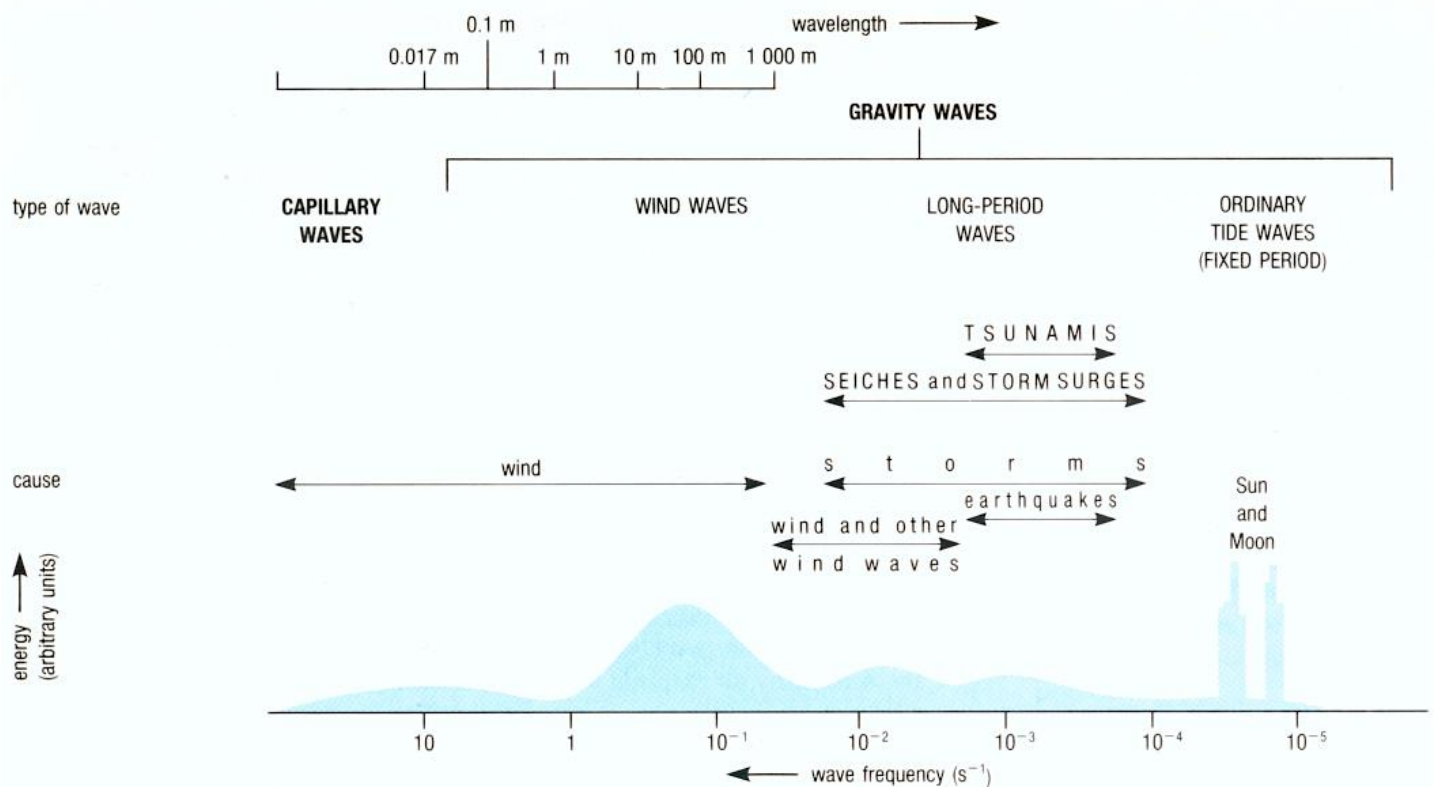


Chapitre 5

Ondes océaniques, vagues et marées



ondes : phénomènes capables de transporter de l'énergie sans transport de matière

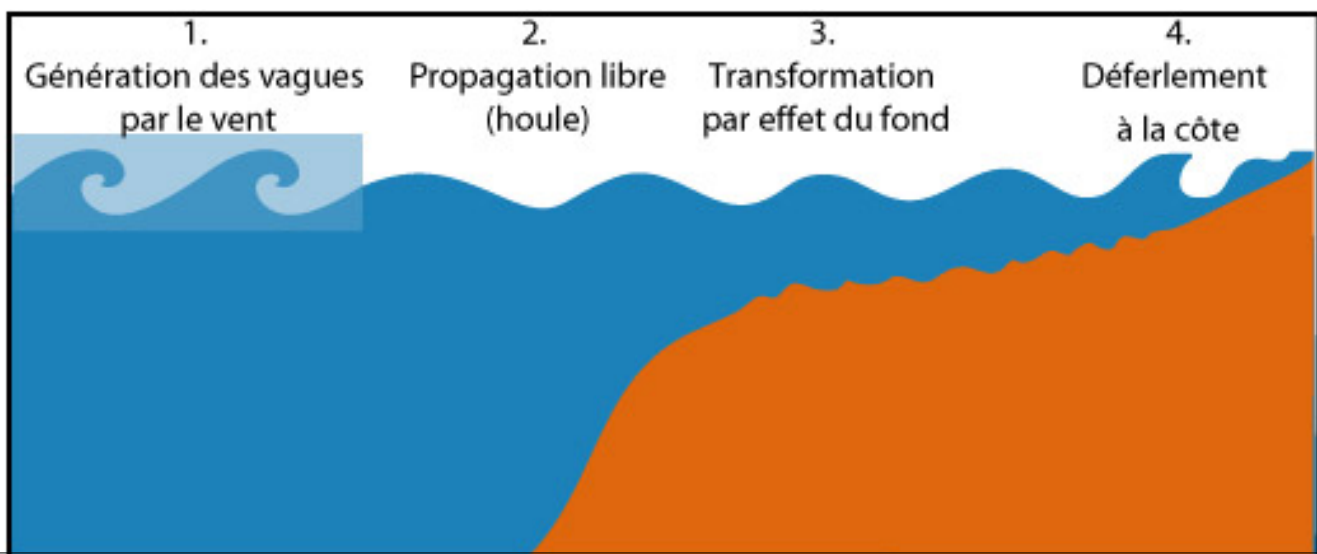
vague et houle : ondes de gravité externe

- dynamique gouvernée par la gravité (force de rappel)
- amplitude maximale en surface et décroît avec la profondeur
- période ~ 10 secondes : $\omega \gg N \gg f$

N mesure la stratification $\sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

f le paramètre de Coriolis associé à la rotation de la Terre $\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

excitation par le forçage atmosphérique (vent, pression)



Ondes de gravité de surface

Hypothèses :

