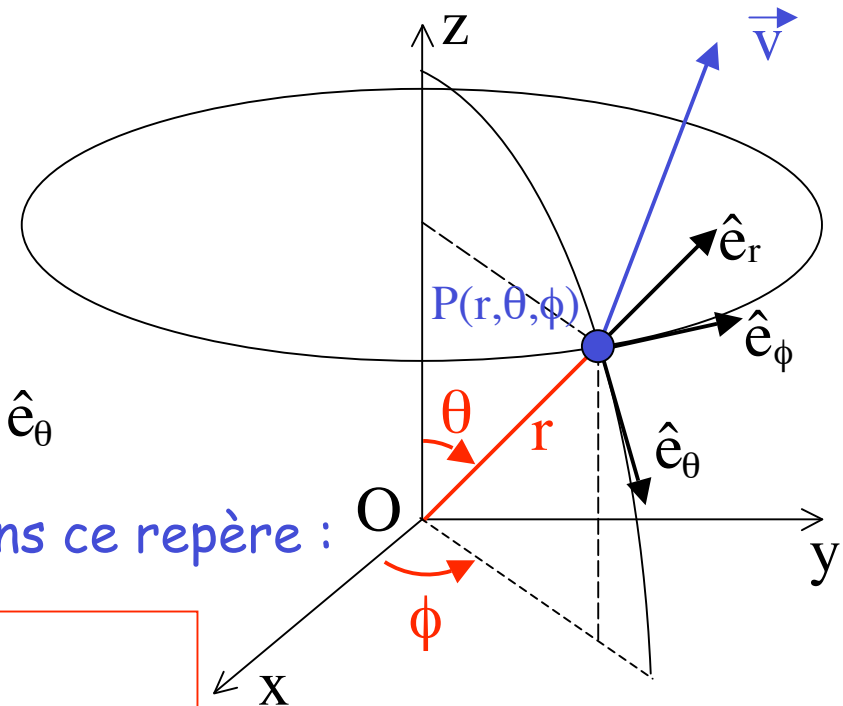
$$\dot{\hat{e}}_\phi = \vec{\omega} \wedge \hat{e}_\phi = -\dot{\phi} \sin\theta \hat{e}_r - \dot{\phi} \cos\theta \hat{e}_\theta$$

- Position, vitesse et accélération dans ce repère :

$$\vec{r} = r \hat{e}_r$$

$$\vec{v} = \dot{r} \hat{e}_r + r\dot{\theta} \hat{e}_\theta + r\dot{\phi} \sin\theta \hat{e}_\phi$$

$$\vec{a} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2 \sin^2\theta) \hat{e}_r + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\dot{\phi}^2 \sin\theta \cos\theta) \hat{e}_\theta + (r\ddot{\phi} \sin\theta + 2\dot{r}\dot{\phi} \sin\theta + 2r\dot{\phi}\dot{\theta} \cos\theta) \hat{e}_\phi$$



accélération radiale
accélération méridienne
accélération transverse

Petite parenthèse sur les coordonnées généralisées

On appelle *coordonnées généralisées* tout ensemble de k grandeurs tel que la donnée de (q_1, \dots, q_k, t) détermine univoquement la position du système à l'instant t

- **Définition** : k variables q_i déterminant la position du point matériel :

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(q_1(t), q_2(t), \dots, q_k(t))$$

- **Vitesse en coordonnées généralisées** : $\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt} = \sum_{i=1}^k \frac{\partial \vec{r}}{\partial q_i} \dot{q}_i$
(et similairement pour l'accélération)

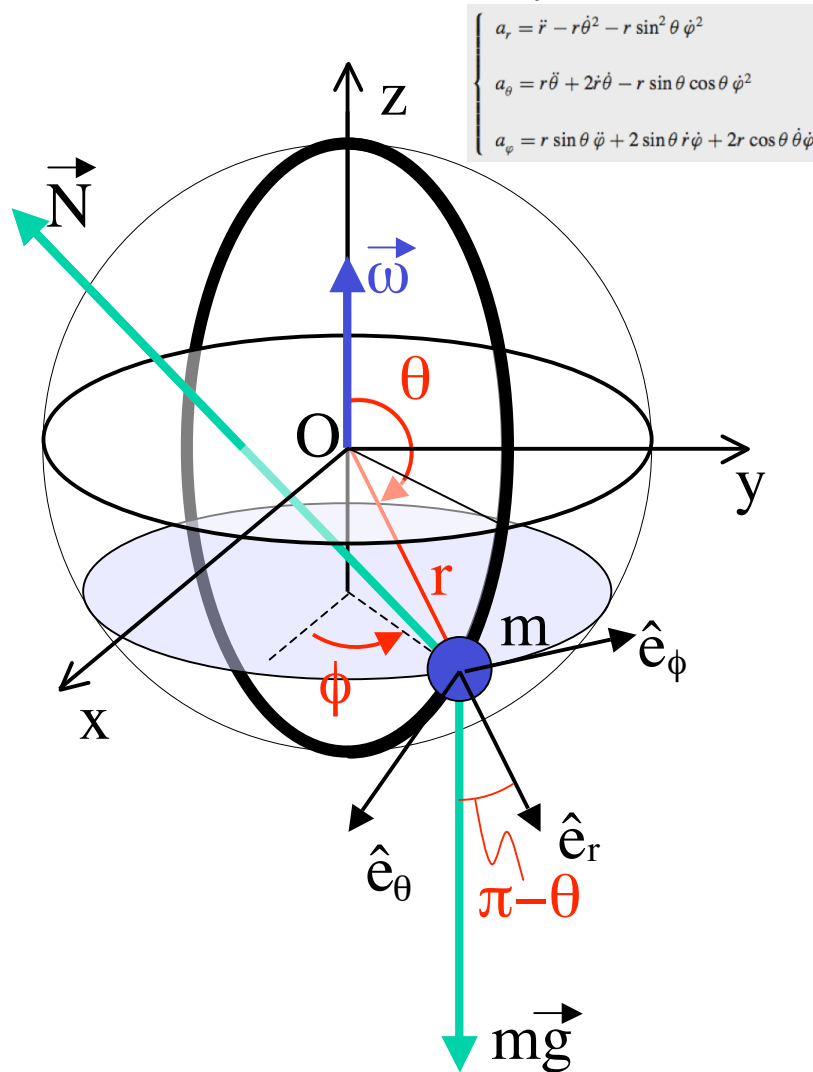
Dérivée partielle par rapport à q_i $\frac{\partial \vec{r}}{\partial q_i} = \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(\dots, q_i + \Delta q_i, \dots) - \vec{r}(\dots, q_i, \dots)}{\Delta q_i}$

