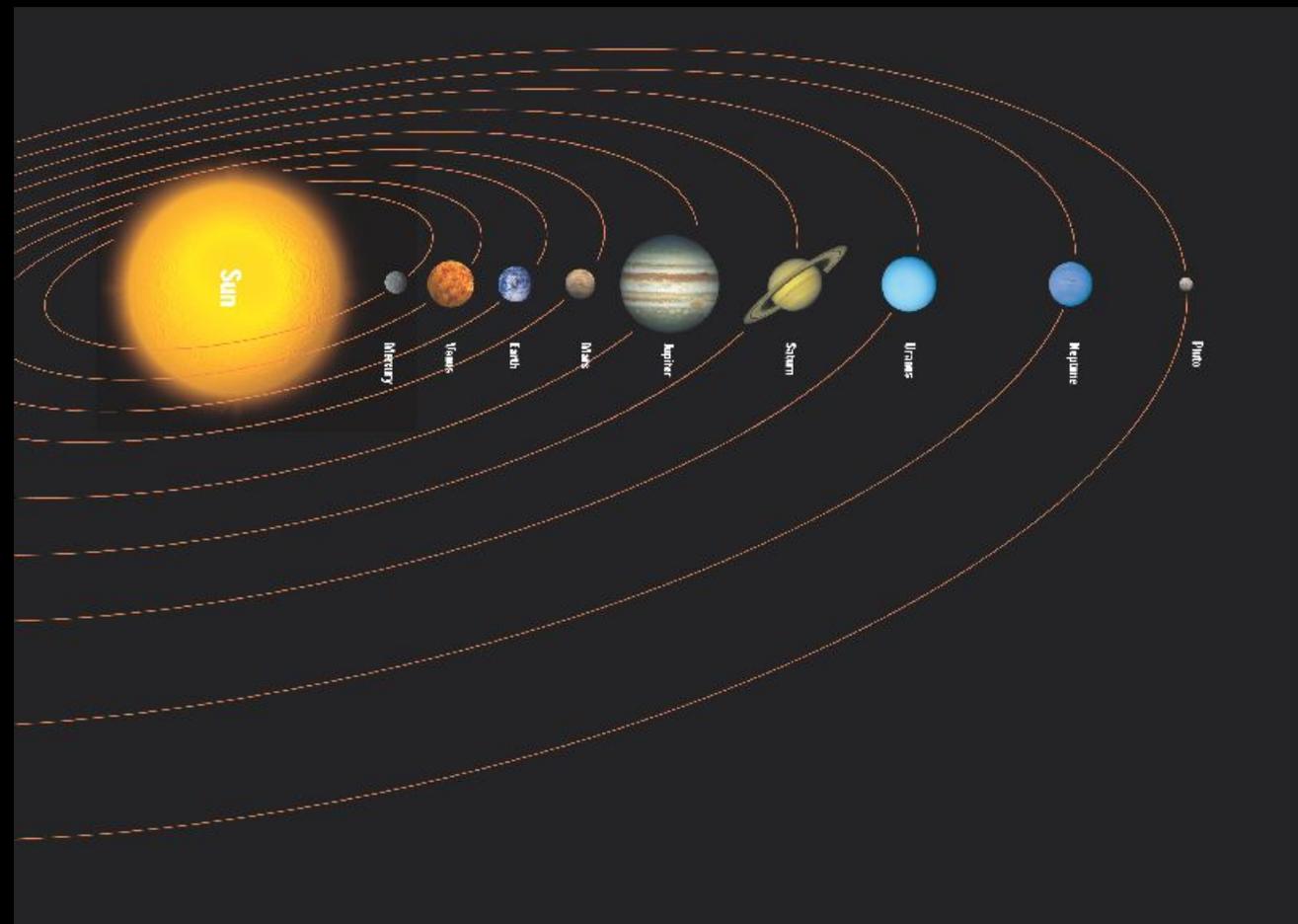


Spin et rotation des planètes

Benjamin Levrard

*Institut de Mécanique Céleste/Obs. de Paris et
Centre de Recherche Astrophysique de Lyon /ENS Lyon*



Pourquoi s'intéresser au spin des planètes ?

■ Le moment cinétique orbital terrestre >> Le moment cinétique de rotation terrestre

$$\sim M_{\oplus} \sqrt{G M_{\odot} a}$$

$$\sim 10^{40} \text{ J.s}$$

$$C\omega \sim 0.4 M_{\oplus} R_{\oplus}^2 \omega$$

$$\sim 10^{33} \text{ J.s}$$

Intérêt de l'étude de la rotation des planètes

- Contraintes sur la formation du système solaire
- Contraintes sur la structure interne des planètes
- Grandeur fondamentale dans l'étude des climats et de leur évolution

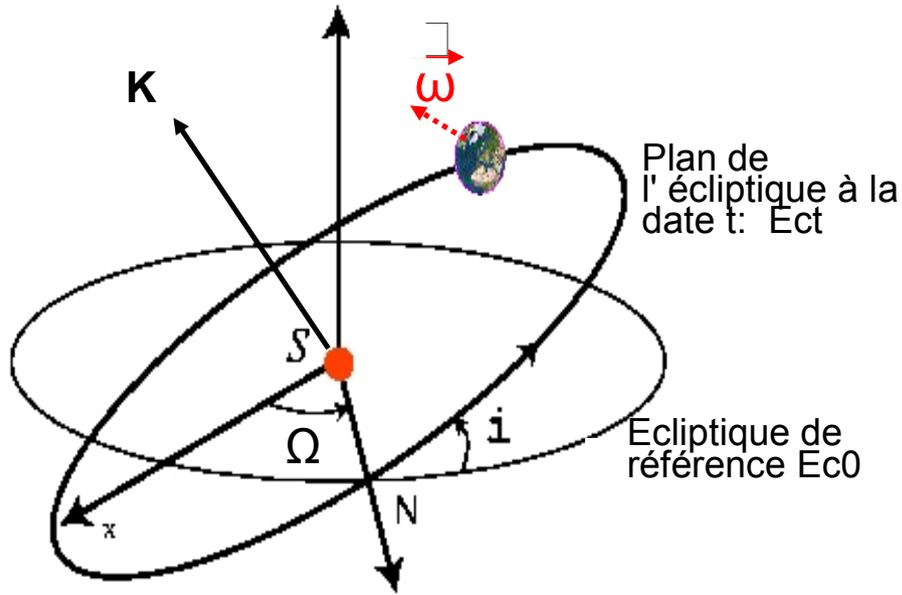
Plan de l'exposé

1. Considérations sur le spin des planètes, historique, état des lieux....
 2. Comment peut-on modifier le spin d'une planète ?
3. Pourquoi Mercure est bloquée dans une résonance 3 : 2 ?
 4. Pourquoi Vénus tourne à l'envers ?
5. L'axe de la Terre a-t-il basculé dans le passé lointain ?
 6. L'obliquité chaotique de Mars : implications climatiques

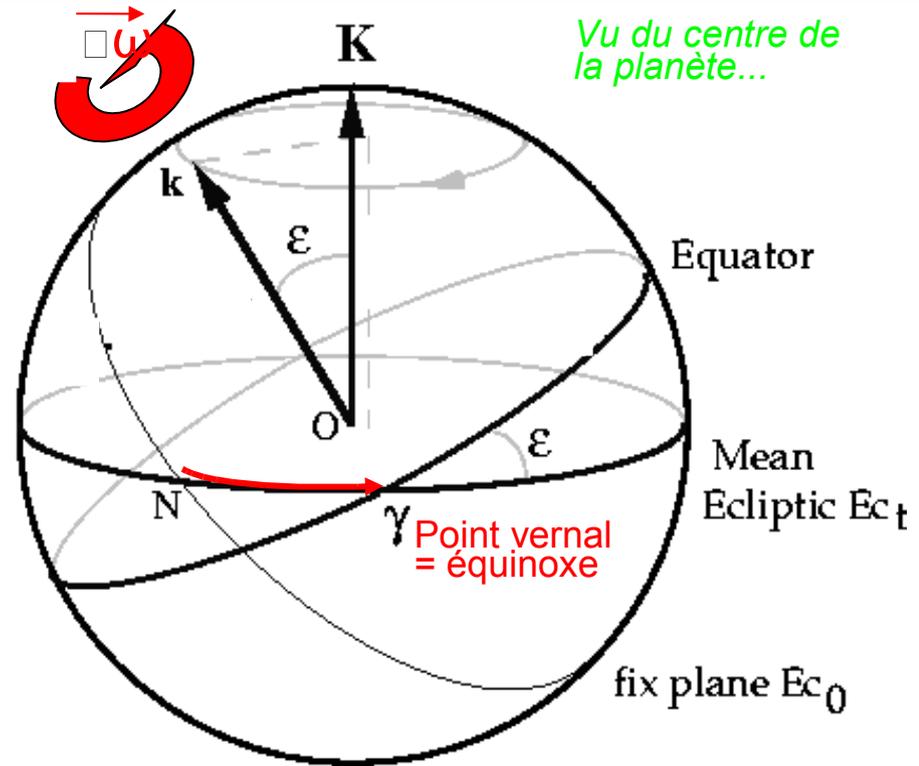
Conclusions et perspectives

La rotation planétaire

- Hypothèse : Le vecteur rotation est confondu avec l'axe principal d'inertie

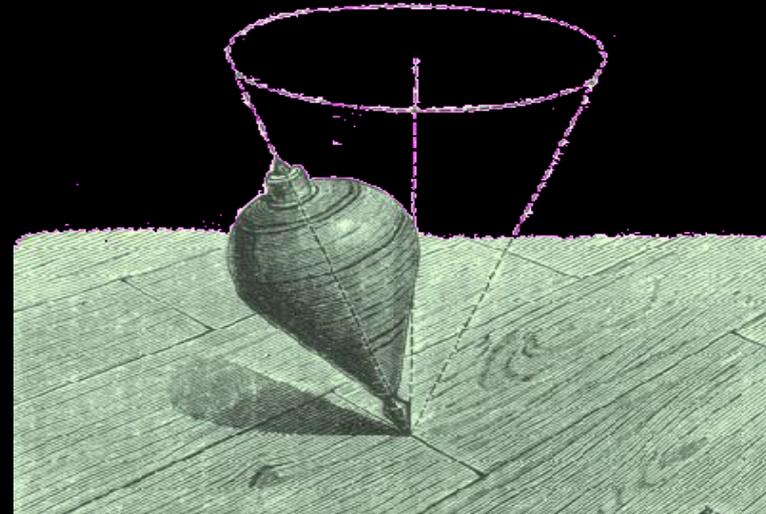


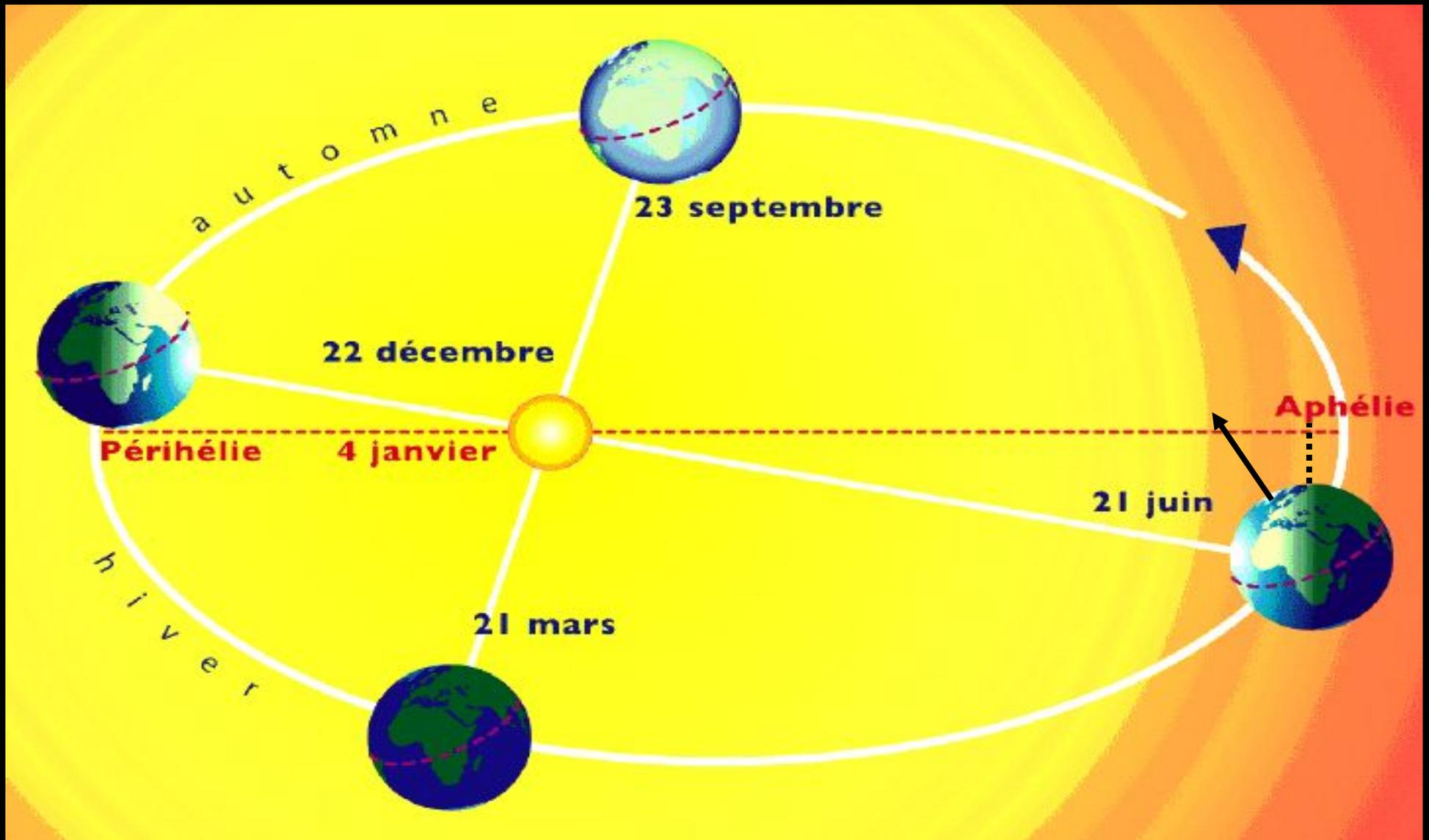
- i : inclinaison du plan orbital
- Ω : longitude du noeud N



Le vecteur vitesse de rotation est défini par 3 paramètres :

- Sa norme $\omega =$ vitesse de rotation
- L'obliquité $\epsilon =$ angle entre le plan orbital et l'équateur
- La précession $\psi = N\gamma =$ position de l'équinoxe par rapport au noeud





- * Présence de saisons (obliquité de 23.4°) modulées par l'excentricité

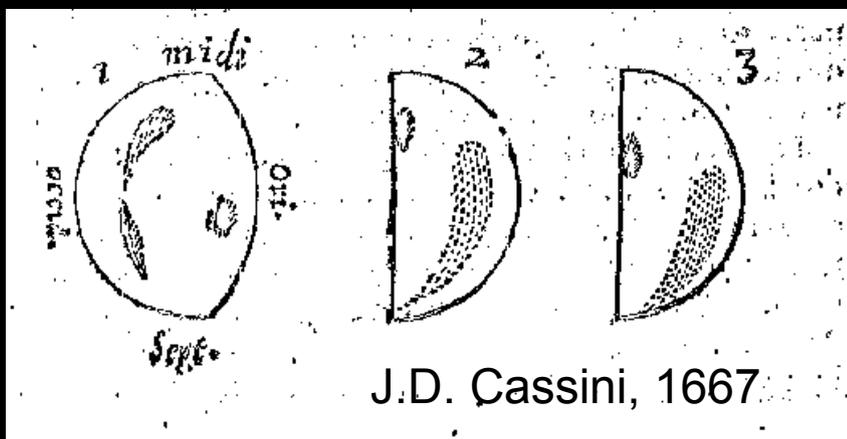
Un bref historique de la mesure des rotations planétaires

Mercure



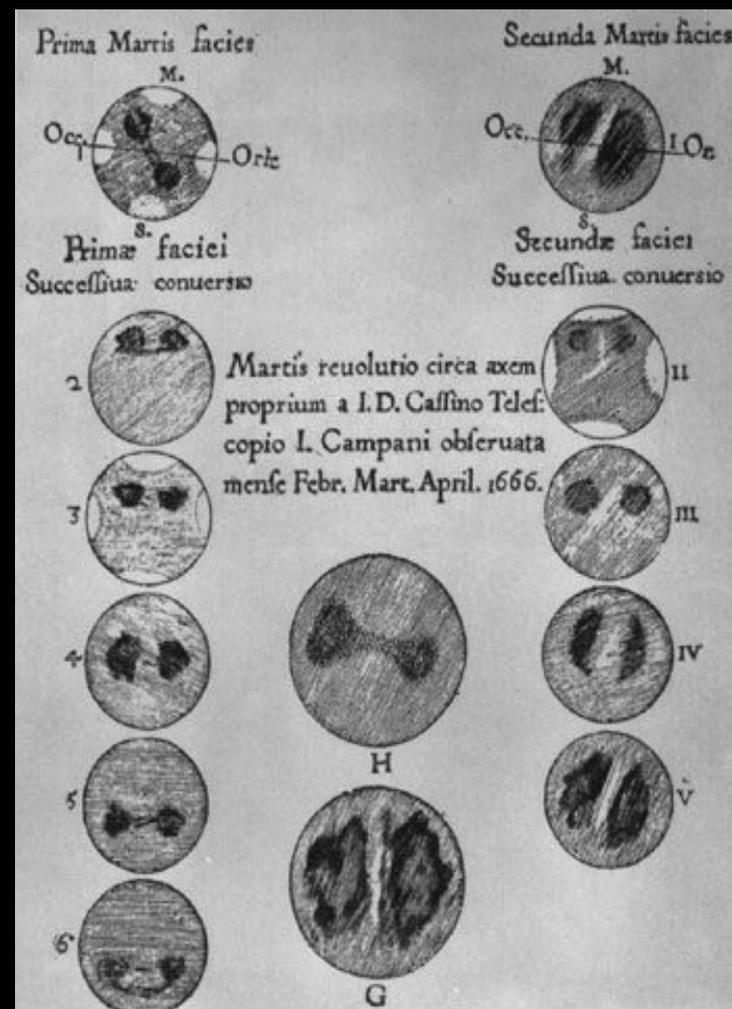
Prédiction d'une rotation synchrone....

Vénus



Période de rotation inférieure à 1 jour...

