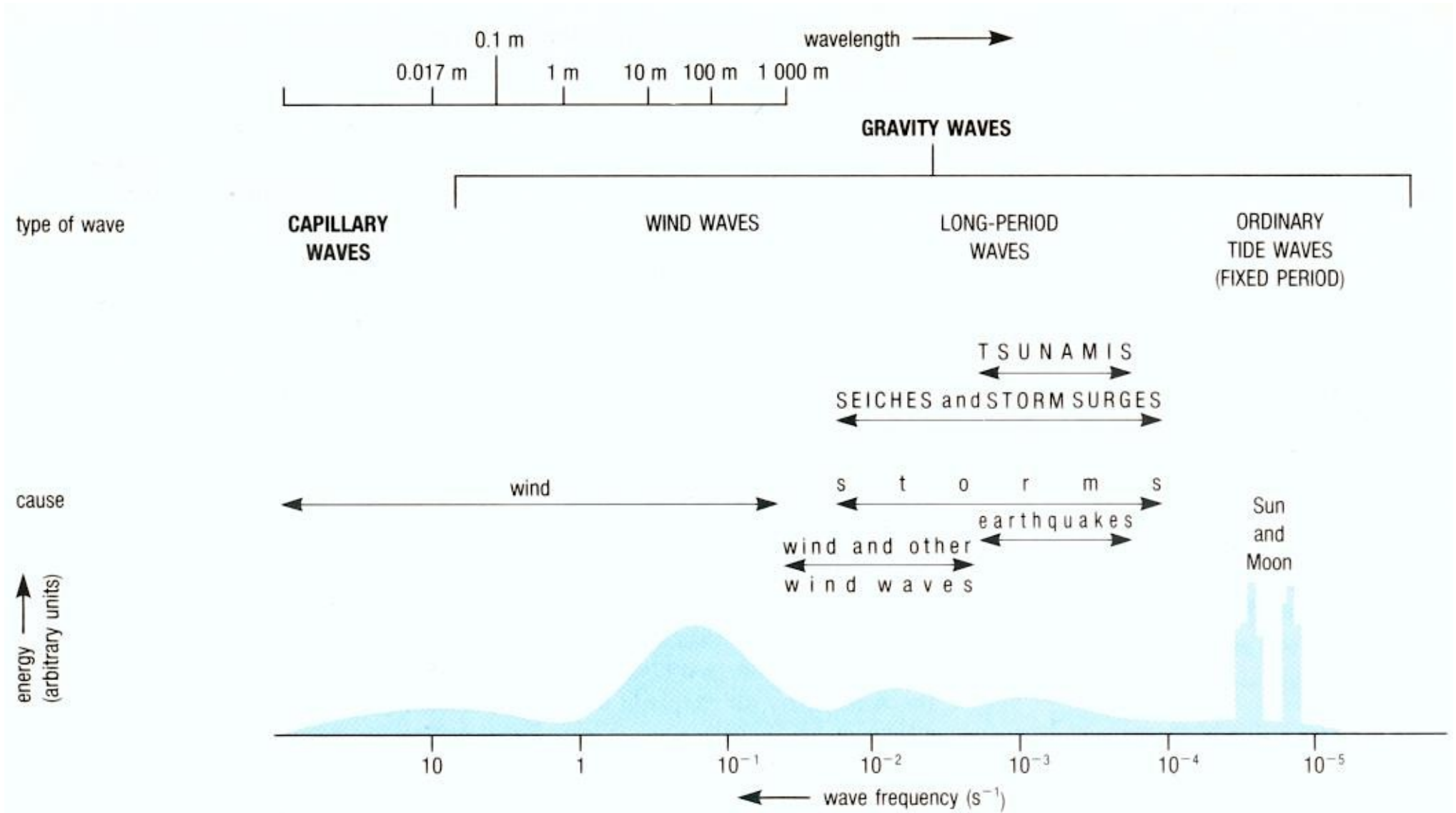


# Chapitre 5

## Ondes océaniques, vagues et marées



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

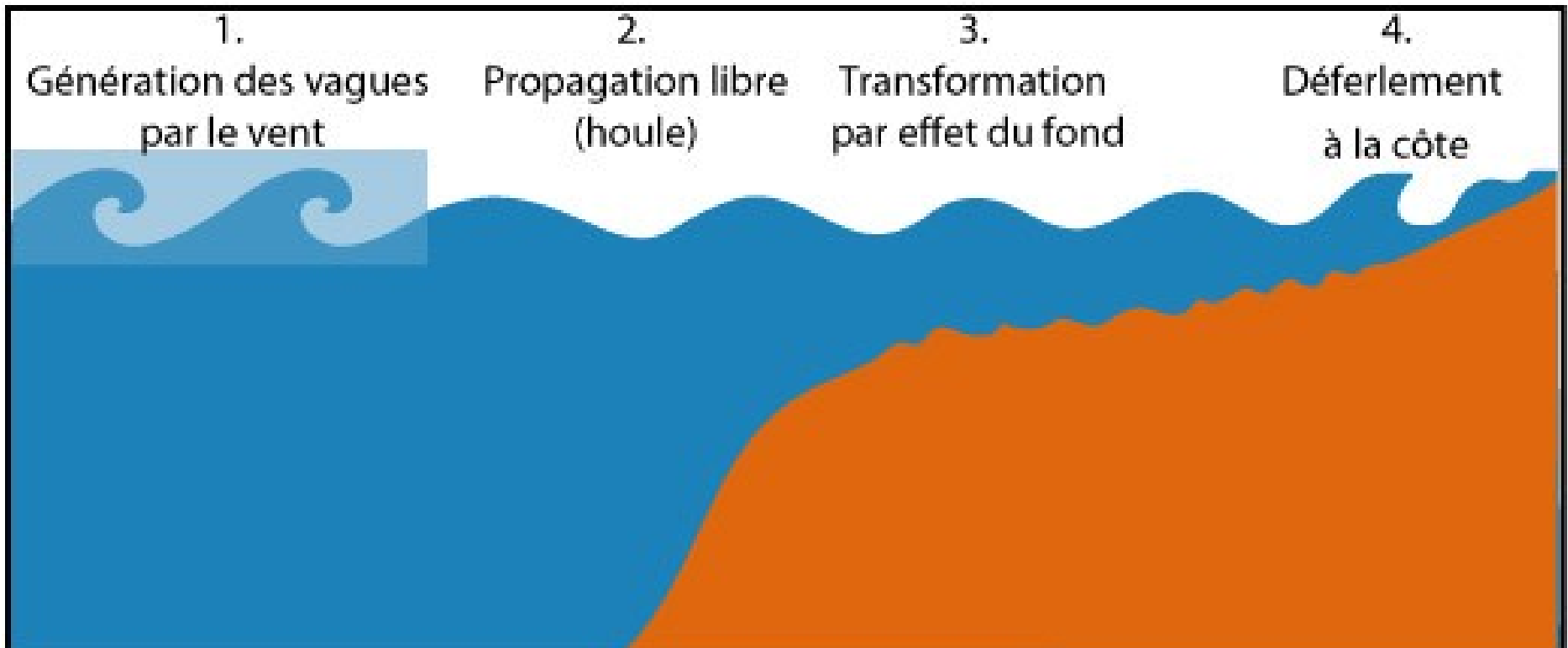
vague et houle : ondes de gravité externe

- dynamique gouvernée par la gravité (force de rappel)
- amplitude maximale en surface et décroît avec la profondeur
- période  $\sim 10$  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 :  $\mathbf{u} = 0$ ,  $p(z) = p_{\text{atm}} - \rho g z$
- 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  $\rho_0$  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  $\phi$  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  $k = |\mathbf{k}|$ ,

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

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

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

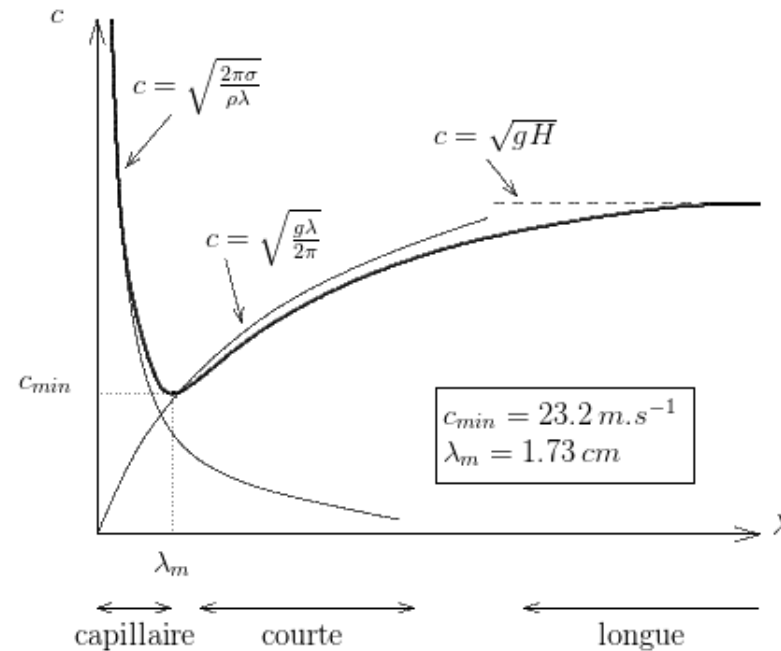


FIGURE 1 – Relation de dispersion des ondes de gravité.

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

- **Eau profonde** ou ondes courtes :  $kH \gg 1$ 
  - $\omega = \sqrt{gk}$
  - ondes dispersives  $c_g = \frac{1}{2}c$
  - $u(z)$  décroît exponentiellement. Les ondes ne sentent pas le fond.  
Échelle 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.

