



LA ROTATION DE LA LUNE ET LES LOIS DE CASSINI DANS LE SYSTEME SOLAIRE



NICOLAS RAMBAUX

Université Pierre et Marie Curie

IMCCE, Observatoire de Paris



13 juin 2012

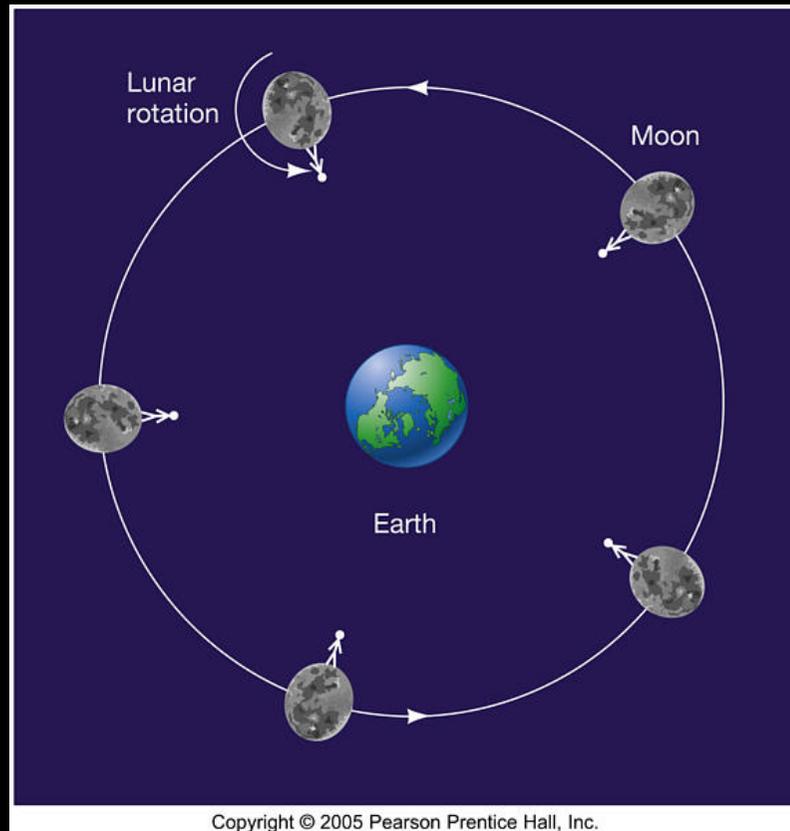
BDL- journée Cassini

Plan

- **Les lois de Cassini**
- Description de la rotation de la Lune
- Description de la rotation d'un satellite de Saturne
Titan

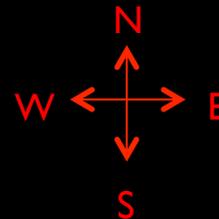
Librations optiques

Rotation moyenne uniforme



Librations géométriques (librations optiques)

Date: 2005 Sep 1 02:23:28 UT



(59% de la surface observable)

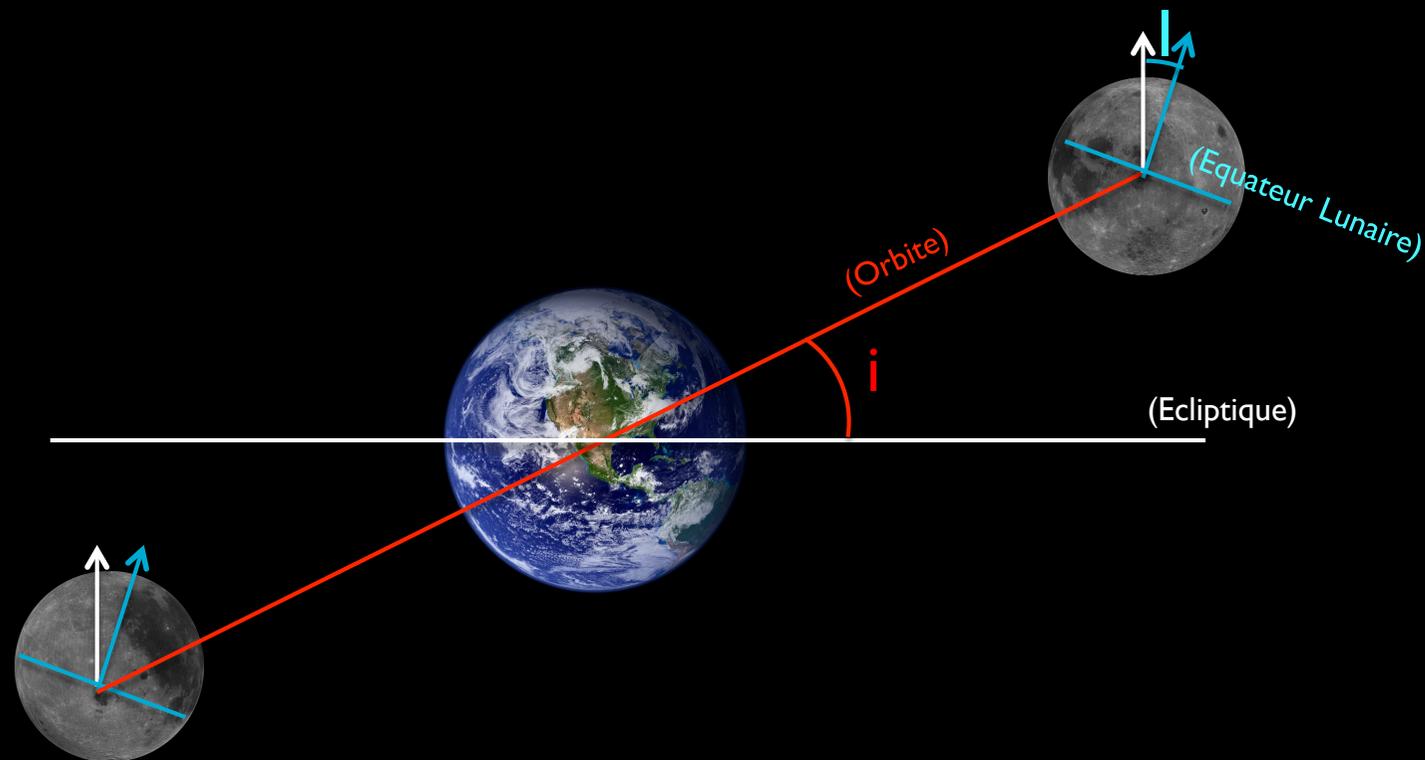
L'axe de rotation constant

1° La Lune tourne sur elle-même, dans le sens direct, d'un mouvement uniforme autour d'un axe dont les pôles sont fixes à sa surface; la durée de la rotation, $27^j 7^h 43^m 11^s,5$, est identique à la durée de la révolution sidérale de la Lune autour de la Terre.

2° L'axe de rotation fait un angle constant avec l'écliptique; cet angle est de $88^\circ 25'$.

3° L'axe de l'écliptique, l'axe de l'orbite de la Lune et son axe de rotation sont constamment dans un même plan.

(Tisserand 1898)



(Echelle non respectée)

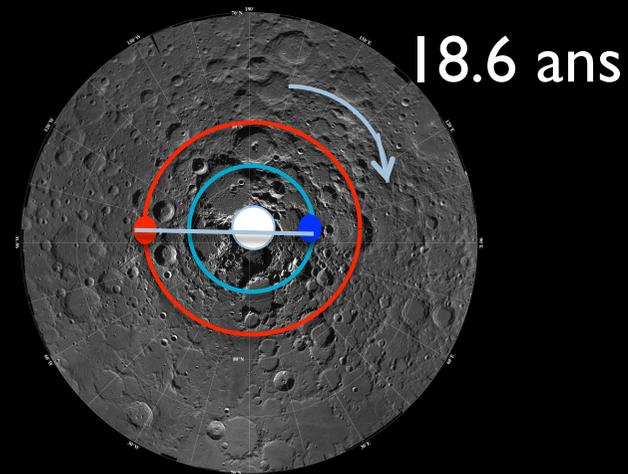
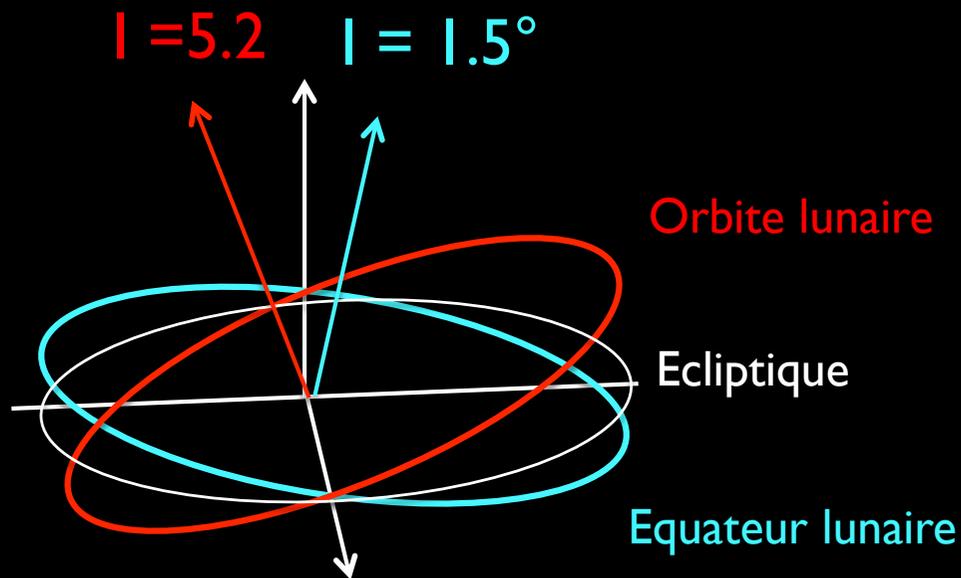
Précessions de l'orbite et de l'équateur lunaire

1° La Lune tourne sur elle-même, dans le sens direct, d'un mouvement uniforme autour d'un axe dont les pôles sont fixes à sa surface; la durée de la rotation, $27^{\text{j}} 7^{\text{h}} 43^{\text{m}} 11^{\text{s}},5$, est identique à la durée de la révolution sidérale de la Lune autour de la Terre.

