



# **LES EFFETS DE MAREES** **dans le système solaire**

## **SOMMAIRE**

### **I - Pourquoi des effets de marées ?**

### **II - Les effets de marées sur la Terre**

- a) Les marées océaniques
- b) Les marées terrestres

### **III - Les effets de marées sur le couple Terre - Lune**

- a) Freinage de la rotation de la Terre
- b) Eloignement de la Lune
- c) Rotation synchrone de la Lune

### **IV - Les rotations synchrones dans le système solaire**

- a) Les satellites naturels des planètes
- b) 2 cas particuliers : Phobos et Triton
- c) Le couple Pluton - Charon
- d) Mercure
- e) Une énigme : Vénus

### **V - Les révolutions synchrones dans le système solaire**

- a) Les satellites des planètes géantes
- b) Le couple Neptune - Pluton

### **VI - Autres conséquences des effets de marées**

- a) Io
- b) Europe
- c) Hypérion
- d) Triton

### **VII - Les effets de marées dans l'univers**

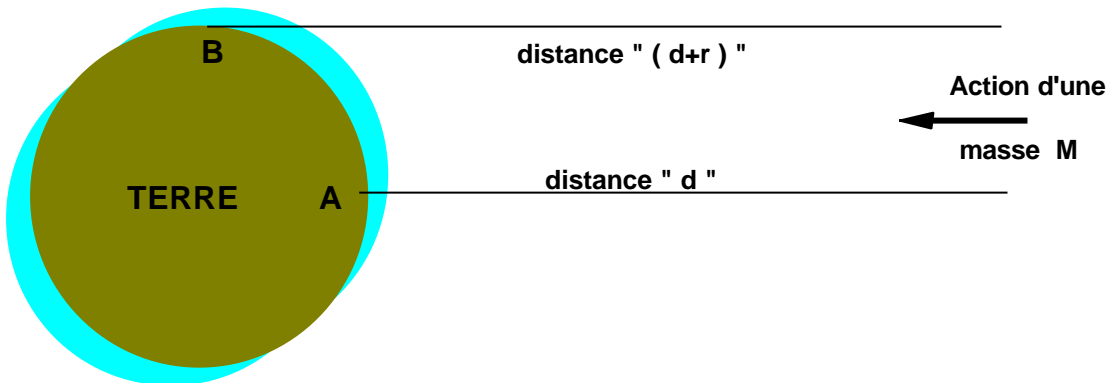
## I°) Pourquoi des effets de marées.

La 4<sup>ème</sup> loi de la gravitation universelle, décrite par Newton en 1687, définit que les corps s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leurs masses (M & m) et inversement proportionnelle au carré de la distance ( d ) qui les sépare :

$$F = G.M.m / d^2$$

(avec la constante gravitationnelle  $G = 6,67 \times 10^{-11}$ , si M & m en Kg, d en mètres et F en Newton ).

L'effet de marée provient du fait que les corps ne sont pas des points, mais des sphères et cette force n'est donc pas la même en tous points de ces corps.



*Sur ce schéma, nous voyons bien que B est plus distant de M que A.*

Nous allons donc calculer la force d'attraction de M sur B, puis sur A, et c'est la différence de ces 2 forces qui représente la force des marées .

$$\text{En A , on a } F_a = \frac{G.M.m}{d^2} \quad ; \quad \text{en B , on a } F_b = \frac{G.M.m}{(d+r)^2}$$

$$F_a - F_b = (G.M.m) \left( \frac{1}{d^2} - \frac{1}{(d+r)^2} \right) = (G.M.m) \cdot \left[ \frac{(d+r)^2 - d^2}{d^2 \cdot (d+r)^2} \right] =$$

$$F_a - F_b = \frac{(G.M.m) (d^2 + r^2 + 2d.r - d^2)}{(d^4 + 2d^3.r + d^2.r^2)} = \frac{(G.M.m) (r^2 + 2d.r)}{(d^4 + 2d^3.r + d^2.r^2)}$$

Or " r " est très petit devant " d ", donc " r<sup>2</sup> " est négligeable devant " 2d.r ".  
De même , au dénominateur, " 2d<sup>3</sup>.r " et " d<sup>2</sup>.r<sup>2</sup> " sont négligeables devant " d<sup>4</sup> ".

$$\text{Donc } F_a - F_b = \frac{(2 \cdot G.M.m \cdot d.r)}{d^4} = \frac{2.G.M.m.r}{d^3}$$

On voit que si la gravitation est inversement proportionnelle au carré de la distance, les forces de marées sont inversement proportionnelles au cube de la distance.

