

Famil  
es  
rural  
es

Vivre mieux !

ASSOCIATION  
DE MAILLET

Club d'astronomie

Caroline H



# Les effets de marée

Jean-Pierre Maratrey - Septembre 2022

**Pourquoi les marées ?**

**Les marées sur Terre**

**Le couple Terre-Lune**

**Les rotations synchrones**

**Autres conséquences**

**Les effets de marée dans l'univers**

**Pourquoi les marées ?**

**Les marées sur Terre**

**Le couple Terre-Lune**

**Les rotations synchrones**

**Autres conséquences**

**Les effets de marée dans l'univers**

# Pourquoi les marées ?

Loi de la gravitation (Isaac Newton 1643-1727)

Principia mathematica (1687) :

Les corps s'attirent avec une force (F) proportionnelle au produit de leurs masses (M et m) et inversement proportionnelle au carré de la distance ( d ) qui les sépare :

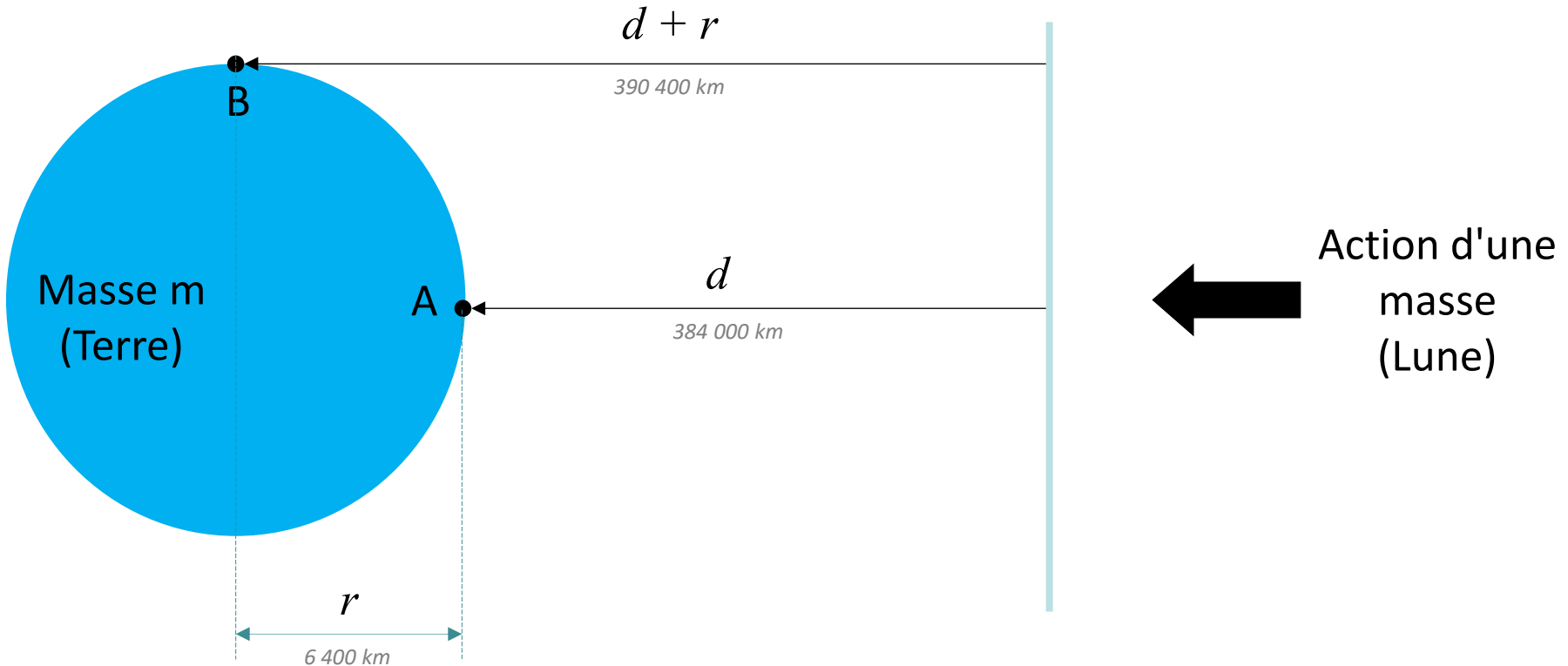
$$F_{gravité} = G \frac{M \cdot m}{d^2}$$