# effet du fetch sur la hauteur des vagues

fetch: distance de mer libre où le vent peut souffler sans influence des terres

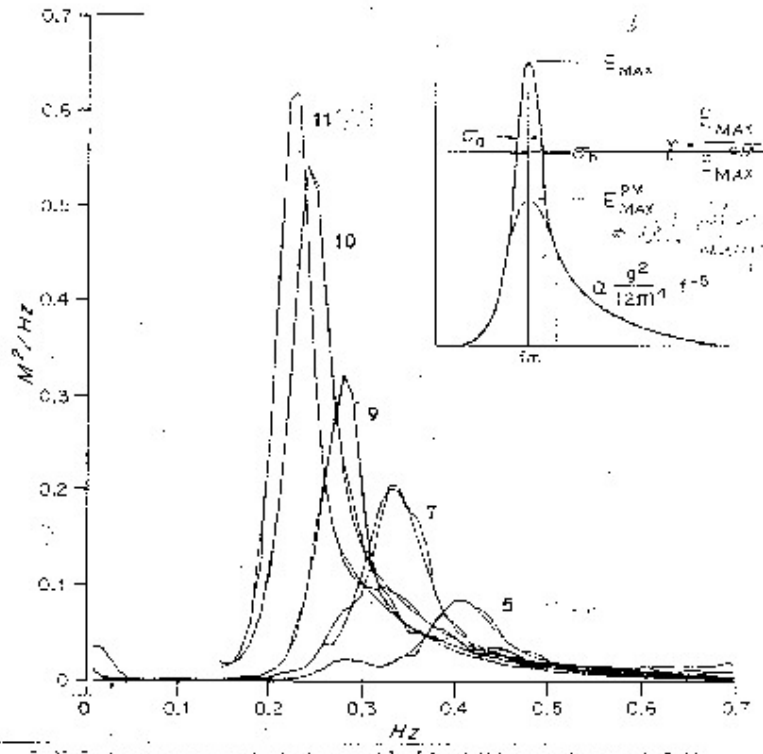
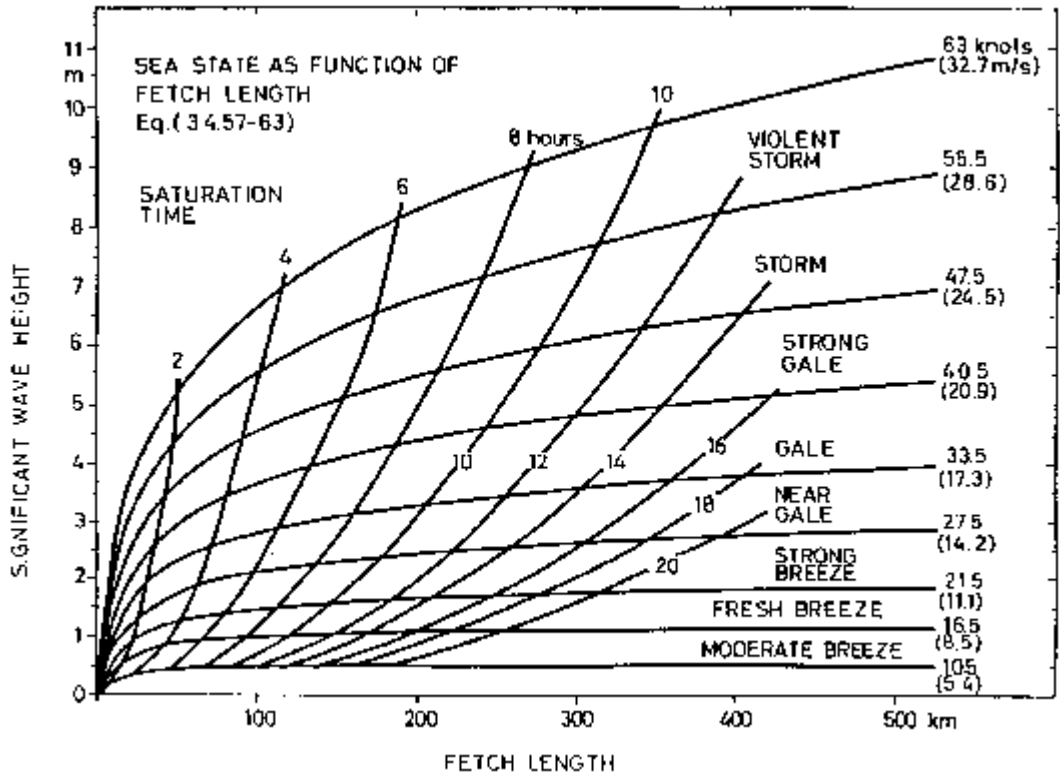
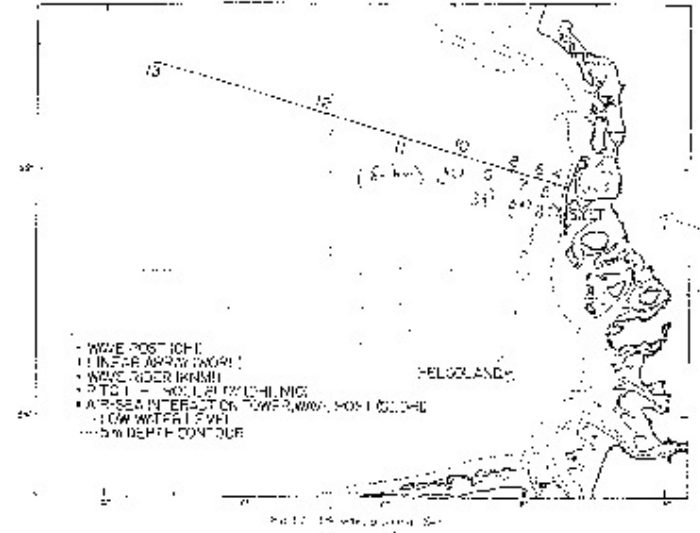


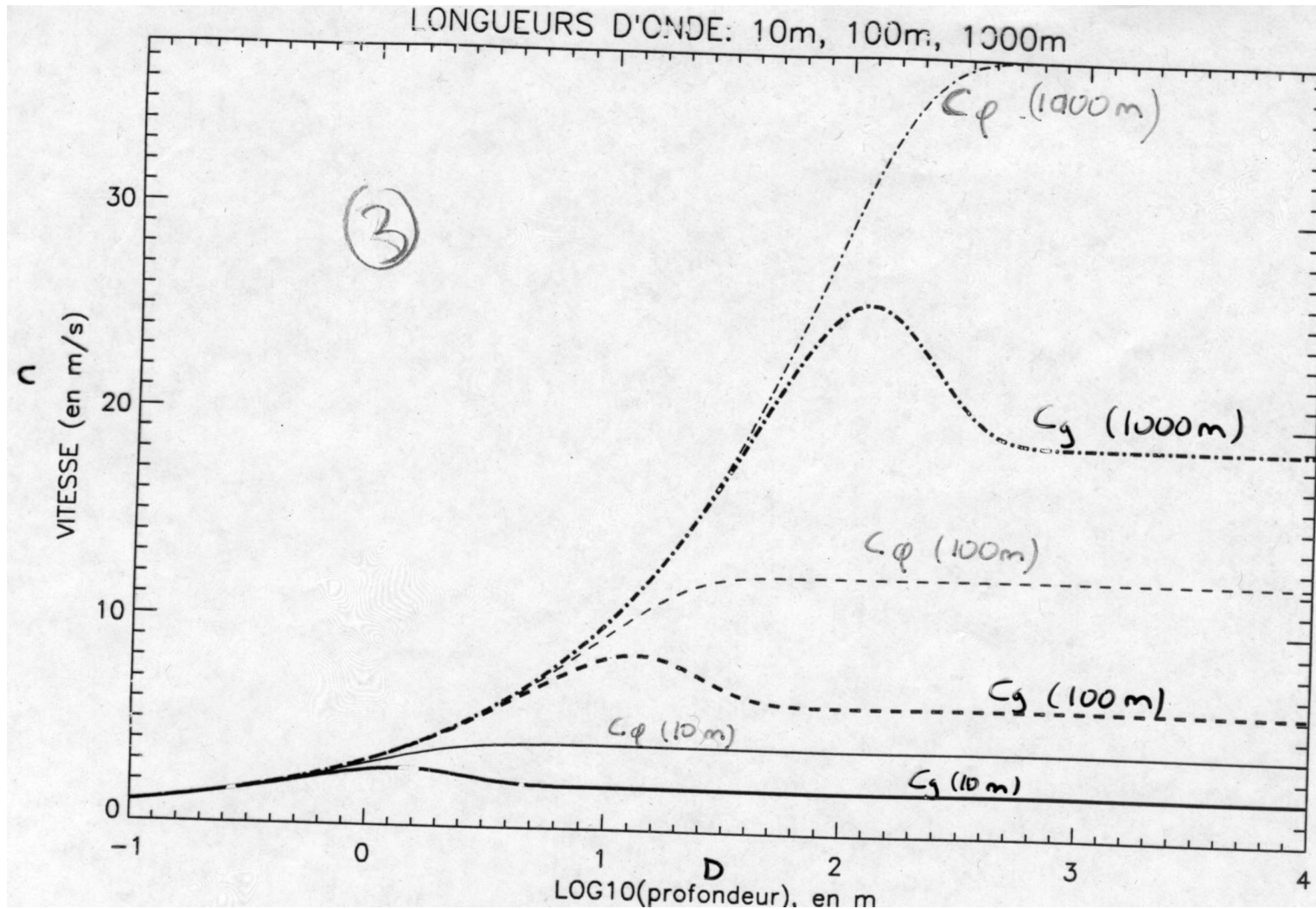
Fig. 10 Evolution of wave energy spectrum with time for different wind speeds. (cf. Sect. 1.104, Subsection 1.104.1, Fig. 1.2. The peak energy  $E_{MAX}$  and peak frequency  $f_p$  are also shown. The inset illustrates the location of the peak energy  $E_{MAX}$  and peak frequency  $f_p$  on the energy spectrum.)

longue de l'axe des ordonnées est la hauteur des vagues...  
l'axe des abscisses est la fréquence des vagues...