- **Exemple** : coordonnées sphériques r, θ, ϕ

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(r(t), \theta(t), \phi(t)) = \begin{pmatrix} r \sin\theta \cos\phi \\ r \sin\theta \sin\phi \\ r \cos\theta \end{pmatrix} \begin{matrix} \nearrow \\ \nearrow \end{matrix} \begin{matrix} \text{en composantes} \\ \text{cartésiennes} \end{matrix}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{\partial \vec{r}}{\partial r} \dot{r} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \vec{r}}{\partial \phi} \dot{\phi} = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\phi \dot{r} + r \cos\theta \cos\phi \dot{\theta} - r \sin\theta \sin\phi \dot{\phi} \\ \sin\theta \sin\phi \dot{r} + r \cos\theta \sin\phi \dot{\theta} + r \sin\theta \cos\phi \dot{\phi} \\ \cos\theta \dot{r} - r \sin\theta \dot{\theta} \end{pmatrix}$$

Bille en équilibre dans un anneau en rotation



$$\begin{cases} a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\sin^2\theta\dot{\phi}^2 \\ a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\sin\theta\cos\theta\dot{\phi}^2 \\ a_\phi = r\sin\theta\ddot{\phi} + 2\sin\theta\dot{r}\dot{\phi} + 2r\cos\theta\dot{\theta}\dot{\phi} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2 \sin^2\theta) \hat{e}_r \\ &\quad + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\dot{\phi}^2 \sin\theta \cos\theta) \hat{e}_\theta \\ &\quad + (r\dot{\phi} \sin\theta + 2\dot{r}\dot{\phi} \sin\theta + 2r\dot{\phi}\dot{\theta} \cos\theta) \hat{e}_\phi \\ &= -R\omega^2 \sin^2\theta \hat{e}_r - R\omega^2 \sin\theta \cos\theta \hat{e}_\theta \\ &\quad \text{car } r = R = \text{cte}, \dot{\phi} = \omega = \text{cte} \text{ et } \theta = \text{cte} \text{ (équilibre)} \end{aligned}$$

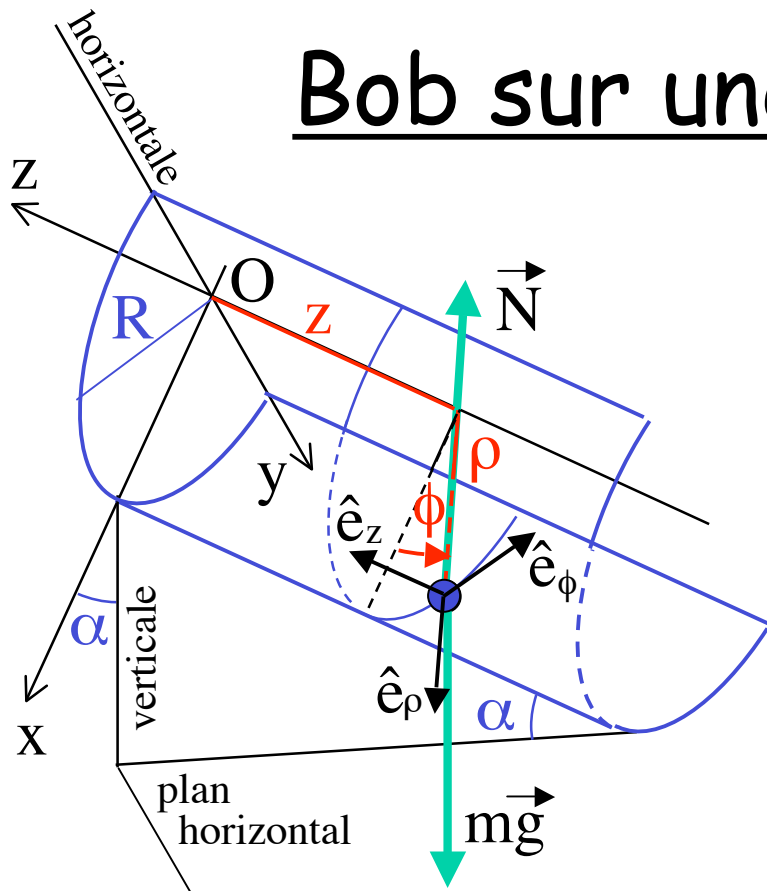
$$\begin{cases} m\vec{g} = -mg \cos\theta \hat{e}_r + mg \sin\theta \hat{e}_\theta \\ \vec{N} = N_r \hat{e}_r + N_\phi \hat{e}_\phi \end{cases}$$

