

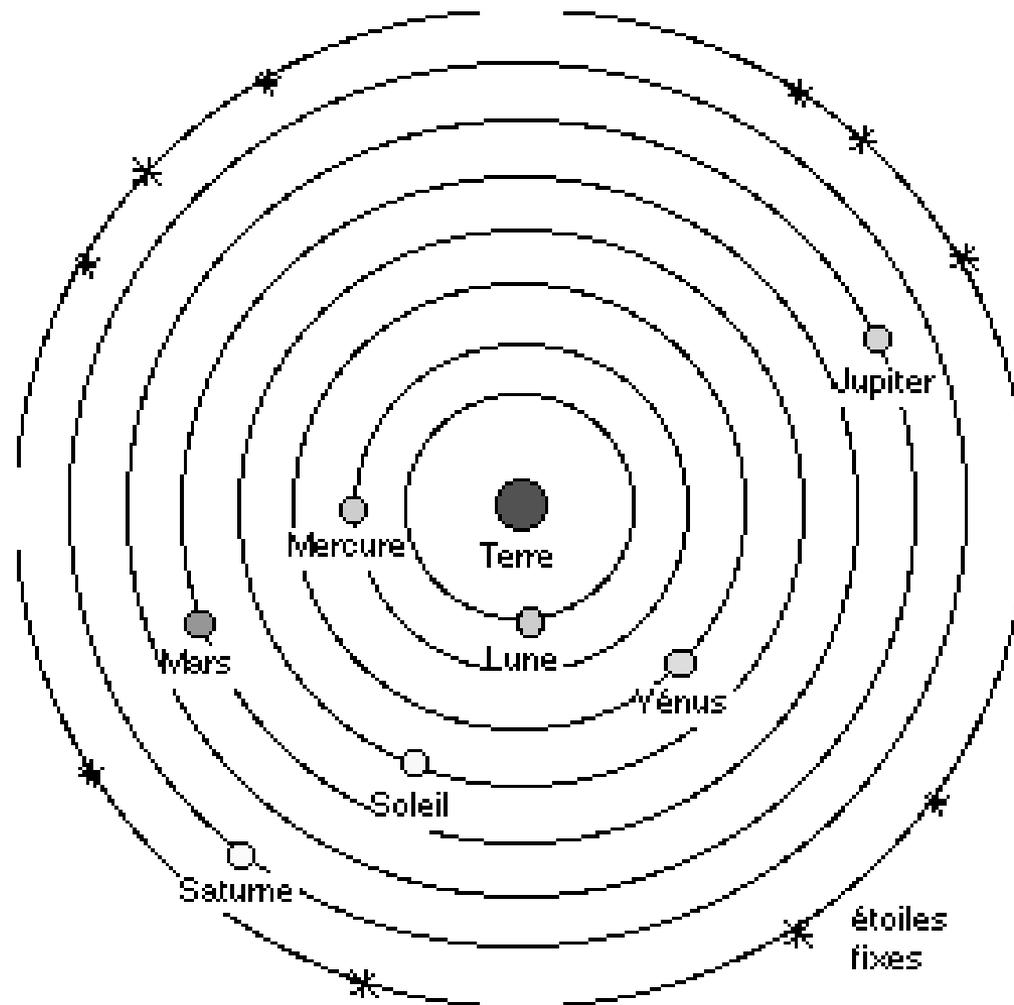


# La mécanique céleste et la relativité générale

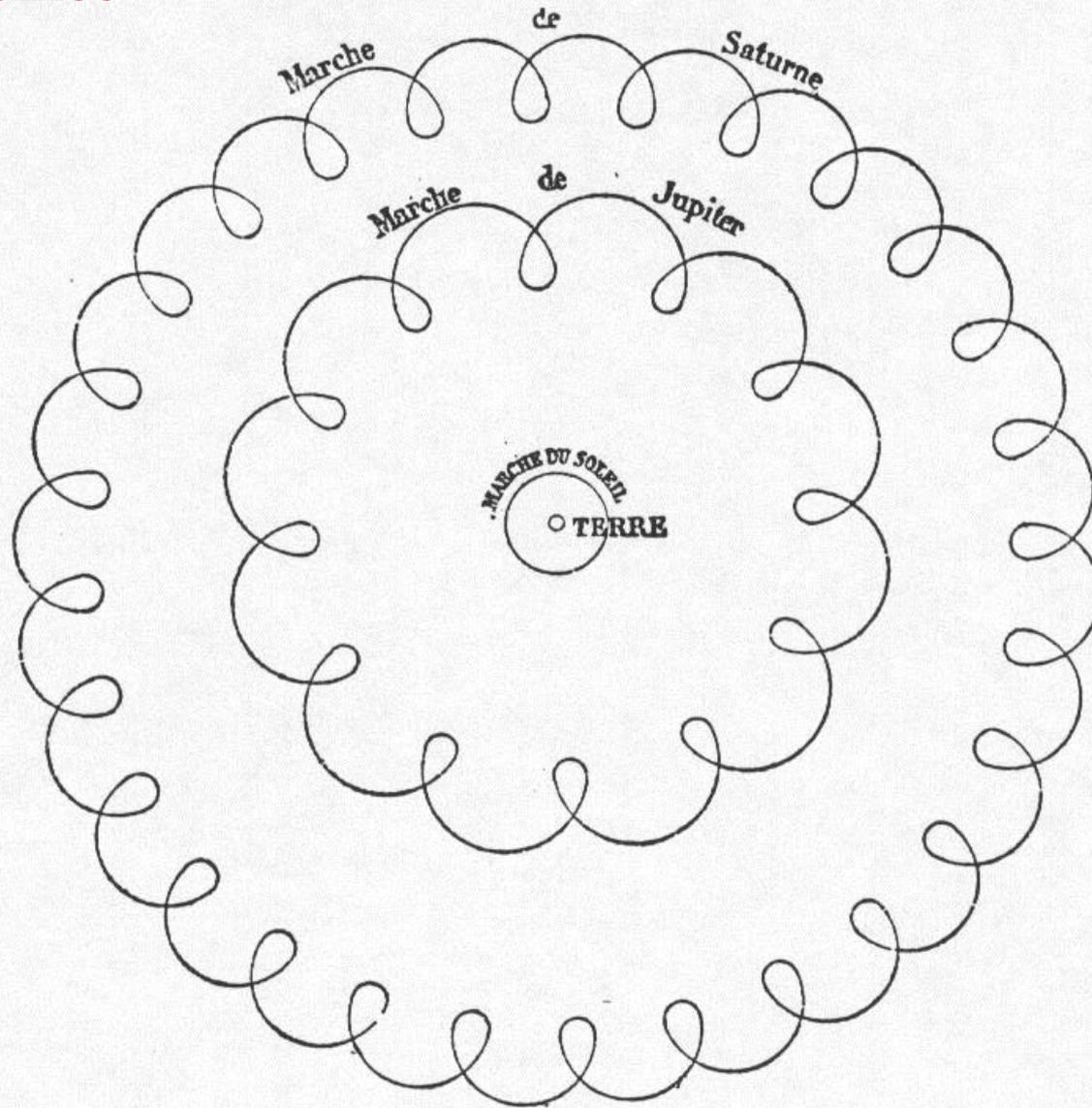
École d'été « l'univers à la portée de tous »

23-26 août 2017

# Rappel: Aristote



# Rappel: Ptolémée

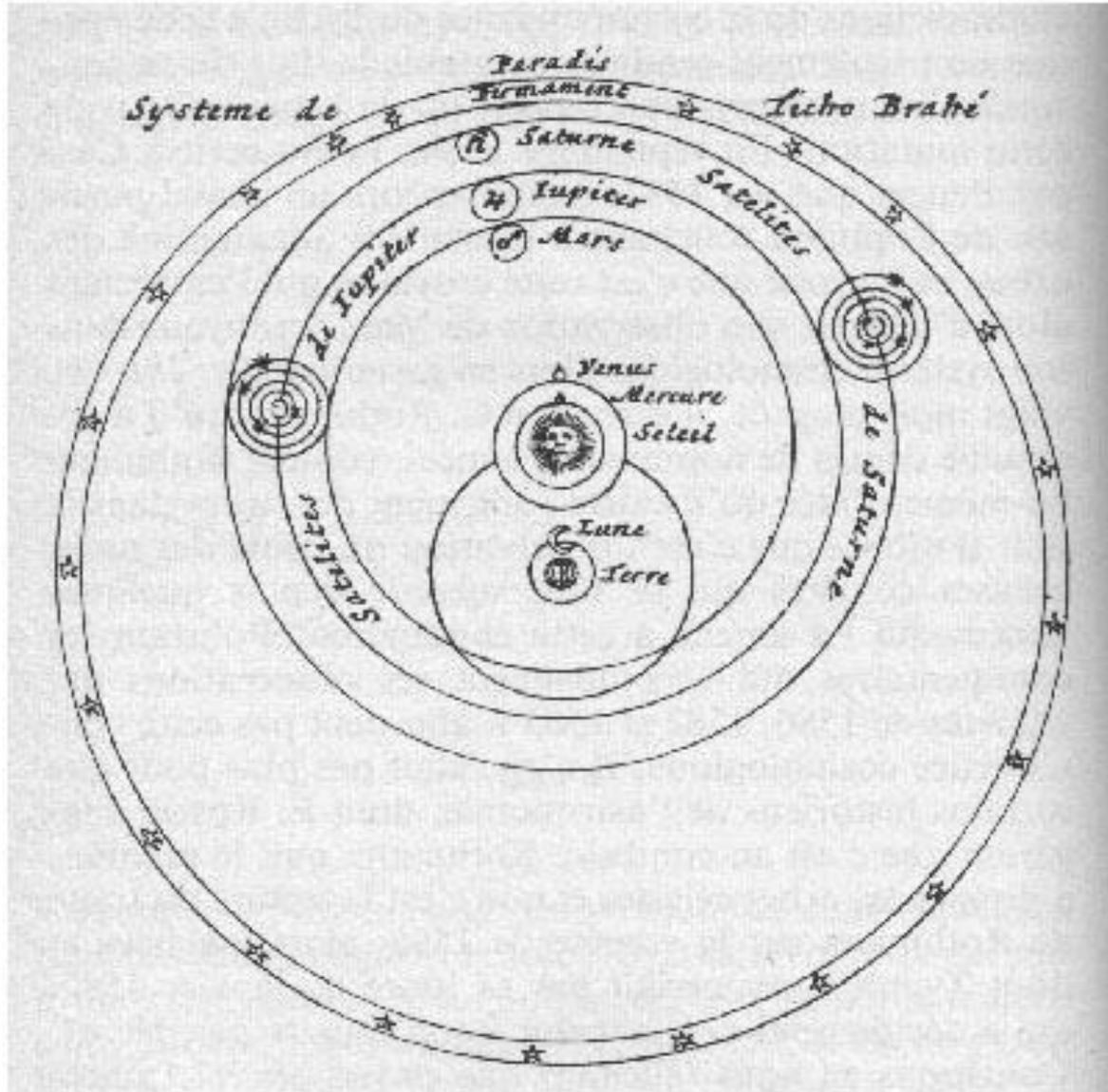


ÉPICYCLES DE PTOLÉMÉE.

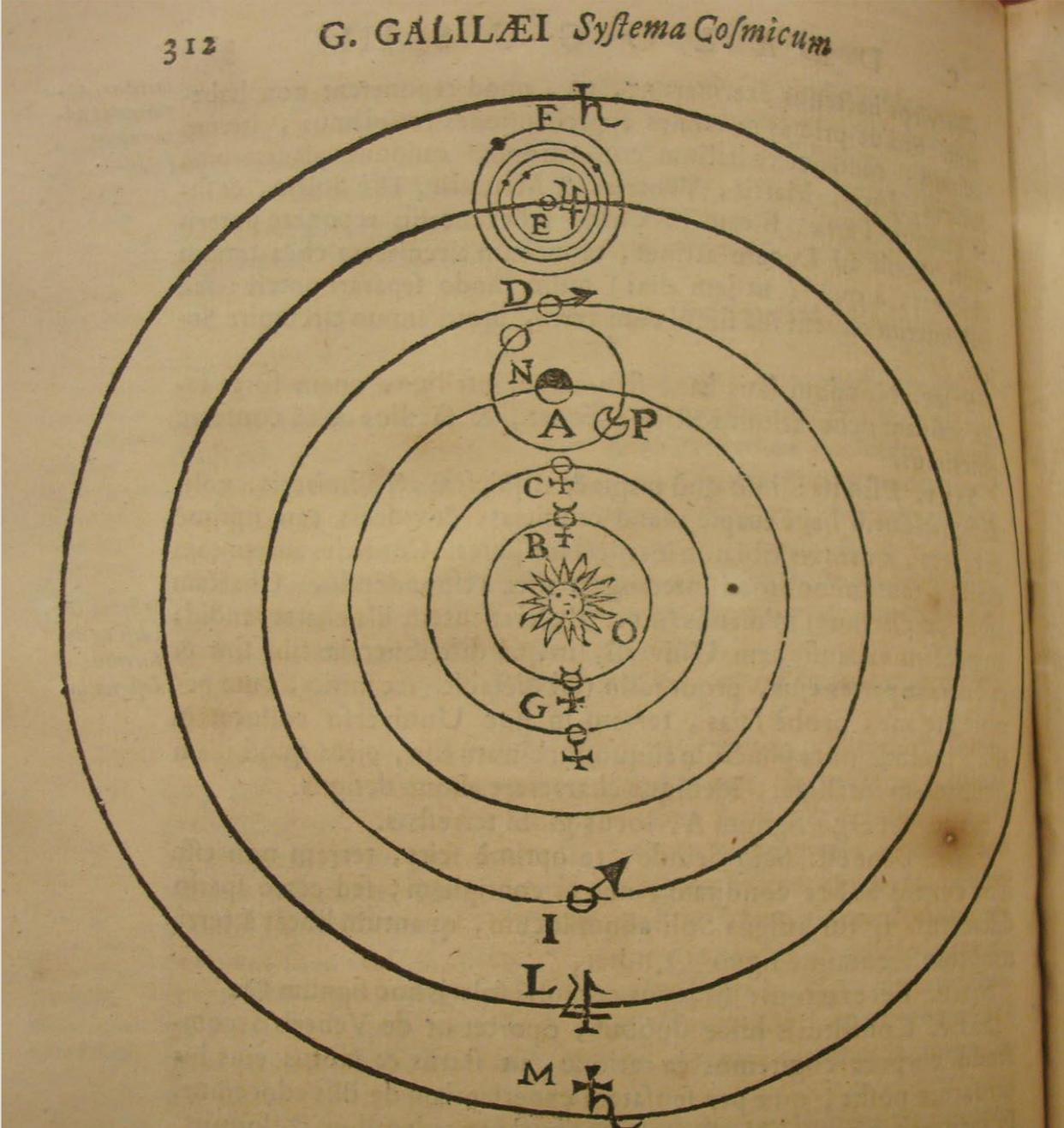
# Rappel: Copernic

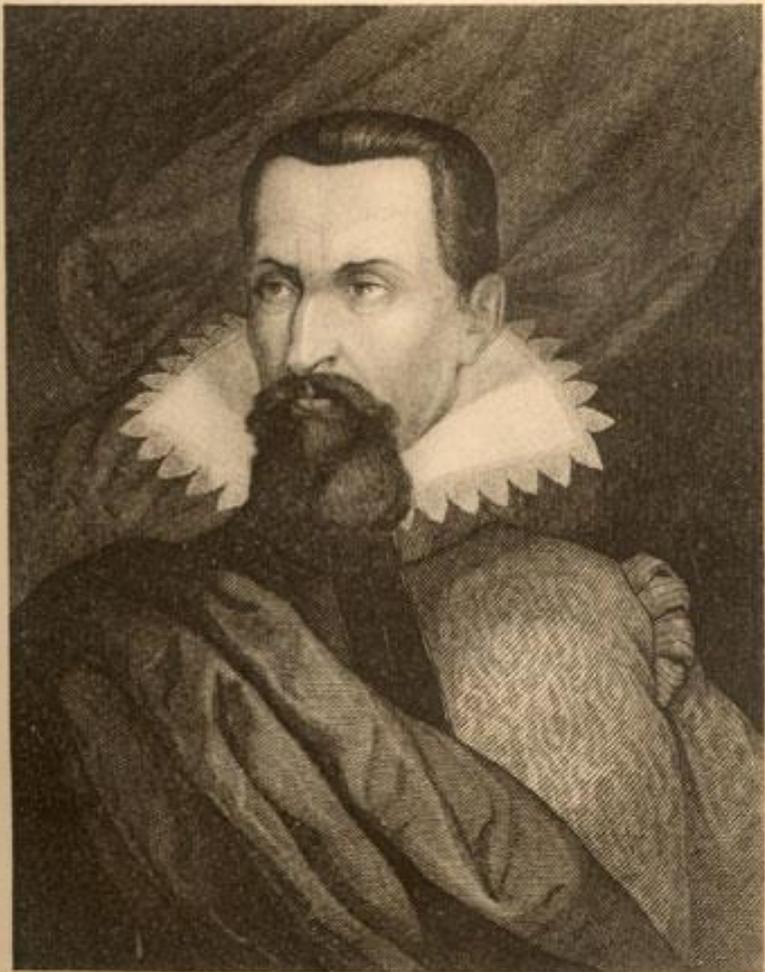


# Rappel: Tycho-Brahé



# Rappel: Galilée





KÉPLER  
1571-1630



Galilée (1564-1642)

# Rappel: les lois de Kepler

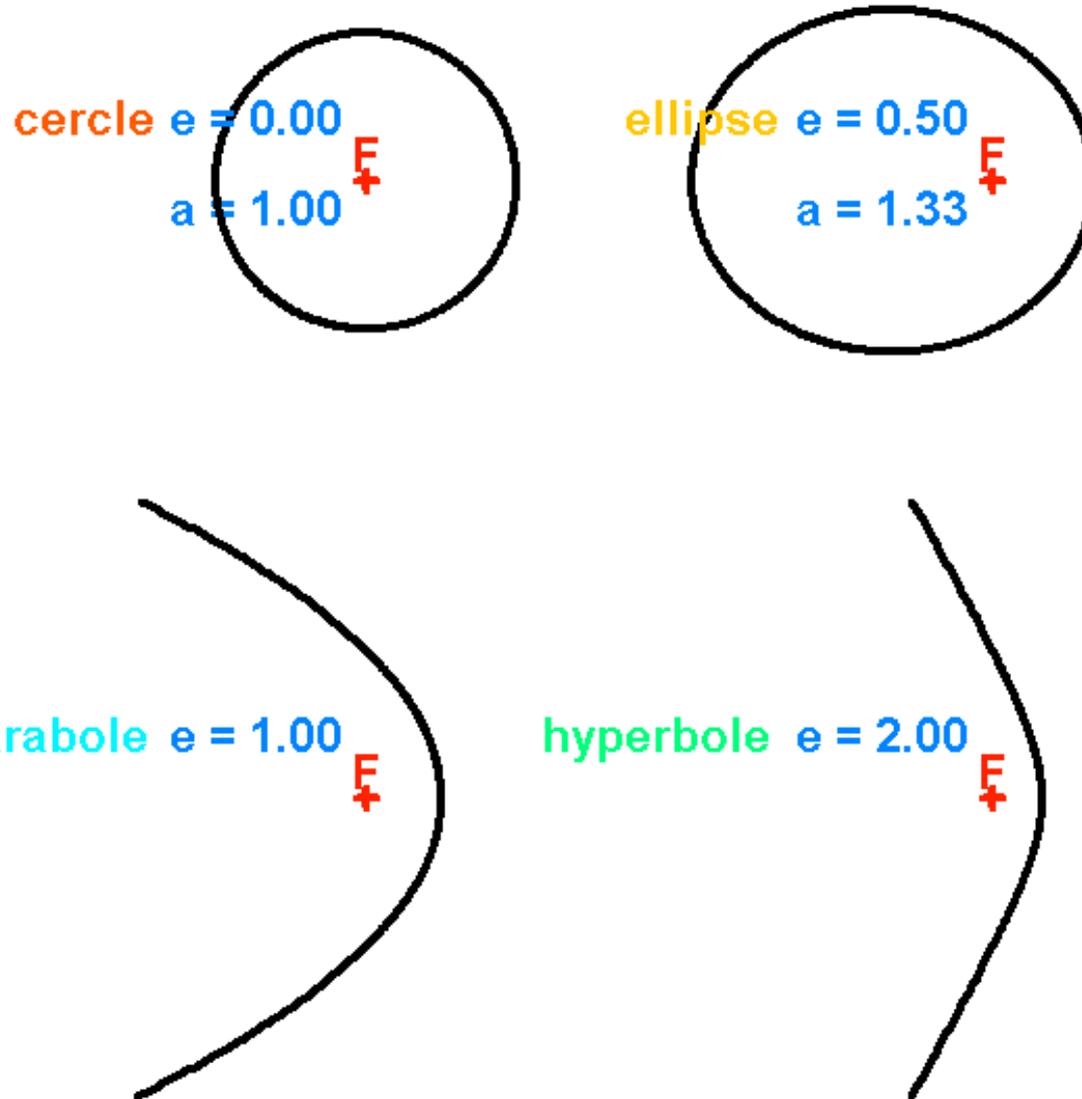
- Ellipse (conique)
- Vitesse (lois des aires) et accélération
- Distances:  $a^3/T^2 = \text{constante}$  pour toutes les planètes