- non dissipatif : pas de viscosité
- non tournant
- homogène : $\rho \equiv \rho_0$ constant et uniforme
- petits mouvements par rapport à l'état au repos : $\mathbf{u} = 0$, $p(z) = p_{atm} - \rho g z$
- écoulement incompressible : $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$
- écoulement potentiel $\mathbf{u} = \nabla \phi$, ce qui supprime le mode de vorticité : en l'absence de viscosité, il ne peut y avoir de création de vorticité, donc si il n'y en a pas initialement à $t = 0$ il n'y en aura jamais.
- fond plat : $H = \text{constante}$

 quations :

$$\begin{aligned} \partial_t u &= -\rho_0^{-1} \partial_x p \\ \partial_t v &= -\rho_0^{-1} \partial_y p \\ \partial_t w &= -\rho_0^{-1} \partial_z p - g \\ \partial_x u + \partial_y v + \partial_z w &= 0, \end{aligned}$$

où l'on a absorbé la densité ρ_0 dans la définition de p , ce que nous ferons continuellement par la suite.

Les conditions aux limites sont les suivantes

i) **en surface** 2 CL : cinématique+dynamique

$$\begin{cases} \partial_t \eta + u \partial_x \eta + v \partial_y \eta = w \\ p(\eta) = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{linearisation}} \begin{cases} \partial_t \eta = w(0) \\ p(0) = g \rho_0 \eta \end{cases}$$

ii) **au fond** 1 seule CL (la réaction du fond est quelconque) : cinématique

$$w(-H) = 0.$$

L'écoulement étant irrotationnel on introduit le potentiel des vitesses ϕ défini par $\mathbf{u} = \nabla \phi$.

Résolution :

On cherche des solutions du type : $(\eta, \phi) = (\eta_0, \phi_0) e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)}$ et on obtient, avec $k = |\mathbf{k}|$,

$$\begin{aligned} \eta &= a \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t) \\ \phi &= a \frac{\omega \cosh k(z+H)}{k \sinh kH} \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t) \end{aligned}$$

3

La condition dynamique de surface nous fournit la **relation de dispersion**

$$\omega^2 = gk \tanh kH.$$

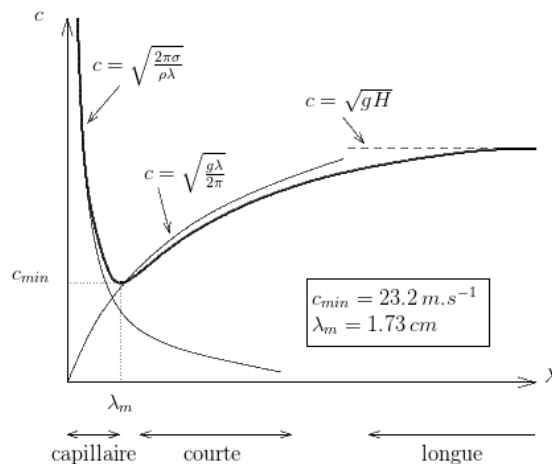


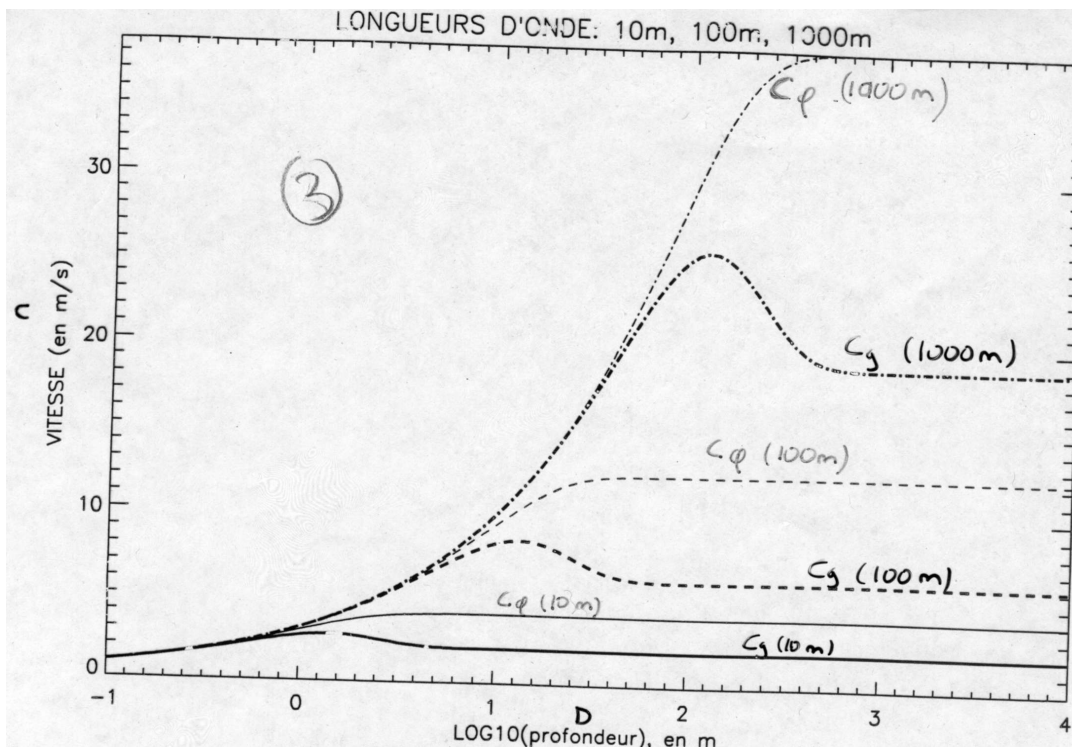
FIGURE 1 - Relation de dispersion des ondes de gravité.

On distingue 2 régimes suivant le rapport profondeur / longueur d'onde :

- **Eau profonde** ou ondes courtes : $kH \gg 1$
 - $\omega = \sqrt{gk}$
 - ondes dispersives $c_g = \frac{1}{2}c$
 - $u(z)$ décroit exponentiellement. Les ondes ne sentent pas le fond.
 -  chelle caractéristique verticale $\delta \sim k^{-1}$
- **Eau peu profonde** ou ondes longues : $kH \ll 1$
 - $\omega = \sqrt{gH}k$
 - ondes non dispersives $c_g = c$
 - $u(z)$ est pratiquement uniforme. Les ondes sentent le fond, il s'agit du mode barotrope
- les ondes vraiment longues sentent la rotation de la Terre, ce seront les ondes de d'inertie-gravité.