Les conséquences des effets de marées sont :

- Des déformations sur les éléments fluides
- Des frottements entraînant des échauffements et des modifications des mouvements de rotations et de révolutions .

## **II°) Les effets de marées sur la Terre**

### **a) Les marées océaniques**

Le Soleil est 25 millions de fois plus massif que la Lune, mais 400 fois plus éloigné de la Terre, donc :

L'attraction du Soleil est  $\frac{25\,000\,000}{400 \times 400} = 150$  fois plus forte que la Lune .

Par contre la Lune agit  $\frac{400 \times 400 \times 400}{25\,000\,000} = 2,5$  fois plus sur les marées que le Soleil.

C'est pourquoi les effets de marées sur la Terre sont créés en majorité par la Lune alors que l'attraction du Soleil est la plus forte.

Si la Lune et le Soleil étaient les seuls responsables des effets de marées, il n'y aurait qu'une seule marée par jour .

Mais la Terre tourne, et dans sa rotation, donne aux océans une forme ellipsoïde qui crée 2 marées aux antipodes.

Chaque jour, on observe donc 2 marées décalées de 12 h 25 mn du fait de l'avance journalière de la Lune.

De plus, comme l'indique le schéma de la page précédente, ces marées sont décalées par rapport à la Lune du fait de la viscosité des éléments fluides en mouvement (océans et magma interne).

En ce qui concerne les océans, si la cause du phénomène est très simple, les marées se présentent de façon très complexes.

La hauteur de la mer (le coefficient), étudiée dans une branche de la physique appelée l'hydrodynamique, dépend de nombreux facteurs :

- En s'ajoutant ou se retranchant à l'action de la Lune, le Soleil contribue à modifier les coefficients de marées.
- La position de ces 2 astres par rapport à l'équateur est également déterminant.
- Les marées agissent sur des masses d'eau importantes telles que les océans.

Les mers intérieures (méditerranée, mer noire etc...) sont peu concernées. Mais si la Terre était entièrement recouverte d'eau, les marées n'excèderaient pas un mètre.

- Par contre, ces marées sont importantes sur les côtes des océans (dans les golfes, les baies ou les estuaires) par l'effet de baignoire appelé le marnage, différence de hauteur d'eau entre la haute et la basse mer. Il peut atteindre 15m au Mont-St-Michel et 17m dans la baie du Fundy (Canada).
- Il faut ajouter les phénomènes de résonance, dépendant de la forme et de la taille des golfes, qui augmentent les coefficients de marées.
- Dans les estuaires, l'onde de marée peut même remonter les fleuves sous la forme du mascaret.
- L'énergie des forces de marées est d'ailleurs utilisée pour créer de l'électricité comme dans l'usine marémotrice sur l'estuaire de la Rance, en Bretagne.

### **b) Les marées terrestres**

Si les marées océaniques sont très spectaculaires, car visibles et agissant sur des éléments liquides de faible cohésion, la partie solide du globe terrestre n'est pas complètement rigide et indéformable.

Ces déformations sont faibles et ont donc été découvertes récemment, mais les masses mises en mouvement et donc les énergies sont importantes.

Sous l'effet de la marée, la croûte, le manteau et même le noyau subissent des déformations pouvant atteindre le mètre.