# vent (échelle de Beaufort) et caractéristiques des vagues associées

Force	Vent (km/h)	Effets visibles	Etat de la mer	Hauteur de vague (m)
0	0	La fumée s'élève verticalement	Calme	0
1	1 à 5	Le vent incline la fumée	Calme, ridée	0.1-0.2
2	6 à 11	Bruissement des feuilles	Vaguelettes	0.3-0.5
3	12 à 19	Le vent agite les feuilles	Peu agitée	0.6-1.0
4	20 à 28	Les petites branches remuent	Agitée, petits moutons	1.5
5	29 à 38	Les arbustes remuent	Houleuse, embruns éventuels	2.0
6	39 à 49	Les grandes branches bougent	Très houleuse. Les lames se forment, crêtes d'écume.	3.5
7	50 à 61	Les arbres entiers s'agitent	Grosse. Lames déferlantes, trainées d'écume.	5.0
8	62 à 64	Les petites branches se cassent	Très grosse. Tourbillons d'écume.	7.5
9	75 à 82	Le vent arrache les cheminées	Lames déferlantes, grosses à énormes. Visibilité réduite.	9.5
10	89 à 102	Le vent déracine ou brise les arbres	Très grosses lames déferlantes, en rouleaux, larges bancs d'écume. Visibilité réduite.	12.0
11	103 à 117	Rare. Ravages considérables	Lames exceptionnellement hautes, mer blanche d'écume.	15.0
12	118 et plus	Très rare. Ouragan	Enorme. Visibilité fortement réduite.	> 15

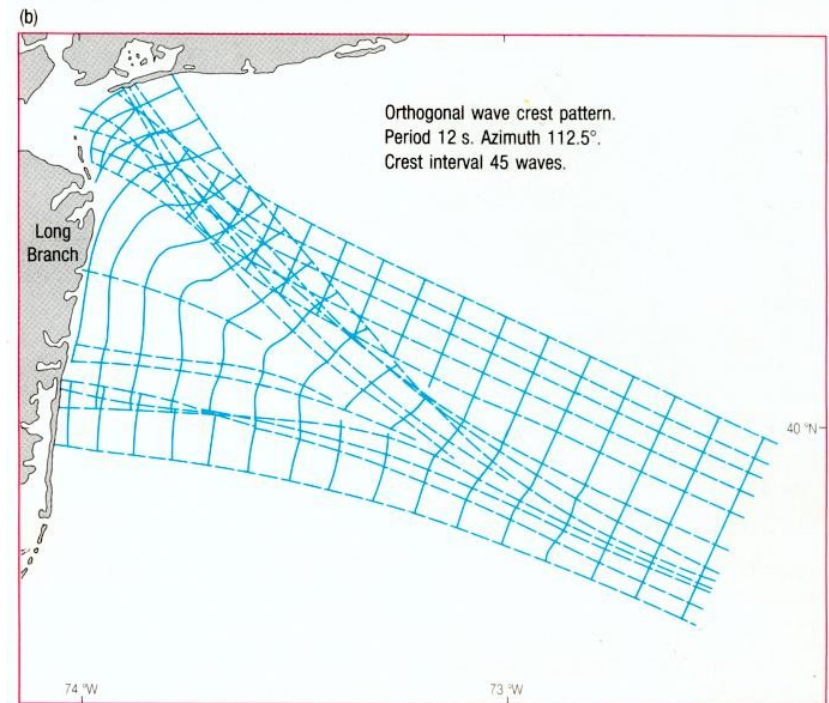
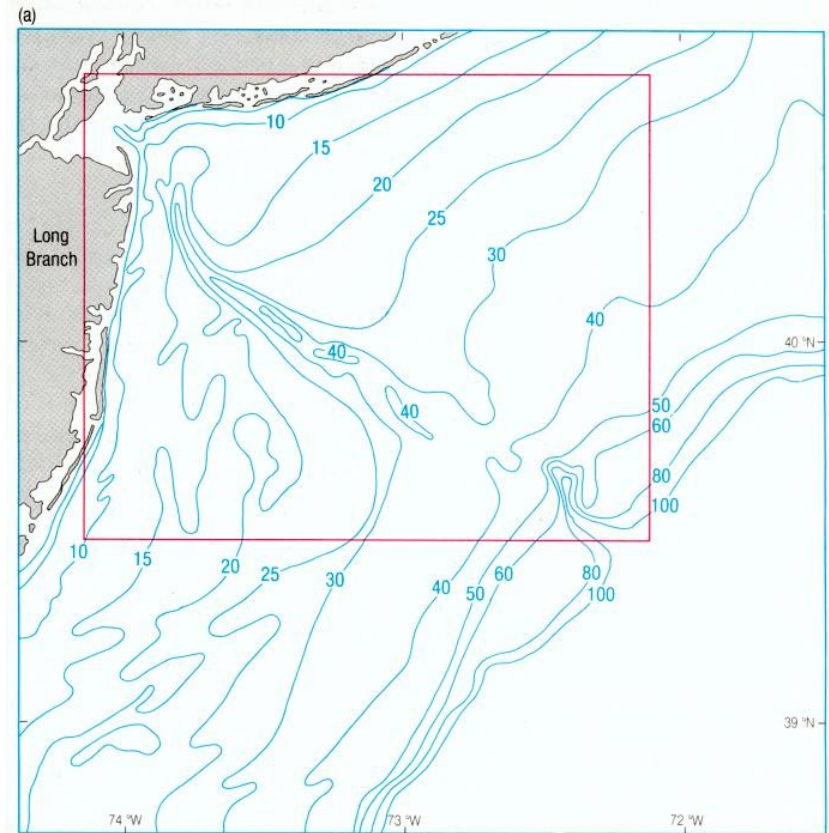
# Vitesse de propagation fonction de la profondeur pour différentes longueurs d'onde





# réfraction de la houle au voisinage d'une côte

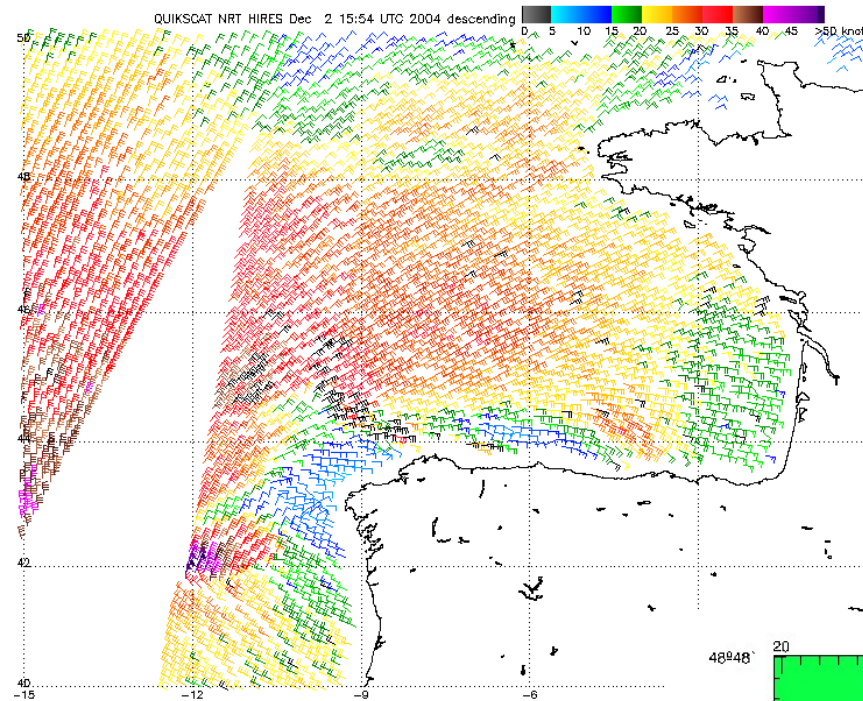
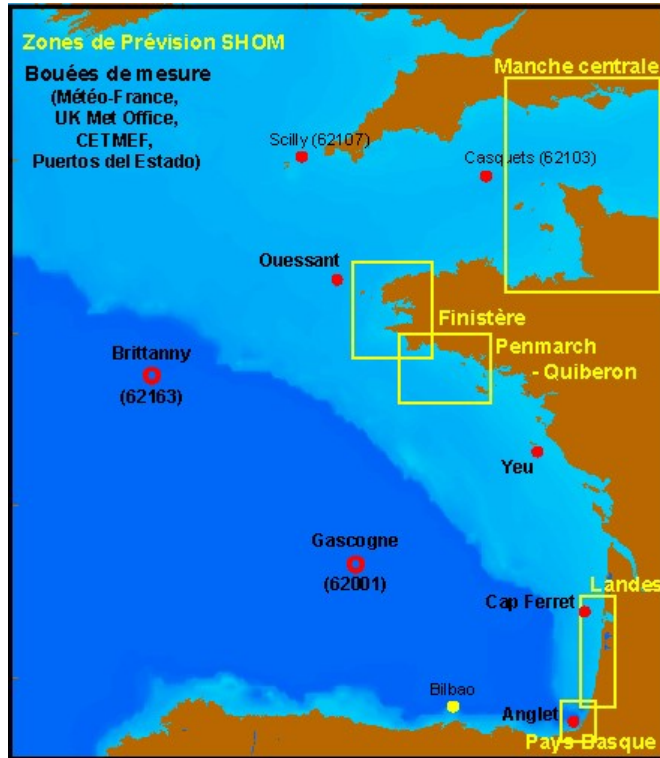
(a) Le profil bathymétrique du plateau continental à l'entrée de la rivière Hudson, New York (a) affecte la vitesse de la houle et modifie le chemin des rayons associés (b).