4

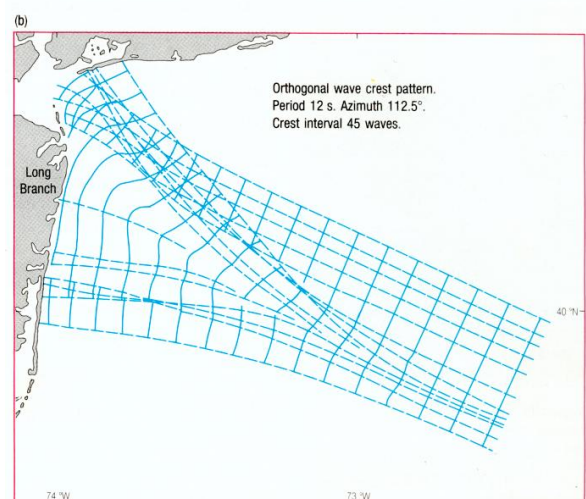
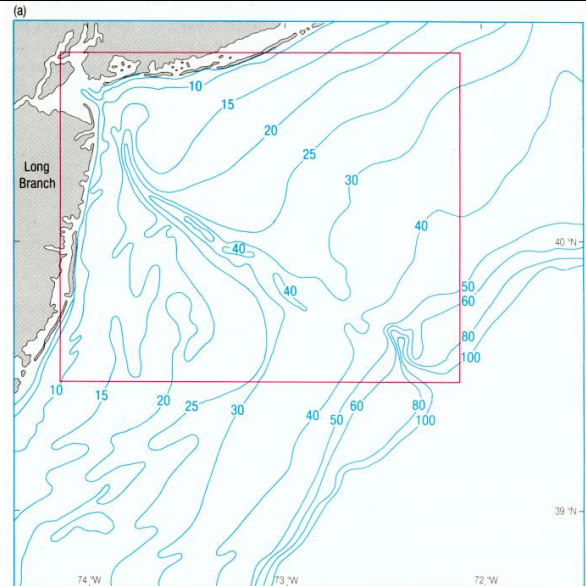
Vitesse de propagation fonction de la profondeur pour différentes longueurs d'onde



7

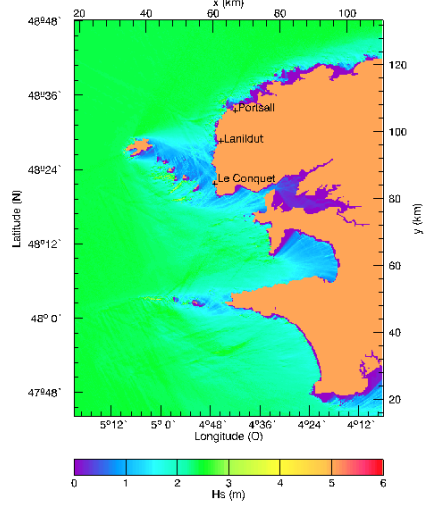
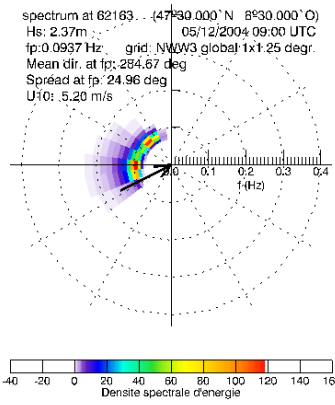
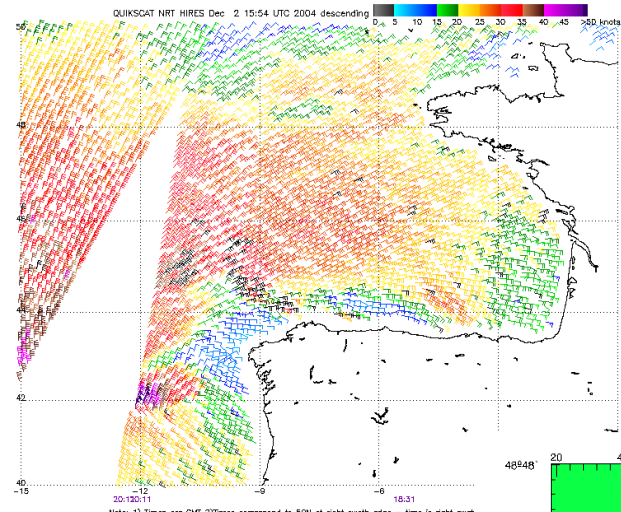
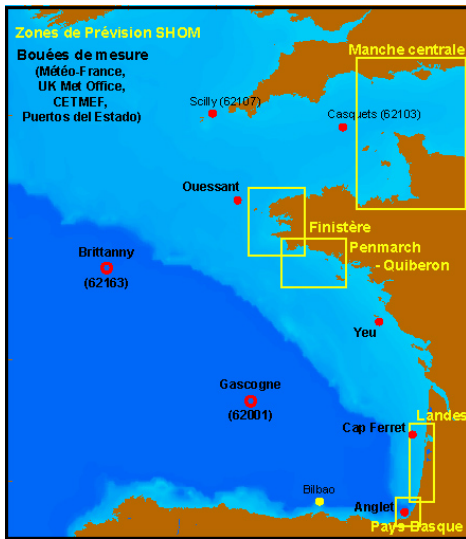
réfraction de la houle au voisinage d'une côte

(a) Le profil bathymétrique du plateau continental à l'entrée de la rivière Hudson, New York (a) affecte la vitesse de la houle et modifie le chemin des rayons associés (b).