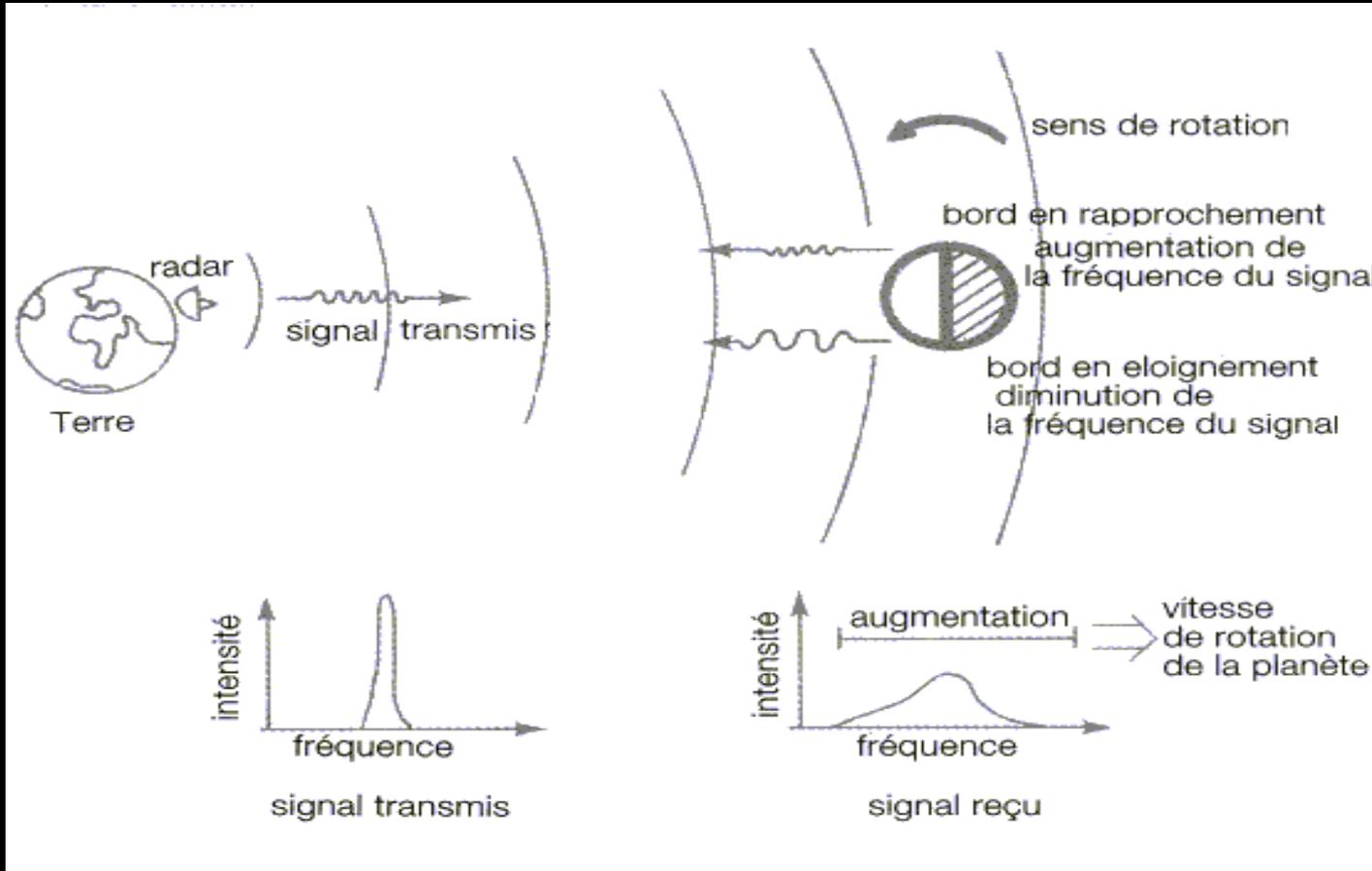
Mars



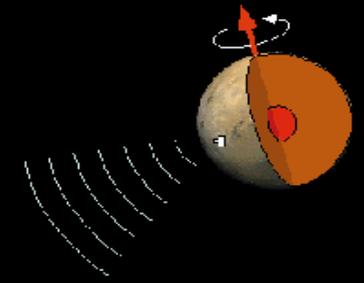
Observations de Jean-Dominique Cassini (1625-1712) vers 1666

Première estimation de la durée du jour martien ~ 24 heures

Utilisation de la radioastronomie terrestre

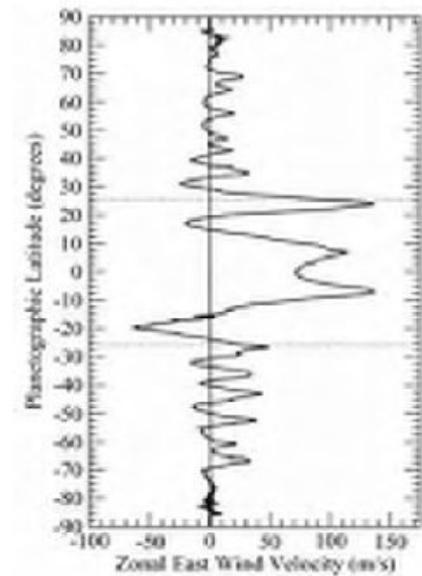


....et des landers planétaires

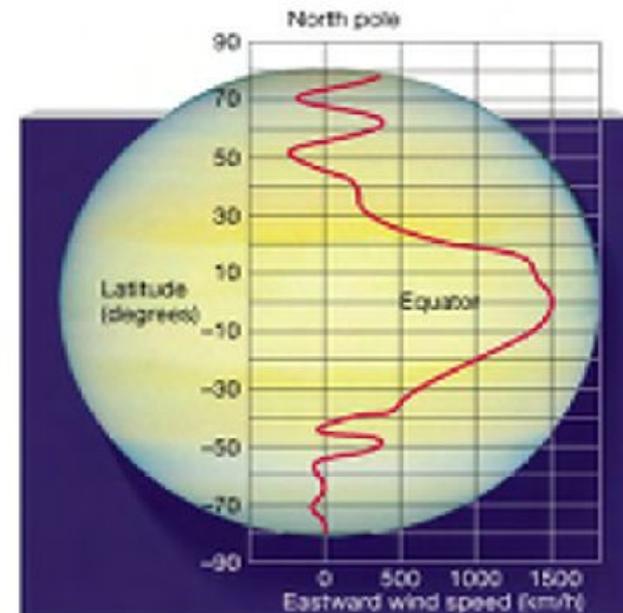
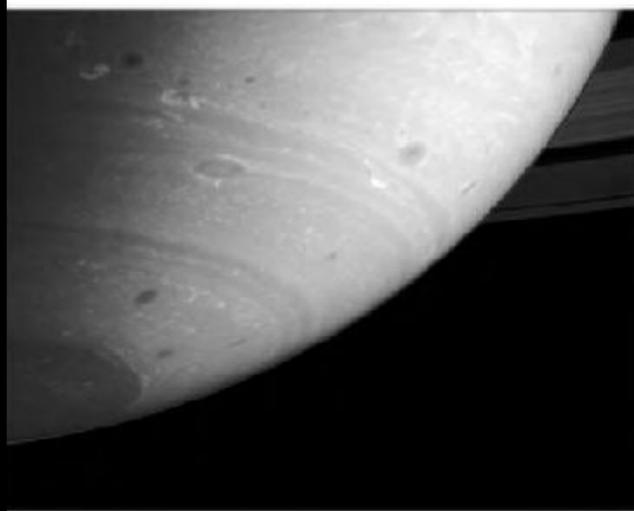


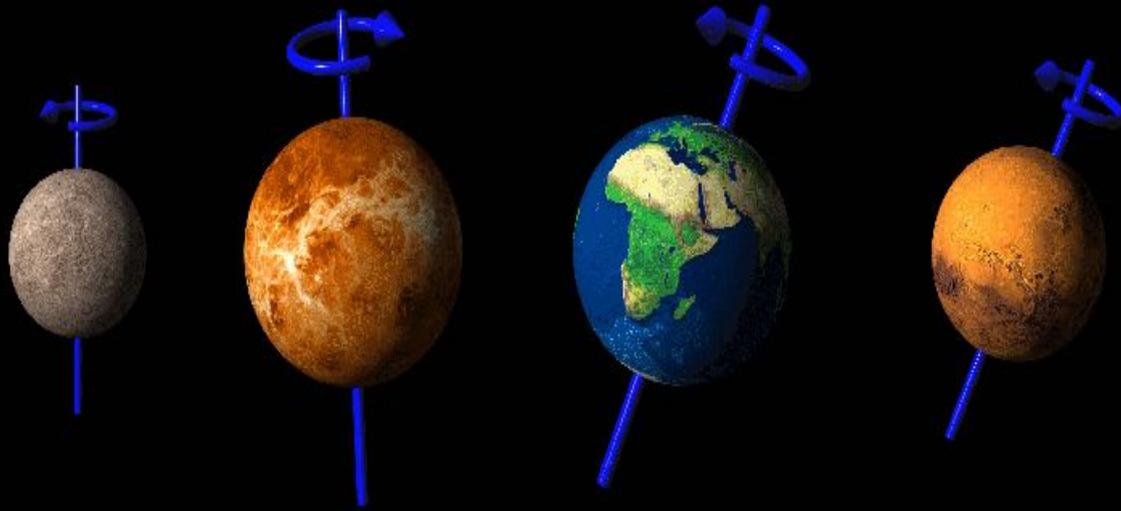
La rotation des planètes géantes gazeuses

Jupiter



Saturne





Les obliquités planétaires

Mercury
0.1°

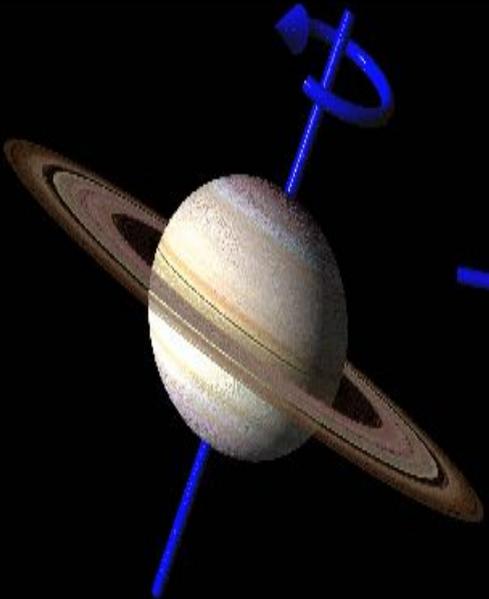
Venus
177°

Earth
23°

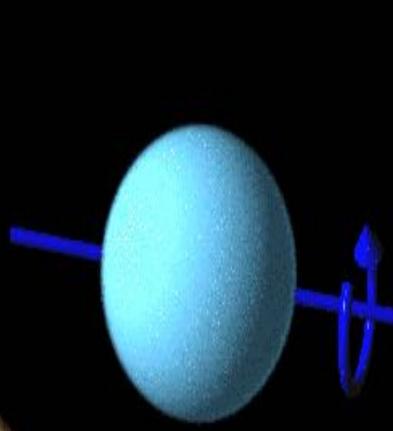
Mars
25°



Jupiter
3°



Saturn
27°



Uranus
98°

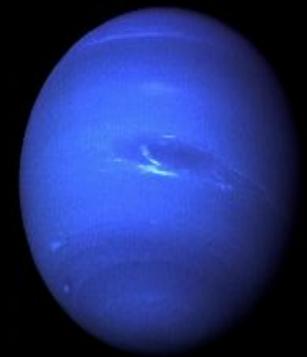
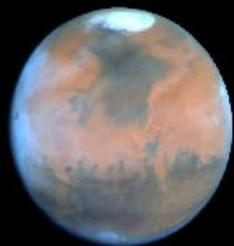


Neptune
30°

Période sidérale Période de révolution Jour solaire moyen

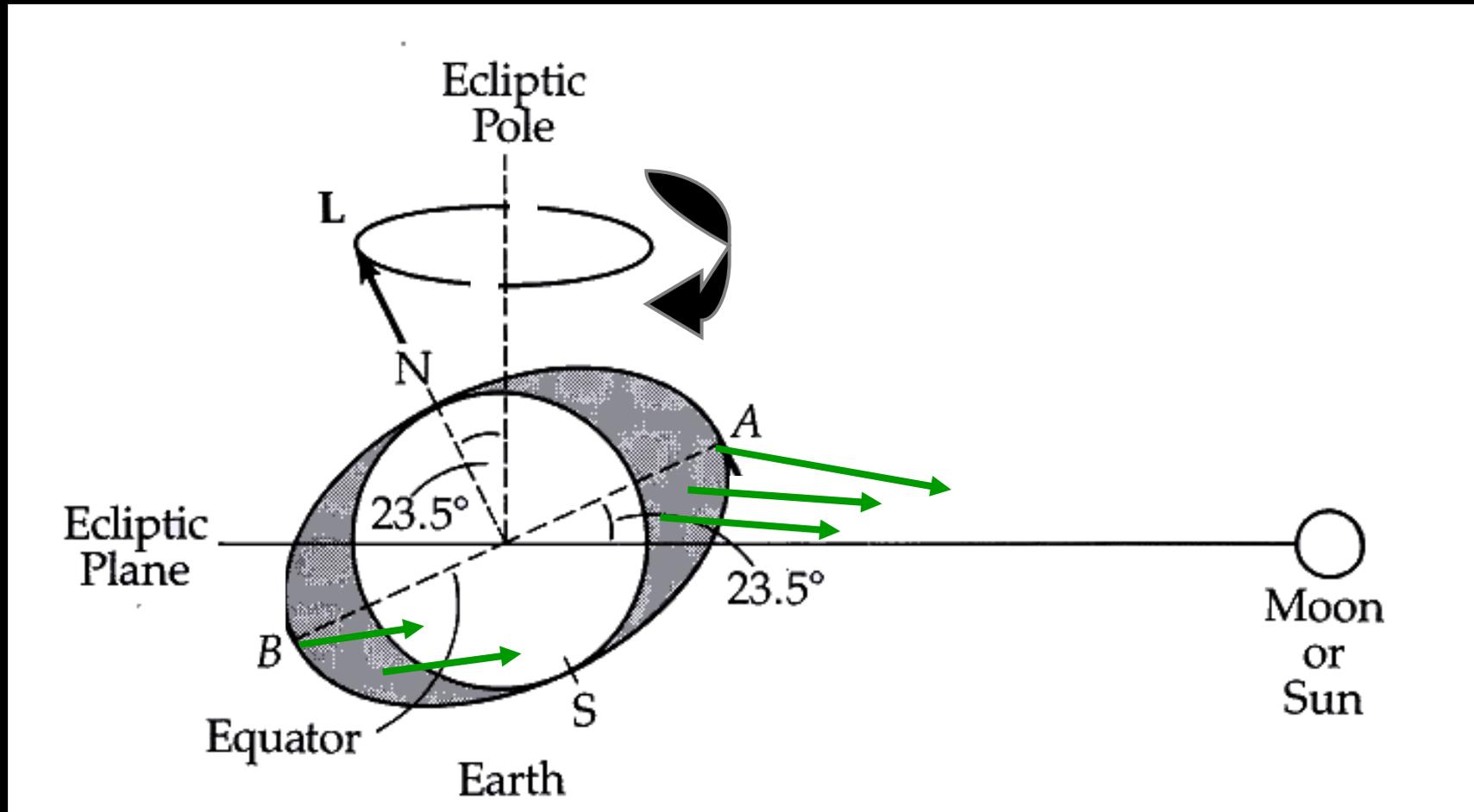
	Période sidérale	Période de révolution	Jour solaire moyen
Mercure	58.64 jours	88.0 jours	175.9 jours
Venus	-243.01 jours	224.7 jours	116.7 jours
Terre	23.93 heures	365.25 jours	1.003 jours
Mars	24.62 heures	689.0 jours	1.03 jours
Jupiter	9.92 heures	11.87 années	9.92 heures
Saturne	10.65 heures	29.45 années	10.65 heures
Uranus	17.24 heures	84.07 années	17.24 heures
Neptune	16.11 heures	164.89 années	16.11 heures

$$\frac{1}{T_{\text{solaire}}} = \frac{1}{T_{\text{sidéral}}} - \frac{1}{T_{\text{orbital}}}$$



Les mécanismes qui peuvent modifier le spin d'une planète

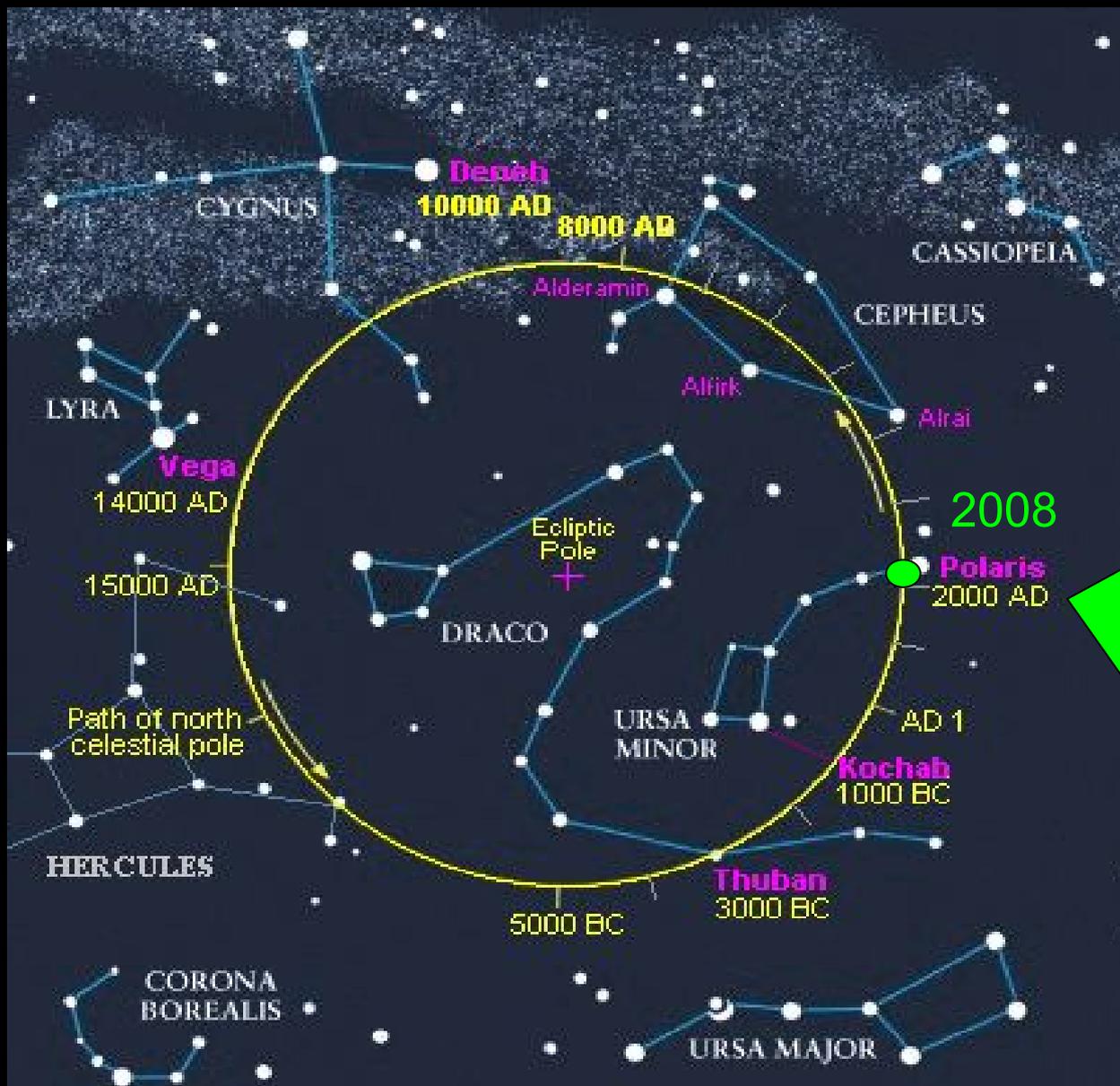
- Effets « conservatifs » : 1. Précession de l'axe de rotation



■ Vitesse de précession

$$\dot{\psi} \propto \frac{G M_{\odot}}{a^3 \omega} \frac{C - A}{C} \times \cos \varepsilon$$

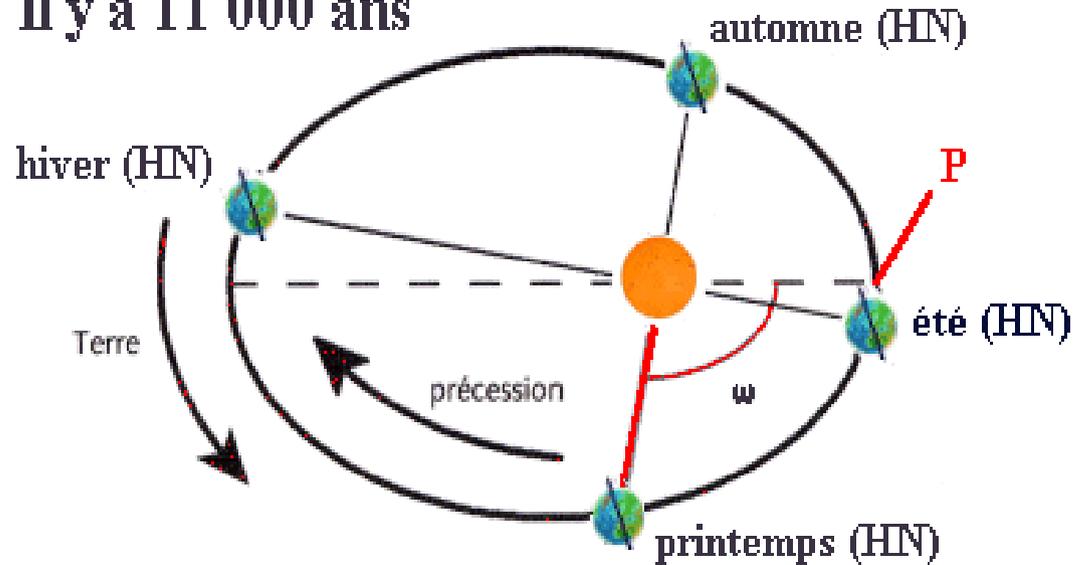
	Mercure	Vénus	Terre	Mars
Période de Précession	230000	81000	26000	170000



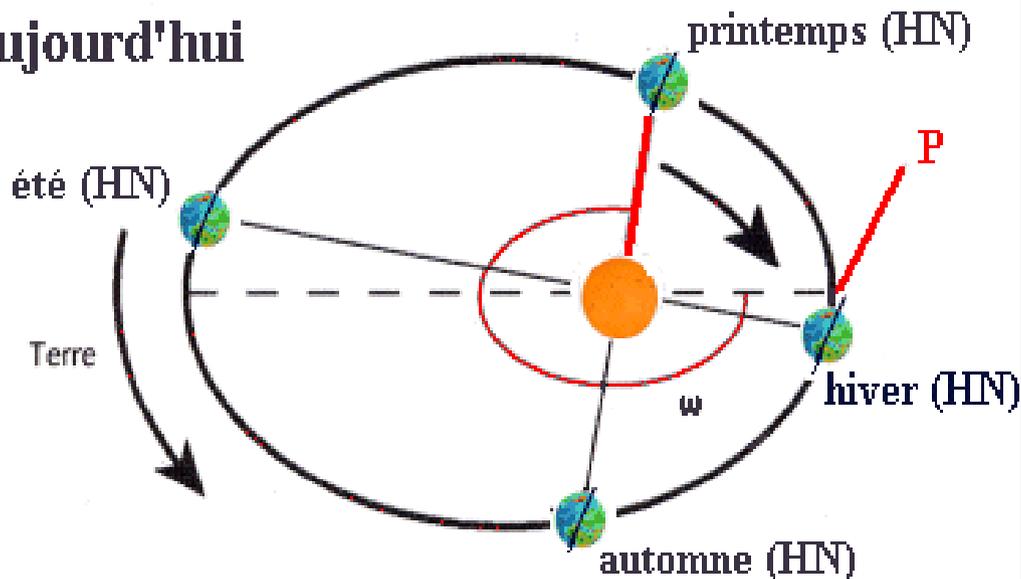
« Cône » de précession observé par Hipparque IIème siècle avant J.C.