## **III°) Les effets de marées sur le couple Terre-Lune**

### **a) Freinage de la rotation de la Terre**

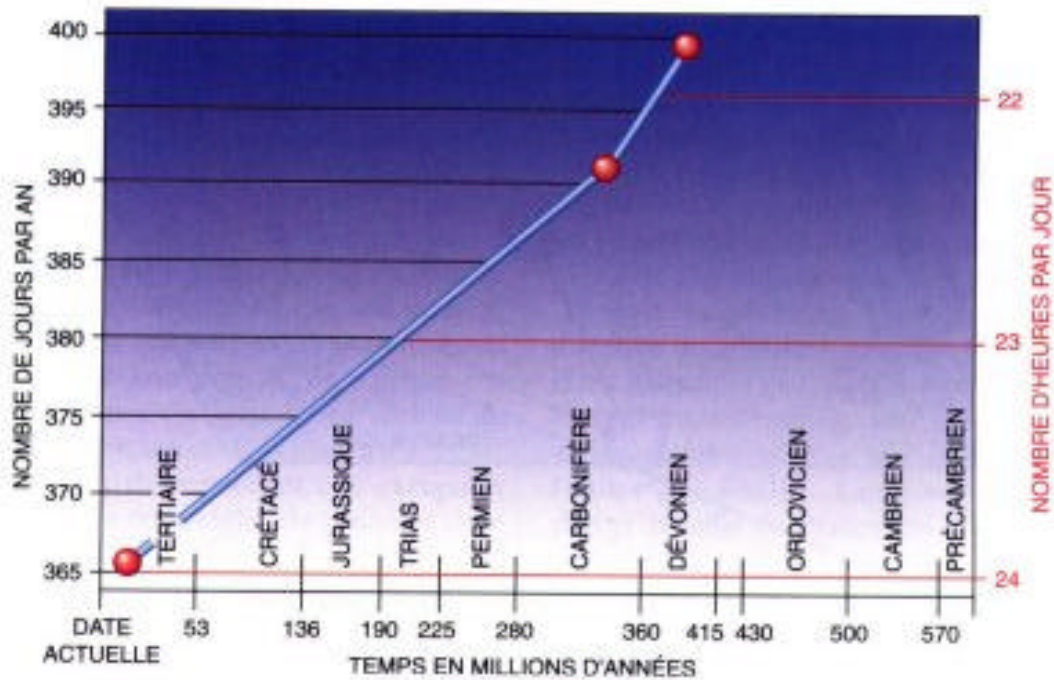
En examinant les dates des éclipses de Lune dans l'antiquité, et les observations faites au XVII<sup>e</sup> siècle, l'astronome anglais Edmond Halley émit, en 1695, l'idée que le mouvement de révolution de la Lune autour de la Terre ne devait pas être uniforme.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, Emmanuel Kant imagina que les marées devaient produire des frottements internes et donc dissiper de l'énergie.

Il en concluait que la Terre devait être progressivement freinée dans son mouvement de rotation sur elle-même.

La période de révolution de la Terre autour du Soleil étant constante (la distance Terre-Soleil ne se modifiant que très peu), il en découlerait que le nombre de jours dans l'année devait être plus grand.

Certaines études géologiques, ainsi que des études sur la croissance des coraux ont confirmé qu'il y a 400 millions d'années, l'année comptait 400 jours de 22 heures.



**LA DURÉE DU JOUR** a changé au cours des âges : cette variation traduit le ralentissement de la période de rotation de la Terre dû aux effets des marées lunaires. La durée du jour au Carbonifère (22,2 heures) et au Dévonien (21,9 heures) a été mesurée par la croissance annuelle des coraux. Les jours étaient alors plus courts, mais la durée de l'année reste constante, car les interactions de marées entre la Terre et le Soleil sont trop faibles pour modifier l'année.

## b) Eloignement de la Lune

Simultanément au freinage de la rotation de la Terre, la distance Terre-Lune augmente. Pourquoi ?

Deux lois régissent tous les phénomènes mécaniques :

- la loi de la conservation de l'énergie.
- la loi de conservation du moment cinétique.

Or, le freinage de la rotation de la Terre dû aux marées conduit à une diminution du moment cinétique de rotation de la Terre.

Le moment cinétique total du système Terre-Lune devant se conserver, il s'en suit une augmentation du moment cinétique associé au mouvement orbital de la Lune.