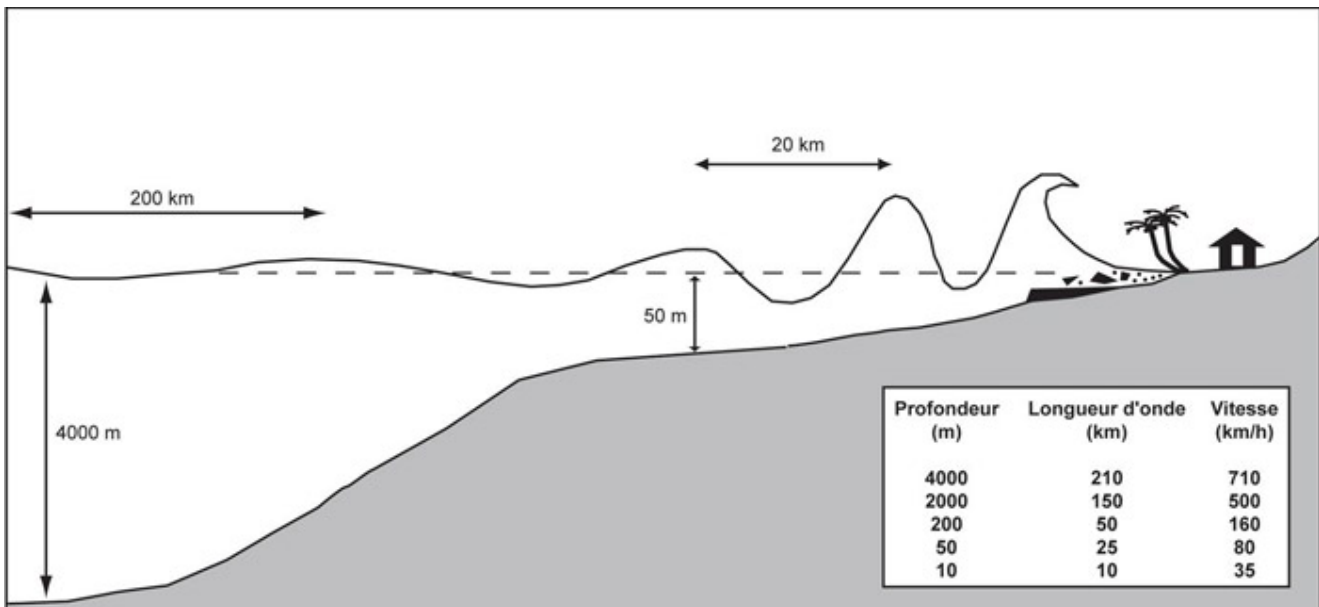
prévision de la houle/vagues

nécessite des prévisions météorologiques de vent



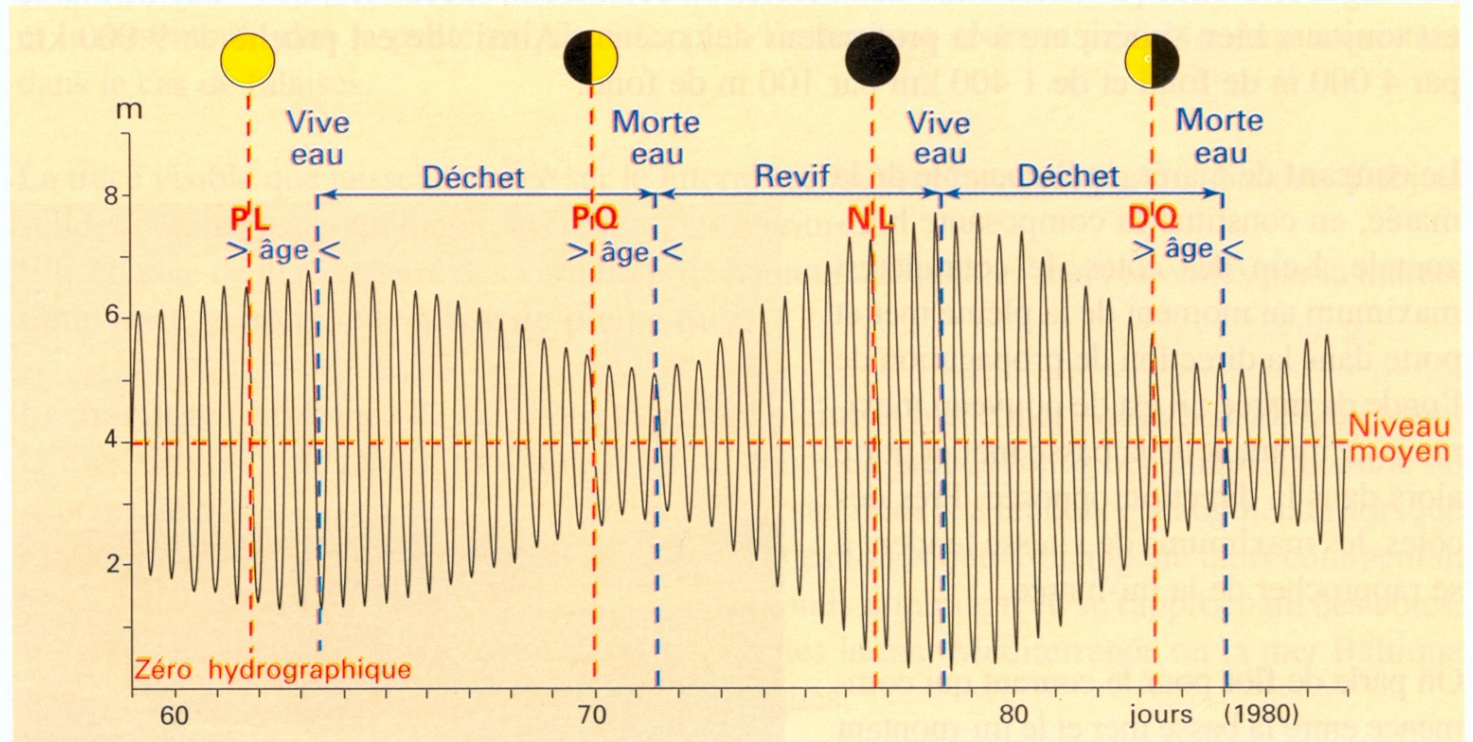
tsunamis

- excitation par séisme sous-marin à très grande longueur d'onde (100 km)
- propagation très rapide au large : $\sqrt{(gH)}=200\text{m/s}=700\text{ km/h}$
- amplitude augmente dramatiquement à la côte



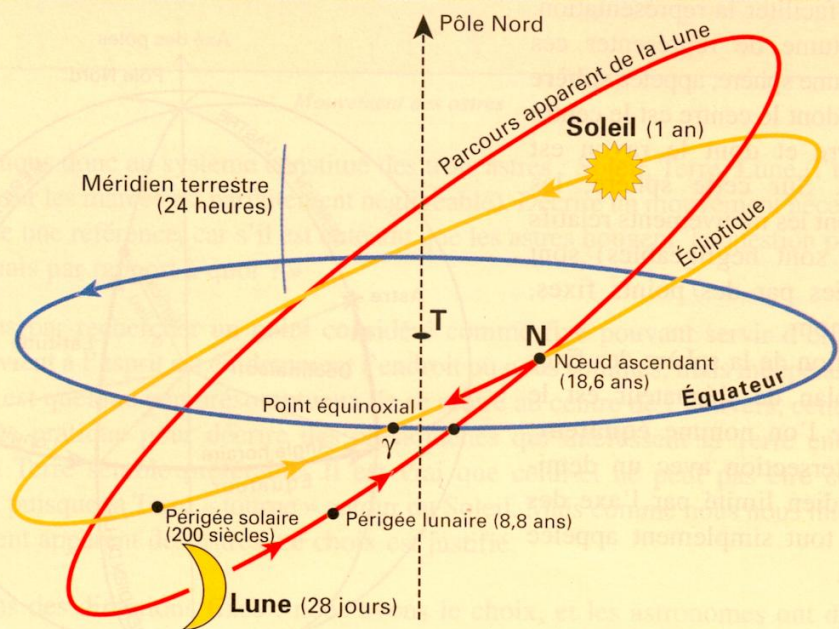
La marée

Lorsque le marnage est maximum, on parle de marée de **vive-eau (VE)**, et lorsqu'il est minimum de marée de **morte-eau (ME)**.