2ème loi de Newton: $\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}$

$$\begin{cases} \text{sur } \hat{e}_r: & N_r - mg \cos\theta = -mR\omega^2 \sin^2\theta \\ \text{sur } \hat{e}_\theta: & mg \sin\theta = -mR\omega^2 \sin\theta \cos\theta \\ \text{sur } \hat{e}_\phi: & N_\phi = 0 \end{cases}$$

$$\sin\theta = 0 \text{ (c-à-d } \theta = 0 \text{ ou } \pi) \text{ ou } \cos\theta = -\frac{g}{R\omega^2} \left(\text{seulement si } \omega \geq \sqrt{\frac{g}{R}} \right)$$

Bob sur une piste cylindrique



Repère lié à la piste (référentiel) : $Oxyz$

Coordonnées cylindriques : ρ, ϕ, z

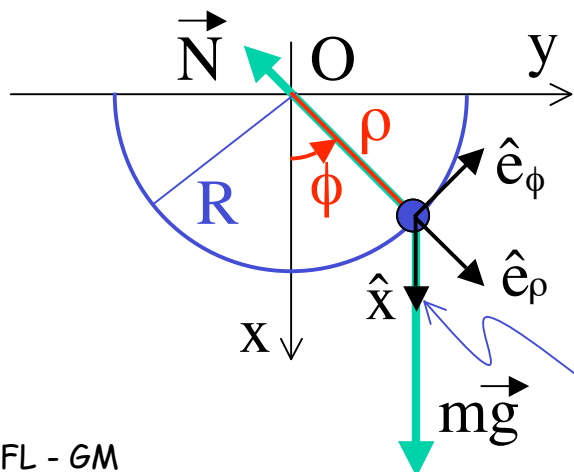
Contrainte: le bob reste sur la piste

$$\rho = R, \quad \dot{\rho} = 0, \quad \ddot{\rho} = 0$$

Repère en mvt avec le bob : $P\hat{e}_\rho\hat{e}_\phi\hat{e}_z$

Forces :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{poids } m\vec{g} = mg (\cos\alpha \hat{x} - \sin\alpha \hat{z}) \\ \text{force de liaison } \vec{N} = -N \hat{e}_\rho \end{array} \right.$$



$$\hat{x} = \cos\phi \hat{e}_\rho - \sin\phi \hat{e}_\phi$$

$$m\vec{g} = mg (\cos\alpha \cos\phi \hat{e}_\rho - \cos\alpha \sin\phi \hat{e}_\phi - \sin\alpha \hat{z})$$

angle α entre \hat{x} et $m\vec{g}$

Bob sur une piste cylindrique (suite)

$$\begin{cases} a_\rho = \ddot{\rho} - \rho\dot{\phi}^2 \\ a_\phi = \rho\ddot{\phi} + 2\dot{\rho}\dot{\phi} \\ a_z = \ddot{z} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (\ddot{\rho} - \rho\dot{\phi}^2) \hat{e}_\rho + (\rho\ddot{\phi} + 2\dot{\rho}\dot{\phi}) \hat{e}_\phi + \ddot{z} \hat{e}_z \\ &= -R\dot{\phi}^2 \hat{e}_\rho + R\ddot{\phi} \hat{e}_\phi + \ddot{z} \hat{e}_z \end{aligned}$$

$$\vec{N} = -N \hat{e}_\rho$$

$$m\vec{g} = mg (\cos\alpha \cos\phi \hat{e}_\rho - \cos\alpha \sin\phi \hat{e}_\phi - \sin\alpha \hat{e}_z)$$

2ème loi de Newton: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}$

$$\begin{cases} \text{sur } \hat{e}_\rho : & -mR\dot{\phi}^2 = mg \cos\alpha \cos\phi - N & \text{(i)} \\ \text{sur } \hat{e}_\phi : & mR\ddot{\phi} = -mg \cos\alpha \sin\phi & \text{(ii)} \\ \text{sur } \hat{e}_z : & m\ddot{z} = -mg \sin\alpha & \text{(iii)} \end{cases}$$

(iii) \Rightarrow $z(t)$: mouvement uniformément accéléré
(pesanteur = $g \sin\alpha$)

(ii) \Rightarrow $\phi(t)$: mouvement d'un pendule mathématique
(pesanteur = $g \cos\alpha$, longueur = R)

(i)+(ii) \Rightarrow $N(t) = 3 mg \cos\alpha \cos\phi(t) + A$
(A = constante d'intégration déterminée par les conditions initiales)