En d'autres termes, la Lune s'éloigne de la Terre de 3 cm environ par an. Ce qui fait d'ailleurs dire que dans l'avenir, on ne verra plus d'éclipses totales de Soleil.

## c) Rotation synchrone de la Lune

Le freinage dû aux marées s'arrête lorsque la rotation a atteint un état d'équilibre stable, tel que la période de révolution orbitale est égale à la période de rotation.

On parle alors de rotation synchrone. La planète ou le satellite présentent alors toujours la même face au corps qui a créé ces effets de marées.

Si la Lune a contribué à ralentir la Terre, plus encore, la Terre a ralenti la Lune.

Ce freinage a été extrêmement plus efficace, puisqu'on estime à quelques millions d'années, le temps nécessaire à la Lune pour acquérir sa rotation synchrone.

## **IV°) Les rotations synchrones dans le système solaire**

### **a) Les satellites naturels des planètes**

Les effets de marées sont d'autant plus importantes que les masses sont importantes. Le rapport des diamètres entre les planètes et leurs satellites est généralement  $>10$ . Aussi, ce sont surtout les satellites naturels qui possèdent des périodes de rotation synchrones.

Un grande majorité des satellites du système solaire se comporte donc comme la Lune et présente des rotations synchrones :

- Phobos et Déimos autour de Mars.
- Io , Europe , Ganymède et Callisto ( les 4 satellites galiléens ) autour de Jupiter. Amalthée, plus proche de Jupiter que Io, de forme ellipsoïdale, présente toujours son grand axe en direction de la planète.
- Japet autour de Saturne. On pense la même chose pour Titan, mais son atmosphère nous empêche d'en être sûr. La sonde Cassini-Huyghens nous en dira peut-être plus en 2004.
- Miranda et Ariel autour d'Uranus
- Triton autour de Neptune

### **b) 2 cas particuliers : Phobos et Triton**

Si Phobos, un des 2 satellites naturels de Mars, a une rotation synchrone, il orbite en dessous de l'orbite géostationnaire de Mars.

En effet, Phobos ( 27 km x 18 km ) est à 9350 km au dessus de la surface de Mars, alors que l'orbite géostationnaire est à 16750 km .

La révolution de Phobos autour de Mars est donc plus rapide que la rotation de la planète. Dans ce cas, l'onde de marée sur Mars est en avance sur la rotation de Mars et son moment cinétique augmente.

Ainsi, le moment cinétique du mouvement orbital de Phobos diminue et le satellite se rapproche donc de la planète.

Le phénomène va ainsi s'accélérer jusqu'à l'écrasement du satellite sur Mars dans 30 millions d'années environ.

La révolution de Triton autour de Neptune est rétrograde.

Dans le calcul du moment cinétique du système de Neptune, Triton vient donc en soustraction. Dans ce cas, l'augmentation du moment cinétique orbital total passe par la diminution de celui de Triton.

Triton qui gravite à 355 000 km de Neptune se rapproche donc de la planète, mais les masses et les forces de gravitation mises en jeu sont plus importantes que pour Phobos.

Au fur et à mesure que le satellite (diamètre : 4 000km), se rapproche inexorablement de la planète les effets de marées tiraillent de plus en plus le satellite jusqu'à une limite

appelée “ limite de Roche” en dessous de laquelle les forces de cohésion du satellite ne sont plus suffisantes et le satellite se disloquera.

Les débris s'enfonceront dans Neptune comme la comète Shoemaker-Lévy 9 dans Jupiter. On estime que cet évènement se produira dans 100 millions d'années environ.

### **c) le couple Pluton / Charon**

Dans le cas du couple Pluton /Charon, le rapport de diamètre n'excède pas 3 :

Pluton mesure 2 400 km et Charon 800 km.

Les effets de marées ont ainsi joué dans les 2 sens, et si Charon a une rotation synchrone, il en est de même pour Pluton.

Ainsi, Pluton et Charon se présentent mutuellement la même face, comme s'ils étaient attachés l'un à l'autre avec une corde.