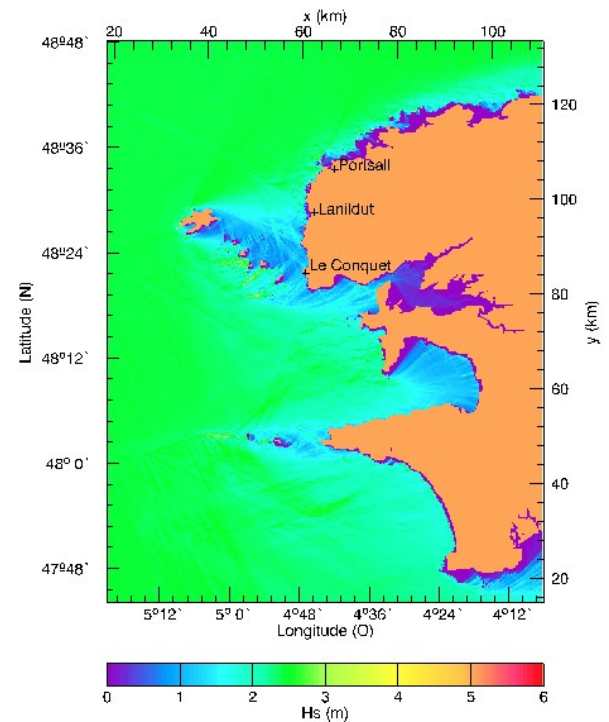
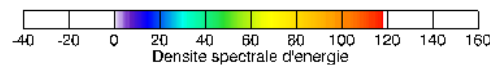
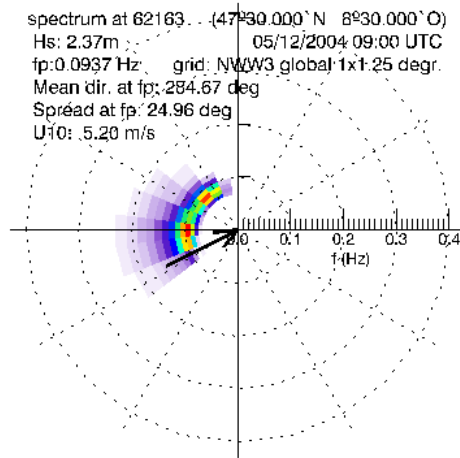


# prévision de la houle/vagues

## nécessite des prévisions météorologiques de vent

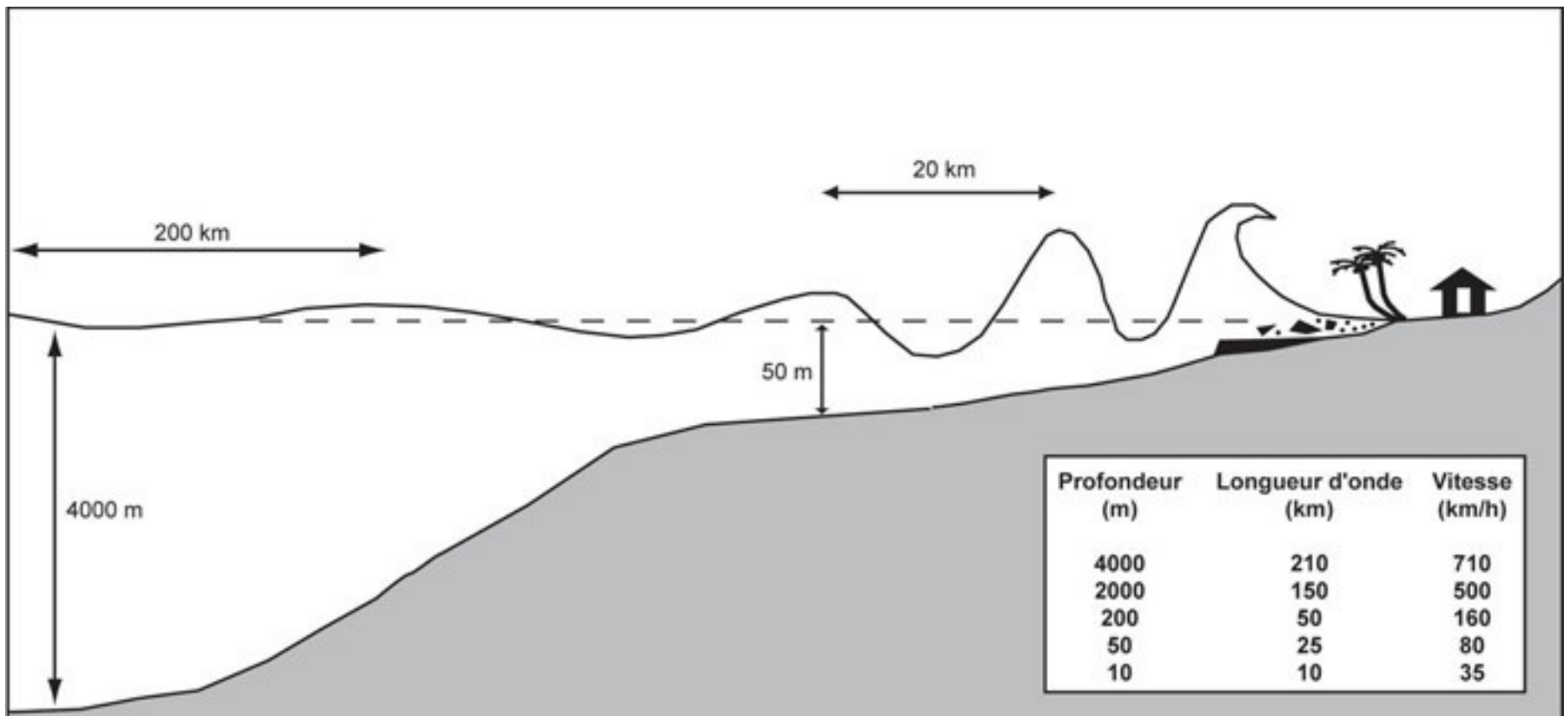


Note: 1) Times are GMT 2) Times correspond to 50N at right swath edge - time is right swath  
3) Data buffer is 22 hrs for Dec 2 15:54 UTC 2004 4) Black bars indicate possible rain  
NOAA/NESDIS/OMF



# tsunamis

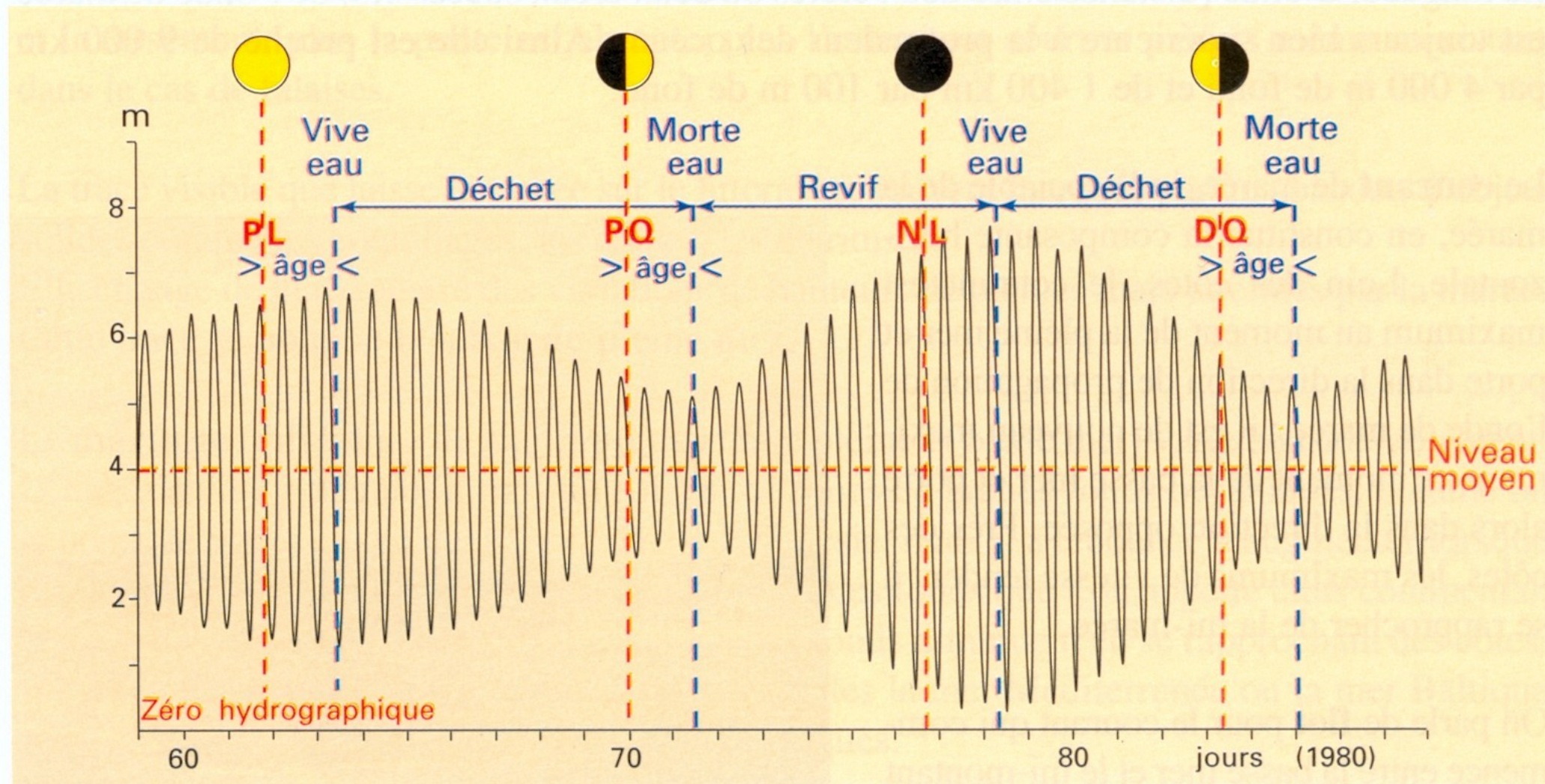
- excitation par séisme sous-marin à très grande longueur d'onde (100 km)
- propagation très rapide au large :  $\sqrt{gH}=200\text{m/s}=700\text{ km/h}$
- amplitude augmente dramatiquement à la côte