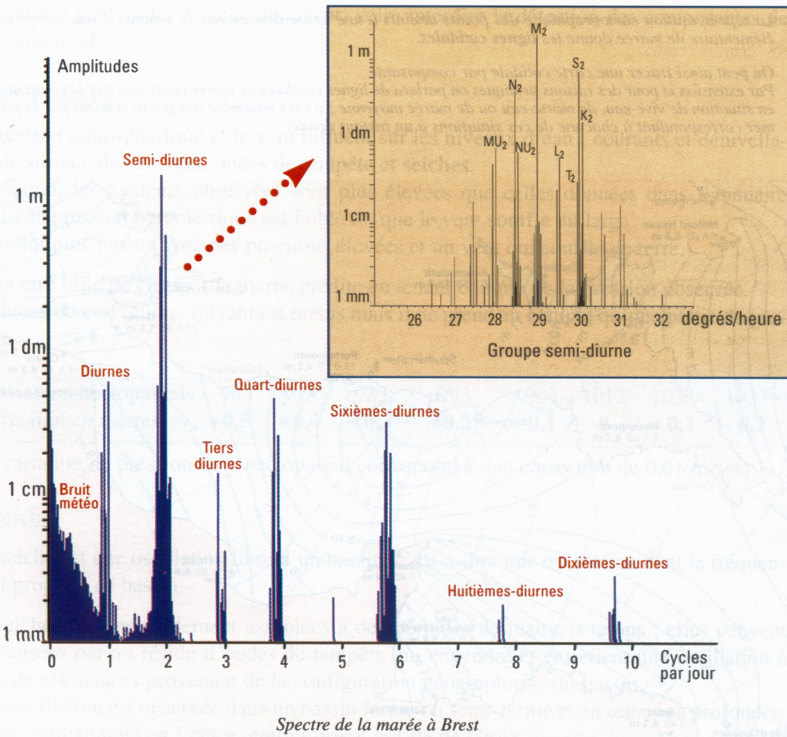
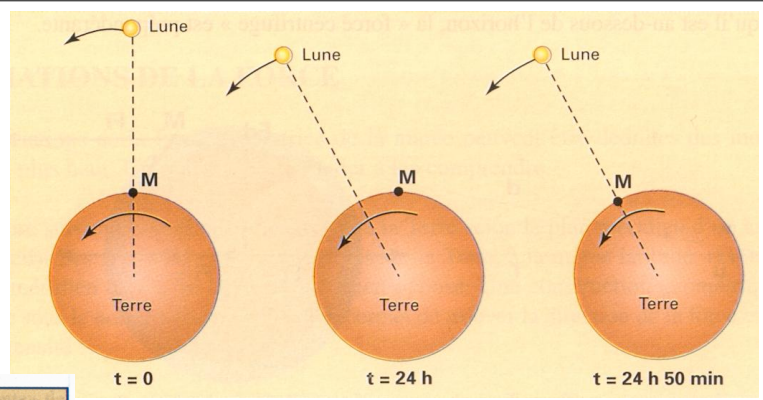
Courbe de marée pendant une lunaison

mouvement des astres



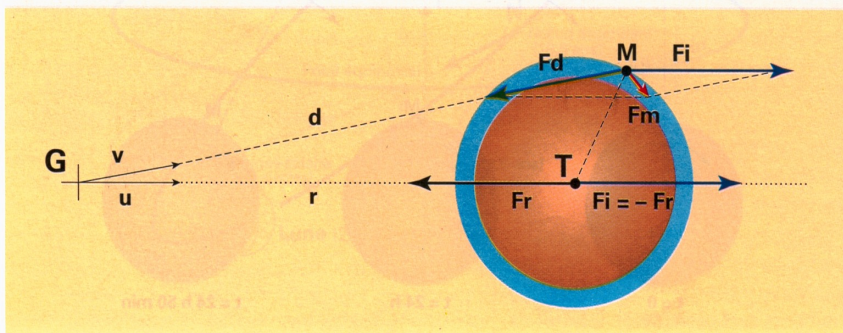
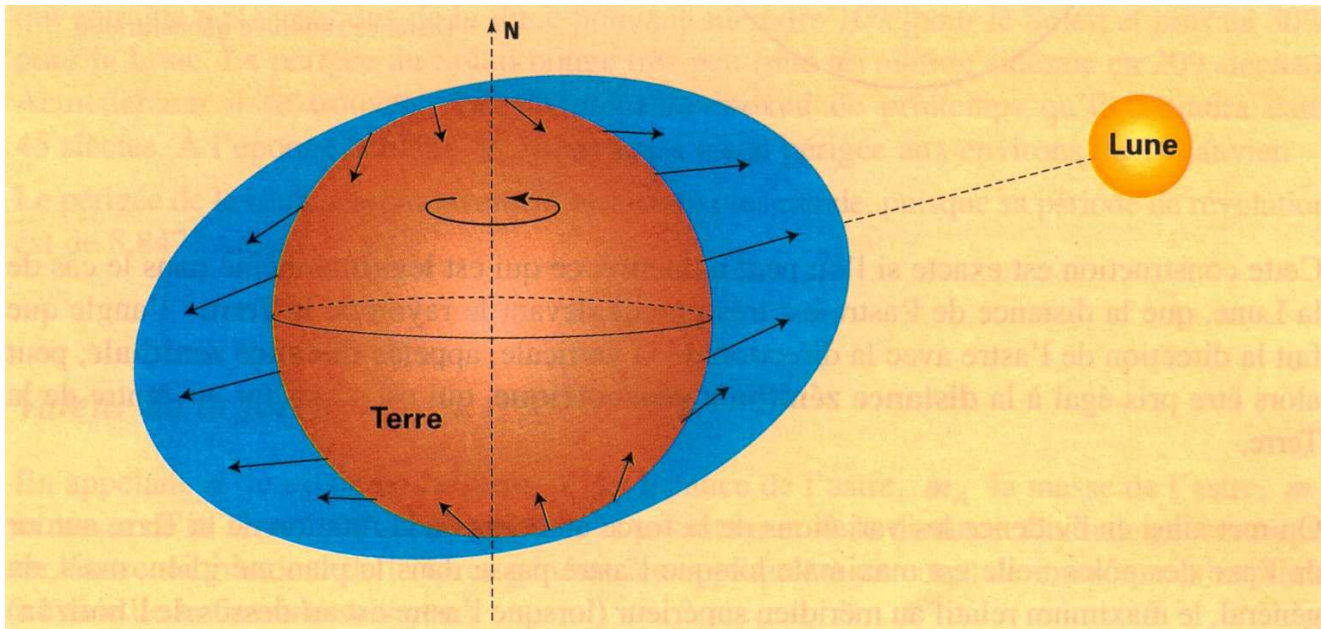
rapportés au référentiel terrestre

jour lunaire :
 2 PM en 24h50,
 période 12h25,
 décalage de 50'/jour



spectre de la marée à Brest
 semi-diurnes
 M2 lunaire (moon) 12h25 100%
 S2 solaire (sun) 12h00 46%
 diurnes
 O1 K1 P1...