2° L'axe de rotation fait un angle constant avec l'écliptique; cet angle est de $88^{\circ} 25'$.

3° L'axe de l'écliptique, l'axe de l'orbite de la Lune et son axe de rotation sont constamment dans un même plan.

(Tisserand 1898)



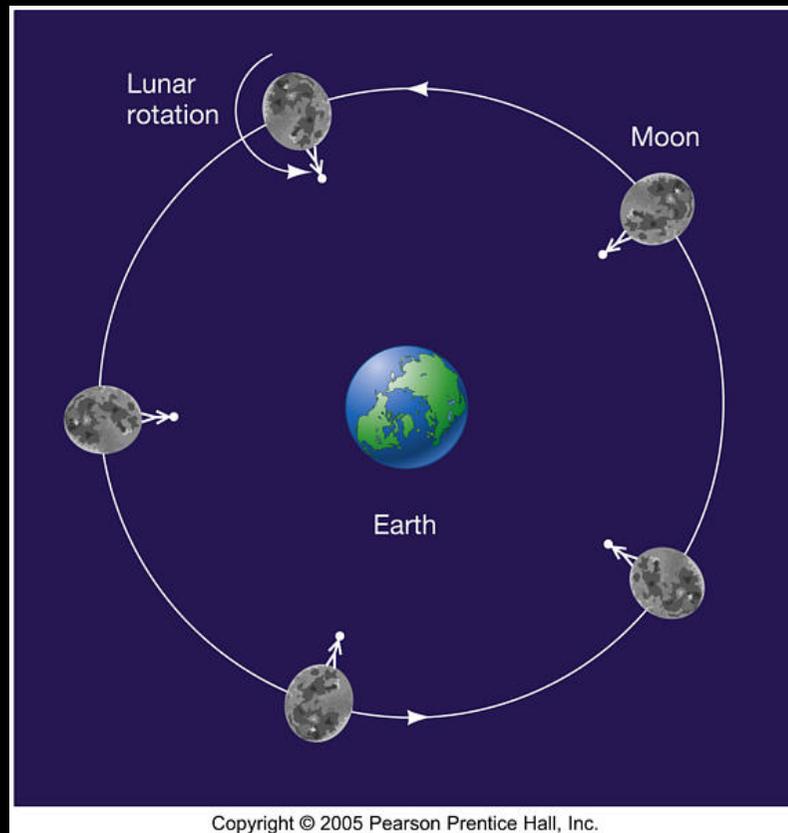
Mouvement des pôles de la Lune

Intersection des trois plans suivant une même ligne des noeuds

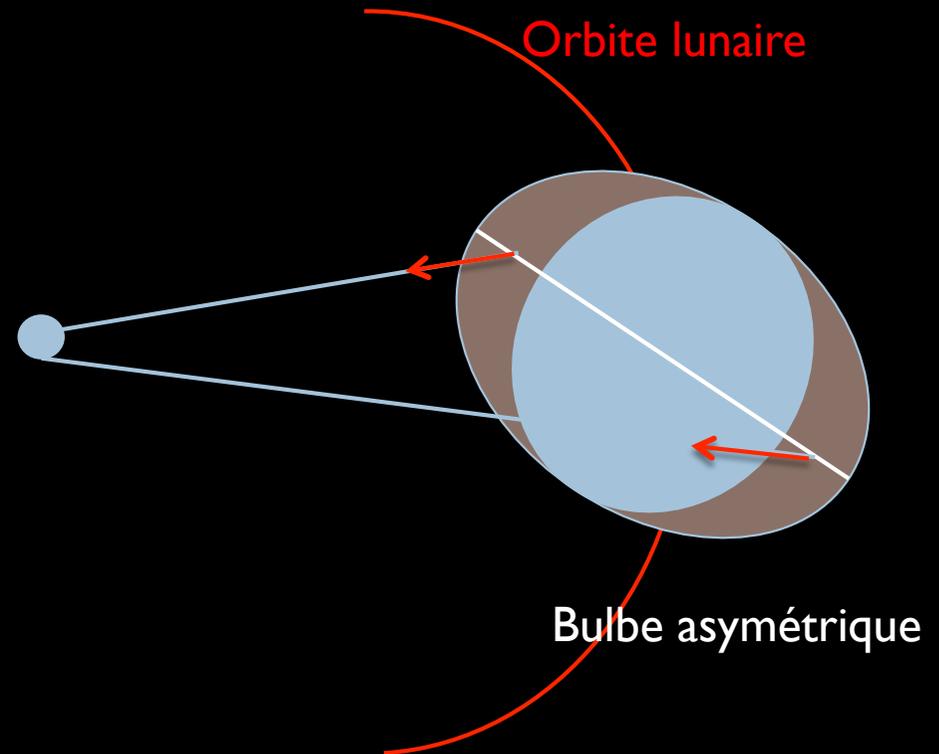
Librations physiques

Librations = oscillations autour de la rotation moyenne uniforme

**Rotation moyenne
uniforme**

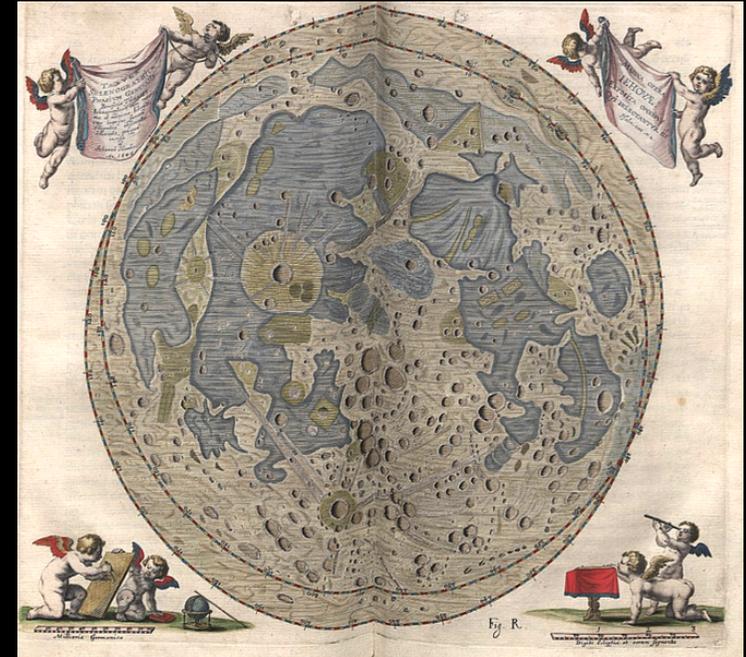


Librations physiques



Lois de Cassini & Librations

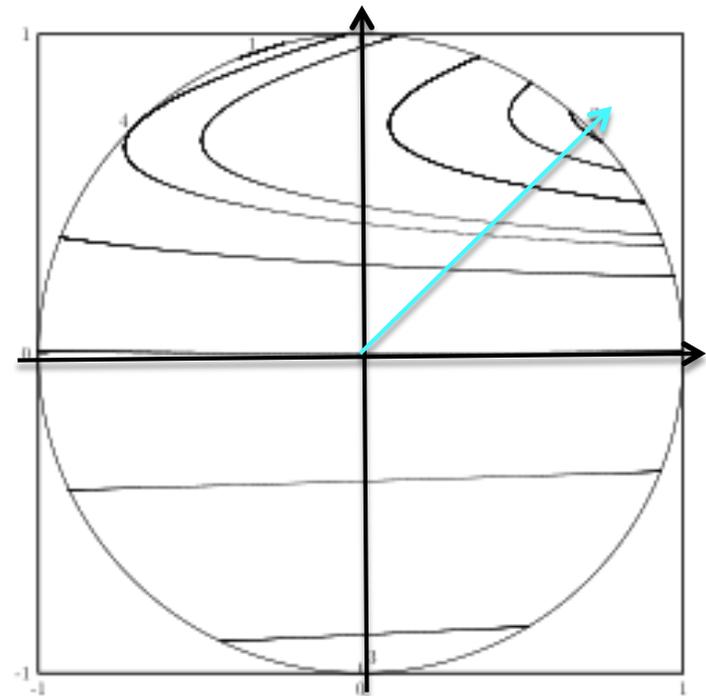
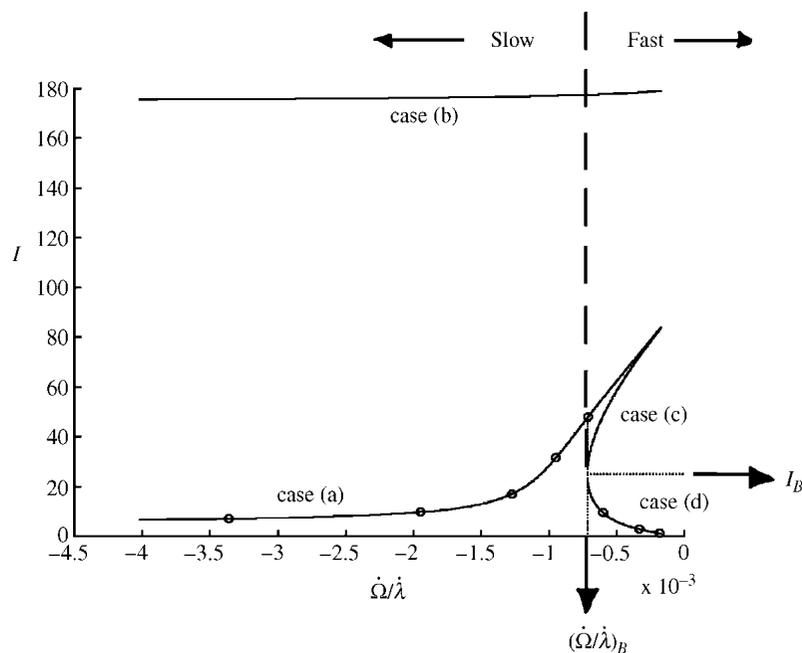
- La libration optique (Galilée 1632, Riccioli et Hevelius 1638-1641)
- Explication + hypothèse de la libration physique (Newton 1687)
- Lois de Cassini (J.D. Cassini 1693) et la théorie mathématique (Lagrange 1784)
- Mesure des librations physiques (Bessel 1839)
- Énoncées claires et modernes (Tisserand 1898)