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

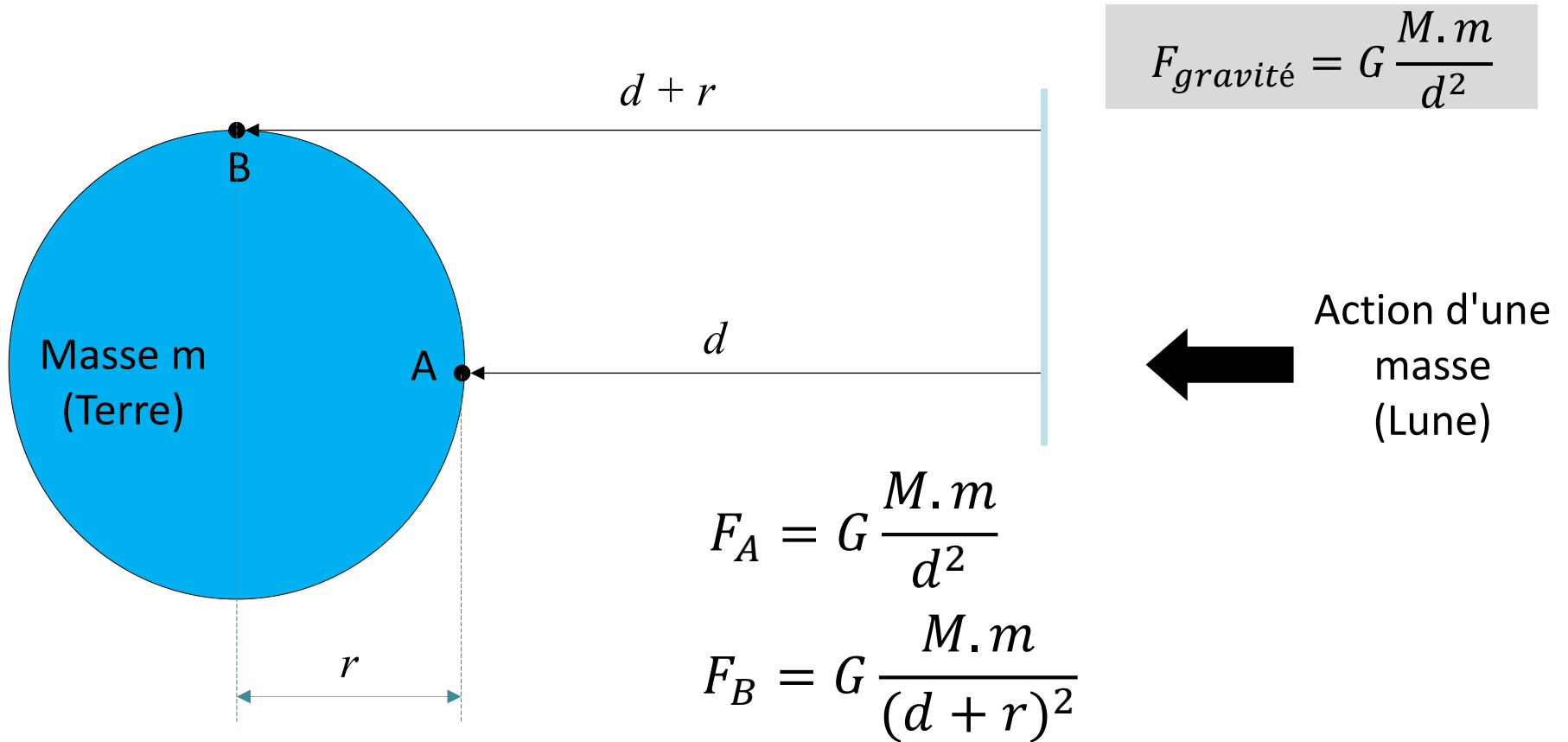
# Pourquoi les marées ?