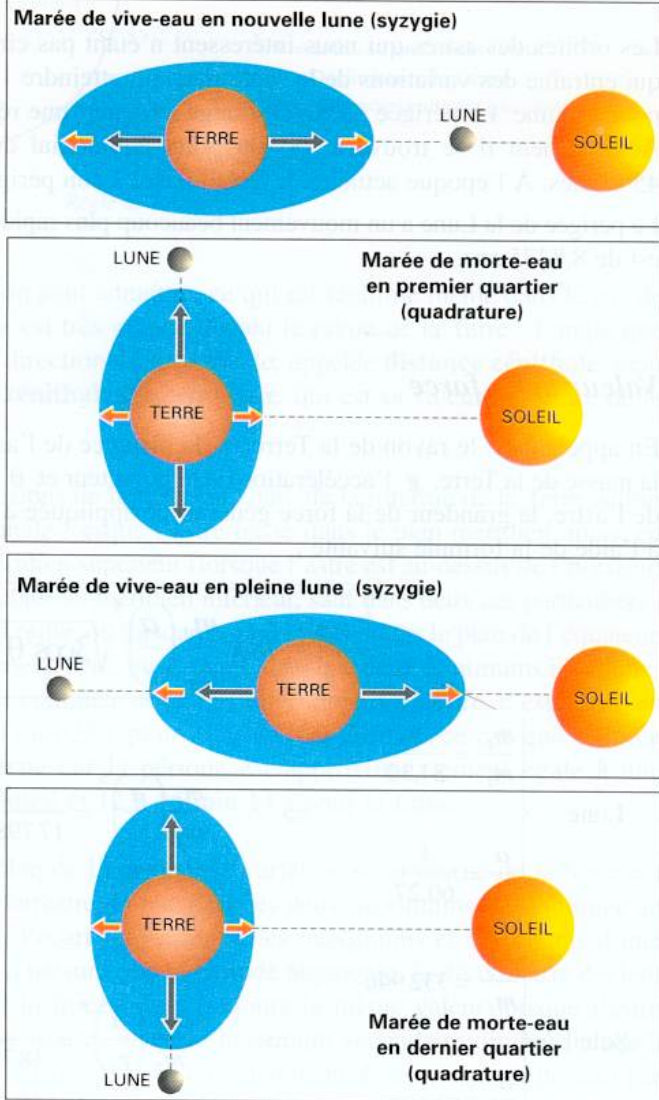
ellipsoïde équipotentiel et force génératrice de la marée



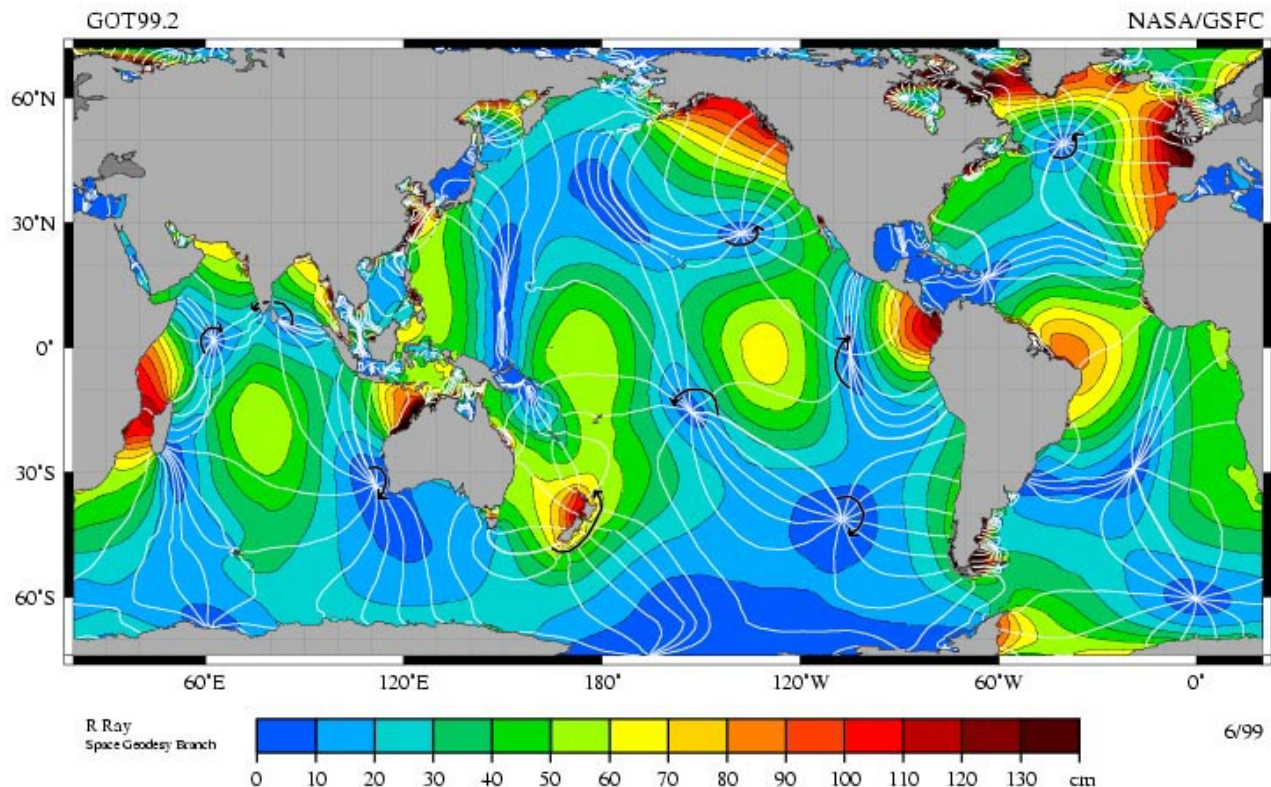
Construction géométrique de la force génératrice

différentes configurations du système Terre-Lune-Soleil affectant l'amplitude des marées (lunaison)