# La marée

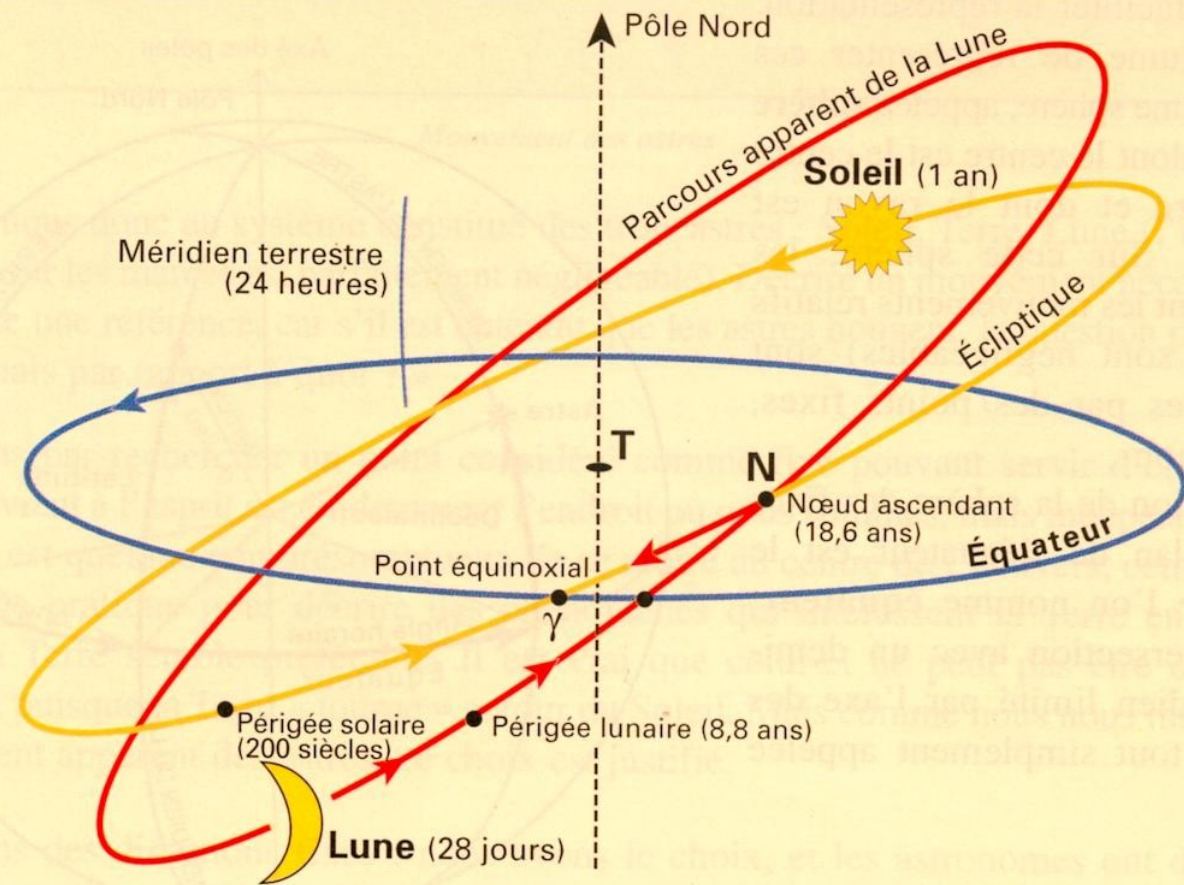
Lorsque le marnage est maximum, on parle de marée de **vive-eau (VE)**, et lorsqu'il est minimum de marée de **morte-eau (ME)**.



*Courbe de marée pendant une lunaison*

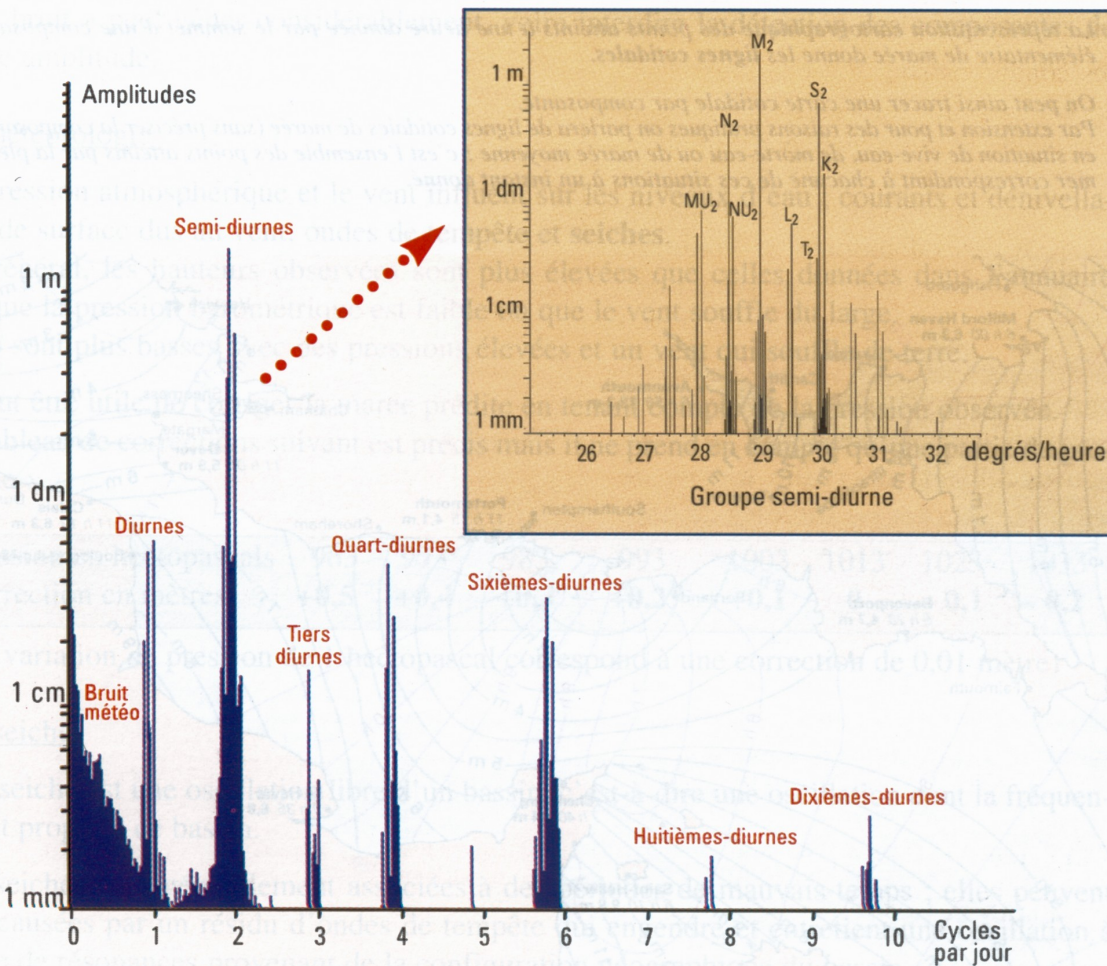
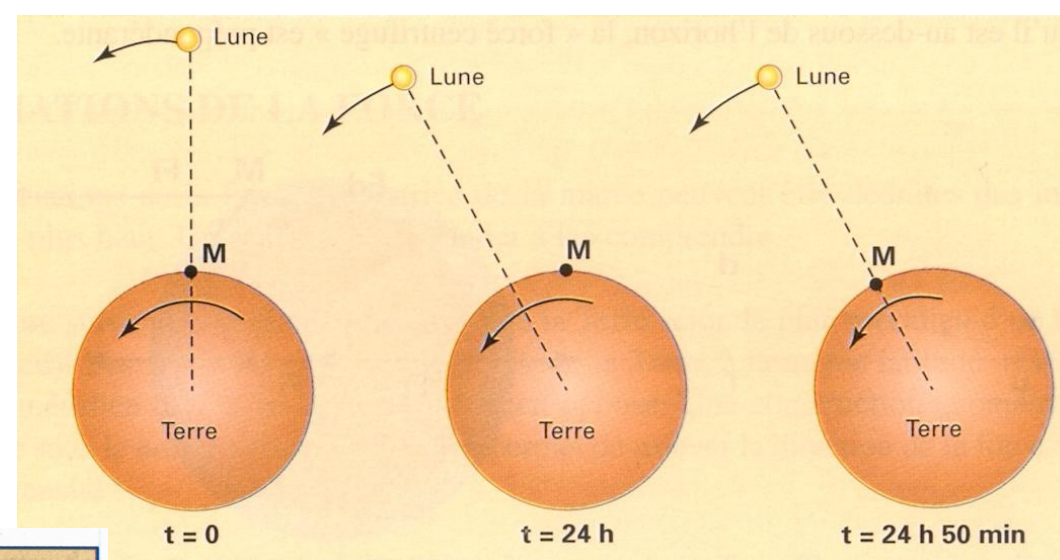