Changement dans la nature de "l'étoile polaire"

Il y a 11 000 ans



Aujourd'hui



Précession rétrograde des solstices et des équinoxes (période ~ 26 000 ans)

+

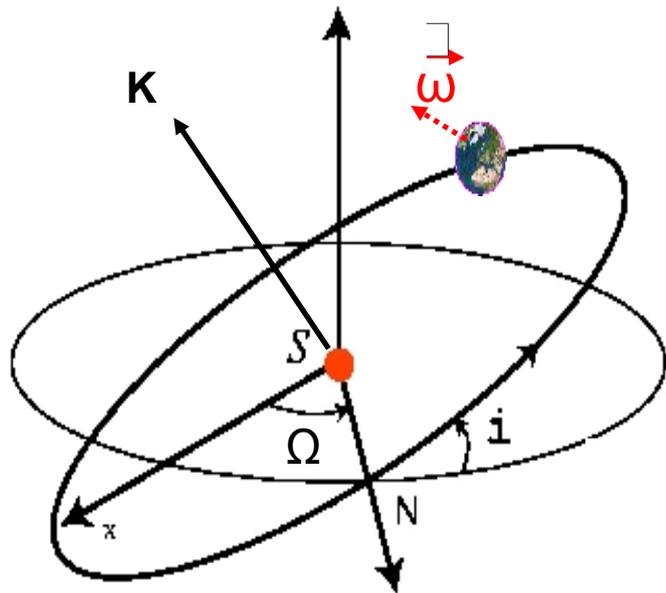
Précession prograde du périhélie l'orbite (période ~ 100 000 ans)

=

Inversion régulière de l'intensité des saisons, et de l'insolation saisonnière (période ~ 23 000 ans)

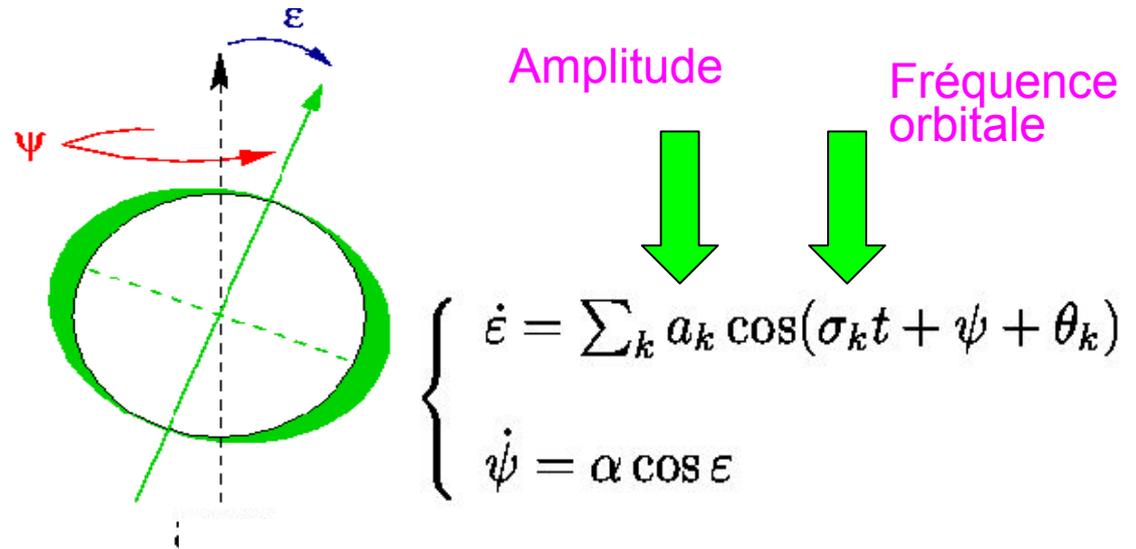
➤ Effets « conservatifs » : 2. Perturbations des autres planètes

Tous les éléments orbitaux de la Terre (position du noeud, inclinaison, etc...) évoluent avec le temps: on ne considère ici que le termes dits « séculaires » de longue période.



i : inclinaison du plan orbital

Ω : longitude du noeud N

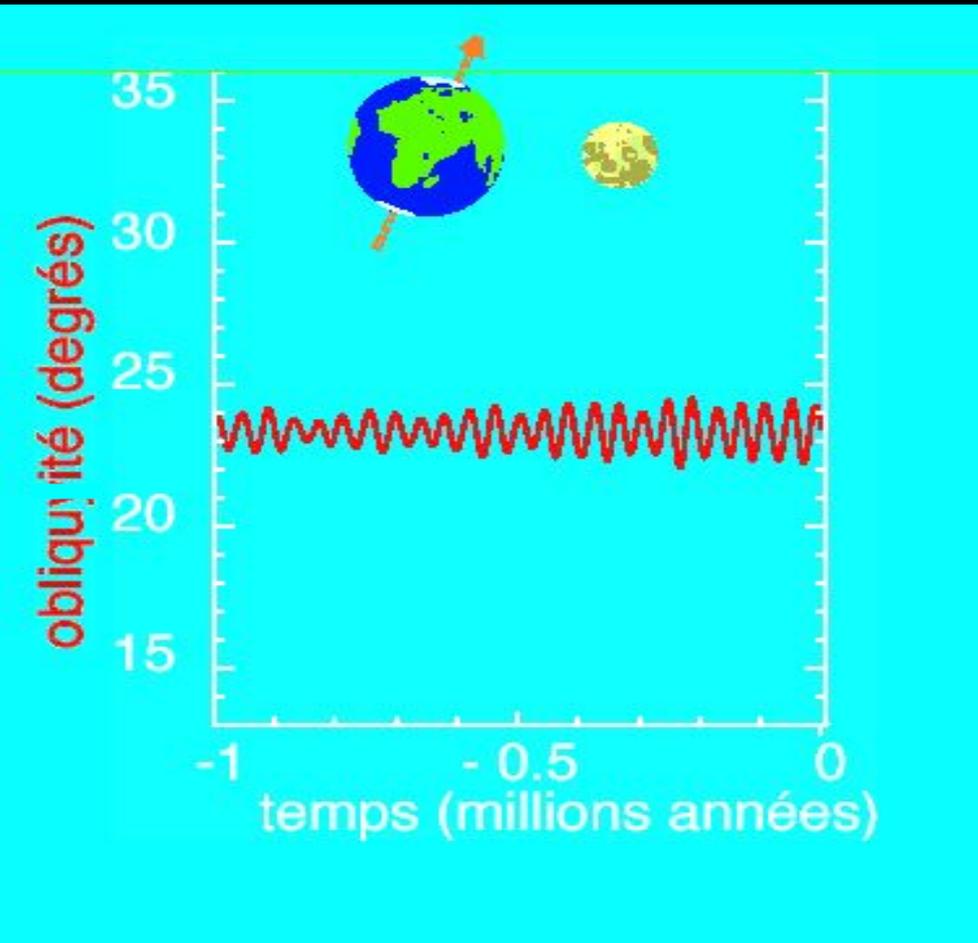


Equations de précession

↔ Résonance si $-\sigma_k = \dot{\psi} \simeq \alpha \cos \epsilon$

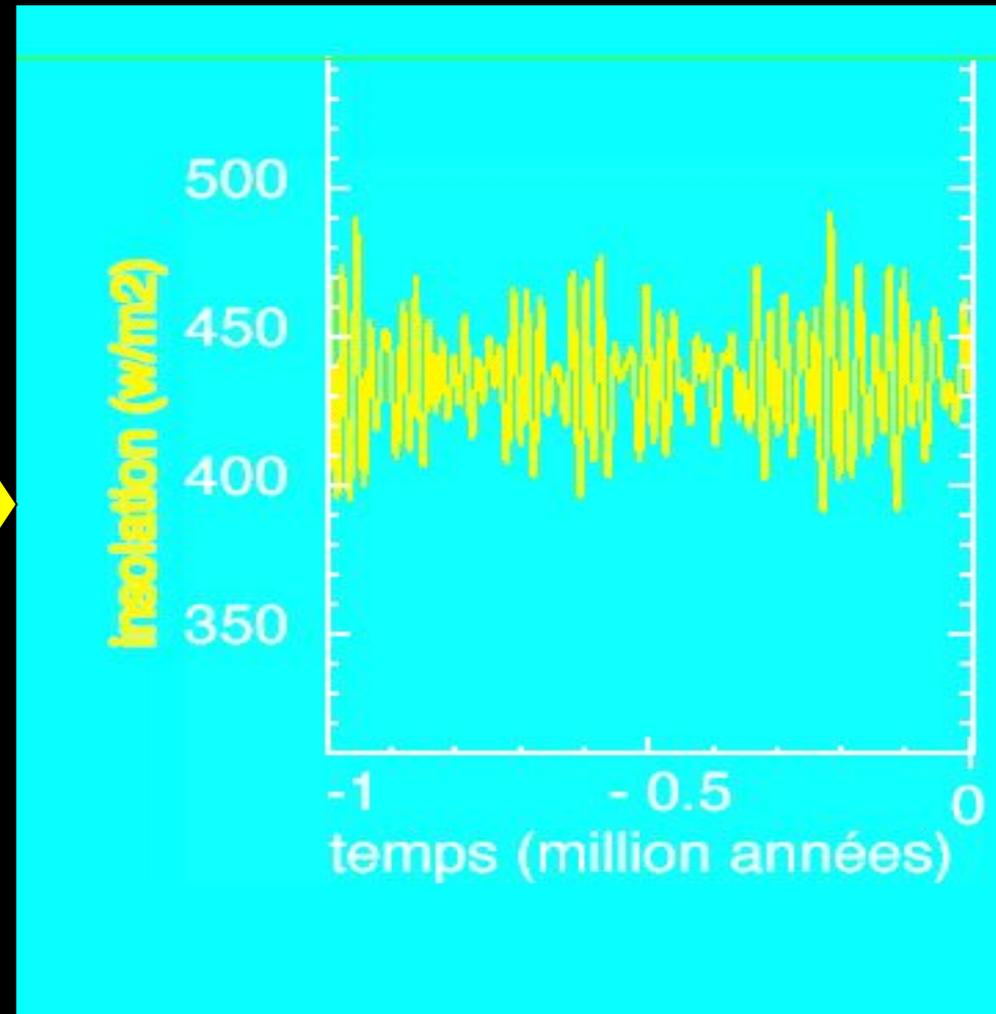
- Le recouvrement de résonances peut conduire au chaos...(Laskar et al., 1993)
- Il faut connaître la dynamique du système solaire pour prédire l'évolution du spin !!!
- Le système solaire est chaotique sur une échelle de temps de ~ 10 Ma (Laskar, 1989)

Variations de l'obliquité terrestre sur 1 Ma



Période principale ~41 000 ans

Variations de l'insolation estivale à 65°N



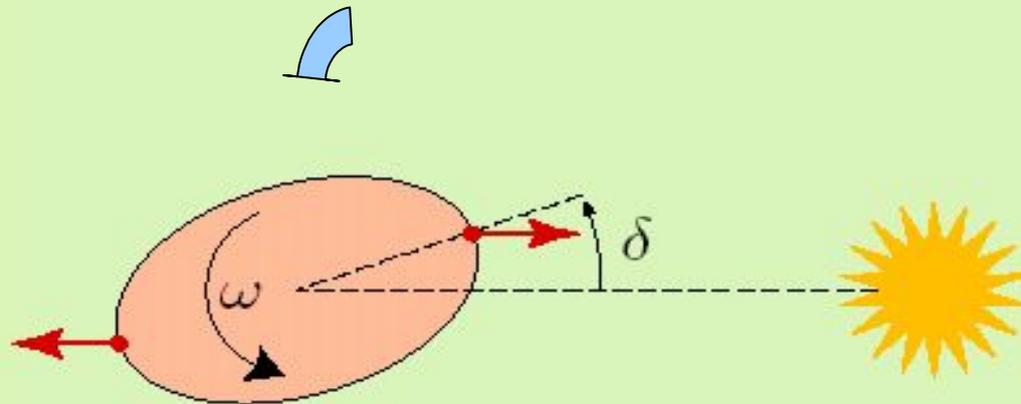
Plus de 20 % de variations de l'ensoleillement reçue !

➤ Effets « dissipatifs » : 1. Effets de marées solides

Friction de marée solide

Darwin, G., 1880; MacDonald, 1964; Goldreich, 1966; Kaula, 1964; Mignard, 1979, 80, 81; Touma & Wisdom, 1994

n : moyen mouvement autour de l'astre central



Bouffon de marées

Pour une orbite circulaire, la rotation doit être **synchrone** avec la révolution à l'équilibre

- Si $w > n$: Couple de rappel

$$\dot{\omega} < 0$$

- Augmentation de la distance Soleil-planète
- Diminution de l'obliquité

Couple de marées

$$\Gamma \propto \frac{1}{r^6} \times \sin 2\delta$$

Temps caractéristique d'évolution des marées solides

temps de « mise à l'équilibre » de la rotation

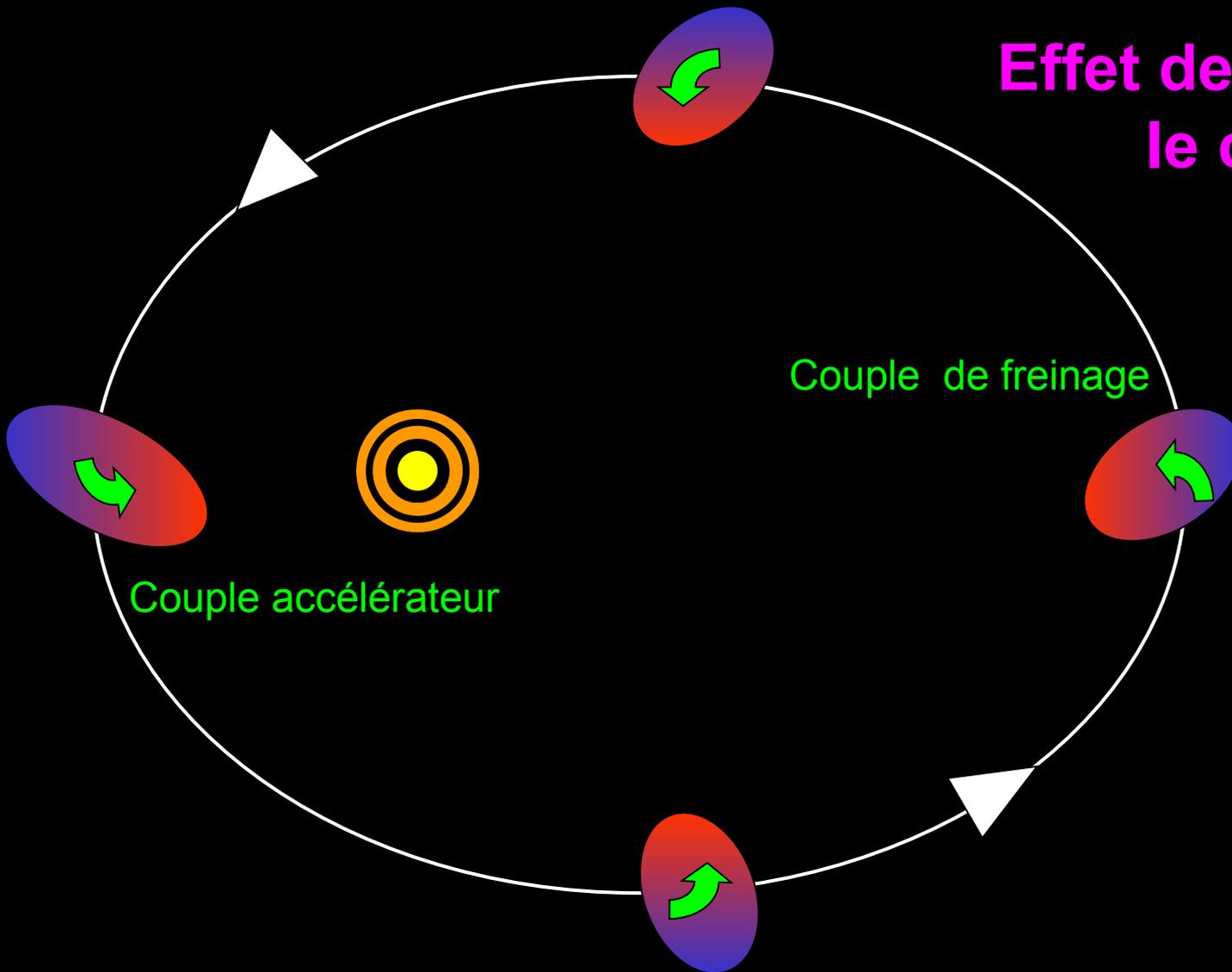
Mercure	300 Ma
Venus	4 Ga
Terre	50 Ga
Mars	7000 Ga
Lune	20 Ma

- Seules Mercure et Vénus ont été fortement ralenties par effet de marées
- Contraintes sur les vitesses initiales de rotation des planètes (une dizaine d'heures ?)



Effet de l'excentricité sur le couple de marées

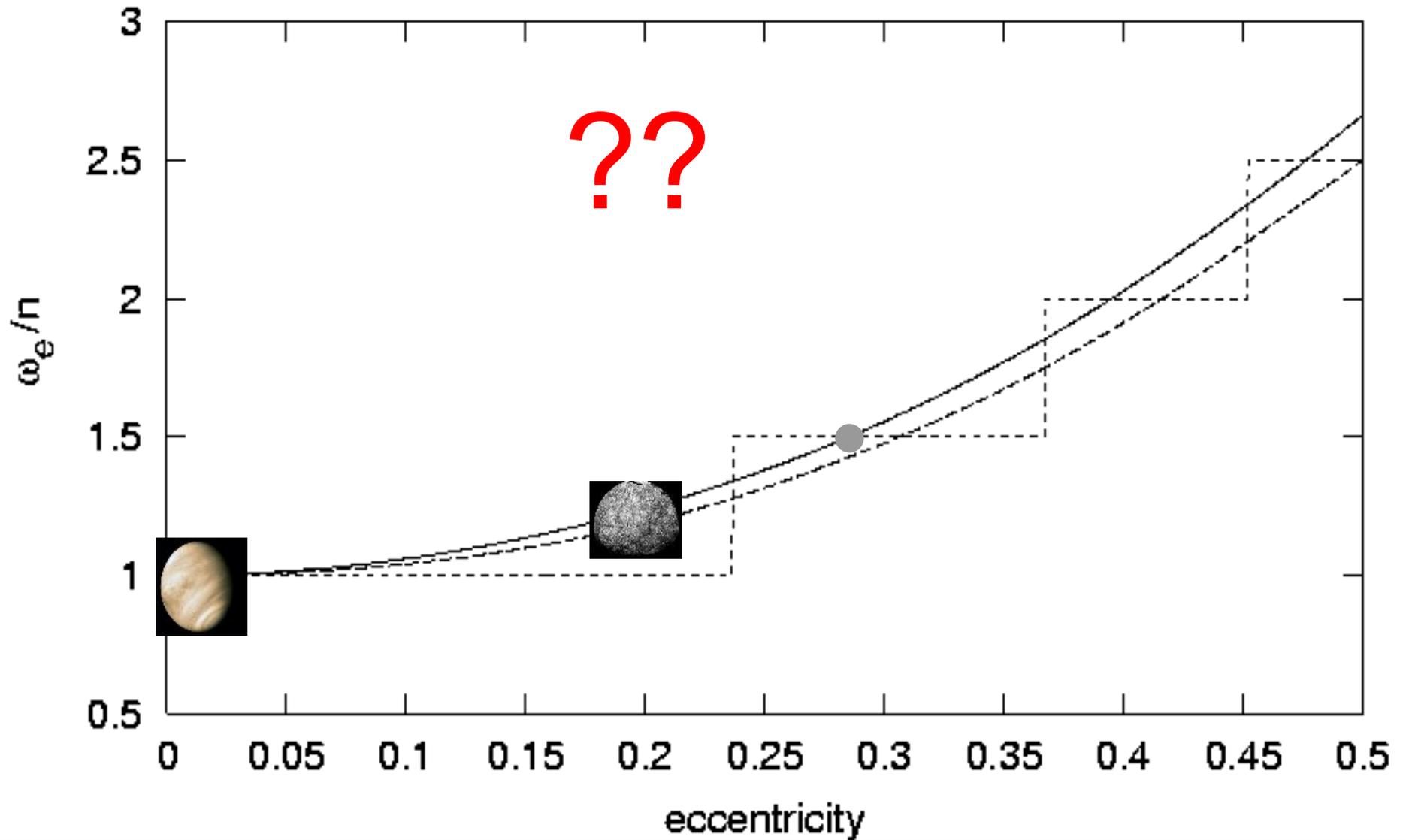
Si la rotation est synchrone....Impossible ! Cela conduit à un paradoxe....