### **d) Mercur**

Si on analyse les périodes de rotation des planètes du système solaire, on s'aperçoit qu'hormis Mercure et Vénus, les autres tournent très vite :

<b>Mercur</b>	<b>Vénus</b>	<b>Terre</b>	<b>mars</b>	<b>Jupiter</b>	<b>Saturne</b>	<b>Uranus</b>	<b>Neptune</b>	<b>Pluton</b>
<b>88j</b>	<b>243j</b>	<b>24h</b>	<b>24h</b>	<b>10h</b>	<b>10h</b>	<b>17h</b>	<b>16h</b>	<b>6j 9h</b>

Mercur et Vénus auraient été considérablement freinées par les effets de marées dû à l'imposant Soleil.

Mais Mercur a trouvé un état stable avant la rotation synchrone de 88 jours correspondant à sa période de révolution.

En effet, Mercur tourne en 59 jours, soit les 2/3 de 88 jours.

En ralentissant progressivement sous les effets de marées, les astres passent par des états intermédiaires stables sous certaines conditions correspondant à des valeurs rationnelles simples ( 1/3 , 1/2 , 2/3 , 3/4.....). A chaque rapport est associé un phénomène de résonance.

Pour se stabiliser au rapport 2/3, Mercur a rempli à 2 conditions :

Une orbite très elliptique (de 49 à 70 millions de kms) et une distribution des masses internes fortement dissymétriques dans le plan équatorial de la planète.

Si une des 2 conditions venait à disparaître, le freinage pourrait reprendre jusqu'à la rotation synchrone.

Ce ballet a pour conséquence des jours mercuriens durant 176 jours terrestres : à la 1<sup>ère</sup> révolution de Mercur autour du Soleil, il fait jour, et à la suivante il fait nuit.

### **e) Une énigme : Vénus**

La période de rotation de Vénus a été le sujet d'un débat très controversé pendant 300 ans, car l'atmosphère qui cache la surface de la planète tourne en 4 jours rétrogrades

soit 60 fois plus vite que la planète. Il aura, en effet, fallu l'envoi de sondes sur Vénus dans les années 60 pour connaître sa période de rotation réelle : 243 jours.

Les jours sur Vénus durent ainsi 117 jours terrestres.

On peut penser que Vénus aurait du atteindre sa rotation synchrone soit 224 jours.

Et pourtant, le freinage semble avoir dépassé cette étape réputée infranchissable, et donne à la planète une rotation rétrograde. Alors, Que s'est-il passé ?

- Dès le début, on a pensé que lors du ralentissement, un objet aurait fait basculer l'axe de rotation de  $180^\circ$ .

Lorsqu'on sait que des études récentes ont montré que c'est la Lune qui aurait stabilisé l'axe de la Terre, on peut se demander comment Vénus, qui n'a pas de satellite naturel a pu stabiliser cet axe à  $3^\circ 4'$  de l'écliptique après un tel choc.

Mais la rotation également rétrograde de l'atmosphère ne fait qu'épaissir le mystère.

- Puis l'idée est venue que, comme pour la Terre, un autre astre, ou un phénomène auraient pu contrebalancer l'effet du Soleil et continuer le freinage de la planète.

Il est ainsi venu à l'esprit que 243j correspondait au  $\frac{2}{3}$  de 365j (période de révolution de la Terre).

Mais cette idée a été vite abandonnée pour 2 raisons :

D'abord , il paraissait invraisemblable, compte tenu des distances et des masses mises en jeu, que la Terre ait pu prendre le pas sur le Soleil.

Puis des mesures plus précises ont montré que cette pseudo-synchronisation n'était qu'apparente puisqu'elle devrait être de 243,16j alors qu'elle n'est que de 243,01j.

- Plus récemment, des simulations en laboratoire ont montré que les échanges thermiques entre la planète elle-même et son épaisse atmosphère entraînaient des transferts d'énergie susceptible de freiner la rotation de la planète.

Même la grande régularité de la rotation rapide de l'atmosphère pourrait s'expliquer par l'énorme inertie de cette masse atmosphérique en mouvement, si ce mouvement est entretenu par quelque effet de "machine thermique" créé par l'échauffement du Soleil.