$$F_{\text{gravité}} = G \frac{M \cdot m}{d^2}$$



La force de marée est la différence entre la force de gravité en A et celle en B.  
Calculons ces deux forces :

# Pourquoi les marées ?



Tout calcul fait, la force de marée ( $F_{\text{marée}}$ ) est égale à  $F_A - F_B$  :

$$F_{\text{marée}} = F_A - F_B = 2G \frac{M \cdot m \cdot r}{d^3}$$

# Pourquoi les marées ?

$$F_{gravité} = G \frac{M.m}{d^2}$$

$$F_{marée} = 2G \frac{M.m.r}{d^3}$$

La force de gravité est inversement proportionnelle au carré de la distance.

La force de marée est inversement proportionnelle au cube de la distance.

Conséquences :

- Des déformations sur les éléments fluides, et solides à un moindre niveau.
- Des frottements entraînant des échauffements et des modifications des mouvements de rotation.

# Au menu

Pourquoi les marées ?

**Les marées sur Terre**

**Le couple Terre-Lune**

**Les rotations synchrones**

**Autres conséquences**

**Les effets de marée dans l'univers**



# Les marées sur Terre

$$F_{gravité} = G \frac{M.m}{d^2}$$

$$F_{marée} = 2G \frac{M.m.r}{d^3}$$

Le Soleil est environ 27 millions de fois plus massif que la Lune.

Le Soleil est environ 389 fois plus éloigné de la Terre que ne l'est la Lune.

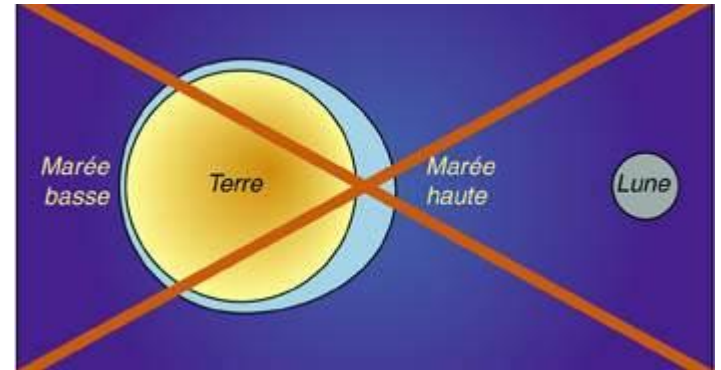
Tout calcul fait :

- Sur Terre, l'attraction gravitationnelle du Soleil est 178 fois plus forte que celle de la Lune.
- La Lune agit 2,2 fois plus sur les marées terrestres que le Soleil.

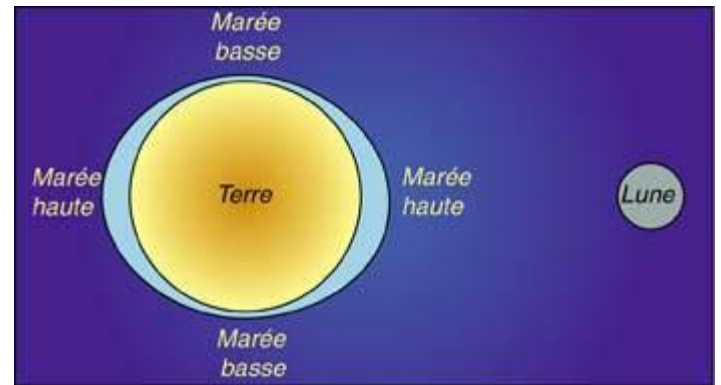
C'est pourquoi les effets de marées sur la Terre sont créés en majorité par la Lune alors que l'attraction du Soleil est la plus forte.

