

LA CAPSULE DU DÉBUTANT

Mécanique céleste

- ✓ Les orbites
- ✓ Les mouvements de la Lune
- ✓ Les mouvements de la Terre
- ✓ Les éclipses
- ✓ Les marées



LES OBJECTIFS

- Au terme de cette présentation, le participant pourra :
  - Expliquer les paramètres astronomiques impliqués dans la genèse des forces de marée.
  - Nommer les modèles scientifiques qui expliquent et mesurent les forces de marée.
  - Énoncer les différents facteurs qui déterminent l'expression locale des forces de marée sur Terre.
  - Illustrer les situations qui impliquent les forces de marée dans notre compréhension de l'Univers.



Telle qu'on la conçoit ici sur Terre… parce qu'on retrouve l'expression des forces de marée partout dans l'Univers

- La marée est la variation du niveau des mers et des océans, causée par l'effet conjugué de la force de gravitation due à un astre et à l'effet centrifuge relié à la révolution de la Terre et de l'astre autour de leur barycentre commun.



Son expression locale est aussi *géographique*

- La marée est la variation du niveau des mers et des océans, causée par l'effet conjugué de la force de gravitation due à un astre et à l'effet centrifuge relié à la révolution de la Terre et de l'astre autour de leur barycentre commun.

Si la cause de la marée est *astronomique*



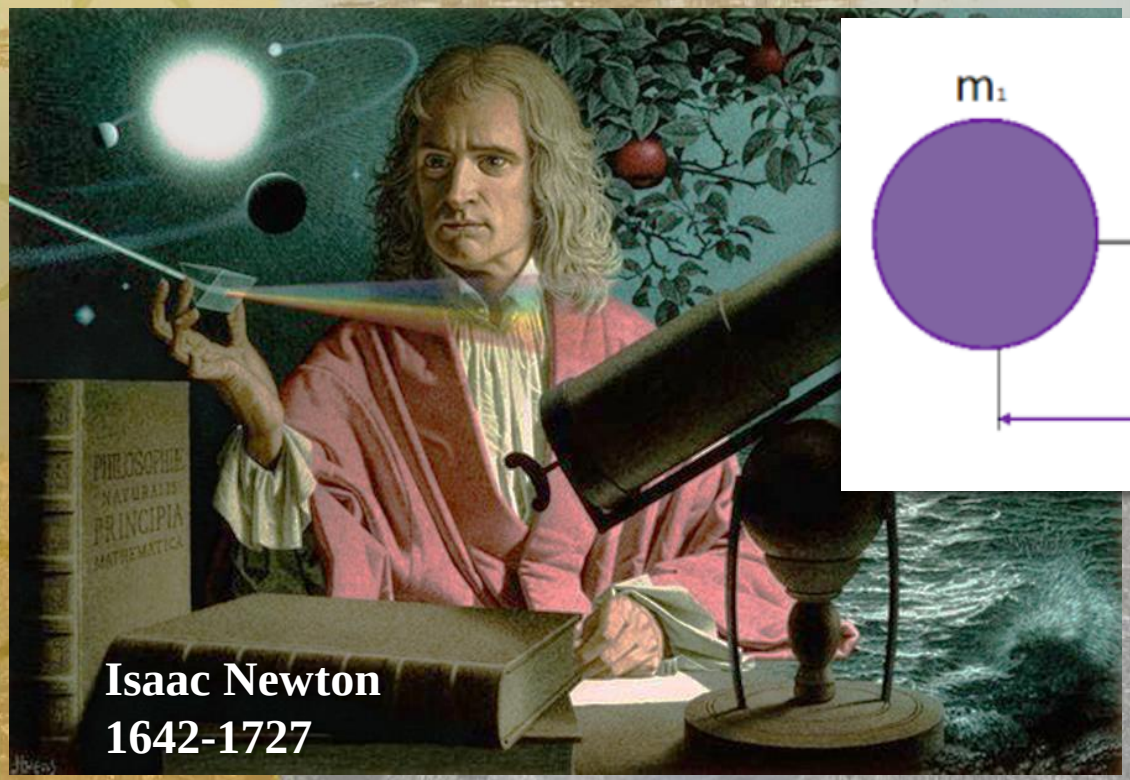
MARÉE ET ASTRONOMIE

- La marée est la variation du niveau des mers et des océans, causée par l'effet conjugué de la force de gravitation due à un astre et à l'effet centrifuge relié à la révolution de la Terre et de l'astre autour de leur barycentre commun.

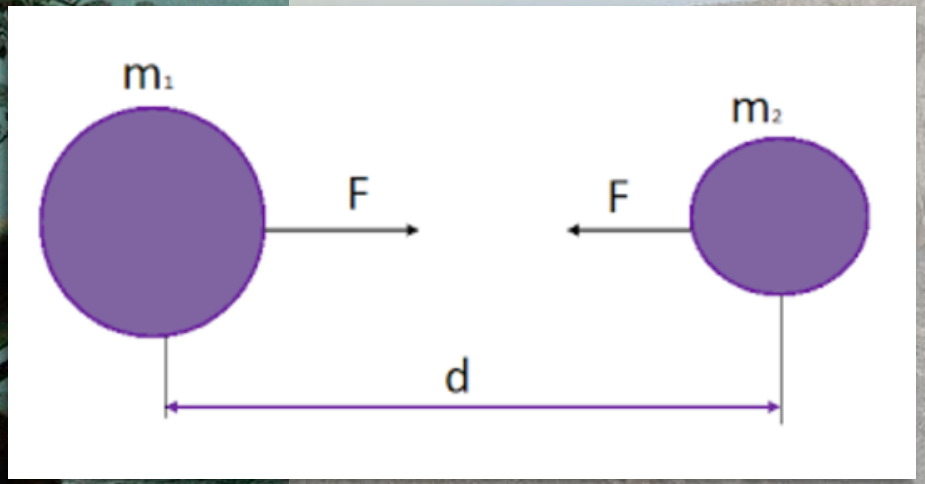
Rappel théorique : paradigme newtonien

MARÉE ET ASTRONOMIE

- La marée est due à la force gravitationnelle que les astres exercent les uns sur les autres.



Isaac Newton
1642-1727

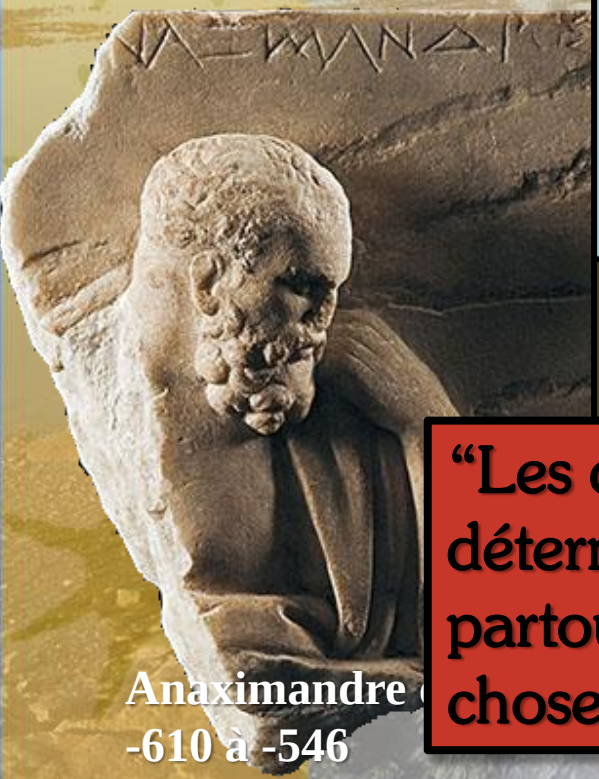


$$\overrightarrow{F_G} = G\frac{m_1 \bullet m_2}{d^2}$$

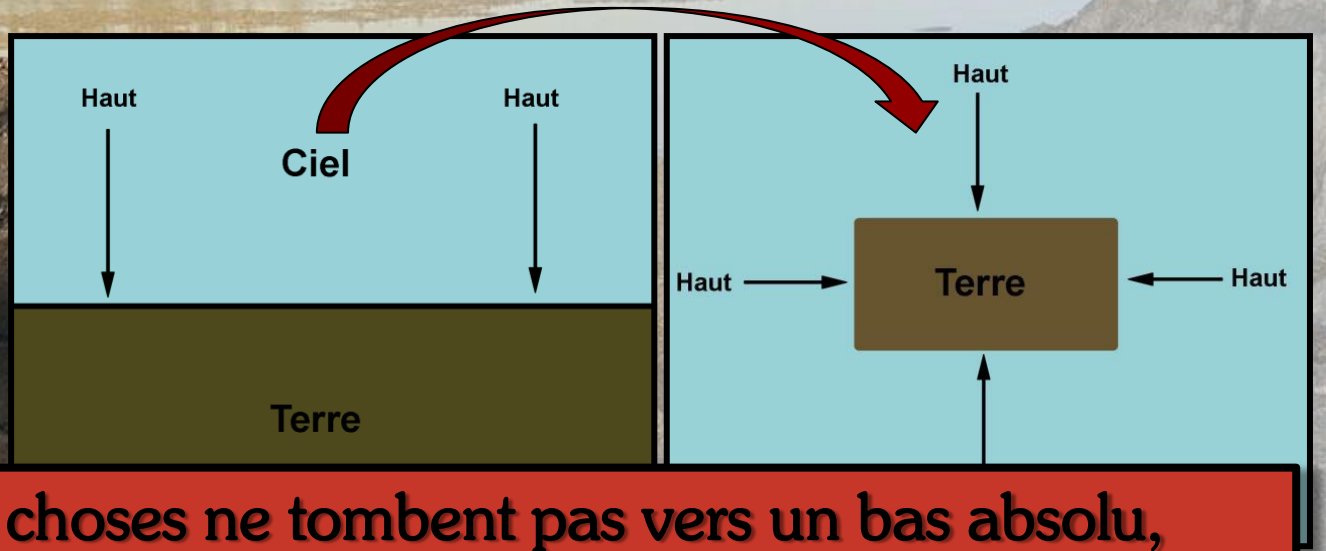
$$O\grave{u}\ G = 6{,}67 \times 10^{-11}\frac{m^3}{kg \bullet s^2}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- La force gravitationnelle s'exerce au centre de masse du volume considéré.



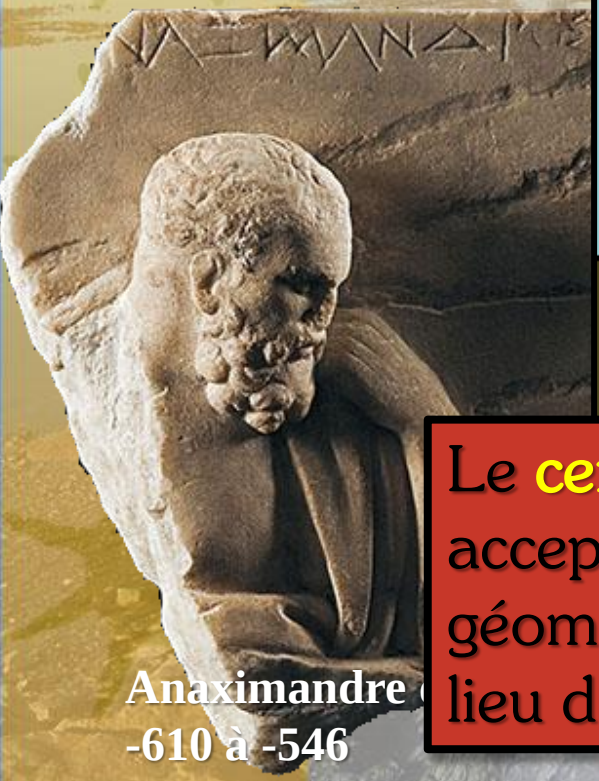
Anaximandre
-610 à -546



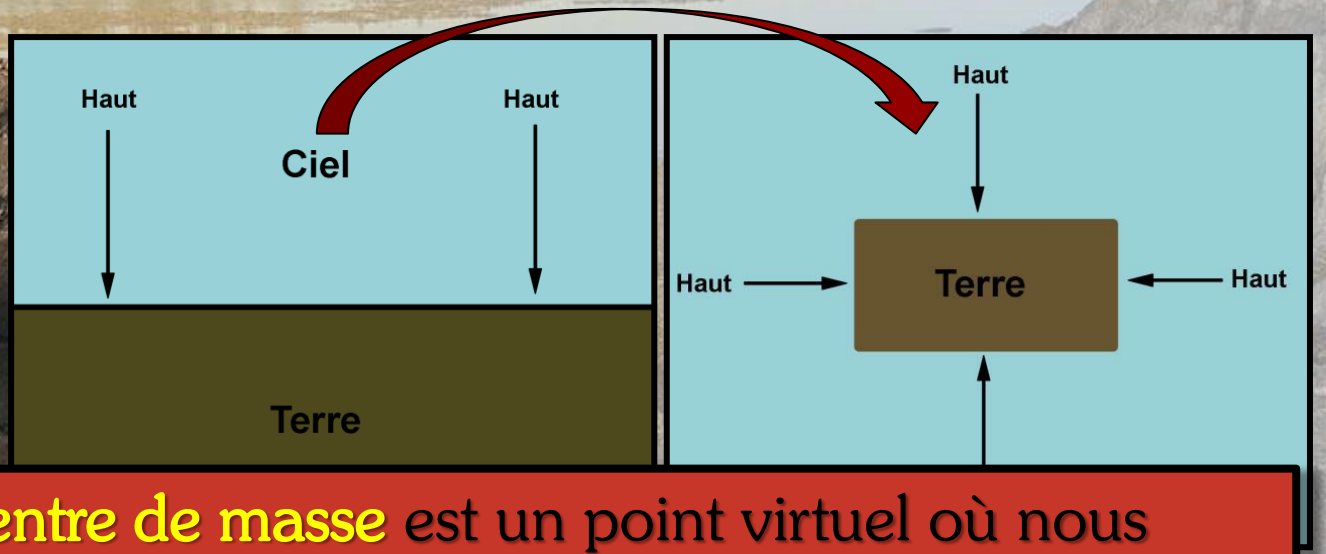
"Les choses ne tombent pas vers un bas absolu, déterminé par une unique direction qui est la même partout dans l'Univers ; mais plutôt, de partout, les choses tombent vers le centre de la Terre."

MARÉE ET ASTRONOMIE

- La force gravitationnelle s'exerce au centre de masse du volume considéré.



Anaximandre
-610 à -546

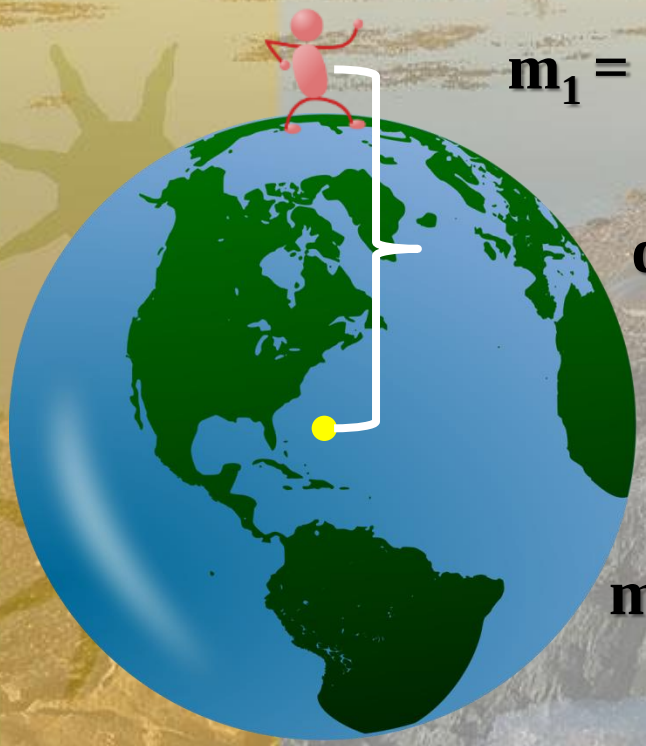


Le centre de masse est un point virtuel où nous acceptons que toute la masse d'une forme géométrique quelconque soit concentrée. C'est le lieu d'application de la force de gravitation.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- La force gravitationnelle s'exerce au centre de masse du volume considéré.



$m_1 = 80\ kg$

$$\overrightarrow{F_G} = G\frac{m_1 \bullet m_2}{d^2}$$

$d = 6{,}378 \times 10^6\ m$

$$\overrightarrow{F_G} = 785\ N$$

$m_2 = 5{,}972 \times 10^{24}\ kg$

$$O\grave{u}\ N = \frac{kg \bullet m}{s^2}$$



MARÉE ET ASTRONOMIE

- La force gravitationnelle s'exerce au centre de masse du volume considéré.

$$\overrightarrow{F_G} = 785\ N$$

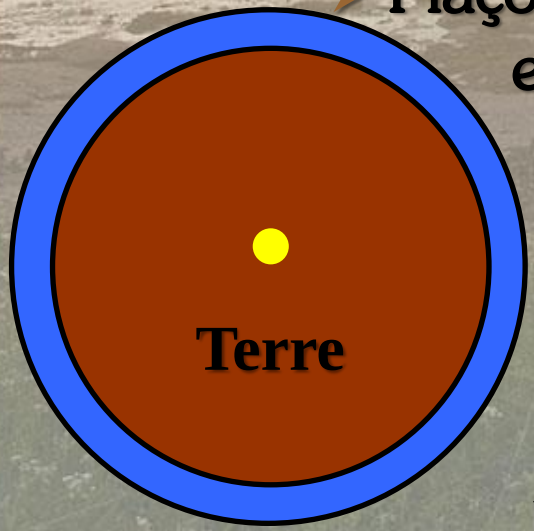


$$Or, \vec{F} = m\vec{a} \qquad Et, \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$\vec{a} = \frac{785}{80} = 9,8\ {}^{m}/_{s^2}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Modèle proposé pour comprendre la composante astronomique de la marée :
  - Imaginons une Terre enrobée d'un océan global sans continents, sans accidents géographiques.
    - Plaçons nous dans un référentiel galiléen et ajoutons un astre attracteur dans le voisinage.





$$\overrightarrow{F_G} = G\frac{m_1 \bullet m_2}{d^2}$$

Une force attractive s'applique…

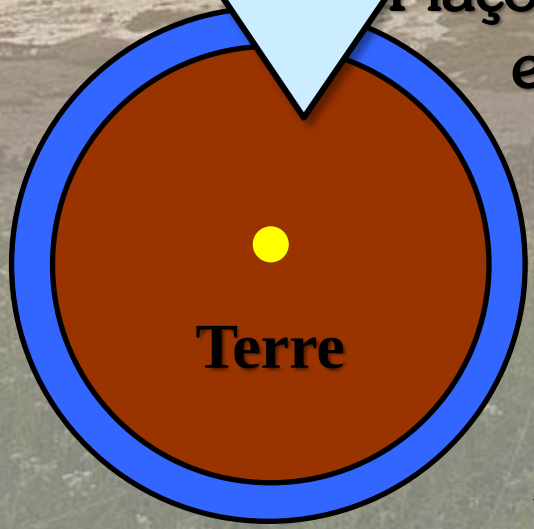
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Modèle proposé pour comprendre la composante astronomique de la marée :

e Terre enrobée d'un océan global
ts, sans accidents géographiques.

Plaçons nous dans un référentiel galiléen et ajoutons un astre attracteur dans le voisinage.

Mais comme la Terre est un objet tridimensionnel…





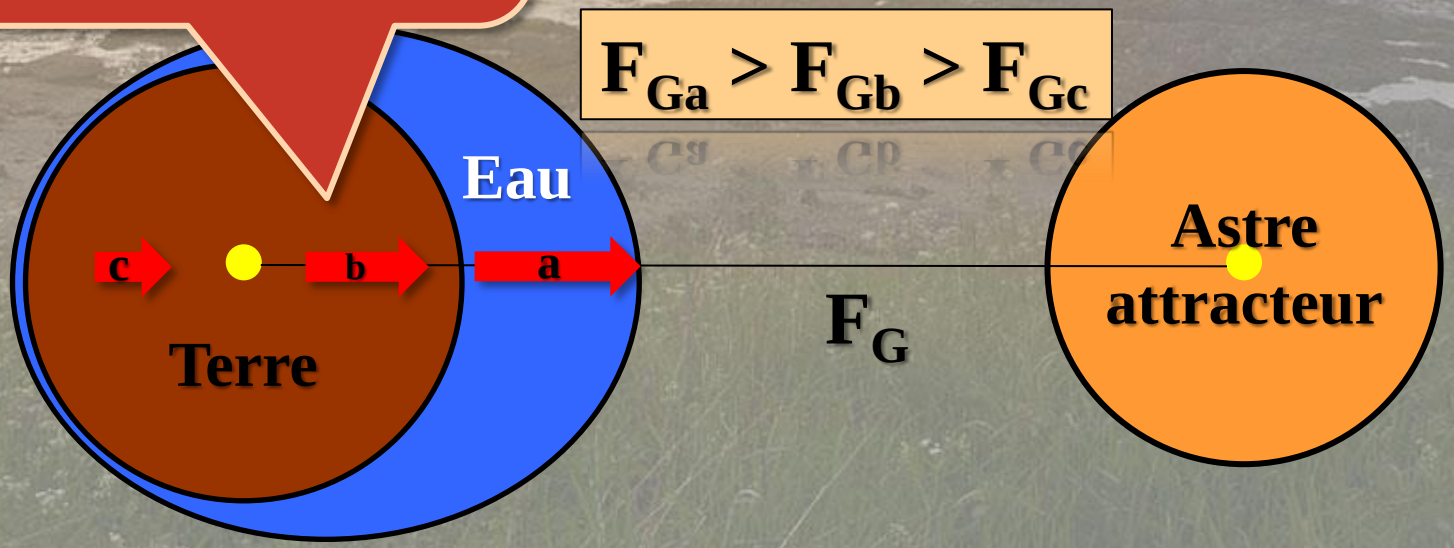
$$\overrightarrow{F_G} = G\frac{m_1 \bullet m_2}{d^2}$$

Une force attractive s'applique…

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Modèle proposé pour comprendre la
  tronomique de la marée :
  Terre enrobée d'un océan global
  , sans accidents géographiques.

La force gravitationnelle qui s'applique sur la Terre est différentiée car $d_a < d_b < d_c$.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Modèle proposé pour comprendre la composante astronomique de la marée :**

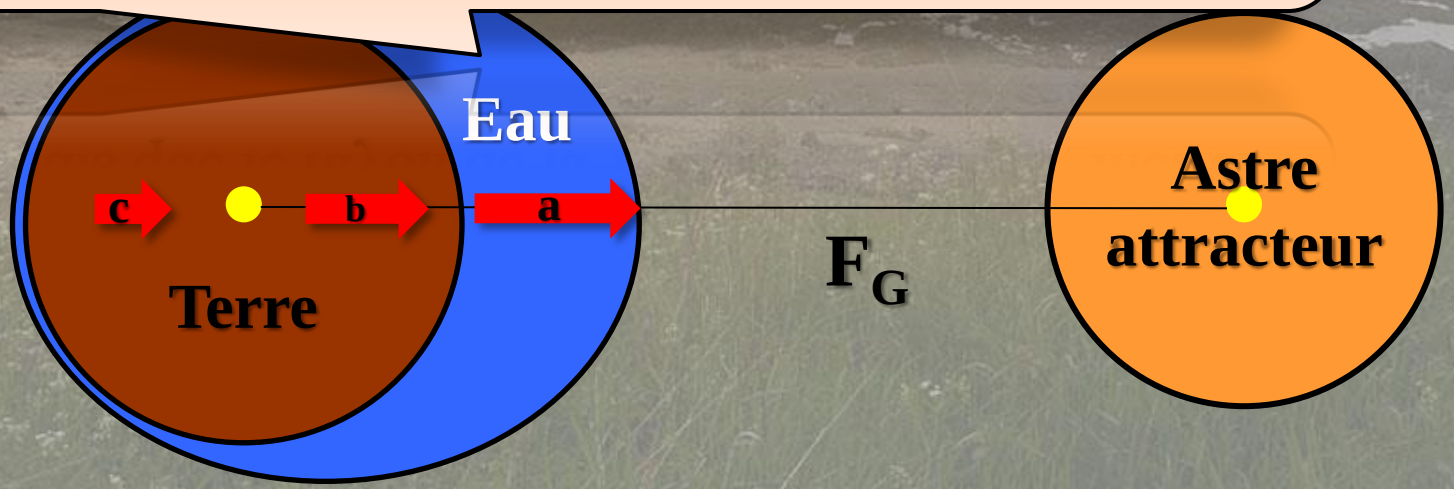
Ainsi, un objet astronomique est *tridimensionnel* et la force d'attraction d'un autre corps céleste s'applique de manière différentiée en des points singuliers de cet objet. C'est ce qui donne lieu aux ***forces de marée***.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Modèle proposé pour comprendre la composante astronomique de la marée :**

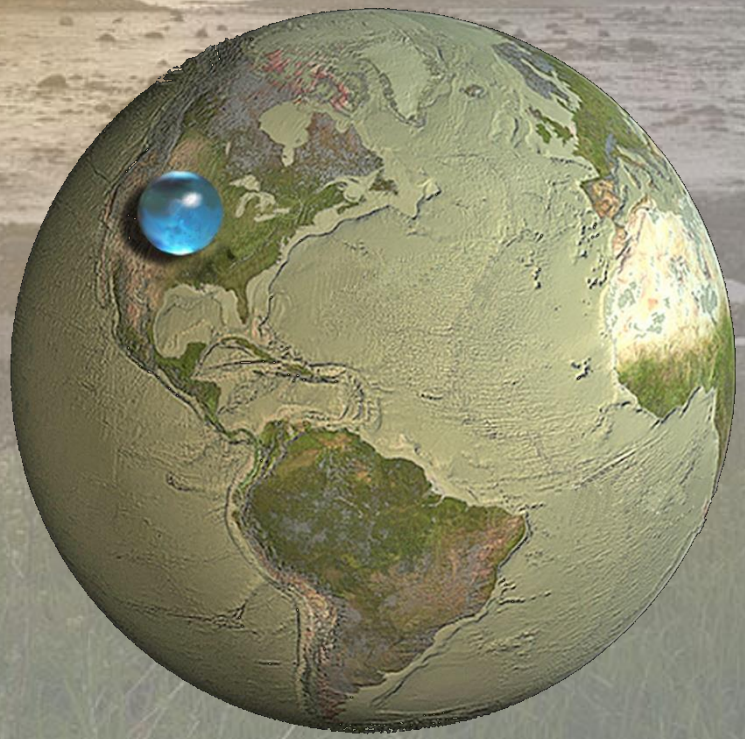
- Ici, le bourrelet de marée est grandement exagéré. Au centre de l'océan Pacifique, il est = ½ mètre.
- Tandis que le rayon de la Terre = ***6 378 000*** mètres !

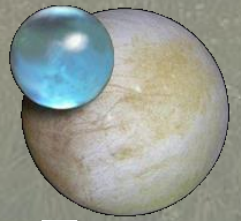


MARÉE ET ASTRONOMIE

- La Terre serait la *planète bleue*, dit-on !



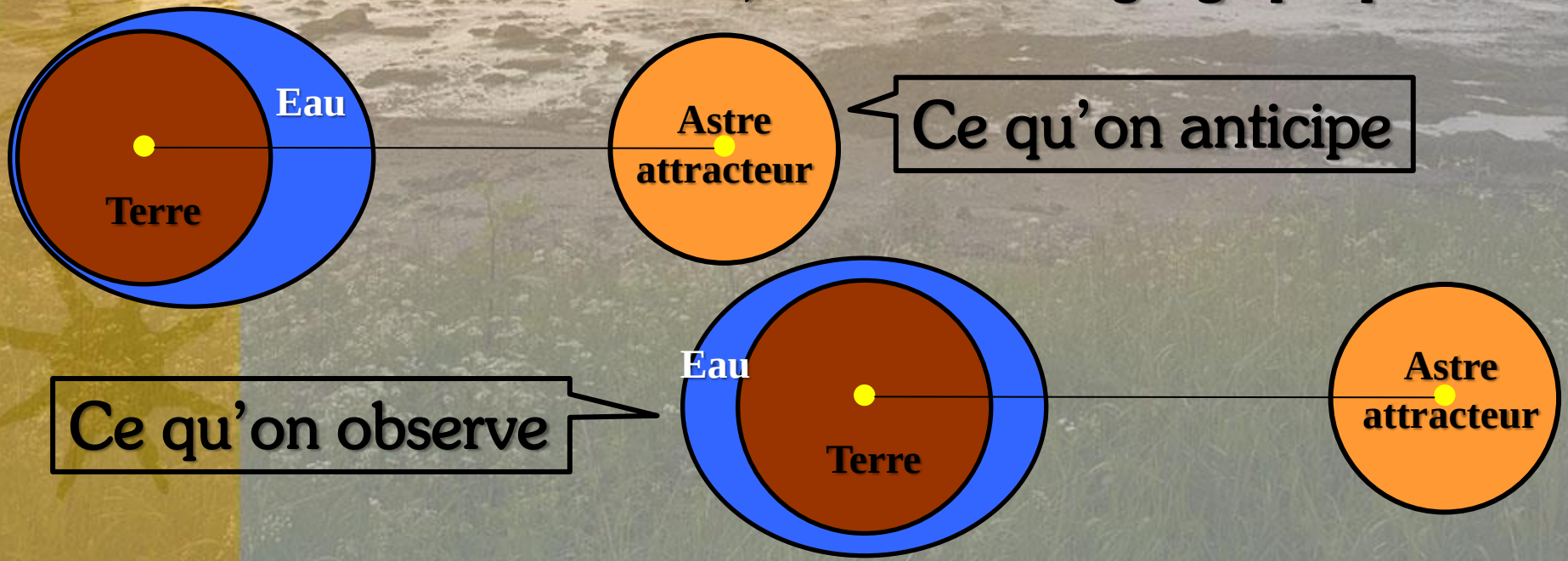




Europe

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Modèle proposé pour comprendre la composante astronomique de la marée :
  - Imaginons une Terre enrobée d'un océan global sans continents, sans accidents géographiques.





MARÉE ET ASTRONOMIE

- Modèle proposé pour comprendre la composante astronomique de la marée :
  - Imaginons une Terre enrobée d'un océan global sans continents, sans accidents géographiques.
  - Implique des *forces* de sens opposés.

- Alors, d'où vient le bourrelet situé sur la face de la Terre opposée à l'astre attracteur ?

Ce qu'on observe



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Facile à comprendre si on admet que le système n'est pas statique, mais dynamique.
- En fait, le référentiel n'est pas galiléen.

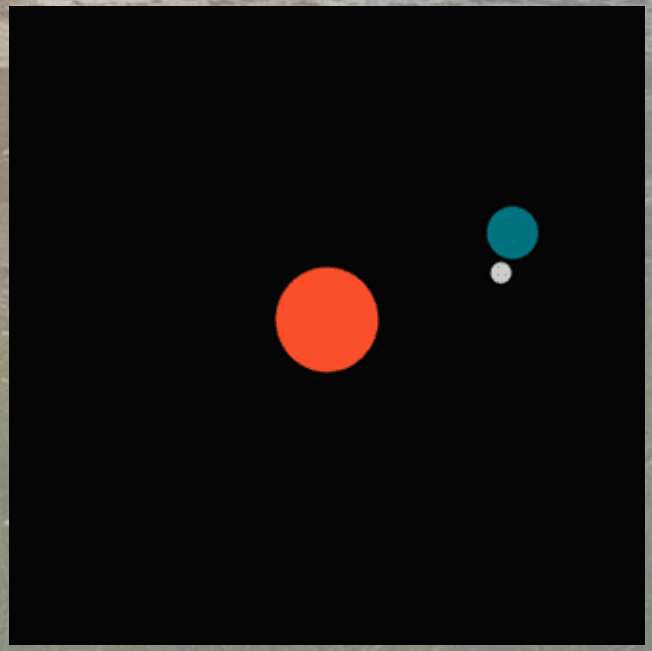
- Alors, d'où vient le bourrelet situé sur la face de la Terre opposée à l'astre attracteur ?