(Hevelius XVII^{ème})

Lois de Cassini & Librations

- Généralisation (Colombo 1966, Peale 1969)
- Description (Henrard & Murigande 1987, Gladman et al 1996, Bouquillon et al 2003, Boué et Laskar 2006, etc.)
- Librations physiques (Chapront, Chapront-Touzé, & Francou 1999, Eckhardt 1981, Williams et al 2001, etc.)



(Bouquillon et al 2003; Wisdom 2006)

Pourquoi étudier la rotation ?

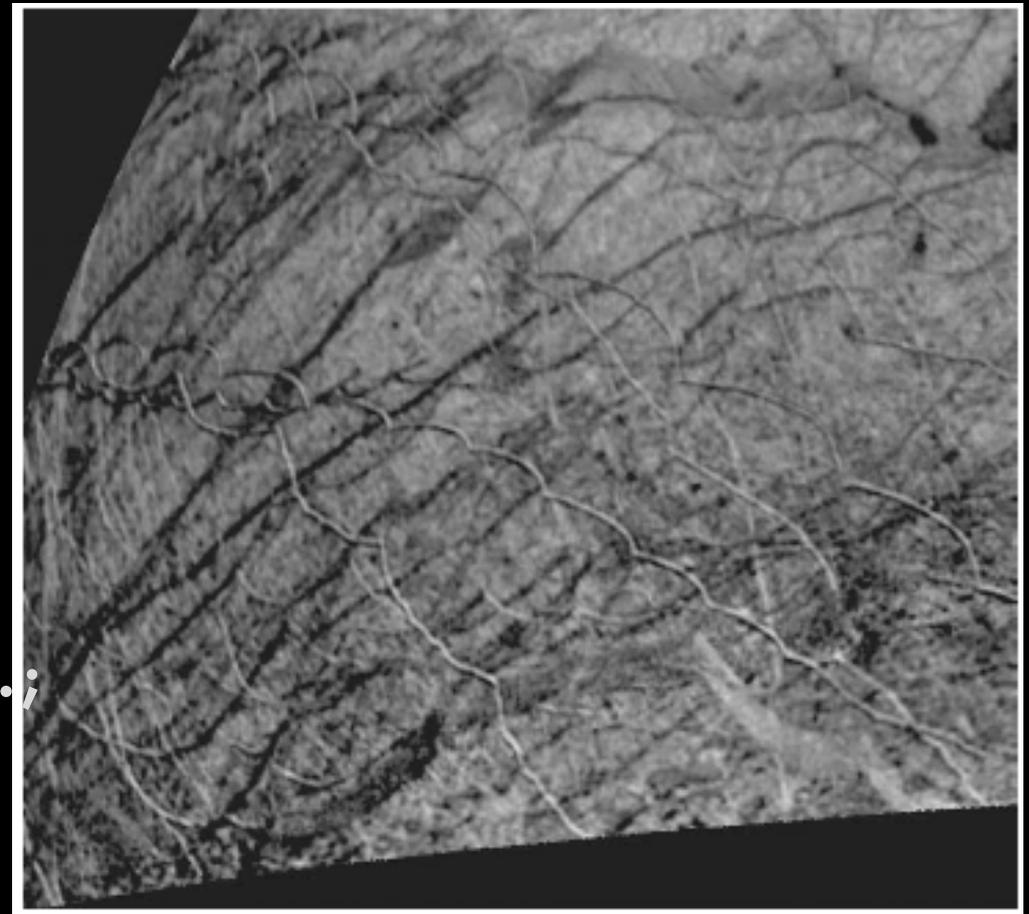
- Comprendre la dynamique (aspect mathématique);
- Evolution à long terme des corps;
- Permet de sonder l'intérieur des corps;
- Contraindre la structure géologique;
- Cartographie, géodésie...;



(movie from ROB)

Pourquoi étudier la rotation ?

- Comprendre la dynamique (aspect mathématique);
- Evolution à long terme des corps;
- Permet de sonder l'intérieur des corps;
- Contraindre la structure géologique;
- Cartographie, géodésie...;



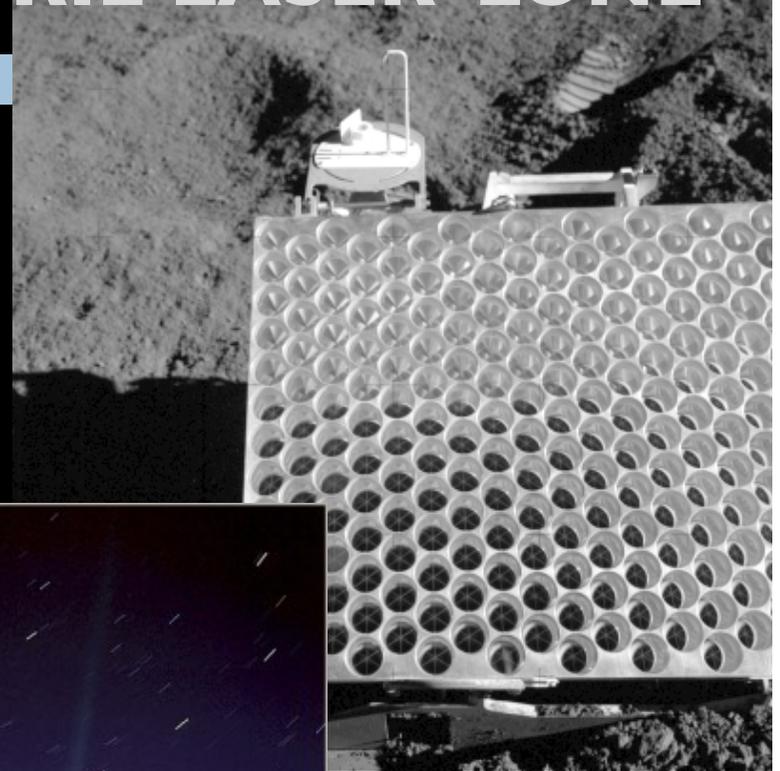
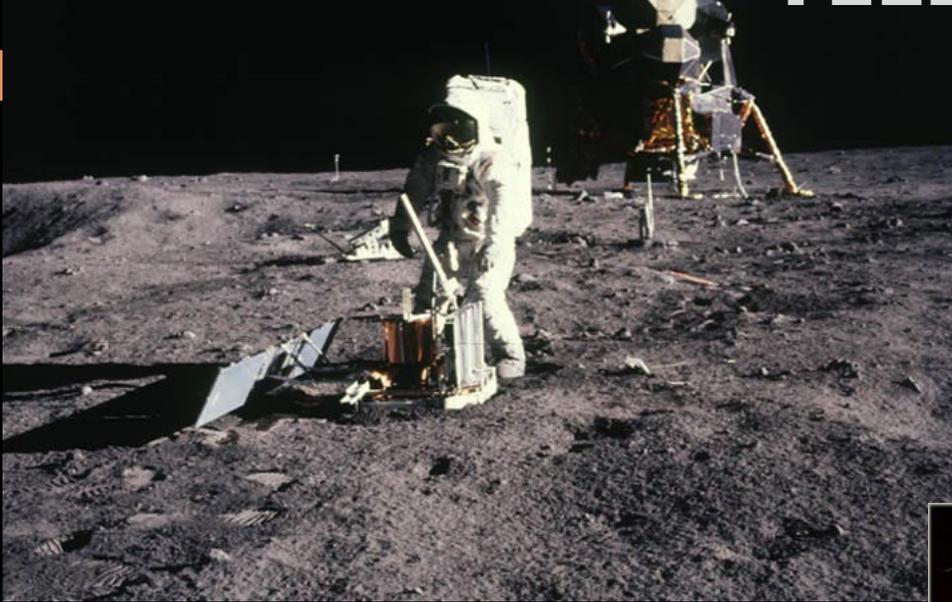
(Greenberg 2002)