# Les marées sur Terre

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



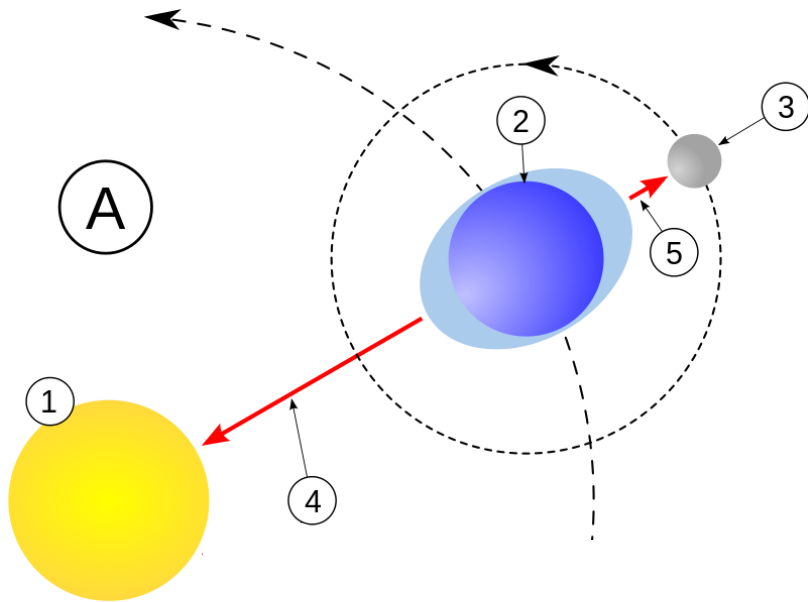
Mais la Terre tourne, et dans sa rotation, donne aux océans une forme d'ellipsoïde qui crée 2 marées aux antipodes.



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

# Les marées sur Terre

Le "coefficient de marée" mesure la hauteur des eaux et varie entre 20 et 120. Un coefficient proche de 20, petite marée, correspond à une faible différence de hauteur d'eau entre la basse-mer et la pleine-mer. Un coefficient proche de 120 indique une grande marée.



Comme l'indique le schéma ci-contre, les marées sont dues à la Lune, mais dans une moindre mesure, au Soleil.

En A : fort coefficient, grande marée

En B : faible coefficient, petite marée.

# Les marées sur Terre

Le coefficient de marée dépend de plusieurs facteurs :

- Comme vu précédemment, les positions relatives de la Lune et du Soleil influent fortement sur les coefficients de marées.
- Les marées agissent sur les masses d'eau importantes, les océans principalement, et peu sur les grands lacs et les mers intérieures.
- Les marées sont importantes sur les côtes des océans, dans les baies, les golfes ou les estuaires, par effet de baignoire. Le marnage peut atteindre 15 m dans la baie du Mont St-Michel, et 17m dans la baie de Fundy au Canada.
- Dans les estuaires, l'onde de marée peut remonter les fleuves. C'est le mascaret observable sur 80 sites dans le monde, dont l'estuaire de la Garonne en France (ci-contre).
- Les forces de marée peuvent être utilisées pour produire de l'électricité, comme sur la Rance en Bretagne.



# Les marées sur Terre

Les marées océaniques sont spectaculaires, mais la Lune et le Soleil agissent aussi sur l'écorce terrestre.

Les marées de la croûte terrestres peuvent atteindre 60 à 80 cm !

Le LHC (Grand collisionneur de hadron entre la France et la Suisse) et les détecteurs d'ondes gravitationnelles (Ligo aux USA et Virgo en Italie) en tiennent compte.



*LHC*



*Virgo*

# Au menu

Pourquoi les marées ?