Ce qu'on observe



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Facile à comprendre si on admet que le système n'est pas statique, mais dynamique.
- En fait, le référentiel n'est pas galiléen.
- À la fois la Terre et le ou les astres attracteurs décrivent des mouvements courbés les uns autour des autres appelés orbites.
  - Et le mouvement orbital est un mouvement accéléré !





MARÉE ET ASTRONOMIE

- La marée est la variation du niveau des mers et des océans, causée par l'effet conjugué de la force de gravitation due à un astre et à l'effet centrifuge relié à la révolution de la Terre et de l'astre autour de leur barycentre commun.

MARÉE ET ASTRONOMIE

- La rotation autour du barycentre implique une force qui unit les deux partenaires…



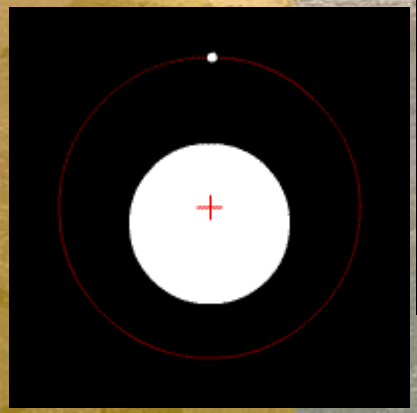
MARÉE ET ASTRONOMIE

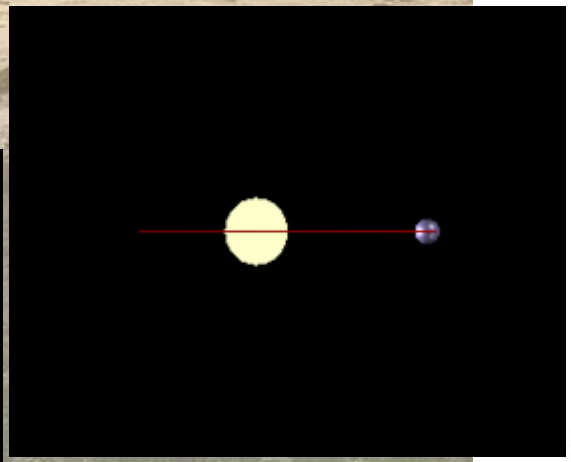
- La rotation autour du barycentre engendre une résultante centrifuge et un bourrelet qui "*traîne*" derrière.

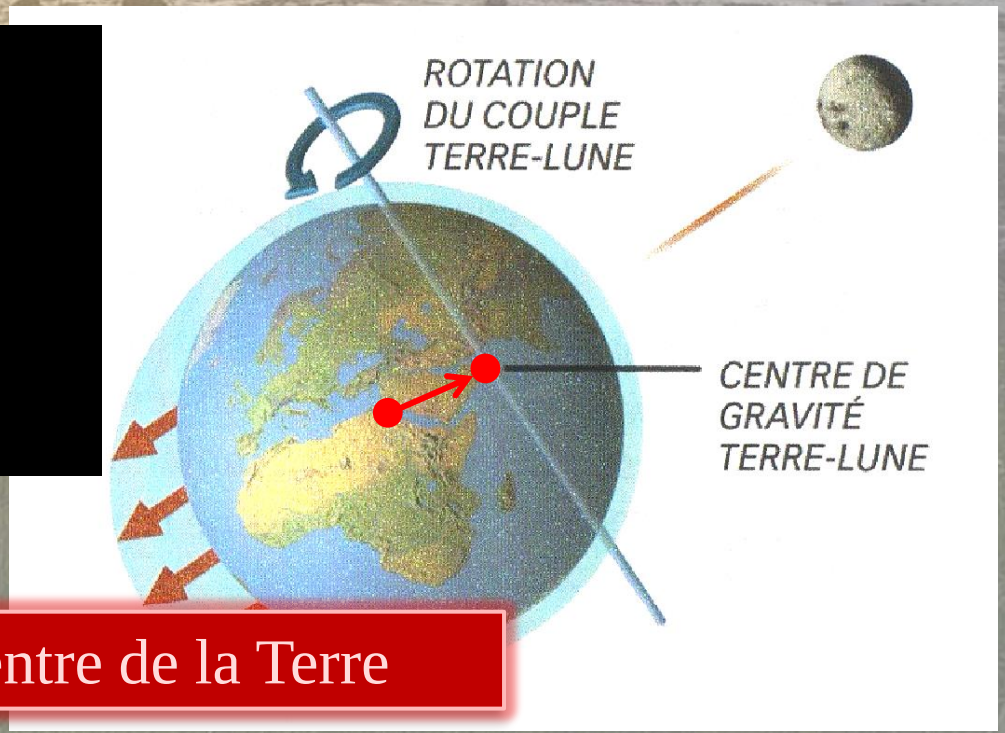


MARÉE ET ASTRONOMIE

- La rotation autour du barycentre engendre une résultante centrifuge et un bourrelet qui "*traîne*" derrière.







4 660 km du centre de la Terre



MARÉE ET ASTRONOMIE

La marée est un mouvement

- La marée est la variation du niveau des mers et des océans, causée par l'effet conjugué de la force de gravitation due à un astre et à l'effet centrifuge relié à la révolution de la Terre et de l'astre autour de leur barycentre commun.

Il s'agit de deux composantes simultanées

La force (centripète) ne s'applique pas au centre de chacune des masses, mais à leur centre de masse commun ou "barycentre"

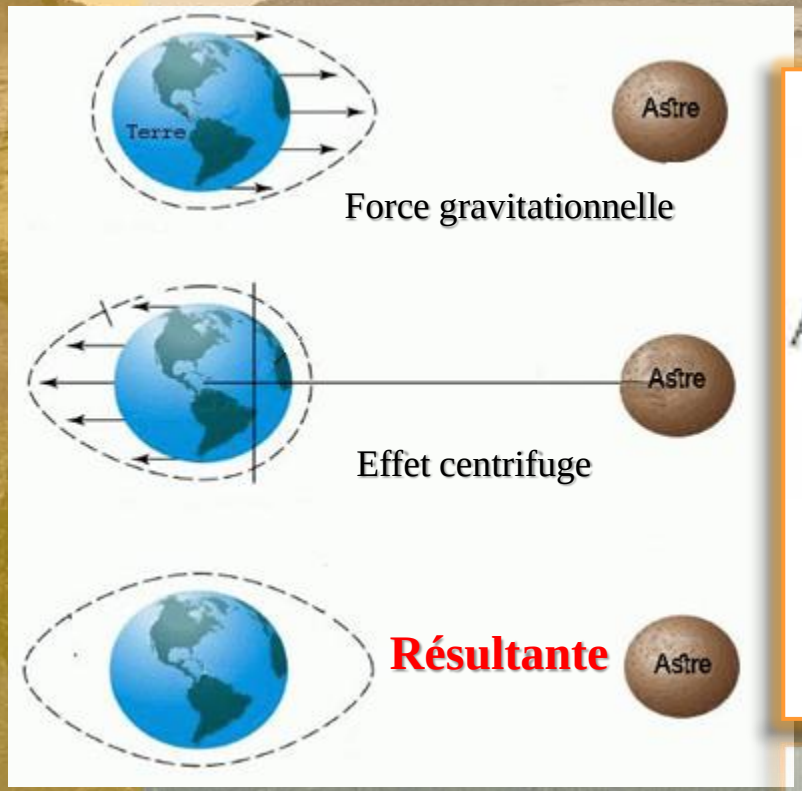


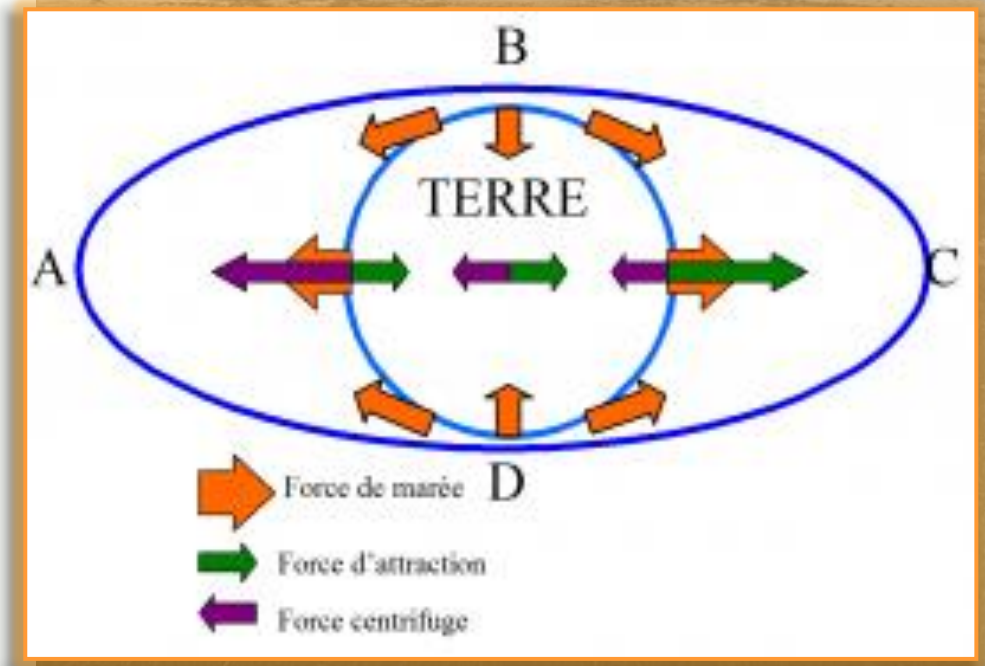
MARÉE ET ASTRONOMIE

- La marée est la **variation** du niveau des mers et des océans, causée par l'**effet conjugué** de la force de gravitation due à un astre et à l'effet centrifuge relié à la révolution de la Terre et de l'astre autour de leur **barycentre** commun.
- La marée s'explique par l'application de forces attractives **différentiées** sur un corps tridimensionnel en **mouvement** dans un champ gravitationnel.

MARÉE ET ASTRONOMIE

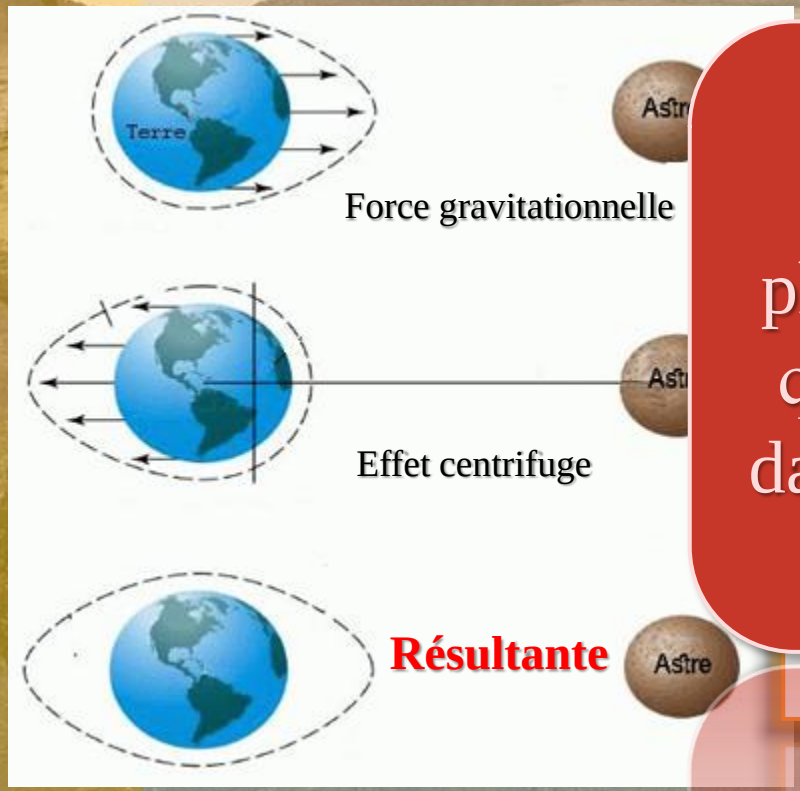
- La force gravitationnelle ⟷ Le contrecoup centrifuge





MARÉE ET ASTRONOMIE

- La force gravitationnelle ⟷ Le contrecoup centrifuge



C'est l'explication astronomique classique du phénomène de la marée. Celle qu'on avance le plus souvent dans les documents qui portent spécifiquement sur le sujet.

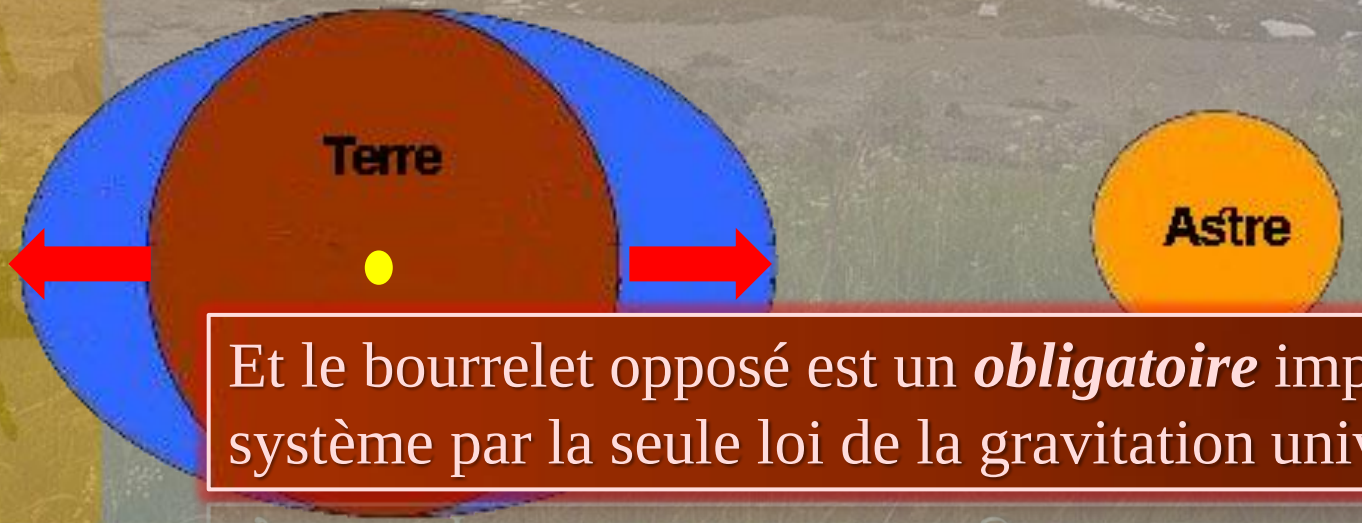
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Mais la force gravitationnelle seule peut expliquer le phénomène des marées si :
  1. On comprend que toutes les relations astronomiques sont dynamiques.
  2. Que la *Force gravitationnelle* est un objet vectoriel.
     a) Un module (ou norme)
     b) Une direction

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Modèle No 2 :
  - fondé sur la seule F_G appliquée au centre de masse de chacun des astres impliqués.

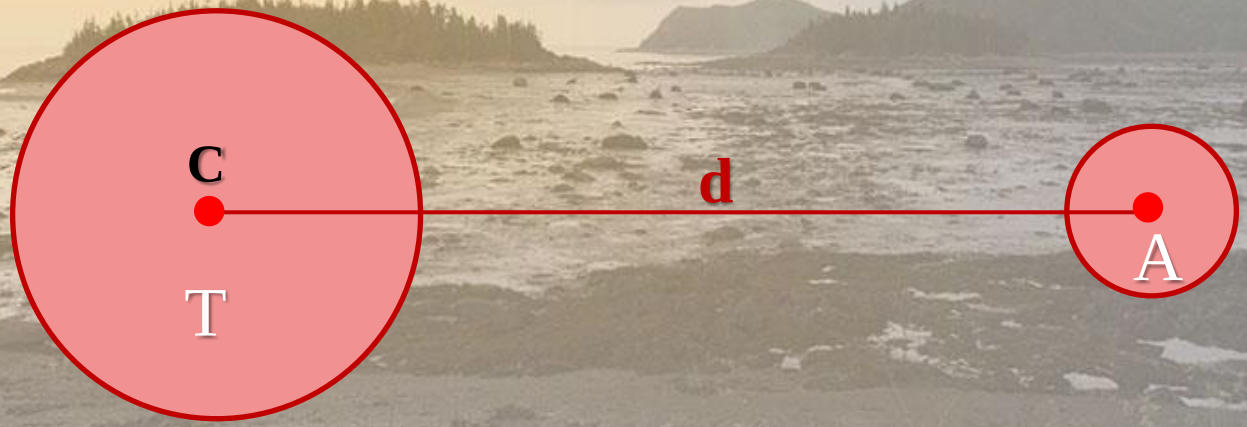
Ce qu'on observe…



Et le bourrelet opposé est un ***obligatoire*** imposé au système par la seule loi de la gravitation universelle.

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

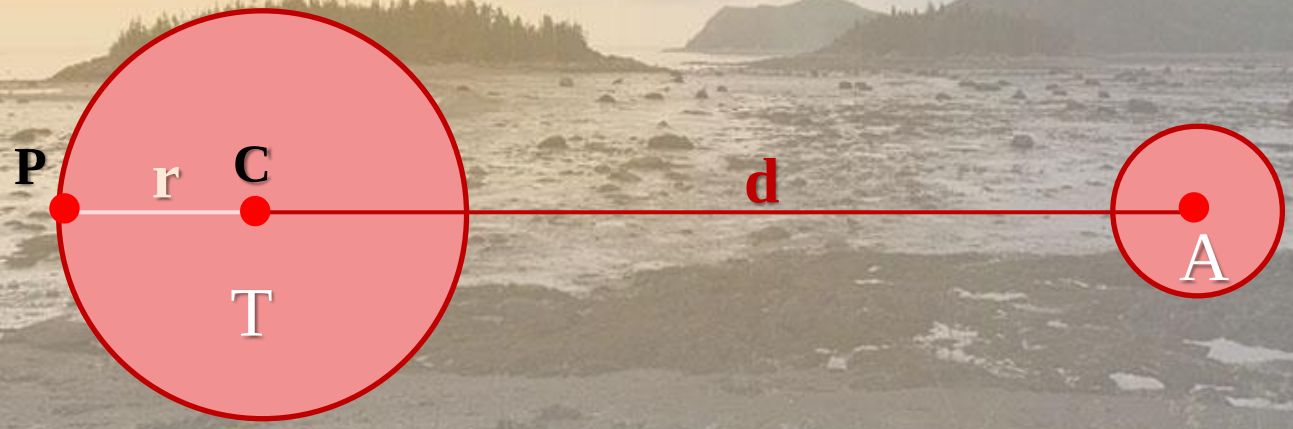


- Soit la force gravitationnelle de l'astre A appliquée au centre de la Terre (T) égale à :

$$\vec{F}_{G_C} = \frac{Gm_A}{d^2}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

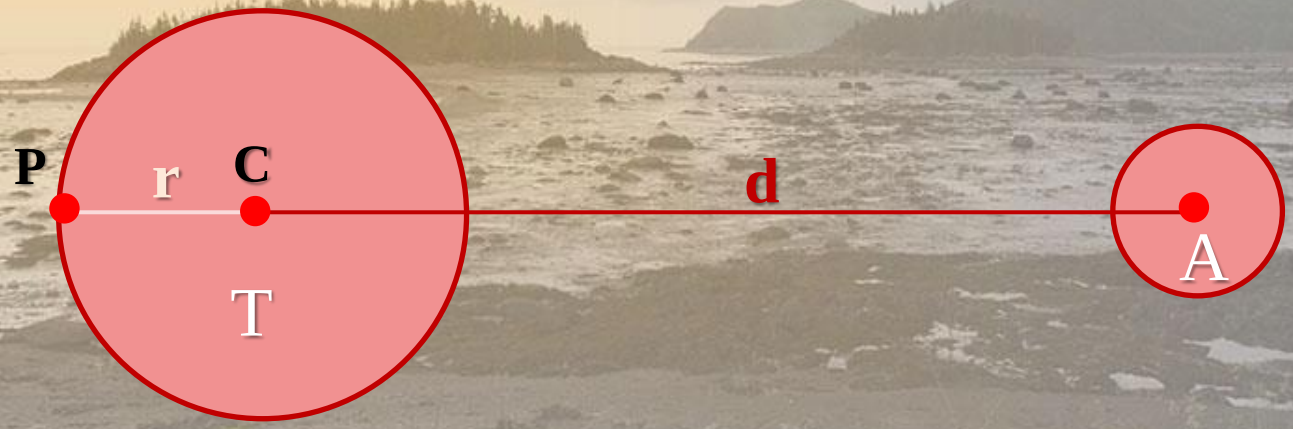


- La force gravitationnelle de l'astre (A) en P est égale à :

$$\vec{F}_{G_P} = \frac{Gm_A}{(d + r_T)^2}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

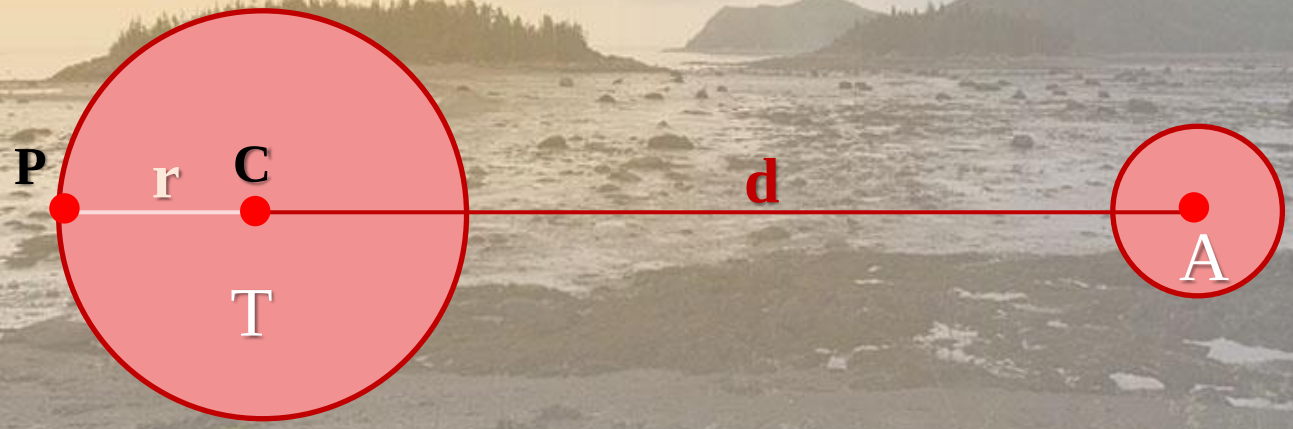


- Et ΔF en P par rapport à C égale :

$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = \frac{Gm_A}{(d+r_T)^2 - d^2} = Gm_A\left(\frac{1}{(d+r_T)^2 - d^2}\right)$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

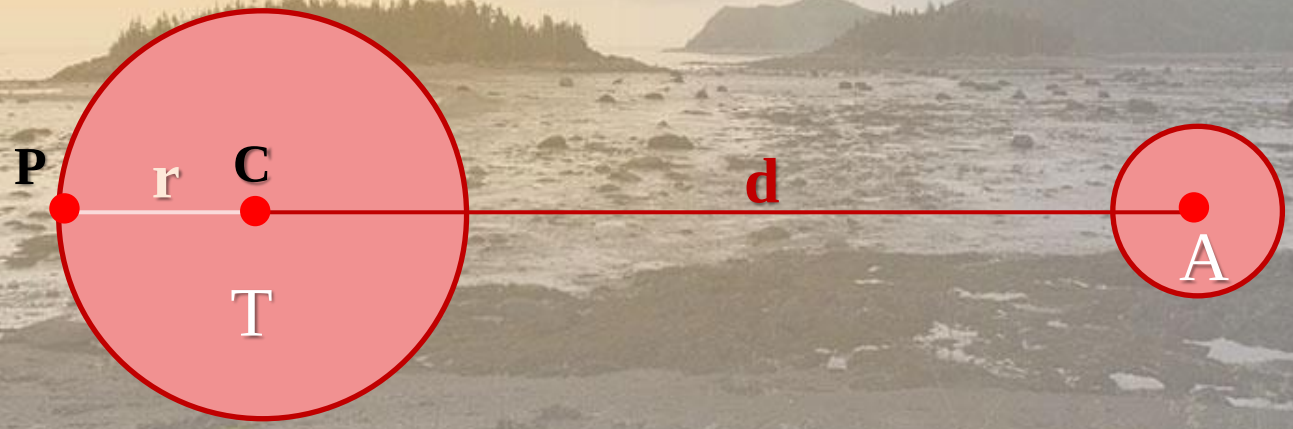


- Et ΔF en P par rapport à C égale :

$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = Gm_A\left(\frac{d^2-(d+r_T)^2}{d^2(d+r_T)^2}\right)$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

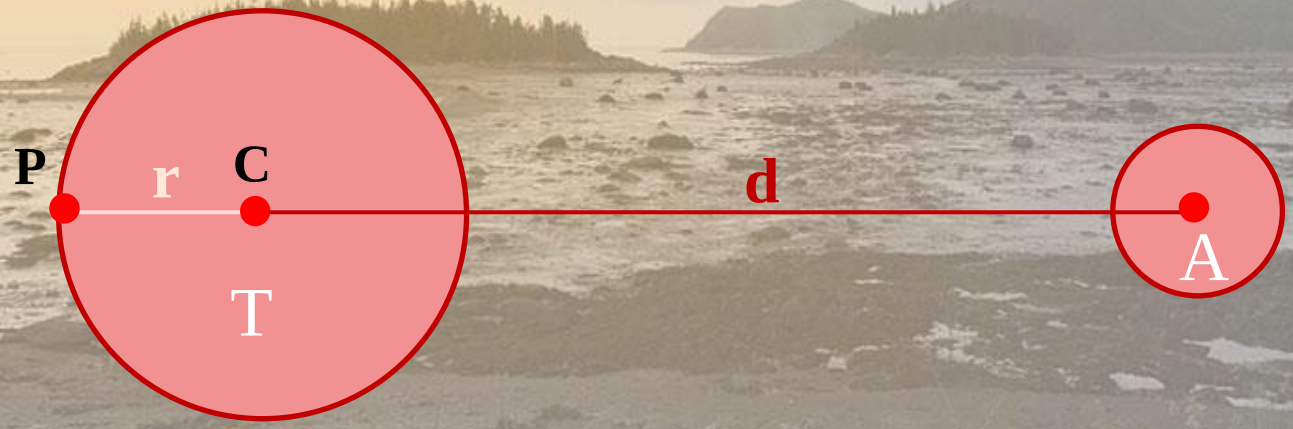


- Et ΔF en P par rapport à C égale :

$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = Gm_A\left(\frac{d^2-(d^2+2dr_T+r^2{}_T)}{d^2(d+r_T)^2}\right)$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

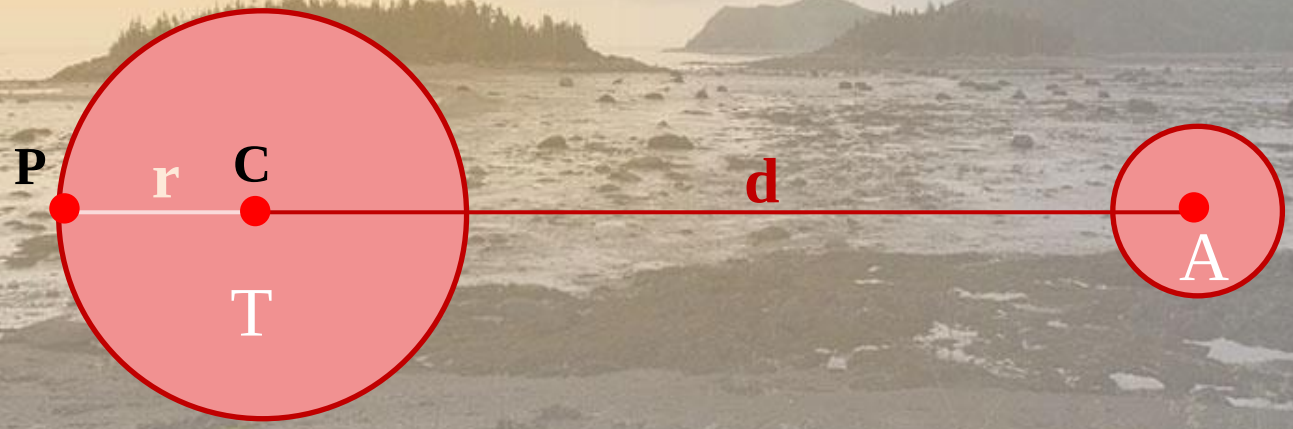


- Et ΔF en P par rapport à C égale :

$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = Gm_A\left(\frac{\cancel{d^2} - \cancel{d^2} - 2dr_T - r^2{}_T}{d^2(d+r_T)^2}\right)$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…



- Et ΔF en P par rapport à C égale :

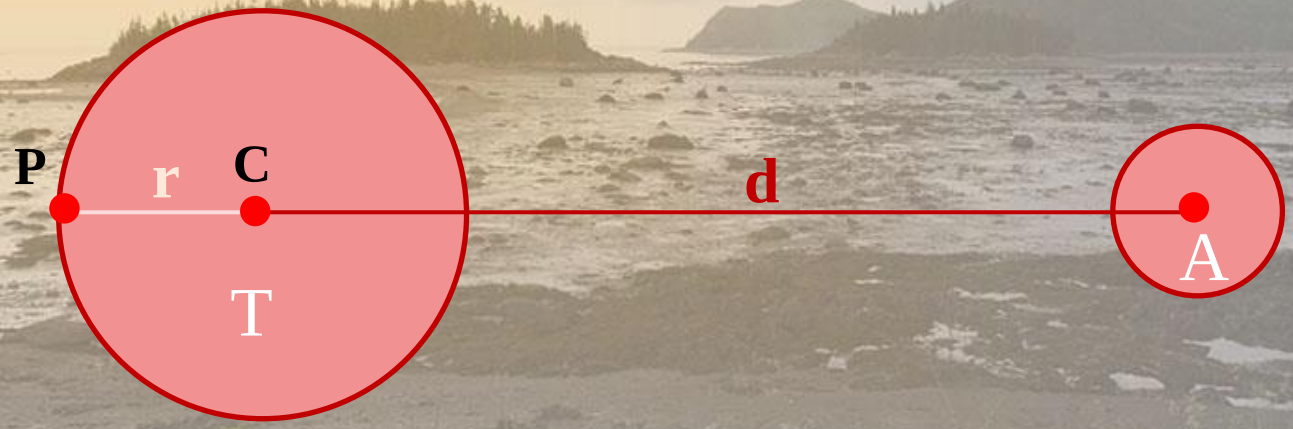
$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = Gm_A\left(\frac{-2dr_T - r^2{}_T}{d^2(d+r_T)^2}\right)$$

Or, $r << d$ ➡ $r^2 <<< d^2$

Et $d+r \cong d$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…

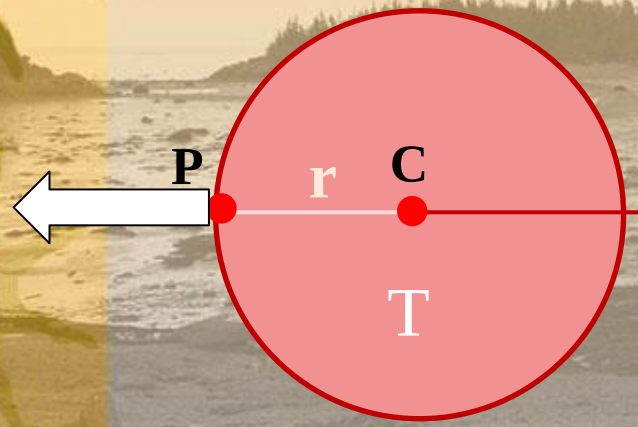


- Et ΔF en P par rapport à C égale :

$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = Gm_A\left(\frac{-2\cancel{d}r_T}{d^2 \bullet \cancel{d}}\right) = \boxed{-\frac{2Gm_Ar_T}{d^3}}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

★Un peu de Math.