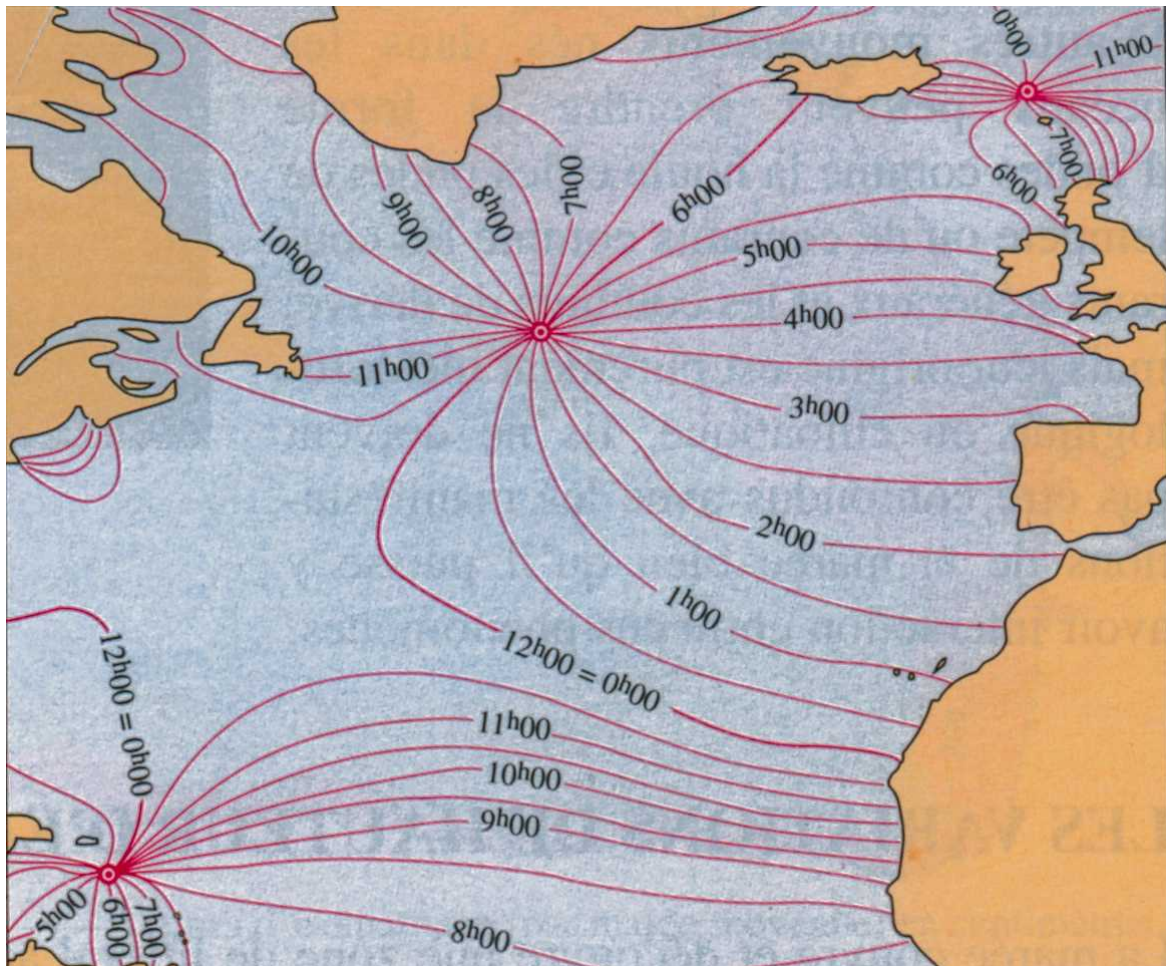
coefficient de marée (Brest) :
 120 marée extraordinaire de vive-eau d'équinoxe
 95 marée de vive-eau moyenne
 70 marée moyenne
 45 marée de morte-eau moyenne
 20 marée de morte-eau la plus faible possible



la marée M2 : amplitude (couleur) et phase (lignes cotidales espacées de 1h, les centres sont les points amphidromiques)



points amphidromiques en Atlantique Nord

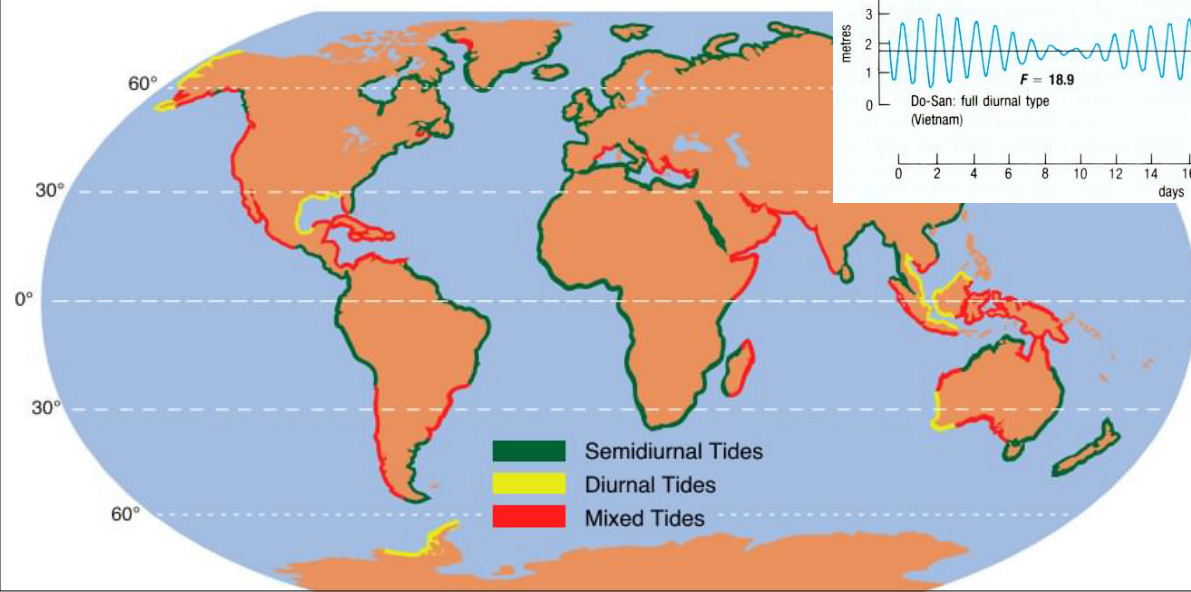
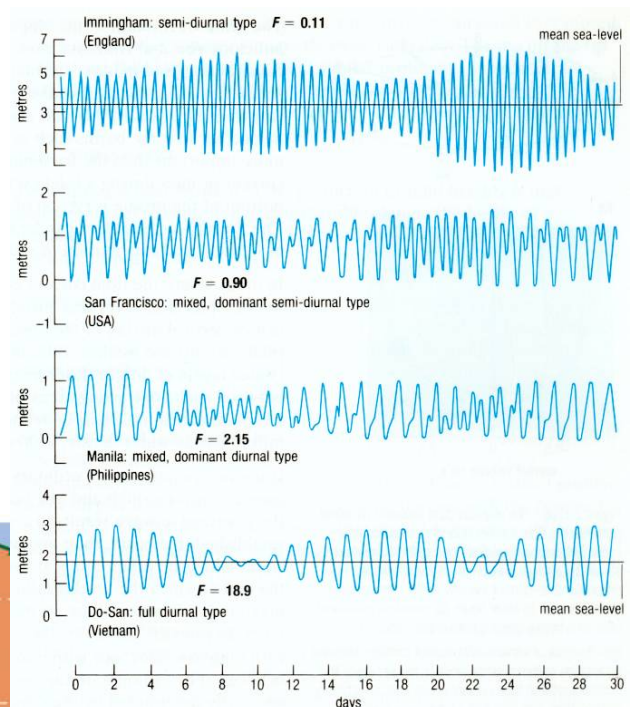