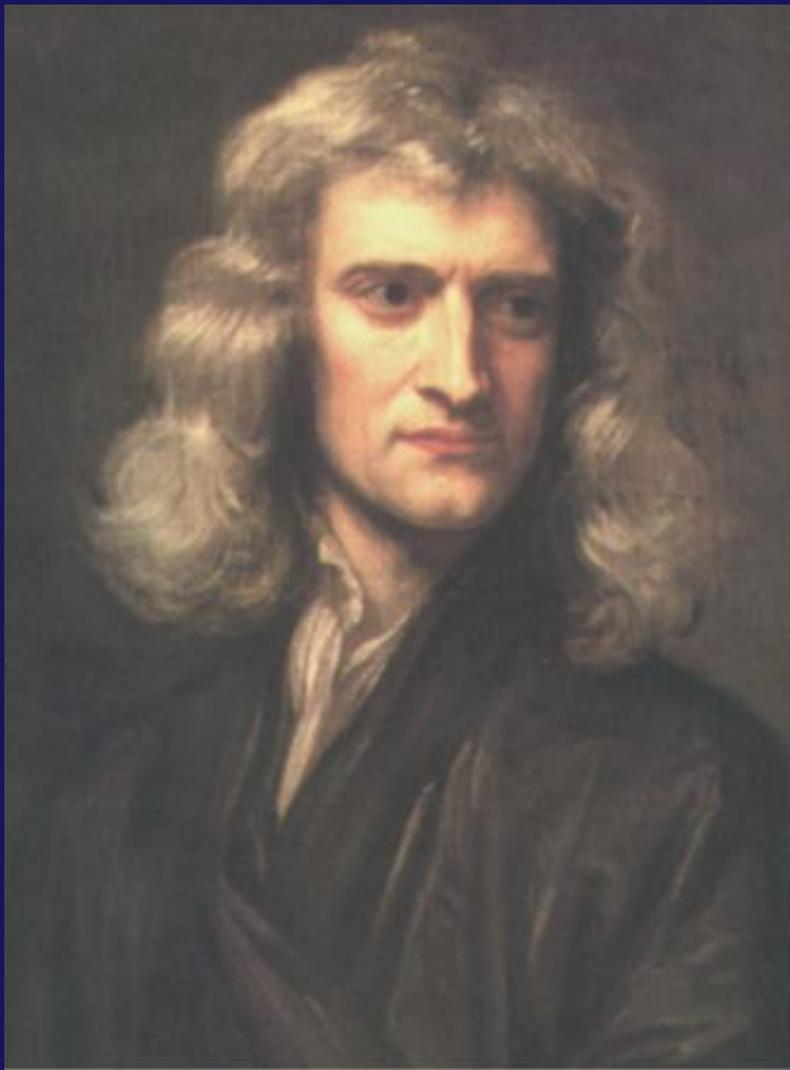
démontrées par Newton, Laplace, ... dans le cas de deux corps

$$a^3/T^2 = \text{constante} = GM/4\pi^2$$

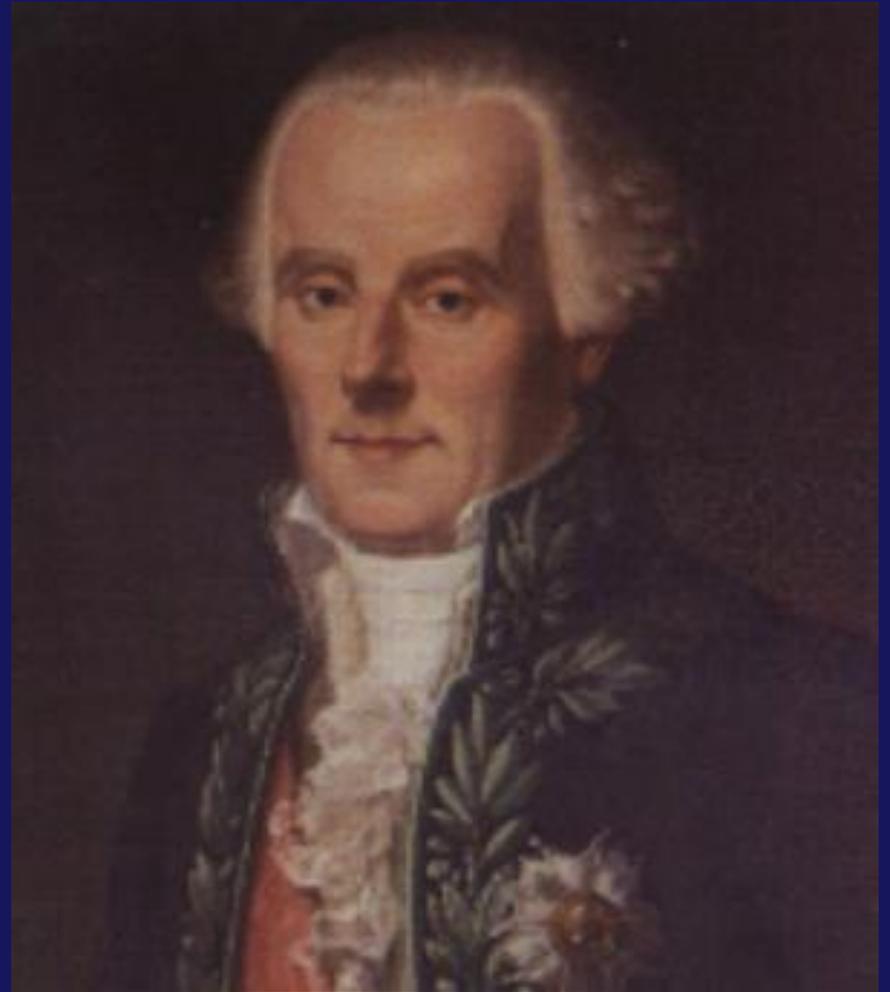
où  $G$  est la constante de la gravitation universelle ( $= 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ )  
et  $M$  la masse du corps central

# Le problème des deux corps





Newton (1643-1727)

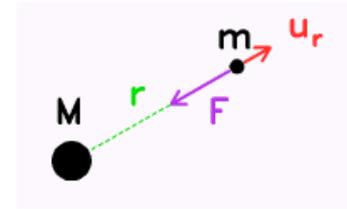


Laplace (1749-1827)

# Les lois de Newton: introduire la notion de force instantanée à distance

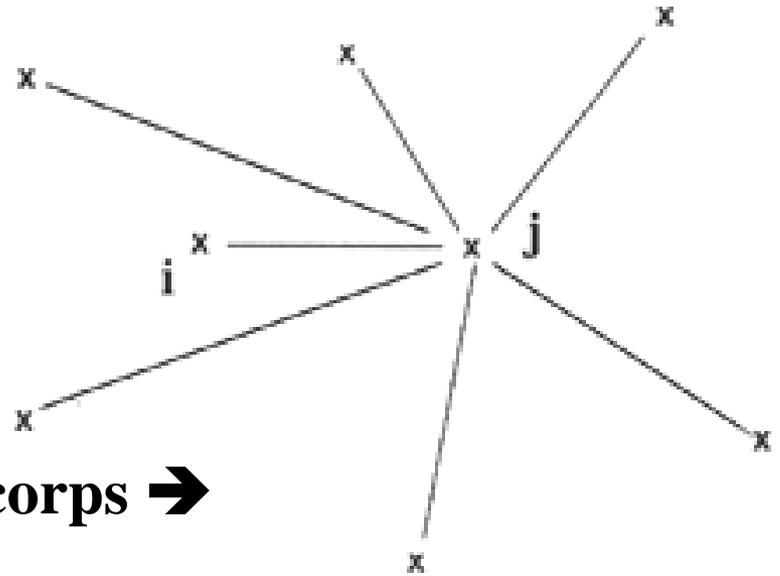
- loi fondamentale de la mécanique:  $\mathbf{F} = m \boldsymbol{\gamma}$

- loi de la gravitation universelle:  $\mathbf{F} = \mathbf{G} m M / r^2$



Forces et accélérations sont liées

$$\mathbf{F}_j = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}} \frac{k m_i m_j \mathbf{P}_i \mathbf{P}_j}{|\mathbf{P}_j \mathbf{P}_i|^3}$$



La complexité du problème à « n » corps →

# Les équations différentielles

$$\mathbf{F} = m \boldsymbol{\gamma} \quad \rightarrow \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} = f(x) \quad \text{où } f = G m M / r^2$$

$$\rightarrow \quad \mathcal{X} = \mathcal{X}(t)$$

## Application à la mécanique céleste:

Dans le cas de trois corps et plus, il n'y a pas de solution analytique générale: il faut trouver des solutions particulières ou des solutions approchées sous forme de séries dépendant du temps.

Dans le cas de deux corps: les lois de Kepler sont démontrées, il y a une solution exacte, c'est le mouvement sur une conique.

**Le problème à deux corps a une solution:**

**une trajectoire elliptique définie par 6 paramètres:**

**a:** demi grand axe

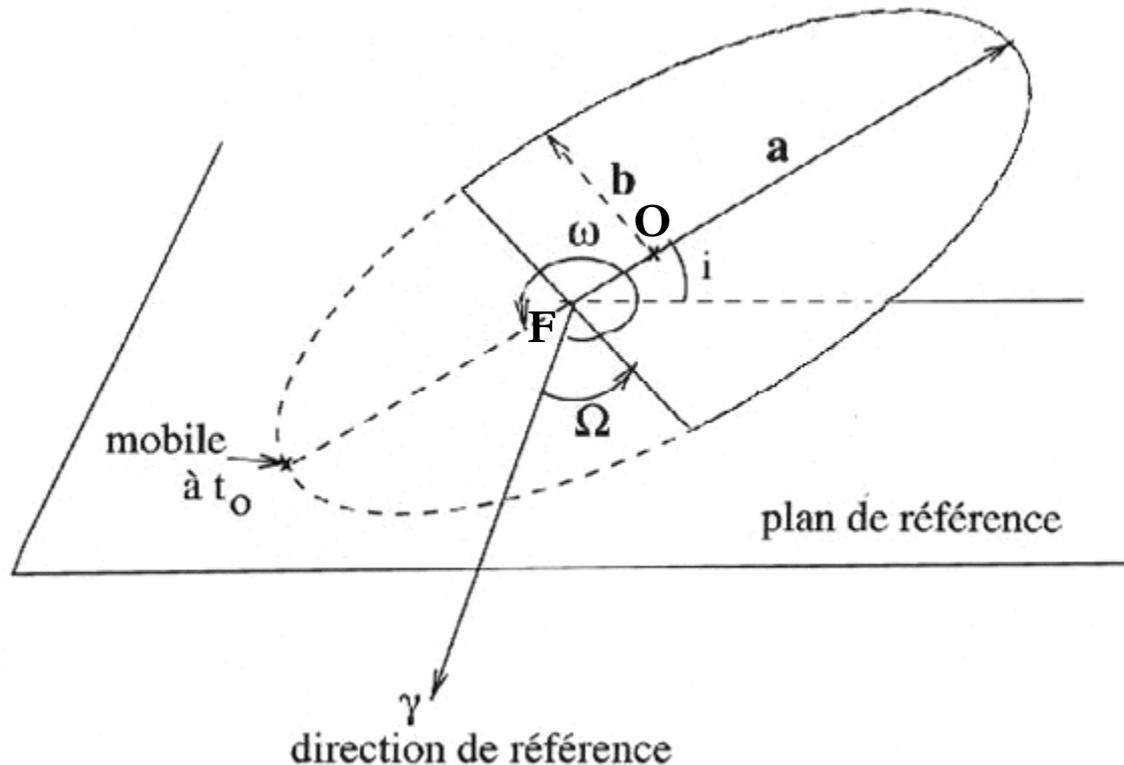
**e:** excentricité

**i:** inclinaison

**$\Omega$ :** longitude du noeud

**$\omega$ :** longitude du périastre

**$t_0$ :** instant de passage au périastre



$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$OF = a e$$

**O:** le centre

**F:** le foyer

# Cas où l'on a plus de deux corps: pas de solution analytique

Par chance le système solaire est une somme de problèmes à deux corps:

- soleil + planète
- planète + satellite

Rappel: définition de l'ellipse

a: demi grand axe

e: excentricité

i: inclinaison

$\Omega$ : longitude du noeud

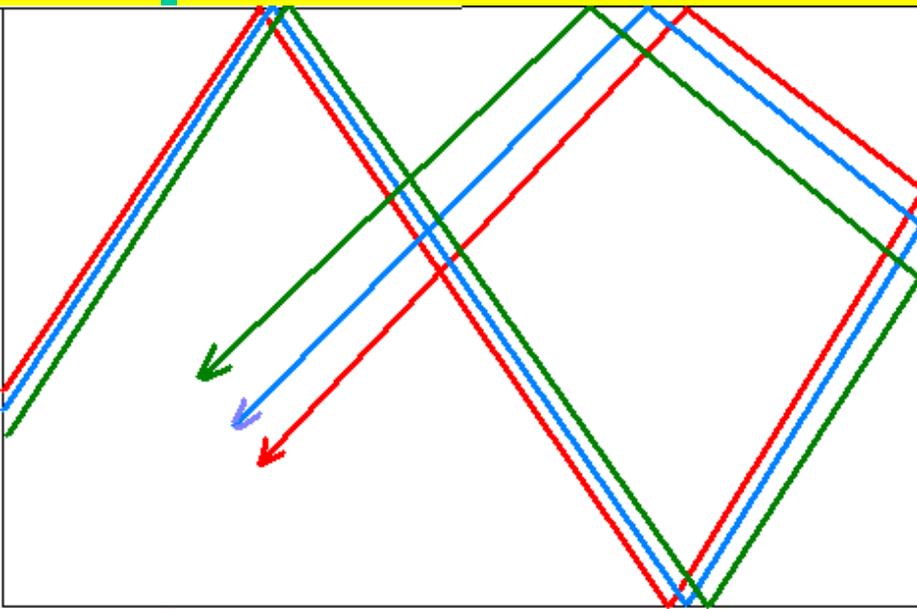
$\omega$ : longitude du périastre

$t_0$ : instant de passage au périastre

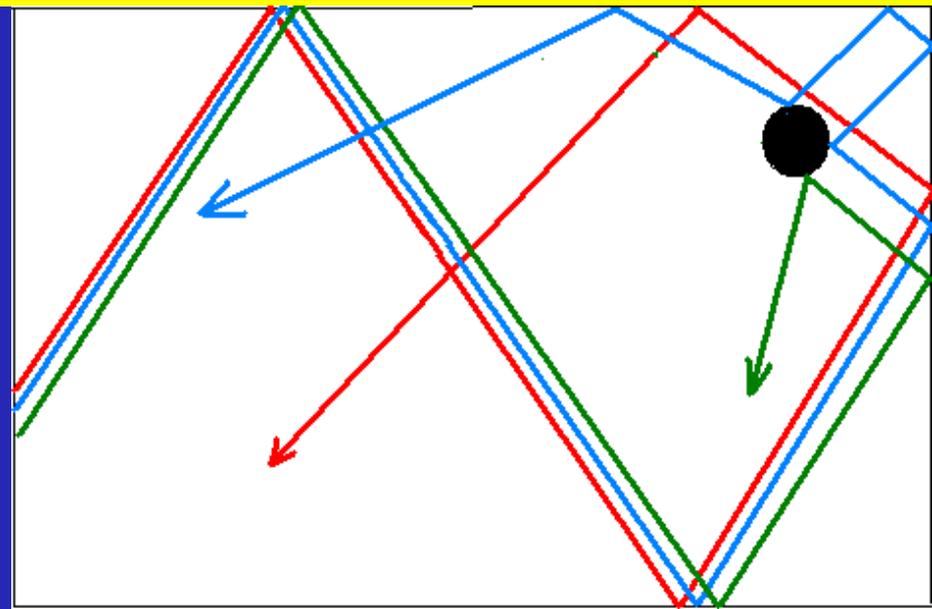
On va résoudre des problèmes à deux corps, perturbés par des forces extérieures

→ Lagrange introduit des équations qui « font varier les constantes »: les six paramètres de définition de l'ellipse vont varier au cours du temps en fonction des forces perturbatrices. A chaque instant, leur valeur définit l'orbite « osculatrice ».

# Qu'est-ce qu'un système chaotique?



À gauche, le système est stable et non chaotique: on peut prévoir à peu près où se trouvera le mobile



À droite, le système est chaotique: après un certain temps, la prédiction est impossible

Exemple: le mouvement des planètes intérieures est chaotique alors que celui des planètes géantes est stable.

Des applications: une masse négligeable autour d'une masse centrale prépondérante

Terre



Lune



$$a^3/T^2 = GM/4\pi^2$$

Pour un même « a », si la masse centrale augmente alors « T » augmente



Jupiter



Io

# La troisième loi de Kepler et la loi de Newton

- $a^3/t^2 = \text{constante} = GM_{\text{Terre}}/4\pi^2$  pour la Terre

où  $G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

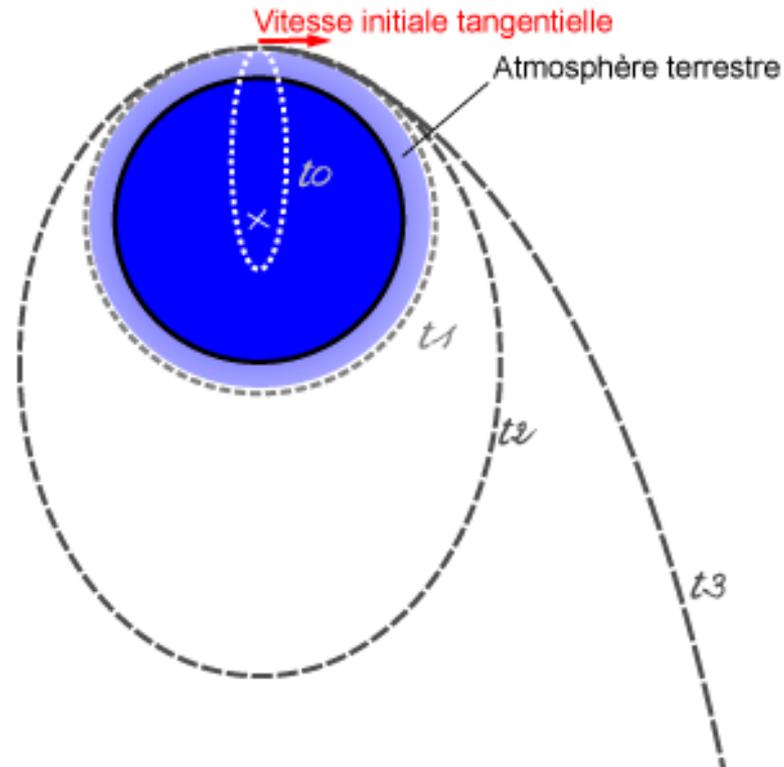
$$GM_{\text{Terre}} = 3.0034896 \times 10^{-6} \times GM_{\text{Soleil}}$$

$$= 3.98600435608 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$GM_{\text{Soleil}} = 1.3271244002 \times 10^{20} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

- Exemple: les satellites de la Terre

# Les satellites artificiels de la Terre

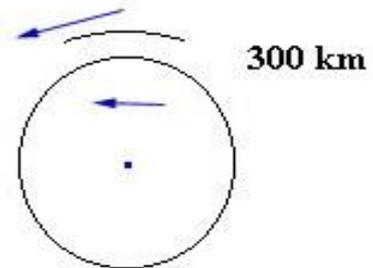
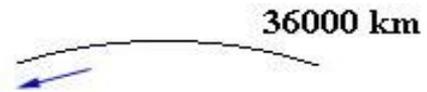


$$V(t_1) > 7,4 \text{ km/s}$$

$$V(t_3) > 11,2 \text{ km/s}$$

$$V(t_3) > V(t_2) > V(t_1)$$

# De la Terre à la Lune



$$a^3/T^2 = GM_{\text{terre}}/4\pi^2$$

# Points de Lagrange (1772)

Les points de Lagrange sont les points où l'attraction solaire et l'attraction terrestre sont exactement compensées par la force d'inertie d'entraînement (centrifuge) sur l'orbite.