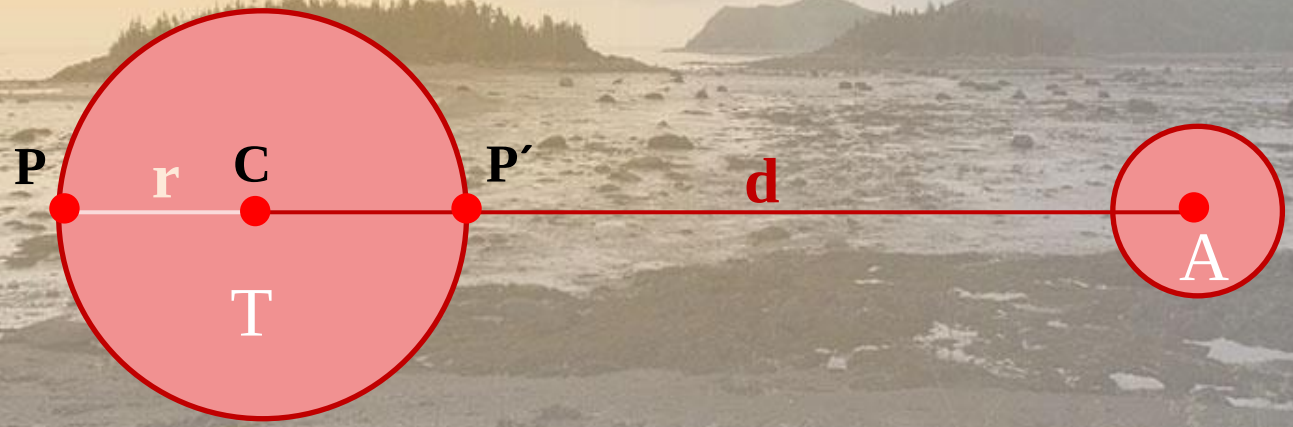
Or, $\vec{F}$ est un objet vectoriel : remarquez que le module est **négatif** et la force s'exprime donc comme un vecteur dirigé vers la gauche

➢ Et ΔF en P par rapport [illegible] égale :

$$\Delta\vec{F}_{P\to C} = Gm_A\left(\frac{-2\cancel{d}r_T}{d^2 \bullet \cancel{d}}\right) = -\frac{2Gm_Ar_T}{d^3}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Un peu de Math…



- On peut montrer que le point symétrique en P' a la même valeur numérique que P mais que son signe est inversé…

$$\Delta\vec{F}_{P'\to C} = \frac{2Gm_A r_T}{d^3}$$

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Et sans faire intervenir une pseudo composante centrifuge.

On observe…



On peut aussi démontrer mathématiquement que l'effet centrifuge est le même en tout point de la Terre et qu'il n'explique rien.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Quel est ce mystérieux *astre attracteur* ?
  - Deux astres maintiennent une distance relativement constante avec la Terre dans l'espace.
  - Et ces deux astres sont en interaction gravitationnelle intime avec la Terre :
    - Le Soleil autour duquel la Terre révolutionne.
    - La Lune qui lui tourne autour.



MARÉE ET ASTRONOMIE

Lune :

- ✓ Masse : $7{,}36 \times 10^{22}$ kg
- ✓ Distance : $3{,}84 \times 10^{8}$ m

Soleil :

- ✓ Masse : $1{,}98 \times 10^{30}$ kg
- ✓ Distance : $1{,}49 \times 10^{11}$ m

Soleil/Lune :

- ○ **Masse : $2{,}7 \times 10^{7}$**
- ○ **Distance : 389,6**

MARÉE ET ASTRONOMIE

	Soleil (N)	Lune (N)	Soleil/Lune
F_G	$3{,}52 \times 10^{22}$	$1{,}98 \times 10^{20}$	
F_M	$5{,}05 \times 10^{-7}$	$1{,}1 \times 10^{-6}$	

MARÉE ET ASTRONOMIE

	Soleil (N)	Lune (N)	Soleil/Lune
F_G $G\frac{m_1 m_2}{d^2}$	$3{,}52 \times 10^{22}$	$1{,}98 \times 10^{20}$	**177**
F_M	$5{,}05 \times 10^{-7}$	$1{,}1 \times 10^{-6}$	

- F_G du Soleil >>>F_G de la Lune

MARÉE ET ASTRONOMIE

	Soleil (N)	Lune (N)	Soleil/Lune
F_G	$3{,}52 \times 10^{22}$	$1{,}98 \times 10^{20}$	
F_M $\frac{2Gm_A r_T}{d^3}$	$5{,}05 \times 10^{-7}$	$1{,}1 \times 10^{-6}$	**0,45**

- F_M du Soleil $< F_M$ de la Lune



MARÉE ET ASTRONOMIE

	Soleil (N)	Lune (N)	Soleil/Lune
F_G $G\frac{m_1 m_2}{d^2}$	$3{,}52 \times 10^{22}$	$1{,}98 \times 10^{20}$	177
F_M $\frac{2Gm_A r_T}{d^3}$	$5{,}05 \times 10^{-7}$	$1{,}1 \times 10^{-6}$	0,45



- La Lune exerce sur la Terre un effet de marée qui est 2,18 fois supérieur à celui du Soleil !



MARÉE ET ASTRONOMIE

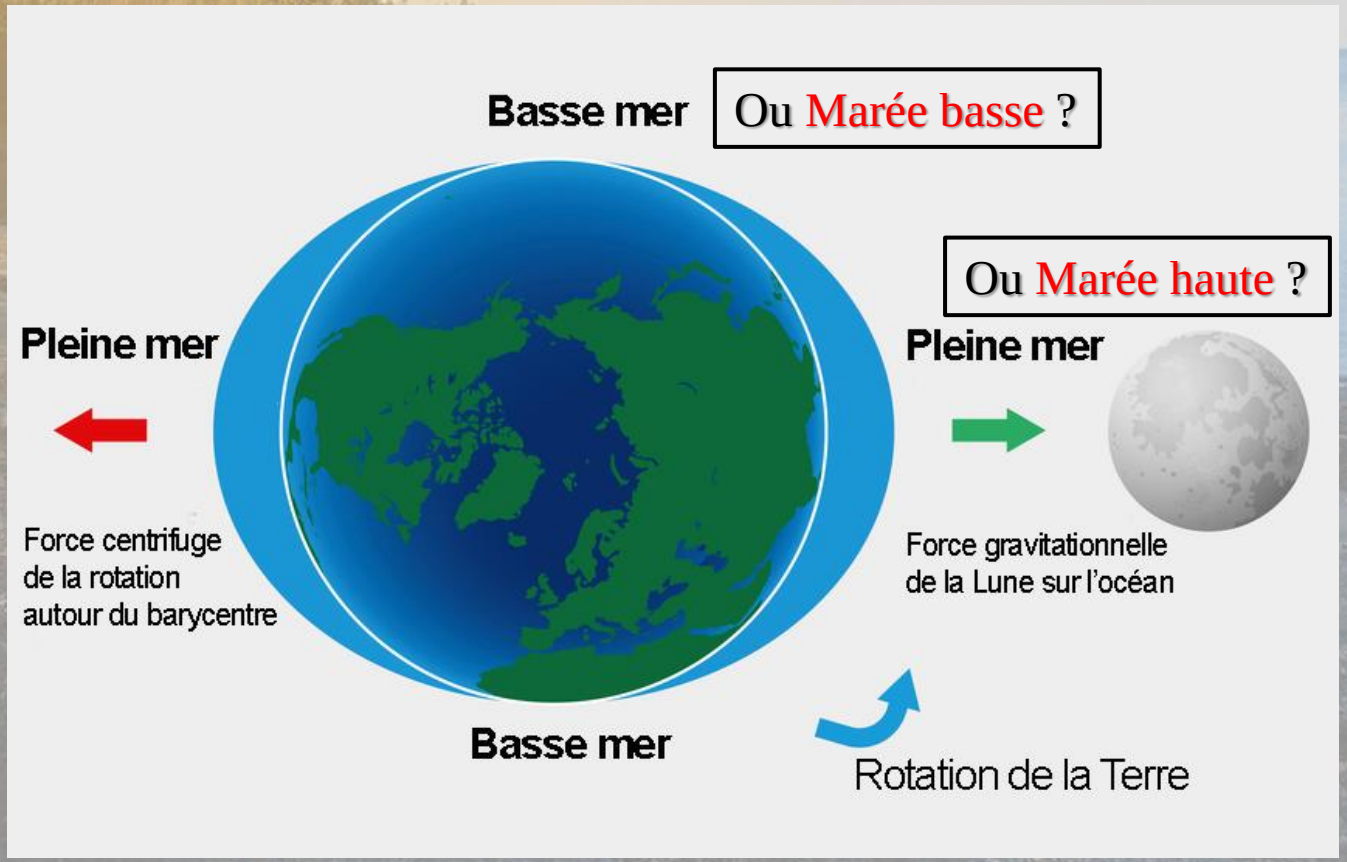
- Séléné la pâle



MARÉE ET ASTRONOMIE

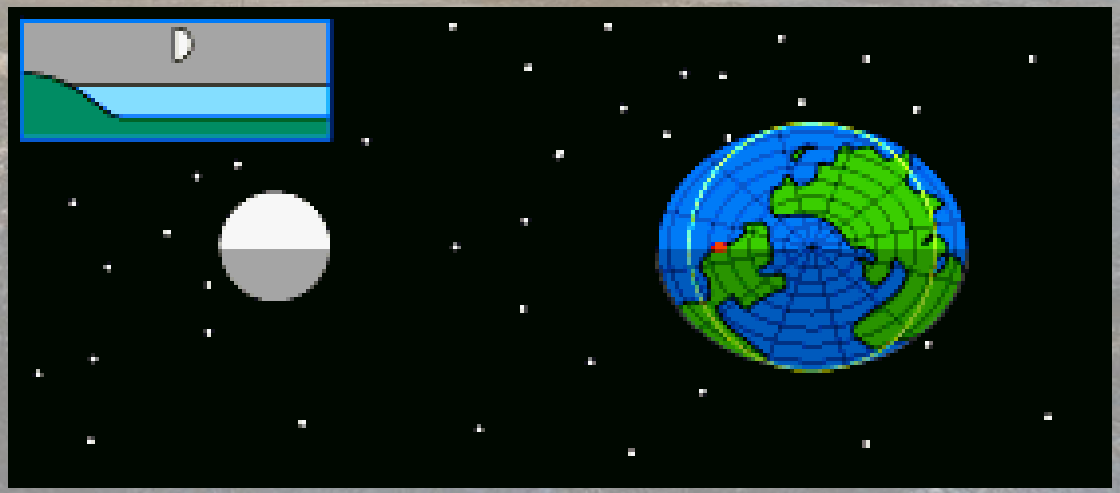
- Séléné la pâle

TERMINOLOGIE



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - “Et pourtant elle tourne !” Galilée
  - La rotation de la Terre amène systématiquement chaque point du globe “sous” le bourrelet océanique.



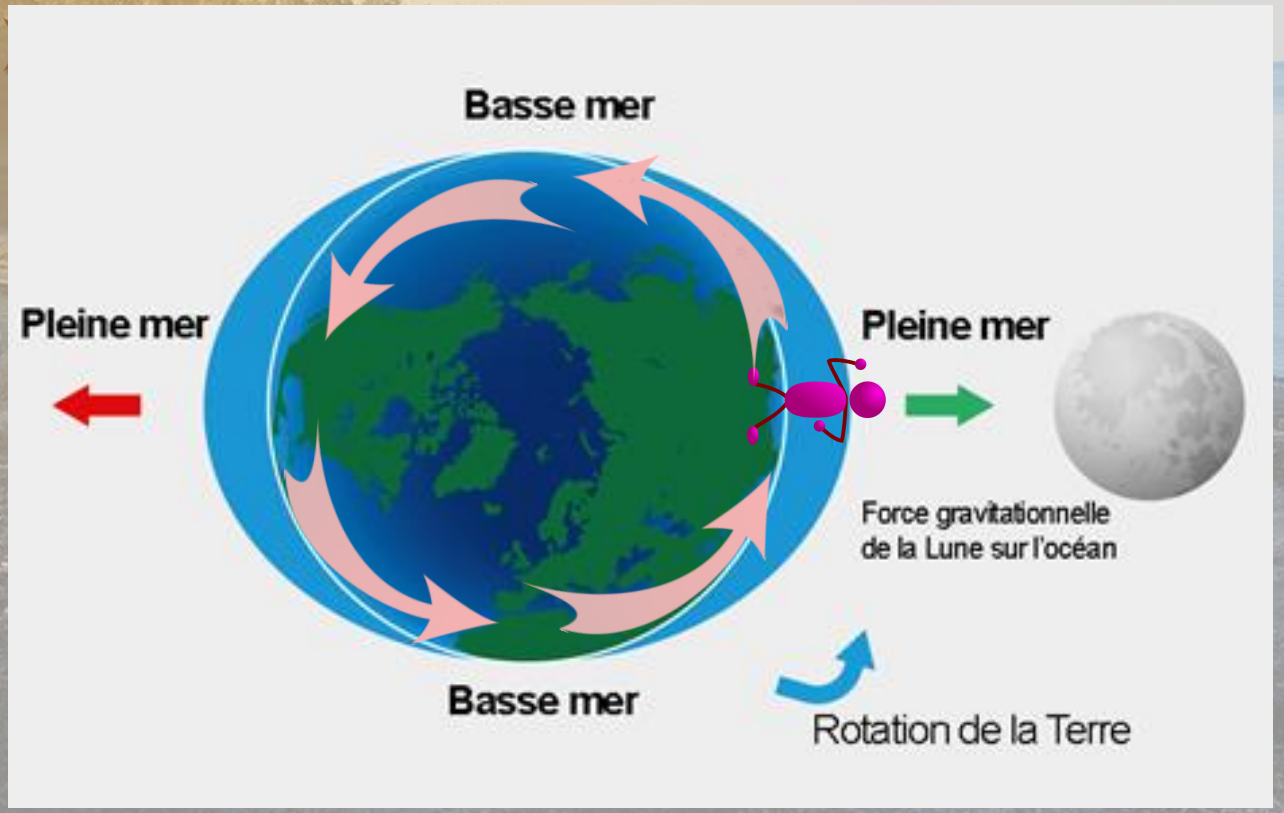
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - Comme la Terre effectue une rotation complète en 24 heures et qu'il y a deux bourrelets océaniques, nous obtiendrons donc (en théorie) :
    - Deux Pleines Mers et
    - Deux Basses Mers

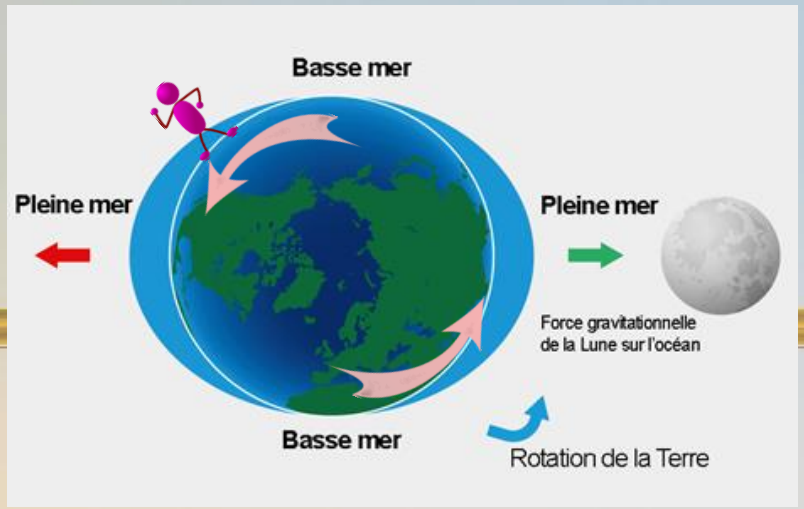
      par jour.

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle

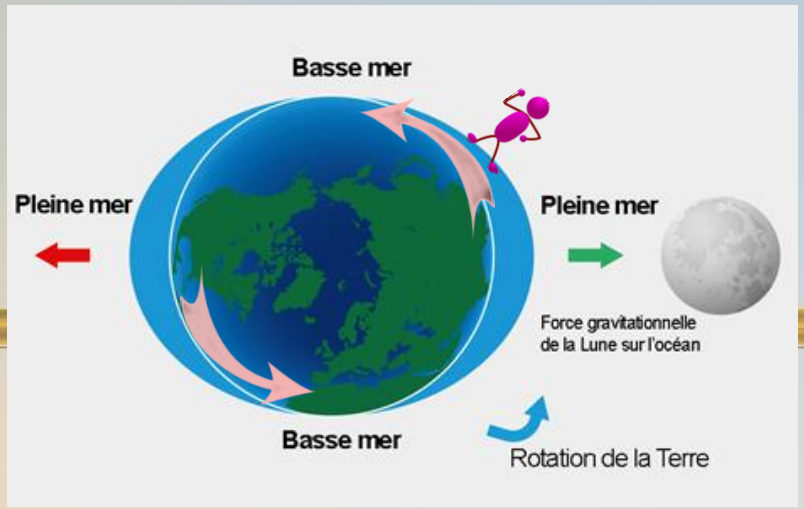


MARÉE ET



- Séléné la pâle
  - Lorsqu'on s'approche du bourrelet, la marée est montante. On parle de Flux ou de Montant de la marée.

MARÉE ET



- Séléné la pâle
  - Lorsqu'on s'approche du bourrelet, la marée est montante. On parle de Flux ou de Montant de la marée.
  - Lorsqu'on s'éloigne du bourrelet, la marée est baissante. On parle alors de Reflux ou de Jusant de la marée.

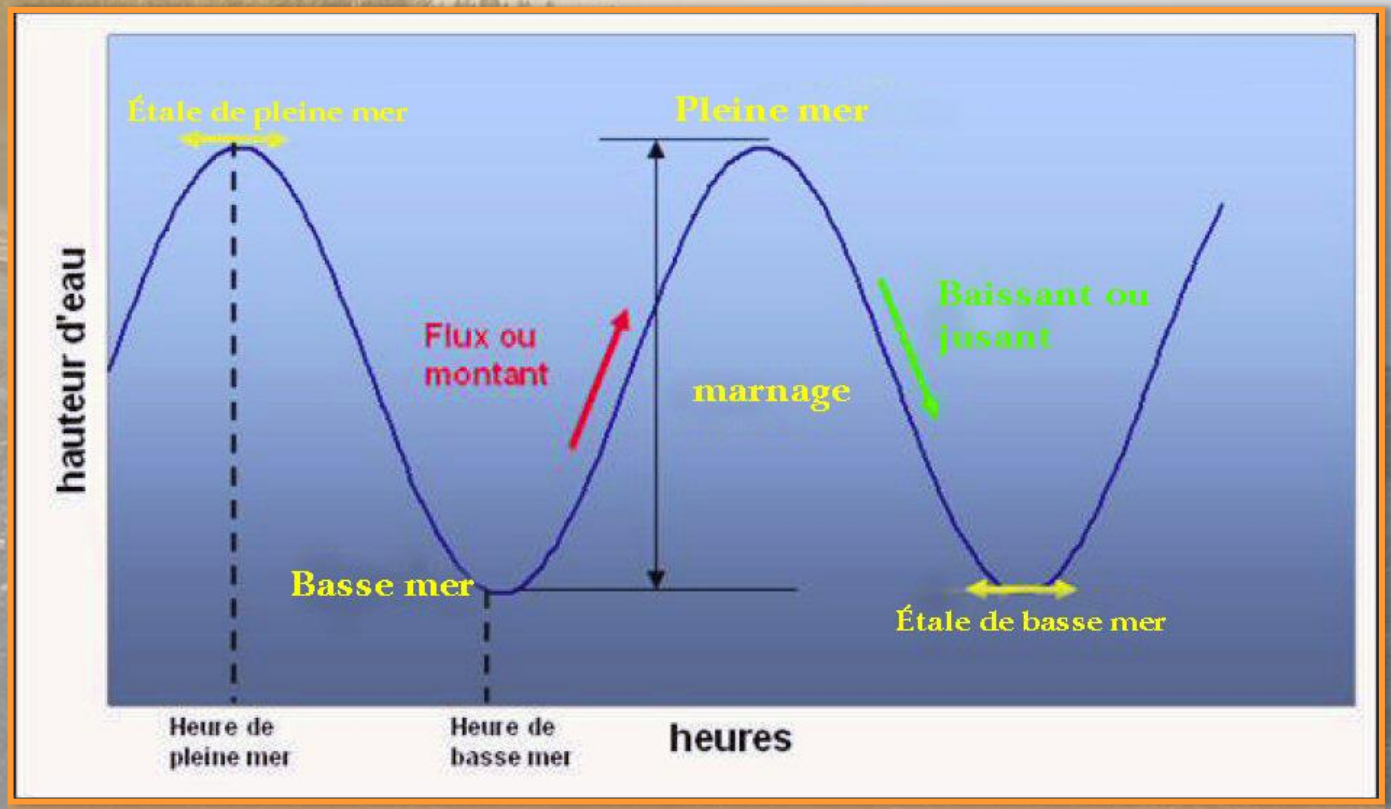


MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - On appelle Marnage l'amplitude du changement de niveau entre la Basse mer et la Pleine mer ➡ Hauteur de marée.
  - On appelle Estran la zone de terre laissée à découvert par la basse mer.

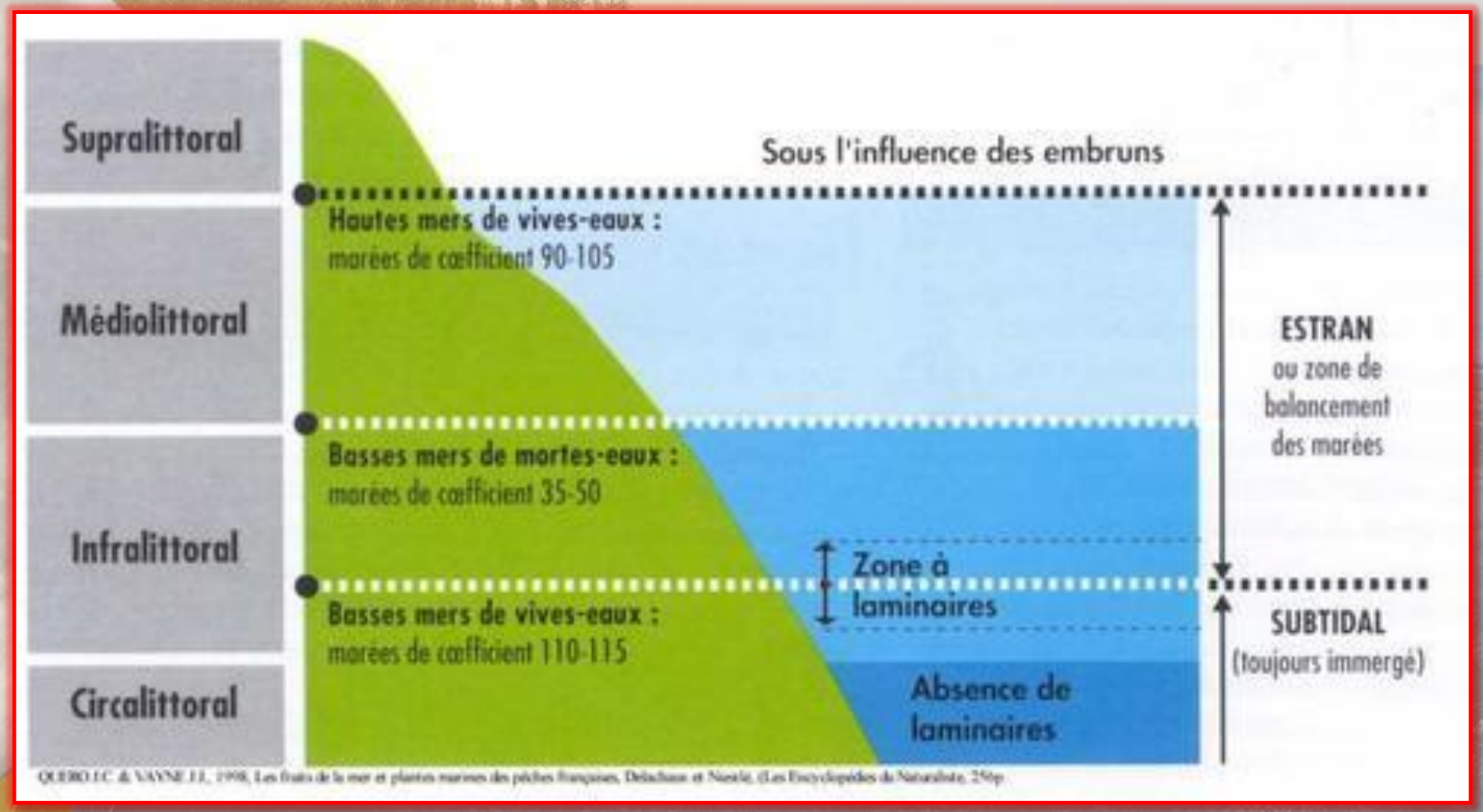
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle

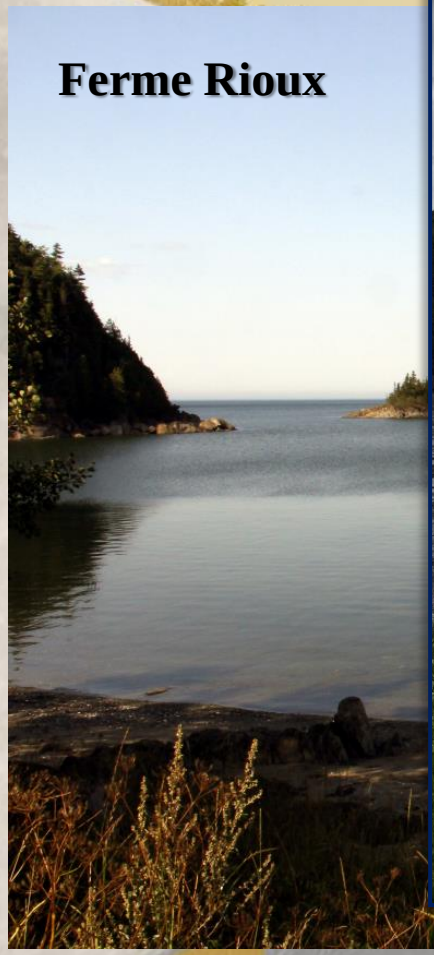


MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle



MARÉE ET ASTRONOMIE

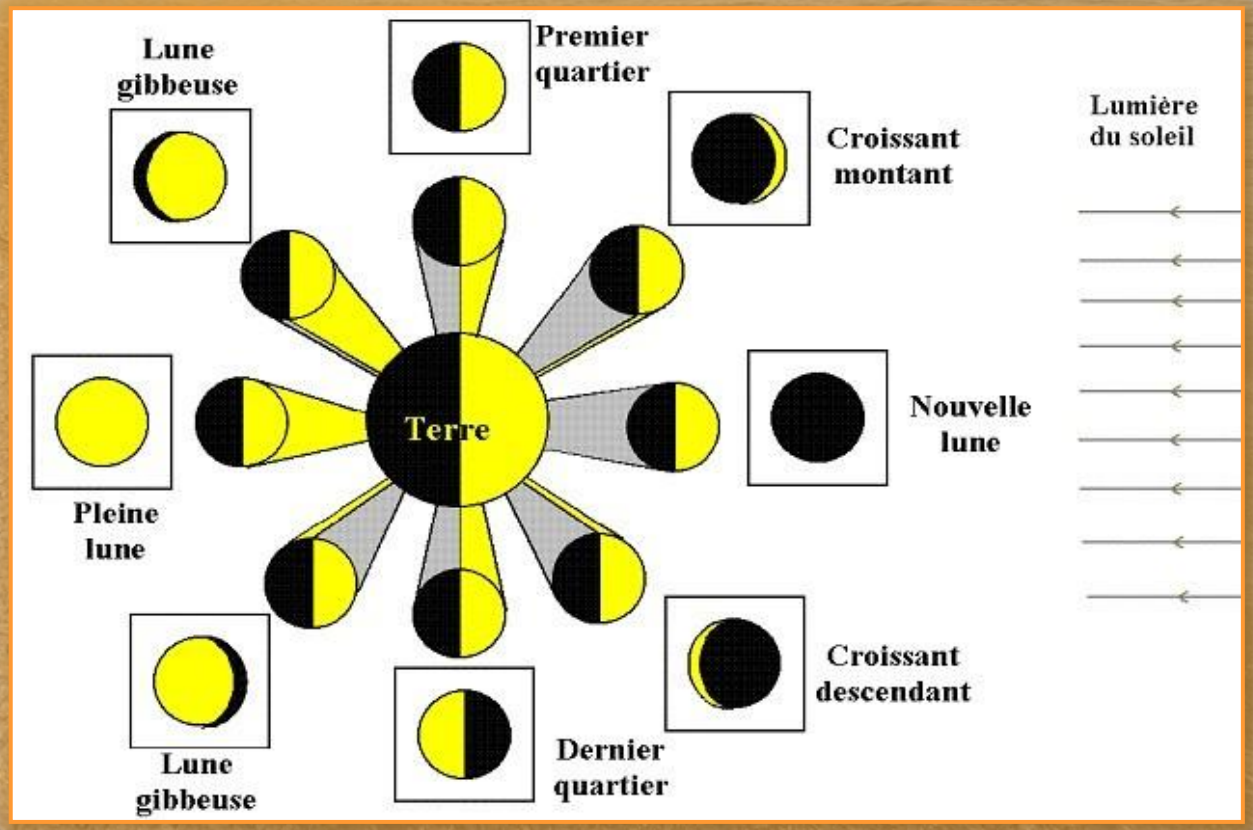


Ferme Rioux



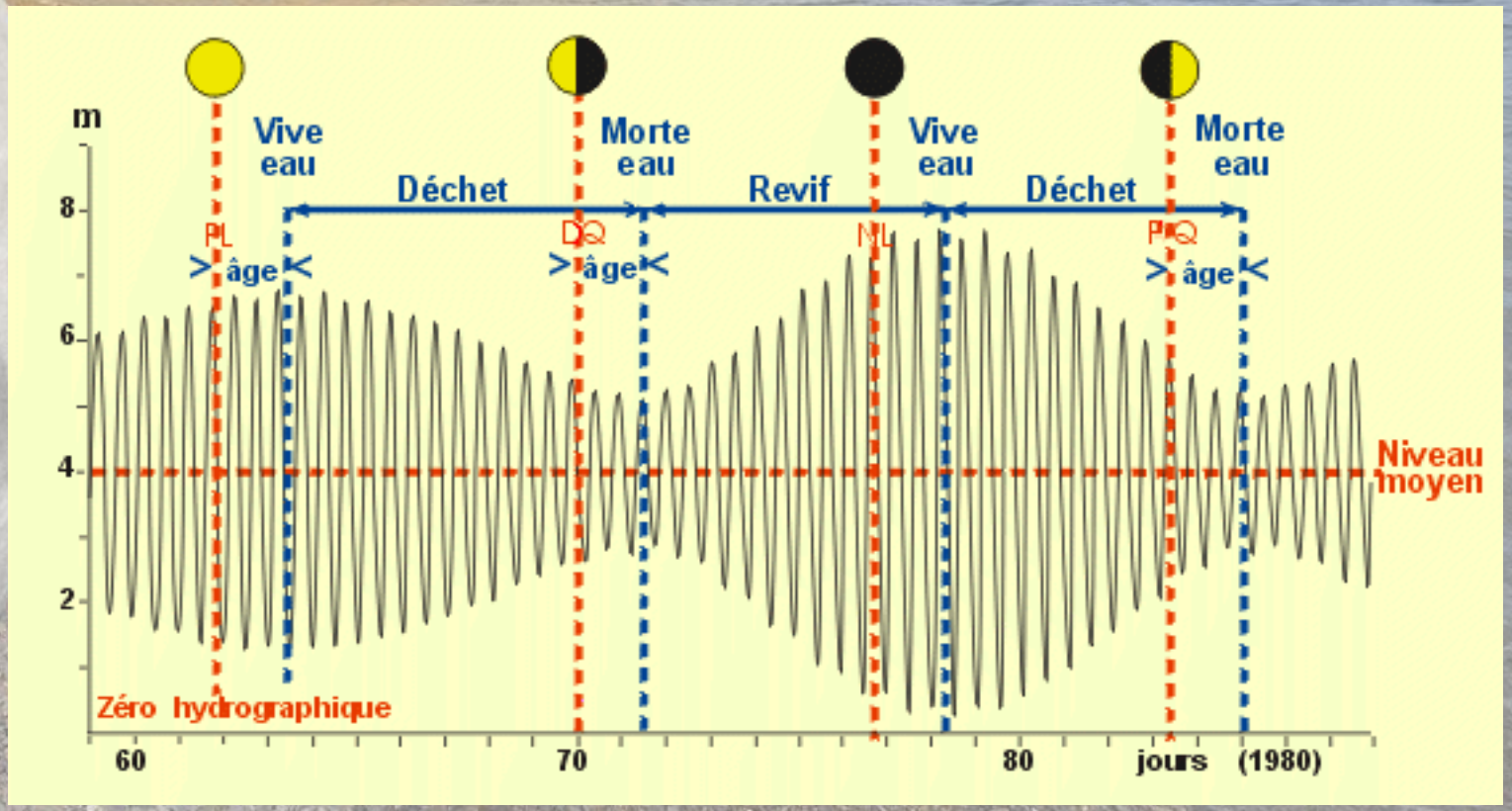
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Les phases de la Lune influent sur le marnage.