Les marées sur Terre

**Le couple Terre-Lune**

**Les rotations synchrones**

**Autres conséquences**

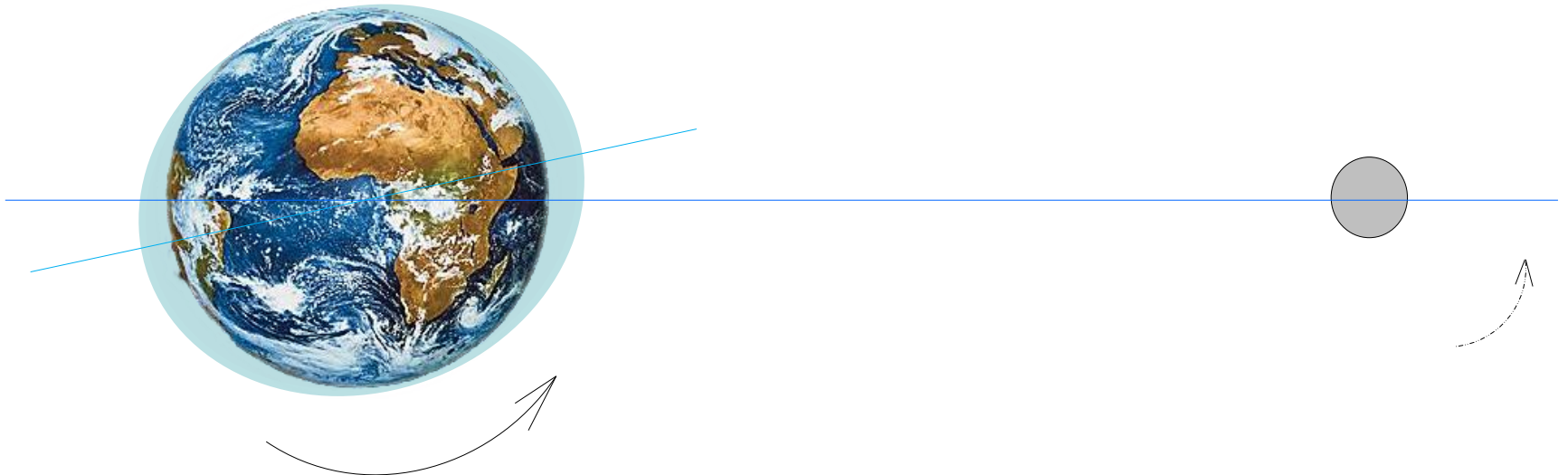
**Les effets de marée dans l'univers**

# Le couple Terre-Lune

## Avance des marées par rapport à la Lune

Comme l'indique le schéma suivant, ces marées sont décalées par rapport à l'axe Terre-Lune pour deux raisons :

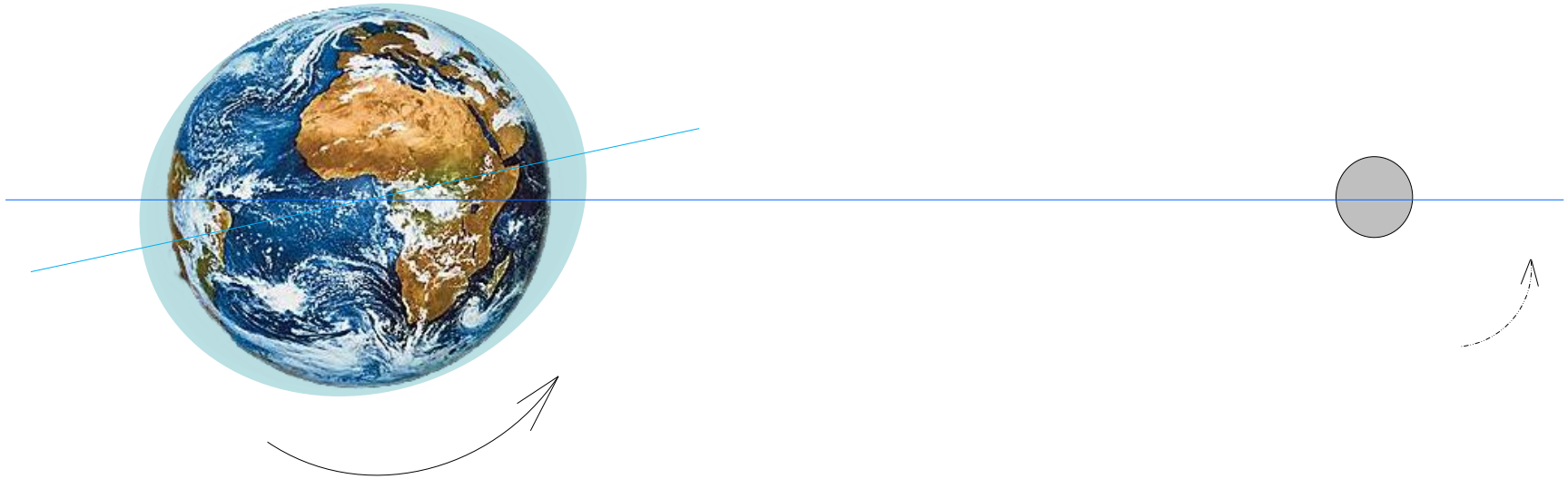
1. Du fait de la viscosité des éléments fluides en mouvement (océans et magma interne).
2. Parce que la Terre tourne plus vite sur elle-même (24h) que la Lune (un peu moins d'un mois).