Quoiqu'il en soit, il est aujourd'hui difficile de savoir si la rotation est stabilisée ou si elle évolue encore et dans quel sens.

## **V°) Les révolutions synchrones dans le système solaire**

On a vu que les effets de marées permettaient aux gros de synchroniser sur des états stables les périodes de rotations et de révolutions des plus petits, grâce à des phénomènes de résonances .

On appelle cela, les résonances spin-orbites.

Mais il existe également des résonances orbite-orbites. Dans ce cas, les gros imposent aux petits des rapports simples entre les périodes de révolutions.



Si ces résonances ne sont pas directement liées aux effets de marées, il y a fort à parier que les transferts d'énergies et de moments cinétiques nécessaires à son exécution ne peuvent s'effectuer que par des effets de marées.

Le cas le plus célèbres et le plus étudié est celui de Jupiter et Saturne dont les périodes de révolutions sont dans le rapport 5/2 : Jupiter fait 5 tours autour du Soleil, pendant que Saturne n'en fait que 2.

### **a) Les satellites des planètes géantes**

Autour de Jupiter, au delà de certains satellites figés entre eux aux points de Lagrange (Les Troyens) , trois des satellites galiléens ont des périodes de révolutions dans des rapports simples :

Ganymède fait un tour autour de Jupiter (7,15j) pendant qu'Europe en fait deux et Io quatre.

Dans le système de Saturne , 6 satellites ont également des périodes de révolutions se trouvant dans des rapports simples :

Mimas et Téthys 1/2

Encelade et Dioné 1/2

Hypérion et Titan 4/3

Parallèlement l'orbite d'Hypérion est complètement assujettie à celle de Titan.

### **b) Le couple Neptune-Pluton**

On ne connaît pas l'origine du couple à trois : Neptune-Pluton-Charon.

Ce qu'on sait, c'est que l'orbite de Pluton coupe celle de Neptune. En effet, Neptune a une orbite circulaire à 4,5 millions de km du Soleil, alors que l'orbite de Pluton, très elliptique va de 4,4 à 7 millions de km du Soleil.

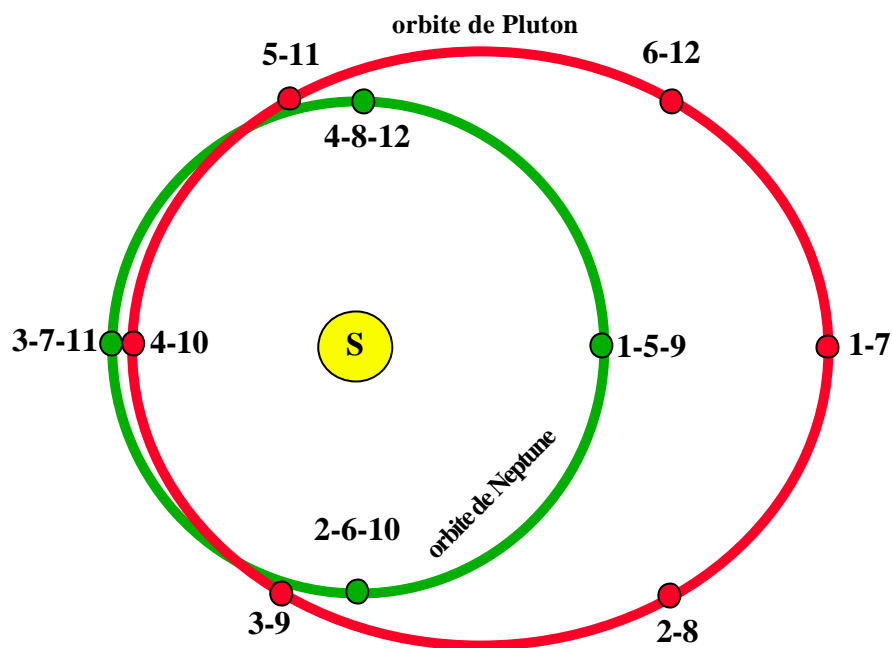
On pourrait donc penser qu'il y a risque de collision.