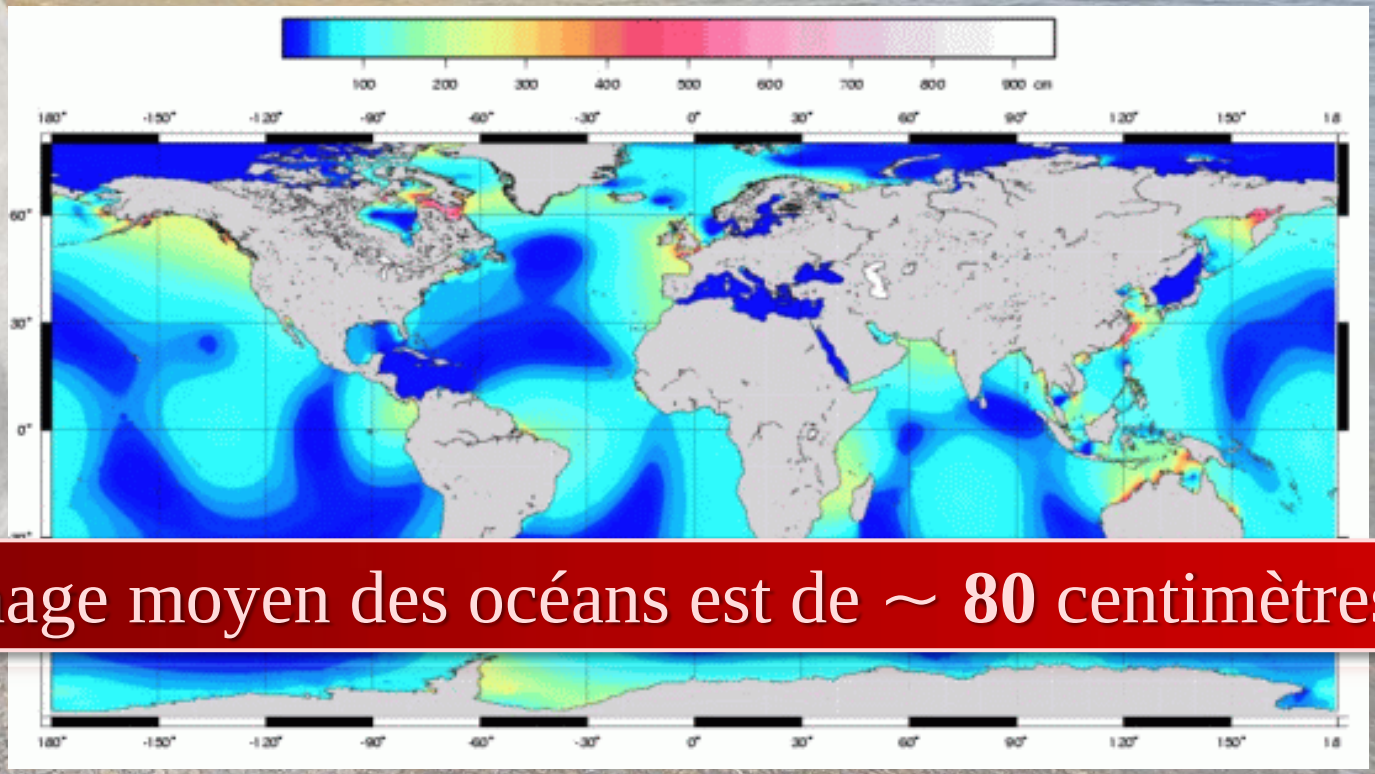
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Les phases de la Lune influent sur le marnage.



MARÉE ET ASTRONOMIE

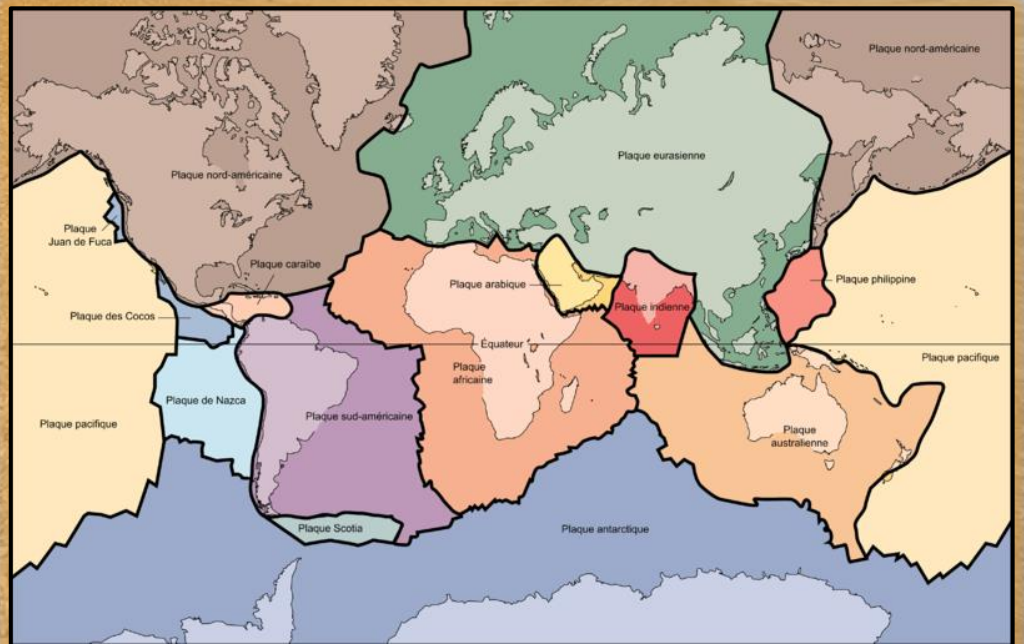
- Les phases de la Lune influent sur le marnage.



Le marnage moyen des océans est de ~ **80** centimètres

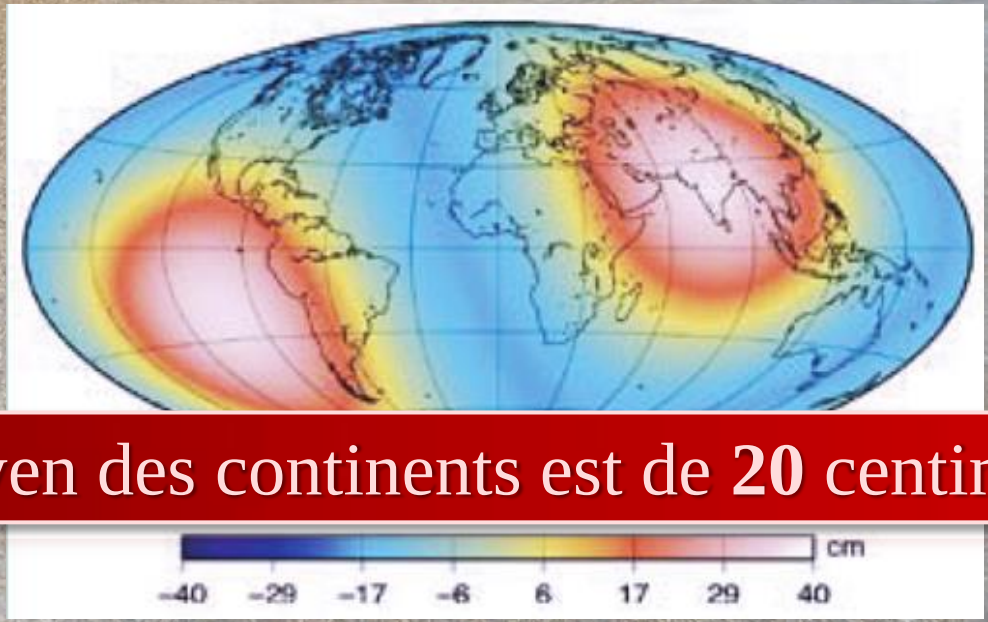
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Les phases de la Lune influent sur le marnage.
  - Les continents aussi subissent un effet de marée (marées terrestres ou solides)



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Les phases de la Lune influent sur le marnage.
  - Les continents aussi subissent un effet de marée (marées terrestres ou solides)

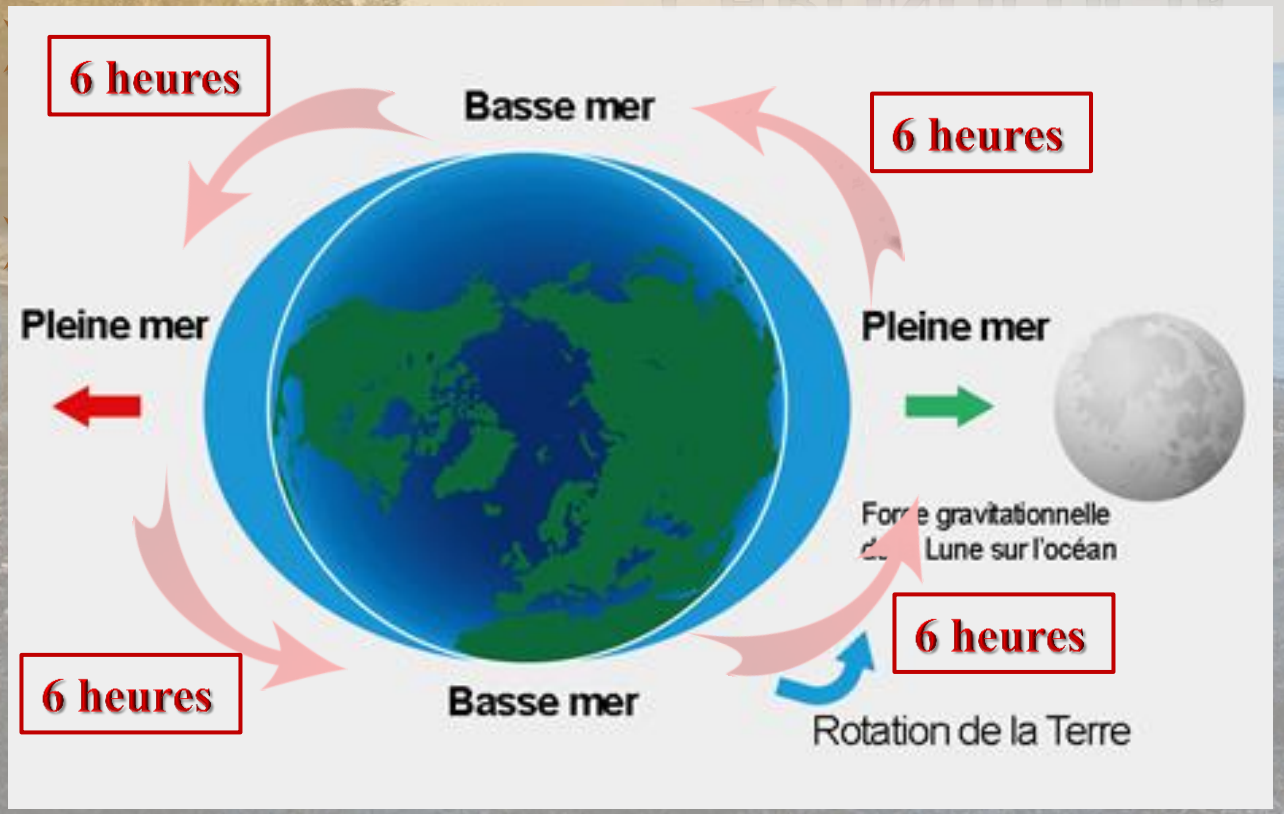


Le marnage moyen des continents est de **20** centimètres

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle

CHRONOLOGIE





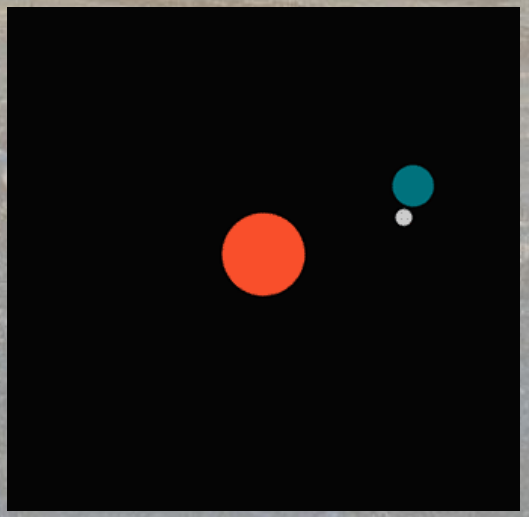
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - Or, ce n'est pas ce qu'on observe.
  - Ce qu'on observe, c'est un *retard* moyen du retour quotidien des marées de ± 50 minutes…

Pourquoi ?

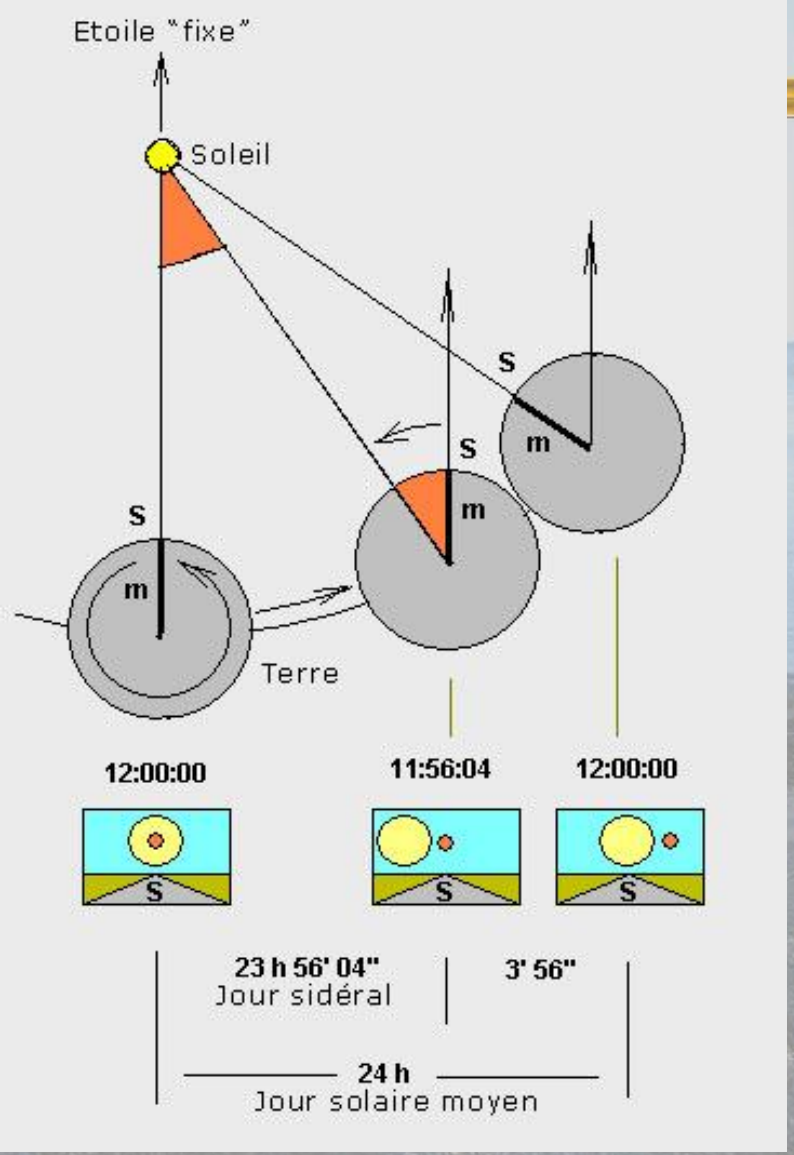
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - La réponse réside dans l'interaction de deux mouvements astraux :
    - La révolution de la Terre autour du Soleil.
    - La révolution de la Lune autour de la Terre.



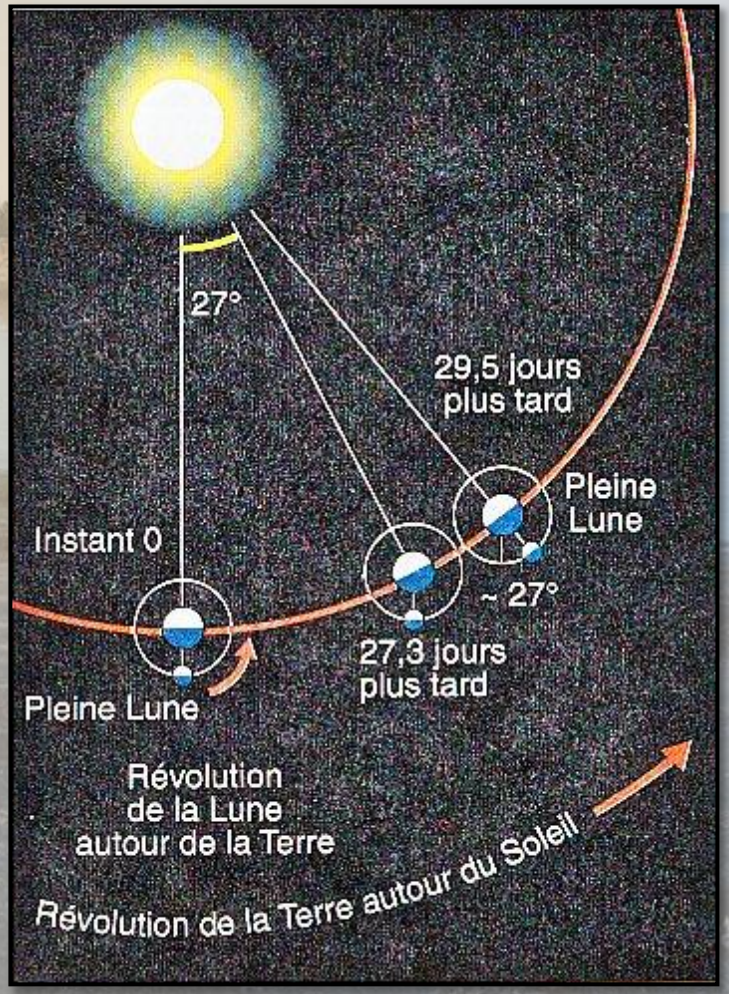
MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - La Terre tourne autour du Soleil de 360° en 365 jours ➡ soit ~ 1° par jour.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - La Lune tourne autour de la Terre en 27,32 jours ➡ soit ~ 13° par jour.



- Ces deux mouvements cumulés ***retardent*** le retour quotidien des marées de ≈ **50 minutes** par jour.

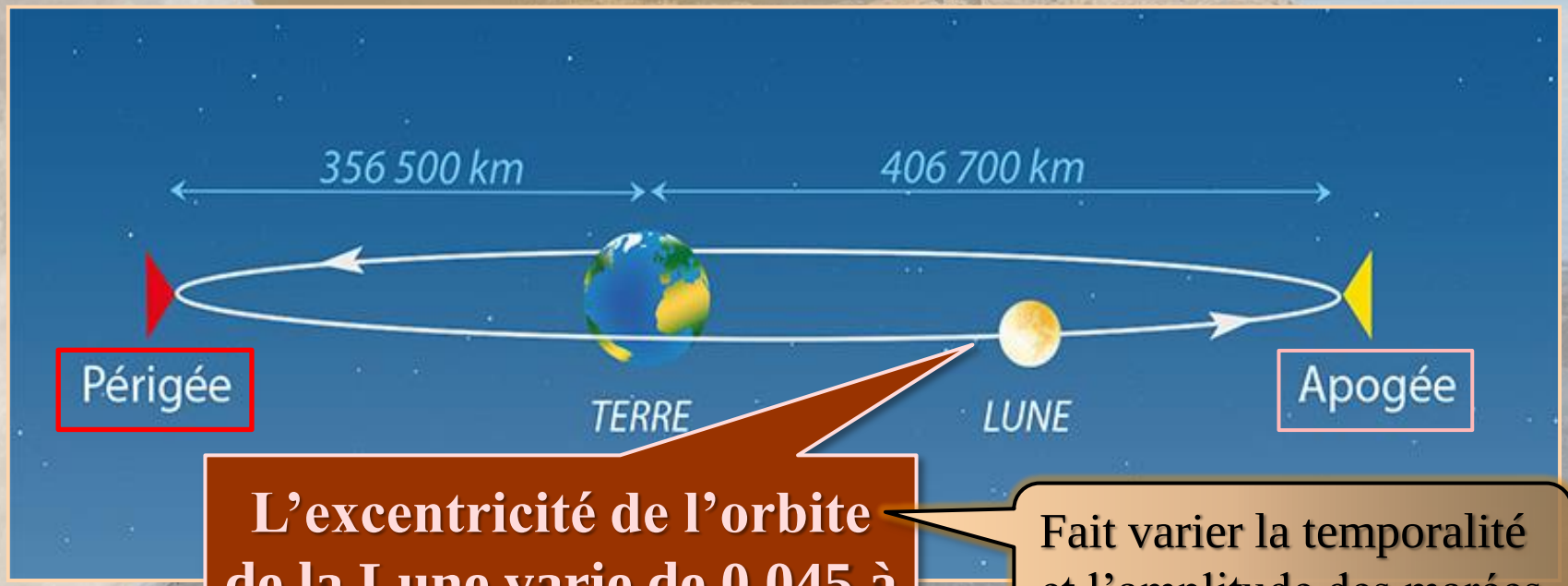


MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Séléné la pâle**
  - **Pour compliquer encore plus l'influence de la Lune sur les marée, il faut dire :**
    - Que l'orbite de la Lune est elliptique.
    - Que le plan de l'orbite de la Lune est incliné sur l'écliptique et l'équateur terrestre.
    - Et que l'orbite de la Lune décrit deux mouvements de rotation dans l'espace.

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - L'orbite de la Lune est elliptique.



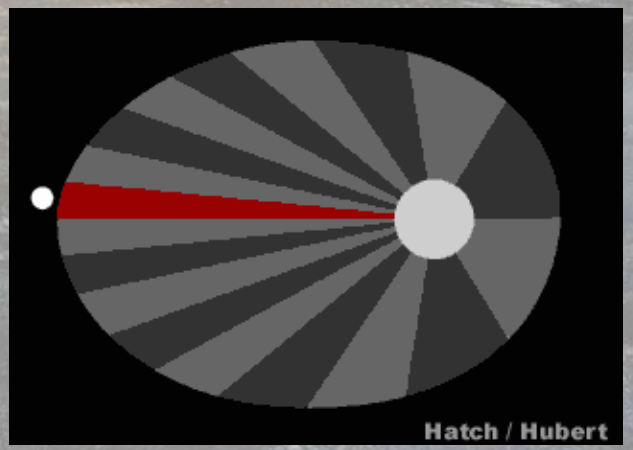
L'excentricité de l'orbite de la Lune varie de 0,045 à 0,065 en 206 jours.

Fait varier la temporalité et l'amplitude des marées

MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Séléné la pâle**
  - **L'orbite de la Lune est elliptique.**
    - 2e loi de Kepler : Les *planètes* balaient des aires égales dans des temps égaux.
    - La Lune va moins vite sur son orbite à l'apogée qu'au périgée.

L'ellipticité de l'orbite de la Lune fait varier le décalage quotidien des marées de 30 à 90 minutes.



MARÉE ET ASTRONOMIE

RIMOUSKI, QUÉBEC; JUIN 2017 U.T.C.- 04Heures 00

jeu	B.M.	02 h 13	01,20 m		ven	B.M.	01 h 11	01,40 m	
	P.M.	08 h 32	03,70 m			P.M.	07 h 34	03,48 m	
	B.M.	15 h 11	00,98 m		16	B.M.	14 h 04	01,17 m	
	P.M.	21 h 19	03,27 m			P.M.	20 h 16	03,12 m	
ven	B.M.	03 h 26	01,30 m		sam	B.M.	02 h 11	01,43 m	
	P.M.	09 h 39	03,48 m			P.M.	08 h 31	03,35 m	
2	B.M.	16 h 13	01,08 m		17	B.M.	14 h 58	01,20 m	
	P.M.	22 h 24	03,31 m			P.M.	21 h 15	03,23 m	
sam	B.M.	04 h 42	01,30 m		dim	B.M.	03 h 24	01,39 m	
	P.M.	10 h 46	03,34 m			P.M.	09 h 36	03,27 m	
3	B.M.	17 h 11	01,12 m		18	B.M.	15 h 58	01,17 m	
	P.M.	23 h 25	03,43 m			P.M.	22 h 17	03,41 m	

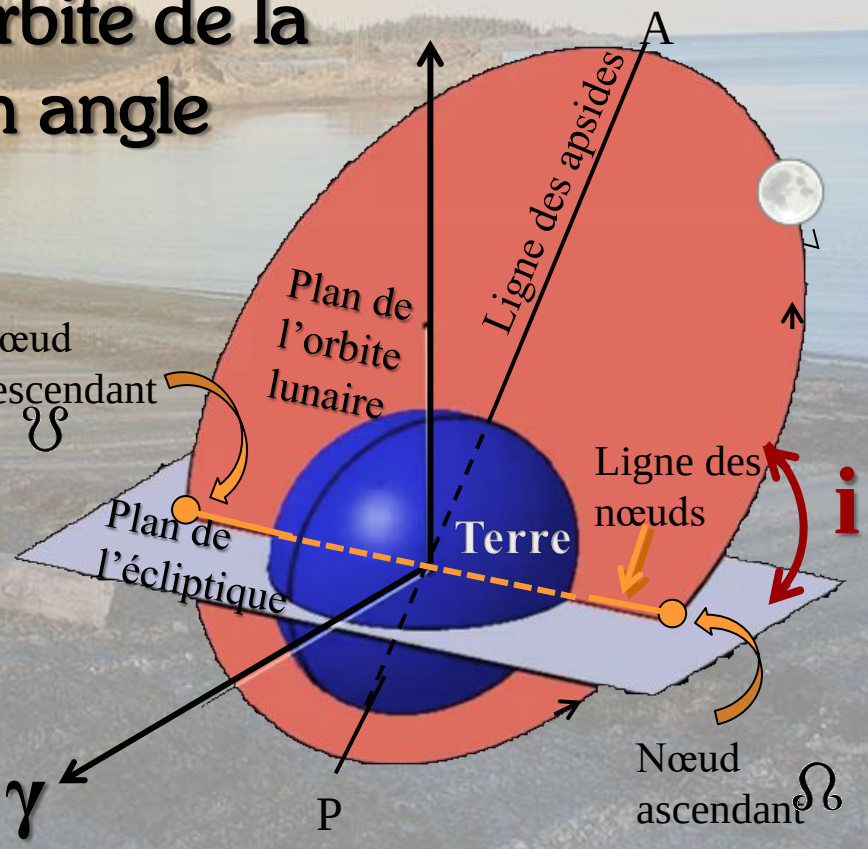
67 minutes

L'ellipticité de l'orbite de la Lune fait varier le décalage quotidien des marées de 30 à 90 minutes.

MARÉE ET ASTRONOMIE

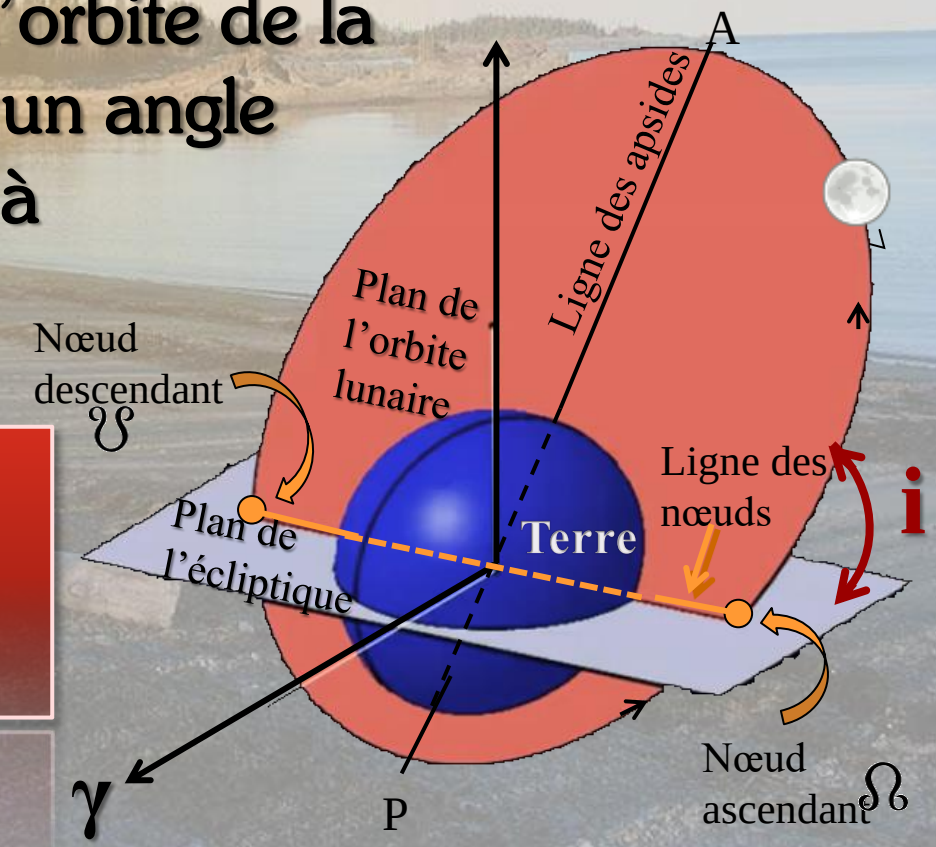
- Séléné la pâle
  - Le plan de l'orbite de la Lune décrit un angle par rapport à l'écliptique.