# mouvement des astres



rapportés au référentiel terrestre

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



Spectre de la marée à Brest

spectre de la marée à Brest  
 semi-diurnes

M2 lunaire (moon) 12h25 100%

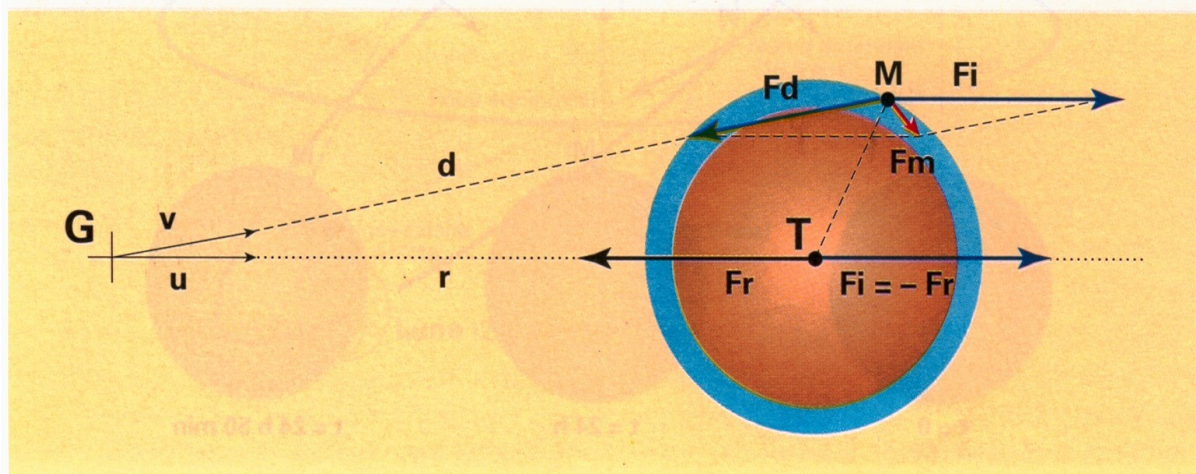
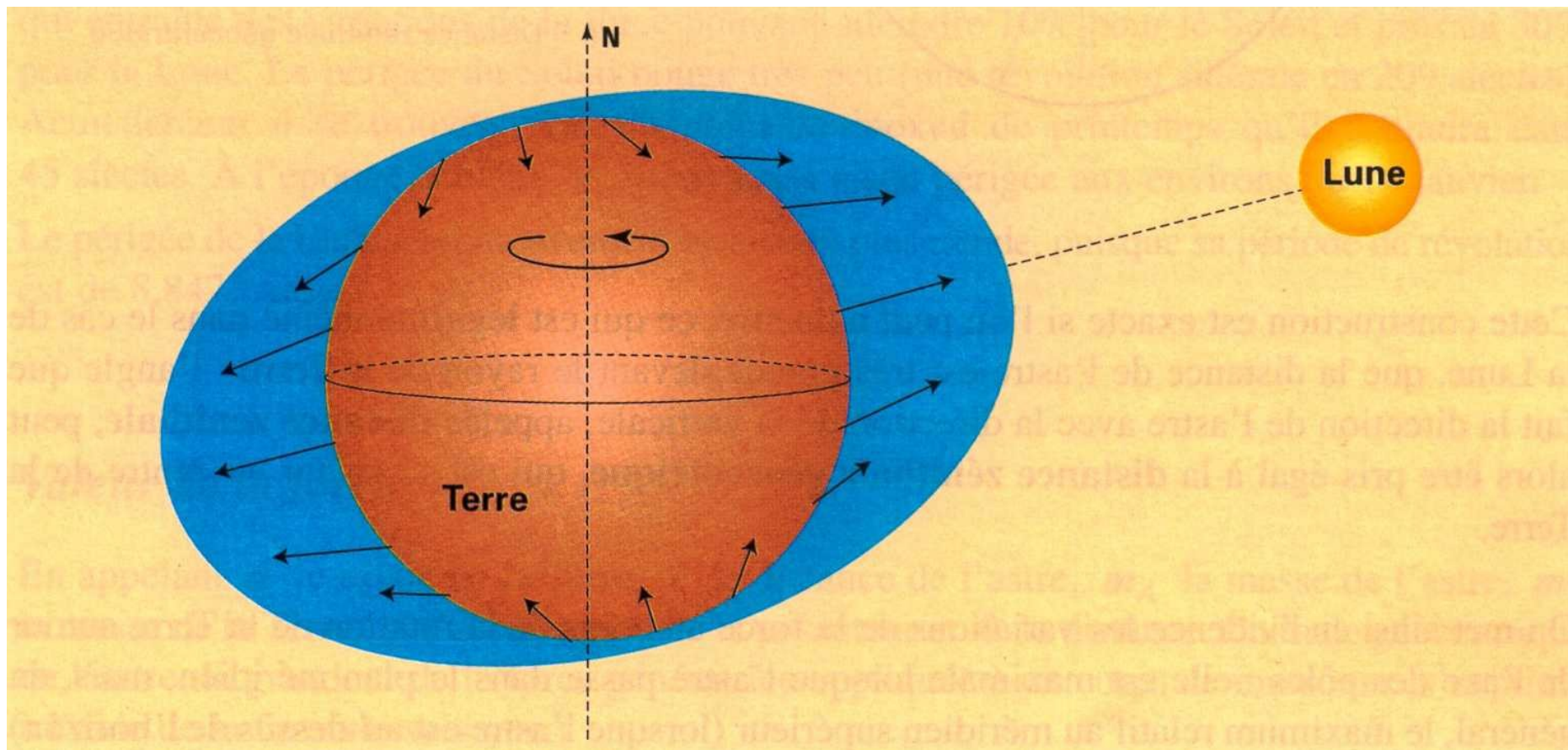
S2 solaire (sun) 12h00 46%

diurnes

O1 K1 P1...



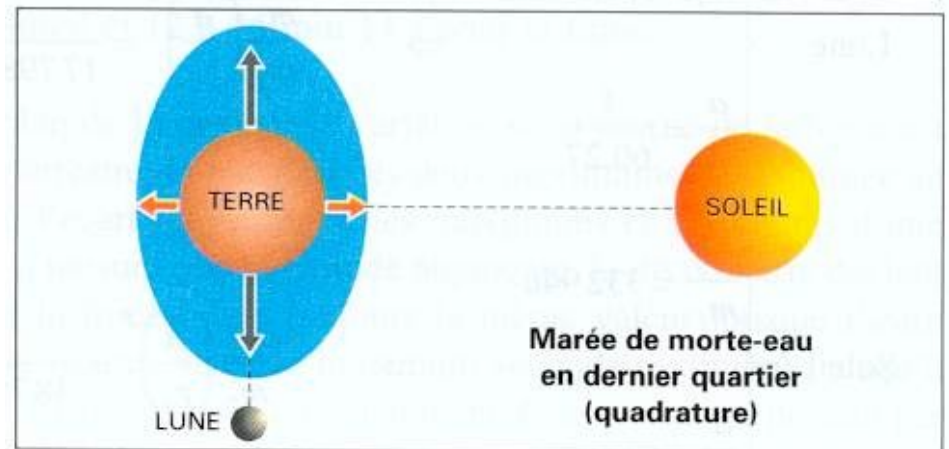
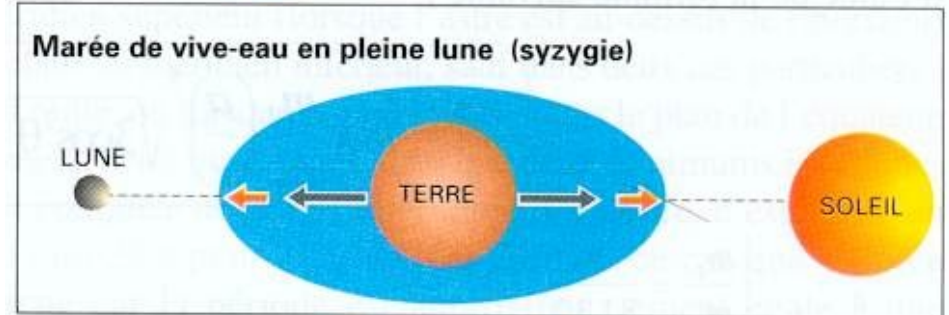
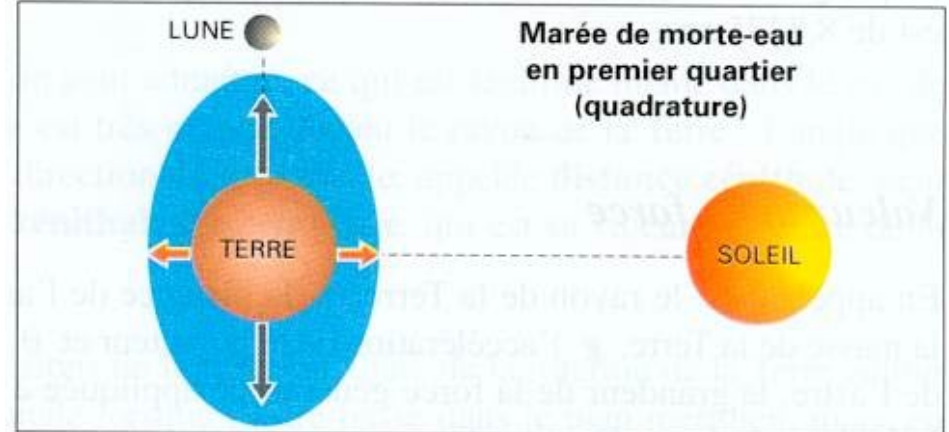
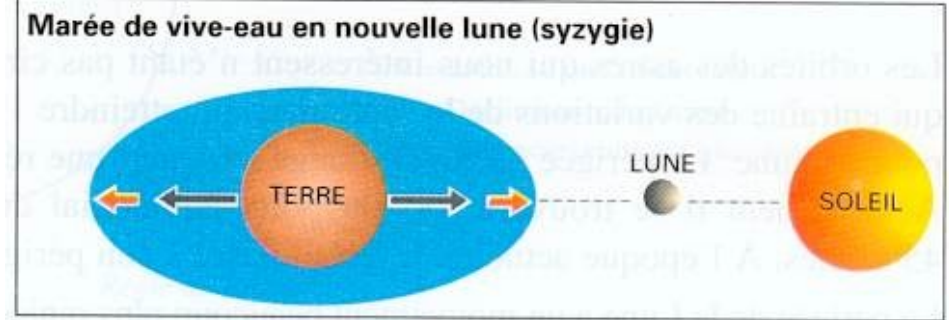
# ellipsoïde équipotentiel et force génératrice de la marée