Le couple de marées s'annule pour $\omega_{eq.} > n$

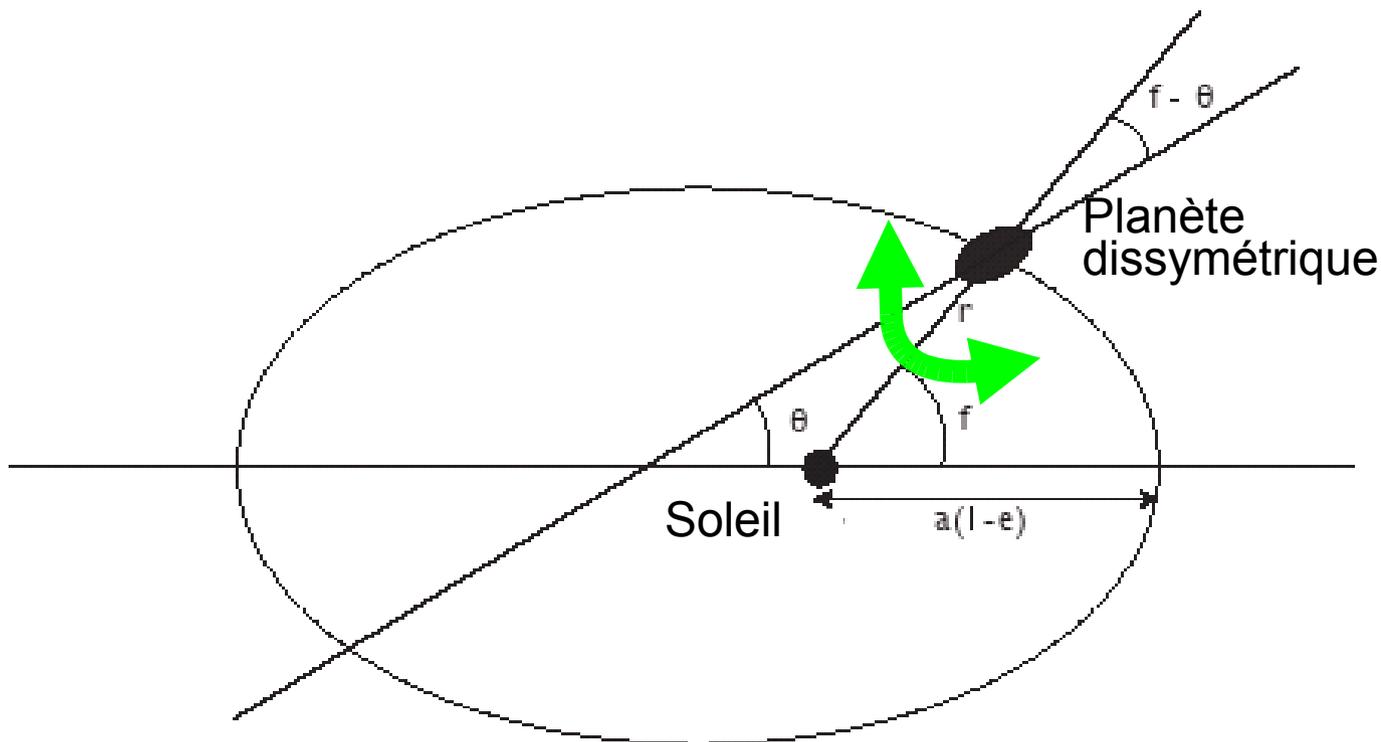
Rotation d'équilibre des marées

Vitesse d'équilibre/ n



Couplage spin-orbite

- Constat : les planètes ne sont pas des sphères, ni même des ellipsoïdes aplatis..mais possèdent un bourrelet équatorial « permanent » et originel.



Positions
d'équilibre stable :

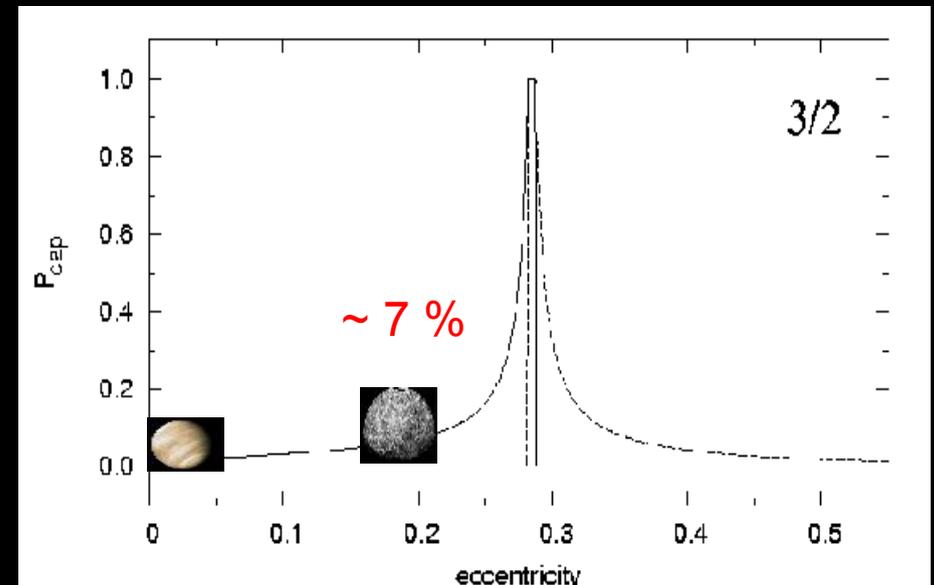
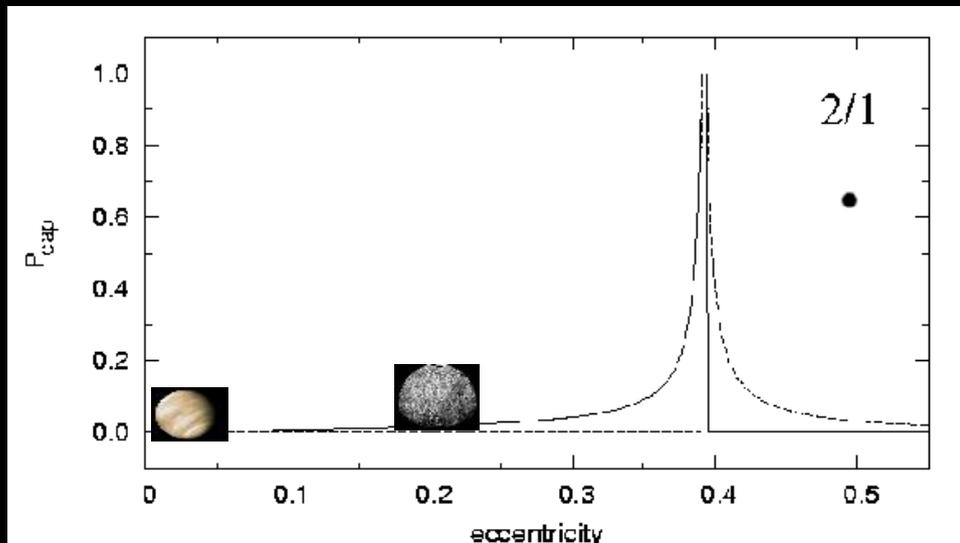
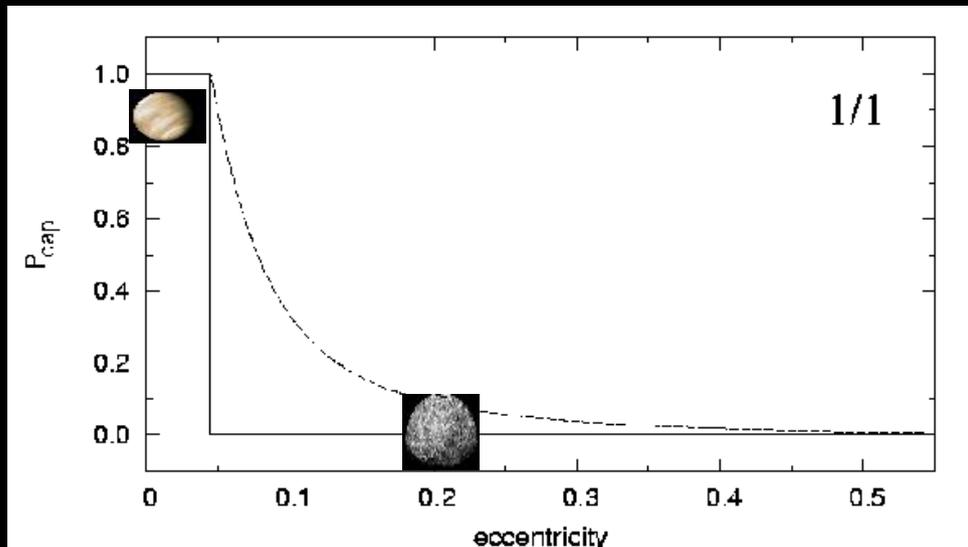
$$\omega'_{eq.} = p \times n$$

p entier ou
demi-entier
(1/2, 1, 3/2,
etc...)

Résonance
spin-orbite

Probabilités de capture en résonance spin-orbite

- Scénario : les planètes sont ralenties par effets de marées et traversent les différentes résonances.....sont-elles ou non capturées ?



Pourquoi Mercure
est-elle capturée en
résonance 3:2 ?

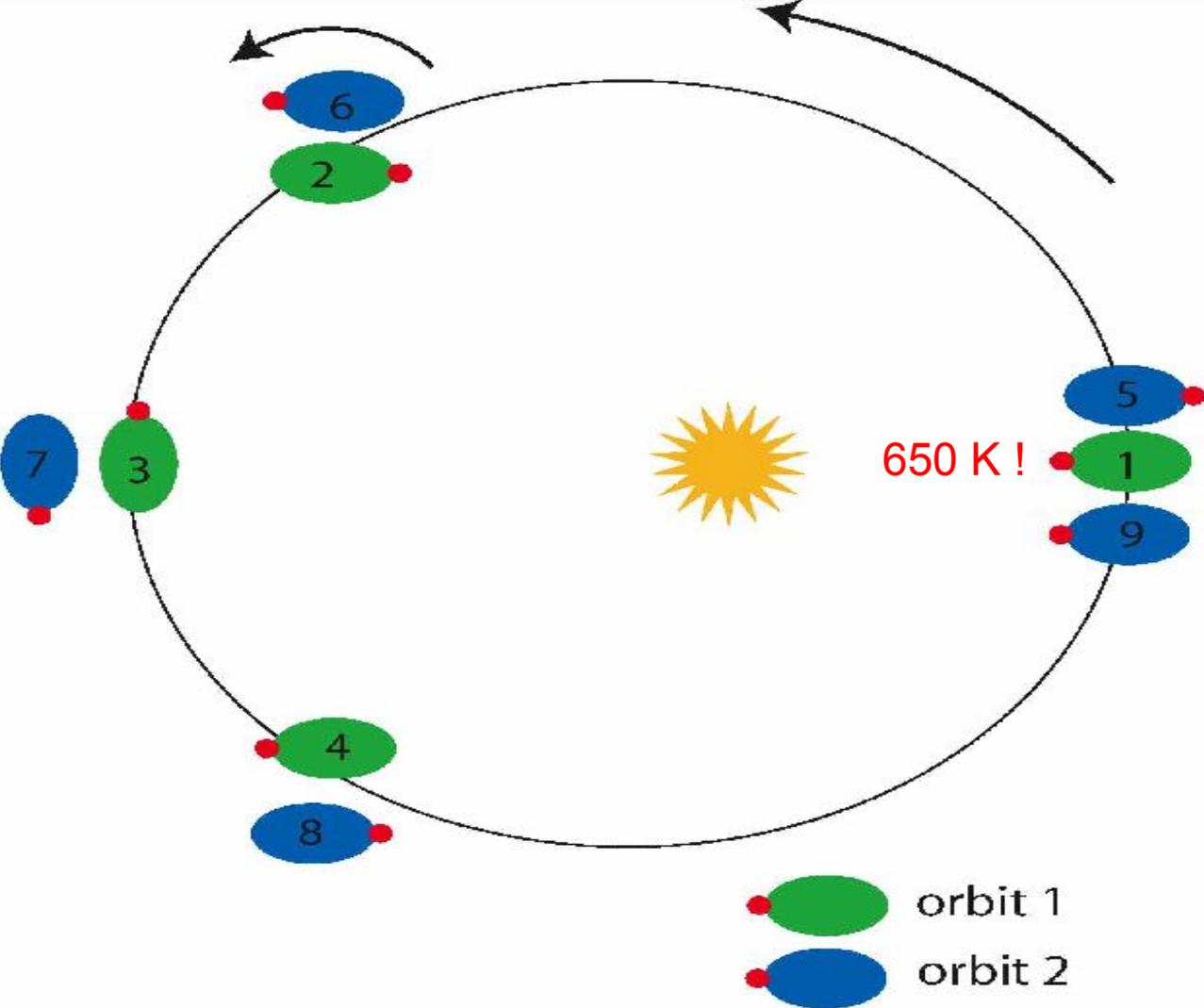
Sonde *Messenger*, JPL,
janv 08



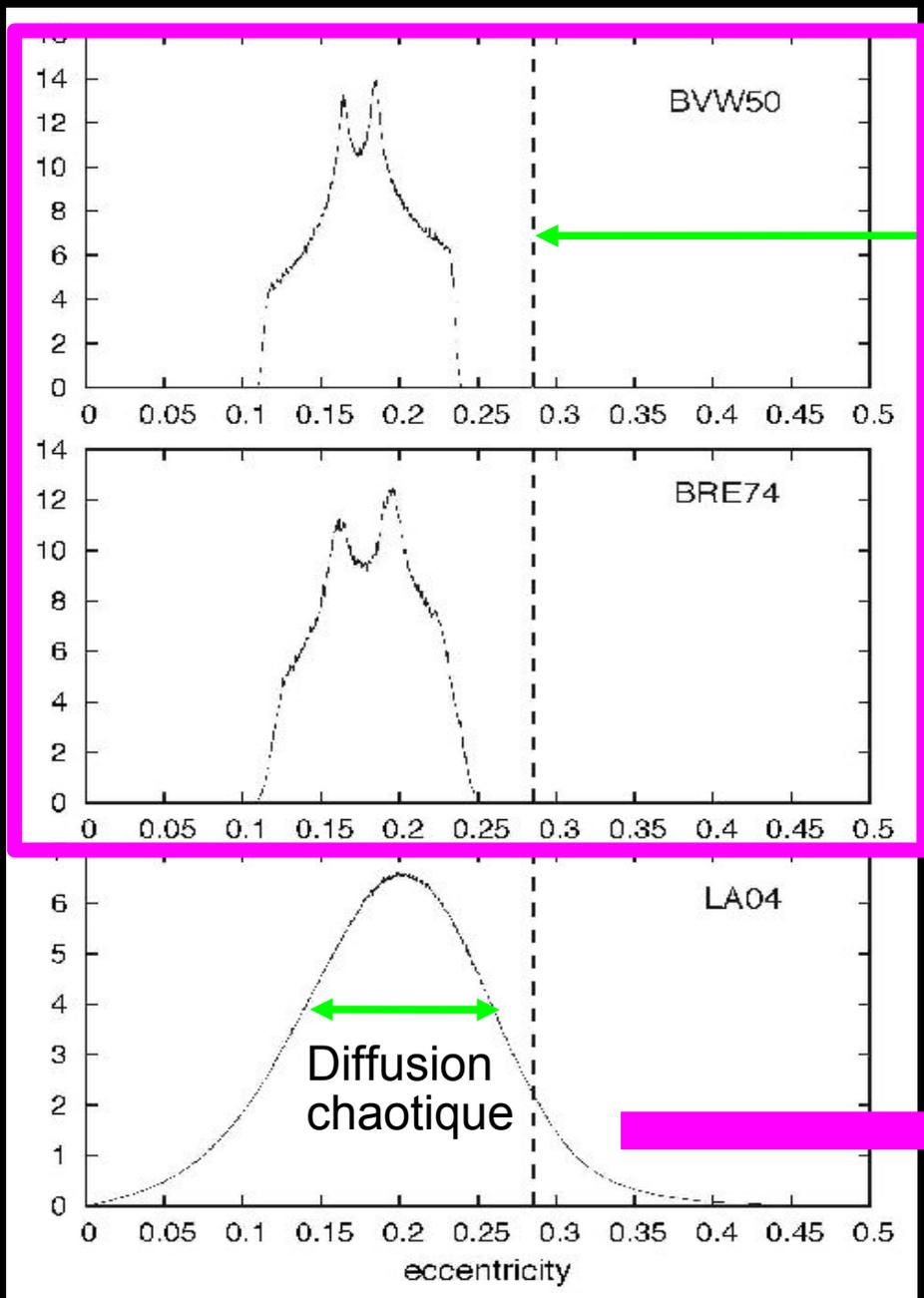
La résonance 3:2 de Mercure (1965)



Radiotélescope d'Arecibo (Porto-Rico)



La capture en résonance 3:2 de Mercure: un effet du chaos orbital ?



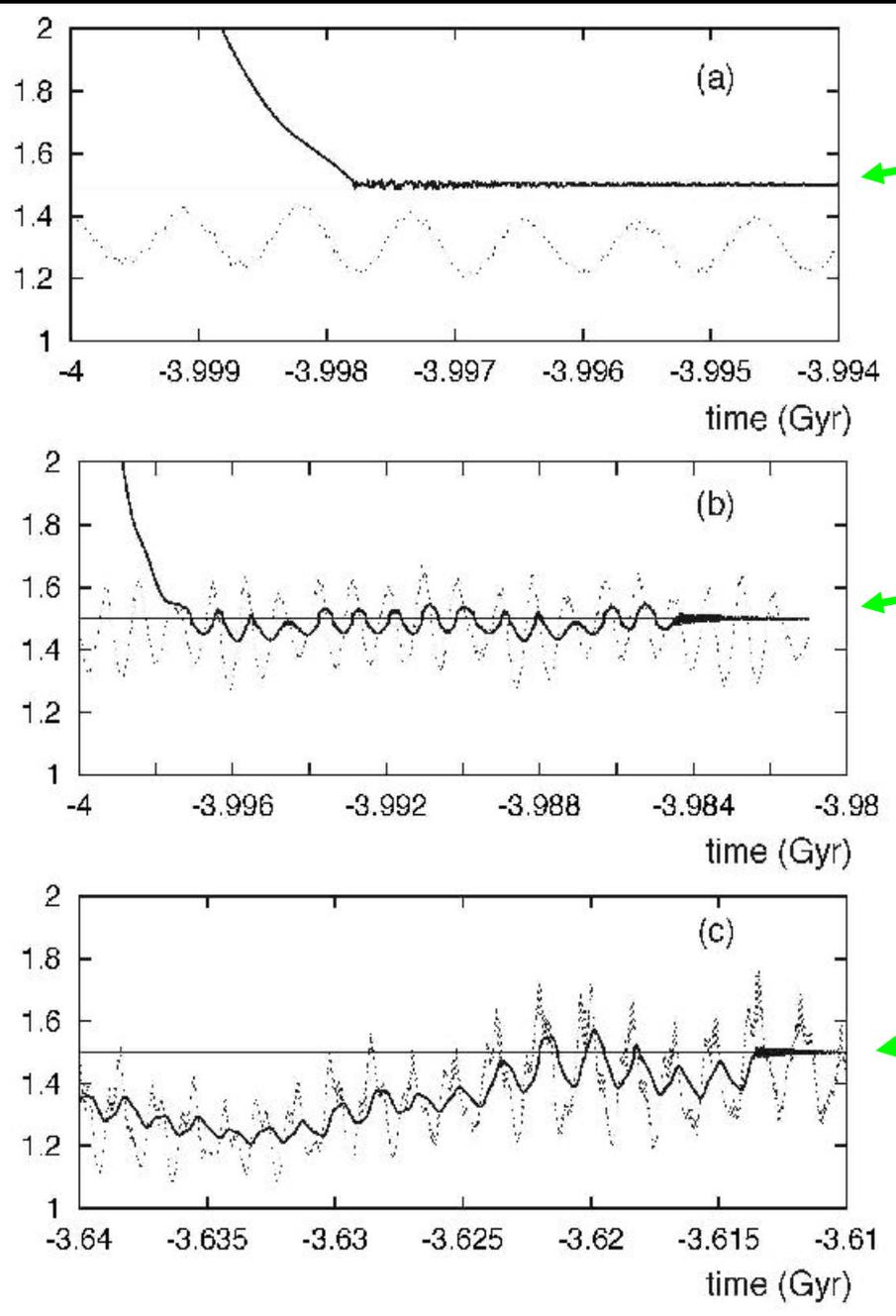
Excentricité critique donnant à Mercure une rotation d'équilibre de marée

$$w_{eq} = 1.5 n$$

7 % de chances de capture...

Beaucoup plus de chances de capture en résonance 3 : 2....

Trois modes de capture différents !