17

les heures de pleine mer sont rapportées au passage de la Lune au méridien de Greenwich

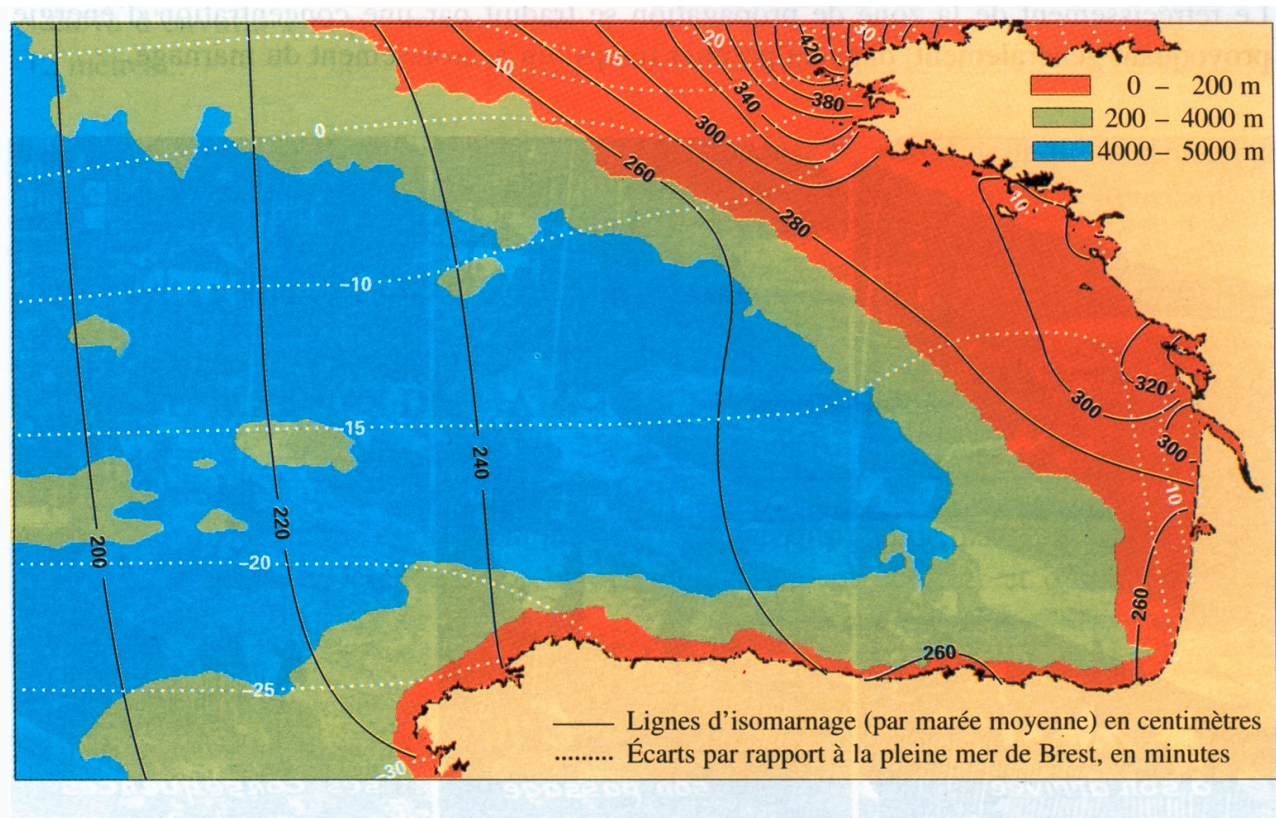
différents signaux de marée observés dans quelques ports :

selon l'endroit le signal dominant peut être de type diurne, semi-diurne, ou mixte



18

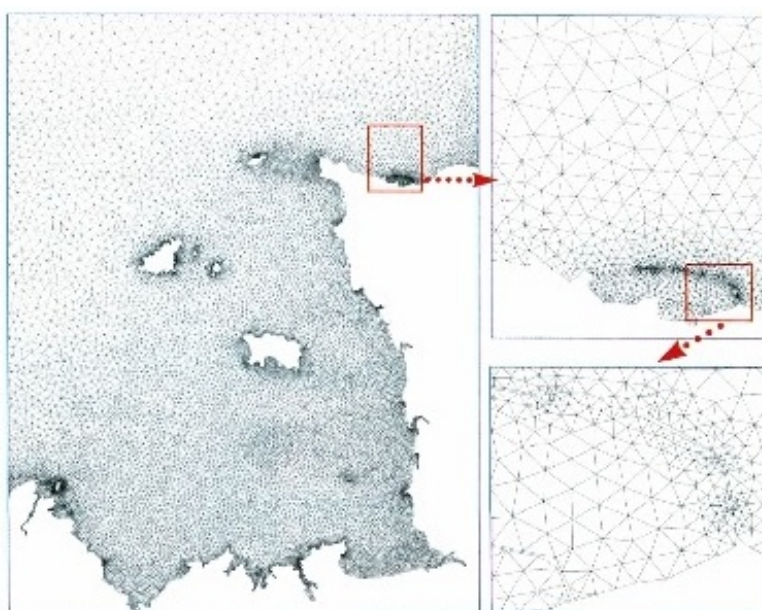
marnage dans le golfe de Gascogne



Modification du marnage et de la direction de propagation de l'onde de marée au passage du talus continental dans le golfe de Gascogne

19

modélisation numérique



La modélisation numérique : maillage du golfe normand-breton

maillage aux éléments finis du golfe normand-breton

20