Une brève histoire de la gravitation



Une brève histoire de la gravitation

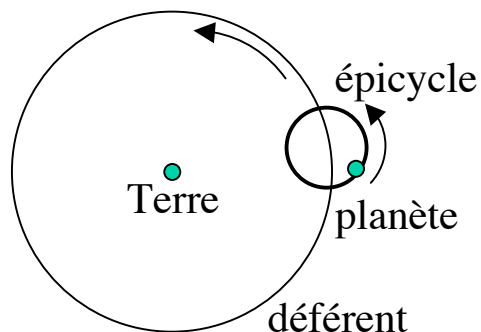
Grèce antique



Une brève histoire de la gravitation

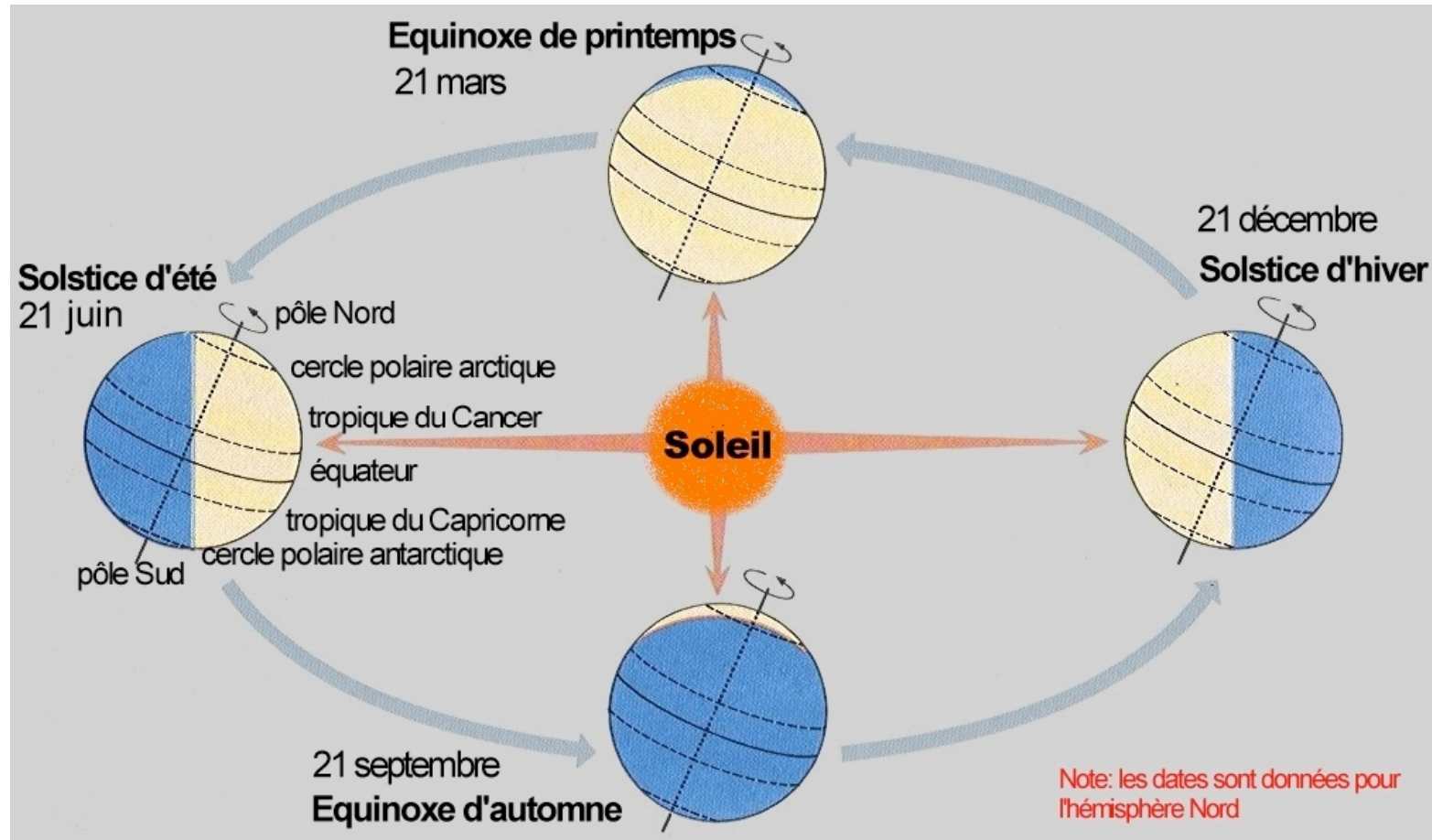
Mouvement des corps célestes (Grèce antique)

- **Eudoxe de Cnide (405–335 av. J-C), Aristote (384–322 av. J-C)**
 - Soleil et planètes sur des sphères concentriques centrées sur la Terre
- **Aristarque de Samos (310–230 av. J-C) 1er système héliocentrique**
 - Terre en rotation sur elle-même
 - Terre et planètes sur des orbites circulaires autour du Soleil
(idées en contradiction avec l'époque, ne parviennent pas à s'imposer)
- **Ptolémée (~100 – ~170 ap J-C), inspiré par Hipparque (~140 av J-C)**
 - Terre au centre, Soleil à vitesse constante sur un cercle légèrement décentré
 - Planètes à vitesse constante sur des cercles (épicycles) dont les centres sont à vitesse constante sur d'autres cercles (déférents) centrés sur la Terre



