

# 1610-2010: La saga des satellites galiléens

## Les "inégalités" (4/11)

- **ou pourquoi les satellites galiléens n'apparaissent-ils pas comme ayant des mouvements circulaires uniformes** -

On se rappelle l'attachement des grecs pour les mouvements circulaires uniformes. Les objets célestes se devaient de suivre des mouvements circulaires uniformes, quitte à décomposer les mouvements réels observés en une succession de plusieurs mouvements circulaires uniformes (introduction des *épicycles*). Pourtant, dès le début du XVII<sup>e</sup> siècle, la découverte et l'observation intensive des satellites galiléens devaient conduire à une conclusion tout autre (appréhendée pour partie par Copernic et Kepler), et offrir ainsi durant les siècles à venir certaines des plus intéressantes observations scientifiques.

Les écarts des mouvements observés à un mouvement circulaire uniforme, également appelés « inégalités », ont des origines diverses. Ces écarts sont décrits par des termes périodiques dans les développements des quantités représentant le mouvement. Nous en présentons quelques unes ci-après.

### Les inégalités associées à la dynamique du système galiléen:

1- Tandis que la première loi de Kepler énonce l'ellipticité des orbites, la deuxième loi de Kepler (également connue sous le nom de « loi des aires ») implique que le déplacement d'un satellite sur une orbite excentrique sera plus rapide au périapse (point de l'orbite où le corps se trouve au plus près de la planète centrale) et plus lent à l'apoapse (point de l'orbite le plus éloigné).

En se contentant du terme le plus important associé à l'ellipticité des orbites des quatre satellites galiléens, nous obtenons sur le mouvement en longitude de chaque satellite:

Satellite	Amplitude le long de l'orbite (degré)	Amplitude le long de l'orbite (km)	Amplitude à l'opposition (secondes de degré)
Io (J1)	0.46	3376	1.13
Europe (J2)	1.15	13 420	4.47
Ganymède (J3)	0.17	3210	1.07
Callisto (J4)	0.80	26 362	8.79

2- Les satellites galiléens étant très massifs, ils se perturbent donc gravitationnellement les uns les autres. Par le biais de méthodes analytiques et numériques, on peut obtenir l'amplitude des termes perturbateurs les plus importants associés aux perturbations mutuelles sur les longitudes moyennes de chaque satellite:

- J1 : 81 km (action de J2) et 41 km (action de J3)
- J2: 576 km (action de J3) et 305 km (action de J4)
- J3: 196 km (action de J3) et 162 km (action de J2)
- J4: 717 km (action de J3), 415 km (action de J3) et 354 km (action de J1)

Pour plus de détails, une liste complète jusqu'aux termes d'amplitude égale à quelques kilomètres se trouve dans (Lainey et al. 2006).

### **Les inégalités dues au mouvement de la Terre et Jupiter:**

1- La vitesse de la lumière étant finie (environ 300 000 km/s), des irrégularités pouvant aller jusqu'à 17 minutes de temps sont possibles. En observant ces inégalités sur un an terrestre, il est donc possible d'estimer la vitesse de la lumière avec une bonne précision. C'est ainsi que Römer (un astronome Hollandais) fera la première mesure de la vitesse de la lumière à l'observatoire de Paris en 1676. Il bénéficiera pour ce faire des prédictions d'éclipses des satellites galiléens réalisées par Cassini.

### **Les inégalités dues aux échelles de temps:**

La période de rotation terrestre n'est pas une mesure de temps uniforme, car celle-ci est affectée par des variations d'origine diverse (effets de marées, mouvement à l'intérieur du manteau, phénomènes météorologiques,...). Une échelle de temps fondée sur la rotation terrestre telle que le Temps Universel peut dériver de plusieurs dizaines de secondes en un siècle, par rapport à un temps uniforme (sous-jacent à tout calcul effectué dans le cadre de la dynamique newtonienne).

### **Les inégalités dues à l'observation des satellites:**

1- Suivant la période de l'année, les satellites sont éclairés différemment, avec un angle de phase pouvant atteindre  $11^\circ$ . Jusque dans les années 60, les rayons des satellites étaient peu connus, rendant difficile la correction entre le photocentre du satellite (centre du satellite tel qu'on l'observe depuis la Terre) et son centre de masse.

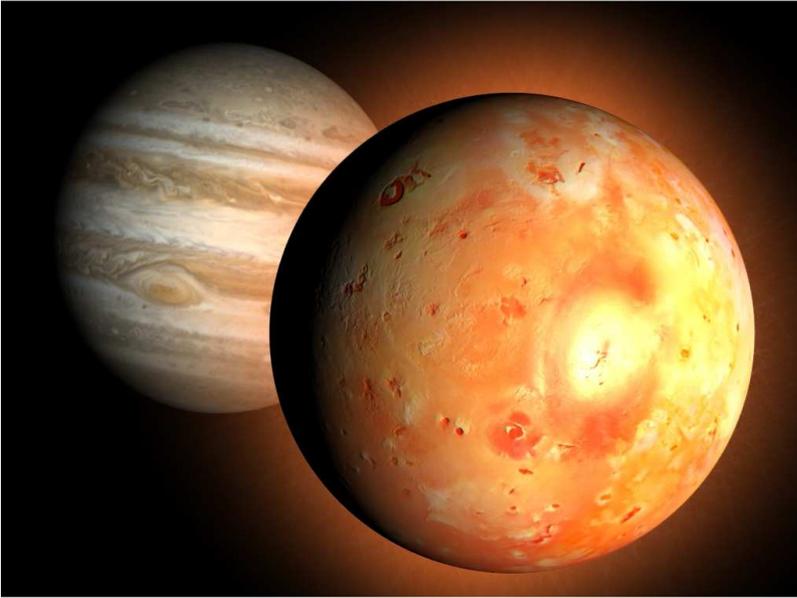
Bien que la phase soit similaire pour chaque satellite, il est clair que cet effet sera proportionnel à la taille des satellites. L'écart le plus important sera donc obtenu pour Ganymède, qui a un rayon d'environ 2631 km. On peut montrer que, en prenant en compte les lois de diffusion par la surface, cela se traduit par une variation pouvant atteindre 160 à 170 km entre la position du photocentre et le centre géométrique véritable du satellite.

### **Les inégalités du système galiléen au XXI<sup>e</sup> siècle:**

Aujourd'hui encore les inégalités du système galiléen sont à l'étude. Récemment, la lente dérive séculaire de l'orbite de Io, Europe et Ganymède, associée aux puissants effets marées agissant sur le système, a pu être quantifiée en utilisant un ensemble d'observations s'étendant sur plus d'un siècle.

La dérive observée en longitude relative aux effets de marées sur les 116 ans étudiés (le signe négatif correspondant à des décélérations en longitude) est de:

- J1 : 55 km
- J2 : -125 km
- J3 : -365 km



**Figure 1:** *Vue d'artiste montrant la forte émission de chaleur de Io induite par les marées joviennes (V.Lainey, copyright: IMCCE-observatoire de Paris, CNRS).*

Pour en savoir plus:

Lainey, V., Arlot, J.-E., Karatekin, O., Van Hoolst, T. Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations, *Nature* 459, 957 (2009).

Lainey, V., Duriez, L., Vienne, A. Synthetic representation of the Galilean satellites' orbital motions from L1 ephemerides, *A&A* 456, 783-788 (2006).