- La valeur de l'angle d'inclinaison de l'orbite de la Lune varie de 5° à 5,3° sur une période de 173 jours.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - Le plan de l'orbite de la Lune décrit un angle par rapport à l'écliptique.



Plus la déclinaison de la Lune est faible, plus le marnage est important.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle
  - Deux autres mouvements de l'orbite lunaire.
    - Rotations rétrograde de l'axe des apsides (Argument du périastre (ω)) Cycle de 8,85 ans. **Mois anomalistique**
    - Rotation antérograde de la ligne des nœuds (Longitude du nœud ascendant (Ω)) Cycle de 18,61 ans) **Mois draconitique**



MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Séléné la pâle**
  - Tous ces mouvements déterminent le cycle du Saros de 6 585,32 jours ou 18 ans 11 jours 7 heures et 43 minutes.
  - Il influence l'**amplitude** des marées :

- **Pendant 9 ans (2006-2015), le niveau de la Pleine mer a ⬆ de 3%/an.**
- **Pendant 9 ans (2015-2024), le niveau de la Pleine mer va ⬇ de 3%/an.**



MARÉE ET ASTRONOMIE

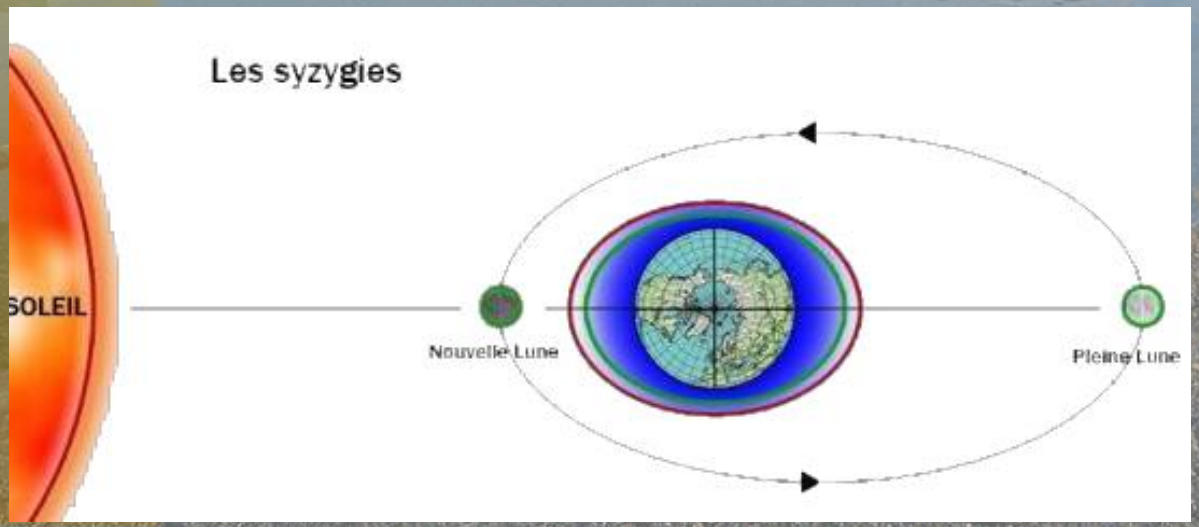
- **Séléné la pâle**
  - Tous ces mou
    cycle du Sar
    18 ans 11 jou
  - Il influence l'**ampli e** des marées :

Ce mouvement de la mer est de **50 cm** au cours du cycle du Saros.

- **Pendant 9 ans (2006-2015), le niveau de la Pleine mer a ⬆ de 3%/an.**
- **Pendant 9 ans (2015-2024), le niveau de la Pleine mer va ⬇ de 3%/an.**

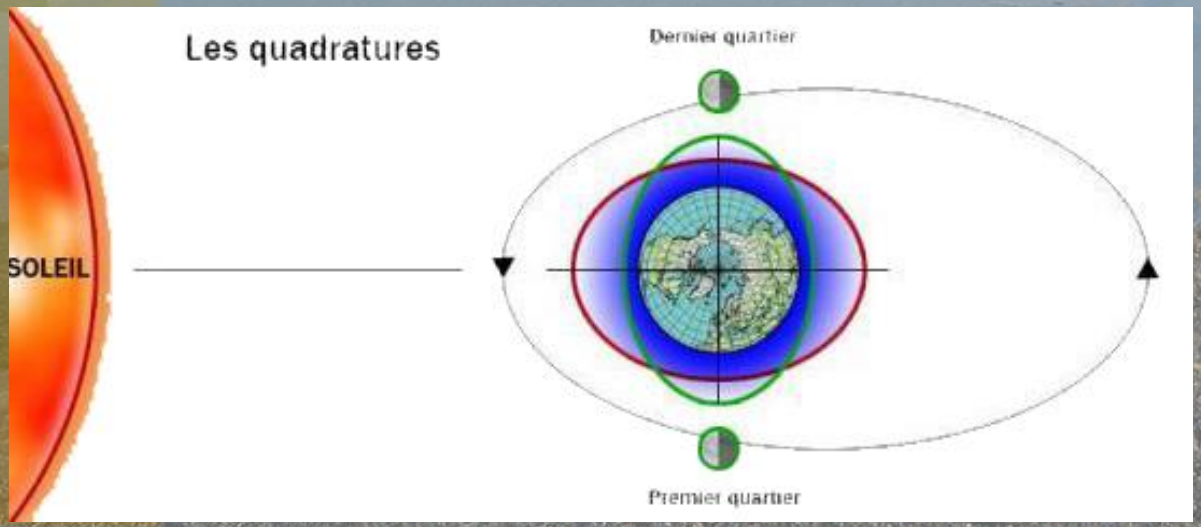
MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Hélios le radieux**
  - Le Soleil exerce une force de marée sur la Terre, équivalente à **46%** de celle de la Lune.
    - Les astres peuvent être en *Syzygie*.



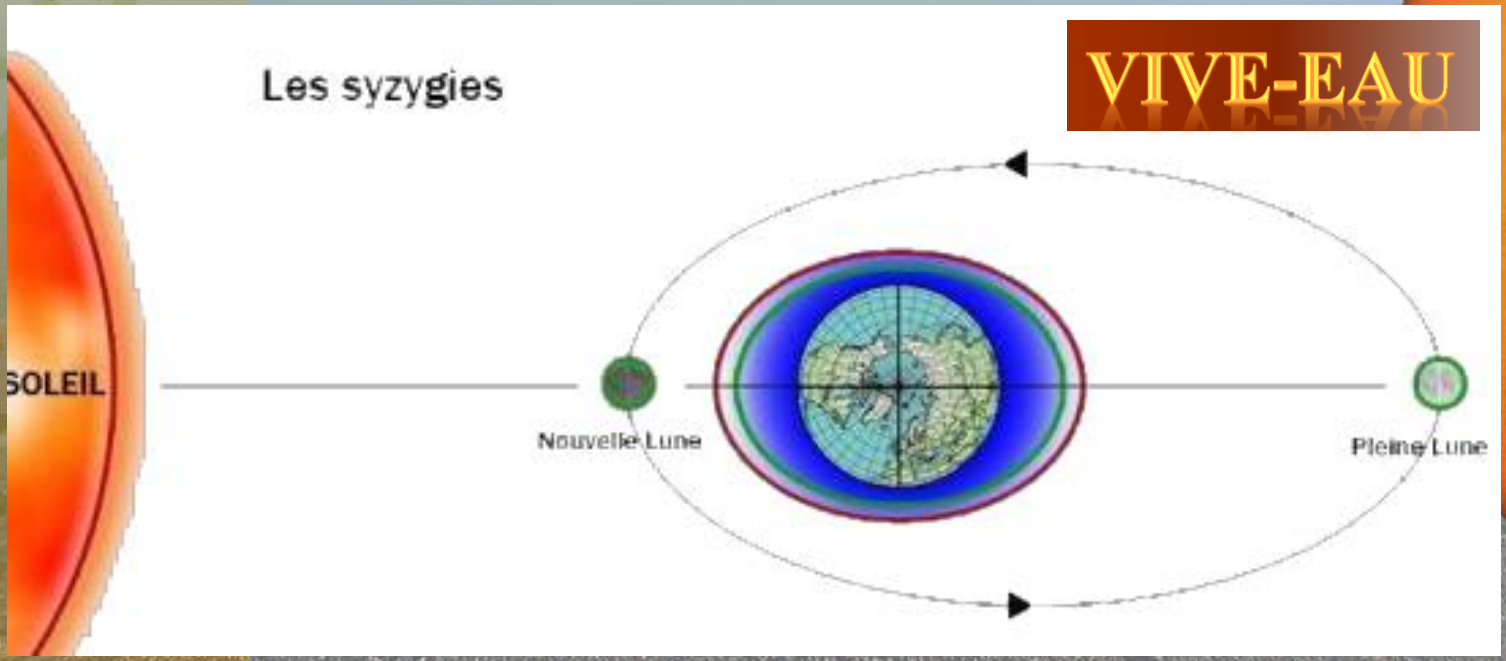
MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Hélios le radieux**
  - Le Soleil exerce une force de marée sur la Terre, équivalente à **46%** de celle de la Lune.
    - Les astres peuvent être en *Quadrature*.



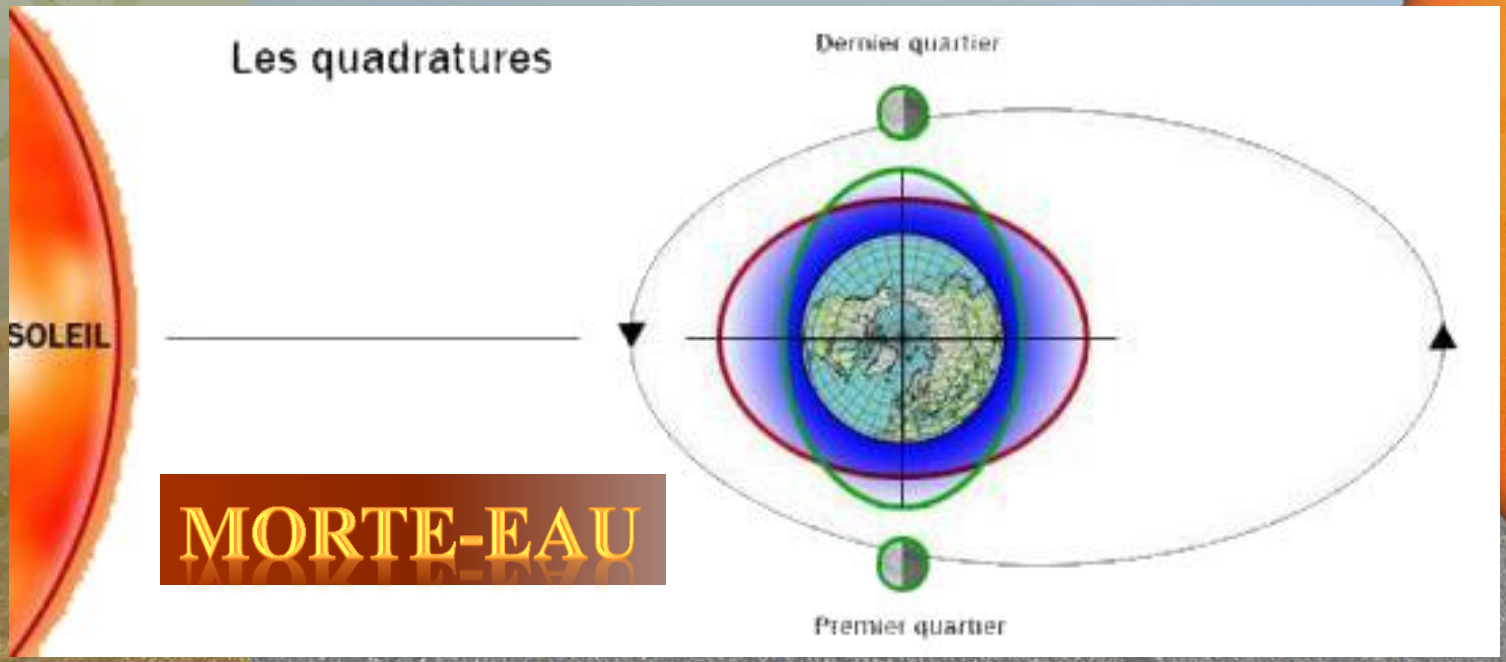
MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Hélios le radieux**
  - En syzygie, les $\overrightarrow{F_G}$ de la Lune et du Soleil se conjuguent ➡ *Grandes marées* (?)



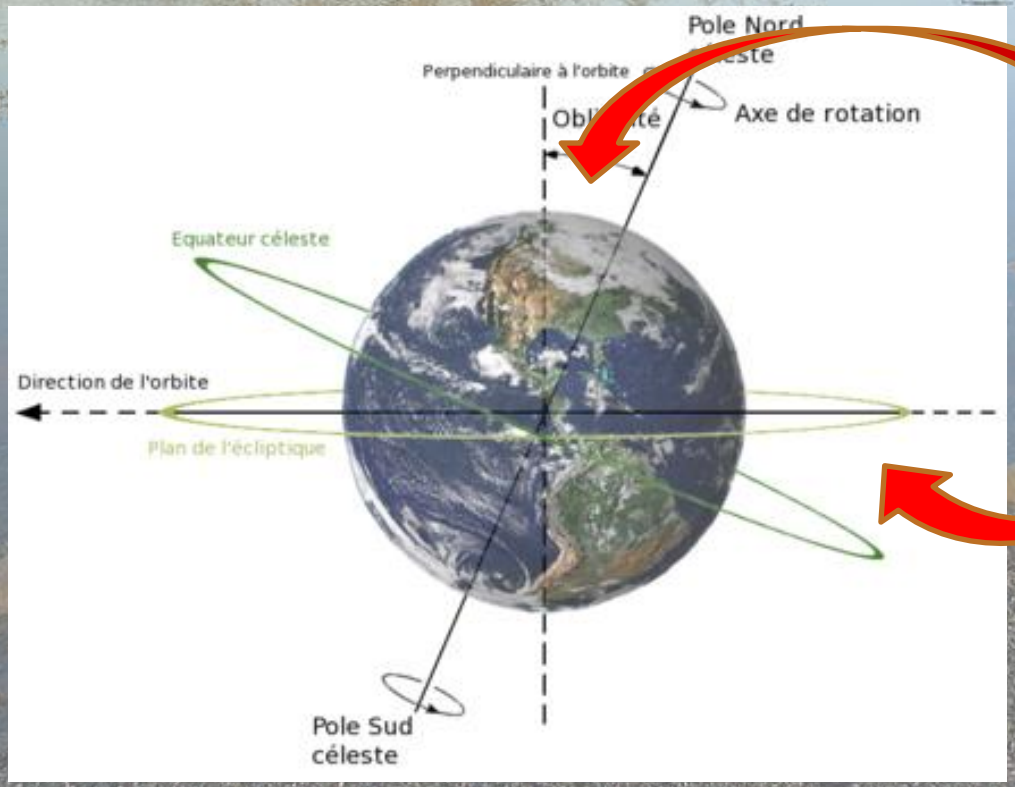
MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Hélios le radieux**
  - En quadrature, les $\overrightarrow{F_G}$ de la Lune et du Soleil se soustraient ➡ *Petites marées* (?)



MARÉE ET ASTRONOMIE

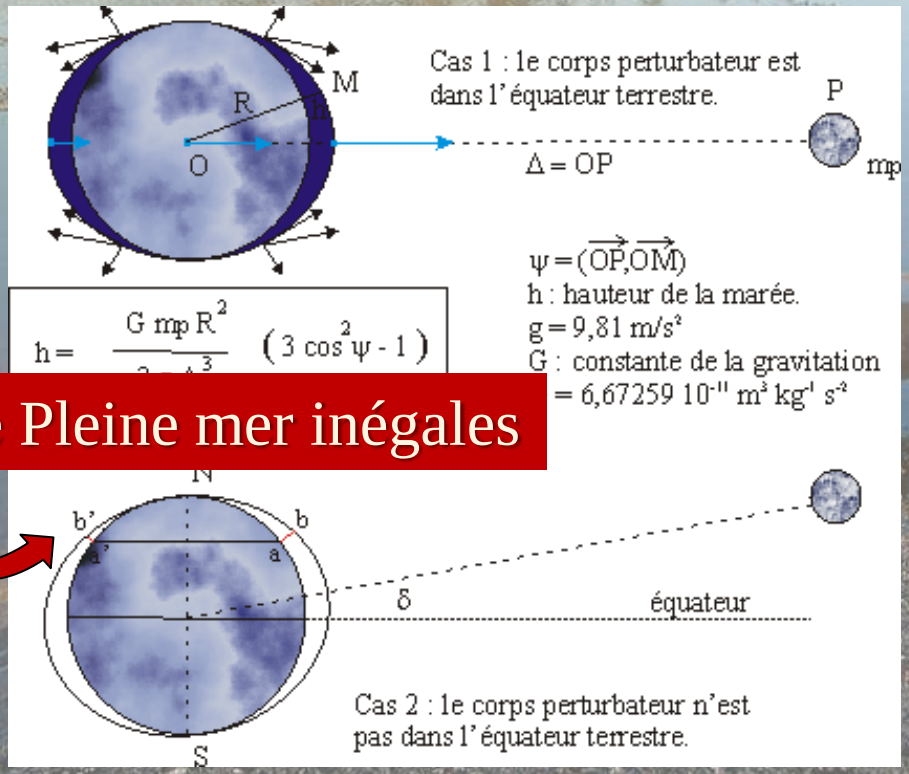
- **Hélios le radieux**
  - Les marées et l'obliquité de l'écliptique



23,4°

MARÉE ET ASTRONOMIE

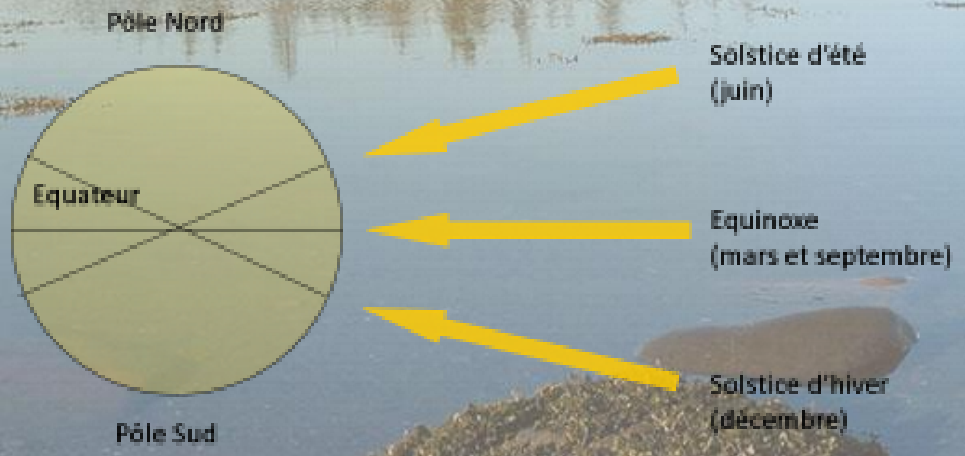
- **Hélios le radieux**
  - Les marées et l'obliquité de l'écliptique



Hauteurs de Pleine mer inégales

MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Hélios le radieux**
  - Les marées et l'obliquité de l'écliptique



Les marées sont plus fortes lorsque l'astre perturbateur est vis-à-vis l'équateur.
On parle alors de ***marées d'équinoxes***.

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Si tout fonctionnait *astronomiquement*, on s'attendrait à observer une marée de Pleine mer lorsque la Lune passe au méridien et une marée de Basse mer lorsque la Lune se lève ou se couche…
- … Or, ce n'est pas ce qu'on constate…

MARÉE ET ASTRONOMIE

- La marée se transmet comme une Onde dans l'eau qui est un fluide.



MARÉE ET ASTRONOMIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Imaginons un géant…





MARÉE ET ASTRONOMIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Imaginons un géant…

L'eau va rebondir ;
créant un front d'ondes







MARÉE ET ASTRONOMIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Un front d'ondes…
    - L'onde de marée se propage sur l'océan à $\vec{v} = 720\ ^{km}/_{h}$
    - La circonférence de la Terre = 40 075 km
    - Il faudra (40 075 ÷ 2) ÷ 720 = 27,7 heures

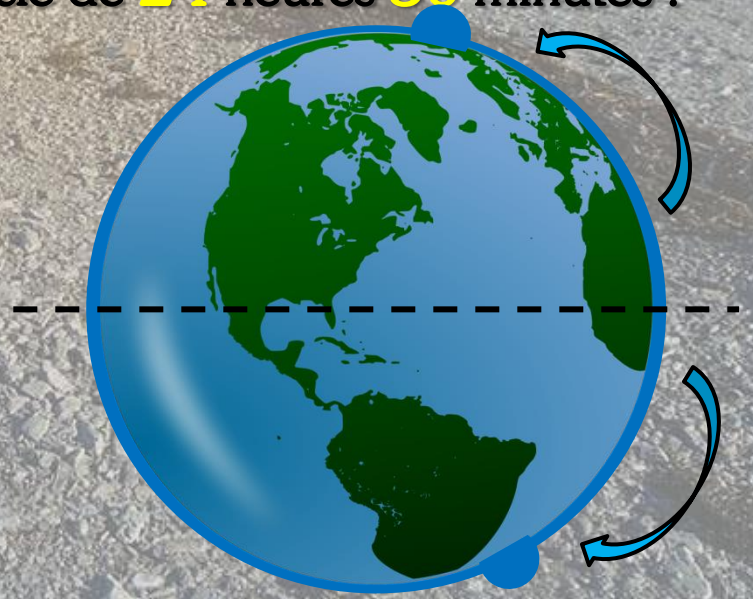




MARÉE ET ASTRONOMIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Un front d'ondes…
    - Il faudra (40 075 ÷ 2) ÷ 720 = 27,7 heures à l'onde de marée pour atteindre son homonyme opposée au nadir.
    - Or, les marées ont un cycle de 24 heures 50 minutes !





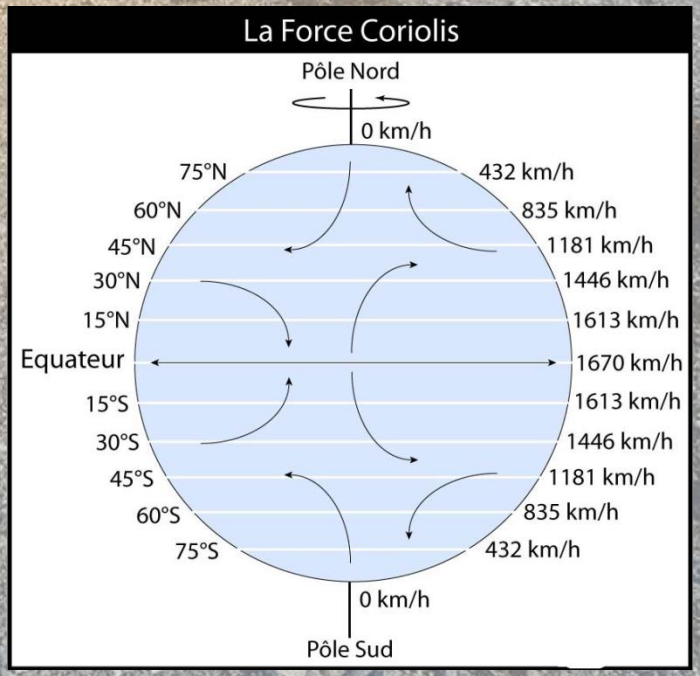
MARÉE ET ASTRONOMIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Un front d'ondes…
    - Les marées ne sont pas un phénomène « instantané ».
    - Elles naissent en pleine mer où les masses d'eau sont suffisantes pour générer le phénomène…
    - Puis elles se propagent sous forme d'ondes dont la vitesse est proportionnelle à $\sqrt{P}$ de la profondeur de l'eau.
      - **P = 6 km ➡ propagation à 200 m/s**
      - **P = 100 m ➡ propagation à 15 m/s**
    - Il faudrait une profondeur océanique constante de 22 km pour que l'onde de marée soit synchrone avec son prochain retour (24,8 heures).

MARÉE ET ASTRONOMIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Un front d'ondes…
    - En raison de la rotation de la Terre, l'onde de marée est déviée par les forces de Coriolis.





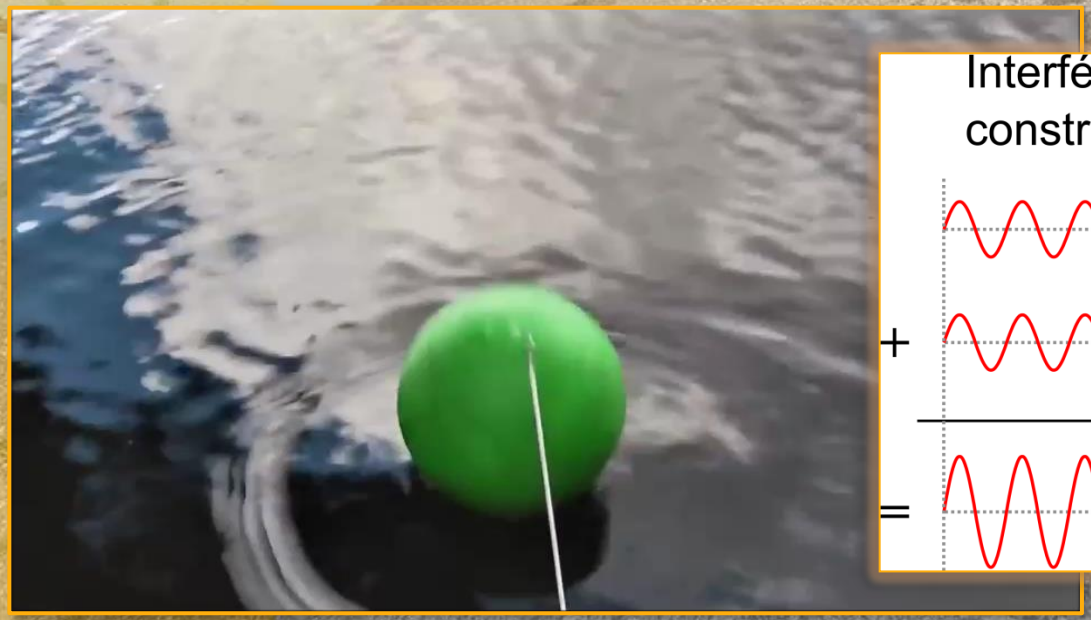
MARÉE ET ASTRONOMIE

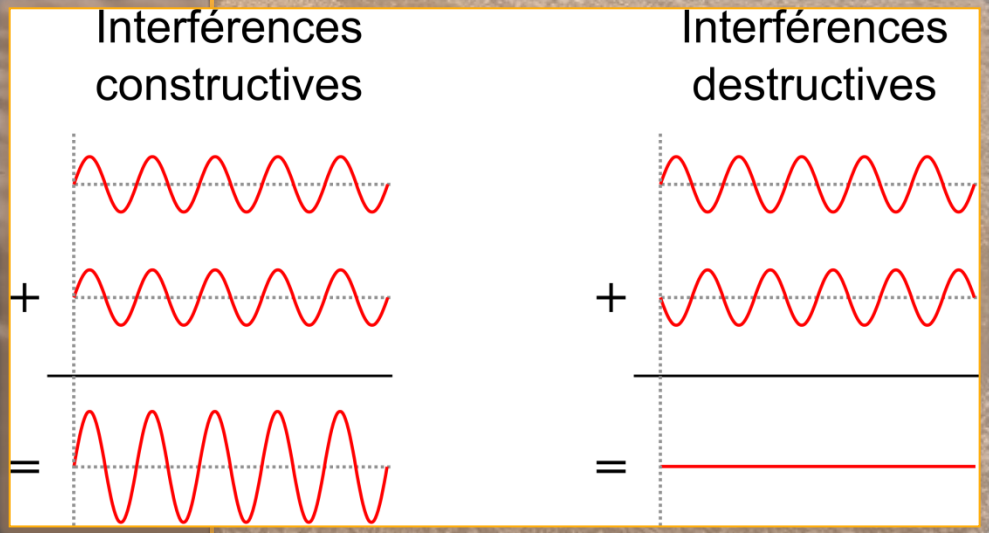
- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Un front d'ondes…
    - Les **continents** font aussi obstacle à la propagation de l'onde de marée.
    - Les fronts d'ondes y rebondissent, et se créent des interactions.
    - Et des patrons d'**interférences**.



MARÉE ET GÉOGRAPHIE

- **L'onde de marée : l'eau est un fluide**
  - Des fronts d'ondes et des interférences…

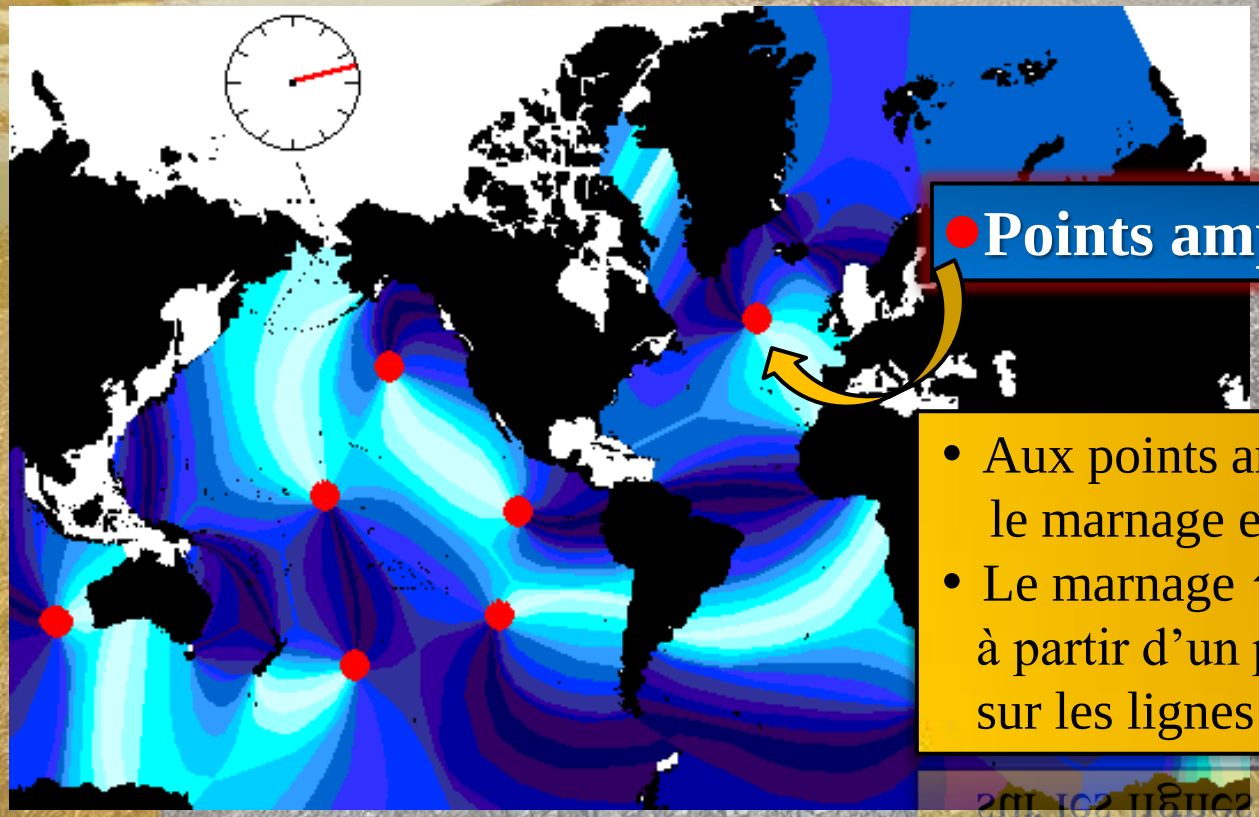




MARÉE ET ASTRONOMIE

★L'onde de marée : l'eau est un fluide

- ➢ Des fronts d'ondes et des interférences…



Points amphidromiques

- Aux points amphidromiques, le marnage est nul.
- Le marnage ⬆ progressivement à partir d'un point amphidromique sur les lignes cotidales.