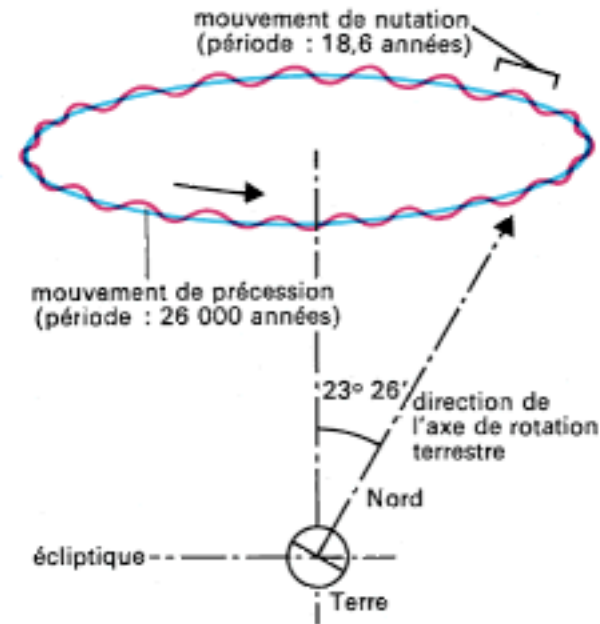
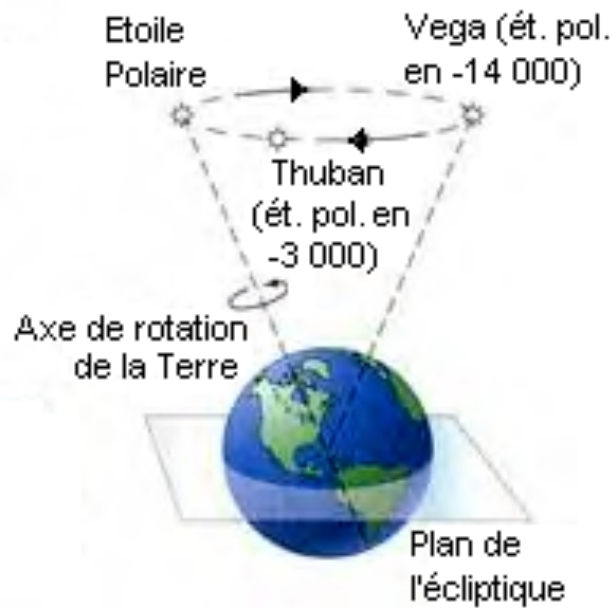
En accord avec des observations de qualité médiocre, les modèles géocentriques de Ptolémée et d'Aristote ont prévalu pendant quinze siècles, i.e., durant tout le Moyen Age jusqu'au 16e siècle !

Equinoxes et solstices



Précession des équinoxes

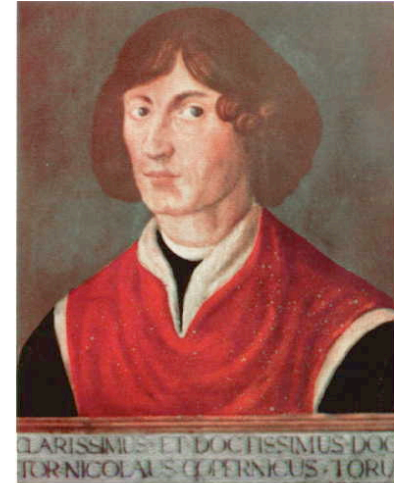
Hipparque (190-120 av J-C) :
observations (169 ans d'archives) \Rightarrow précession des équinoxes



Nicolas Copernic (1473–1543)

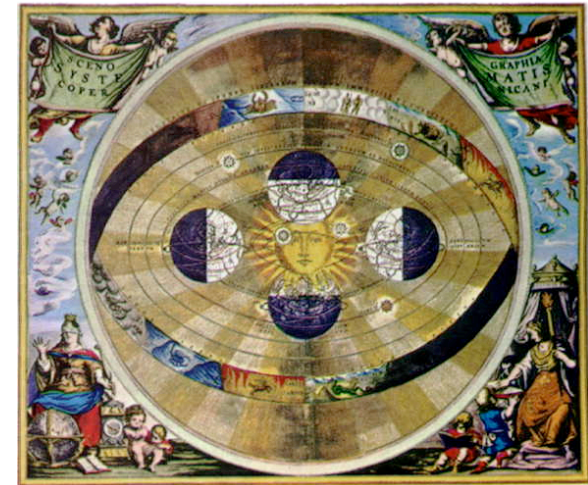
polonais

- *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543)
 - Modèle héliocentrique (inspiré par Aristarque)
 - Remet en question la vision géocentrique et le « modèle des deux sphères concentriques » (la sphère terrestre et la sphère des étoiles fixes)



Révolution de la pensée :
la Terre (et donc l'être humain)
n'est plus au centre de l'Univers !

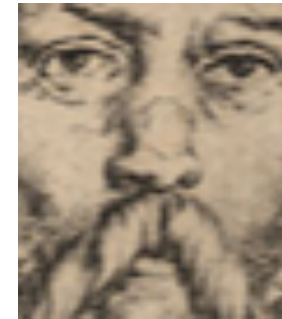
⇒ conflit avec l'Eglise



Qualitativement, explication plus simple du mouvement des planètes (mouvement rétrograde expliqué par le mouvement de la Terre) ... mais toujours des cercles !

« ... le mouvement des corps célestes est circulaire. En effet, la mobilité propre de la sphère est de tourner en rond : par cet acte même [...] elle exprime sa forme, celle du corps le plus simple ... »

Tycho Brahe (1546-1601)



Jacob de Gheyn (1565-1629)

La Terre ou le Soleil au centre de l'Univers ?