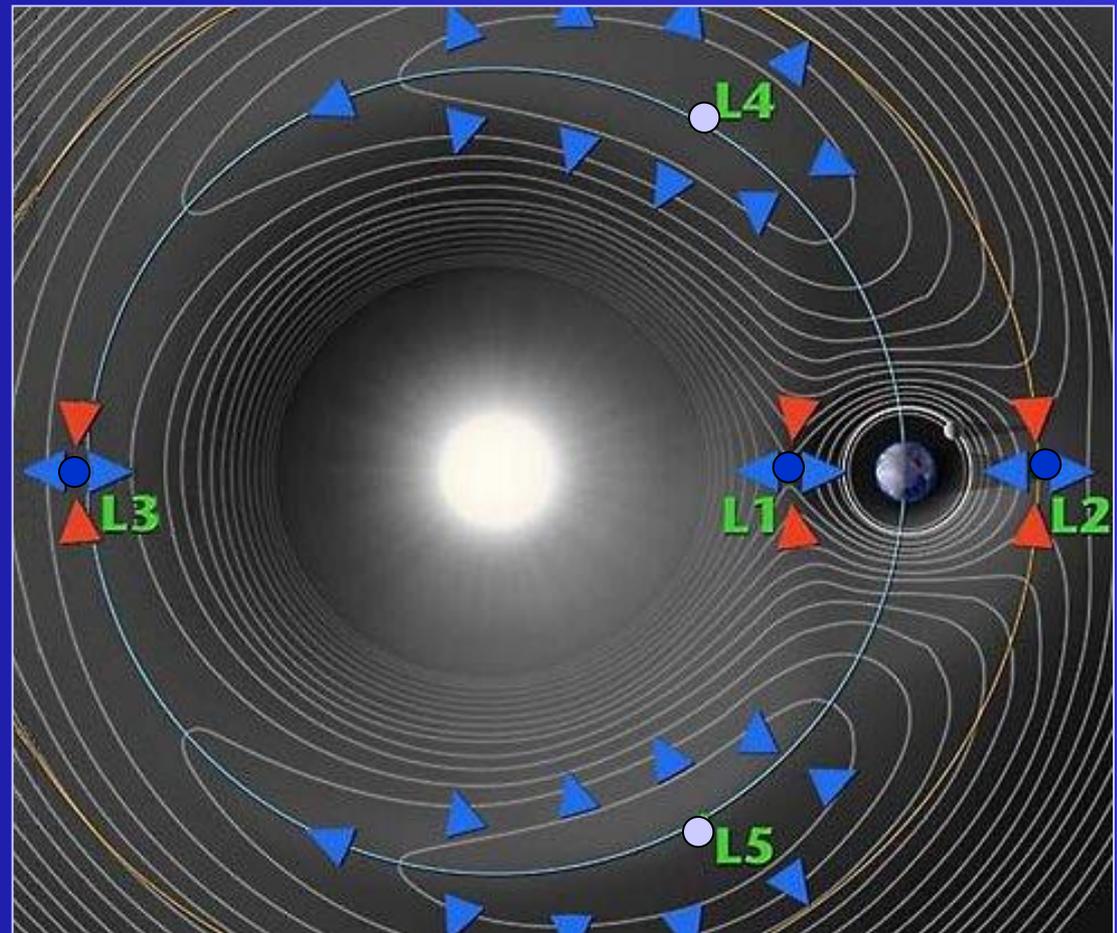
▲ Zone ou direction d'instabilité

▲ Direction stable

L1 : SOHO

L2 : Plank, GAIA

L1 : 1 500 000 km



Joseph-Louis Lagrange (1736- 1813)

## Rappel: définition de l'unité astronomique

La distance Terre-Soleil dépend du mouvement de la Terre:

$$a^3/t^2 = GM/4\pi^2 \text{ où } a \text{ est l'unité astronomique}$$

Introduire une définition indépendante de la Terre

L'unité astronomique est le demi grand axe de l'orbite d'un corps de masse négligeable non perturbée dont le moyen mouvement est égal à  $k$  radians par jour ( $k$ : constante de Gauss)

$$k \text{ (radian/jour)} = 0.01720209895 \text{ ua}^{3/2} \text{ d}^{-1} \text{ S}^{-1/2}$$

$$k = 0.985607668601425 \text{ deg/jour}$$

La distance Soleil-Terre reste donc une inconnue

Aujourd'hui: **une unité astronomique = 149 597 870 700 mètres**

Ce qui revient à considérer désormais la constante de la gravitation universelle comme une inconnue

# La constante de la gravitation universelle

Dans la formule de Newton, on remarque l'existence d'une constante multiplicative  $G$ . A quoi correspond-elle ? Quelle est sa valeur ?

En fait, la mesure des distances et des périodes dans le système solaire ne nous fournit que le produit  $G \times m$  de la constante  $G$  avec la masse du corps central. On connaît donc  $G \times$  (masse solaire) en mesurant les positions des planètes,  $G \times$  (masse terrestre) en mesurant le mouvement de la Lune,  $G \times$  (masse de Jupiter) en mesurant les positions des satellites de Jupiter, etc.

La mesure absolue de  $G$  a été faite par Cavendish (1731-1810) en 1798. Pour cela il réalise une expérience désormais célèbre : il mesure l'attraction de deux boules de plomb de 150 kg chacune sur de petites billes par l'intermédiaire d'un pendule de torsion. Il pourra dire : j'ai pesé la Terre ! La valeur de cette constante est  $6,672\ 59 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ .

Aujourd'hui, nous ne disposons pas de méthodes beaucoup plus précises pour cette mesure. Et une question se pose: la constante de la gravitation universelle est-elle vraiment constante?

# A quoi sert la mécanique céleste?

- Navigation des sondes spatiales
  - Dynamique, stabilité, évolution, échelle du système solaire
  - Surveillance des astéroïdes géocroiseurs
  - Physique de l'intérieur des corps du système solaire (systèmes dissipatifs)
  - Gravitation et relativité générale (tests)
  - Planètes extra solaires
  - Systèmes de référence dynamiques
- 
- Dynamique galactique
  - Cosmologie, rotation des galaxies
  - Étoiles doubles, paramètres orbitaux

# Détermination des orbites dans le système solaire

## Etape 1: Modélisation du système dynamique

### Equations du mouvement

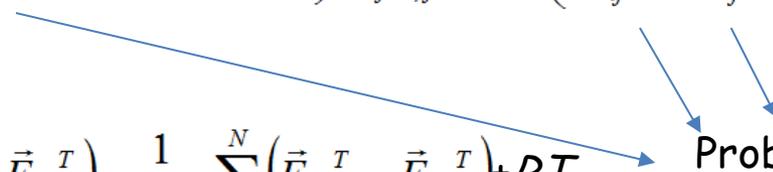
$$\ddot{\vec{r}}_i = -G(m_0 + m_i) \left( \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} - \nabla_i U_{\vec{r}_i \hat{0}} + \nabla_0 U_{\vec{r}_i \hat{0}} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Gm_j \left( \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_j^3} - \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_i U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{0}} - \nabla_0 U_{\vec{r}_j \hat{0}} \right)$$
$$+ \frac{(m_0 + m_i)}{m_i m_0} (\vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T) - \frac{1}{m_0} \sum_{j=1, j \neq i}^N (\vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T) + \mathcal{RT}$$

# Détermination des orbites dans le système solaire

## Etape 1: Modélisation du système dynamique

### Equations du mouvement

$$\ddot{\vec{r}}_i = -G(m_0 + m_i) \left( \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} - \nabla_i U_{\vec{r}_i \hat{0}} + \nabla_0 U_{\vec{r}_i \hat{0}} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Gm_j \left( \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_j^3} - \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_i U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{0}} - \nabla_0 U_{\vec{r}_j \hat{0}} \right)$$



$$+ \frac{(m_0 + m_i)}{m_i m_0} (\vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T) - \frac{1}{m_0} \sum_{j=1, j \neq i}^N (\vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T) + RT$$

**Problème des N-corps**

# Détermination des orbites dans le système solaire

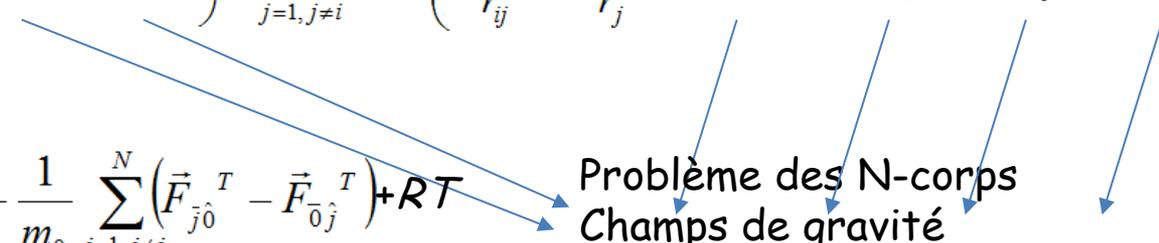
## Etape 1: Modélisation du système dynamique

### Equations du mouvement

$$\ddot{\vec{r}}_i = -G(m_0 + m_i) \left( \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} - \nabla_i U_{\vec{r}_i \hat{0}} + \nabla_0 U_{\vec{r}_i \hat{0}} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Gm_j \left( \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_j^3} - \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_i U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{0}} - \nabla_0 U_{\vec{r}_j \hat{0}} \right)$$

$+$   $\frac{(m_0 + m_i)}{m_i m_0} (\vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T) - \frac{1}{m_0} \sum_{j=1, j \neq i}^N (\vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T) + RT$

Problème des N-corps  
Champs de gravité



# Détermination des orbites dans le système solaire

## Etape 1: Modélisation du système dynamique

### Equations du mouvement

$$\ddot{\vec{r}}_i = -G(m_0 + m_i) \left( \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} - \nabla_i U_{\vec{r}_i \hat{0}} + \nabla_0 U_{\vec{r}_i \hat{0}} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Gm_j \left( \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_j^3} - \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_i U_{\vec{r}_j \hat{i}} + \nabla_j U_{\vec{r}_j \hat{0}} - \nabla_0 U_{\vec{r}_j \hat{0}} \right)$$

$$+ \frac{(m_0 + m_i)}{m_i m_0} (\vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_i \hat{0}}^T) - \frac{1}{m_0} \sum_{j=1, j \neq i}^N (\vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T - \vec{F}_{\vec{r}_j \hat{0}}^T) + RT$$

Problème des N-corps  
Champs de gravité  
Effets de marée

# Détermination des orbites dans le système solaire

## Etape 1: Modélisation du système dynamique

### Equations du mouvement

$$\ddot{\vec{r}}_i = -G(m_0 + m_i) \left( \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} - \nabla_i U_{i\hat{0}} + \nabla_0 U_{0\hat{i}} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Gm_j \left( \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_j^3} - \nabla_j U_{j\hat{i}} + \nabla_i U_{i\hat{j}} + \nabla_j U_{j\hat{0}} - \nabla_0 U_{0\hat{j}} \right)$$

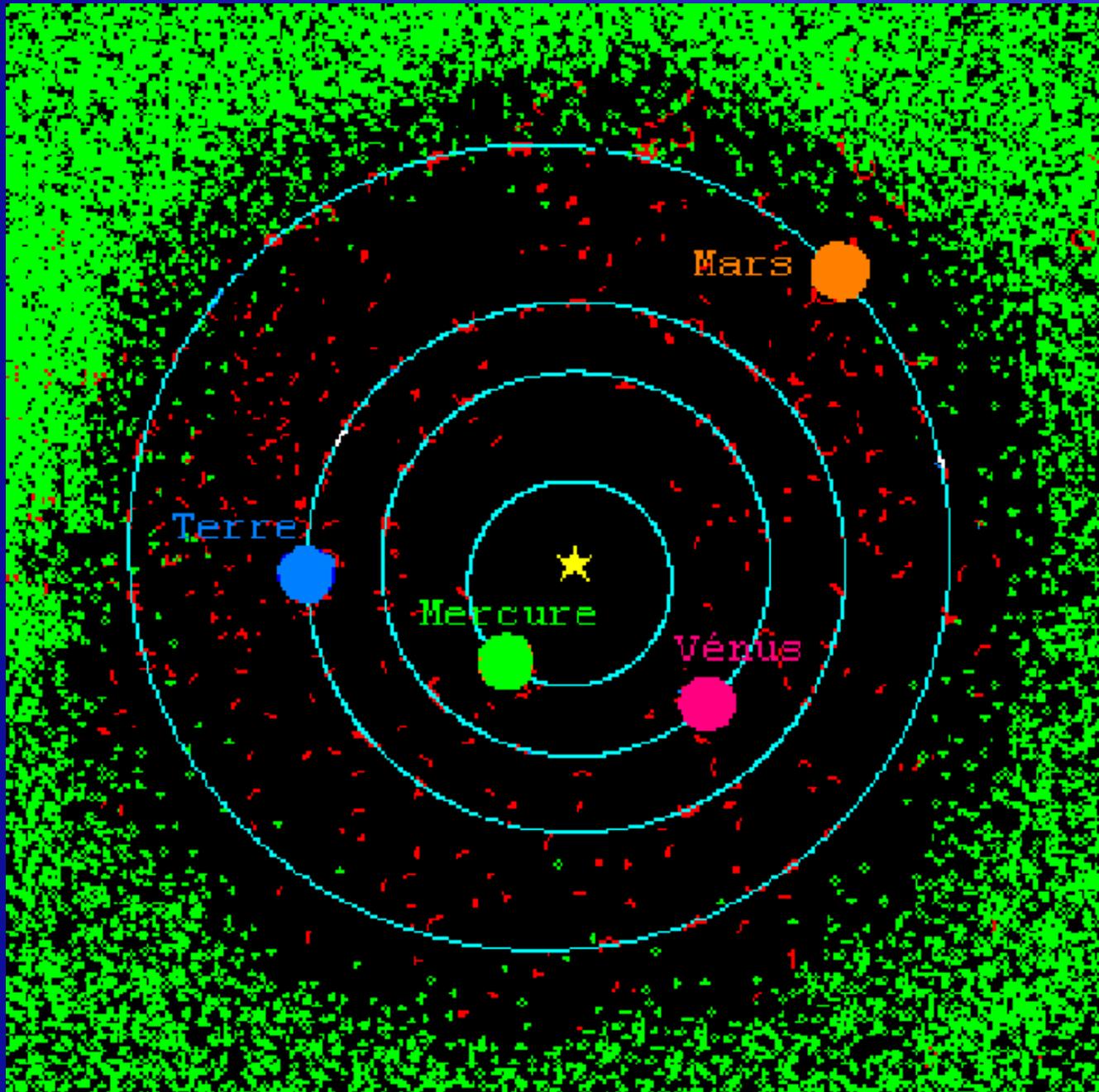
$$+ \frac{(m_0 + m_i)}{m_i m_0} (\vec{F}_{i\hat{0}}^T - \vec{F}_{0\hat{i}}^T) - \frac{1}{m_0} \sum_{j=1, j \neq i}^N (\vec{F}_{j\hat{0}}^T - \vec{F}_{0\hat{j}}^T) + RT$$

Problème des N-corps  
Champs de gravité  
Effets de marée  
Termes relativistes



→ *Solution* :  $\mathbf{r} = \mathbf{R}(t, \text{cstes du mouvement})$ : position du corps à chaque instant

# La modélisation de tous les mouvements dans le système solaire



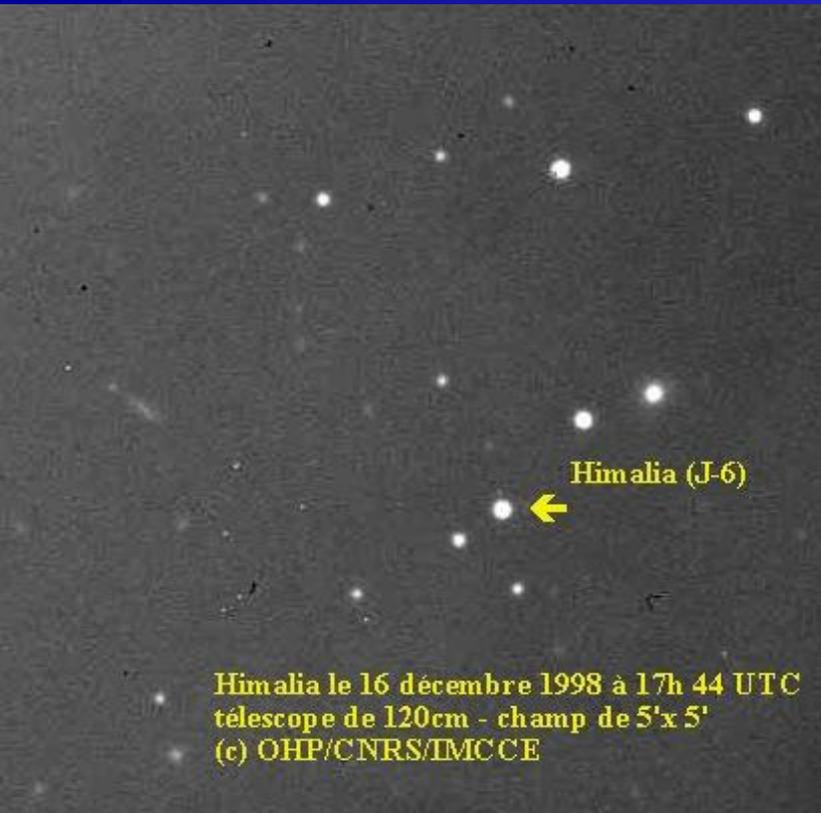
## ***THE MIDDLE SOLAR SYSTEM***

This animation shows the motion of the middle part of the solar system over a two-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Mercury, Venus, Earth Mars and Jupiter are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles). Comets are shown as blue squares (numbered periodic comets are filled squares, other comets are outline squares). Main-belt minor planets are displayed as green circles, near-Earth minor planets are shown as red circles.

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGPLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.

# Détermination des orbites dans le système solaire

## Etape 2: rassembler les observations astrométriques



Observations depuis le sol



Observations depuis une sonde spatiale

# Détermination des orbites dans le système solaire

## Etape 3: ajuster le modèle dynamique sur les observations

$\mathbf{R}$  observé  $\neq$   $\mathbf{R}$  calculé (t, c)

$\mathbf{R}$  observé =  $\mathbf{R}$  calculé (t, c +  $\Delta c$ )

comment trouver la correction  $\Delta c$  à apporter à c pour que le modèle « colle » à l'observation ?

$\mathbf{R}$  observé =  $\mathbf{R}$  calculé (t, c) +  $d\mathbf{R}/dc * \Delta c$  +  $\frac{1}{2} d^2\mathbf{R}/dc^2 * (\Delta c)^2$  + ...

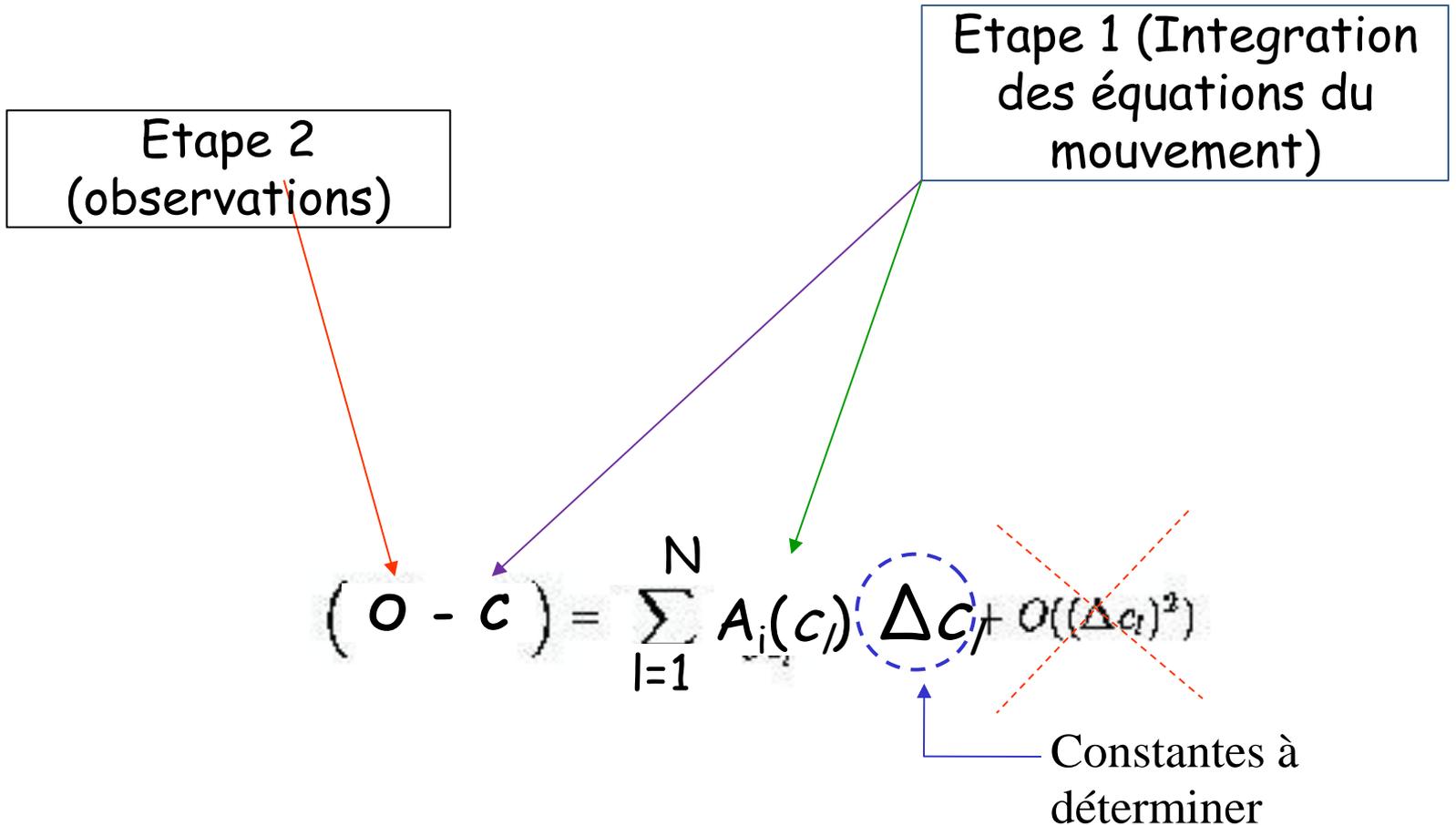
$\mathbf{R}_{\text{obs}} - \mathbf{R}_{\text{calc}} = \sum (d\mathbf{R}/dc * \Delta c)$

Etape 2  
(observations)

Etape 1 (Integration  
des équations du  
mouvement)

# Détermination des orbites dans le système solaire

**Etape 3**: ajuster le modèle dynamique sur les observations



# La mécanique céleste au service de la planétologie

Qu'est-ce que la planétologie?

C'est l'exploration du système solaire:

- par des observations depuis le sol
- par l'envoi de sondes spatiales.