Plan

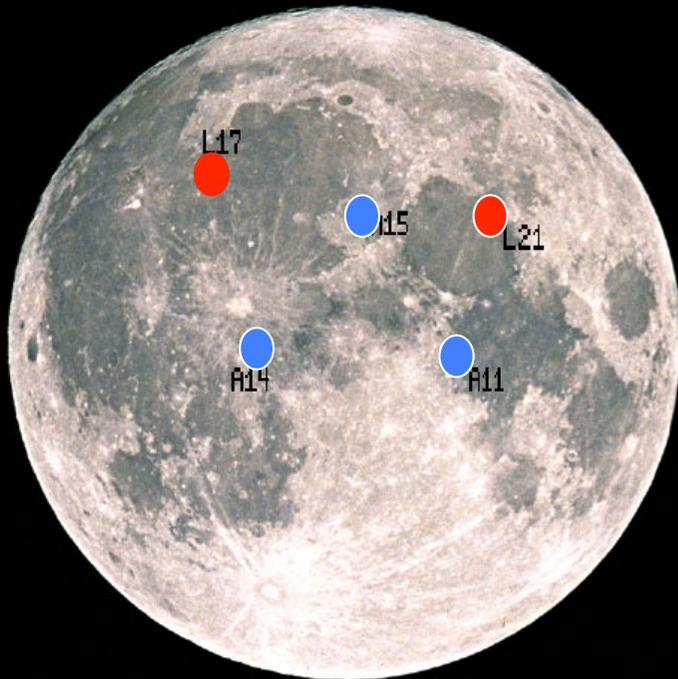
- Les lois de Cassini
- **Description de la rotation de la Lune**
- Description de la rotation d'un satellite de Saturne
Titan

1969 mission Apollo 11

TELEMETRIE LASER-LUNE

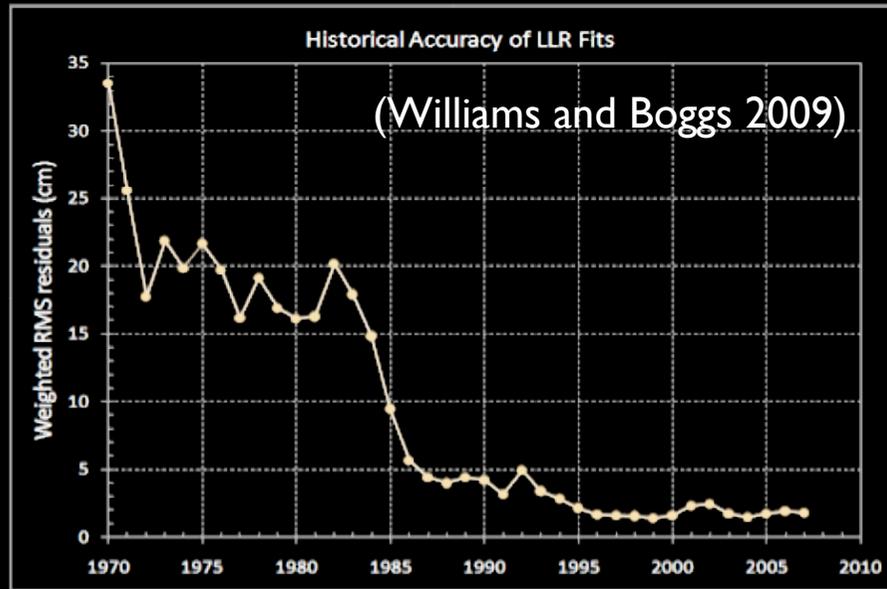


Retrorefacteur



Station Laser-Lune Grasse, OCA

— Télémétrie Laser-Lune et éphéméride —



Télémétrie Laser-Lune Modèles INPOP, EMP, DE

- Précision de **4-2 cm** et **1 mas** en rotation sur **38 ans**.
- Physique fondamentale, Géophysique, Sélénophysique et **intérieur** de la Lune.

INPOP/DE42I: intégration **numérique** simultanée des orbites de la Lune, de la Terre et des planètes, et de la rotation lunaire (Folkner et al 2008; Fienga et al 2009).

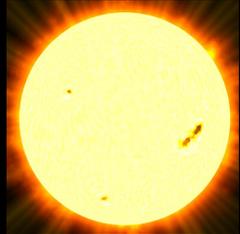
- **Le modèle DE42I contient**

Interactions relativistes Terre-Lune-planètes, Harmoniques gravitationnels pour la Lune (max deg 4), de la Terre (zonal) et du soleil (J_2), les marées de la Terre sur la Lune, et un noyau lunaire fluide.

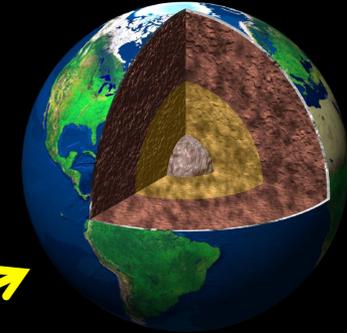
- **Dérivées partielles dynamiques**

Intégration numérique des dérivées partielles des orbites et des angles d'Euler de la Lune par rapport aux paramètres tels que les conditions initiales, le rapport des masses, les coefficients de gravité, les marées, le noyau, et les paramètres relativistes.

La rotation de la Lune est un système dynamique complexe



Problème des 3-corps



Variations de l'orbite qqes 10.000 km

Couple solaire

Couple terrestre

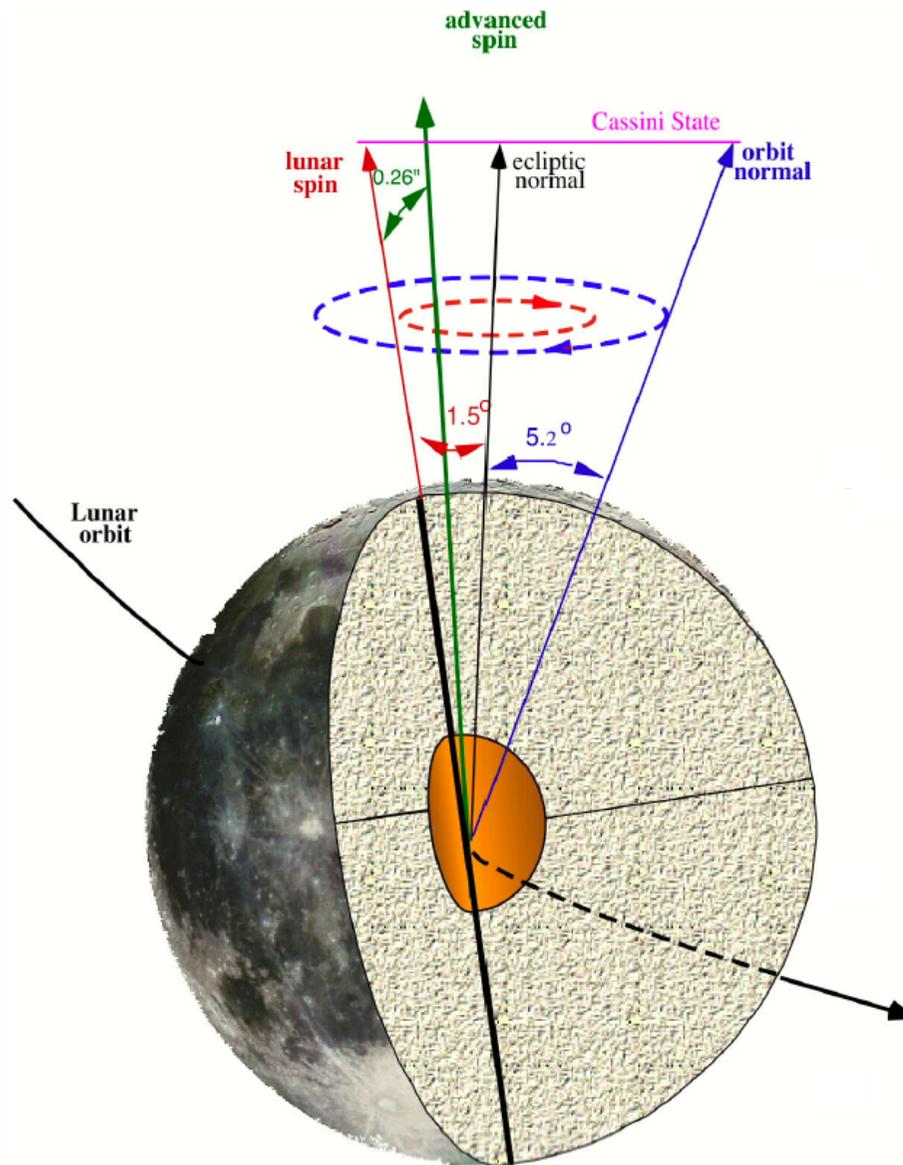
- Harmoniques lunaires 2,3,4
- Figure-figure effets
- Rotation du plan de l'écliptique
- Perturbations planétaires
- Contributions relativistes

Couplage noyau-manteau

Déformations maréales

Variations de la rotation qqes 100 as

Lois de Cassini ?