Capture en résonance
3:2

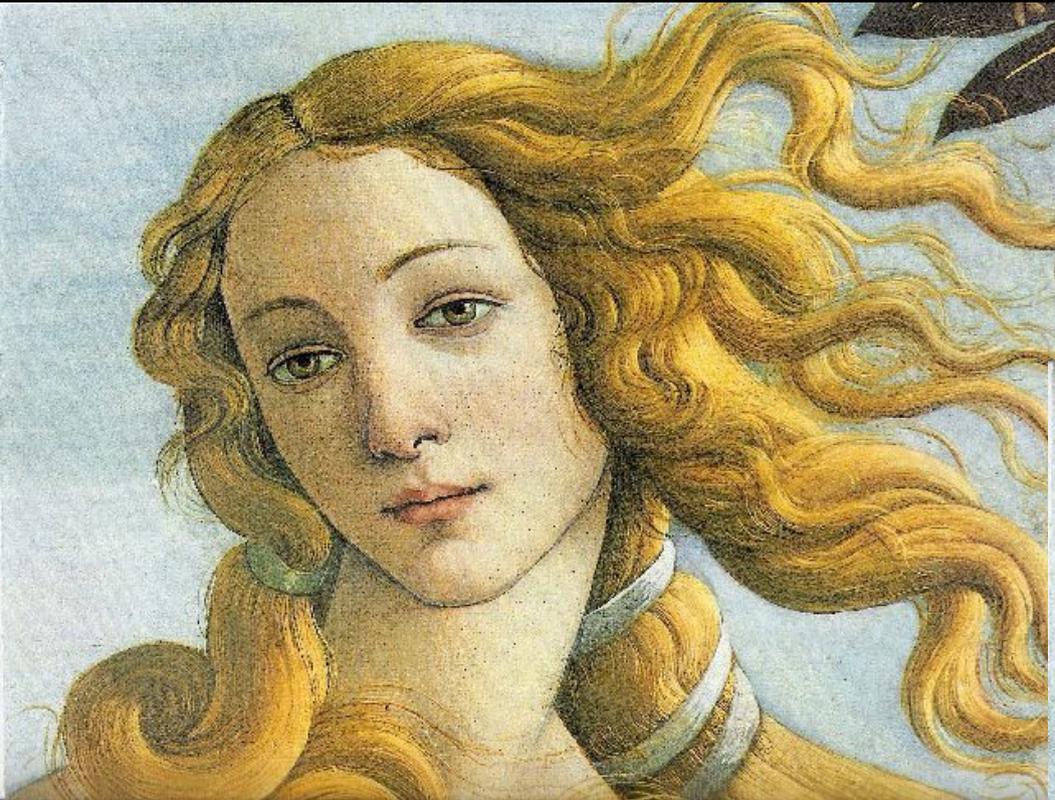
Capture en résonance
3:2

Capture en résonance
3:2

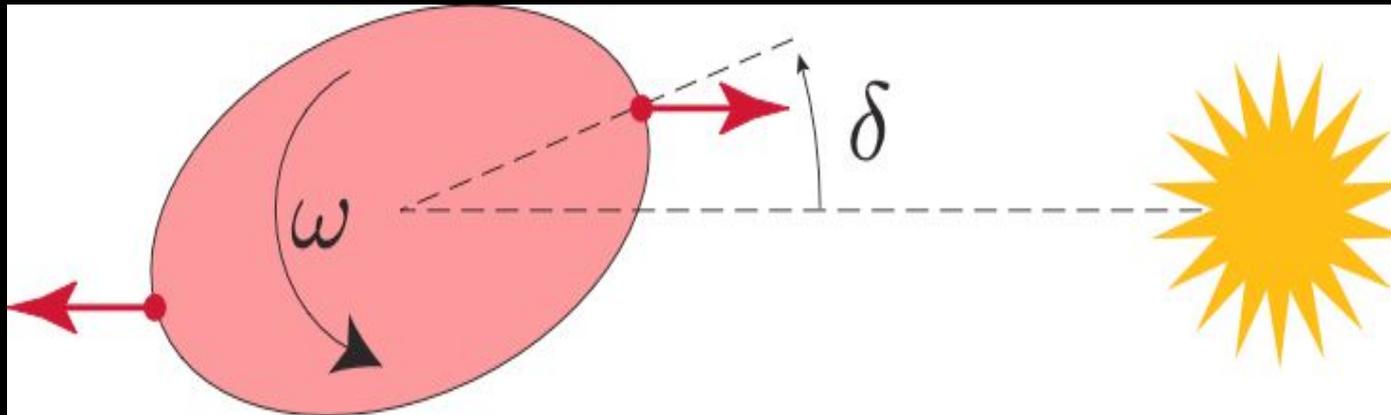
Sur 1000 orbites
proches, 55 % de
capture en 3:2

SFP, UDPPC, Lyon, 12 Mars 2008

Pourquoi Vénus tourne à l'envers ?



Effets conjugués des marées gravitationnelles

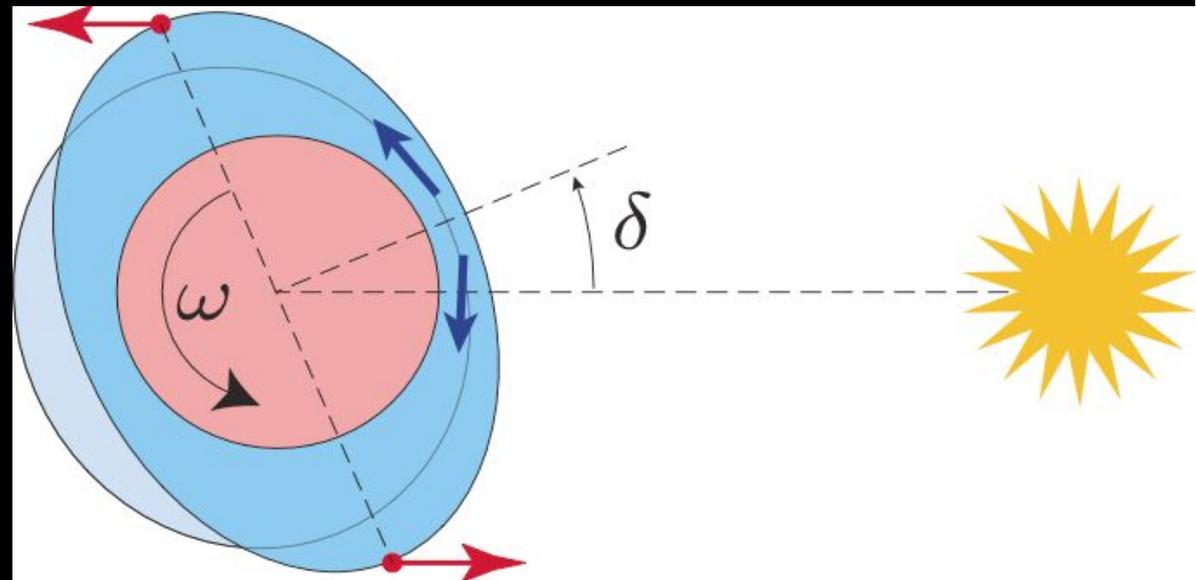


Marées gravitationnelles
« solides » :

Couple de freinage

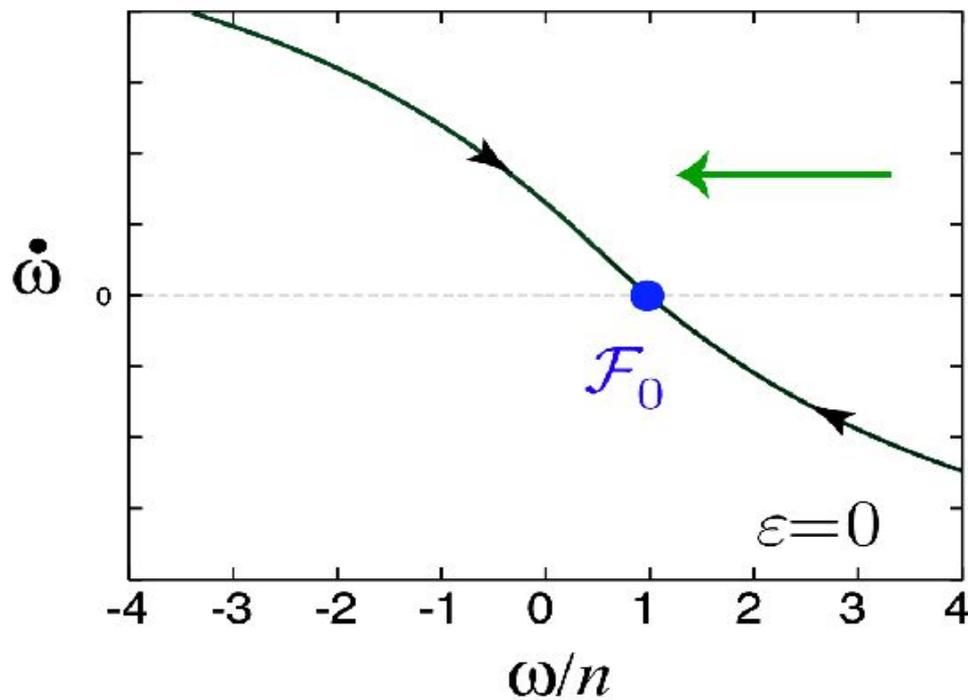
Marées gravitationnelles
« atmosphériques » ou
thermiques :

Couple accélérateur

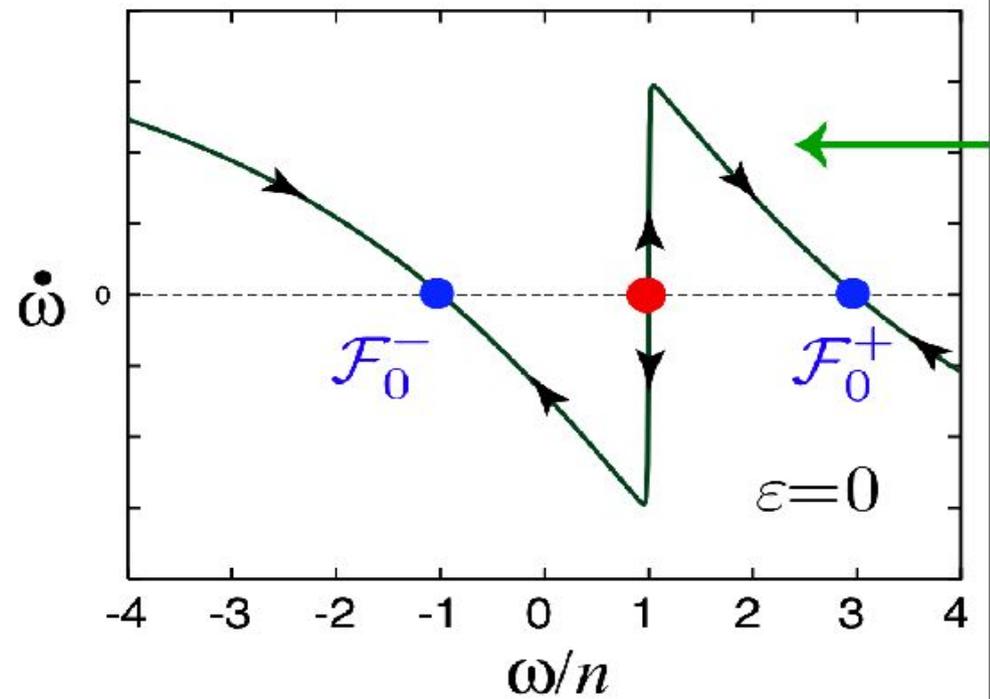


Quels sont les états d'équilibre ?

friction de marées



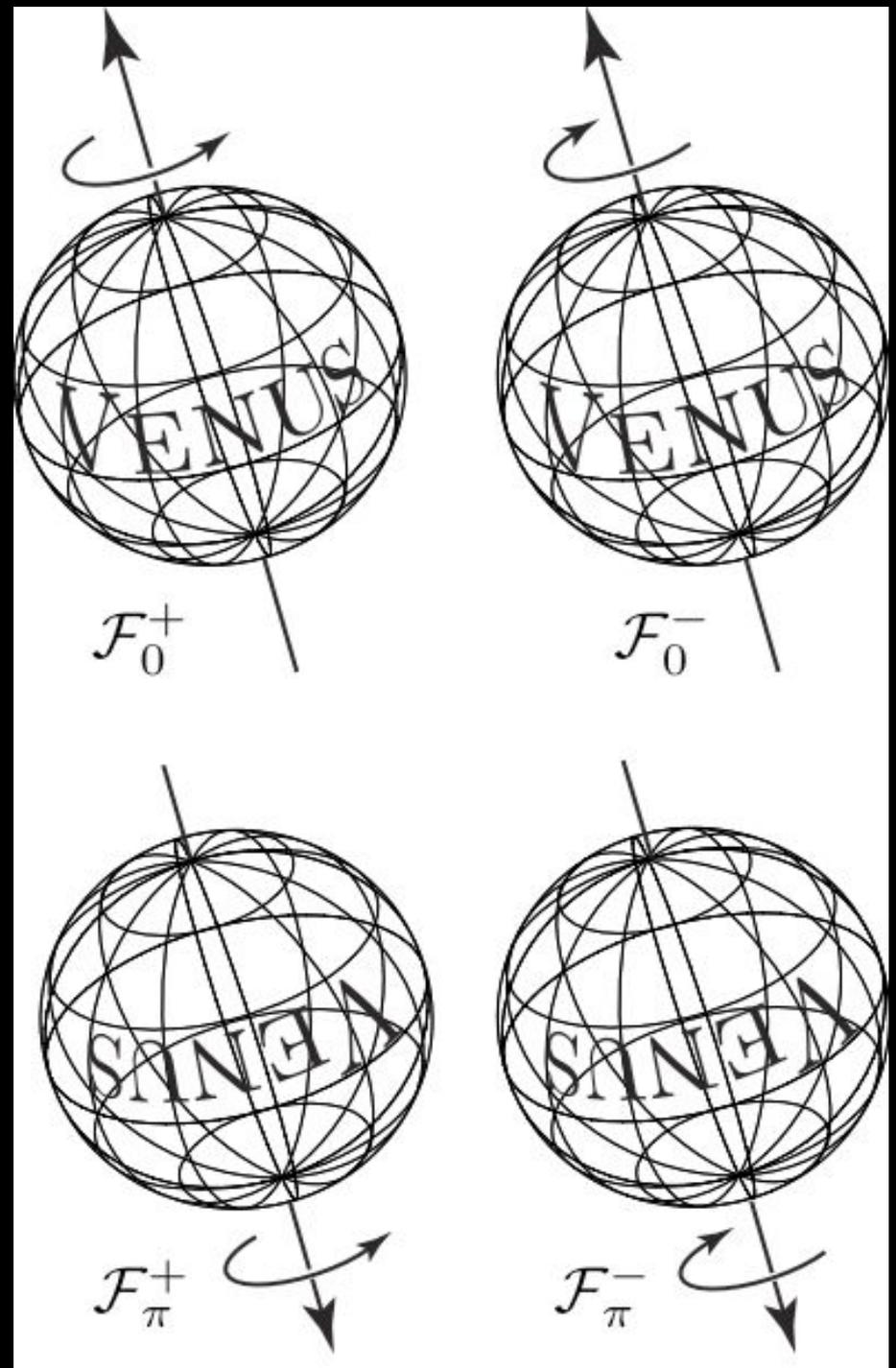
friction de marées
+
marées atmosphériques



Correia & Laskar, Icarus, 2003

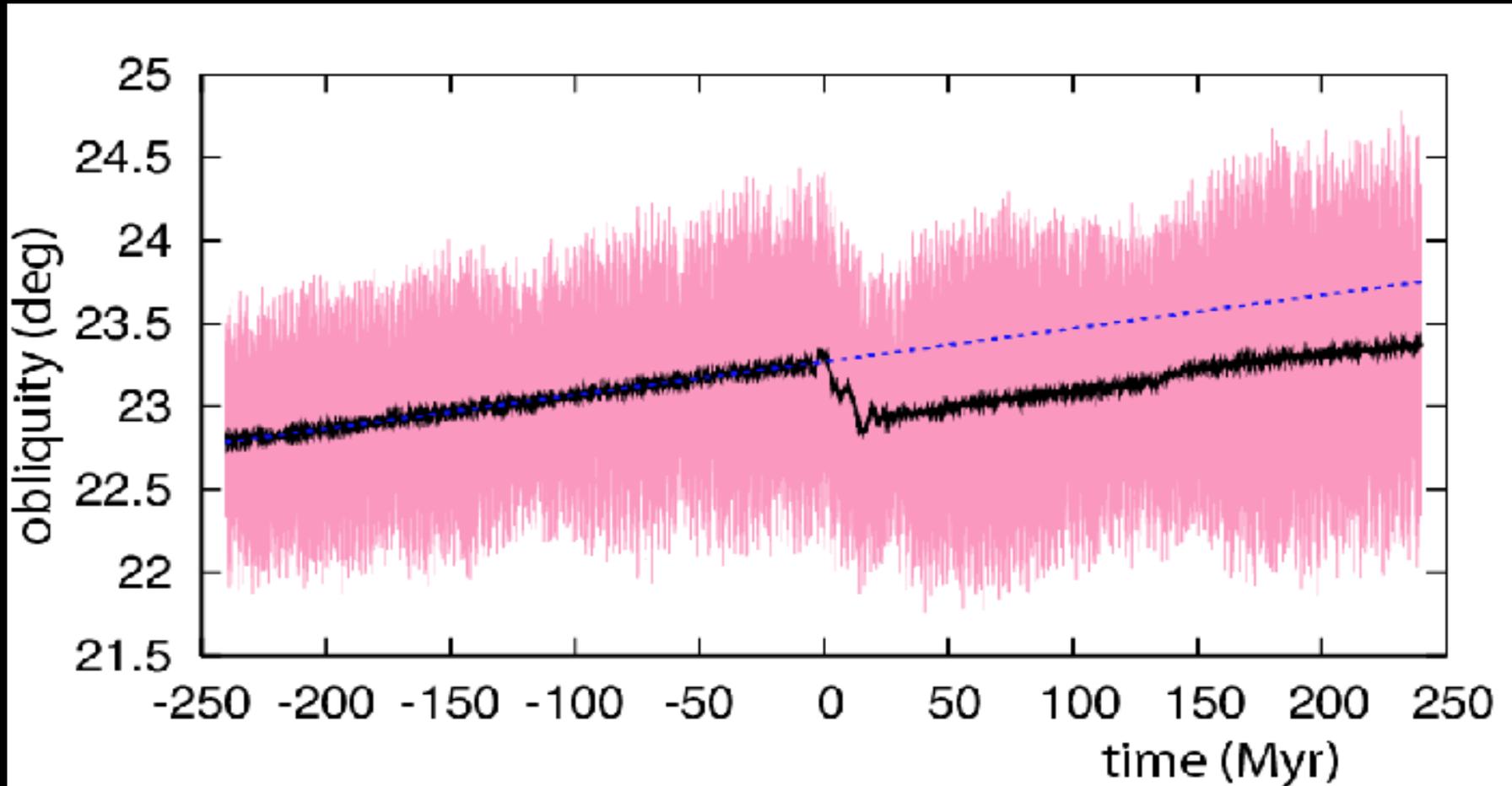
SFP, UDPPC, Lyon, 12 Mars 2008

Les quatre états finaux de Vénus



SFP, UDPPC, Lyon, 12 Mars 2008

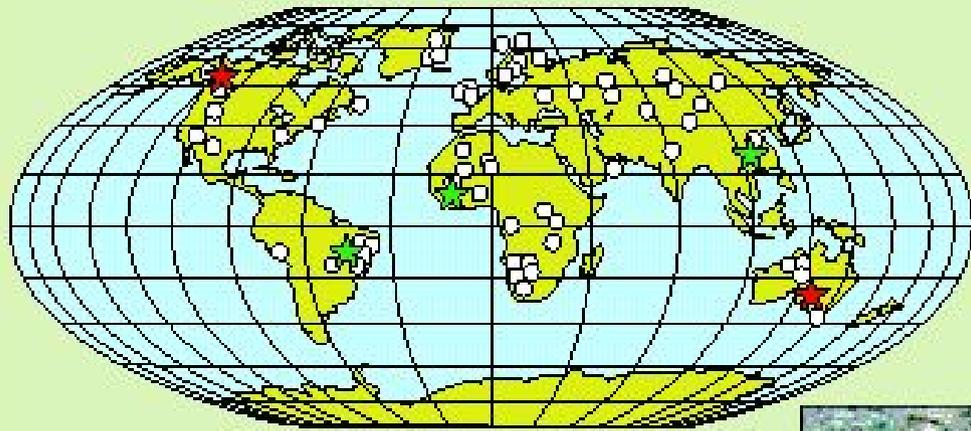
L'axe de la Terre a-t'il basculé à l'échelle des temps géologiques ?



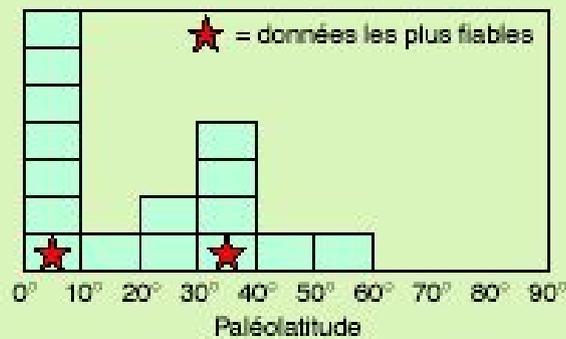
SFP, UDPPC, Lyon, 12 Mars 2008

Laskar et al., A&A, 2004.

Les glaciations du Néoprotérozoïque (500-900 Ma)

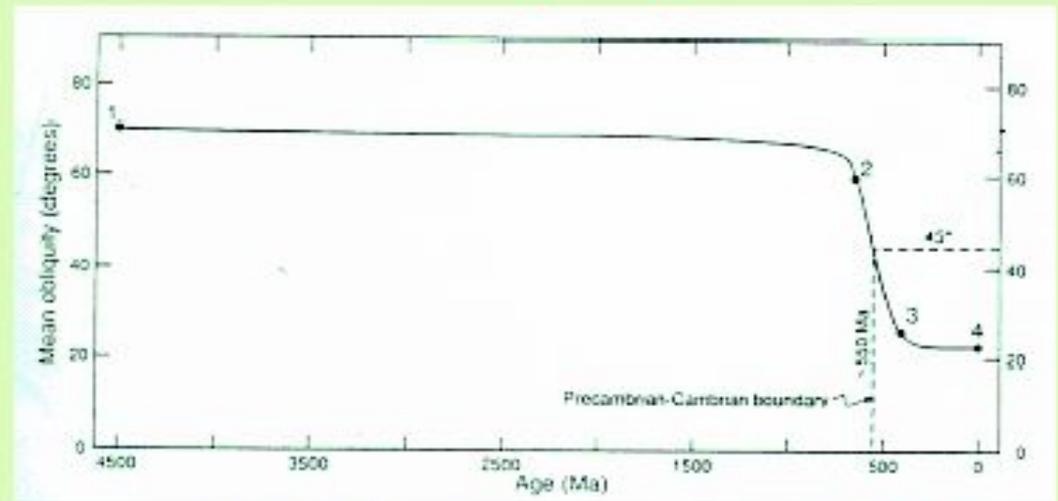


Dépôts glaciogéniques néoprotérozoïques
(○) d'après Evans, 2000
(★) ECLIPSE



Les principaux mécanismes proposés

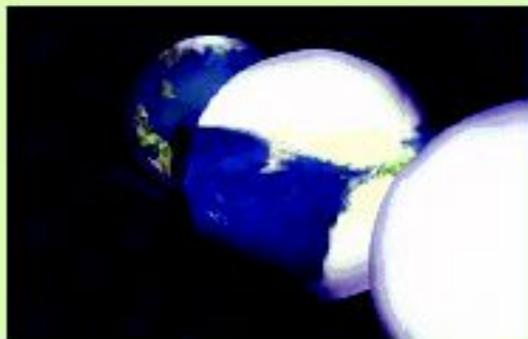
Scénario de haute obliquité
de G.E. Williams (1975, 1993)



Quel mécanisme dissipatif pour faire revenir l'obliquité terrestre à 23.3° ?