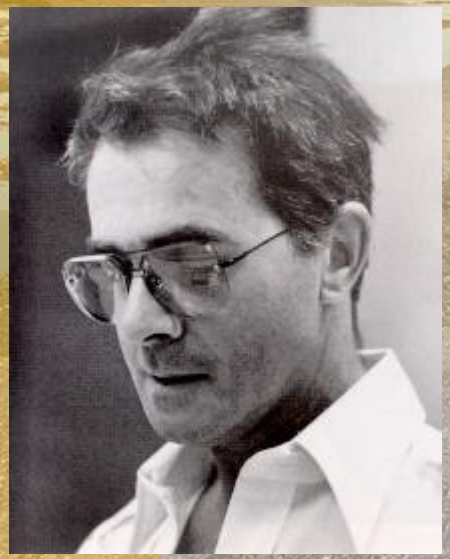


MARÉE ET ASTRONOMIE

- Si les marées sont d'origine astronomique, leurs *expressions locales* sont liées à des facteurs géographiques et géomorphologiques :
  - Forces de Coriolis
  - Transmission horizontale de l'onde de marée
    - Amplifications, Annulations , Résonnances
  - Facteurs locaux :
    - Configuration des côtes
    - Configuration du plancher costal
    - Obstacles à la transmission de l'onde de marée

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- **Un exemple : Le Saint-Laurent**



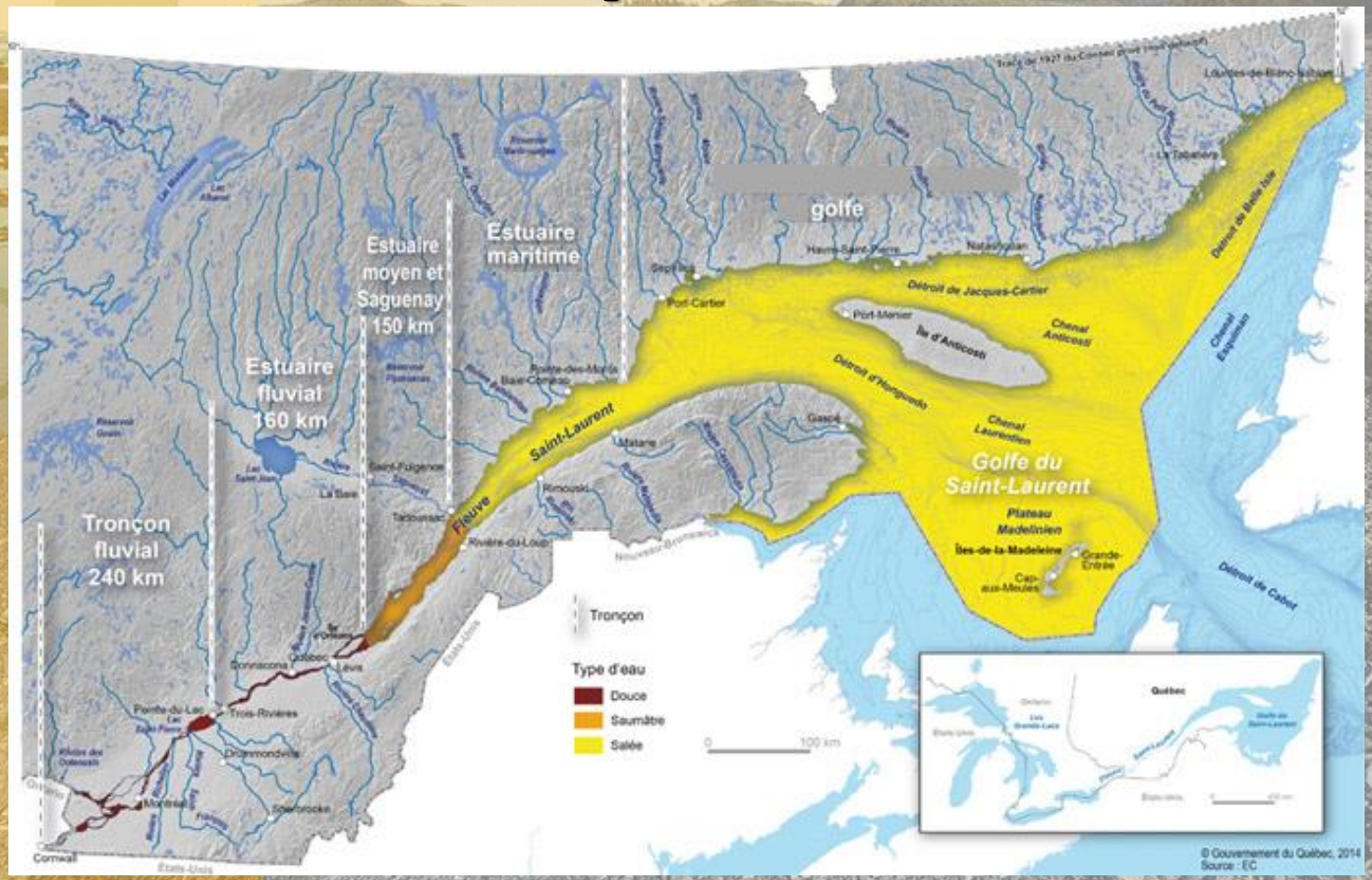
Gatien Lapointe
1931-1983

Extraits : « **Ode au Saint-Laurent** »

Dans mon pays il y a un grand fleuve
Qui oriente la journée des montagnes.
Je dis ce qui pousse et fleurit dans mon pays
J'ai entendu le chant profond du fleuve.
C'est ici le plus beau paysage du monde.

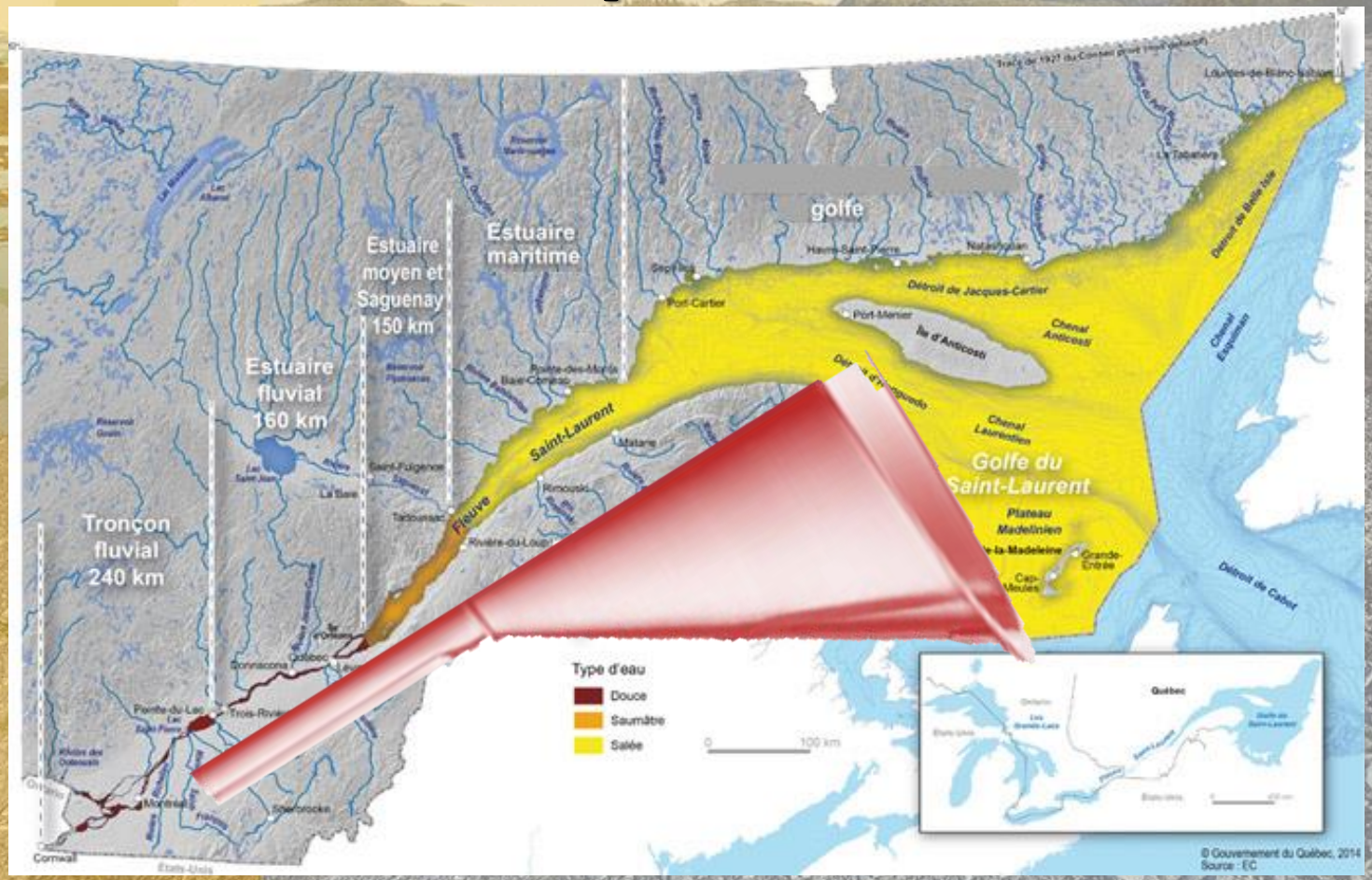
MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Un exemple : Le Saint-Laurent



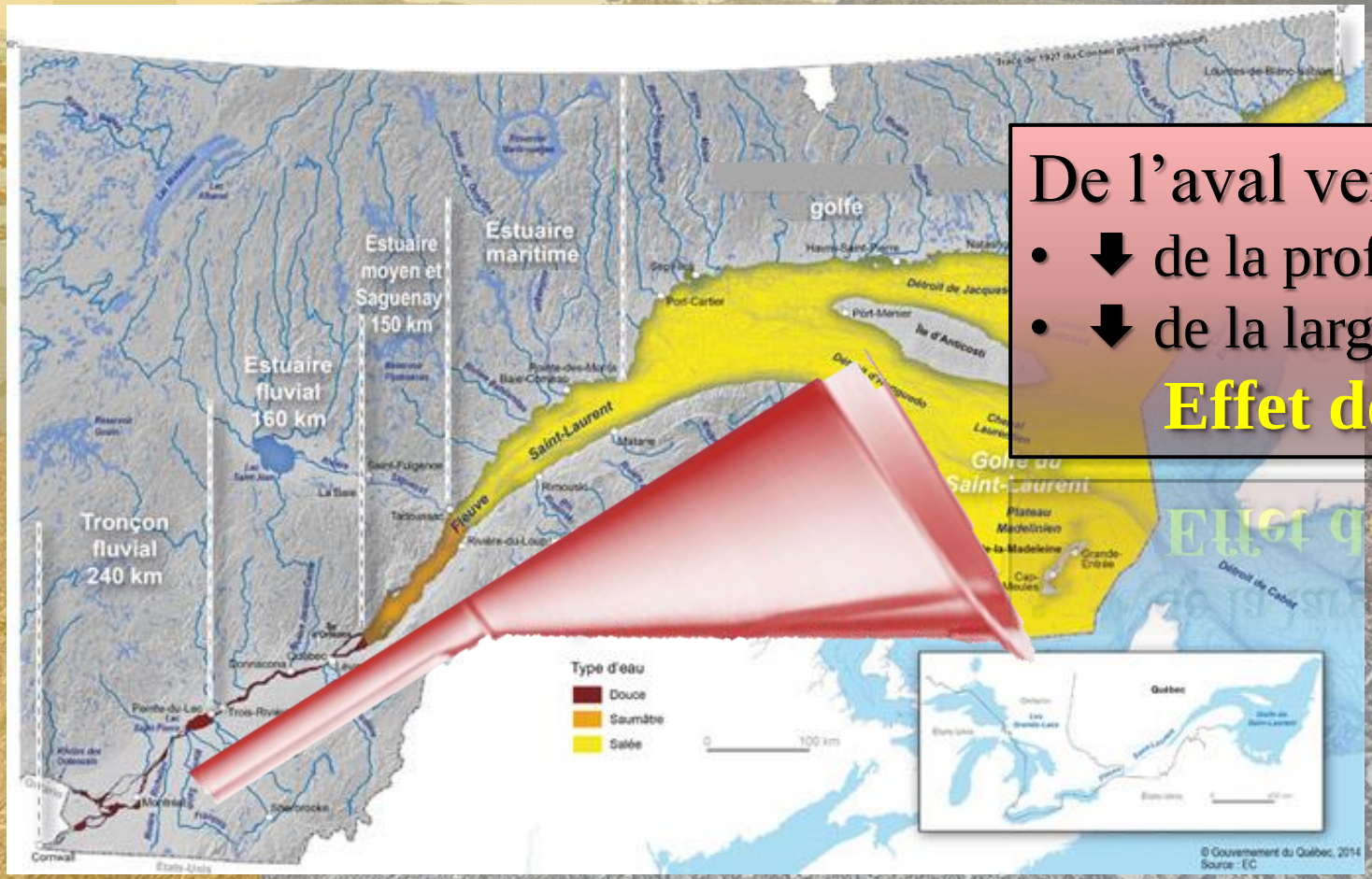
MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Un exemple : Le Saint-Laurent



MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Un exemple : Le Saint-Laurent



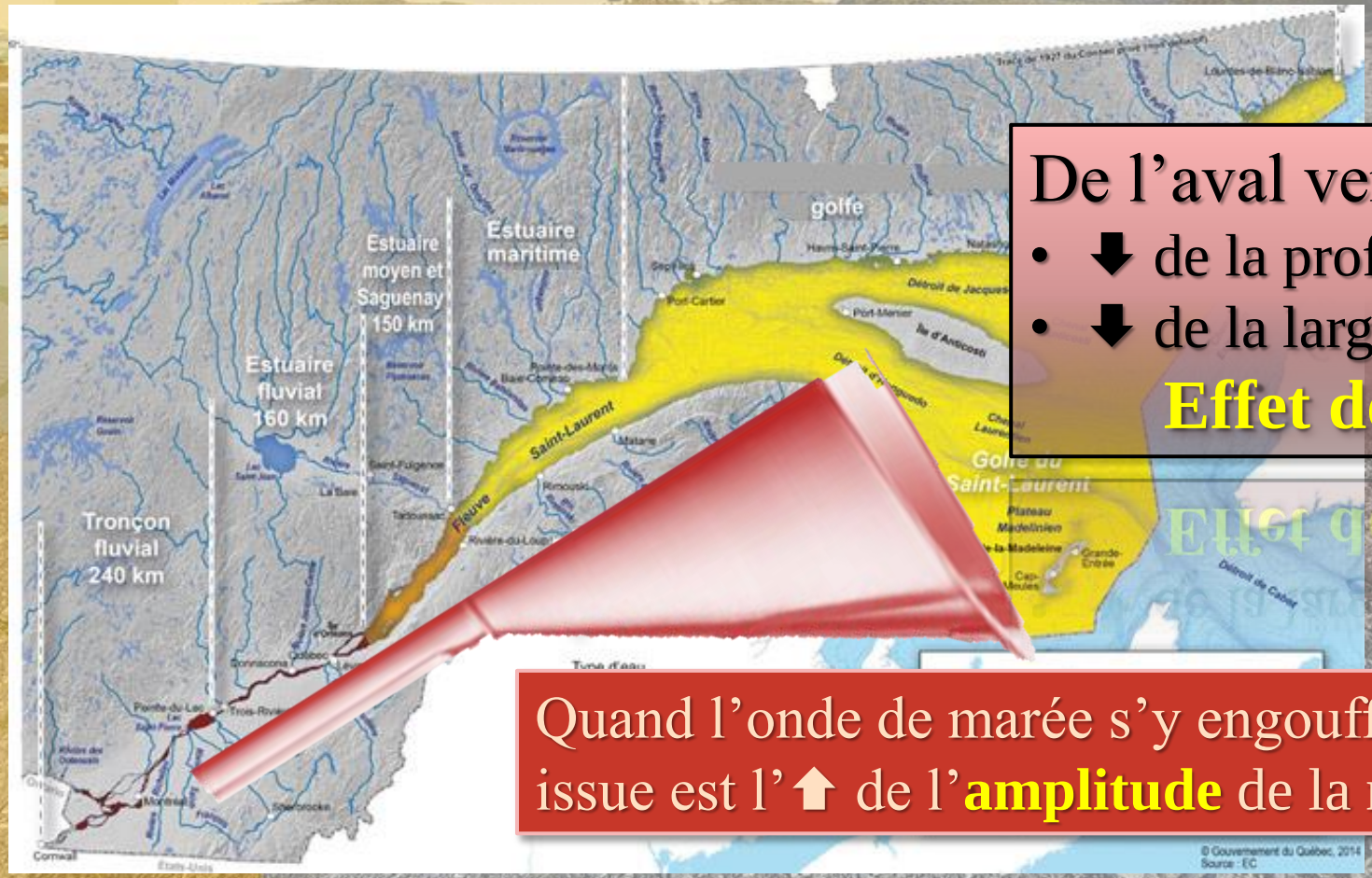
De l'aval vers l'amont :

- ⬇ de la profondeur
- ⬇ de la largeur

Effet de tunnel

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- **Un exemple : Le Saint-Laurent**



De l'aval vers l'amont :

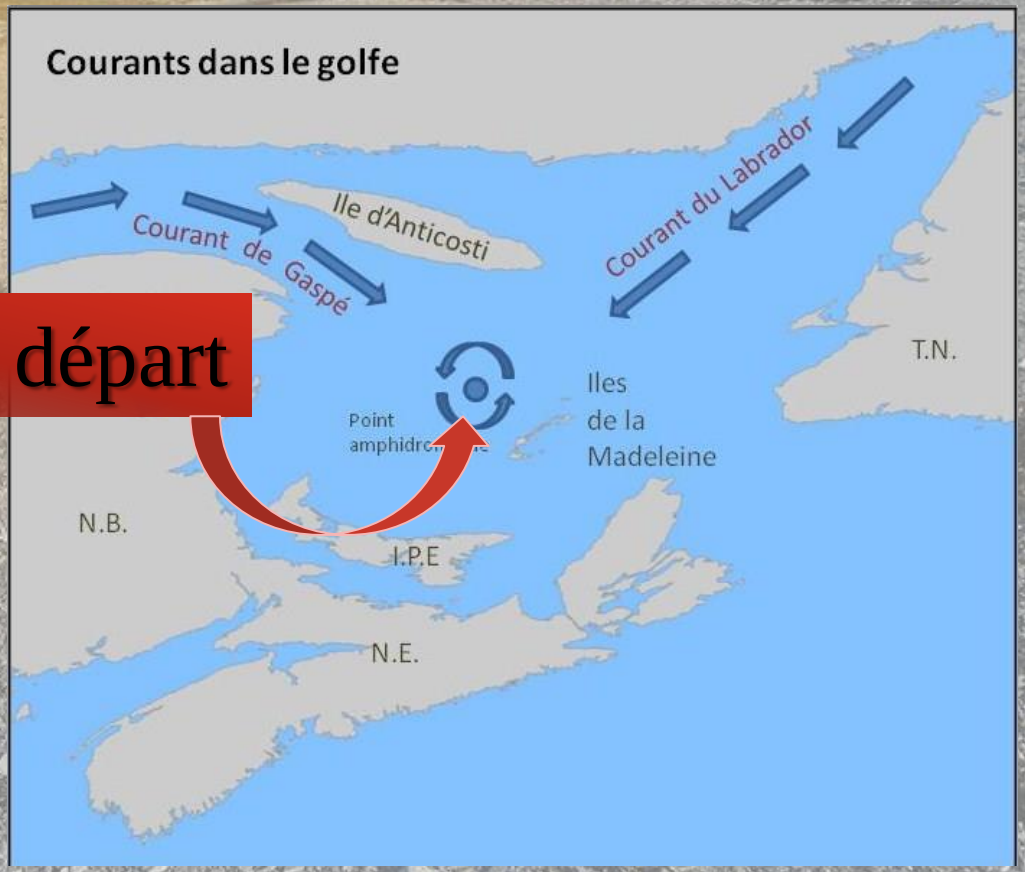
- ⬇ de la profondeur
- ⬇ de la largeur

Effet de tunnel

Quand l'onde de marée s'y engouffre, la seule issue est l'⬆ de l'**amplitude** de la marée.

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Un exemple : Le Saint-Laurent

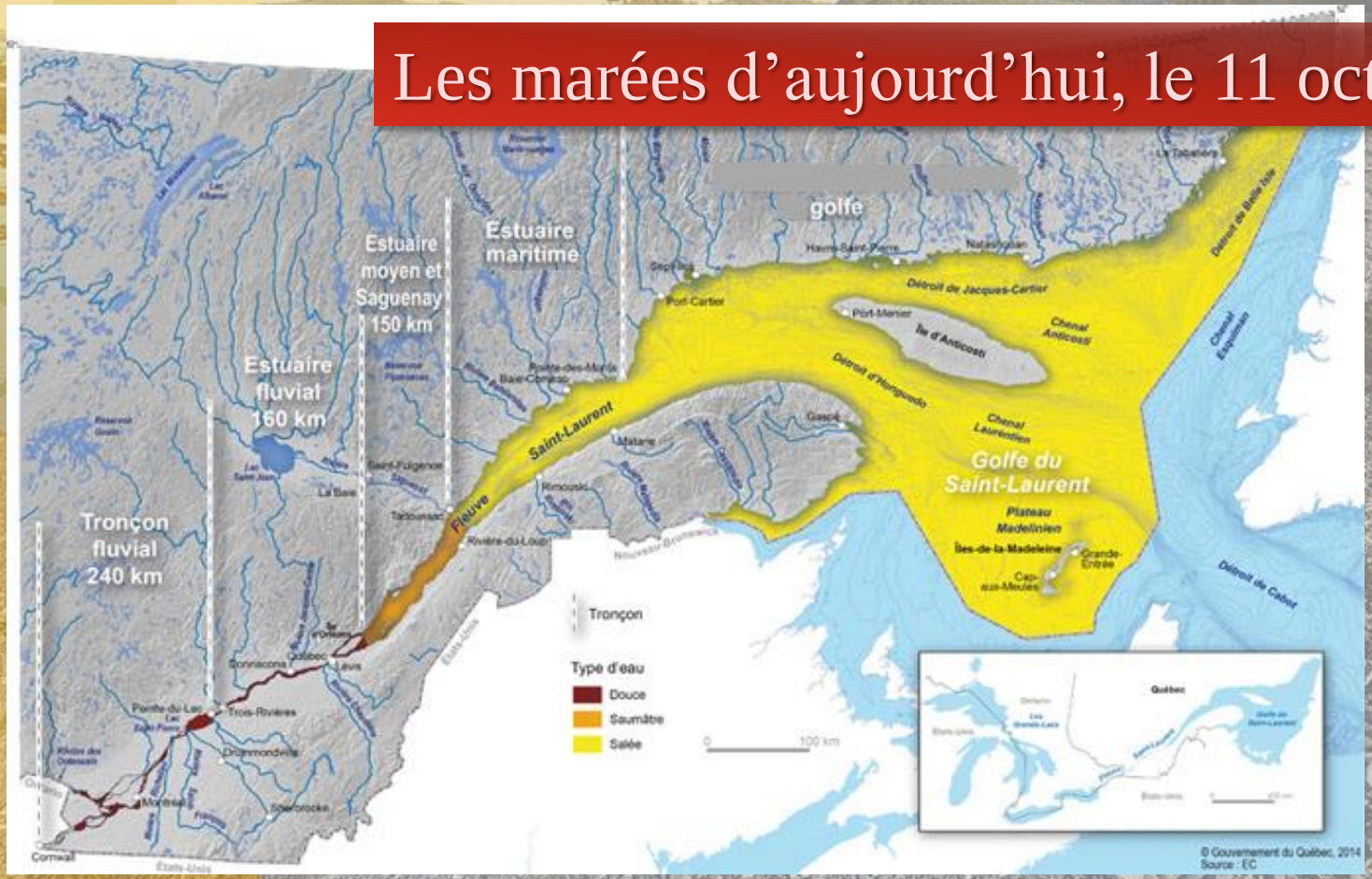


MARÉES ET GÉOGRAPHIE



- **Un exemple : Le Saint-Laurent**

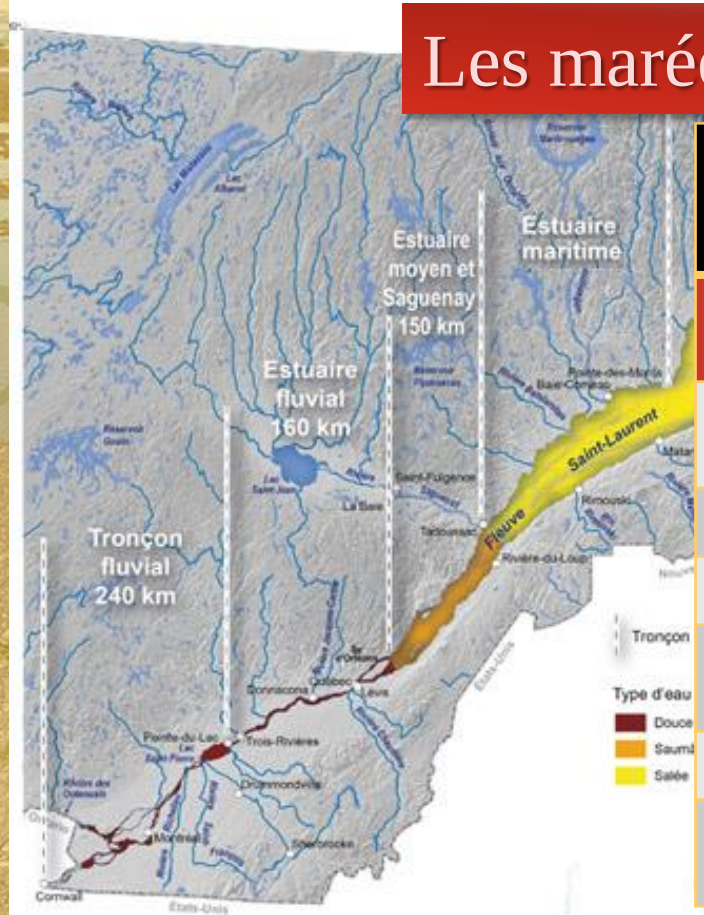
Les marées d'aujourd'hui, le 11 octobre 2019



MARÉES ET GÉOGRAPHIE



Un exemple : Le Saint-Laurent



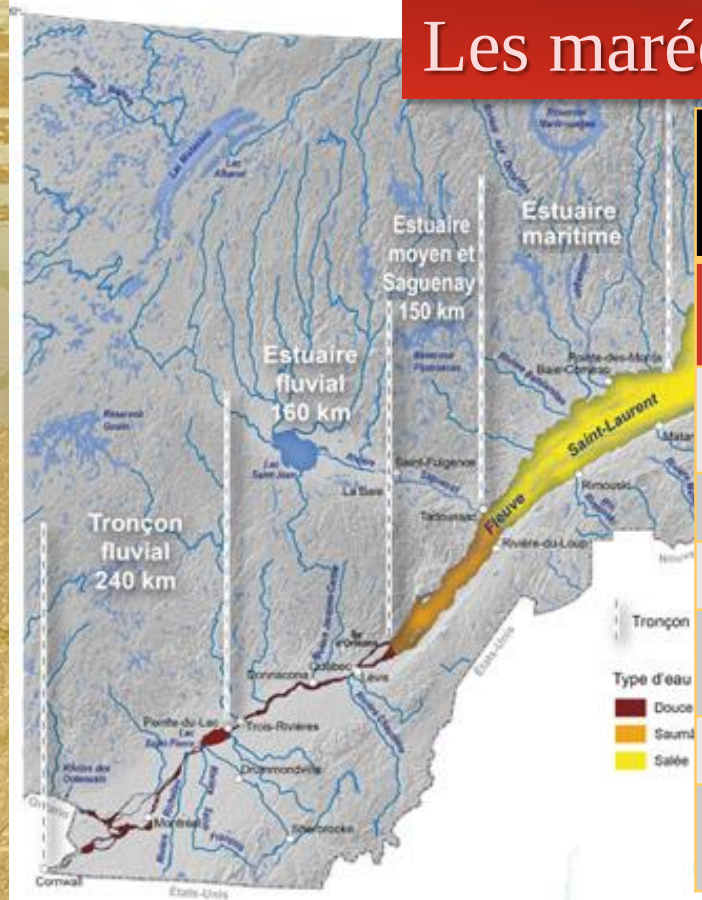
Les marées d'aujourd'hui, le 11 octobre 2019

Localité	Basse Mer		Haute Mer		Mar-nage (m)	Âge de la marée
	Hauteur (m)	Moment	Hauteur (m)	Moment		
Cap-aux-Meules	0,9	1:56	1,2	8:15	0,3	0
Gaspé	0,6	7:35	1,3	13:27	0,7	5:39
Rimouski	1,0	7:59	3,4	13:59	2,4	6:03
St-Joseph-de-la-Rive	1,2	9:46	5,2	16:06	4,0	7:50
Québec	0,4	13:36	4,5	18:30	4,1	11:40
Trois-Rivières	0,9	20:33	1,1	23:18	0,2	18:37

MARÉES ET GÉOGRAPHIE



✶ Un exemple : Le Saint-Laurent



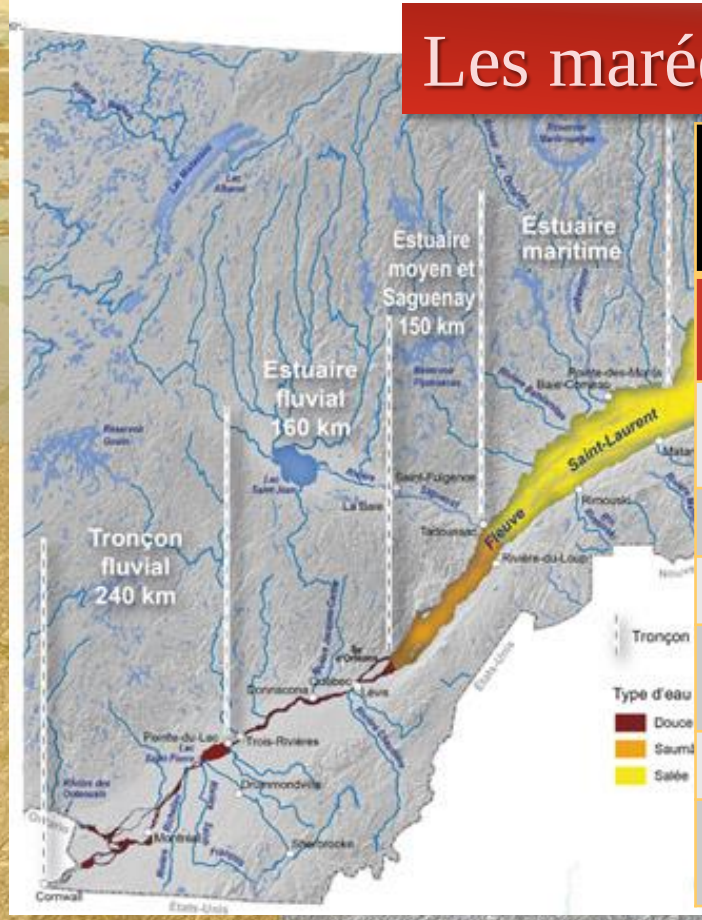
Les marées d'aujourd'hui, le 11 octobre 2019