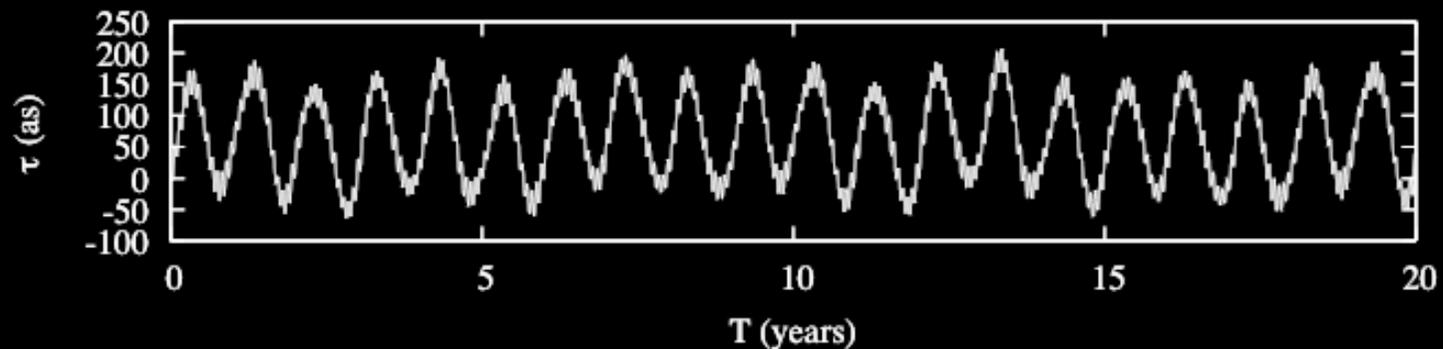
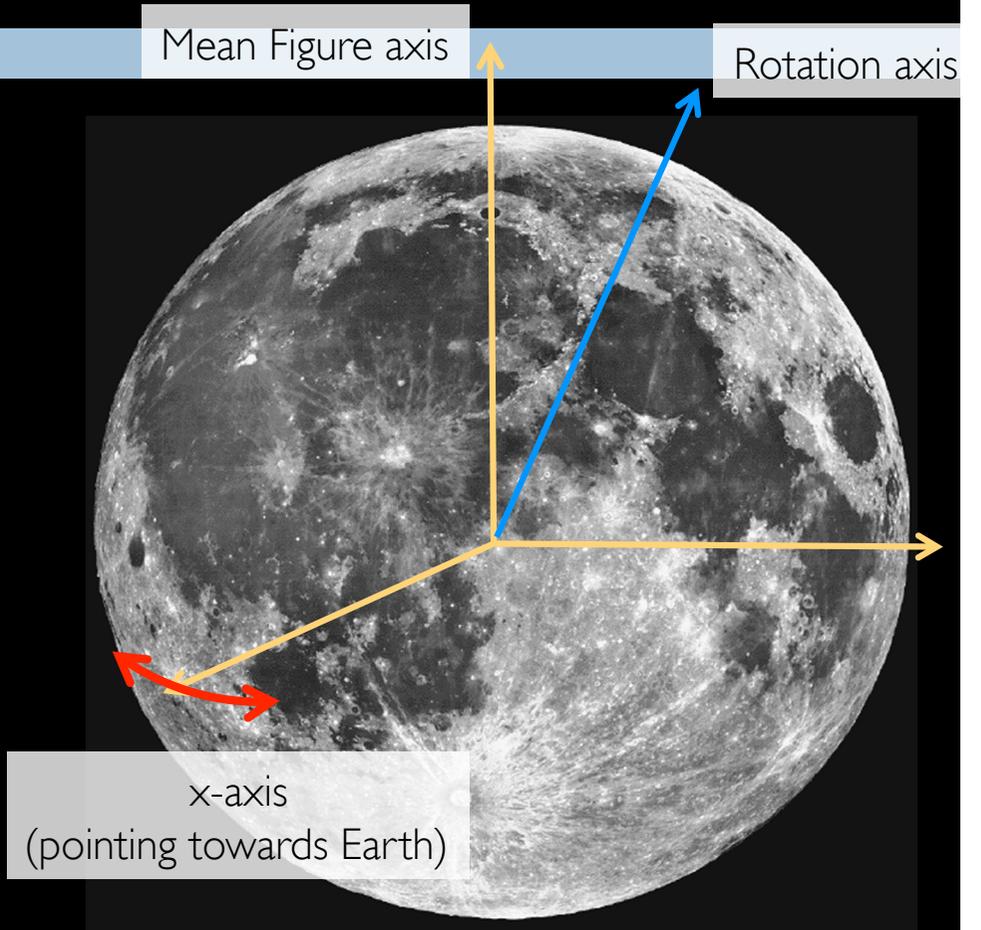
(Williams et al 2001)

- Détermination des moments d'inertie;
- Nombre de Love k_2 (déformation de marée)
- Décalage pôle de rotation dû à la dissipation (signature indirecte d'un noyau fluide).

Contribution en sélénophysique

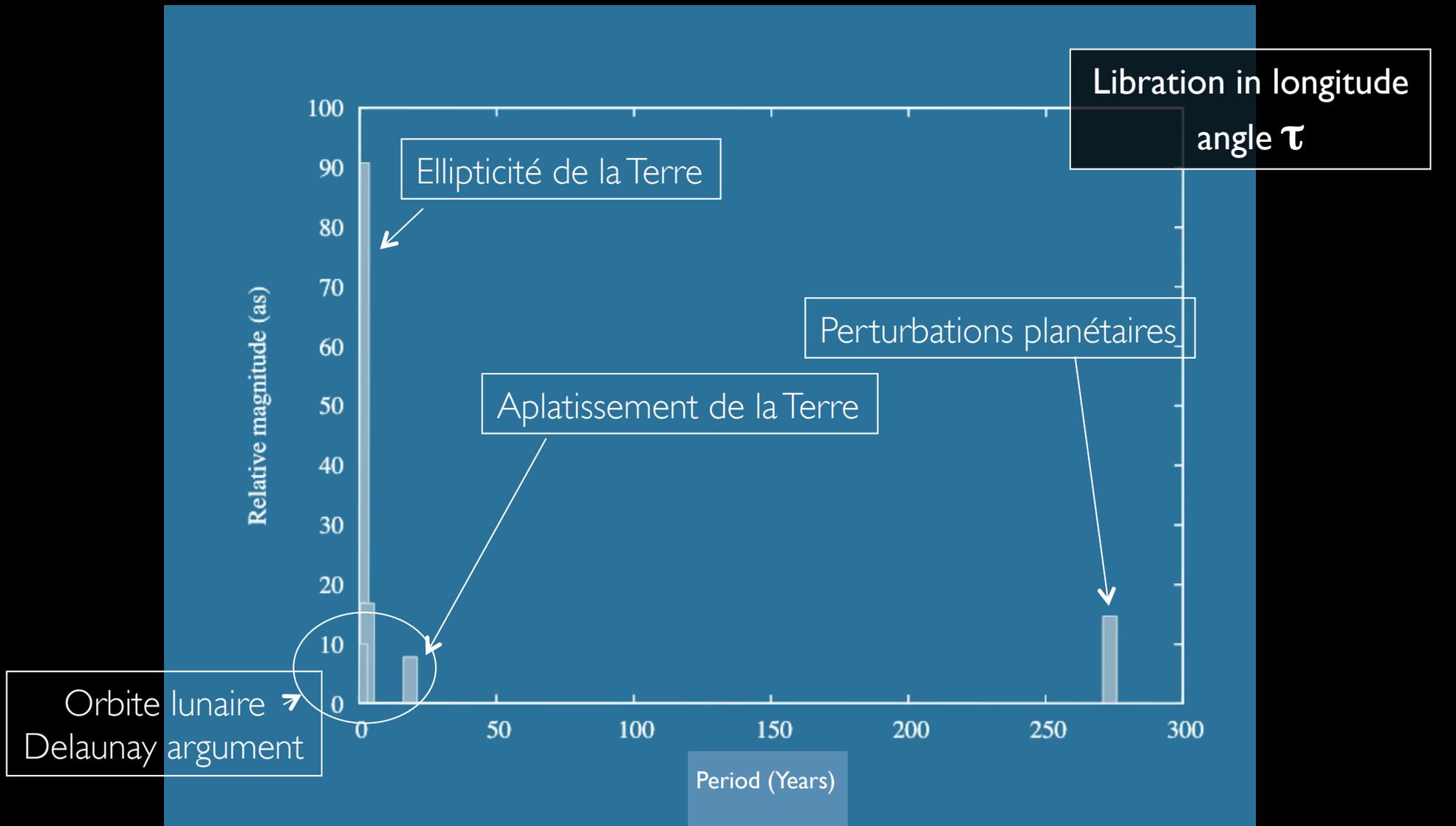
Libration Physique en longitude

- Oscillation dans le plan équatorial de la Lune;
- τ représente la libration physique en longitude de la Lune.