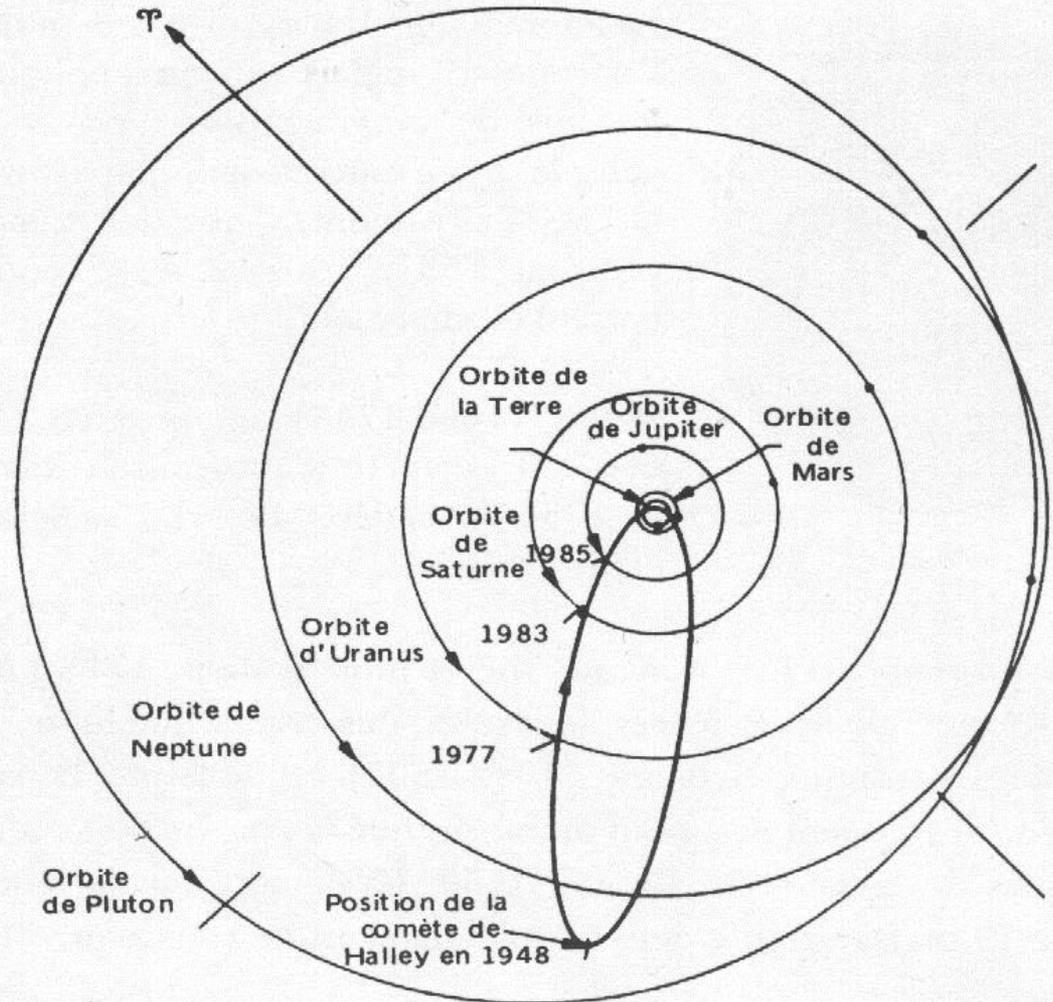
La mécanique céleste le permet, directement et indirectement.

# Les comètes



# Les comètes

- Une astrométrie précise nécessaire pour retrouver la comète après plus de 80 ans



## Les comètes

- La comète de Halley en 1066





# Les systèmes de gros satellites



Les satellites galiléens de Jupiter

## Les satellites « telluriques ou glacés »



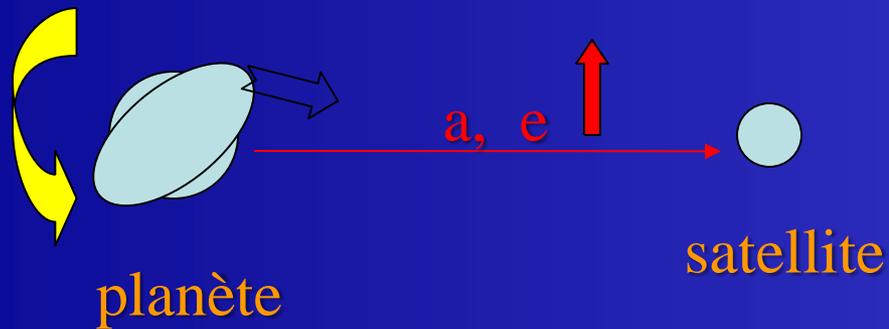
Les principaux satellites d'Uranus



Les satellites de Saturne

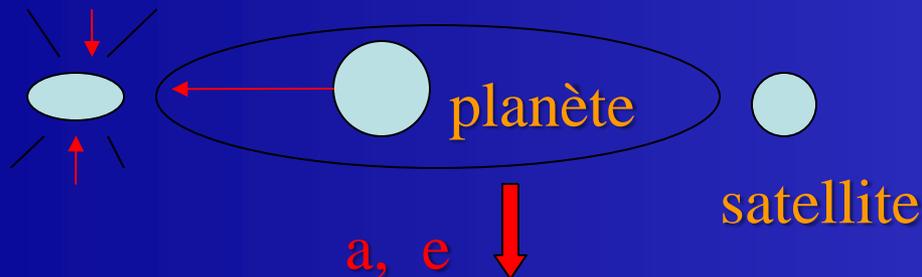
# Les buts scientifiques:

Contraindre la structure interne en mesurant les effets de la dissipation d'énergie par une astrométrie de haute précision



Marées du satellite sur la planète

↳ le satellite s'éloigne



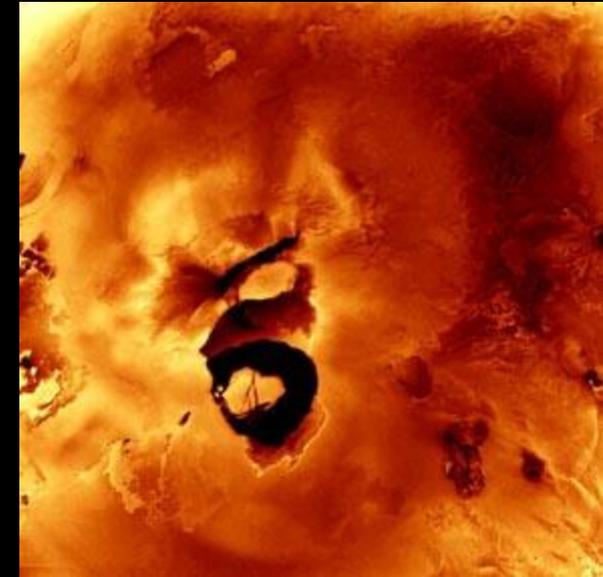
Marée de la planète sur le satellite

↳ le satellite se rapproche

# Les gros satellites de Jupiter



**Io** le premier satellite de Jupiter  
possède des volcans très actifs



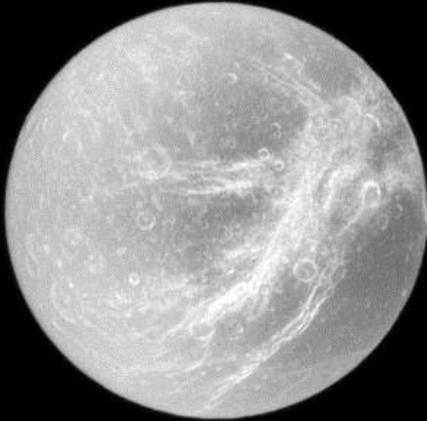


**Europe**, le  
deuxième satellite  
de Jupiter est  
recouvert d'une  
banquise au-dessus  
d'un éventuel océan

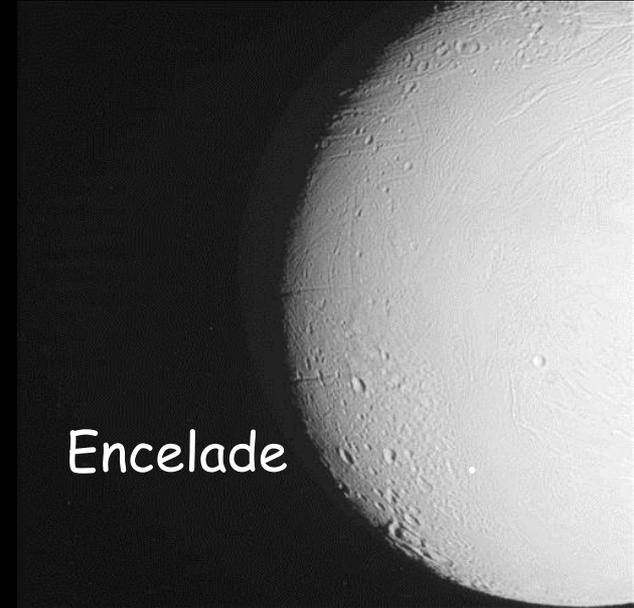


# Les satellites de glace

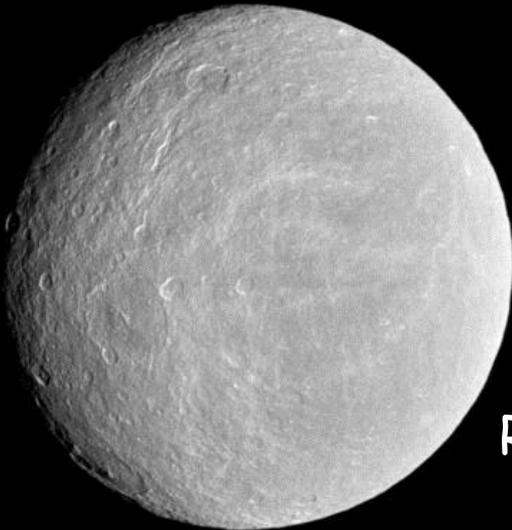
Dioné



Encelade



Rhéa



Geysers sur Encelade

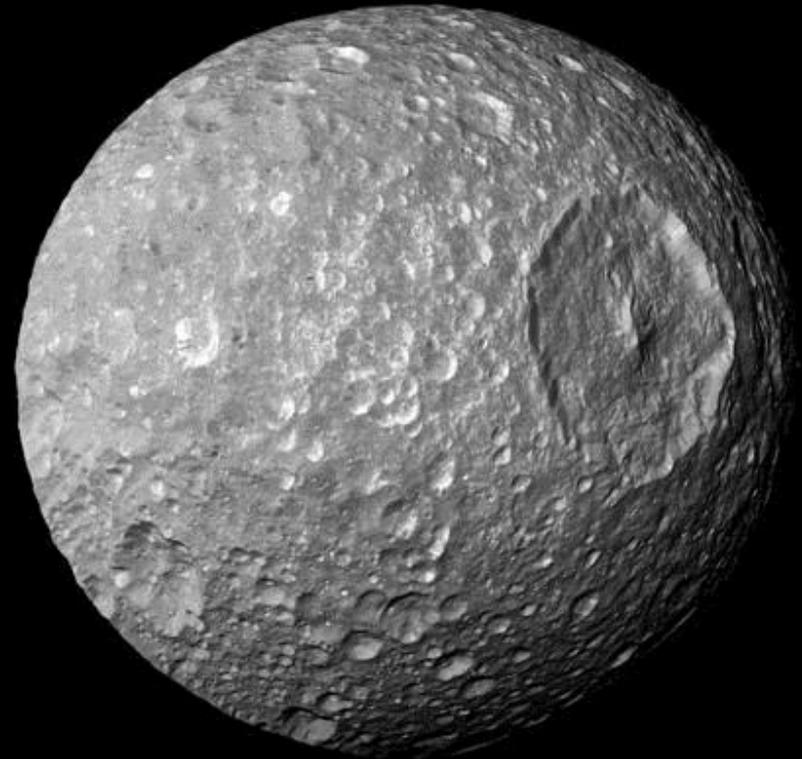


# Des satellites très divers

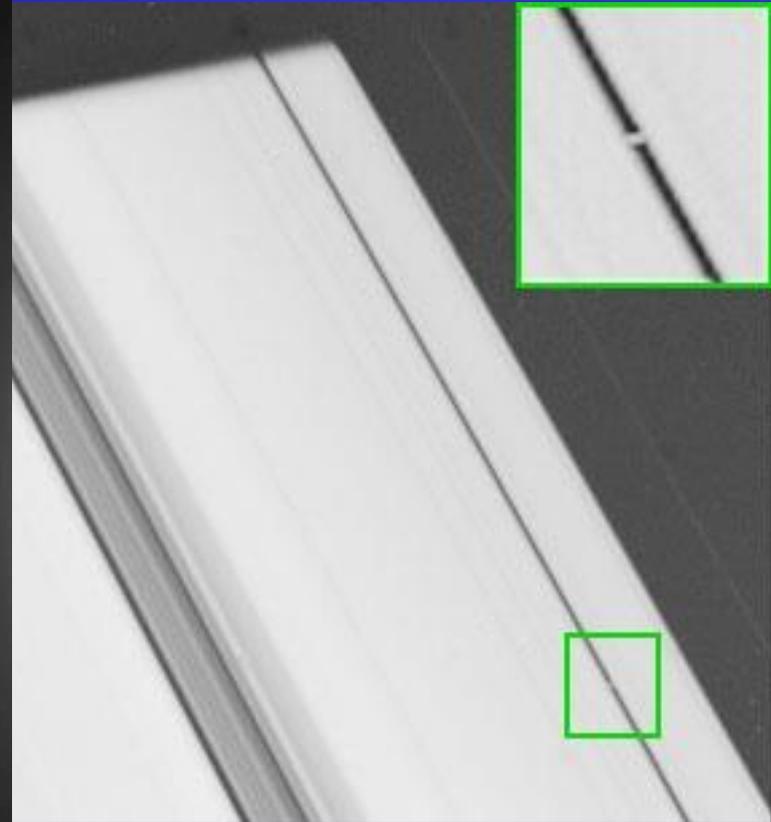
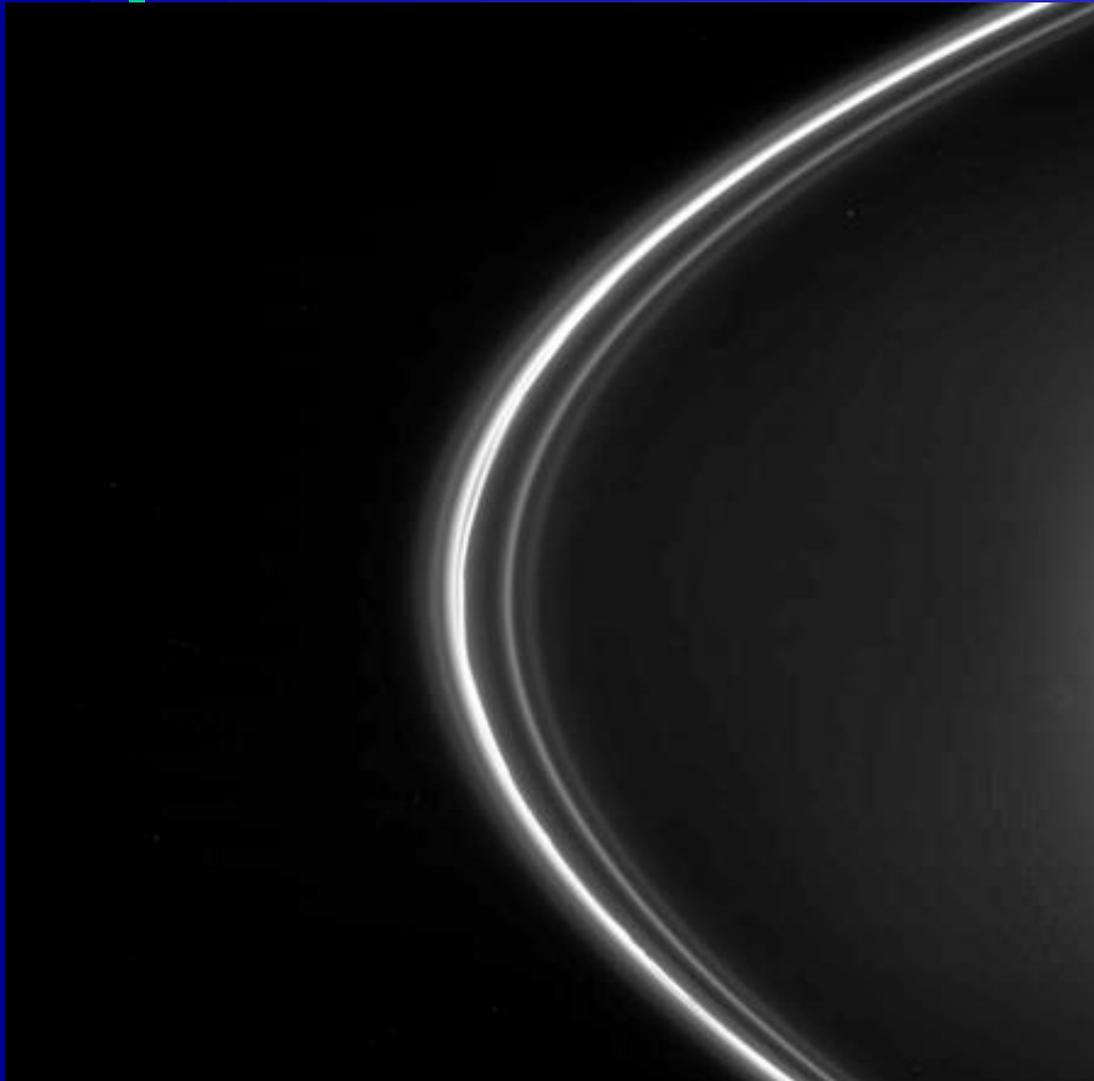
Hypérion

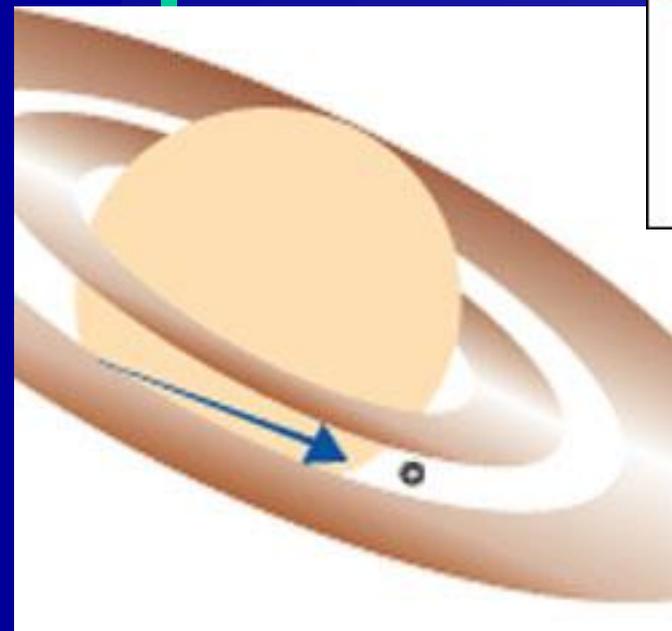
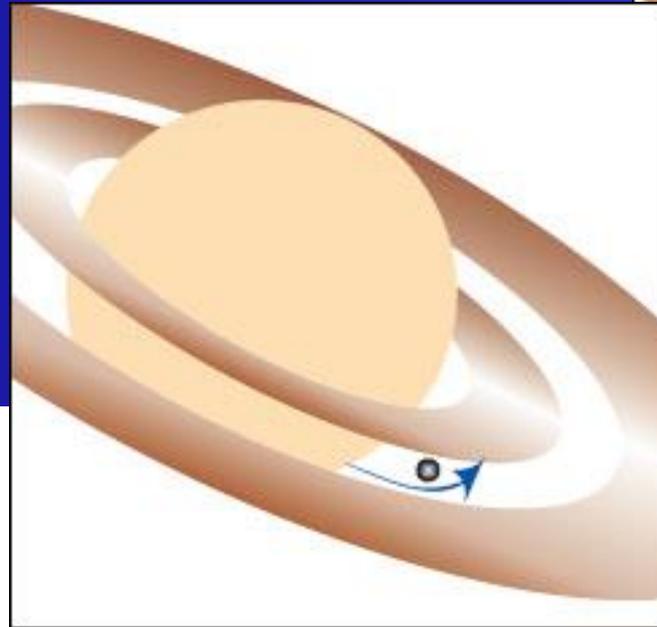
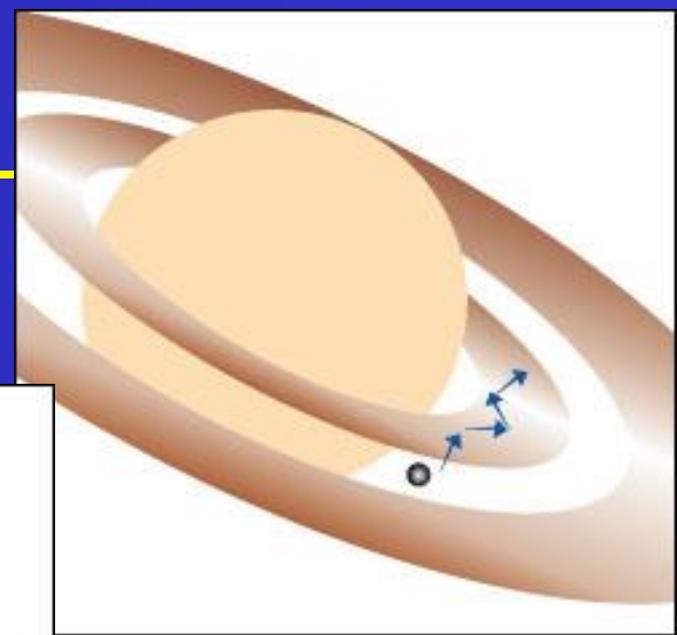


Mimas



# Les satellites « gardiens des anneaux »





Le satellite ne « repousse » pas les anneaux:  
il modifie la trajectoire des particules