- **Claude Ptolémée** (110-160) Alexandrie : système géocentrique, avec déférents et épicycles (pdt 1500 ans)
- **Nicolas Copernic** (1473-1543): De Revolutionibus Orbium Coelestium
- **Tycho Brahe** (1546-1601) : grand observateur Uraniborg

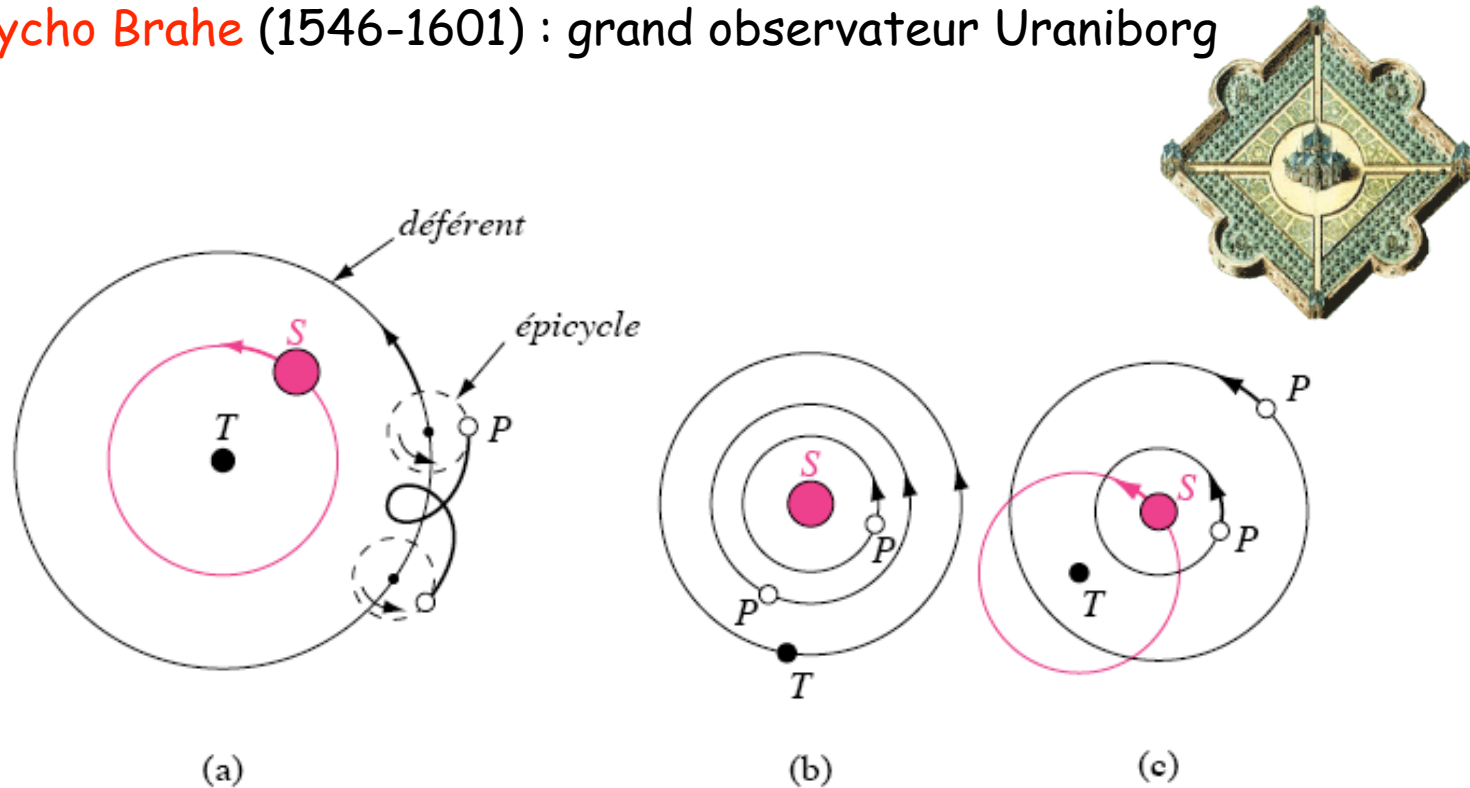


Fig. 6.9 Modèles du système solaire : (a) Ptolémée ; (b) Copernic ; (c) Tycho Brahé.

Tycho Brahe (1546–1601) et Johannes Kepler (1571–1630)