Analyse spectrale

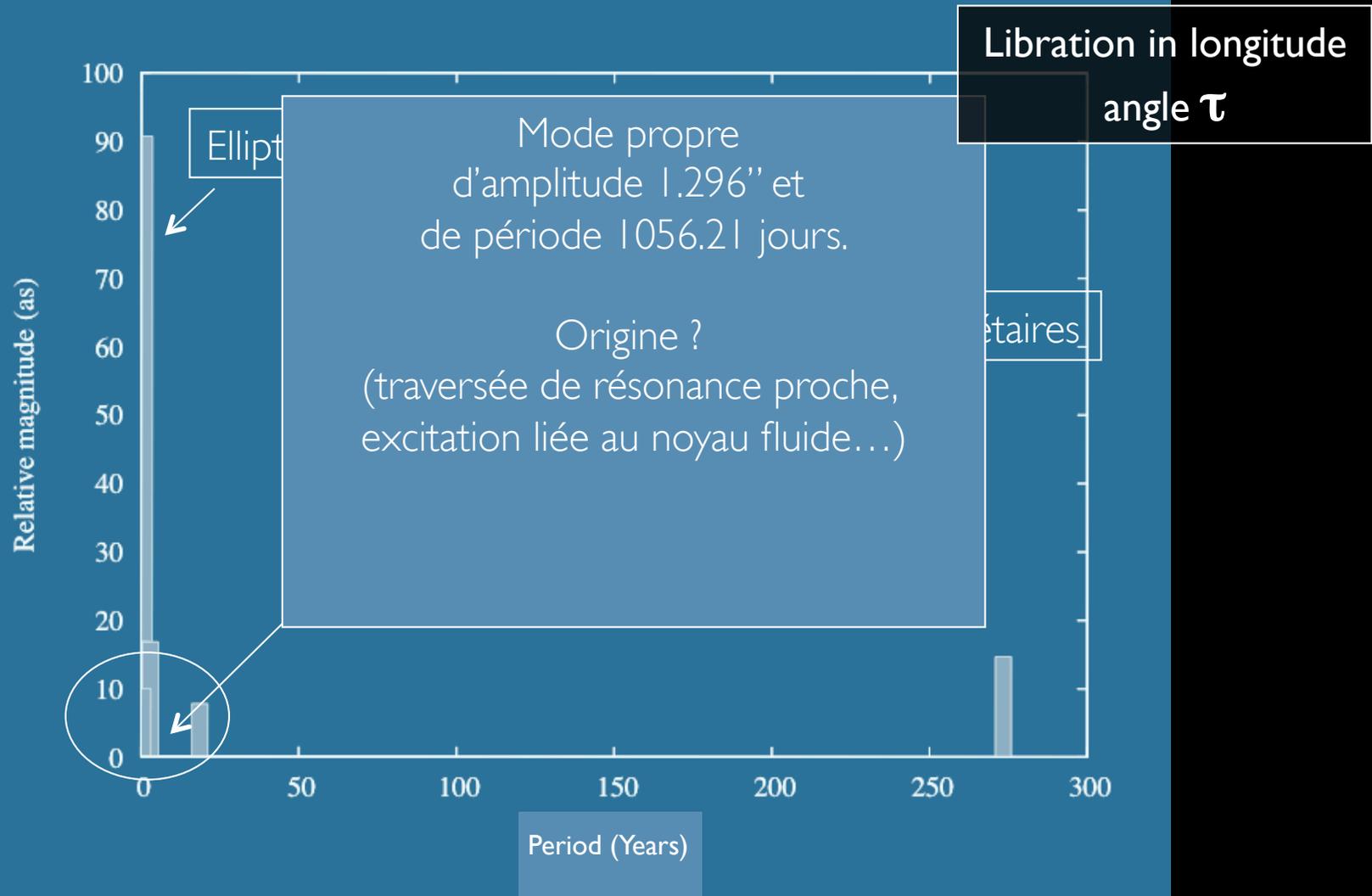
Analyse en fréquence de la libration en longitude sur **1070** ans
(Ephéméride DE421):



(Rambaux & Williams 2011)

Analyse spectrale

Analyse en fréquence de la libration en longitude sur **1070** ans
(Ephéméride DE421):



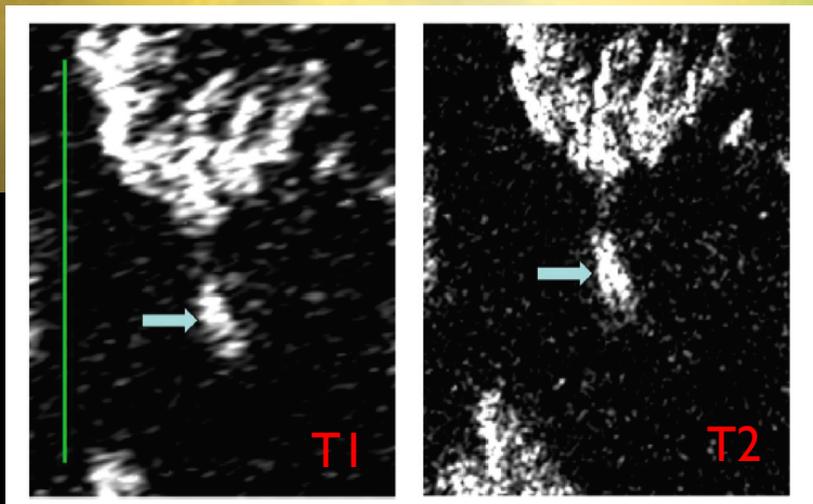
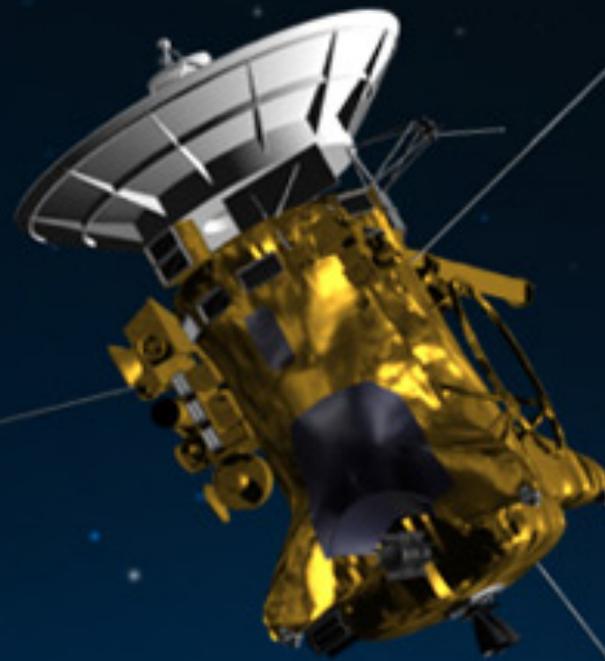
(Rambaux & Williams 2011)

Plan

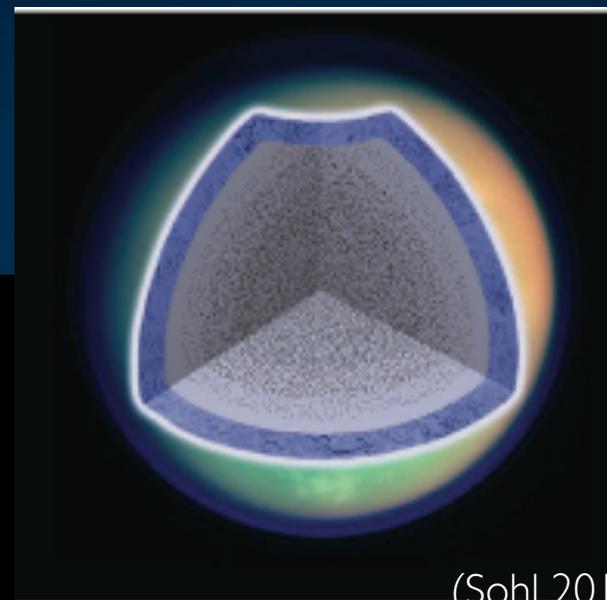
- Les lois de Cassini
- Description de la rotation de la Lune
- **Description de la rotation d'un satellite de Saturne
Titan**

Titan

- Atmosphère dense
- Océan interne probable
- Mesure radar de la rotation
Obliquité = 0.3°
Rotation non-synchrone

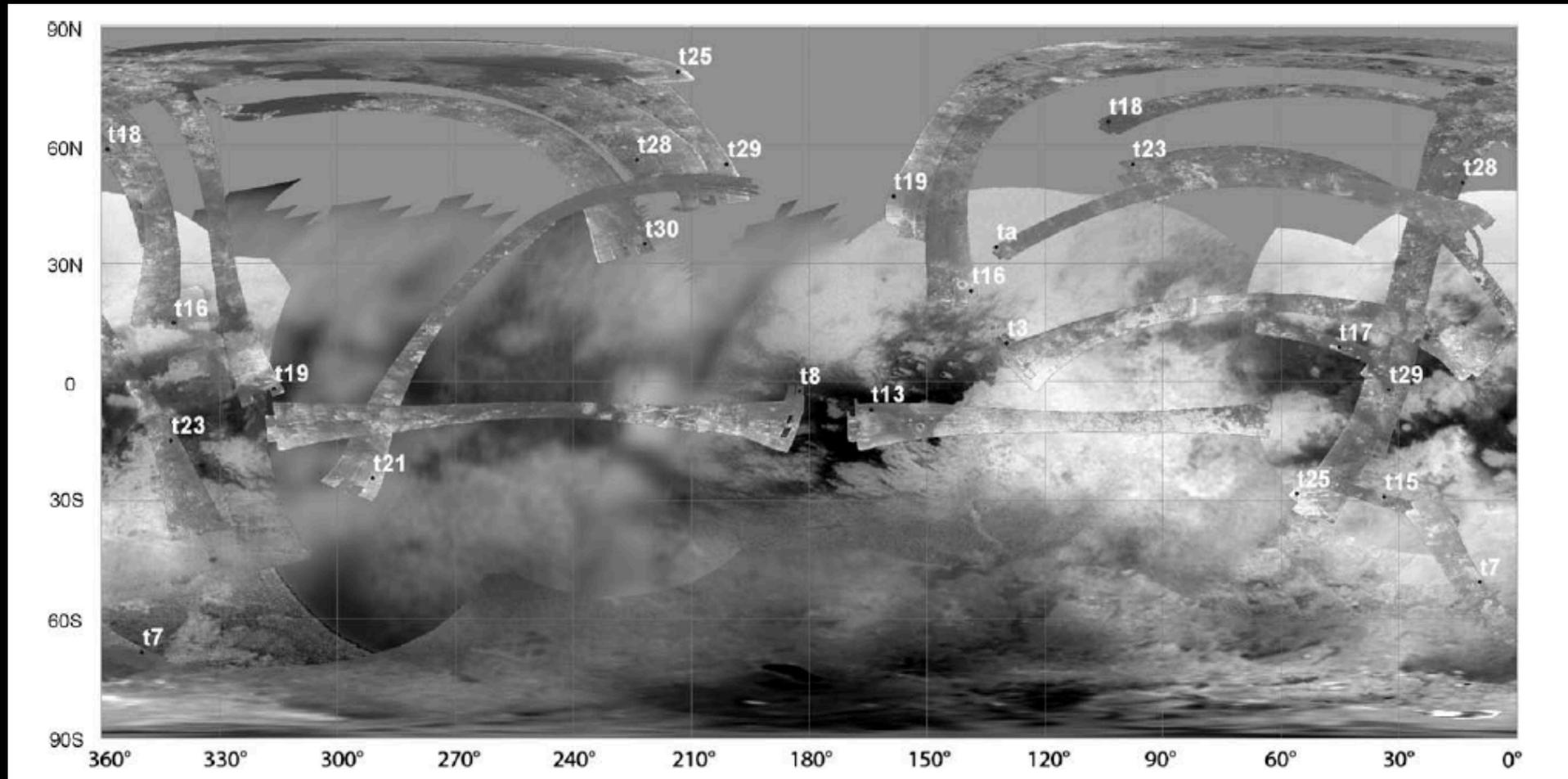


(Stiles et al 2008; 2010)