# Le couple Terre-Lune

## Freinage de la rotation de la Terre

La Lune tire sur le bourrelet, et ralentit la vitesse de rotation de la Terre.



Les jours rallongent de 1,8 ms par siècle !

Il y a 1,4 milliards d'année, le jour ne comptait que 18,7 heures.

Il y a 400 millions d'années, l'année avait 400 jours de 22 heures.

Dans 3,3 millions d'années, la journée durera 24 heures et 1 minute...



# Le couple Terre-Lune

## Eloignement de la Lune

Le ralentissement de la rotation de la Terre entraîne une augmentation de la distance Terre-Lune.

La Lune s'éloigne de nous à raison de 3,8 cm par an (vérifié expérimentalement avec les réflecteurs installés sur la Lune).

Il y a 4 milliards d'années, la Lune n'était qu'à 22 500 km de la Terre ! C'est dire si elle était grosse dans le ciel (environ  $9^\circ$  !).

Nous sommes aujourd'hui dans une période où la Lune et le Soleil ont une taille angulaire comparable ( $0,5^\circ$ ). Le Soleil est 400 fois plus gros que la Lune, mais 400 fois plus éloigné. Nous pouvons observer des éclipses totales de Soleil.

L'éloignement de la Lune fait que les éclipses totales de Soleil vont disparaître d'ici à quelques centaines de millions d'années.

# Au menu

Pourquoi les marées ?

Les marées sur Terre

Le couple Terre-Lune

**Les rotations synchrones**

**Autres conséquences**

**Les effets de marée dans l'univers**

# Le couple Terre-Lune

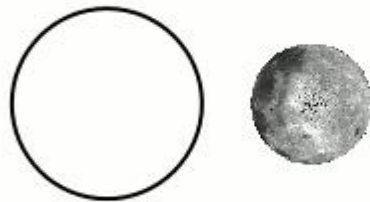
## Rotation synchrone de la Lune

La Lune a ralenti la Terre, mais la Terre a aussi ralenti la rotation de la Lune, et de façon plus efficace.

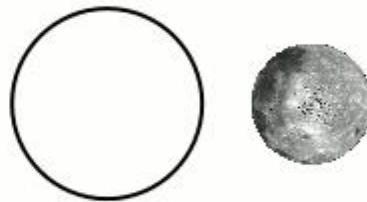
Les marées ont provoqué un ralentissement de la rotation de la Lune, jusqu'à ce que celle-ci soit égale à sa période de révolution autour de la Terre.

Il n'a fallu que quelques millions d'années pour que la Lune soit en rotation synchrone.

Rotation  
synchrone  
de la Lune



Pas de  
rotation  
de la Lune



# Les rotations synchrones

## Les satellites des planètes

Les effets de marées sont d'autant plus importantes que les masses sont grandes. Le rapport des diamètres entre les planètes et leurs satellites est généralement  $>10$ .

Ce sont surtout les satellites naturels des planètes qui possèdent des périodes de rotation synchrones.