danois

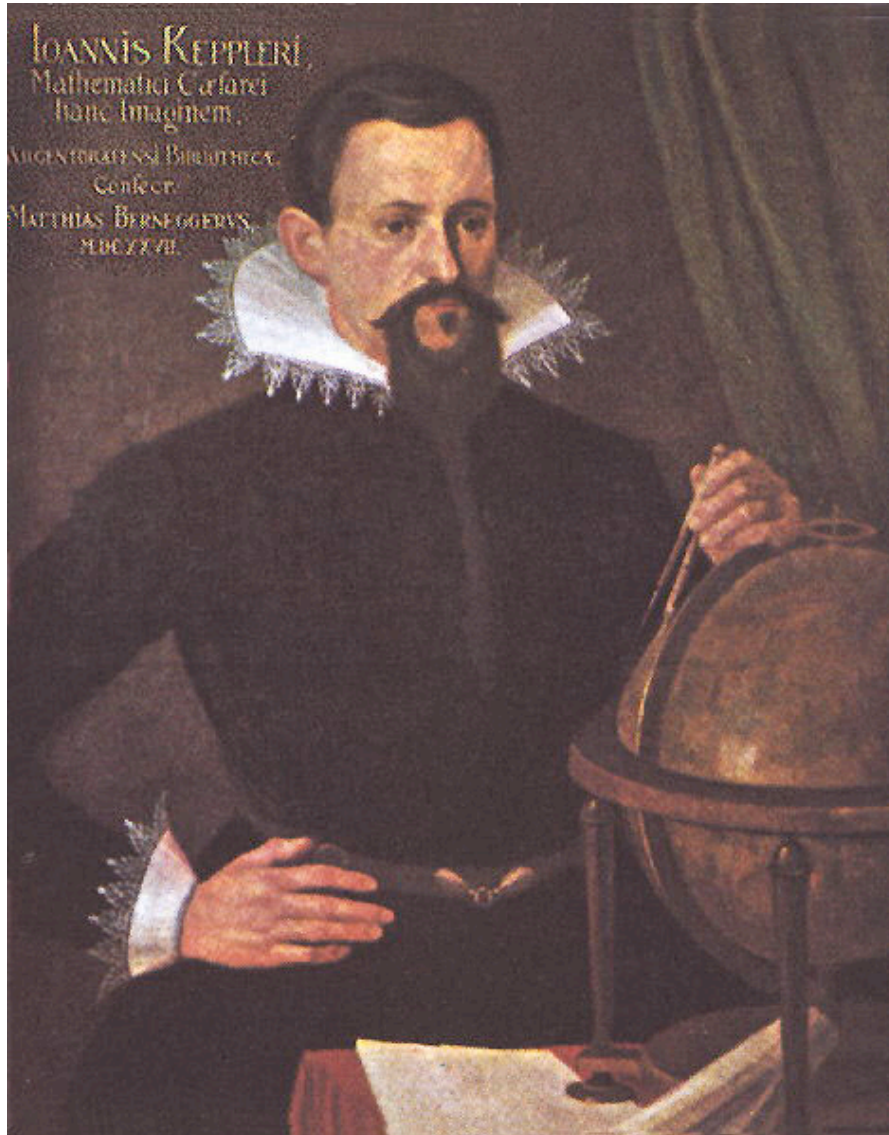
allemand

- Tente de réconcilier les points de vue de l'Eglise et de Copernic (Soleil tourne autour de la Terre immobile et planètes tournent autour du Soleil)
- Réalise l'importance de faire des mesures précises du mouvement des planètes (approche scientifique)
- Consacre de nombreuses années à l'observation et la mesure des mouvements planétaires



- Partisan du système héliocentrique de Copernic
- Poursuit l'analyse des mesures du mouvement de Mars faite(s) par son maître et ami Tycho Brahe
- Remarque que si l'orbite de Mars est un cercle, le Soleil ne peut pas se trouver au centre de ce cercle ... et finalement que l'orbite de Mars n'est pas un cercle

Johannes Kepler (1571-1630)



1^{ère} et 2^e lois publiées
dans *Astronomia Nova* (1609)

3^e loi publiée dans
Harmonices mundi (1619).

De l'enterrement de Johannes Kepler (1571-1630) ou de la qualité des sources d'information

Petite digression sur la qualité des sources d'informations. Voici deux versions différentes de l'enterrement de Kepler, dont la mort survient à Regensburg, lors d'un voyage :

(i) *Johannes Kepler : Life and Letters* par Carola Baumgardt, avec une introduction d'Albert Einstein (1951). "He died there, after a short illness, on November 15, 1630. [...] The Reichstag, assembled in Regensburg in 1630, was far too busy with problems which seemed unfortunately more important, primarily the enforcement of the abdication of Wallenstein as the commander in chief of the Imperial Army. However, the funeral procession of the great astronomer was attended by many members of this illustrious Imperial Diet in Regensburg."

(ii) *Johannes Kepler : Le visionnaire de Prague* par Henriette Chardak (2004). "Kepler meurt le 15 novembre 1630. Le 19, ce véritable défenseur de Copernic est enterré à la sauvette, comme un chien, dans la fosse commune, au cimetière Saint-Pierre, hors de la ville. Personne n'accompagne sa dépouille. L'aubergiste ne connaît pas le nom du défunt. Deux mois plus tard, il le trouvera écrit à côté d'un médaillon sur un livre de son ancien propriétaire. Suzanne apprend la mort de son époux à la fin du mois de janvier."

Ces deux descriptions du même enterrement sont pour le moins divergentes. Qui croire ? La plus récente ? Elles illustrent l'importance de la qualité des sources d'information.



Lois de Képler

- 2ème loi : (lois des aires, 1609)
Le rayon-vecteur du Soleil à une planète balaie des aires égales en des temps égaux.
- 1ère loi : (1609)
Les trajectoires des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.
- 3ème loi : (1619)
Les carrés des périodes de révolution sont proportionnels au cube des grands axes :

Découverte pour la planète Terre en supposant une orbite circulaire

Découverte en 1604 pour la planète Mars en supposant la loi des aires

Note :

Rapport des axes de l'ellipse :