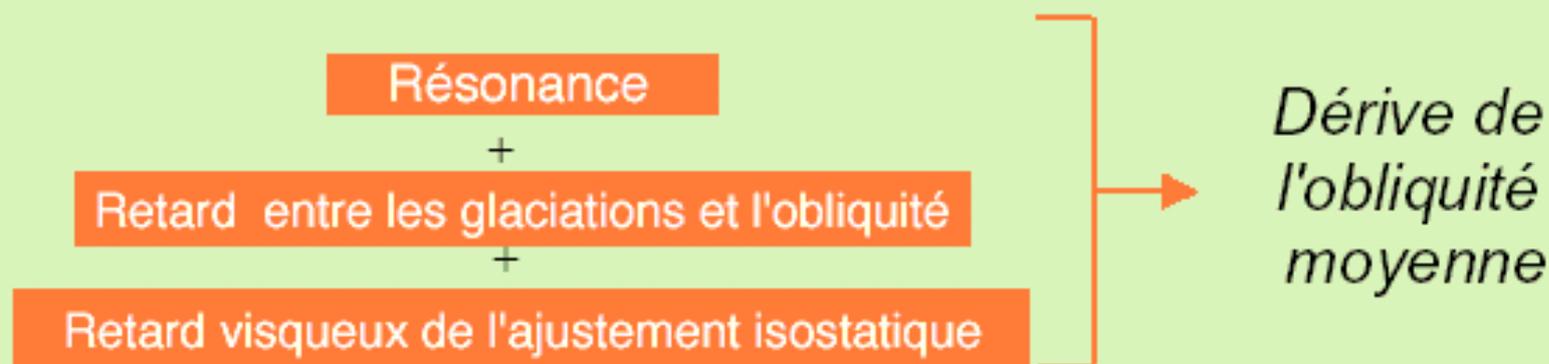
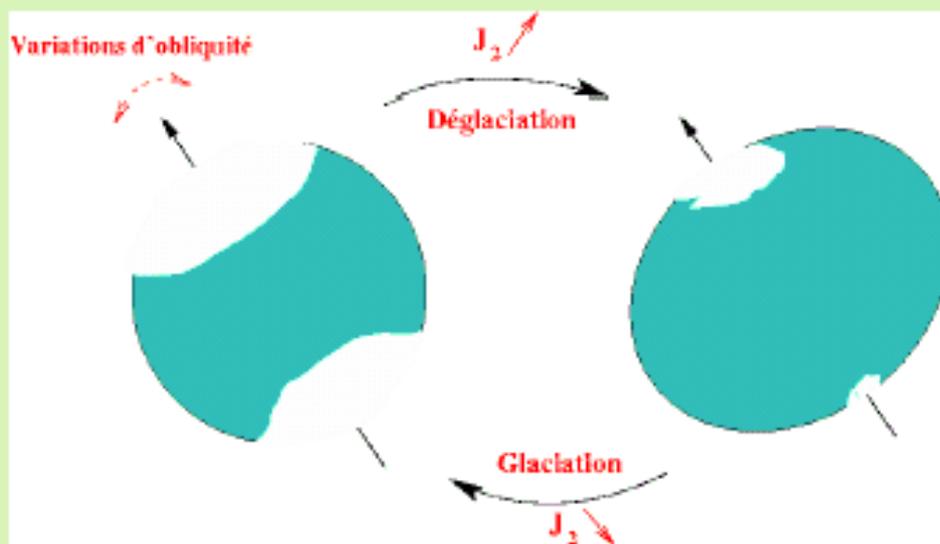
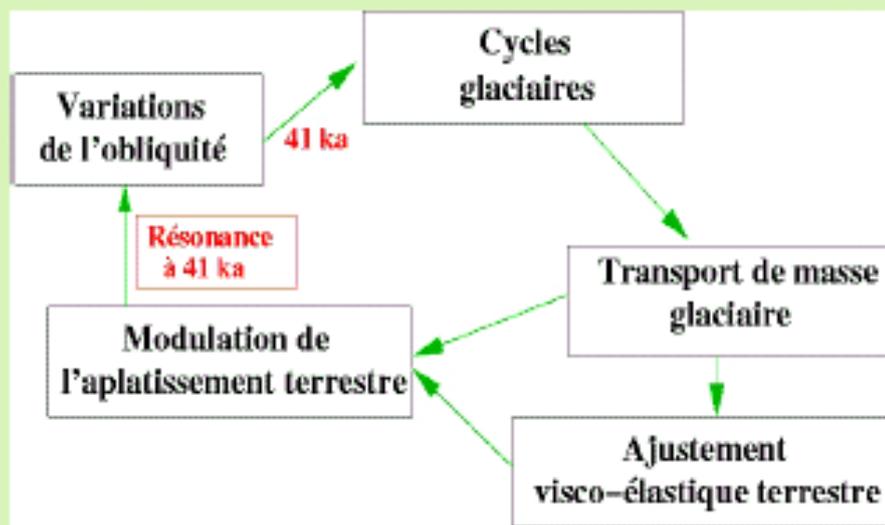
→ Friction noyau-manteau (G. Williams)

→ Friction climatique (D.M. Williams *et al.*, 1998)



Snowball Earth
(Kirschvink, 1992; Hoffman *et al.*, 1998)

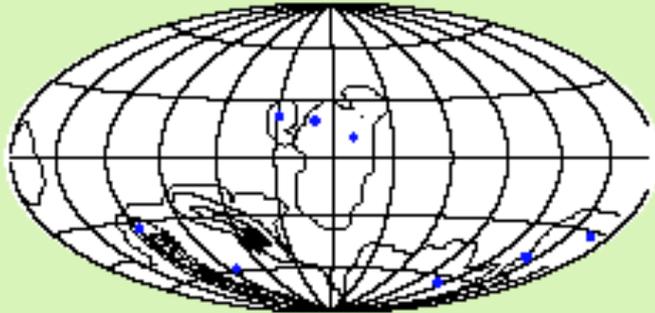
Friction climatique: mécanisme



Néoprotérozoïque (~ 550-950 Ma)

Varangien (~580-630 Ma)

580 Ma



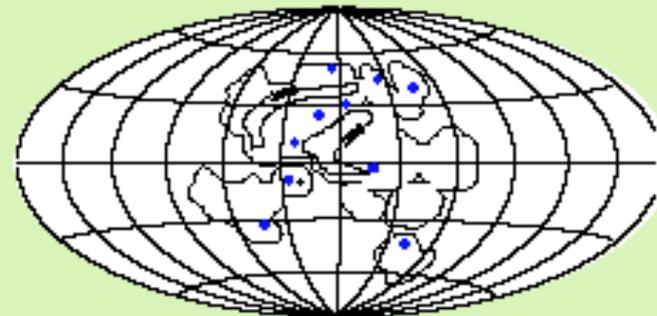
$\Delta J_2/J_2$ maximum : ~ 2 %



variations d'obliquité :
< 2° en 50 Ma

Sturtien (~ 700-750 Ma)

750 Ma



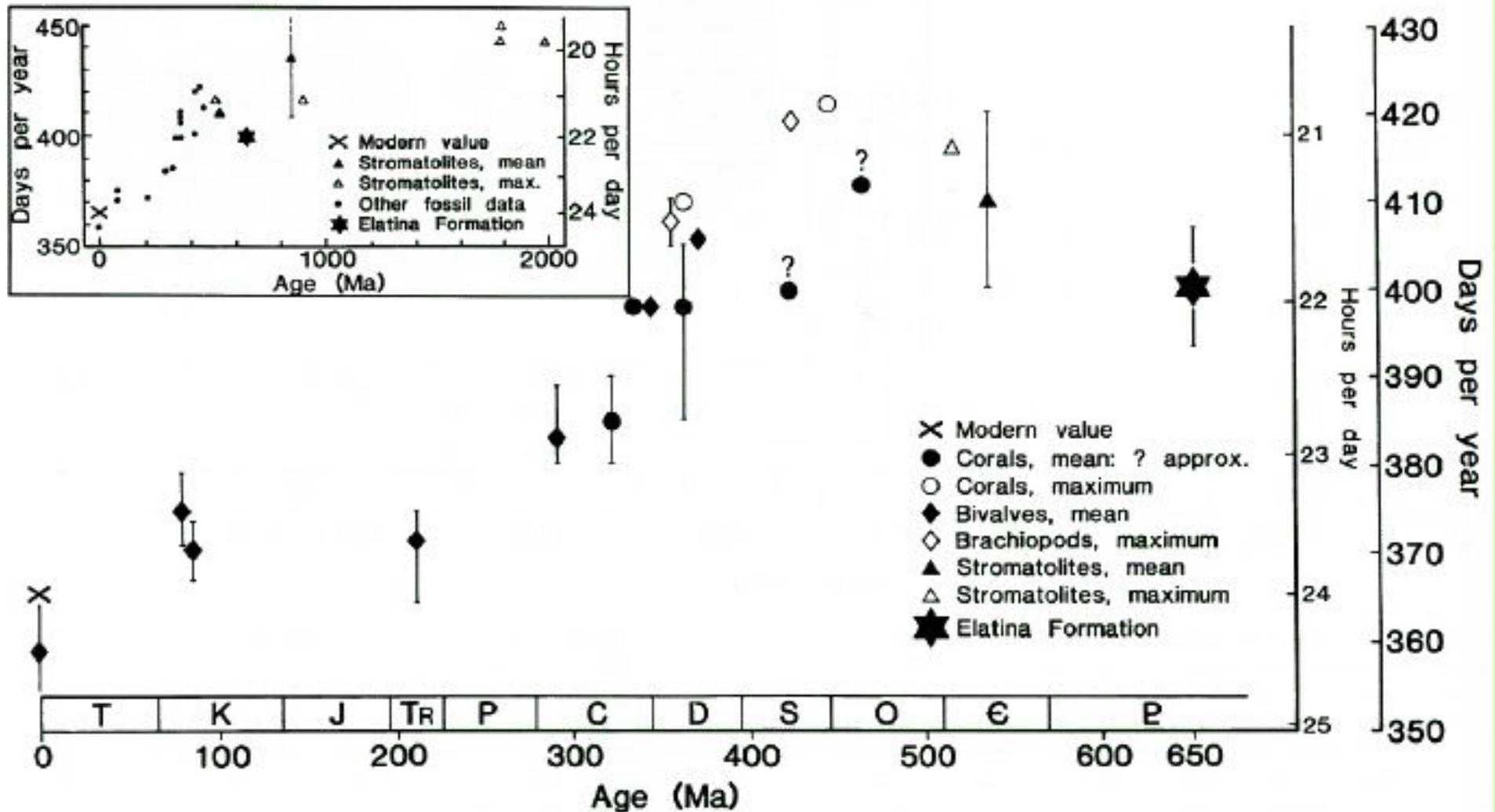
Pas de données ???? ?



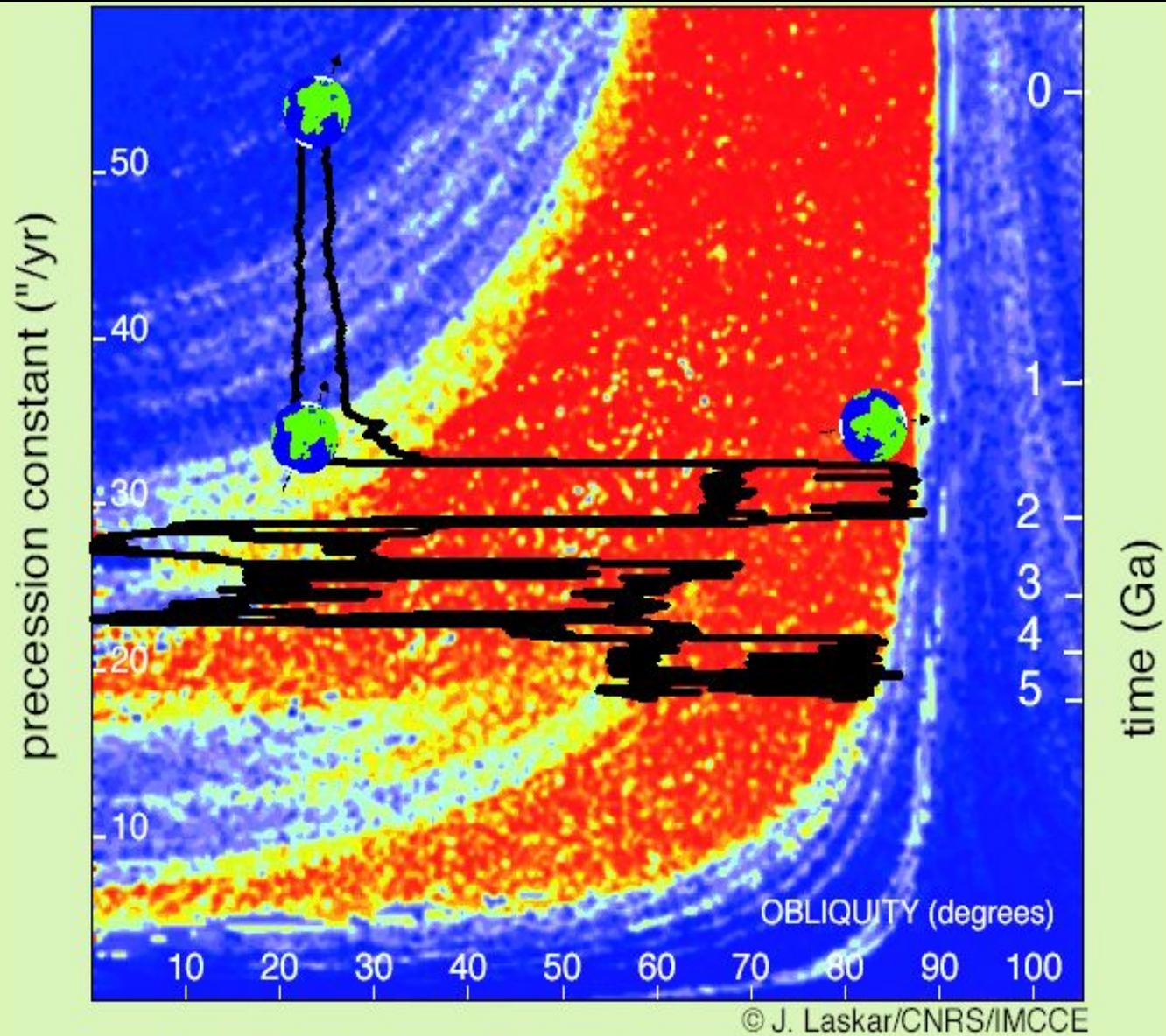
Pas d'effet :
glaces équatoriales.

l'insolation est dominée
par la précession.

observations géologiques

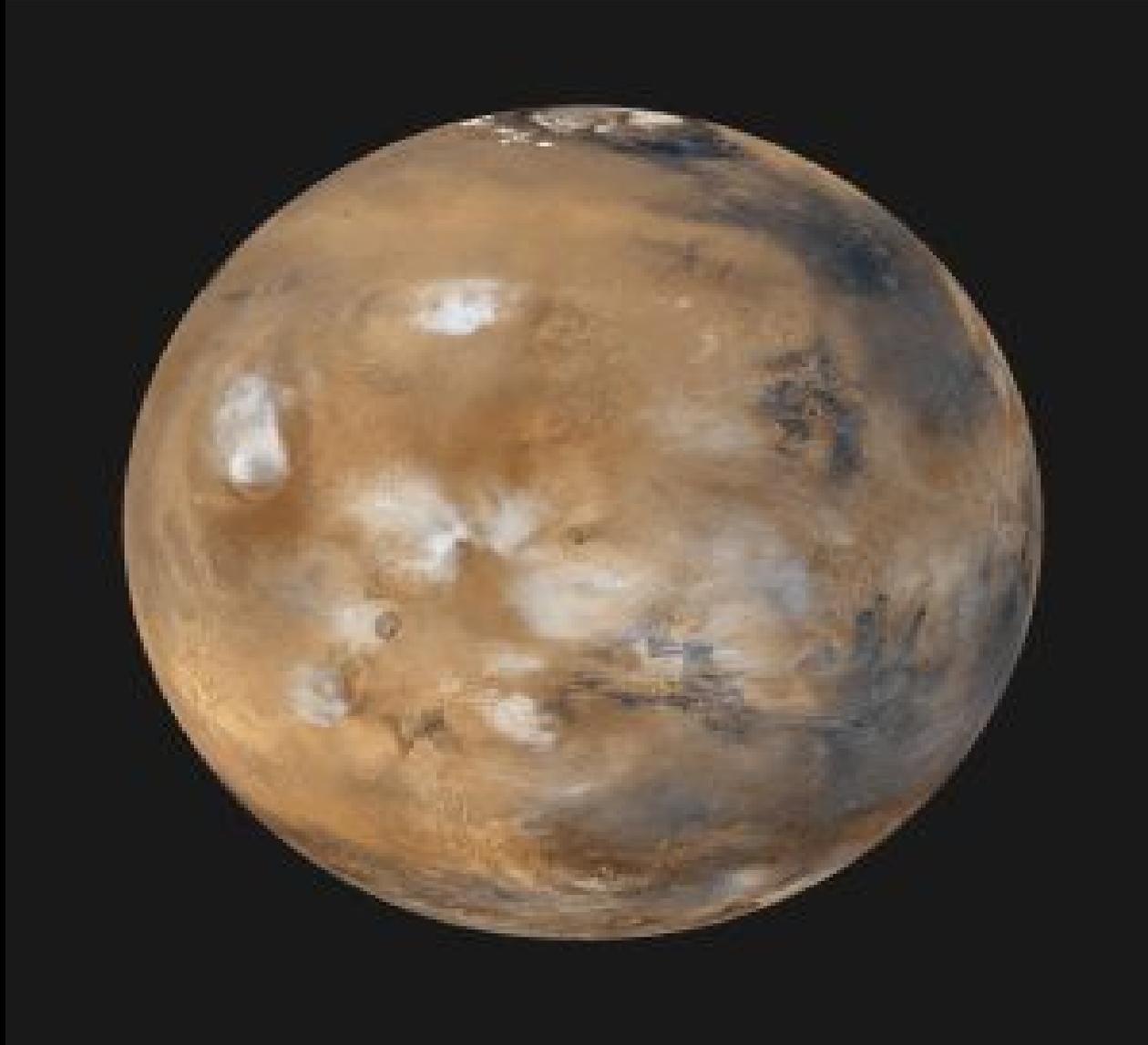


Dans le futur....



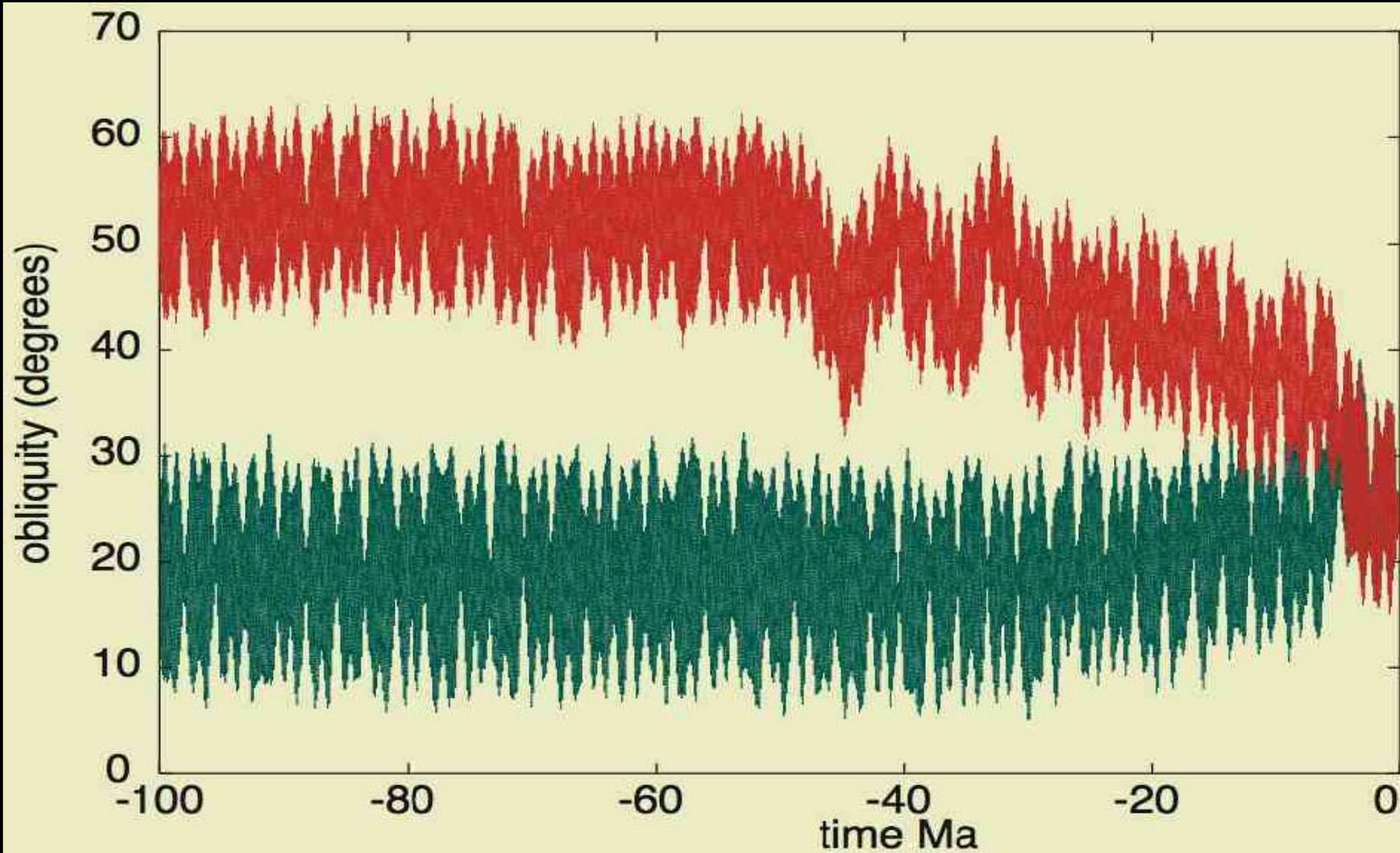
Laskar & Robutel, 1993, Laskar, 1993, Néron de Surgy and Laskar, 1997

L'obliquité chaotique de Mars: implications climatiques....