Construction géométrique de la force génératrice

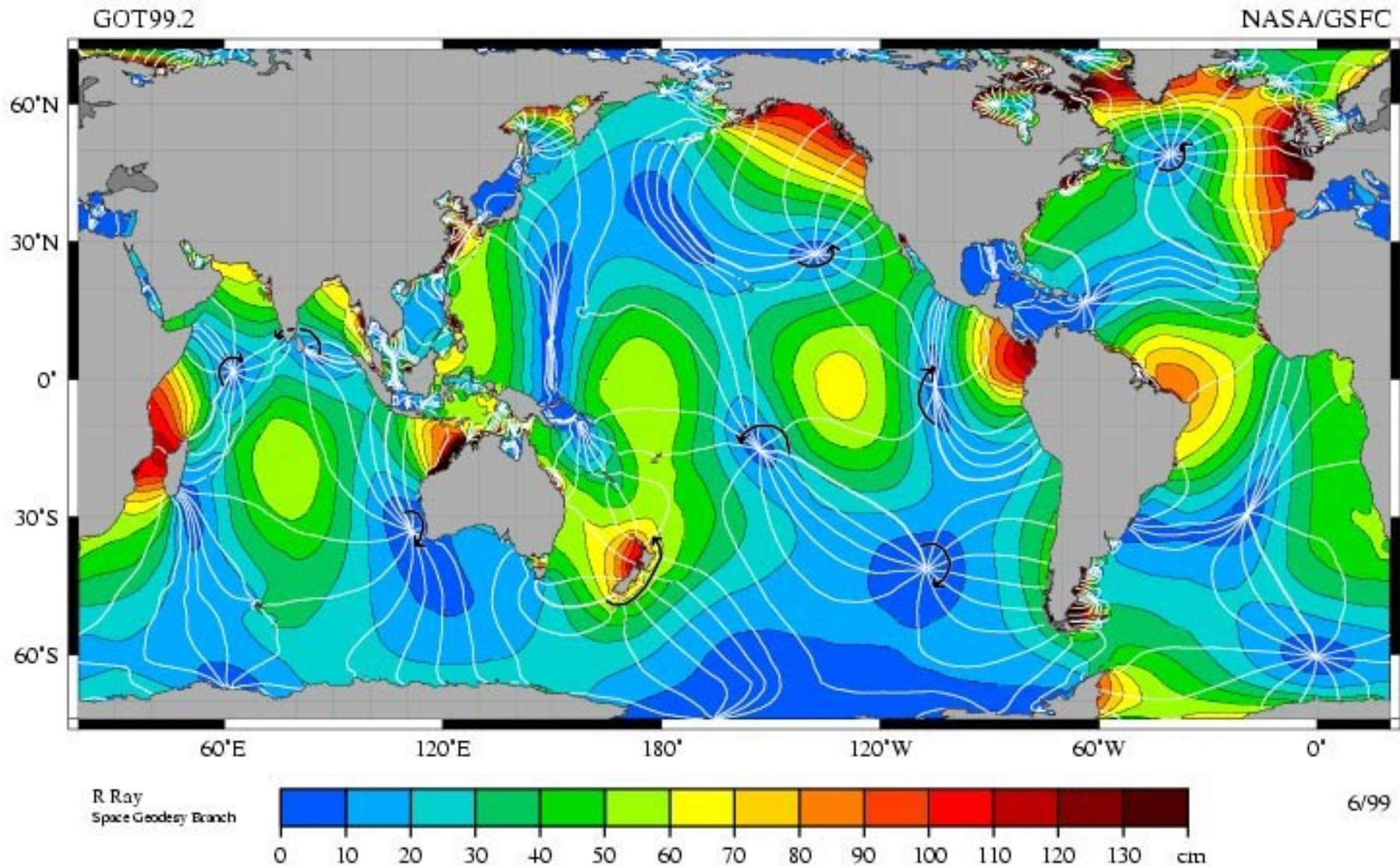
# différentes configurations du système Terre-Lune-Soleil affectant l'amplitude des marées (lunaison)

- 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



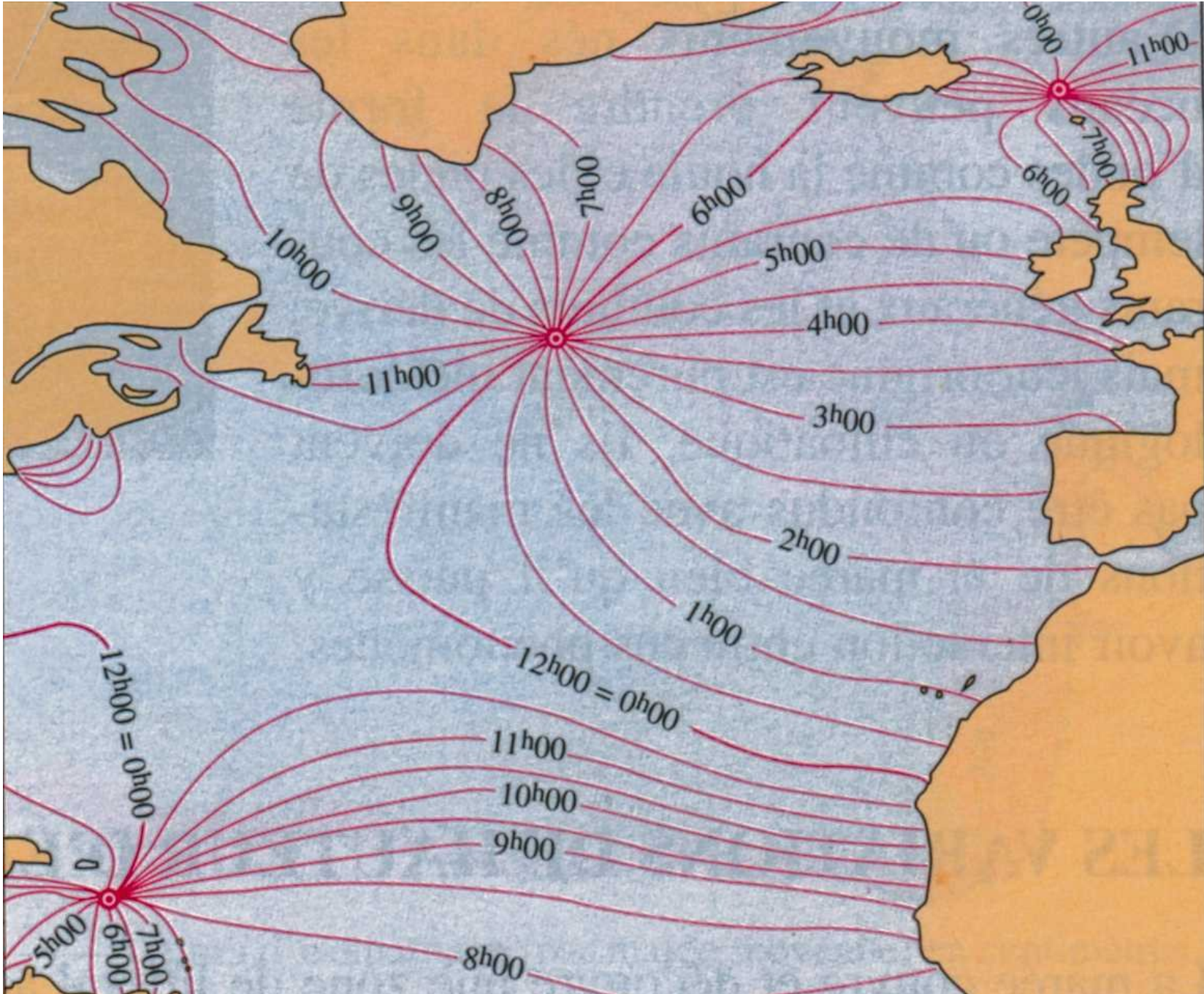


# la marée M2 : amplitude (couleur) et phase (lignes cotidales espacées de 1h, les centres sont les points amphidromiques)