(Sohl 2010)

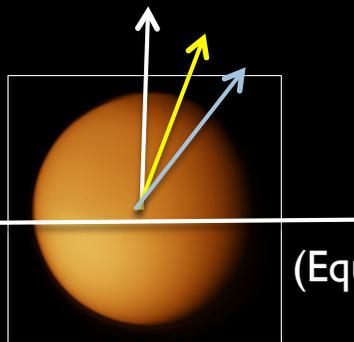
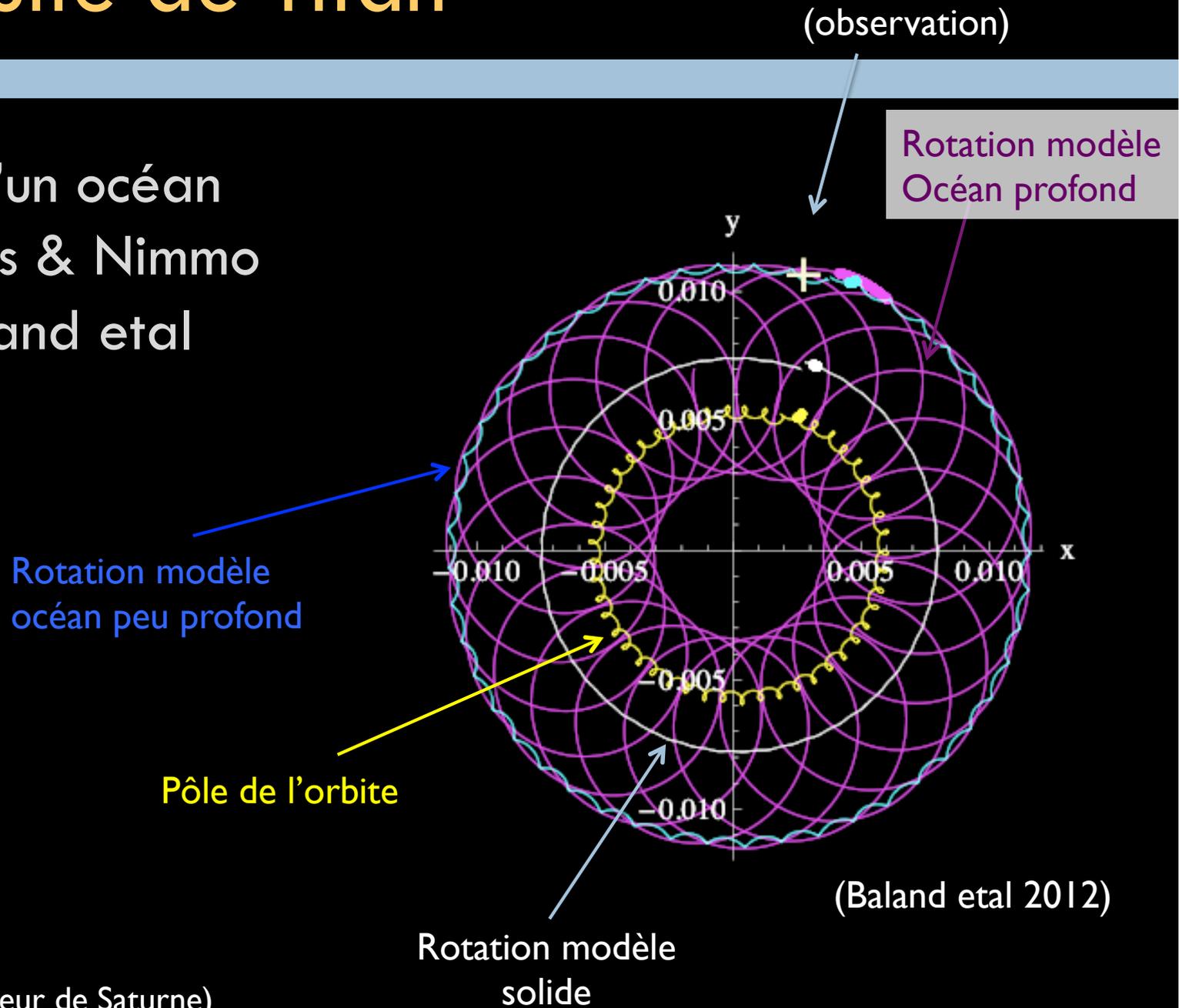
Radar observation of Titan's surface



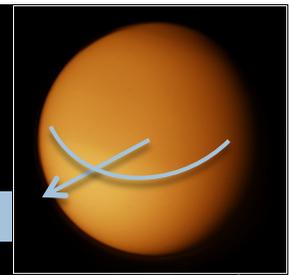
(Lopes et al 2009)

Obliquité de Titan

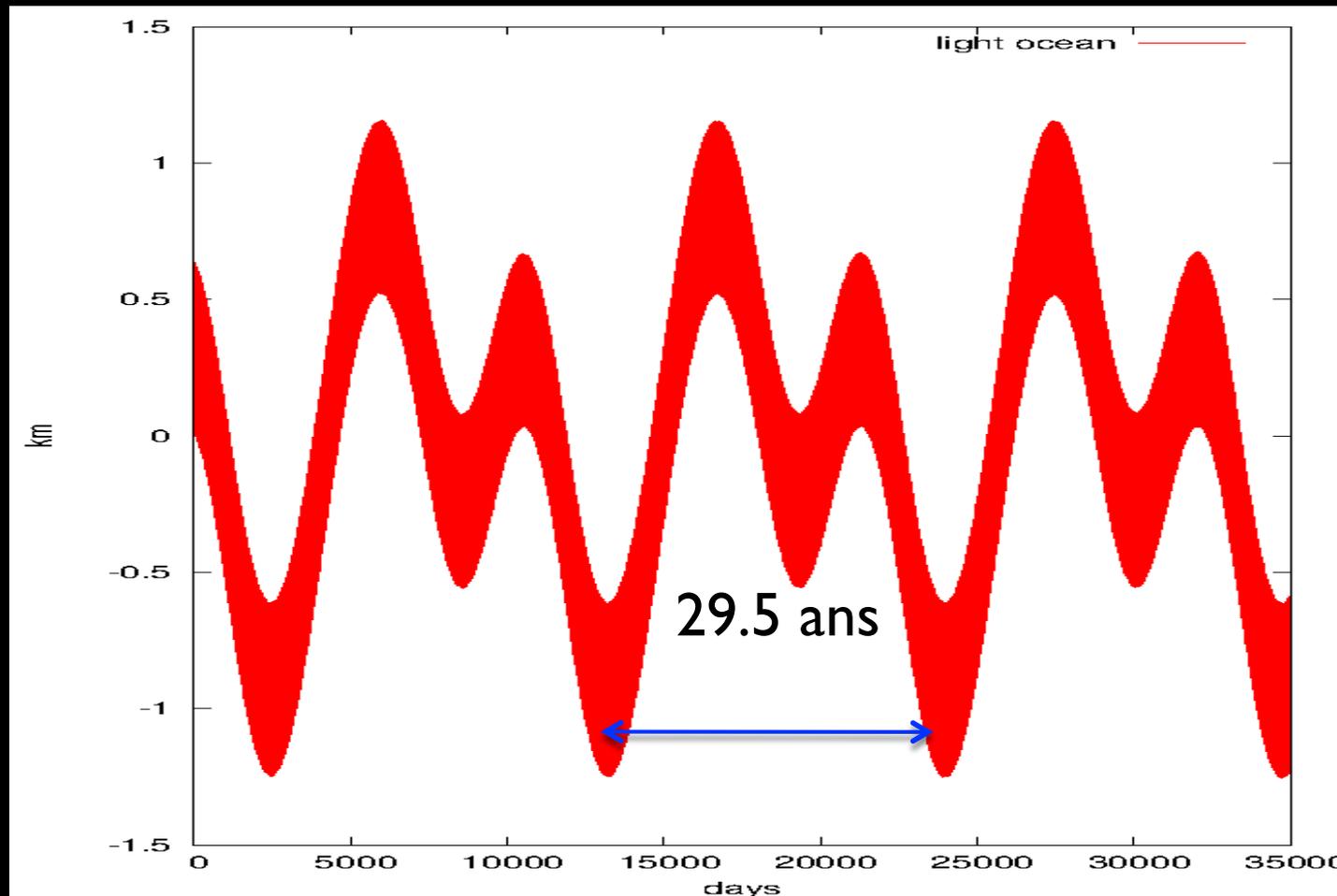
- Présence d'un océan interne (Bills & Nimmo 2008; Balland et al 2012)