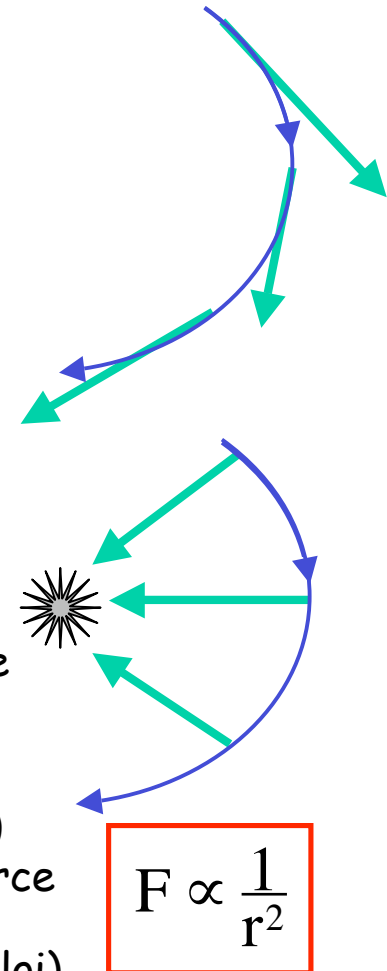
0.996 pour Mars

0.99986 pour la Terre

$$\frac{(\text{période})^2}{(\text{grand axe})^3} = \text{constante}$$

Galilée (1564-1642), Newton (1642-1727) et le développement de la dynamique

- **Qu'est-ce qui fait bouger les planètes ?**
 - **Avant Galilée/Newton :**
 - Le mouvement « naturel » d'un corps est l'immobilité
 - Une planète doit constamment être poussée ou tirée (par « miracle ») dans la direction de son mouvement, autrement elle s'arrête
 - **Après Galilée/Newton :**
 - Le mouvement « naturel » d'un corps est rectiligne uniforme ; une planète dévie de sa ligne droite si une force non tangentielle agit sur elle
- **Newton tire les conséquences des lois de Képler :**
 - ❶ La 2ème loi et la planéité de l'orbite implique que la force et donc l'accélération subies par une planète pointent toujours vers le Soleil :
⇒ cette **force centrale attractive** est exercée par le Soleil (action instantanée à distance, comme par miracle)
 - ❷ En utilisant de plus la 3ème loi, Newton montre que la force est **proportionnelle à $1/r^2$** (r = distance Soleil-planète)
 - ❸ A partir de là, il prédit une **trajectoire elliptique !** (1ère loi)



loi de la
gravitation
universelle

Two hundred and fifty years earlier, Isaac Newton wrote²:

... that one body may act upon another at a distance through a vacuum, without the mediation of anything else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, is to me so great an absurdity that I believe no man who has in philosophical matters a competent faculty of thinking can ever fall into it.

Newton was writing about his theory of gravity, and it was Einstein who showed in 1915 that the action of gravity is not instantaneous but is caused by a 'mediation' signal (the warping of space-time), which moves with a finite speed. Salart and colleagues' experiment¹ tests whether the interaction between entangled particles is also conveyed by a mediating signal, and if so, how fast this signal must travel.



EPFL - LABORATOIRE
D'ASTROPHYSIQUE

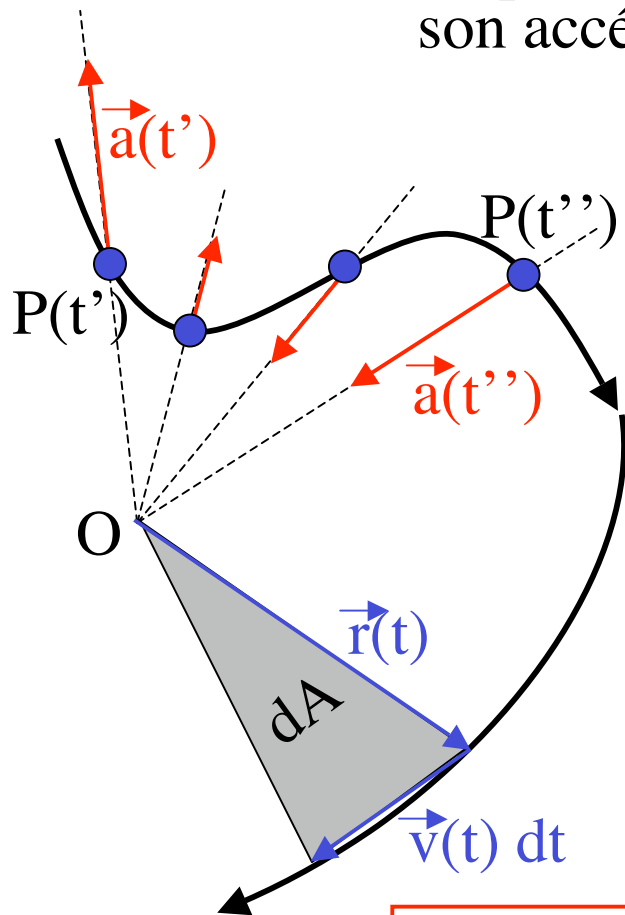


ORATOIRE
HYSIQUE

Mouvement central et loi des aires

Définition : un point P de masse m a un **mouvement central** si son accélération passe toujours par un même point O

$$\Leftrightarrow \vec{r}(t) = \overrightarrow{OP} \text{ reste toujours parallèle à } \vec{a}(t)$$



Conséquences:

- Le vecteur **moment cinétique** $\vec{L} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$ reste **constant** et le mouvement est plan :

$$\frac{d}{dt}(\vec{r} \wedge m\vec{v}) = \vec{v} \wedge m\vec{v} + \vec{r} \wedge m\vec{a} = 0$$

- L'aire balayée par unité de temps par le vecteur $\vec{r}(t)$ est constante (loi des aires) :

$$dA = \frac{1}{2} r v dt \sin(\vec{r}, \vec{v}) \Rightarrow \frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} |\vec{r} \wedge \vec{v}| = \frac{L}{2m}$$

Mouvement central



Moment cinétique constant



Loi des aires + mouvement dans un plan

par rapport à un certain point O fixe