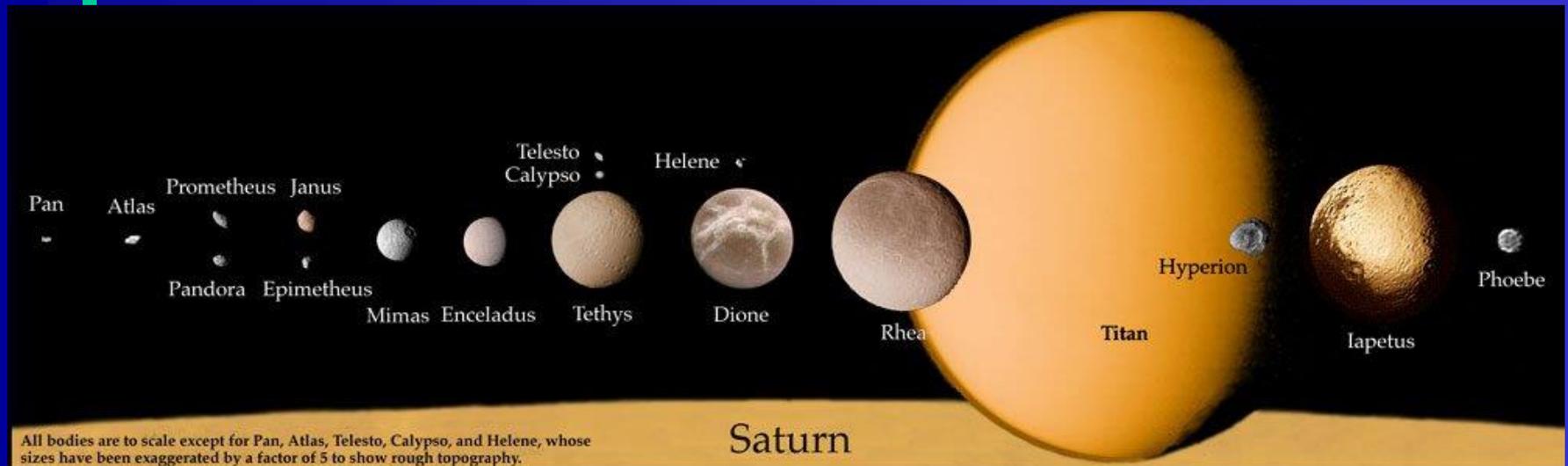
# Le scénario de formation des anneaux et des satellites

- Anneaux jeunes ou anneaux vieux?
  - vieux = reste d'un satellite non formé au début du système solaire (3 milliards d'années)
  - jeunes = reste d'une collision récente ayant détruit un satellite

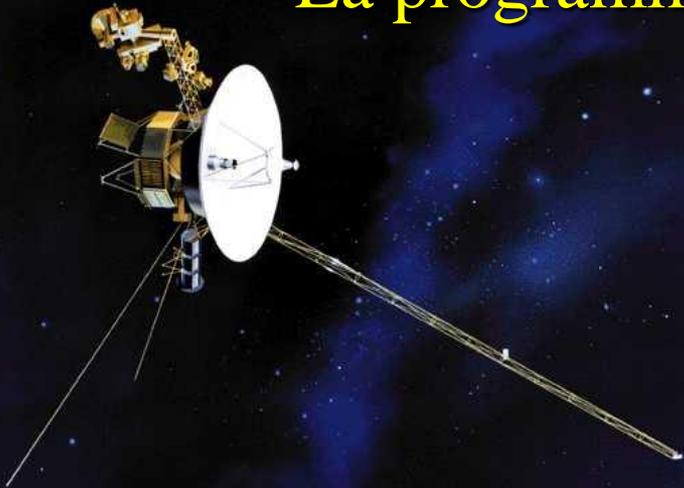


# Les derniers résultats

- Le système de Saturne a été formé avec deux gros satellites « galiléens » dont Titan
- L'un des satellites a été victime d'une collision, ce qui a créé l'anneau
- L'anneau a fabriqué rapidement de nouveaux satellites en 200 millions d'années
- L'anneau actuel est le reste qui tente de créer des satellites de plus en plus petits

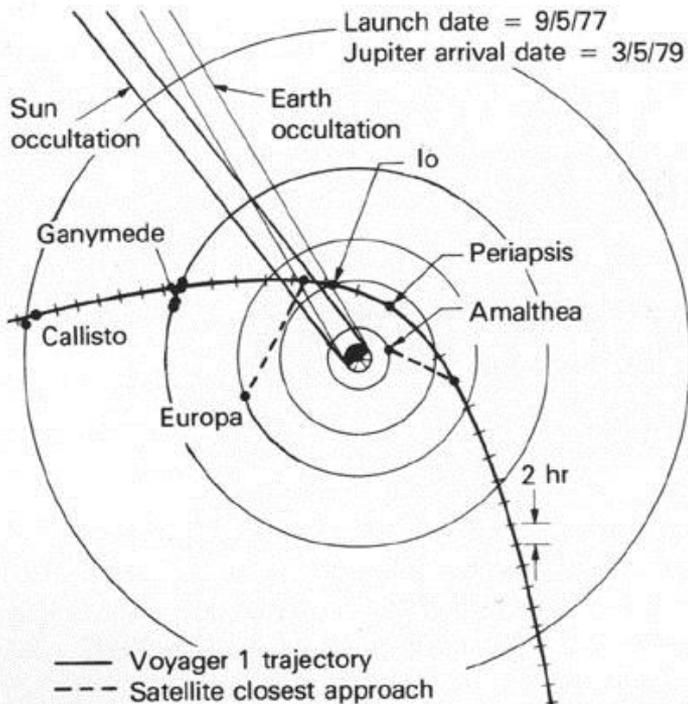


# La programmation des missions spatiales

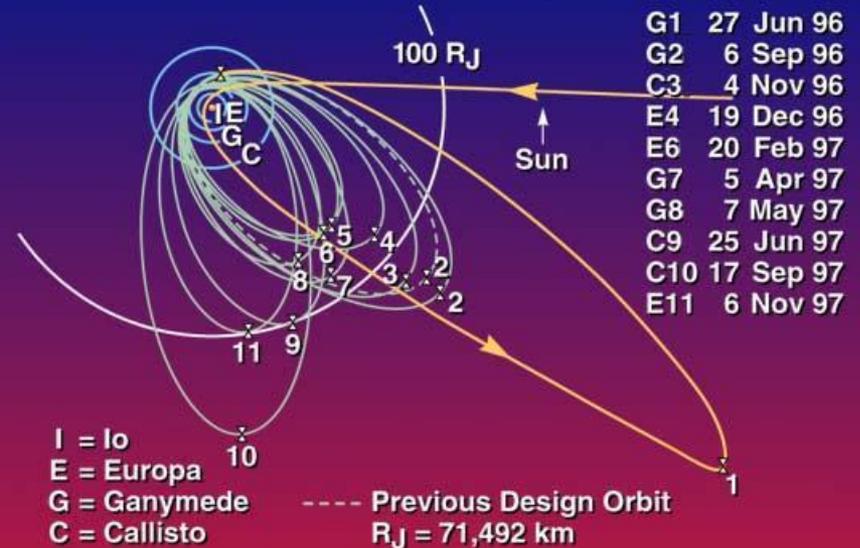


← Voyager

Galileo →



## Orbital Tour of the Jupiter System



# Points de Lagrange (1772)

Les points de Lagrange sont les points où l'attraction solaire et l'attraction terrestre sont exactement compensées par la force d'inertie d'entraînement (centrifuge) sur l'orbite.

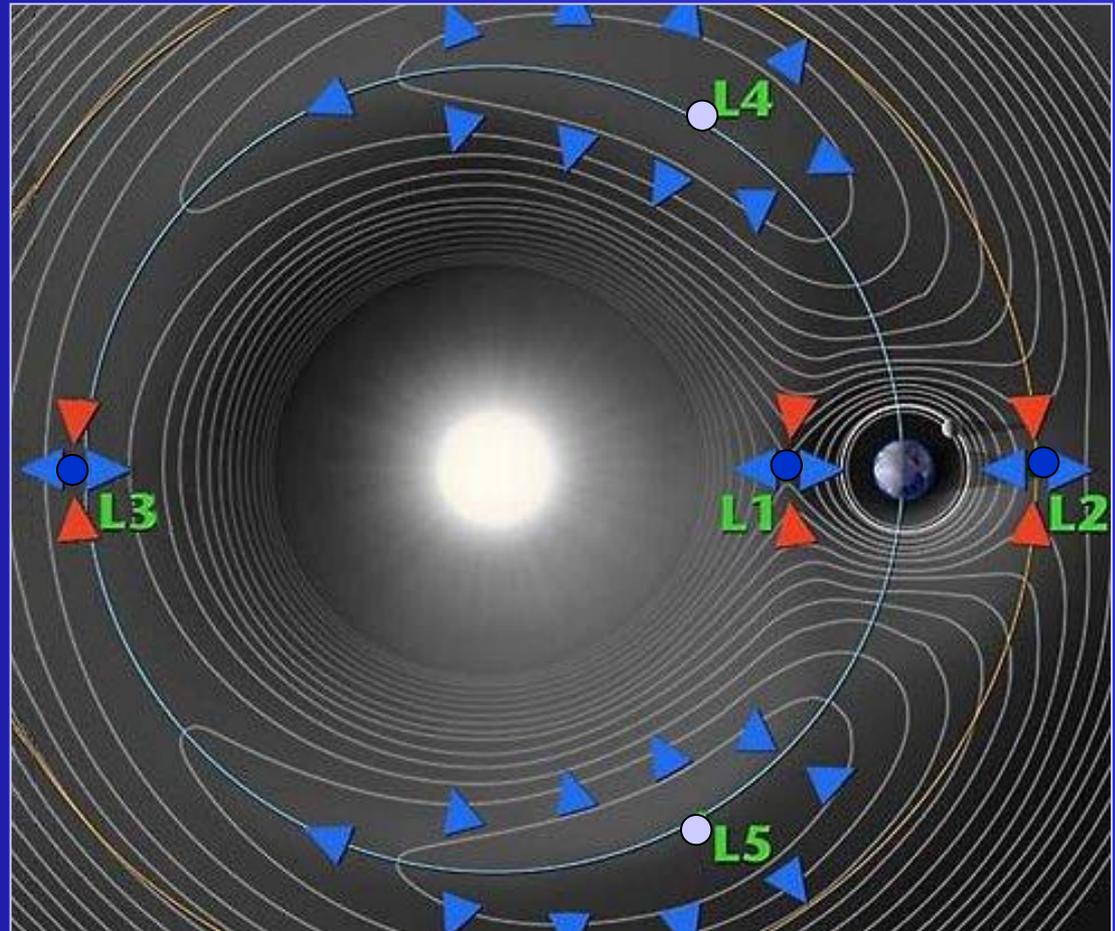
▲ Zone ou direction d'instabilité

▲ Direction stable

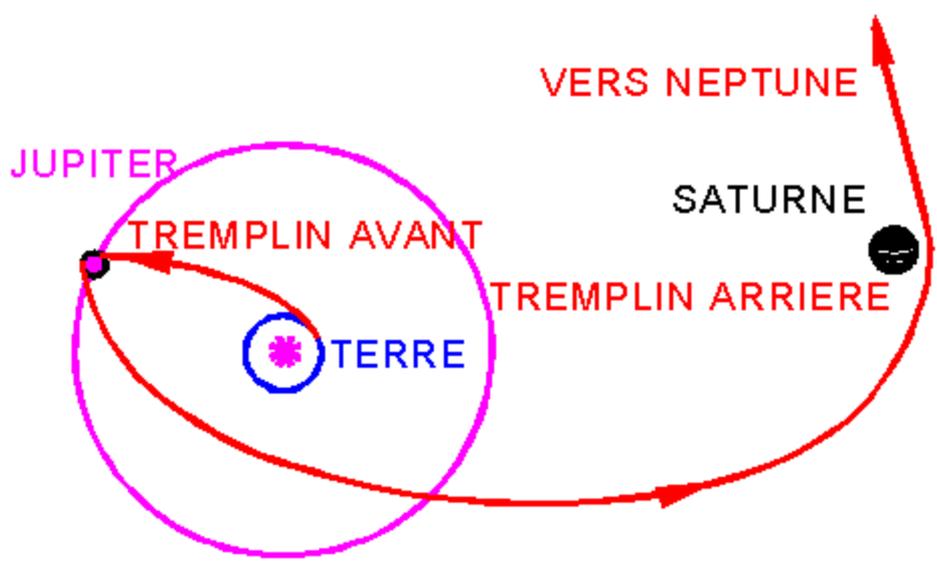
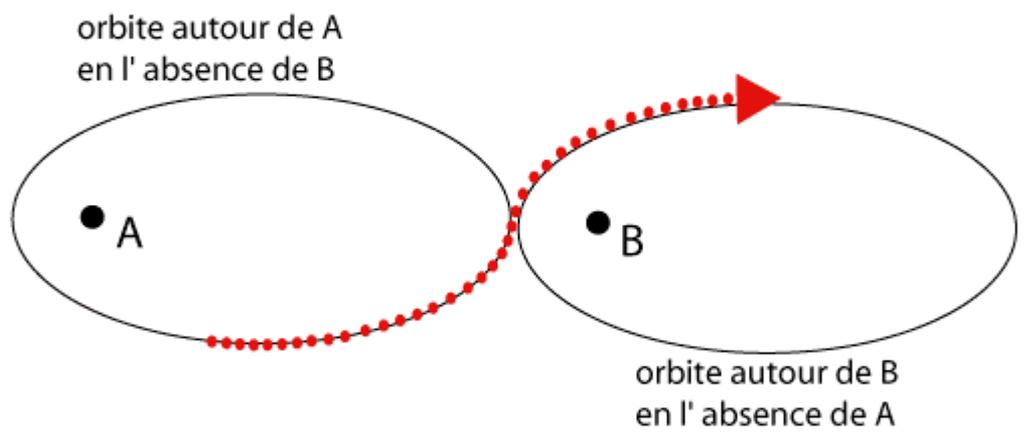
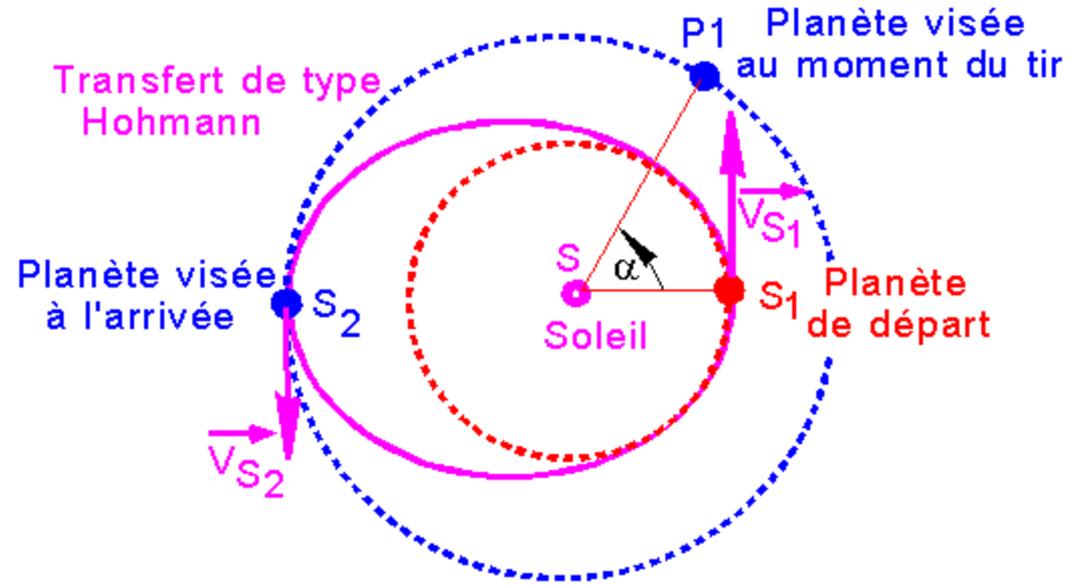
L1 : SOHO

L2 : Plank, GAIA

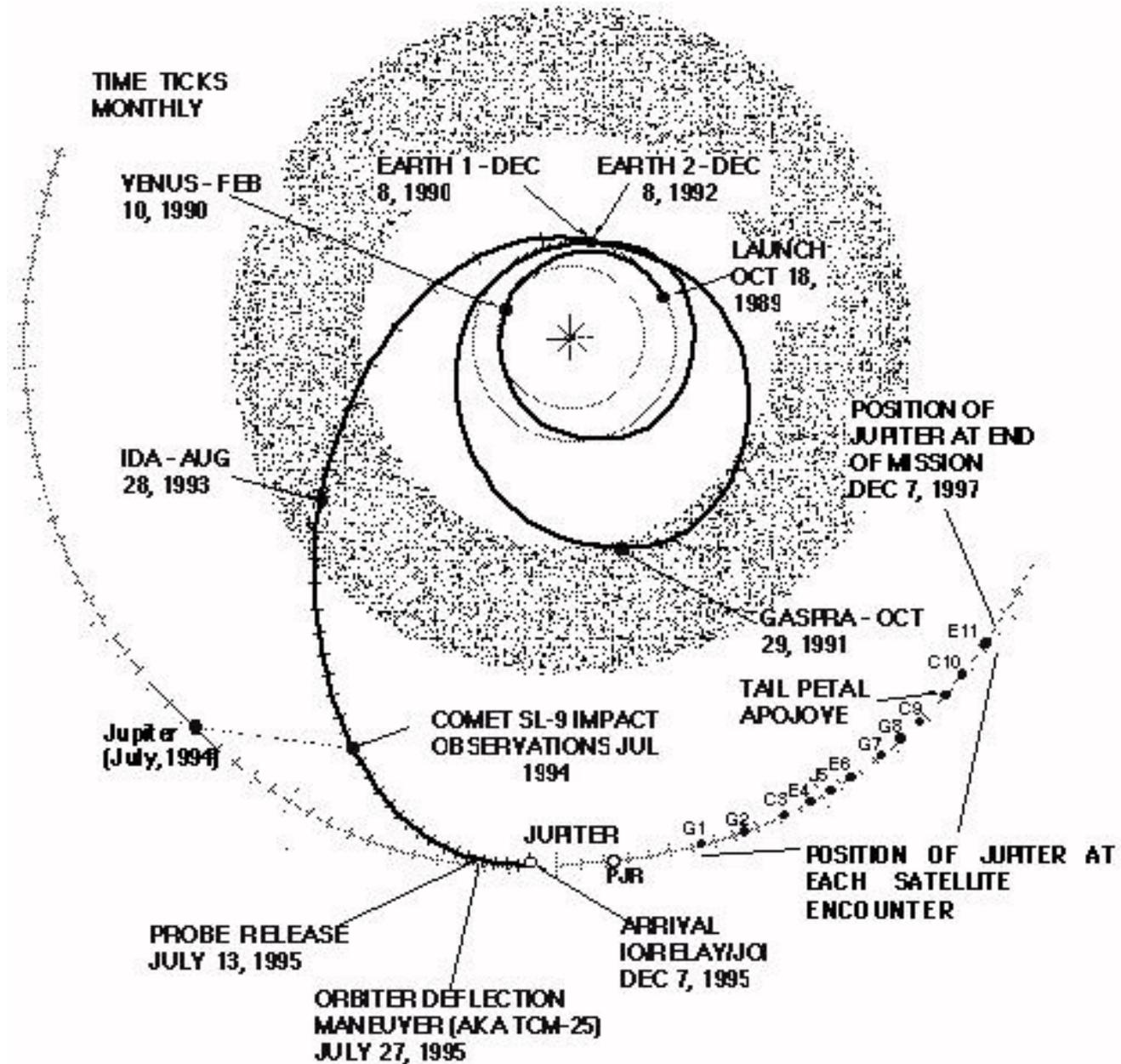
Terre-L2 : 1 500 000 km



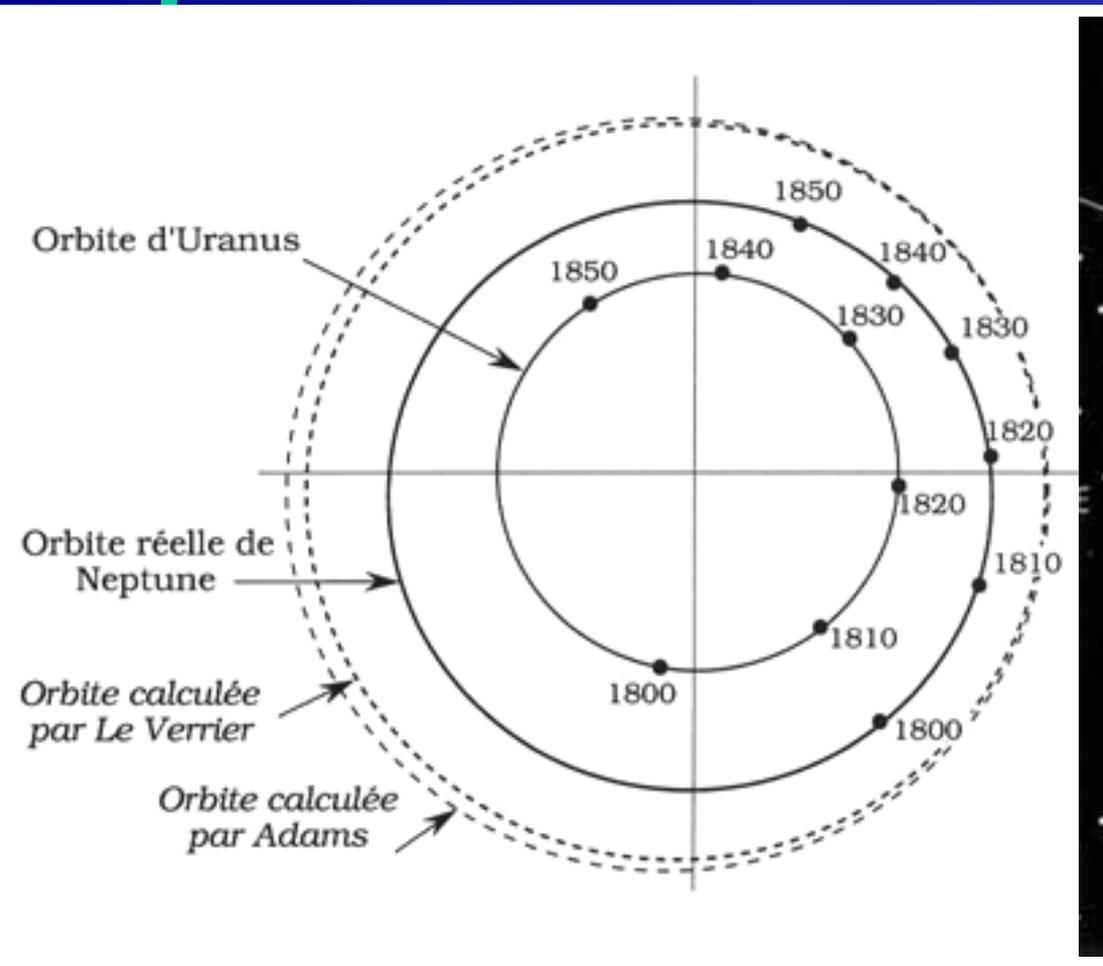
Joseph-Louis Lagrange (1736- 1813)