Localité	Basse Mer		Haute Mer		Mar-nage (m)	Âge de la marée
	Hauteur (m)	Moment	Hauteur (m)	Moment		
Cap-aux-Meules	0,9	1:56	1,2	8:15	0,3	0
Gaspé	0,6	7:35	1,3	13:27	0,7	5:39
Rimouski	1,0	7:59	3,4	13:59	2,4	6:03
St-Joseph-de-la-Rive	1,2	9:46	5,2	16:06	4,0	7:50
Québec	0,4	13:36	4,5	18:30	4,1	11:40
Trois-Rivières	0,9	20:33	1,1	23:18	0,2	18:37

MARÉES ET GÉOGRAPHIE



Un exemple : Le Saint-Laurent



Les marées d'aujourd'hui, le 11 octobre 2019

Localité	Basse Mer		Haute Mer		Mar-nage (m)	Âge de la marée
	Hauteur (m)	Moment	Hauteur (m)	Moment		
Cap-aux-Meules	0,9	1:56	1,2	8:15	0,3	0
Gaspé	0,6	7:35	1,3	13:27	0,7	5:39
Rimouski	1,0	7:59	3,4	13:59	2,4	6:03
St-Joseph-de-la-Rive	1,2	9:46	5,2	16:06	4,0	7:50
Québec	0,4	13:36	4,5	18:30	4,1	11:40
Trois-Rivières	0,9	20:33	1,1	23:18	0,2	18:37

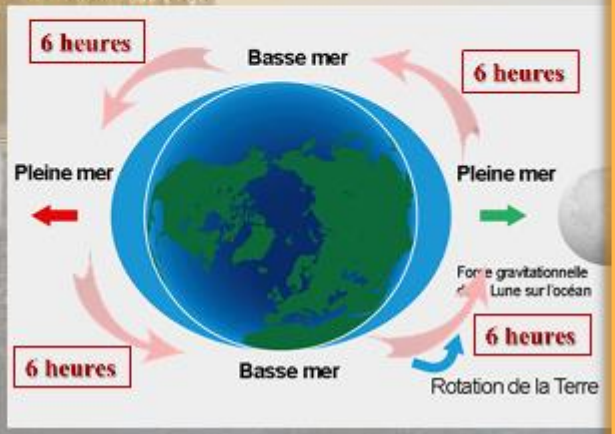
MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Un exemple : Le Saint-Laurent
  - Fronts d'ondes et types de marées

L'astronomie nous dit :

MARÉE ET ASTRONOMIE

- Séléné la pâle

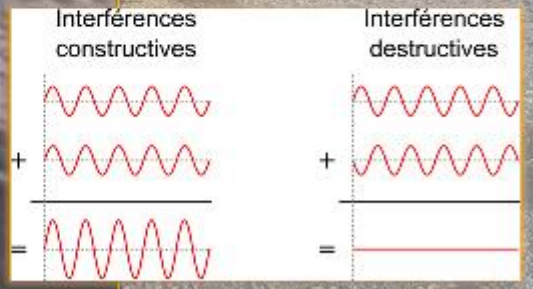


La géographie nous dit :

MARÉE ET GÉOGRAPHIE

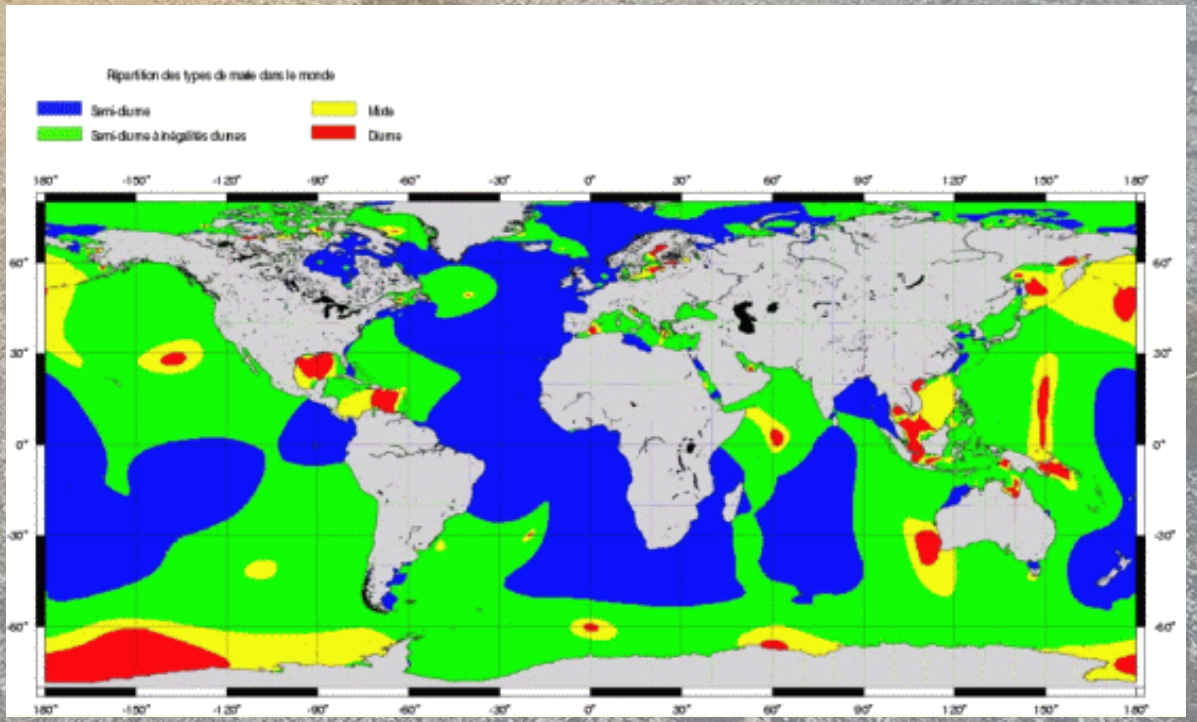
- L'onde de marée :l'eau est un fluide
  - Des fronts d'ondes et des interférences…





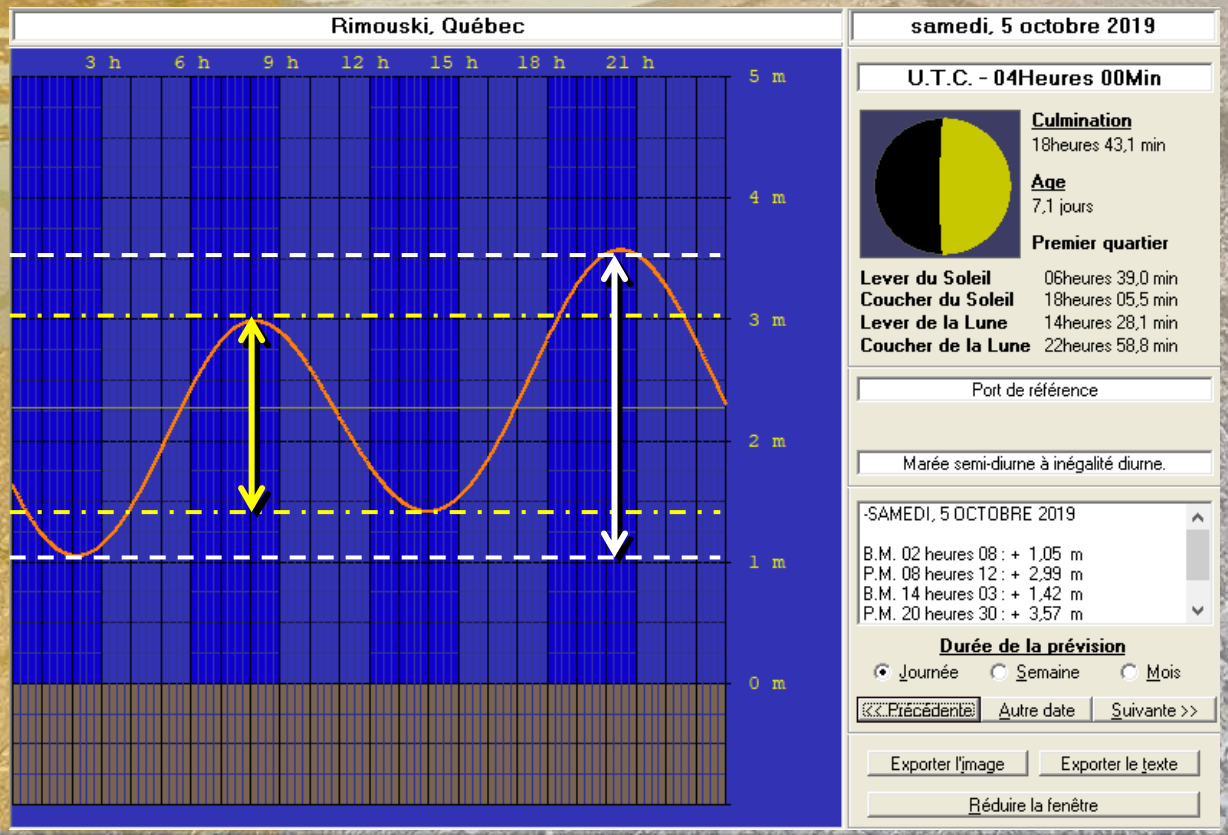
MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Fronts d'ondes et types de marées
  - Semi-diurnes ➡ d'allure astronomique stricte
  - Semi-diurnes à inégalité diurne
  - Diurnes
  - Mixtes



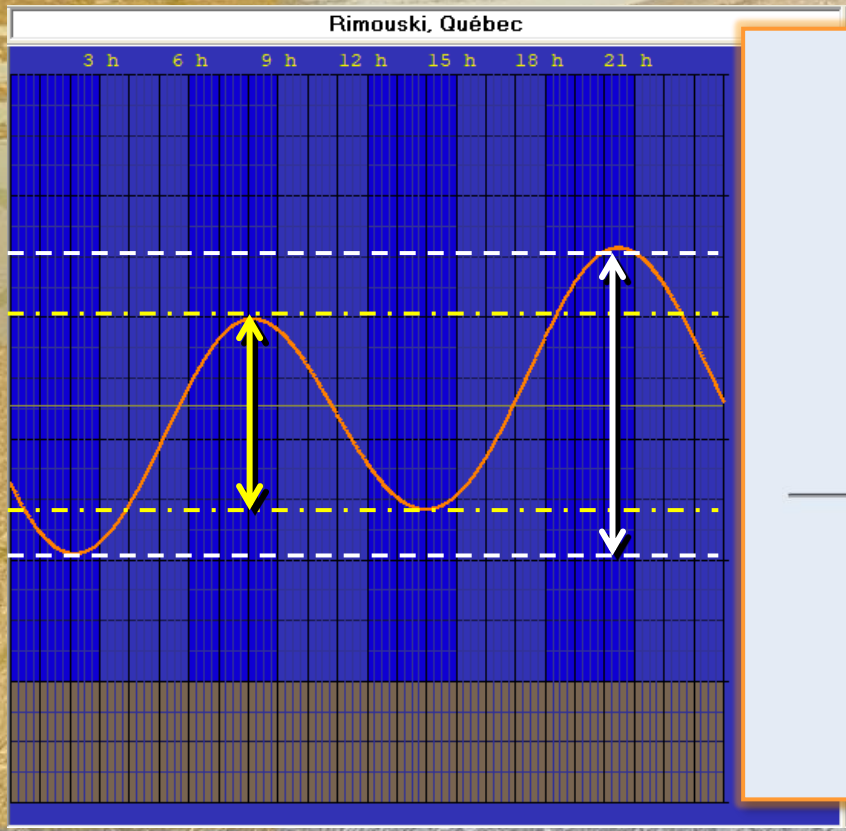
MARÉES ET GÉOGRAPHIE

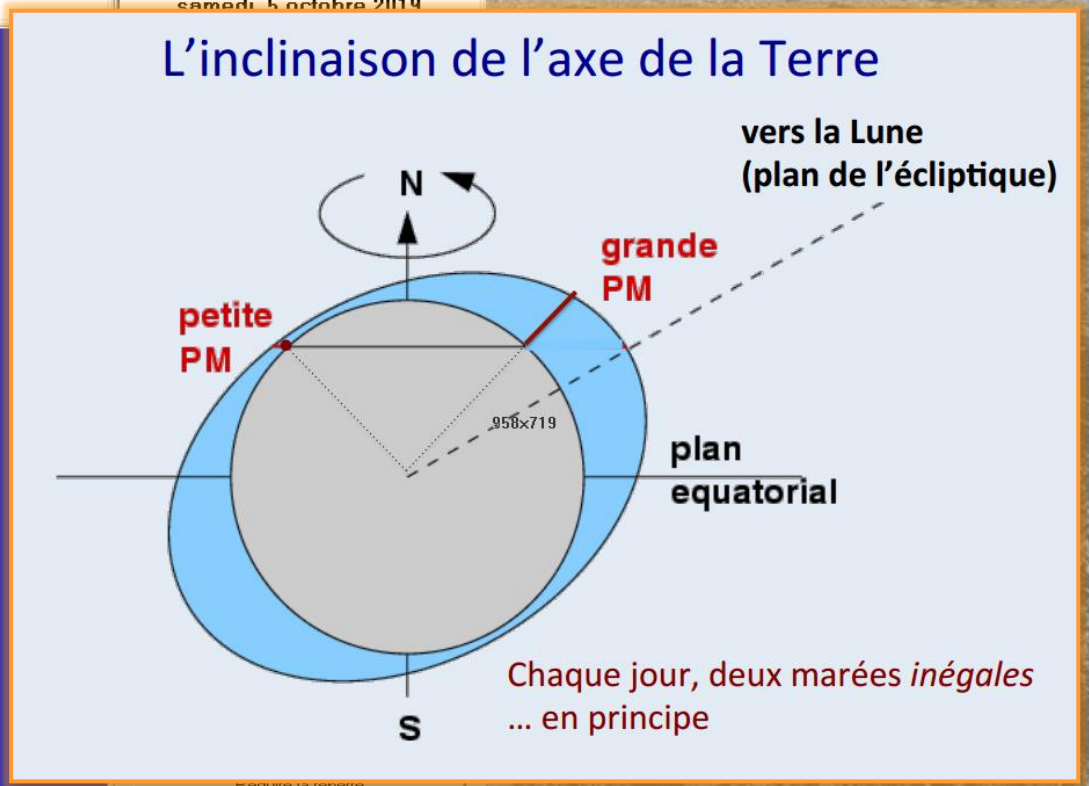
- Un exemple : Le Saint-Laurent
  - À Rimouski : Semi-diurnes à inégalité diurne



MARÉES ET GÉOGRAPHIE

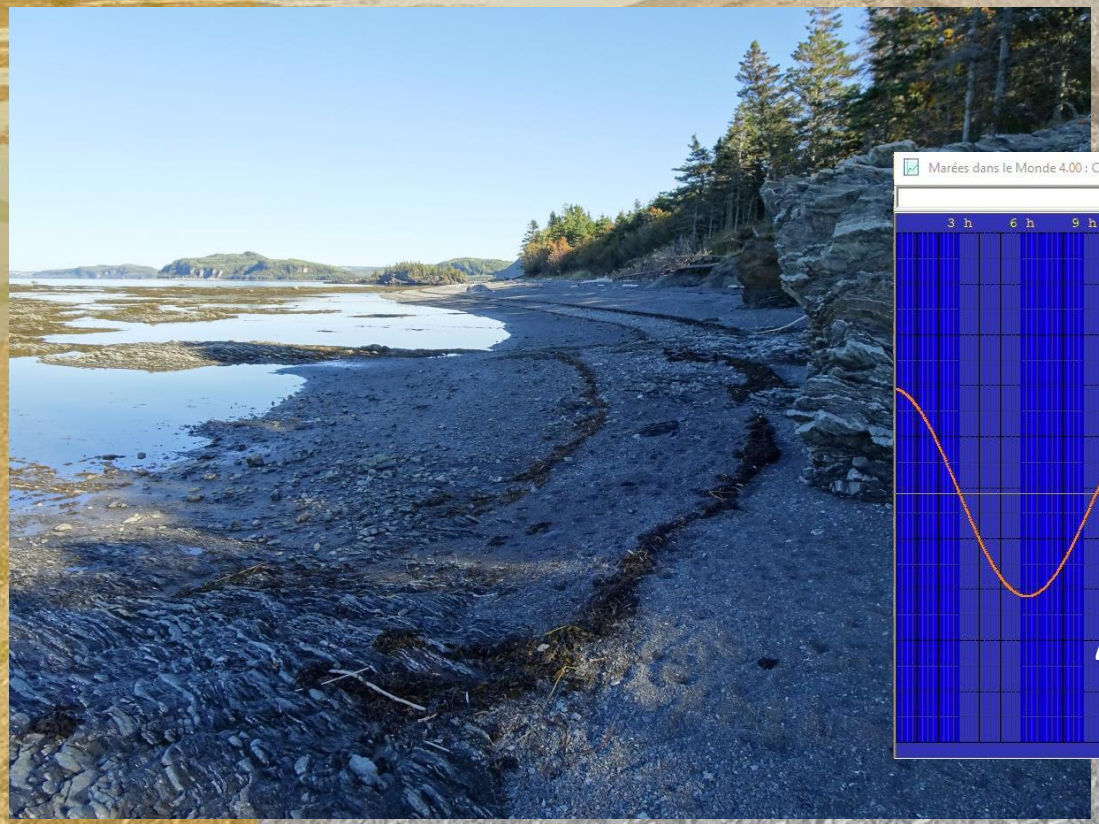
- Un exemple : Le Saint-Laurent
  - À Rimouski : Semi-diurnes à inégalité diurne



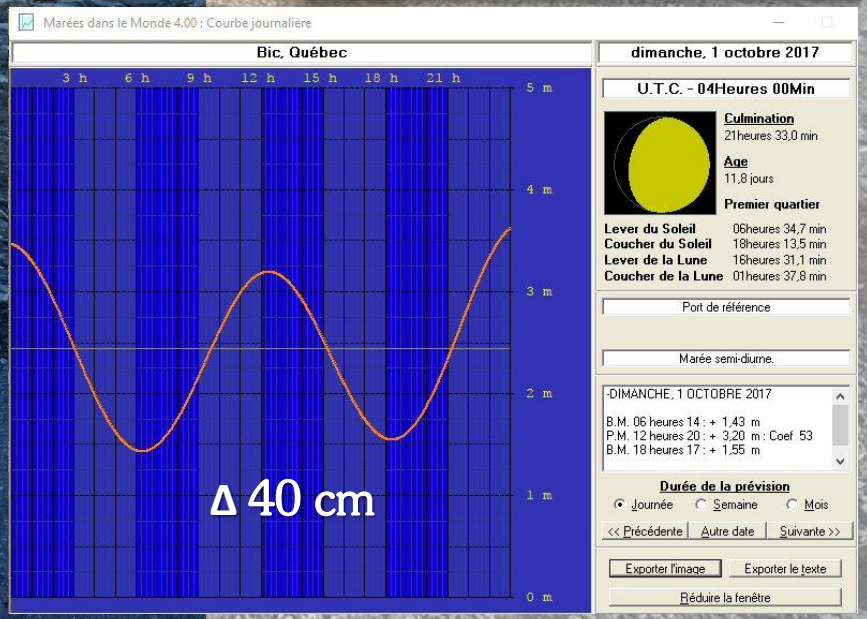


MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Un exemple : Le Saint-Laurent
  - À Rimouski : Semi-diurnes à inégalité diurne



Laisses de mer.



MARÉES ET GÉOGRAPHIE

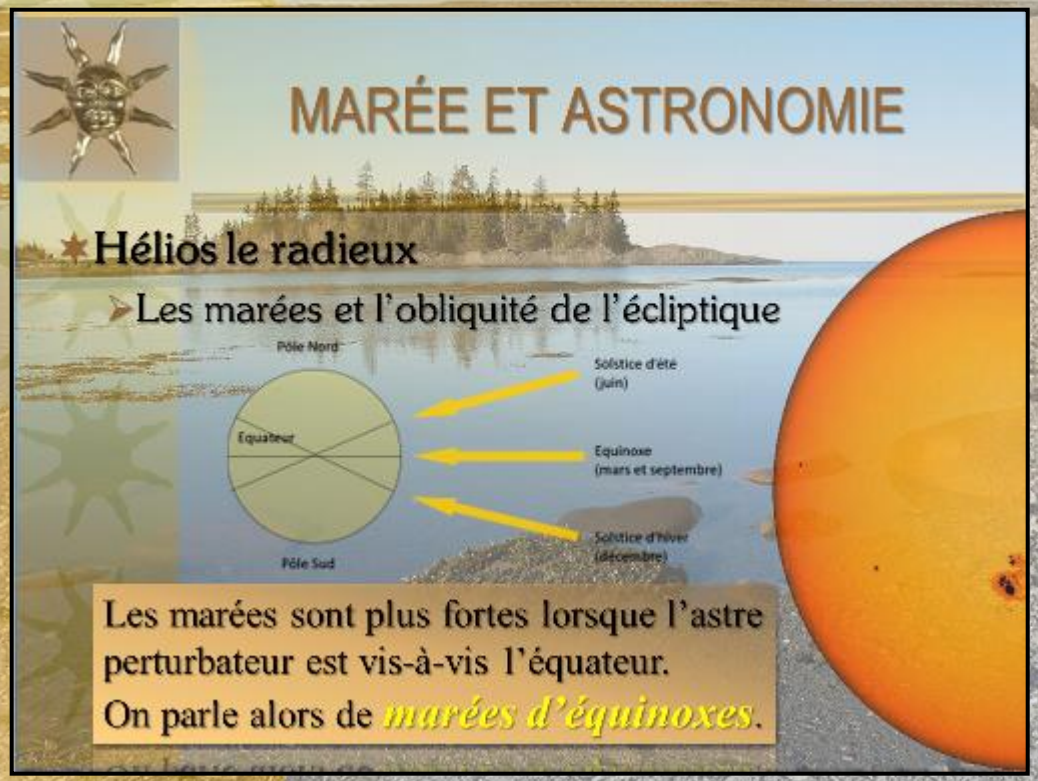
- Un exemple : Le Saint-Laurent
  - À Rimouski : Semi-diurnes à inégalité diurne



Laisses de mer.

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…



MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…

SCIENCES DE LA MER

Le point sur les marées d'équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent

Daniel Bourgault, Cédric Chavanne, Dany Dumont, Émilie Morin, Peter S. Galbraith et Louis Gostiaux

Résumé

Selon une étude publiée dans *Le Naturaliste canadien*, les marées de l'estuaire du Saint-Laurent ne seraient pas plus grandes aux équinoxes qu'à d'autres moments de l'année. Cette idée de marées plus grandes aux équinoxes relèverait plutôt d'une croyance populaire sans fondements théoriques, répandue même parmi la communauté scientifique. Il est démontré ici que ces conclusions contredisent en fait la théorie des marées et découlent d'un problème de sous-échantillonnage des données de marées. Une analyse basée sur 30 ans d'observations horaires du niveau de la mer à la station Rimouski montre que, statistiquement, les marées sont bel et bien plus énergétiques autour des équinoxes, en accord avec la théorie des marées. Cependant, cette conclusion statistique n'indique pas nécessairement que les marées les plus fortes d'une année particulière se rencontrent précisément aux jours des équinoxes puisque l'augmentation du marnage vers les équinoxes est faible comparativement aux variations de marnages associées au cycle vive-eau/morte-eau (2 semaines) qui n'est pas synchronisé avec les équinoxes. La théorie des marées est expliquée simplement et un schéma est proposé pour illustrer l'influence du cycle équinoxe-solstice sur les marées.

Mots clés : équinoxe, estuaire du Saint-Laurent, marée, observations, prédictions

Abstract

According to a study published in *Le Naturaliste canadien*, tides in the St. Lawrence Estuary would not be any greater at the equinoxes than they are at any other moment of the year. According to the study, the idea that tides may be larger at the equinoxes is a popular unfounded belief that is widespread, even among scientists. Here, it is demonstrated that these conclusions contradict the theory of tides and arise from a problem in the subsampling of tide data. A statistical analysis based on 30 years of hourly water level observations at Rimouski, shows that tides are indeed more energetic around the equinoxes, which is in agreement with the theory of tides. However, this conclusion does not necessarily indicate that the greatest tides always appear precisely at the equinoxes in a given year. This is because the increase in the tidal range as the equinoxes are approached is rather small in comparison with the large neap-spring tidal variability, which is not synchronized with the equinoxes. The theory of tides is explained in simple terms and a schematic diagram is proposed to explain the effect on tides during the equinox-solstice cycle.

Keywords: equinox, observations, predictions, St. Lawrence Estuary, tide

Introduction

Dans 2 articles semblables, Dionne (2005, 2008) tente de faire la lumière sur ce qu'il considère être une croyance populaire répandue au Québec à propos du comportement des marées de l'estuaire du Saint-Laurent. Selon les conclusions tirées, le grand public croirait faussement que les marées les plus grandes se situent lors des équinoxes. Il est de plus affirmé dans ces études que cette croyance circule même dans la communauté scientifique. En appui, Dionne (2008) cite, parmi d'autres exemples, l'extrait suivant tiré du guide de Chabot et Rossignol (2003 : 3) sur l'identification des algues et de la faune du littoral du Saint-Laurent : « …au moment des équinoxes… les grandes marées sont les plus fortes de l'année». Selon l'analyse et l'interprétation effectuées par Dionne, cette notion ne serait qu'une croyance populaire erronée et l'expression de marées d'équinoxe est « insidieuse en laissant croire qu'il s'agit des plus grandes marées de l'année quant à la hauteur et à l'amplitude. » (Dionne, 2005). Dionne (2008) conclut que, « dans l'estuaire du Saint-Laurent, les plus hauts et les plus bas niveaux de la marée ne sont pas atteints lors des équinoxes. » Quelques années plus tard, Dionne (2010) généralise ses conclusions à tout l'est du Canada ainsi qu'à l'Arctique canadien.

Dionne (2008) laisse entendre que, selon la théorie même des marées, le cycle équinoxe-solstice n'a pas d'incidence notable sur les marées en général, et sur les marées du Saint-Laurent en particulier. C'est ainsi qu'il conclut que « La croyance

Daniel Bourgault, Cédric Chavanne et Dany Dumont sont professeurs à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski, Peter Galbraith est chercheur pour Pêches et Océans Canada à l'Institut Maurice-Lamontagne et Louis Gostiaux est chercheur au Conseil national de la recherche scientifique à l'École Centrale de Lyon (France). Ils sont tous spécialistes de l'océanographie physique des milieux côtiers avec des intérêts de recherche qui touchent, entre autres, à l'estuaire et au golfe du Saint-Laurent. Émilie Morin est professionnelle de recherche et chargée de cours à l'Université Laval et est spécialiste en didactique des sciences.

daniel_bourgault@uqar.ca

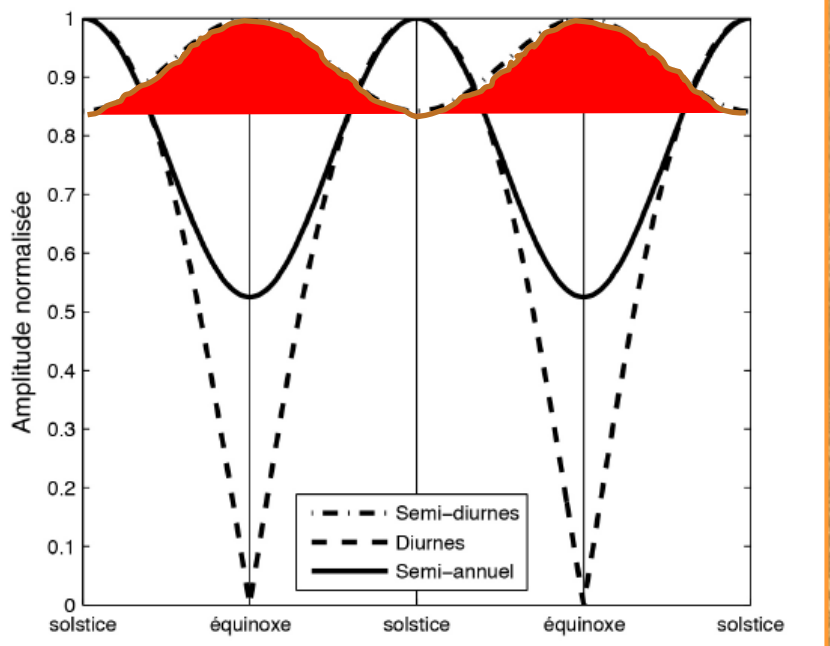


Figure 2. Série temporelle théorique des amplitudes semi-diurne, diurne et semi-annuelle normalisées pour la latitude de Rimouski (48,48 ºN). Ce graphique a été réalisé à partir de l'équation générale des marées statiques (Lamb, 1932; Defant, 1961).

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…
  - Sainte-Luce-sur-Mer, le 6 décembre 2010

L'Avantage
votre journal

Les grandes marées de 2010 ont coûté plus de 20 M $

Pierre Michaud pierre.michaud@tc.tc
Publié le 13 janvier 2016



Cette photo impressionnante des grandes marées à Sainte-Luce, en décembre 2010, avait fait la une du Journal de Québec de même que du bulletin d'information de TVA.

©Photo TC Media - Pierre Michaud archives

Les grandes marées qui ont déferlé sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de La Gaspésie ces derniers jours ne sont pas sans rappeler celles qui ont causé pour plus de 20 M $ de dégâts dans l'Est du Québec, en 2010.

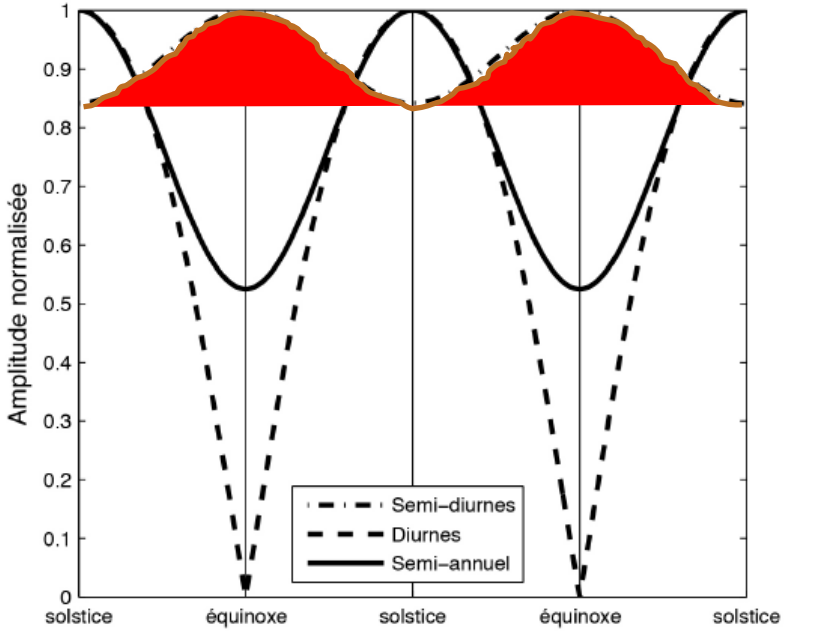


Figure 2. Série temporelle théorique des amplitudes semi-diurne, diurne et semi-annuelle normalisées pour la latitude de Rimouski (48,48 ºN). Ce graphique a été réalisé à partir de l'équation générale des marées statiques (Lamb, 1932; Defant, 1961).