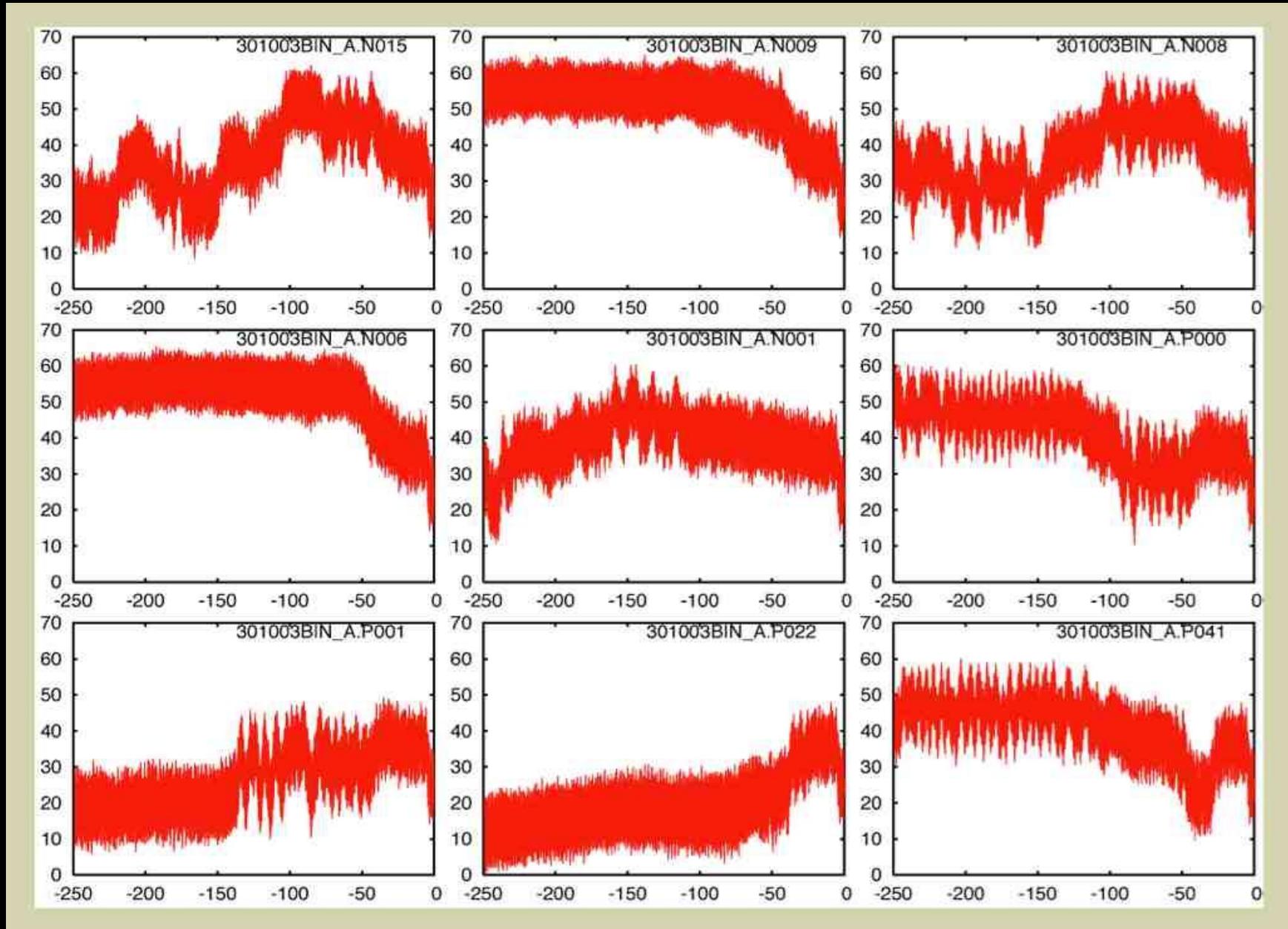
SFP, UDPPC, Lyon, 12 Mars 2008

Deux solutions très proches sur 100 Millions d'années....



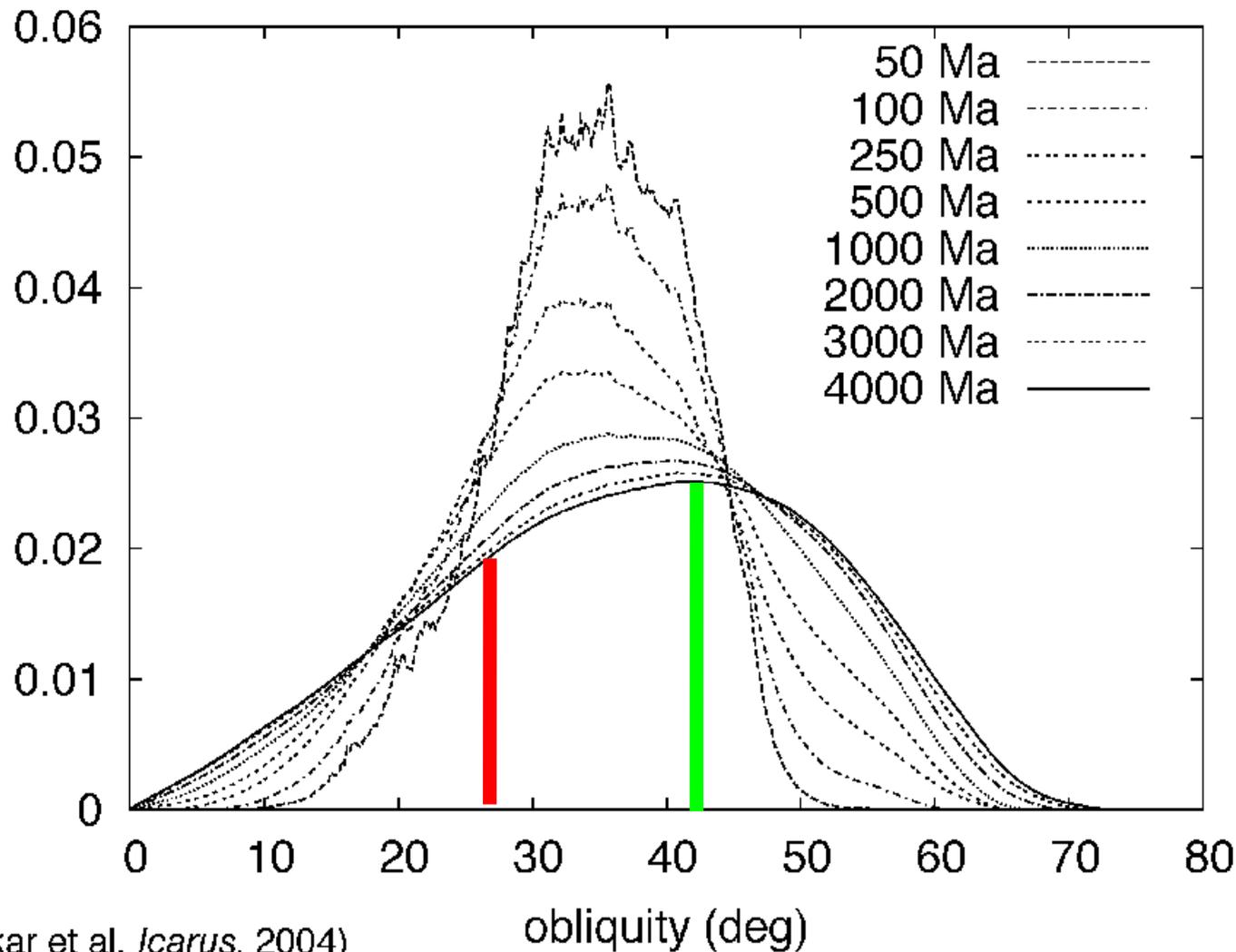
(Laskar & Robutel, *Nature*, 1993, Laskar et al, *Icarus*, 2004)

Neufs solutions très proches sur 250 Millions d'années....



Dix mille solutions très proches sur 4 Milliards d'années....

10 000 obliquity solutions

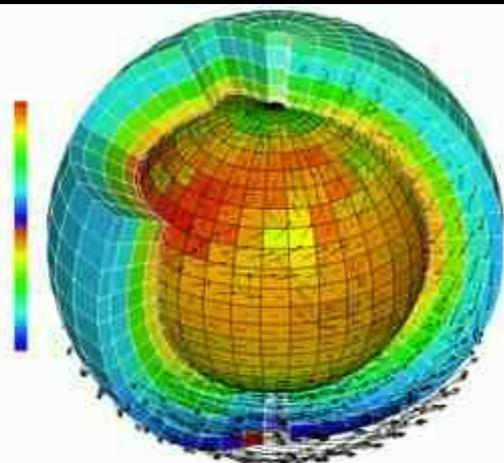


(Laskar et al, *Icarus*, 2004)

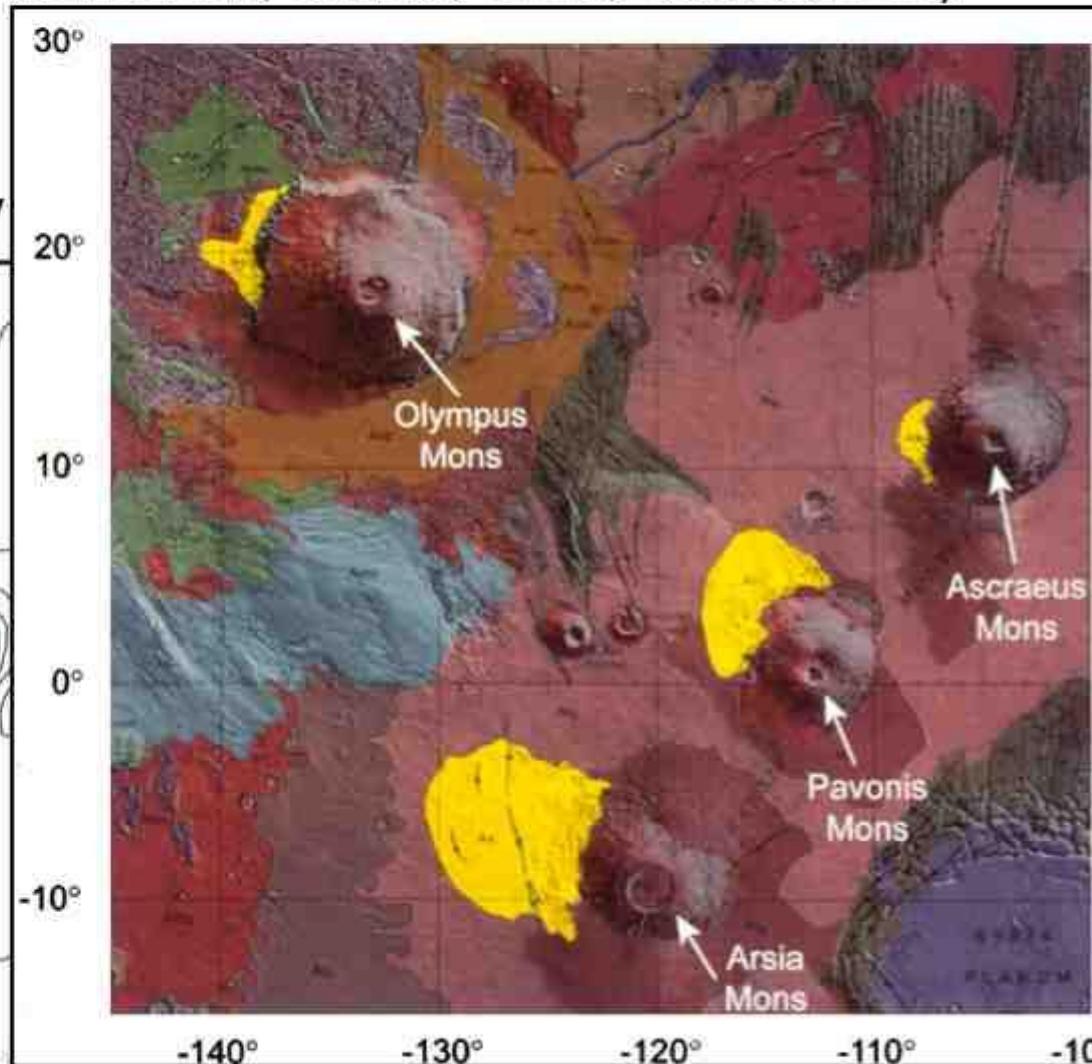
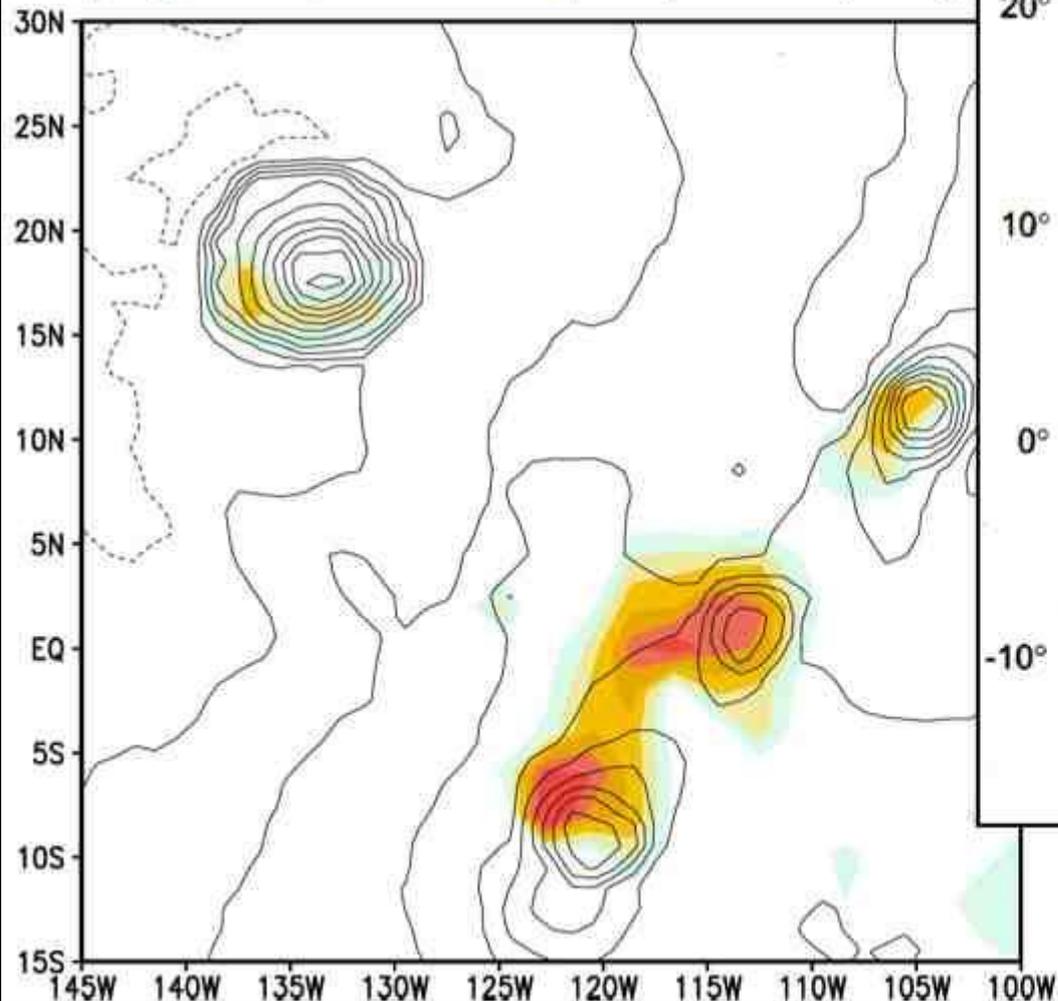
— Présent : 25.2 °
— Plus probable : 41.8 °

Modélisation des périodes glaciaires sur Mars avec le GCM du LMD

(Levrard, Forget, Montmessin, Laskar, *Nature*, 2004
Forget, Haberle, Montmessin, Levrard, Head, *Science*, 2006)