Mouvement de libration de Titan

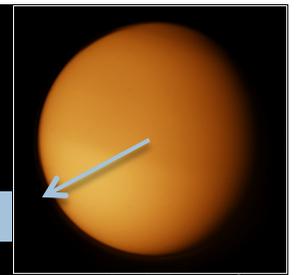


(Equateur de Titan)

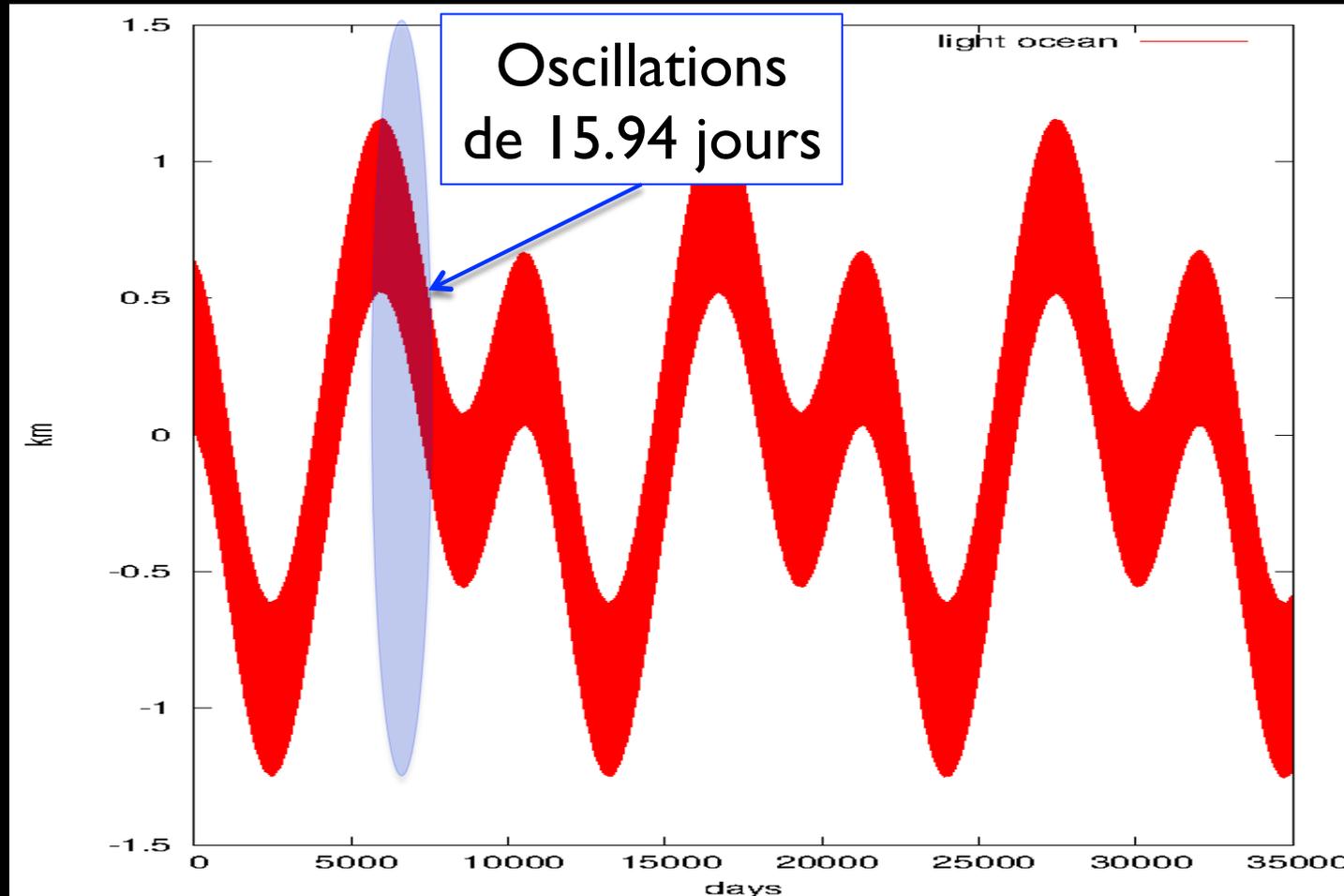


Effet indirect des perturbations orbitales

Mouvement de libration de Titan

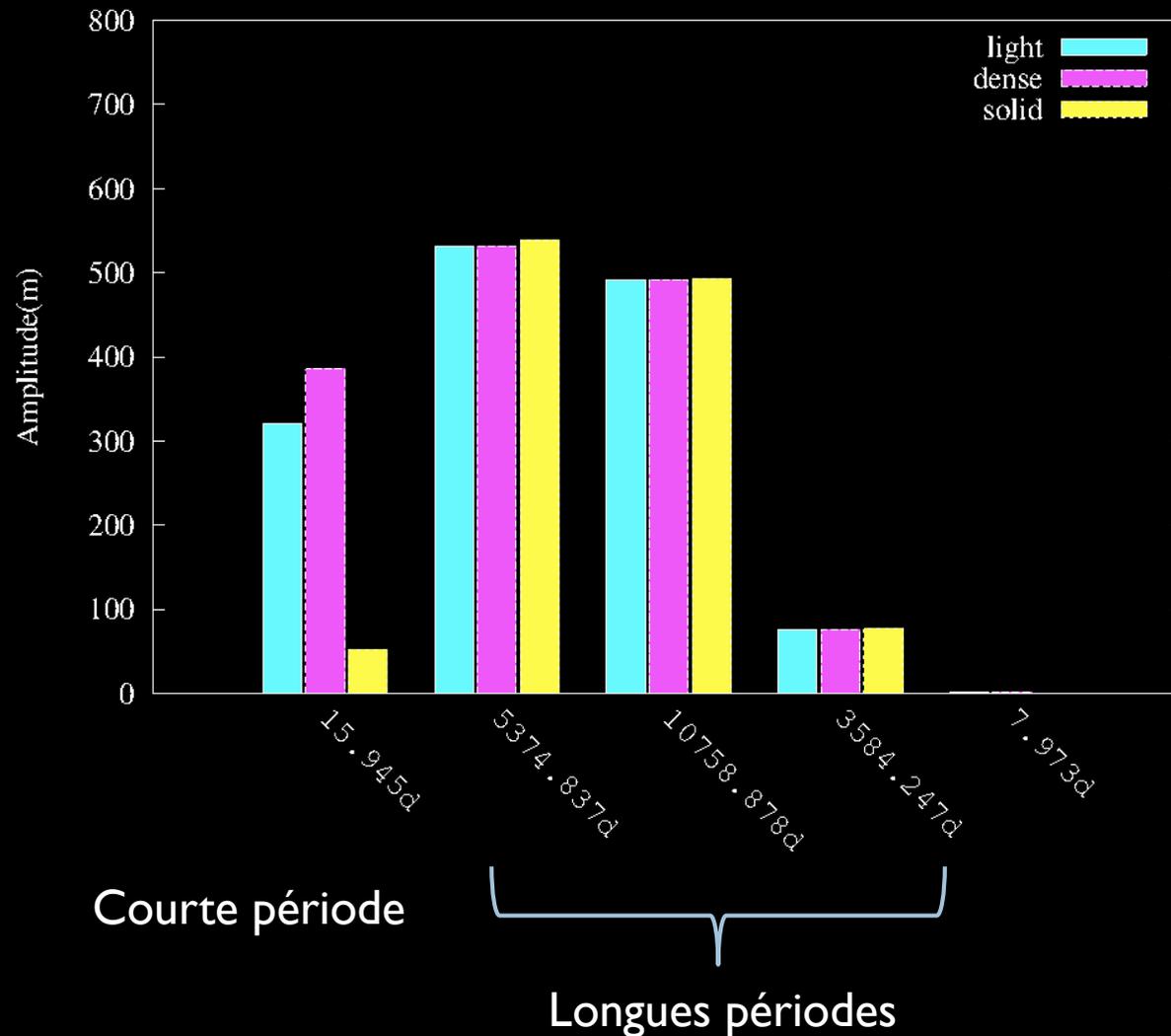


(Equateur de Titan)



Effet indirect des perturbations orbitales

Libration pour différents modèles d'intérieur



- Importance des courtes périodes pour sonder l'intérieur;
- Les librations de longues périodes sont nécessaires dans les ajustements;
- Motivation pour chercher l'amplitude des librations dans le mouvement de Titan.

Rotations & états de Cassini, planétologie comparée

- Mercure détection de la libration & de son obliquité par interférométrie radar et mise en évidence d'un **noyau fluide** (Margot et al 2007; Rambaux et al 2007, Peale et al 2008; etc.);
- Phobos, Janus, Encelade détection des librations (Duxbury 1989; Willner et al 2010; Tiscareno et al 2009; Robutel et al 2010; Rambaux et al 2010; Giese et al 2011; etc.)
- Europe signature d'une rotation non-synchrone ? (Greenberg et al 2003; Bills et al 2009, etc.)
- Traversé d'état de Cassini dans le passé, exemples: **Saturne et la Lune** (Ward & Hamilton 2004; Meyer & Wisdom 2010, etc.)

Conclusions

- Les lois de Cassini sont devenues les états de Cassini qui décrivent le mouvement de rotation moyen des corps en rotation spin-orbite ;
- L'obliquité moyenne et les libérations physiques apportent l'information sur les moments d'inertie et les processus internes (océan global) et externes (atmosphère) qui agissent dans les corps.
- Aujourd'hui grâce à de nouvelles données et missions (Radar, Cassini, MEX...) renouveau de l'exploration de la rotation des corps;
- Nouveaux projets de télémétrie planétaires, mesures par interférométrie radar des satellites Galiléens (Margot)