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…
  - Sainte-Luce-sur-Mer, le 6 décembre 2010

L'Avantage
votre journal

Les grandes marées de 2010 ont coûté plus de 20 M $

Pierre Michaud pierre.michaud@tc.tc
Publié le 13 janvier 2016



Cette photo impressionnante des grandes marées à Sainte-Luce, en décembre 2010, avait fait la une du Journal de Québec de même que du bulletin d'information de TVA.

©Photo TC Media - Pierre Michaud archives

Les grandes marées qui ont déferlé sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de La Gaspésie ces derniers jours ne sont pas sans rappeler celles qui ont causé pour plus de 20 M $ de dégâts dans l'Est du Québec, en 2010.



MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…
  - Sainte-Luce-sur-Mer, le 6 décembre 2010

L'Avantage
votre journal

Les grandes marées de 2010 ont coûté plus de 20 M $

Pierre Michaud pierre.michaud@tc.tc
Publié le 13 janvier 2016



Cette photo impressionnante des grandes marées à Sainte-Luce, en décembre 2010, avait fait la une du Journal de Québec de même que du bulletin d'information de TVA.

©Photo TC Media - Pierre Michaud archives

Les grandes marées qui ont déferlé sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de La Gaspésie ces derniers jours ne sont pas sans rappeler celles qui ont causé pour plus de 20 M $ de dégâts dans l'Est du Québec, en 2010.

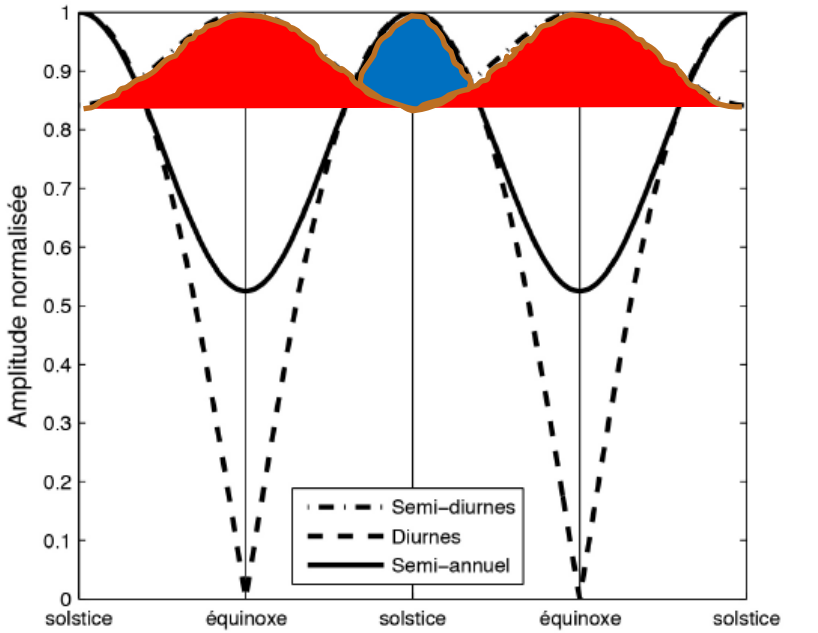


Figure 2. Série temporelle théorique des amplitudes semi-diurne, diurne et semi-annuelle normalisées pour la latitude de Rimouski (48,48 ºN). Ce graphique a été réalisé à partir de l'équation générale des marées statiques (Lamb, 1932; Defant, 1961).

MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…
  - Baie de Fundy :les plus grandes marées du monde



Marnage de 16 mètres



MARÉES ET GÉOGRAPHIE

- Nous avons vu que les marées d'équinoxes…
  - Baie de Fundy :les plus grandes marées du monde



Marnage de 16 mètres



Mascaret de la rivière Petitcodiac, Moncton

MARÉE ET ASTRONOMIE

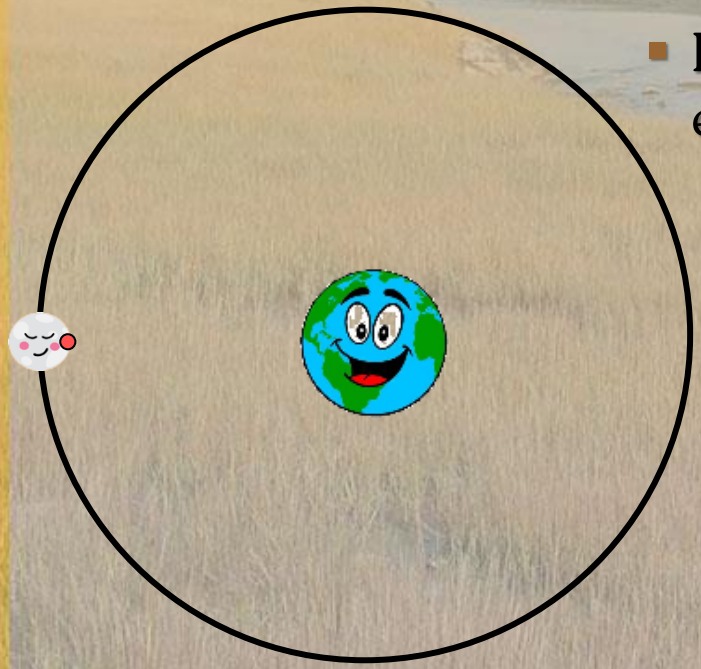
- Les marées et le système Terre-Lune
  - Le verrouillage orbital de la Lune

Nous voyons toujours la même face de la Lune



MARÉE ET ASTRONOMIE

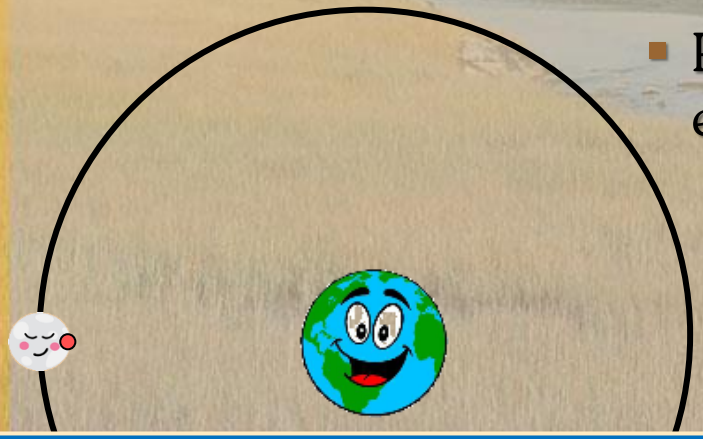
- **Les marées et le système Terre-Lune**
  - **Le verrouillage orbital de la Lune**
    - Période de révolution de la Lune autour de la Terre = 27,32 jours (mois sidéral).
    - Période de rotation de la Lune sur elle-même = 27,32 jours.





MARÉE ET ASTRONOMIE

- **Les marées et le système Terre-Lune**
  - **Le verrouillage orbital de la Lune**
    - Période de révolution de la Lune autour de la Terre = 27,32 jours (mois sidéral).
    - Période de rotation de la Lune sur elle-même = 27,32 jours.





Autrement dit, il y a synchronisation entre les périodes de rotation et de révolution. C'est l'***orbite verrouillée***.

Durée : **27,322** jours



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

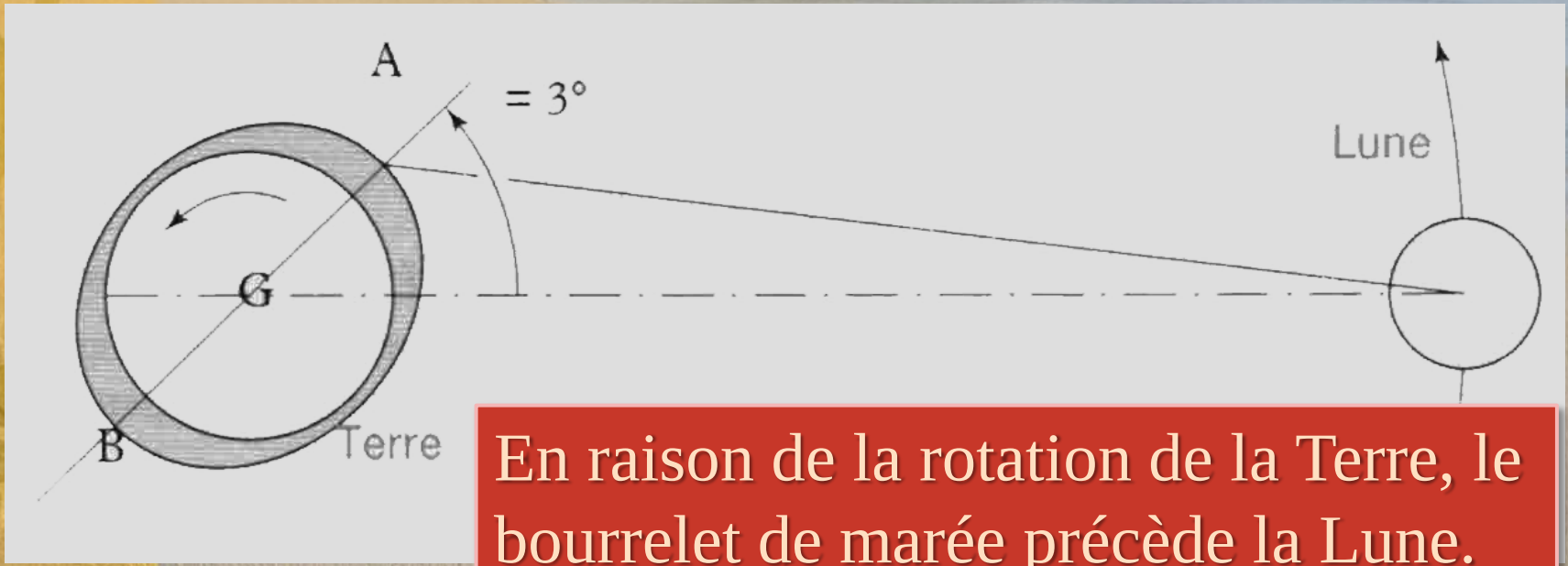
- **Les marées et le système Terre-Lune**
  - Pourquoi ce verrouillage ?
    - Une histoire de ~ 4 milliards d'années.



- Une Lune plus près de la Terre,
- Une Lune en fusion,
- Des forces de marée colossales,
- Une déformation équatoriale,
- Un sphéroïde…
- … une orbite verrouillée.

LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- **Les marées et le système Terre-Lune**
  - La Terre ralentit, la Lune s'enfuit…

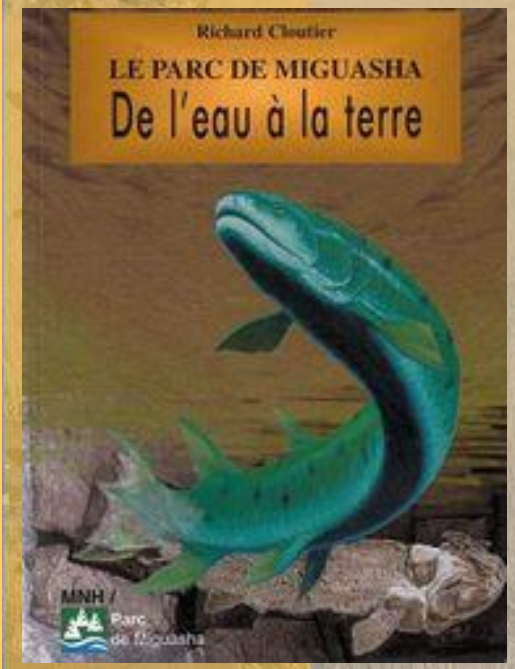


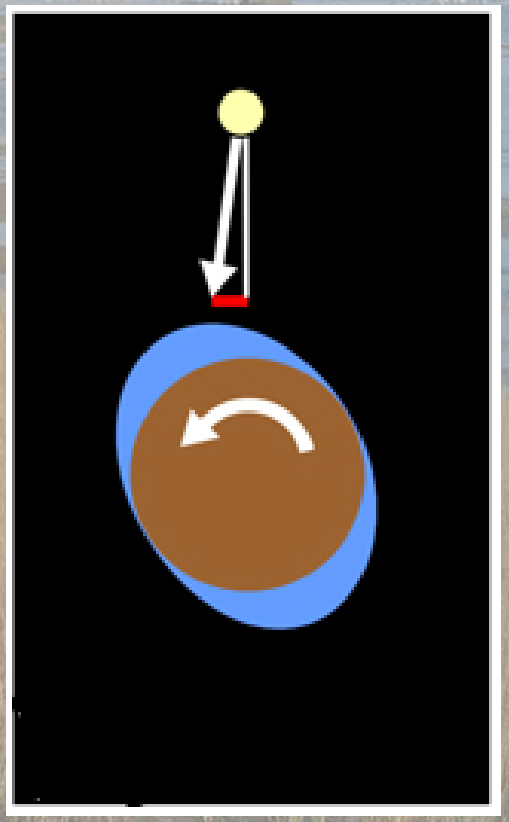
En raison de la rotation de la Terre, le bourrelet de marée précède la Lune.



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- **Les marées et le système Terre-Lune**
  - La Terre ralentit, la Lune s'enfuit…
    - La vitesse de rotation de la Terre diminue de **23 µs** par année.
    - Le jour au Dévonien (400 Ma) était de 22 heures.
    - Et l'année durait ~ 400 jours.



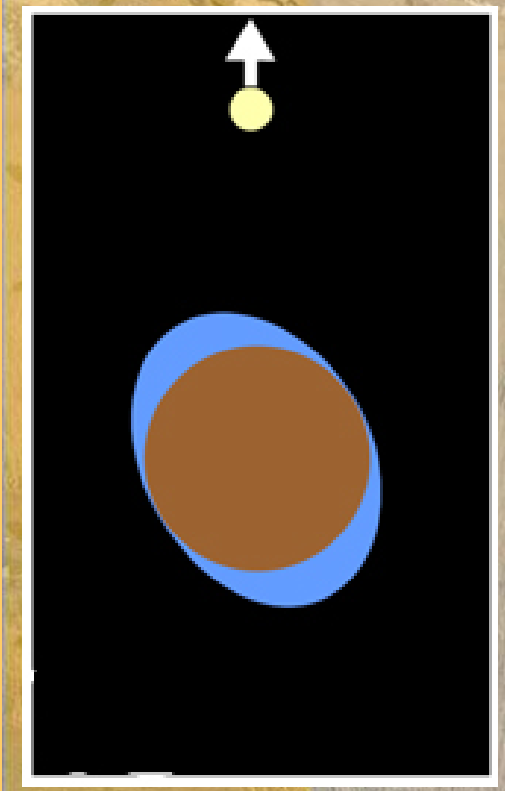




LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

✶Les marées et le système Terre-Lune

➢La Terre ralentit, la Lune s'enfuit…



- La Lune s'éloigne de la Terre à raison de 3,8 cm par année.
- On pense que lors de sa formation, la Lune n'était qu'à ± 30 000 km de la Terre.
  - Les marées étaient >>> qu'aujourd'hui.
  - Il n'y avait pas d'éclipses annulaires de Soleil

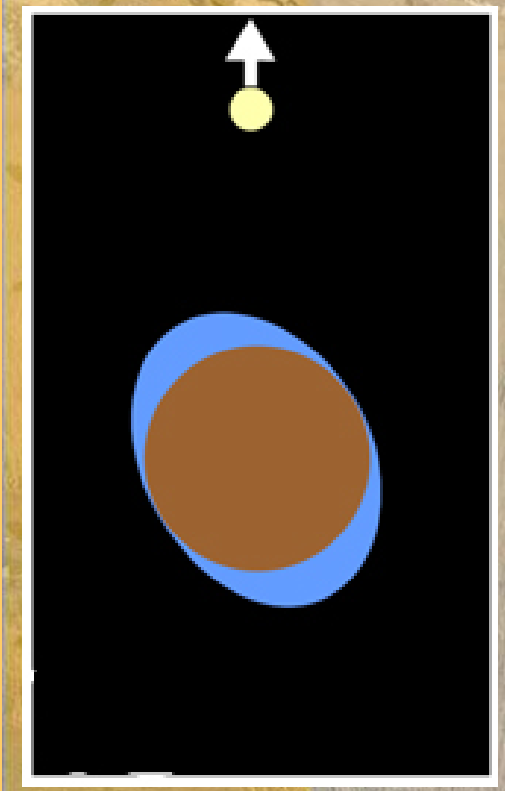
Il y a conservation du moment cinétique au sein du couple Terre-Lune.



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

✶Les marées et le système Terre-Lune

➢La Terre ralentit, la Lune s'enfuit…



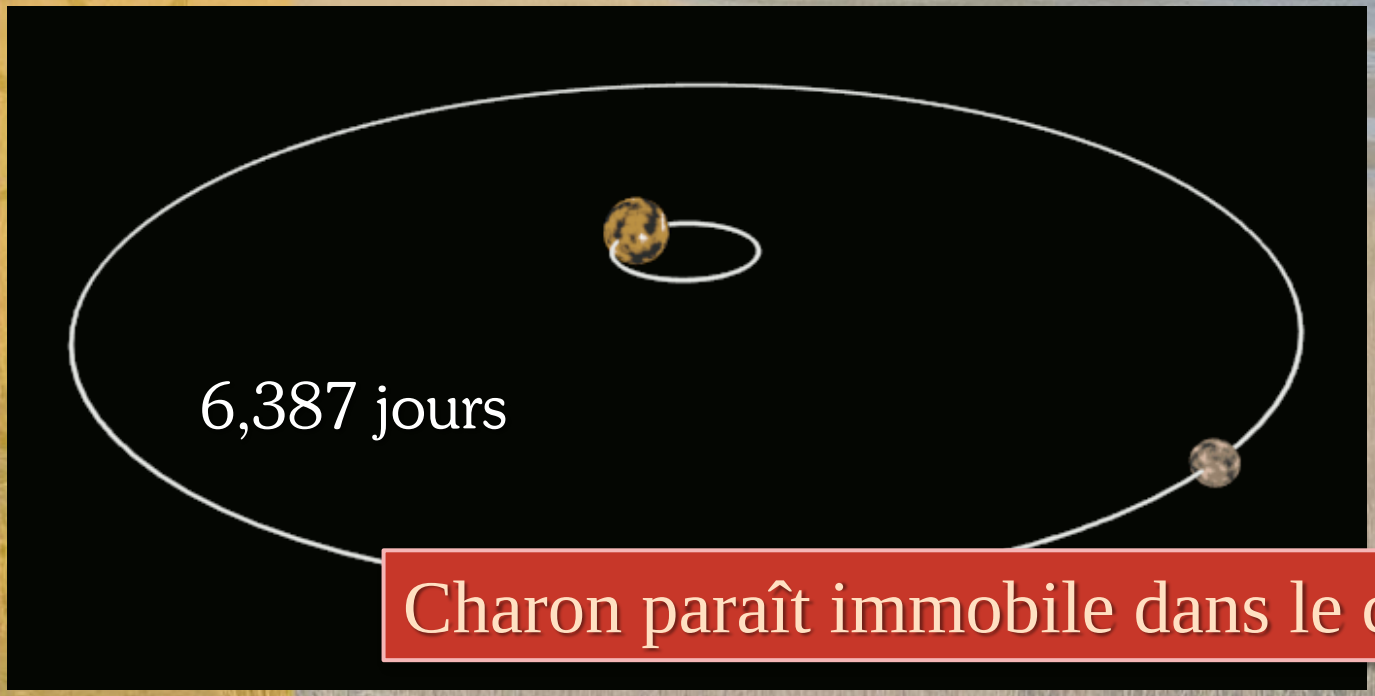
- La Lune s'éloigne de la Terre à raison de 3,8 cm par année.
- On pense que lors de sa formation, la Lune n'était qu'à ± 30 000 km de la Terre.
  - Les marées étaient >>> qu'aujourd'hui.
  - Il n'y avait pas d'éclipses annulaires de Soleil

En théorie, la Terre pourrait finir par présenter une rotation synchrone avec la Lune mais pas avant ~ 10 X 10^9 années !



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- **Les marées dans le Système solaire**
  - Un bel exemple de synchronisation orbitale parfaite : le couple Pluton – Charron



Charon paraît immobile dans le ciel de Pluton !



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans le Système solaire
  - Sous le joug de Jupiter
    - Io – la lune tourmentée…



- Diamètre : 3 643 km
- Distance de Jupiter : 421 700 km
- Période de révolution : 1,77 jour
- T° interne : 10 000 °C
- T° externe : - 140 °C



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans le Système solaire
  - Sous le joug de Jupiter
    - Io – la lune tourmentée…



- Un volcanisme intense (~ 400)
  - Orbite verrouillée
  - Orbite elliptique
  - Force de frictions internes – cisaillement

Sonde Voyageur I

LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

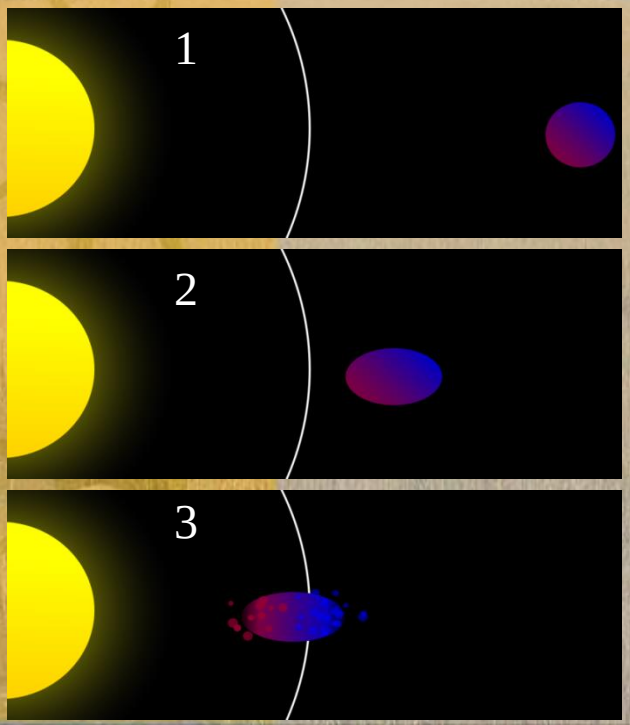
- Les marées dans le Système solaire
  - Jupiter, une arme de destruction massive
    - La comète Shoemaker-Levy 9
      - 21 impacts entre le 16 et le 22 juillet 1994

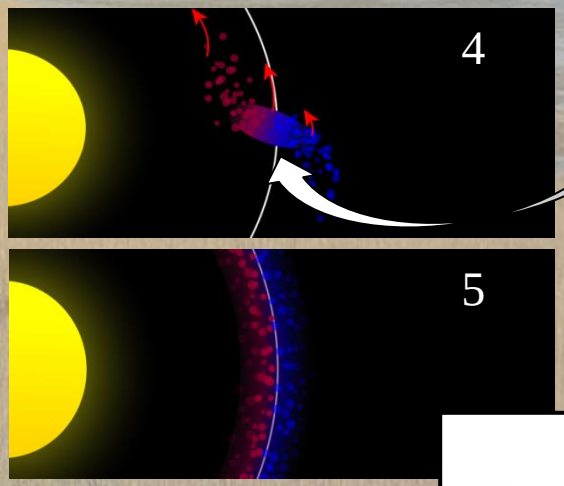




LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans le Système solaire
  - Jupiter, une arme de destruction massive
    - La comète Shoemaker-Levy 9





- La limite de Roche

$$d = R\sqrt[3]{16\frac{\rho_P}{\rho_s}}$$

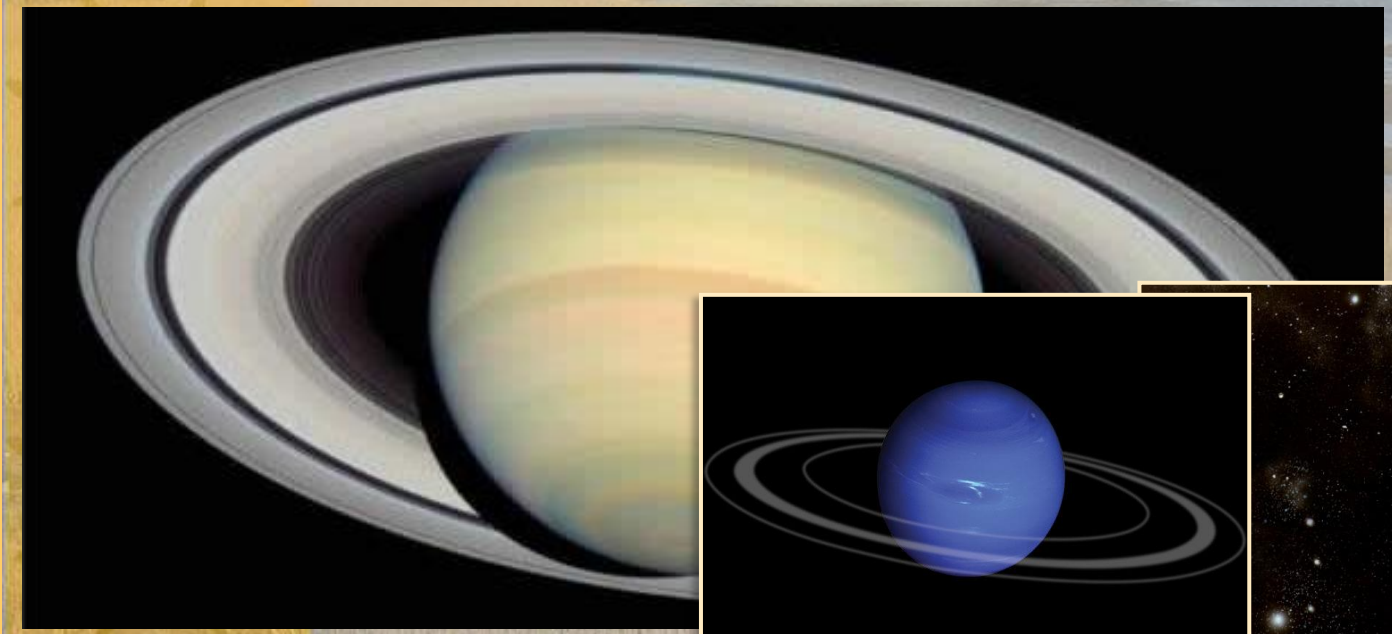


Édouard Roche
1820-1883



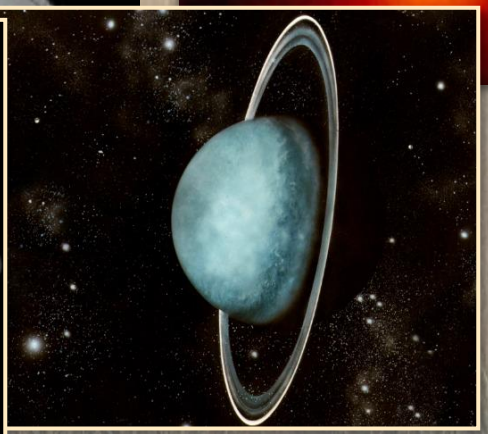
LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans le Système solaire
  - La limite de Roche et les anneaux





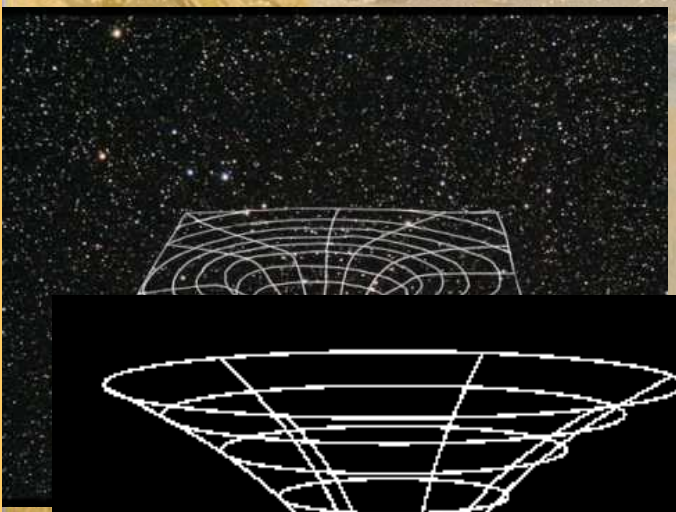


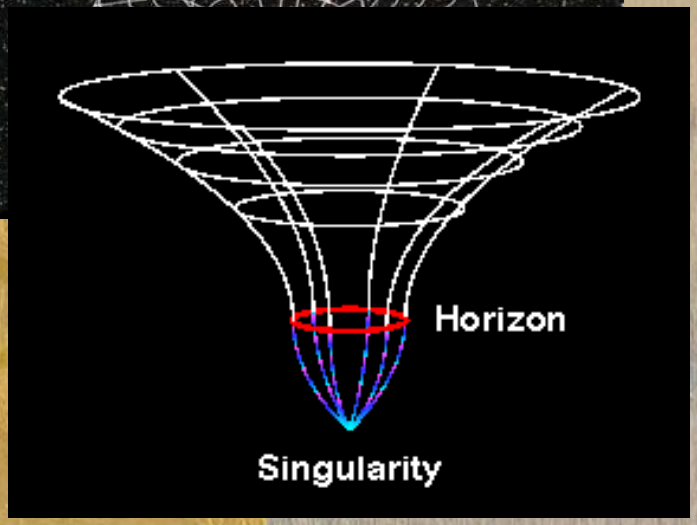




LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans l'Univers
  - Le trou noir et l'horizon des événements









LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans l'Univers
  - Les galaxies en approche et collisions



LES VISAGES DE SÉLÉNÉ

- Les marées dans l'Univers
  - Les galaxies en approche et collisions



NGC 4038


Mignonne allons voir si la rose...
Pierre de Ronsard
UGC 1810



MESSAGES CLÉS

- La marée est un mouvement mu par une force gravitationnelle différentiée sur un corps tridimensionnel.
- La marée survient dans un référentiel non galiléen entre deux ou plusieurs astres en orbite autour de barycentres communs
- La cause des forces de marée qui s'exercent sur la Terre est astronomique et implique l'interaction conjuguée de la Lune et du Soleil. Les forces de marée lunaires sont 2,18 fois supérieures à celles du Soleil.



MESSAGES CLÉS

- Les effets observés des forces de marée en un certain lieu sur la Terre dépendent tout autant de facteurs géographiques et géomorphologiques.
- La force de marée s'incarne dans un front d'ondes dont la propagation dépend de la taille des bassins aqueux, de la profondeur de l'eau, de la présence d'obstacles terrestres et du découpage des côtes.
- Les ondes de marée montrent des patrons d'interférence qui font varier l'amplitude du niveau de l'eau.



MESSAGES CLÉS

- Dans l'Univers, les forces de marée sont omniprésentes: elles expliquent les synchronisations orbitales, certains processus de frottement et de cisaillement, la désagrégation de corps célestes à l'approche de la limite de Roche, la formation d'anneaux autour des planètes, la déformation de galaxies en interaction ou les patrons d'absorption des trous noirs.



RÉFÉRENCES

- Astronomie et Astrophysique, 2e édition
  Séguin M, Villeneuve B
  Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 2002

- Tout savoir sur les marées
  Odile Guérin
  Éd : Ouest-France, 2004

- Site Internet de *Pêches et Océans Canada* :
  https://www.waterlevels.gc.ca/fra/info/marees

- Explications générales sur les marées :
  https://fr.wikipedia.org/wiki/Mar%C3%A9e