# La trajectoire de la sonde Galileo

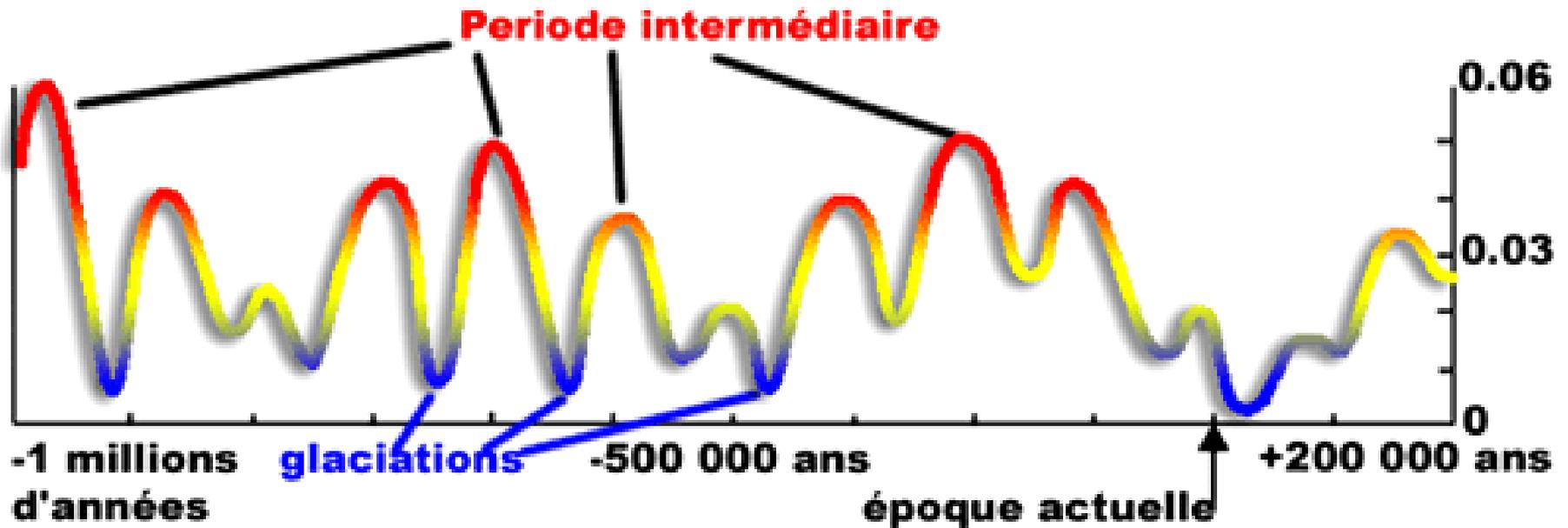


# La découverte de Neptune par Le Verrier



# La paléoclimatologie et la mécanique céleste: dater les temps géologiques

## Excentricité de l'orbite terrestre







Dysnomia



**Sedna:**  
**1600 km**



**Eris**  
(2003 UB313)  
**2400 km**



**Quaoar:**  
**1300 km**



**Pluton:**  
**2390 km**

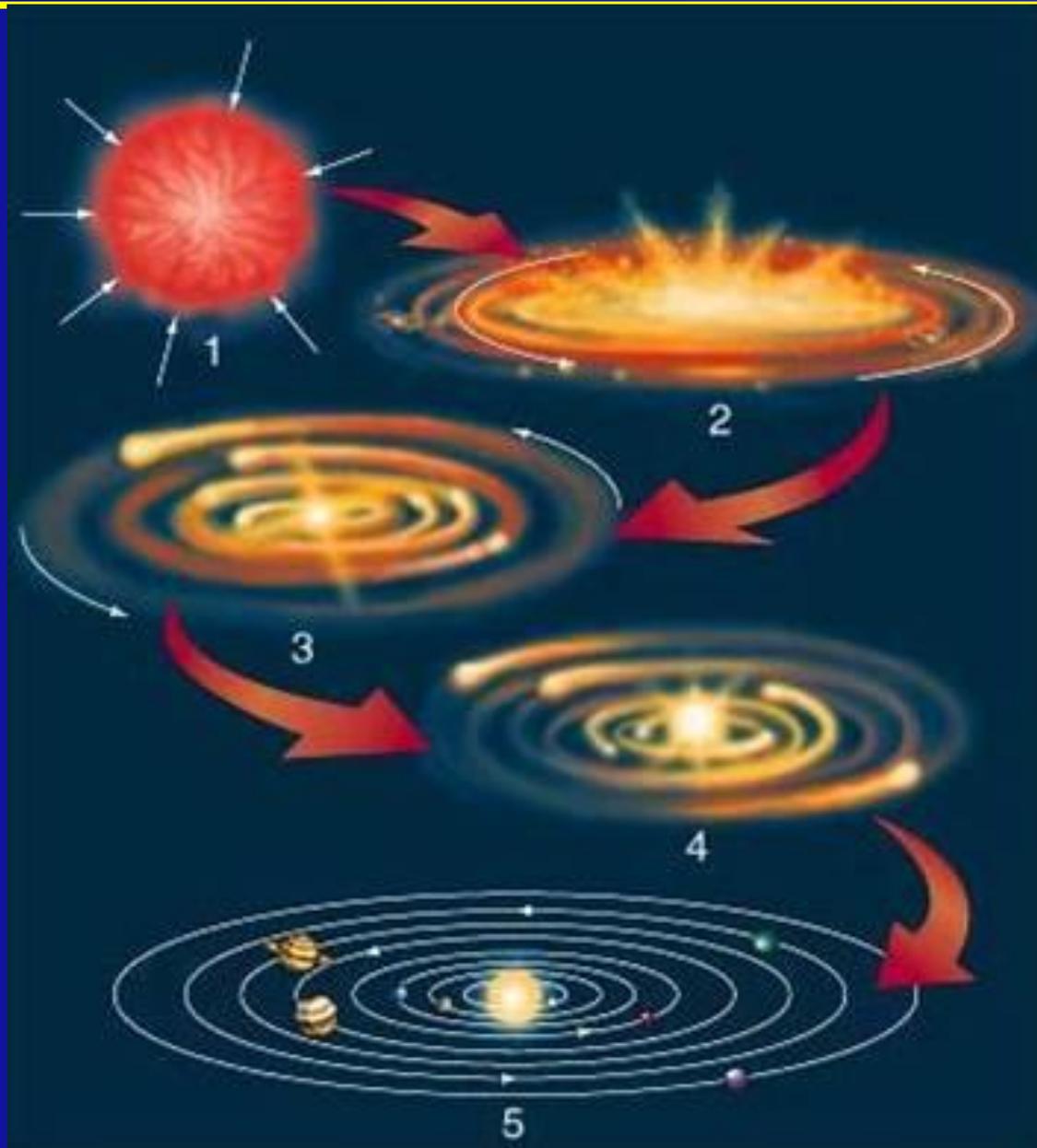
Charon



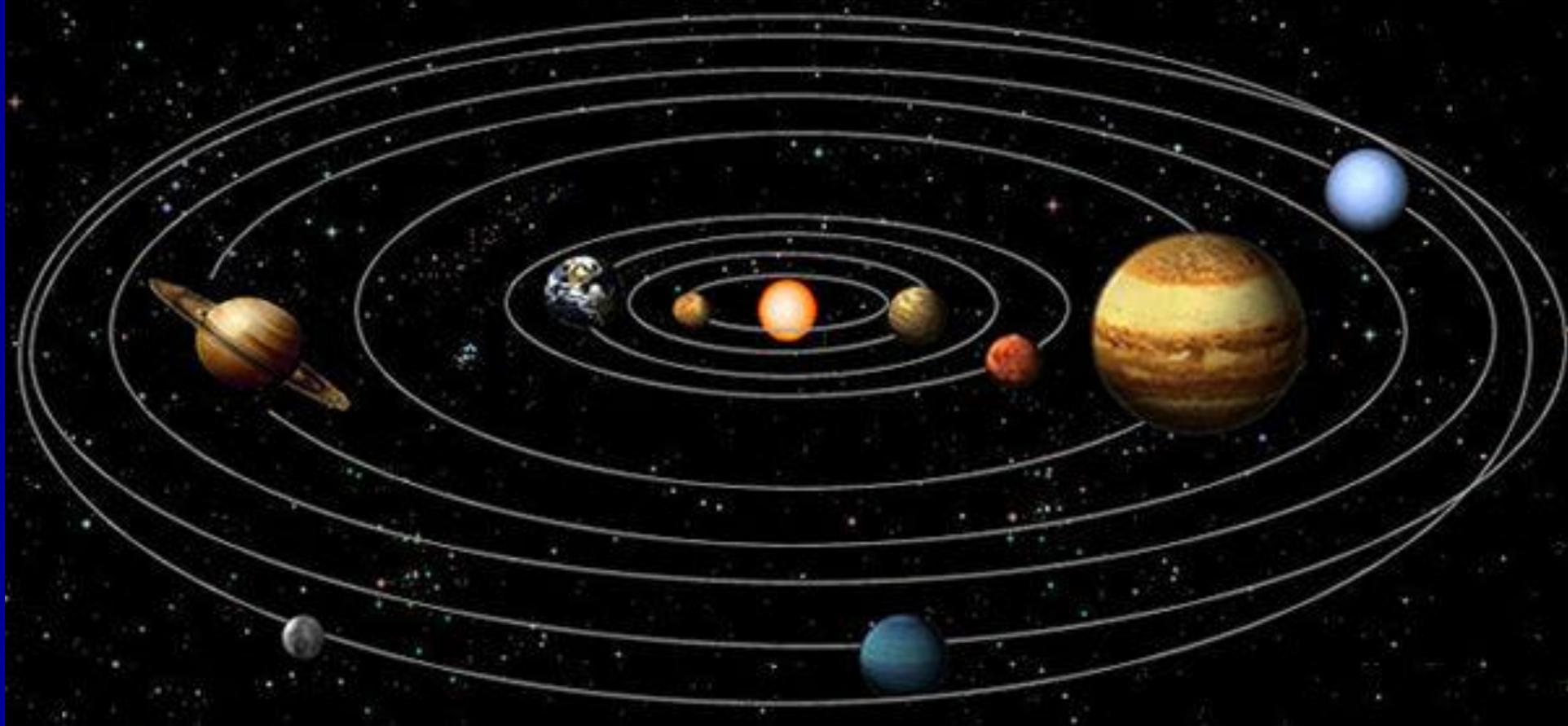
**Lune:**  
**3475 km**

**Terre:**  
**12756 km**

# La formation du système solaire pour expliquer les planètes



# L'étape actuelle de l'évolution du système solaire



## ***THE MIDDLE SOLAR SYSTEM***

This animation shows the motion of the middle part of the solar system over a two-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Mercury, Venus, Earth Mars and Jupiter are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles). Comets are shown as blue squares (numbered periodic comets are filled squares, other comets are outline squares). Main-belt minor planets are displayed as green circles, near-Earth minor planets are shown as red circles.

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGPLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.

## ***THE OUTER SOLAR SYSTEM***

This animation shows the motion of the outer part of the solar system over a 100-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Jupiter, Saturn Uranus and Neptune are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles).

Comets: blue squares (filled for numbered periodic comets, outline for other comets)

High-e objects: cyan triangles

Centaur: orange triangles

Plutinos: white circles (Pluto itself is the large white crossed circle)

"Classical" TNOs: red circles

Scattered Disk Objects: magenta circles

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGPLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.

## L'évolution du système solaire

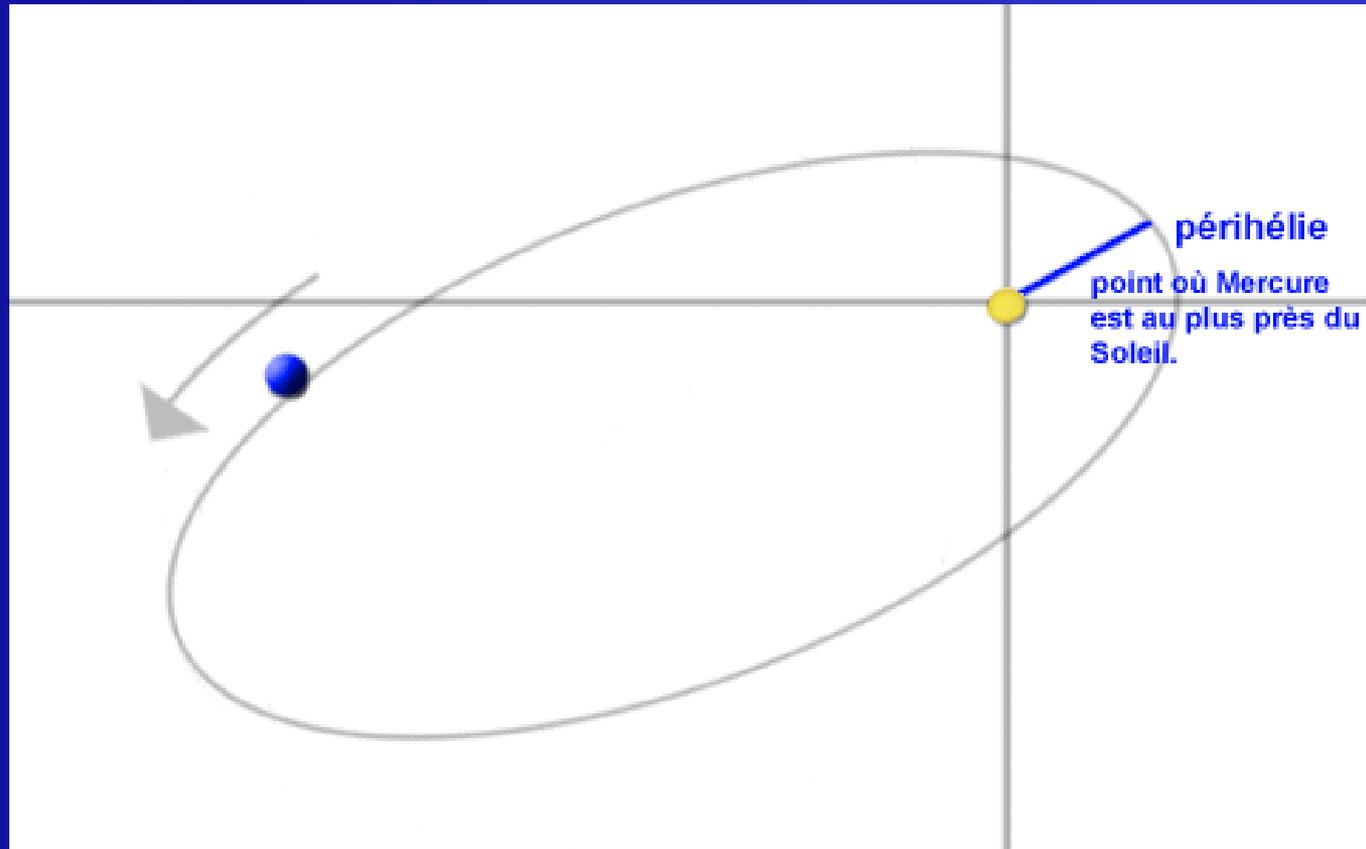
- Les plus gros corps (« planètes »?) vont absorber les plus petits
- La dissipation d'énergie (marées, collisions) circularise les orbites des gros corps (« planètes »?)
- Les petits corps vont disparaître et il ne restera plus que les « planètes », corps sur des orbites au minimum d'énergie
- Ces corps ne seront plus que huit (ou peut-être sept\*)

\* : rappelons-nous que Mercure a une orbite inclinée de  $7^\circ$  et une excentricité de 0.20 mais ne recoupe pas d'autre orbite; Pluton:  $17^\circ$  et 0.25 recoupe l'orbite de Neptune.

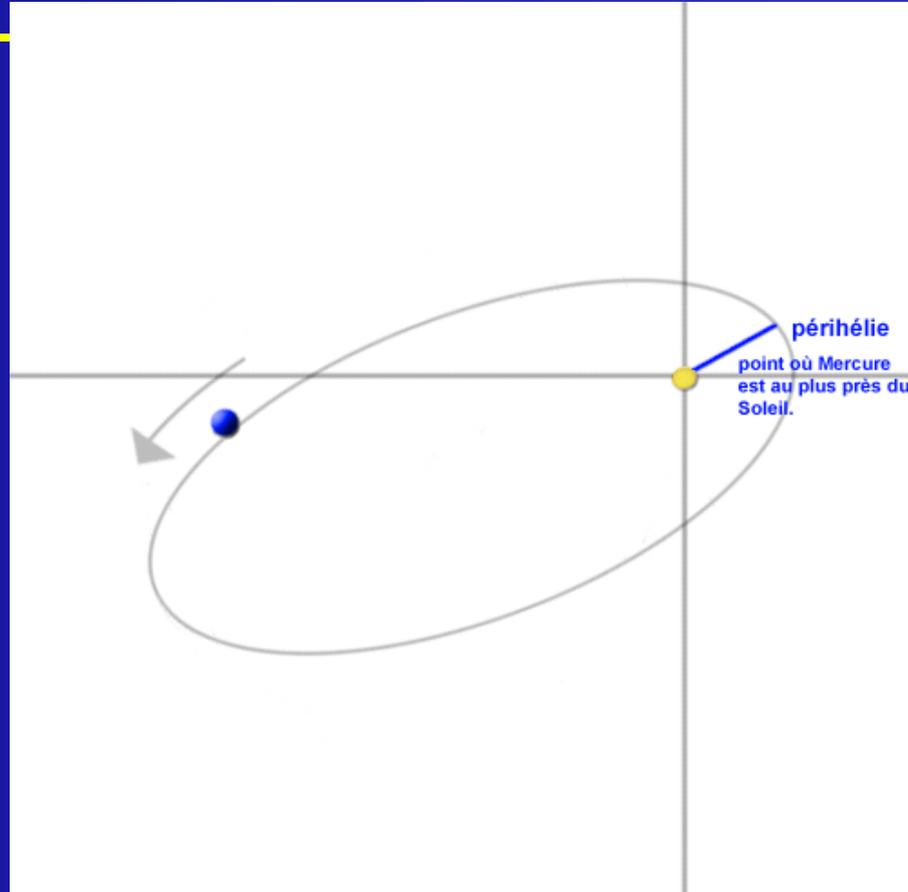
# Pourquoi augmenter toujours la précision des observations?

L'augmentation de la précision de mesure des distances va rendre caduques les modèles admis jusqu'alors.

Par exemple, les mesures précises de position de Mercure faites à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle montrent que la planète n'est pas à sa place: le modèle d'univers newtonien bat de l'aile...



# Les limites de la gravitation universelle de Newton



Un nouveau modèle va expliquer les errements de Mercure:

- Il n'y a pas de repère ni de temps absolus (exit Galilée)
- Il n'y a pas d'actions à distance (exit Newton)
- L'univers est courbe (exit Euclide)

# La relativité

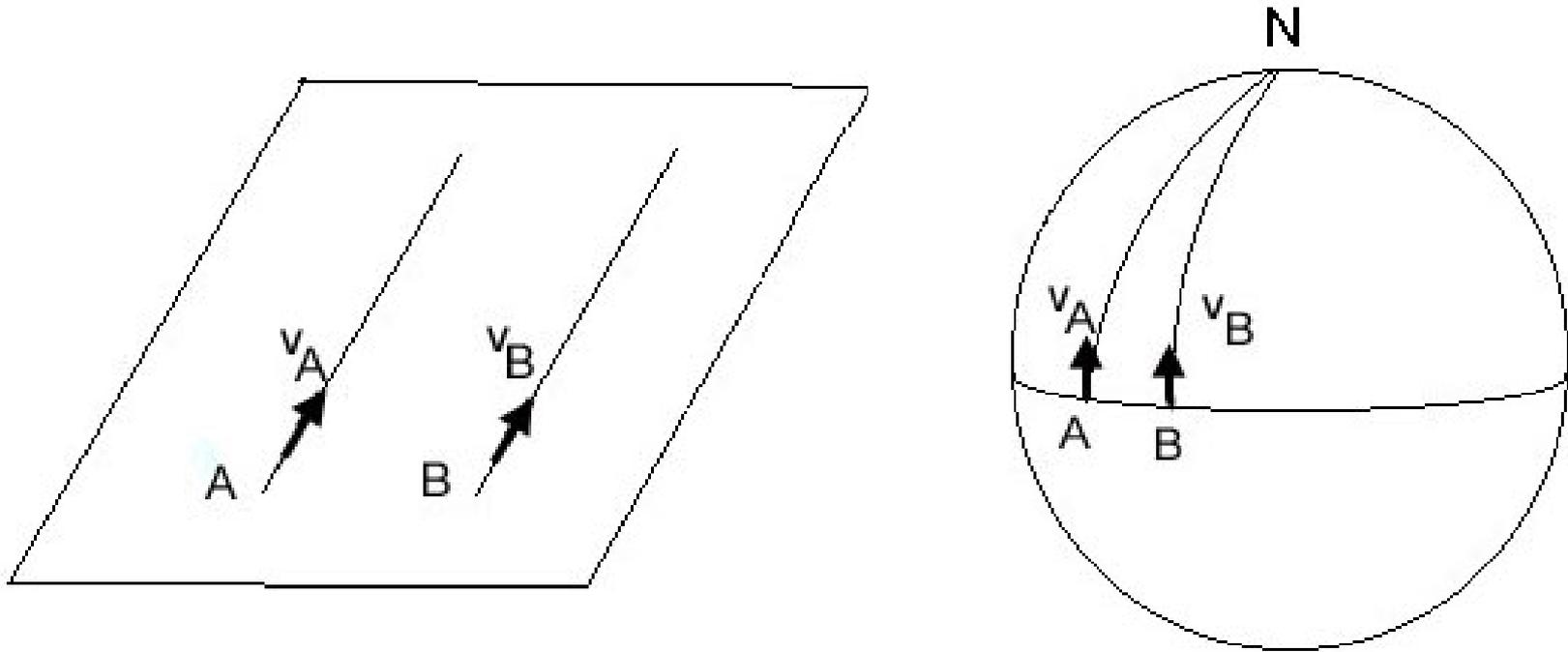
$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

**relativité galiléenne**

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

**relativité restreinte**

# La relativité générale: principe d'équivalence et courbure de l'espace



Quelles preuves a-t-on? Mercure? Les éclipses de Soleil? L'expansion de l'univers?