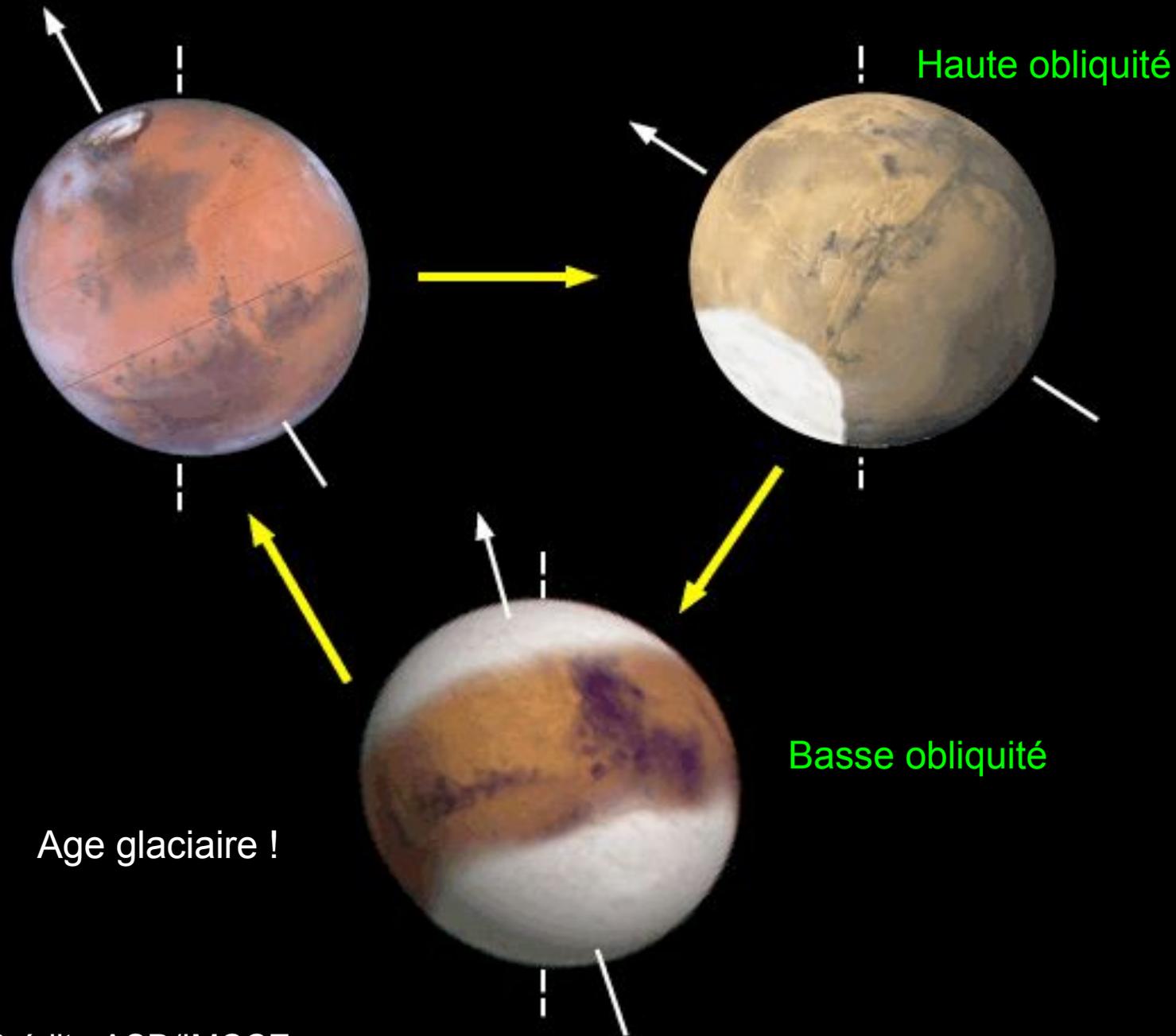


Obliquity = 45° , eccentricity = 0, Dust Opacity



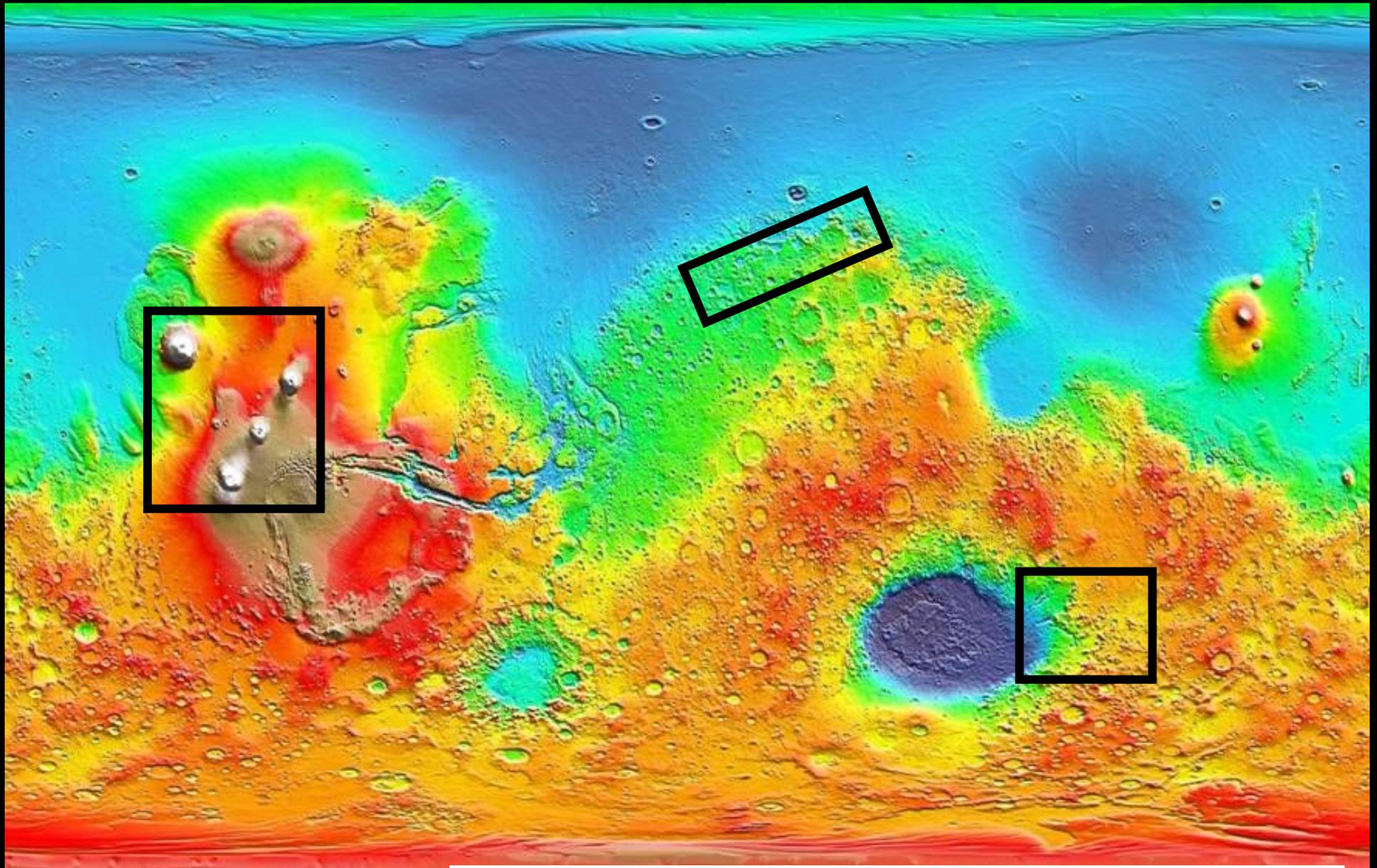
Head et al. 2003, Shean et al. 2005,
Head et al. 2005 Lucchitta 1981

Cycles glaciaires martiens

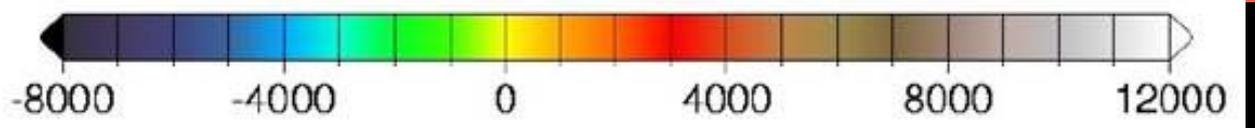


Crédit: ASD/IMCCE

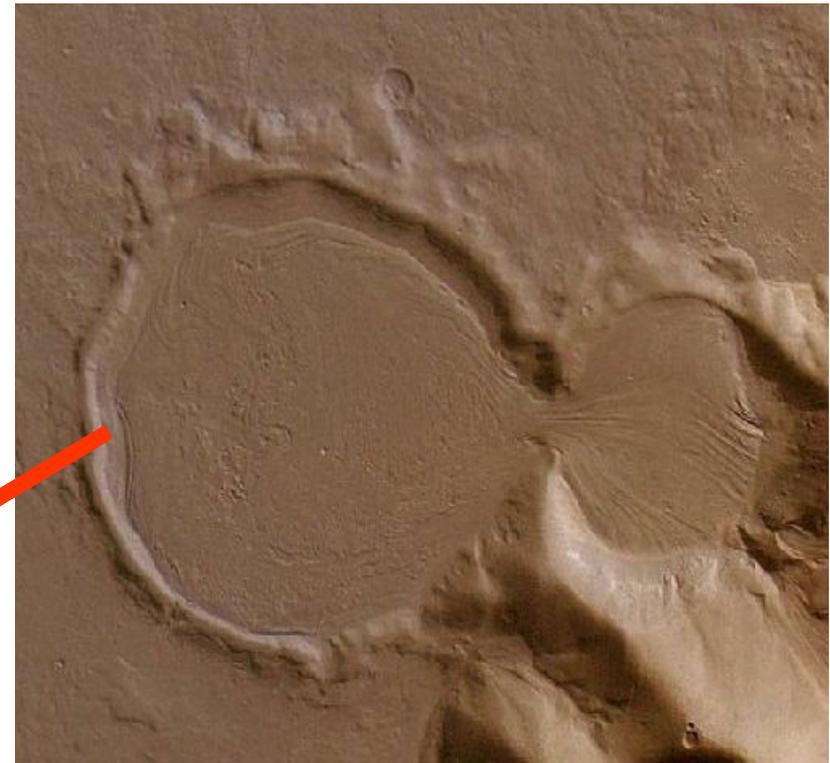
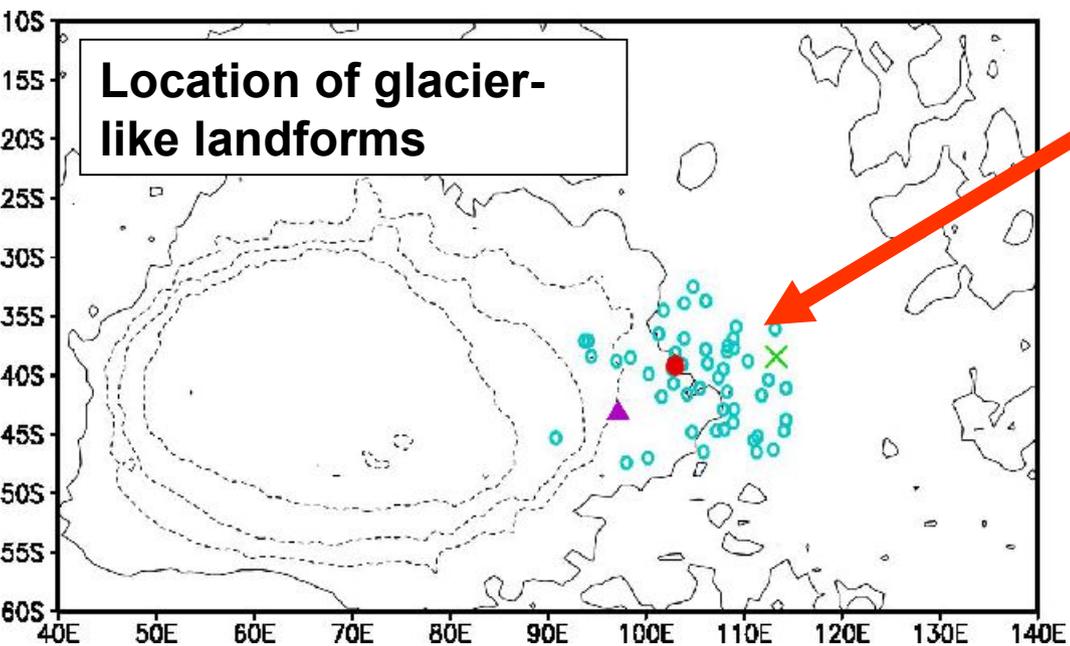
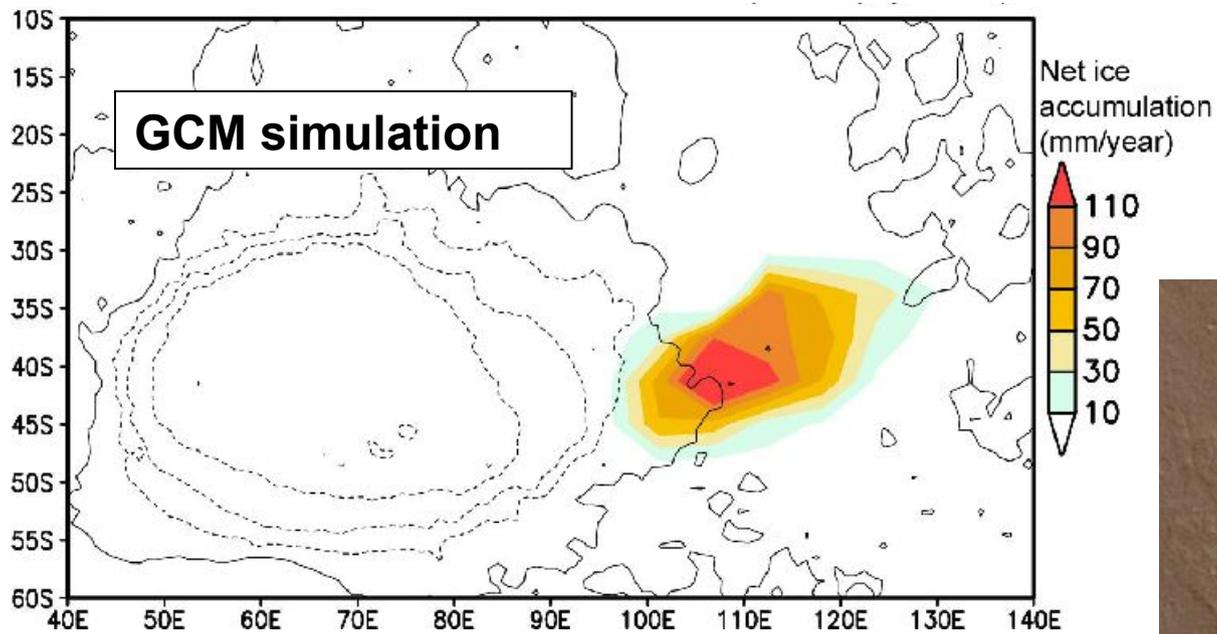
Levrard *et al.*, Nature, 2004



Topographie (m)



SFP, UDPPC, Lyon, 12 Mars 2008

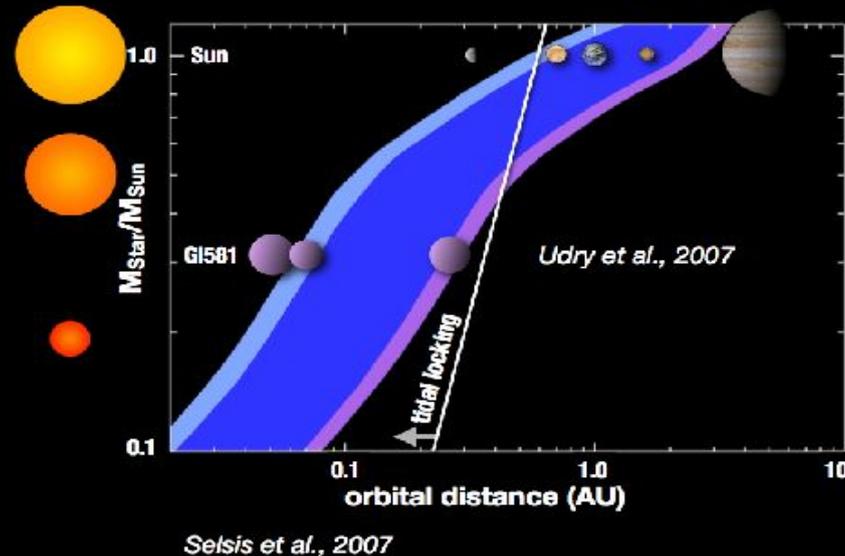


*Head et al., Nature, 2005
Caméra HRSC de Mars Express*

En cours...

Rotation des planètes extra-solaires

- Système Gliese 581 avec des planètes habitables !

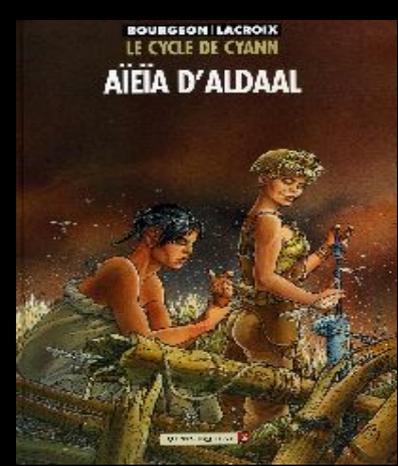
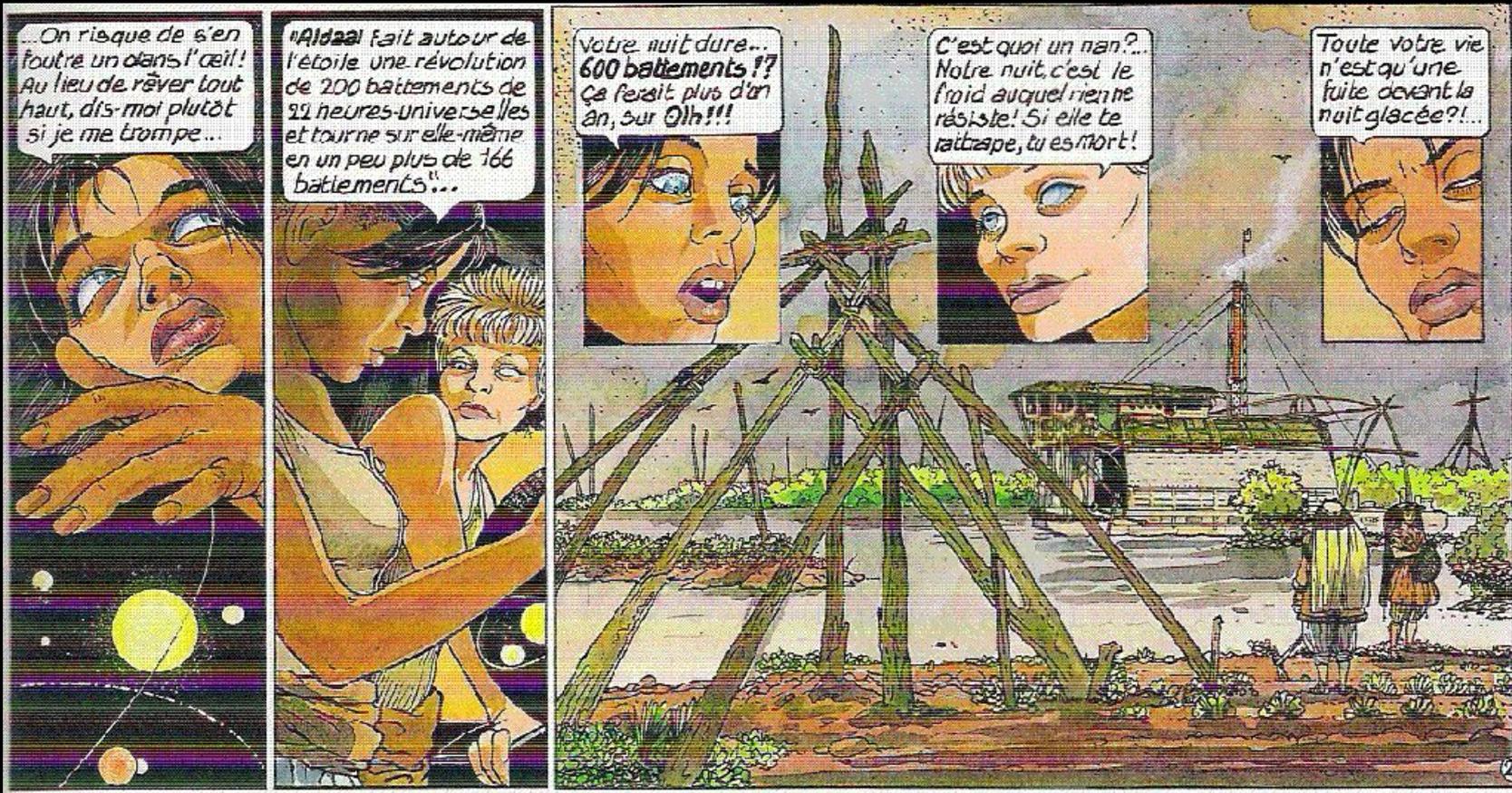


Rotation des planètes telluriques

- Modélisation affinée des effets dissipatifs et de leur influence à long terme

Role du spin dans les paléoclimats

- Ephémérides terrestres hautes précisions pour les géologues et les paléoclimatologues
- Contraindre l'obliquité chaotique de Mars dans le passé à partir des observations géologiques et de leurs datations éventuelles.

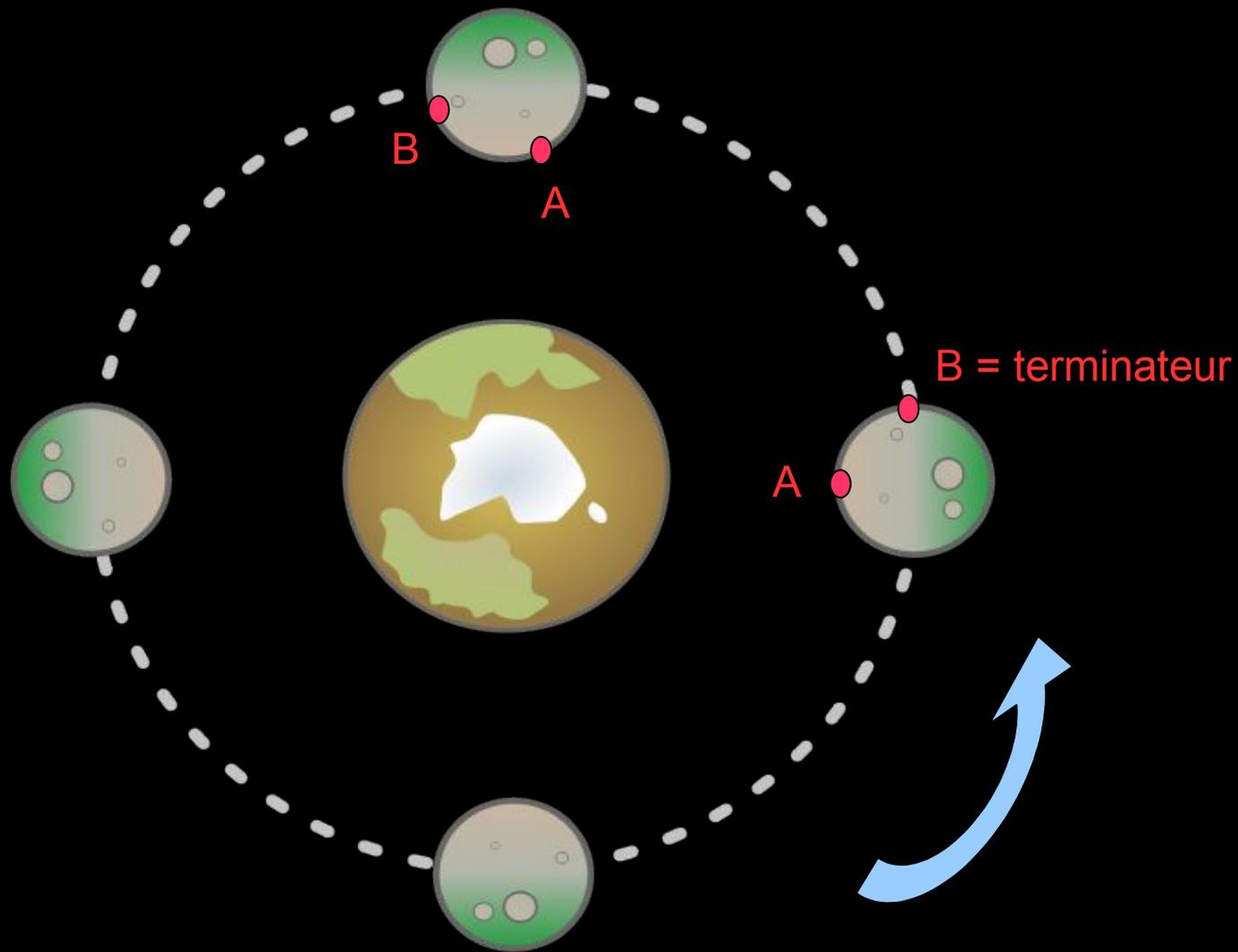


Estimation de la durée de la nuit : 488 battements et non 600 !

Estimation possible de l'excentricité:

$$\omega_{eq.} \sim (1 + 6e^2)n$$

soit $e \sim 0.18$



- x Les zones de jour et de nuit se décalent sans arrêt
- x Transitions climatique intenses entre ces zones

Conditions peu favorables à l'habitabilité !