Or, il n'en est rien !

En effet, Neptune a, comme certaines planètes géantes sur leurs satellites, imposé sa période de révolution à Pluton dans un rapport 3/2 :

Pluton fera deux révolutions autour du Soleil pendant que Neptune en fera trois. Ainsi tous les 495 ans, ce ballet recommence.

Ainsi, Neptune s'arrange pour que Pluton soit toujours à des positions éloignées de lui de plus de 2,5 millions de km.



*Dans la figure ci-dessus, le cycle de 495 ans est découpé en 12 positions à 41 ans d'intervalles. Elle montre qu'à chaque position, les 2 planètes sont toujours très éloignées l'une de l'autre.*

## **VI°) Autres conséquences des effets de marées**

Les effets de marées créant des frottements entraînent inéluctablement des échauffements.

### **a) Io**

Voyager I a montré une activité volcanique intense de soufre. Pour cela, il faut une source d'énergie particulièrement importante. Dans le cas des planètes telluriques, la source de chaleur réside dans la désintégration d'éléments radioactifs tels que le Thorium et l'Uranium.

En ce qui concerne Io, si l'on avait affaire au même type d'énergie, il faudrait 100 fois plus de ces éléments que ce corps ne doit en contenir.

L'explication proposée fait intervenir les effets de marées provoquées par l'énorme masse de Jupiter qui déforment Io. Ces déformations seraient sans effets si la distance Io / Jupiter ne variait en raison des perturbations gravitationnelles engendrées par Ganymède. L'énergie engendrée à l'intérieur de Io est estimée à  $10^{13}$  watts.

### **b) Europe**

Voyager II a survolé Europe et montré un satellite lisse, brillant, dépourvu de relief et sillonné de lignes sombres de quelques km de largeur.

Une hypothèse suppose qu'Europe serait constituée d'un "océan" dont la surface gelée se serait épaissie et fracturée par des mouvements d'extension provoqués par les

effets de marées dû à Jupiter. Il est même envisagé que cette surface fonde partiellement et de façon superficielle dans certaines régions et ainsi se remodèle. La constitution de cet "océan" reste une énigme.

### **c) Hypérion**

Comme pour Io, ce satellite est soumis à l'action conjugué de Saturne, mais aussi de Titan dont il est totalement assujéti. Ce tiraillement permanent lui donne un mouvement de rotation complètement aléatoire.

D'aucuns affirment même que la forme de cacahuète dont il est affublé, malgré ses dimensions (260 km x 400 km ), serait dû à ces tiraillements.

Phoébé, un autre satellite de Saturne de même dimension, est totalement sphérique.

### **d) Triton**

Ce satellite de Neptune est le corps le plus froid connu du système solaire ( -232 ° C ) serait soumis à des échauffements dû aux effets de marées jusqu'à -150°C.

Ces échauffements créeraient du volcanisme de glaces.

## **VII°) Les effets de marées dans l'univers**

Les effets de marées ne s'exercent pas seulement dans le système solaire. Ils jouent un rôle fondamental dans tout l'univers, en particulier entre les étoiles et entre les galaxies et, plus généralement, dès que la taille des 2 astres n'est pas négligeable devant leur distance.

Quand un système double d'étoiles est composé de 2 membres proches l'un de l'autre, les effets de marées rendent circulaires les orbites de chaque étoile l'une autour de l'autre et synchronisent leurs périodes de rotation. Elles peuvent même échanger de la matière, modifiant ainsi leur évolution.

Les galaxies pouvant être assimilées a des corps fluides sont déformées par des effets de marées.

De nombreuses galaxies irrégulières sont le résultat d'interactions entres galaxies. Certaines vont même jusqu'à manger des plus petites.

Notre galaxie est en train d'absorber les nuages de Magellan.

La galaxie d'Andromède entrera en collision avec la notre dans 1 milliard d'années, et si nos descendants sont encore là , il verront dans le ciel 2 voies lactées.