# Eclipse totale de Soleil du 1 août 2008: Novosibirsk

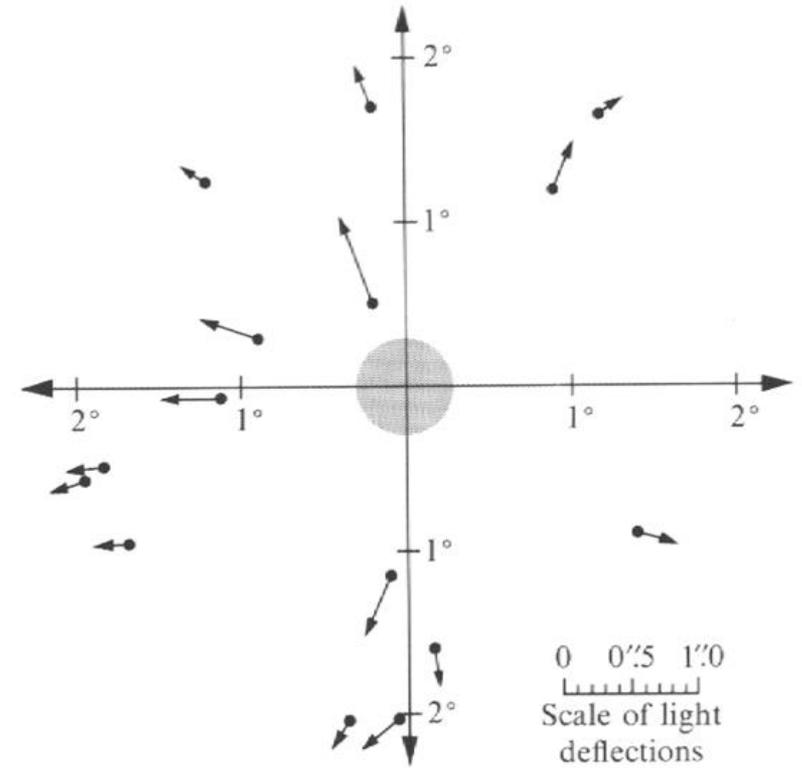
Vénus →



Mercure →



# Rayons lumineux déviés par la masse du Soleil



# Les arcs gravitationnels



Qu'est-ce que les éphémérides?

Ce sont les prédictions des positions et des phénomènes grâce à la mécanique céleste (éclipses, levers et couchers des astres, pluies d'étoiles filantes,...) des astres du système solaire.

# Forme des éphémérides: des tables

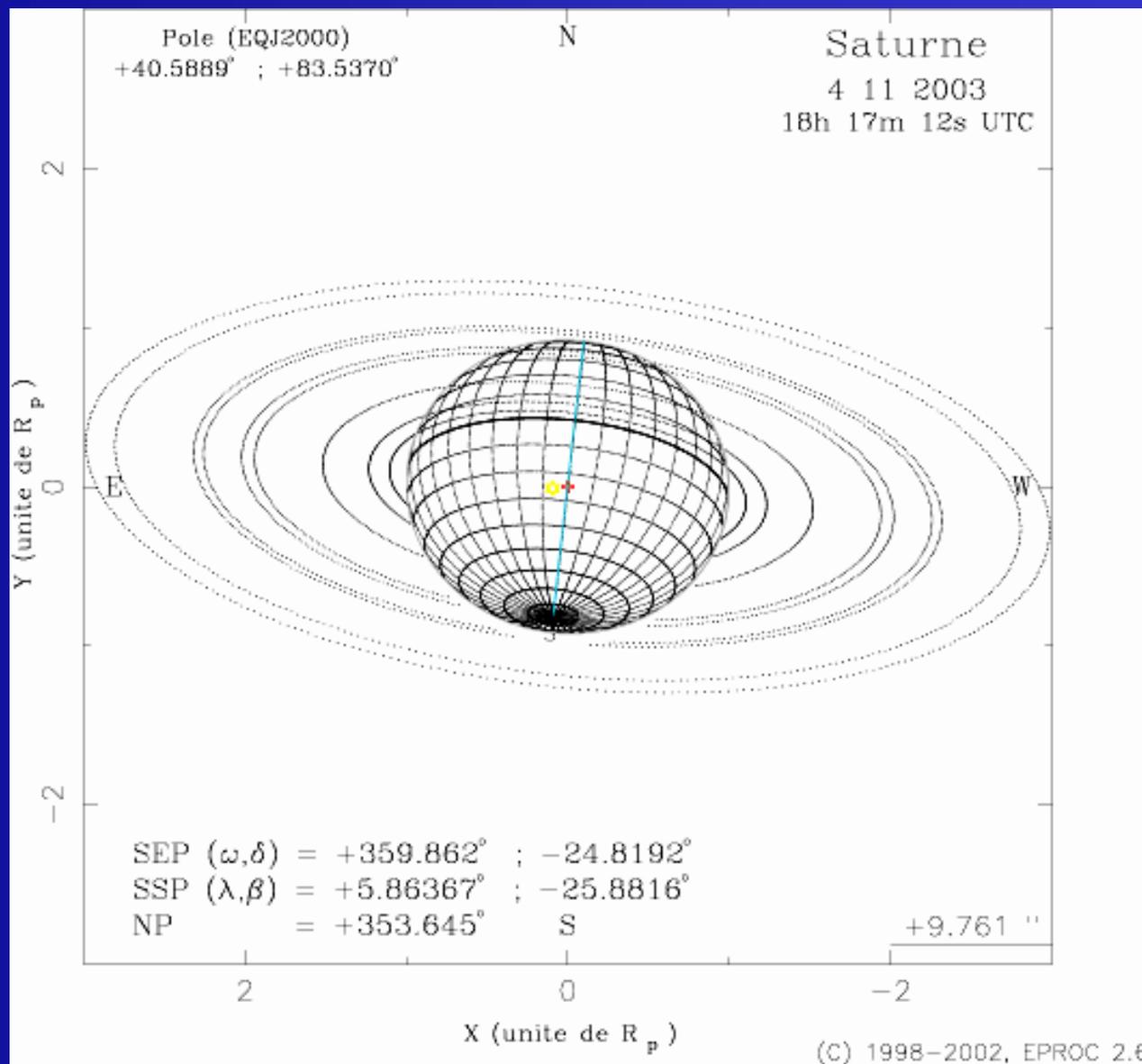
## SOLEIL 2009 à 0h TT

### ASCENSION DROITE ET DÉCLINAISON APPARENTES, TEMPS DE PASSAGE

Équinoxe et équateur vrais de la date.

Date	asc. droite			déclinaison			t. passage			Date	asc. droite			déclinaison			t. passage				
	h	m	s	°	'	"	h	m	s		h	m	s	°	'	"	h	m	s		
<b>Juill.</b>	3	6	48	47.354	22	57	55.28	12	4	16.00	<b>Août</b>	18	9	49	53.718	13	7	20.04	12	3	48.54
	4	6	52	54.785	22	52	54.93	12	4	26.71		19	9	53	36.850	12	47	52.03	12	3	34.87
	5	6	57	1.890	22	47	30.73	12	4	37.08		20	9	57	19.494	12	28	11.85	12	3	20.72
	6	7	1	8.649	22	41	42.83	12	4	47.10		21	10	1	1.658	12	8	19.84	12	3	6.10
	7	7	5	15.046	22	35	31.35	12	4	56.74		22	10	4	43.351	11	48	16.34	12	2	51.02
	8	7	9	21.065	22	28	56.45	12	5	6.01		23	10	8	24.584	11	28	1.69	12	2	35.48
	9	7	13	26.690	22	21	58.25	12	5	14.87		24	10	12	5.367	11	7	36.24	12	2	19.49
	10	7	17	31.906	22	14	36.91	12	5	23.32		25	10	15	45.715	10	47	0.30	12	2	3.08
	11	7	21	36.700	22	6	52.59	12	5	31.34		26	10	19	25.639	10	26	14.22	12	1	46.24
	12	7	25	41.058	21	58	45.44	12	5	38.93		27	10	23	5.154	10	5	18.33	12	1	29.00
	13	7	29	44.969	21	50	15.64	12	5	46.06		28	10	26	44.274	9	44	12.96	12	1	11.38
	14	7	33	48.422	21	41	23.35	12	5	52.73		29	10	30	23.014	9	22	58.42	12	0	53.38
15	7	37	51.404	21	32	8.77	12	5	58.92	30	10	34	1.389	9	1	35.04	12	0	35.02		
16	7	41	53.906	21	22	32.10	12	6	4.62	31	10	37	39.417	8	40	3.14	12	0	16.33		
17	7	45	55.916	21	12	33.53	12	6	9.82	<b>Sept.</b>	1	10	41	17.114	8	18	23.01	11	59	57.32	
18	7	49	57.424	21	2	13.31	12	6	14.50	2	10	44	54.498	7	56	34.97	11	59	38.00		
19	7	53	58.416	20	51	31.65	12	6	18.66	3	10	48	31.589	7	34	39.33	11	59	18.41		
20	7	57	58.879	20	40	28.83	12	6	22.29	4	10	52	8.407	7	12	36.37	11	58	58.55		
21	8	1	58.795	20	29	5.10	12	6	25.36	5	10	55	44.973	6	50	26.40	11	58	38.46		
22	8	5	58.149	20	17	20.74	12	6	27.86	6	10	59	21.308	6	28	9.70	11	58	18.15		

# Forme des éphémérides: des configurations



# Des éphémérides depuis 1679 à l'observatoire de Paris

48 Les vrais lieux des Planetes.

49 pour les 1. 11. & 21. jours de chaque mois.

**JANVIER.**

Jours.	♃		♄		♅		♆		
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	
1	17	41	13	21	0	26	11	55	
11	18	45	12	30	8	0	22	8	
21	19	45	11	49	15	37	2	18	
Latitude.									
1	1	S.	21	0	M.	28	0	M.	38
11	1		21	0		26	0		45
21	1		20	0		25	0		51

**FEVRIER.**

Jours.	♃		♄		♅		♆		
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	
1	20	46	11	Di.	34	24	6	13	28
11	21	34	11		38	1	49	23	35
21	22	14	12		24	9	36	3	40
Latitude.									
1	1	S.	20	0	M.	22	0	M.	58
11	1		24	0		20	0		2
21	1		21	0		18	0		5

**MARS.**

Jours.	♃		♄		♅		♆		
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	
1	22	42	12	35	15	49	11	41	
11	23	7	13	32	23	37	21	39	
21	23	21	14	44	1	25	1	25	
Latitude.									
1	1	S.	21	0	M.	17	1	M.	8
11	1		22	0		15	1		11
21	1		23	0		14	1		14

**JANVIER.**

Jours.	♃		♄		♅		♆		
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	
1	0	4	2	0	5	50	2	31	
11	12	2	7	Re.	30	18	40	1	59
21	24	7	2	29	22	29	41	1	28
Latitude.									
1	2	S.	25	0	M.	50	4	M.	58
11	2		6	0	S.	55	3	S.	38
21	1		37	2		55	0		43

**FEVRIER.**

Jours.	♃		♄		♅		♆			
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.		
1	7	33	24	Di.	6	27	44	0	53	
11	9	48	26		42	2	8	13	0	11
21	2	5	7	47	14	15	19	49		
Latitude.										
1	1	S.	4	3	S.	8	2	M.	40	
11	0	M.	32	1		42	4	S.	59	
21	0		1	2	M.	7	3	M.	31	

**MARS.**

Jours.	♃		♄		♅		♆		
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	
1	11	53	19	59	7	58	29	24	
11	24	13	7	18	10	42	8	52	
21	6	34	25	49	22	34	28	20	
Latitude.									
1	0	M.	26	0	M.	54	1	M.	45
11	0		51	1		35	4	S.	52
21	1		10	1		26	4	M.	4

( 185 ) Année 1808.

ASCENSION DR. c DÉCLINAISON DE LA LUNE.

JOURS.	A MIDI.		A MINUIT.		A 6 HEUR.		A 12 HEUR.		A 18 HEUR.			
	D. M.		D. M.		D. M.		D. M.		D. M.			
	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.		
1	48.	59	55.	9	17.	17. B	17.	47. B	18.	14. B	18.	37. B
2	61.	22	67.	40	18.	58.	19.	15.	19.	29.	19.	40.
3	74.	1	80.	25	19.	48.	19.	52.	19.	53.	19.	50.
4	86.	50	93.	15	19.	45.	19.	35.	19.	22.	19.	6.
5	99.	41	106.	6	18.	47.	18.	24.	17.	57.	17.	28.
6	112.	28	118.	50	16.	55.	16.	19.	15.	41.	14.	59.
7	125.	8	131.	25	14.	15.	13.	28.	12.	38.	11.	46.
8	139.	41	143.	56	10.	52.	9.	56.	8.	57.	7.	57.
9	150.	11	156.	26	6.	55.	5.	51.	4.	46.	3.	40. B
10	162.	43	169.	5	2.	32. B	1.	24. B	0.	15. B	0.	54. A
11	175.	31	182.	4	2.	4. A	3.	14. A	4.	24. A	5.	33.
12	188.	44	195.	33	6.	42.	7.	49.	8.	56.	10.	1.
13	202.	33	209.	43	11.	4.	12.	5.	13.	4.	13.	59.
14	217.	5	224.	38	14.	52.	15.	42.	16.	28.	17.	10.
15	232.	20	240.	11	17.	48.	18.	21.	18.	49.	19.	12.
16	248.	7	256.	7	19.	30.	19.	43.	19.	51.	19.	53.
17	264.	5	272.	0	19.	50.	19.	42.	19.	28.	19.	10.
18	279.	48	287.	26	18.	47.	18.	19.	17.	47.	17.	11.
19	294.	53	302.	6	16.	31.	15.	47.	15.	1.	14.	11.
20	309.	7	315.	55	13.	18.	12.	23.	11.	27.	10.	28.
21	322.	31	328.	55	9.	28.	8.	27.	7.	25.	6.	22.
22	335.	9	341.	15	5.	18.	4.	13. A	3.	9. A	2.	5. A
23	347.	14	353.	7	1.	0. A	0.	3. B	1.	7. B	2.	10. B
24	358.	56	4.	43	3.	12. B	4.	13.	5.	14.	6.	13.
25	10.	28	16.	14	7.	11.	8.	8.	9.	4.	9.	58.
26	22.	1	27.	50	10.	50.	11.	40.	12.	29.	13.	16.
27	33.	43	39.	39	14.	0.	14.	43.	15.	23.	16.	1.
28	45.	40	51.	46	16.	36.	17.	9.	17.	39.	18.	6.
29	57.	57	64.	12	18.	31.	18.	52.	19.	11.	19.	26.
30	70.	32	76.	56	19.	38.	19.	46.	19.	51.	19.	53.
31	83.	23	90.	51	19.	51.	19.	46.	19.	37.	19.	25.

LA  
**CONNOISSANCE**  
 DES TEMPS,  
 OU CALENDRIER  
 ET  
**EPHEMERIDES**

du lever & du coucher du Soleil &  
 de la Lune, avec le passage de la Lune  
 & des autres Planetes par le meridien.

**LES VRAIS LIEUX**  
 de ces Planetes, tant en longitude  
 qu'en latitude.

**PLUSIEURS AUTRES TABLES**  
 d'Astronomie,

**CALCULEES POUR PARIS,**

Et pour l'Année 1693.

Avec la maniere de s'en servir aux autres  
 Elevations.

**DEDIE' AU ROY.**

A PARIS,

Chez ESTIENNE MICHALLET, rue S.  
 Jacques, à l'Image saint Paul.

Avec Privilege de sa Majesté.

*Des Eclipses de l'année 1693.*

**N**ous aurons cette année six Eclipses,  
 quatre de Soleil, & deux de Lune.  
 Les 4 de Soleil nous seront invisibles. Des  
 deux Eclipses de Lune, il y en aura seulement  
 une qui paroîtra sur l'horison de Paris, &  
 qui se fera le 22 Janvier à 3 h. 31 min. 55 sec.  
 du matin. Son commencement arrivera à 2  
 h. 2. min. 25. sec. Le commencement de la to-  
 tale obscurité à 3 h. 1 min. 43 sec. Le com-  
 mencement du recouvrement de lumiere à 4  
 h. 42 min. 7 sec. La fin totale à 5 h. 41 min.  
 25 sec. La durée de la totale obscurité 1 h.  
 40 min. 24 sec. La durée entiere 3 h. 39 min.  
 La grandeur de l'Eclipse 20 doigts 9 min.

Elle sera venue en Europe en-deçà de la  
 Grece orientale, & de la Moscovie, & en  
 Afrique en-d çà de la Numidie, & dans les Isles  
 de l'Ocean atlantique, & dans l'Amérique  
 australe & boreale en-deçà de Tatoucaac.

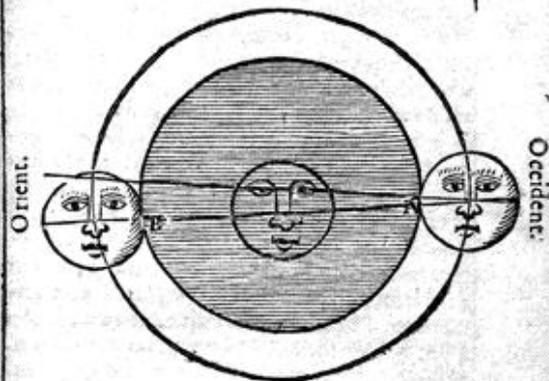
Les peuples de la Grece orientale, de la Mel-  
 darie, de la Moscovie, & toute la Tartarie  
 occidentale, avec les habitans des environs  
 de la mer Caspienne & du Pont-Euxin en ver-  
 ront le commencement. La fin sera venue de  
 Tenduc & des pays d'Anian & de Quivira.

On ne la verra point de la Chine, du Japon,  
 des Philippines, des Molucques, de Java, de  
 Sumatra, de Malacca, de la nouvelle Guinée  
 ny des Isles de Salomon & des Larrons, &c.



*Figure de l'Eclipse de la Lune  
 le 22. Janvier.*

Septentrion.



Midy.

La Lune commencera à s'éclipser au point  
 A, & finira au point B.



## ÉCLIPSES DU TROISIÈME SATELLITE.

Temps moyen de Paris.

1870.	ÉMISSIONS.	1870.	ÉMISSIONS.
Janv. 1	1.13.11	Janv. 1	3. 0. 25
8	*5.14.58	8	*7. 2.17
15	*9.17. 0	15	*11. 4.26
22	13.19. 4	22	15. 6.41
29	17.21.46	29	19. 9.37
Févr. 5	21.23.54	Févr. 5	23.11.59
13	1.26. 8	13	3.14.31
20	5.27.49	20	*7.16.32
27	*9.29.21	27	11.18.25
Mars 6	13.31. 1	Mars 6	15.20.31
13	17.32.40	13	19.22.35
20	21.34.50	20	23.25.15
28	1.36.20	28	3.27.16
Avril 4	5.37.52	Avril 4	7.29.20
11	9.38.47	11	11.30.50
18	13.39.31	18	15.32.10
25	17.42.26	25	19.33.42
Juin 22	1.43.21	Juin 22	3.42.48
29	5.43.45	29	7.44. 3
Juill. 6	9.43.27	Juill. 6	11.44.39
13	13.43. 6	13	15.45.13
20	17.42.14	20	19.45.16
27	21.41.15	27	23.45.14
Août 4	1.40.32	Août 4	3.45.29
11	5.39.43	11	7.45.39
18	9.39.26	18	11.46.21
25	*13.38.30	25	*15.46.28
Sept. 1	17.37.33	Sept. 1	19.46.32
8	21.36.11	8	23.46.10
16	1.34.46	16	3.45.51
23	5.33.44	23	7.45.51
30	9.32.40	30	*11.45.52
Oct. 7	*13.32.13	Oct. 7	*15.46.29
14	*17.31.13	14	19.46.34
21	21.30.13	21	23.46.46
29	1.28.59	29	3.46.32
Nov. 5	5.27.48	Nov. 5	*7.46.28
12	*9.27. 7	12	*11.46.54
19	*13.26.29	19	15.47.25
26	*17.26.32	26	19.48.40
Déc. 3	21.26. 9	Déc. 3	23.49.25
11	1.25.53	11	3.50.14

On ne pourra pas observer les éclipses du 3<sup>e</sup> Satellite de Jupiter du 25 avril au 22 juin, parce que Jupiter sera trop près du Soleil.