Une 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.
- Miranda et Ariel autour d'Uranus
- Triton autour de Neptune

# Les rotations synchrones

## 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 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.



# Au menu

Pourquoi les marées ?

Les marées sur Terre

Le couple Terre-Lune

Les rotations synchrones

**Autres conséquences**

**Les effets de marée dans l'univers**

## Autres conséquences

Les forces de marées créent des frottements, et entraînent inéluctablement des échauffements, en particulier sur les satellites naturels des planètes.

### Io

Le satellite de Jupiter est proche de sa planète. Les forces de marées sont si importantes qu'elles provoquent une forte activité volcanique qui modifie régulièrement son aspect en surface (et probablement en interne).

### Europe

C'est un satellite glacé, lisse et brillant. On suppose qu'il existe un océan d'eau liquide en profondeur. La surface composée de glace est sillonnée de lignes sombres, fractures formées par les effets de marées de Jupiter.

### Encelade

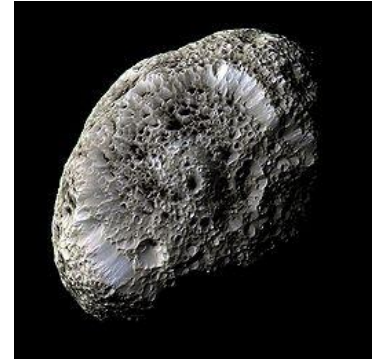
Même constatation que pour Europe, mais ce satellite de Saturne montre des geysers produits par les effets de marées de Saturne.

# Autres conséquences

## Hypérion

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

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



## Triton

Le plus gros satellite de Neptune est le corps le plus froid connu du système solaire ( $-232^{\circ}\text{C}$ ) serait soumis à des échauffements locaux dû aux effets de marées, jusqu'à  $-150^{\circ}\text{C}$ .

Ces échauffements créeraient du volcanisme de glaces provoqués par les forces de marée.





# Au menu

Pourquoi les marées ?

Les marées sur Terre

Le couple Terre-Lune

Les rotations synchrones

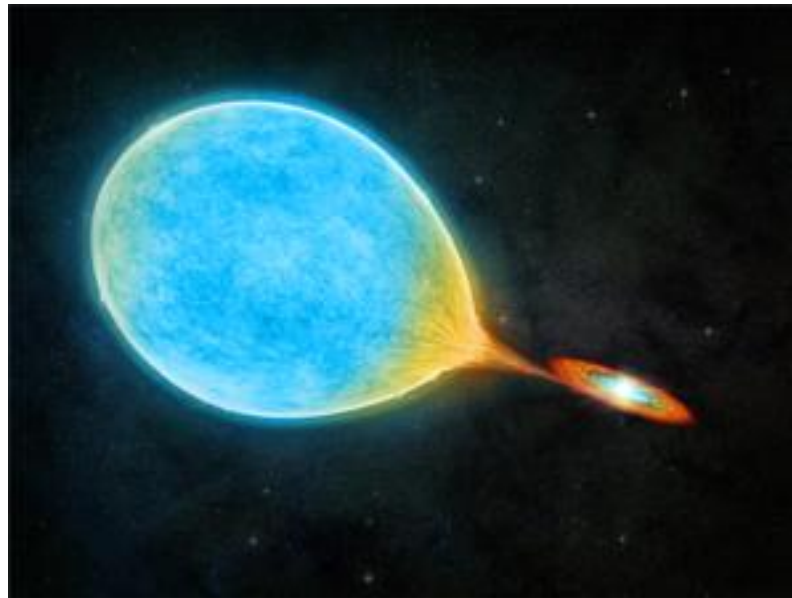
Autres conséquences

**Les effets de marée dans l'univers**

# 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.



# Dans l'univers

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

De nombreuses galaxies elliptiques sont le résultat d'interactions entre galaxies plus petites.

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

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





*Vivre mieux !*

**ASSOCIATION  
DE MAILLET**

**Club d'astronomie  
Caroline H**