Il n'y a pas d'éclipse du 4<sup>e</sup> Satellite pendant l'année 1870.

JANVIER 1870.

## CONFIGURATIONS DES SATELLITES DE JUPITER,

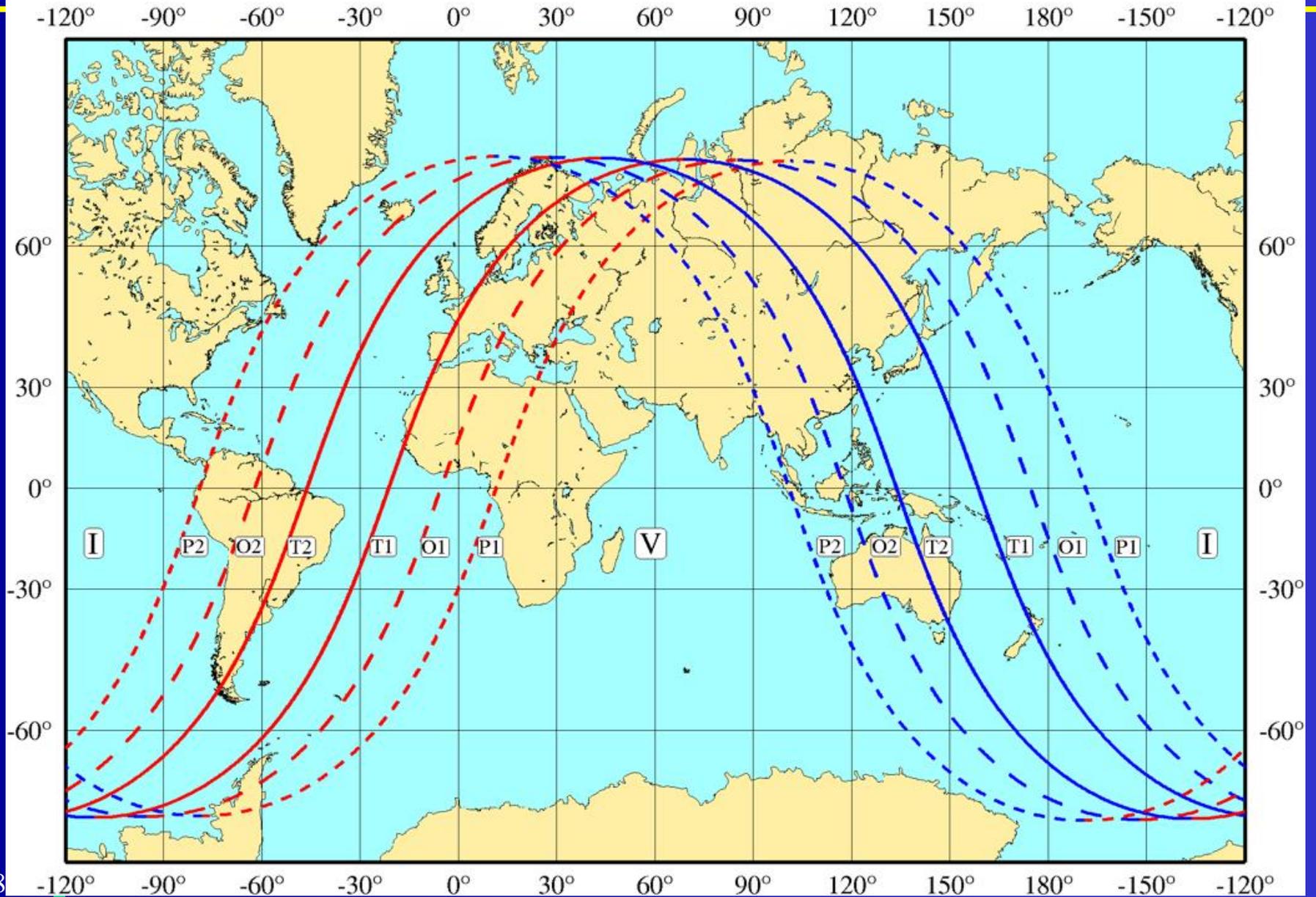
à 9<sup>e</sup> temps moyen de Paris.

1		1.	○	2.3	4
2			○	1	3 4
3		2.	○		3. 4
4		2.	○3.	1.	4
5		3.	1	○	2 4
6	○	3		○1.	4
7	●	2.3		○	4
8		1.	○4.	2.3	
9		4.		○	1 2. 3
10		4.	2.1.	○	3.
11	4.		2	○3.	1.
12	4.	3.	1	○	2
13	4	3.		○2.1.	
14	4		1.	○	
15		4	1.	○	2
16			4	○	1 2. 3
17			1.	○	4 3.
18		2.		○	3. 1. 4
19		3. 1		○	2 4
20		3.		○	2.1. 4
21		3 2.	1	○	4
22	1○. ●2. ●3.			○	4
23				○	1 2. 3 4.
24			1.	○	4. 3.
25		2.	4.	○	1
26		4.	1.	○	2
27		4. 3.		○	1.
28	4.	3 2.	1	○	
29	4			○1.	
30	4			○	2

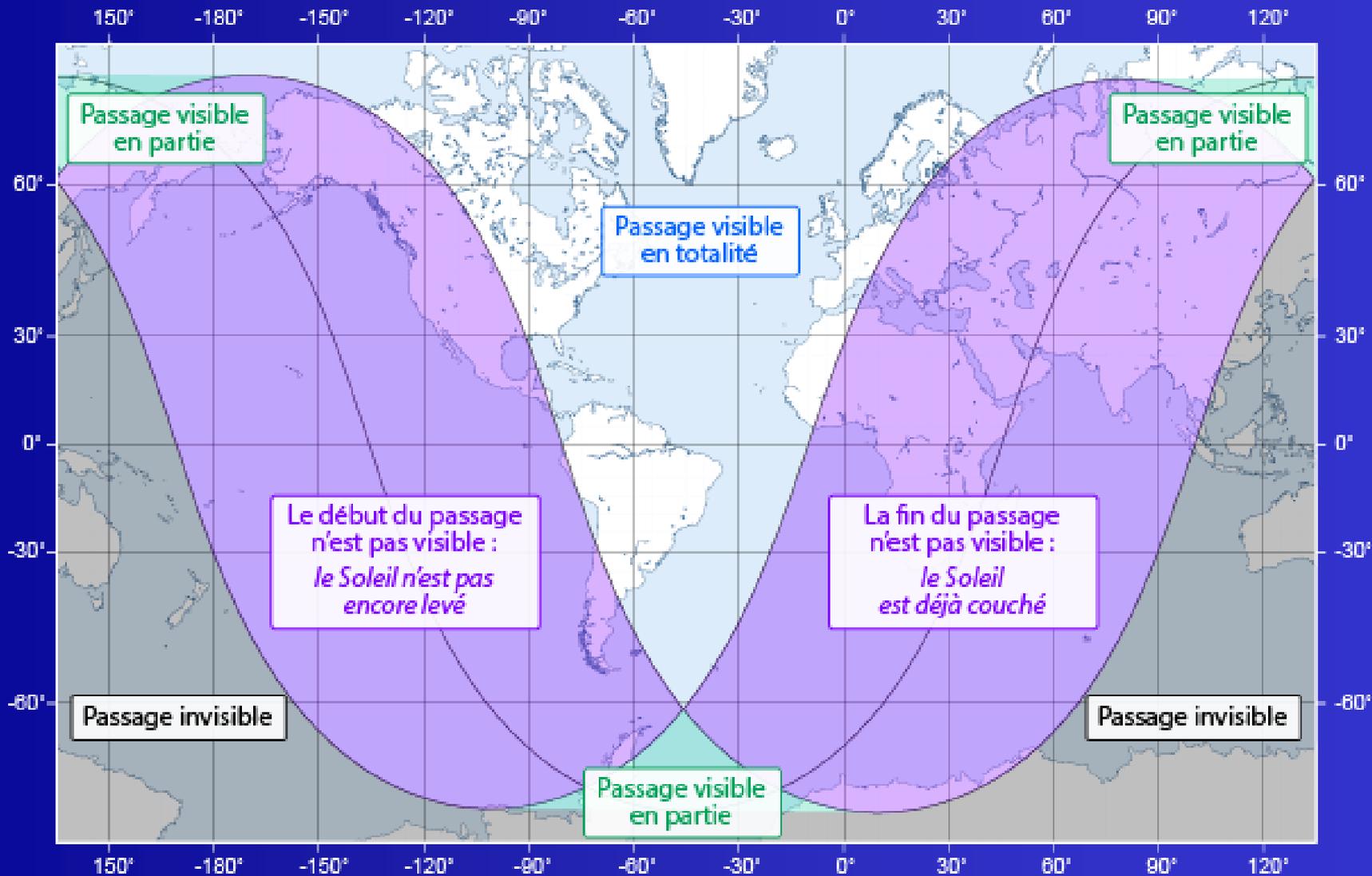
# Éclipse partielle du Soleil le 11 août 2018



# Éclipse totale de Lune du 27 juillet 2018



# Le passage de Mercure du 9 mai 2016



# Passage de Mercure devant le Soleil

Le 11 novembre 2019

Maxi à 15h19h31s UTC

Durée  
5h30m11s

Lever du Soleil à Paris: 6h 51 min  
Coucher du Soleil: 16h 15 min

Visible à Paris

# Les éphémérides dans le monde

USA:                   - USNO-Navy (Washington, DC)  
                          - JPL-NASA (Pasadena, Ca)

France: - IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des  
          éphémérides-observatoire de Paris)

Russie: - Institute for Applied Astronomy (St Petersburg)

Grande Bretagne:       - PParc

Japon:                 - Hydrographic department (Tokyo)

Chine:                 - Purple Mountain Observatory (Nanjing)

Espagne:               - observatoire de la Marine (San Fernando)

Seuls le JPL (NASA, USA) et l' IMCCE (observatoire de Paris, France)  
fabriquent des éphémérides indépendantes. Les autres pays participent à  
l'élaboration de ces éphémérides ou bien les recopient dans leurs ouvrages  
nationaux.



MOTEUR DE RECHERCHE

ok

PRÉSENTATION

PUBLICATIONS

ÉPHÉMÉRIDES

PAGES DE L'OBSERVATEUR

FORMATION ET STAGES

SERVEUR FTP

PLAN DU SITE

CONTACT

ENGLISH VERSION

**EPHEMERIDES** → SOMMAIRE

## NOUVELLES ASTRONOMIQUES

- **Nouvel an chinois le 26 janvier 2009.**
- **L'éclipse annulaire du 26 janvier 2009**
- **Introduction d'une seconde intercalaire**
- **La Terre au périhélie**
- **Les Quadruplés**

▶ archives

RSS

LA RECHERCHE A L'IMCCE

ASTRONOMIE POUR TOUS

BASE DE DONNEES

SITES HEBERGES

SEMINAIRES

EXPERT

INSCRIVEZ-VOUS ...

INTRANET



## GÉNÉRATEURS D'ÉPHÉMÉRIDES

- ▶ Ephémérides générales de position des corps du système solaire
- ▶ Ephémérides générales de position des satellites naturels
- ▶ Ephémérides pour l'observation physique des corps du système solaire - MOVIS

## PHÉNOMÈNES CÉLESTES

- ▶ Levers, couchers et passages au méridien des corps du système solaire
- ▶ Passages de Mercure et Vénus devant le Soleil de l'an -2999 à +3000
- ▶ Eclipses de Lune entre 1997 et 2020
- ▶ Eclipses de Soleil entre 1998 et 2020
- ▶ Phénomènes des satellites naturels de planètes
- ▶ Configurations géométriques des phénomènes mutuels des satellites galiléens
- ▶ Visibilité des phénomènes mutuels des satellites de Jupiter
- ▶ Visibilité des phénomènes mutuels des satellites de Saturne
- ▶ Activité des pluies météoritiques (anglais)
- ▶ Occultations stellaires



### Autres sources d'éphémérides

- JPL** [HORIZONS Generate Ephemeris](#)
- MPC** [Natural Satellites Ephemeris Service](#)
- NS Eph** [Service](#)
- IAA** [Institute of Applied Astronomy Ephemeris](#)
- IMCCE VO-PDC** [IMCCE Virtual Observatory](#)

[NSDB Observations](#) [Ephémérides](#) [Bibliographie](#) [Paramètres et constantes](#) [Liens Internet](#)

### MULTISAT. Ephémérides des planètes et des satellites naturels.

En | Ru

[MULTI-SAT accueil](#)  
[NSDB accueil](#)

### Ephémérides avec un pas constant

[Mars](#) [Jupiter<sub>I</sub>](#) [Jupiter<sub>O</sub>](#) [Saturne](#) [Uranus](#) [Neptune](#) [Pluton](#)  
[Mercure](#) [Vénus](#) [Soleil](#) [Lune](#)

### Ephémérides et (O-C) pour un fichier de dates et de positions

[Mars](#) [Jupiter<sub>I</sub>](#) [Jupiter<sub>O</sub>](#) [Saturne](#) [Uranus](#) [Neptune](#) [Pluton](#)  
[Mercure](#) [Vénus](#) [Soleil](#) [Lune](#)

### Configurations des systèmes de satellites

[Mars](#) [Jupiter<sub>I</sub>](#) [Jupiter<sub>O</sub>](#) [Saturne](#) [Uranus](#) [Neptune](#) [Pluton](#)

### Phénomènes des satellites

- [Recherche des phénomènes mutuels et des éclipses par la planète](#)
- **NEW** [Ephémérides des phénomènes mutuels des satellites Galiléen de Jupiter en 2021 \(en anglais\)](#)
- [Ephémérides des phénomènes mutuels des satellites Galiléen de Jupiter en 2014-2015 \(en anglais\)](#)
- [Ephémérides des éclipses des petits satellites de Jupiter par les satellites Galiléen. en 2014-2015 \(en anglais\)](#)
- [Ephémérides des phénomènes mutuels des satellites Galiléen de Jupiter en 2009 \(en anglais\)](#)
- [Ephémérides des phénomènes mutuels des satellites principaux de Saturne en 2008-2009 \(en anglais\)](#)

| Objectifs | | Origine des données | | Nomenclature des satellites |

[Credit](#)



## Natural Satellites Ephemeride Server. MULTI-SAT.

### Ephemerides with constant step on time

### Galilean and inner satellites of Jupiter

Choose galilean satellite theory version:

- by V.Lainey V2.0|V1.1  
  by V.Lainey V1.1  
  by J.-E. Arlot G-5  
  by D.Lieske E-5

- Choose Satellite  of Jupiter
- Relative to
- Choose planet theory version:
- Enter Observatory code (XXX)  (500 for geocenter) See [the list](#)
- Choose Epoch of equator and equinox  ([Description](#))
- Choose Time Scale:  UTC  TT
- Choose format of initial moment
- Enter initial moment
- Choose the step unit  the step value  the number of steps
- Choose type of output data 
  - do not output if the altitude is less than  ([Explication](#))

Ephémérides avec un pas constant [► Ephémérides](#)

## MULTISAT. Ephémérides des planètes

### Ephémérides avec un pas constant

### Satellites Galiléens et proches de Jupiter

Version théorie:

[Voir versions par défaut](#)

- Choisissez un satellite
- Relatif à
- Choisissez l'éphéméride de la planète :
- Tapez le code de l'observatoire (XXX)
- Choisissez l'époque de l'équateur et l'équinoxe :
- Choisissez l'échelle de temps:  UTC
- Indiquez le format de la date initiale
- Entrez la date initiale
- Choisissez l'unité du pas  la valeur du pas
- Choisissez le type de données en sortie

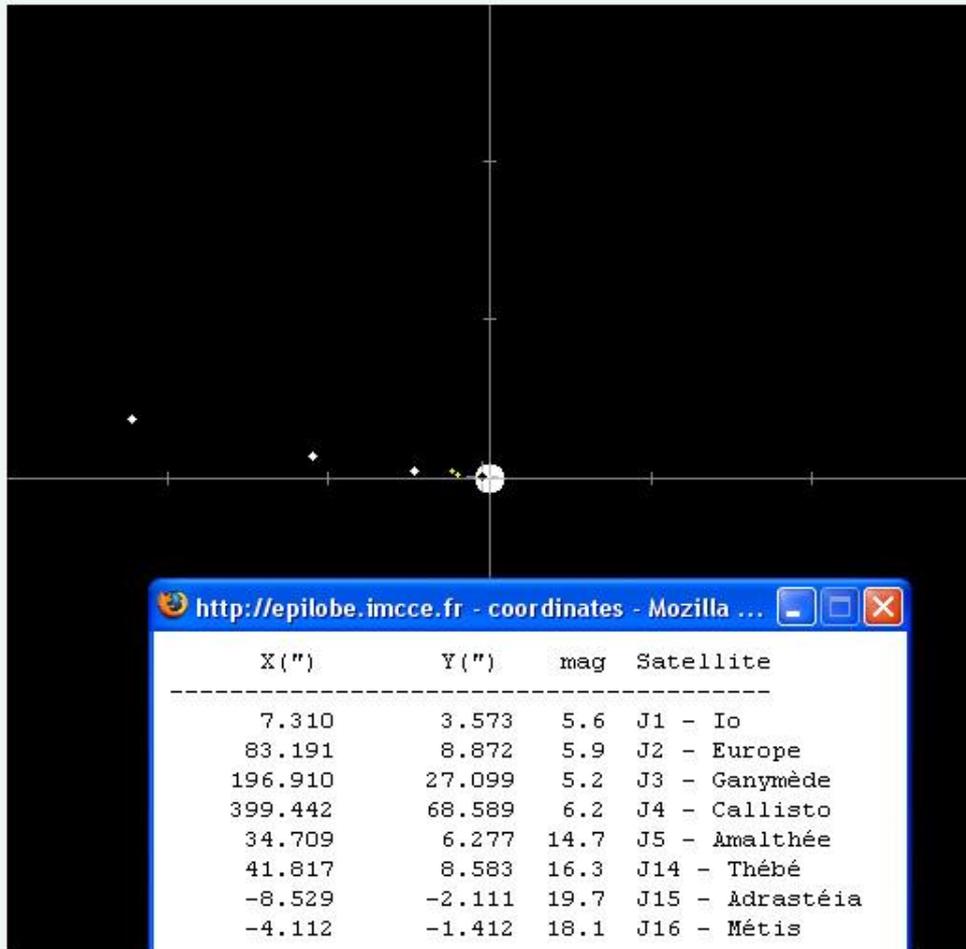
- Alpha (h,m,s.decimals), Delta (°,′,″.decimals)
- Alpha (h.decimals), Delta (deg.decimals)
- Alpha, Delta, dA/dt, dD/dt, R topo, V radial
- Diff. X, Y (sec.d'arc)
- Diff. S(sec.d'arc), Angle de position (degrés)
- Diff. Inclinaison (deg), A, B (sec.d'arc)
- Tang. X, Y (sec.d'arc)
- Tang. S(sec.d'arc), Angle de position (degrés)
- Tang. Inclinaison (deg), A, B (sec.d'arc)
- Delta(Alpha), Delta(Delta) (sec.d'arc)
- Pseudo-héliocentriques X, Y
- Pseudo-héliocentriques S, Angle de position
- x, y, z, Vx, Vy, Vz Géo-equatoriales
- x, y, z, Vx, Vy, Vz Géo-ecliptiques
- x, y, z, Vx, Vy, Vz Planète-equatoriales
- R, Alpha, Delta Géo-planétocentriques
- Orbite kepler.osculat.(géo-équat.)
- Orbite kepler.osculat.(géo-eclipt.)
- Orbite kepler.osculat.(planétoéquat.)
- Plan-équat.lat.,long.,sideral du sat.
- Alpha (h,m,s.decimals), Delta (°,′,″.decimals)

ne pas calculer si la hauteur est inférieure à  ou si le Soleil est au-dessus de l'horizon

[► Configurations](#)

(Description)

(Explications)



Champ de l'  
Date: 2008  
Observatoire

http://epilobe.imcce.fr - coordonnées - Mozilla ...

X (")	Y (")	mag	Satellite
7.310	3.573	5.6	J1 - Io
83.191	8.872	5.9	J2 - Europe
196.910	27.099	5.2	J3 - Ganymède
399.442	68.589	6.2	J4 - Callisto
34.709	6.277	14.7	J5 - Amalthée
41.817	8.583	16.3	J14 - Thébé
-8.529	-2.111	19.7	J15 - Adrastéia
-4.112	-1.412	18.1	J16 - Métis

**IMCCE/SAI.**  
**Serveur d'éphémérides**  
**des satellites naturels. MULTI-SAT.**

**Satellites de Jupiter**

Objet de référence:  
**Jupiter**  
Satellite marqué:  
**J1 - Io**  
L'époque de l'équateur et l'équinoxe  
J2000

**Coordonnées différentielles**

Réactualiser

avec l'échelle de 18'

Un pas de 1.0000 jours

Arrière  
 No  
 En avant

Satellite marqué:

J1 - Io

Centre du champ: N  
 **$\alpha = 19^h 19^m 21.975^s$**  E + W  
 **$\delta = -22^\circ 32' 54.37''$**  S

[Coordonnées et magnitudes](#)

# Conclusion

- La mécanique céleste a beaucoup d'application, depuis les levers et couchers de Soleil jusqu'à la cosmologie
- La mesure des angles et des distances et la modélisation des mouvements sont fondamentales en astronomie.