# points amphidromiques en Atlantique Nord

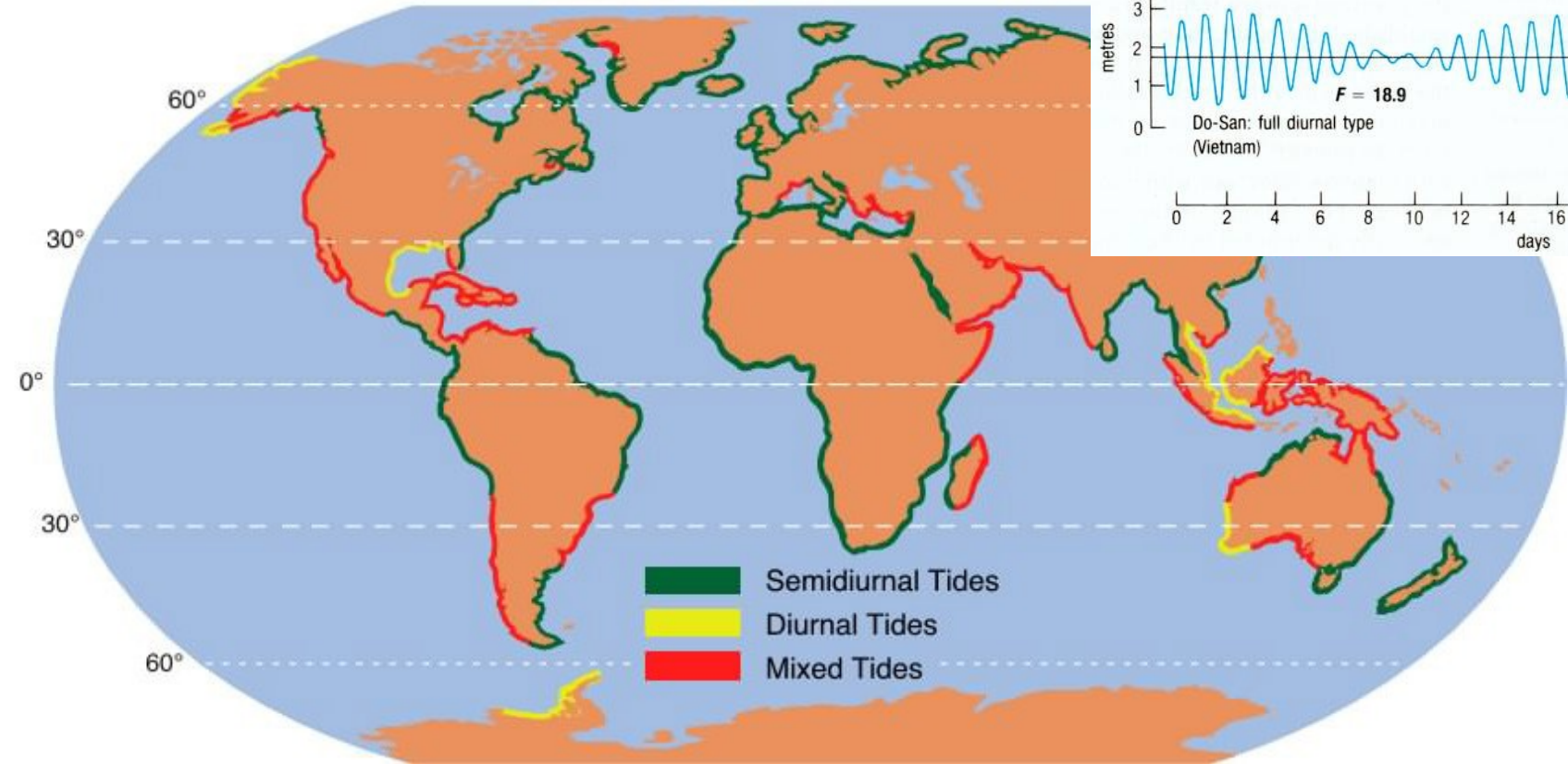
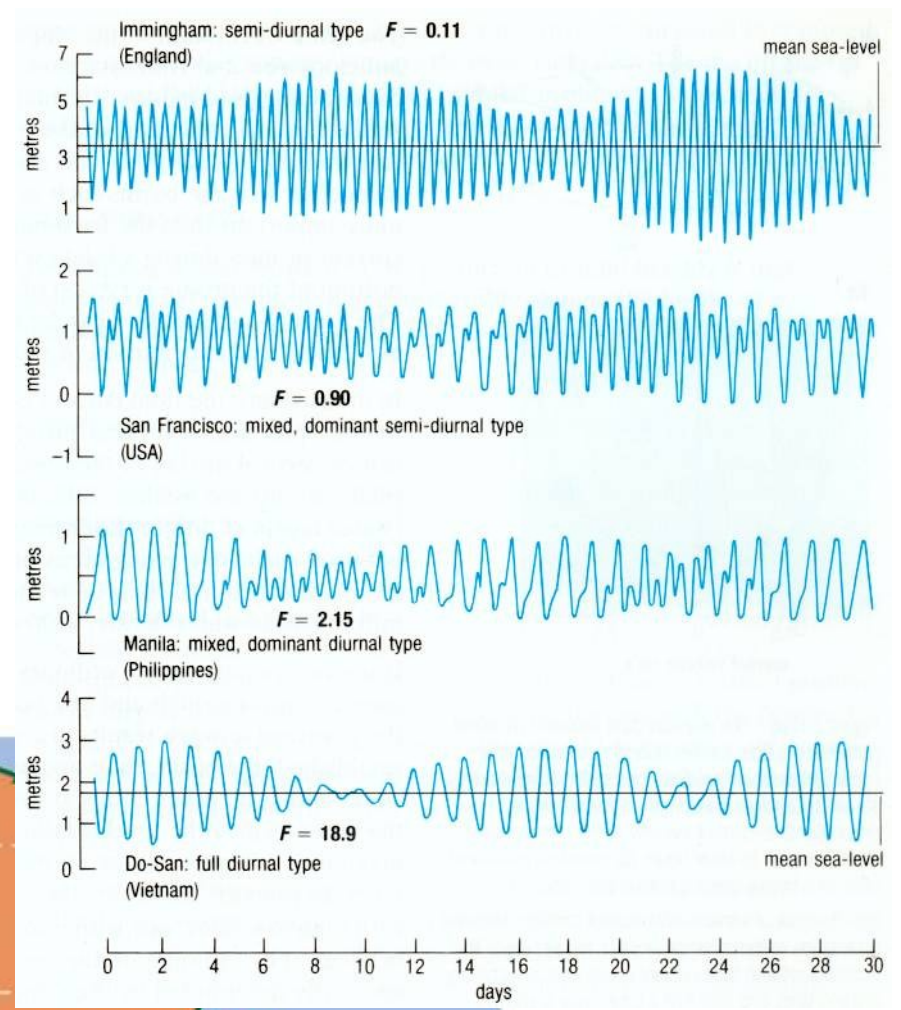


les heures de pleine mer sont rapportées au passage de la Lune au méridien de Greenwich



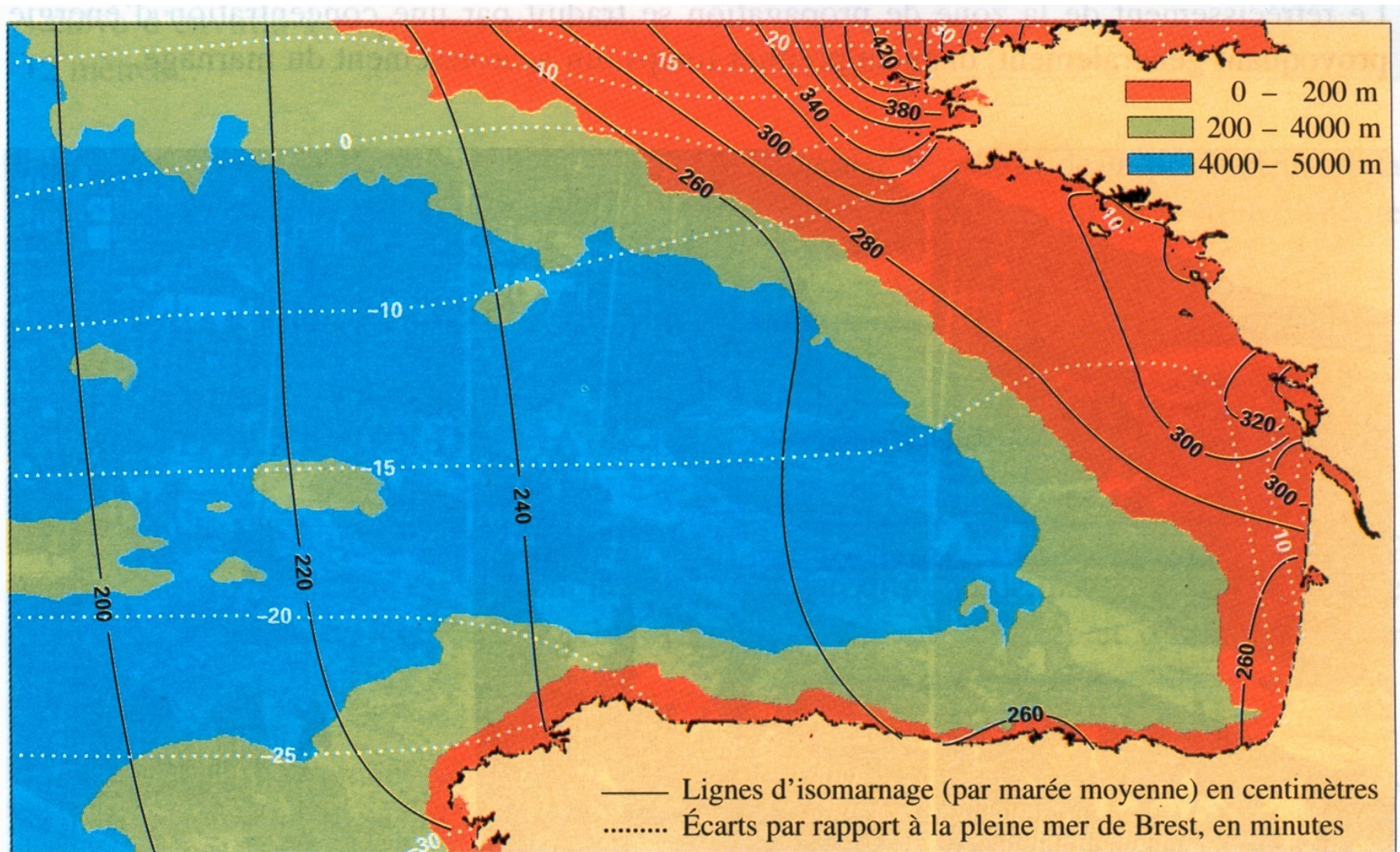
différents signaux de marée observés dans quelques ports :

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



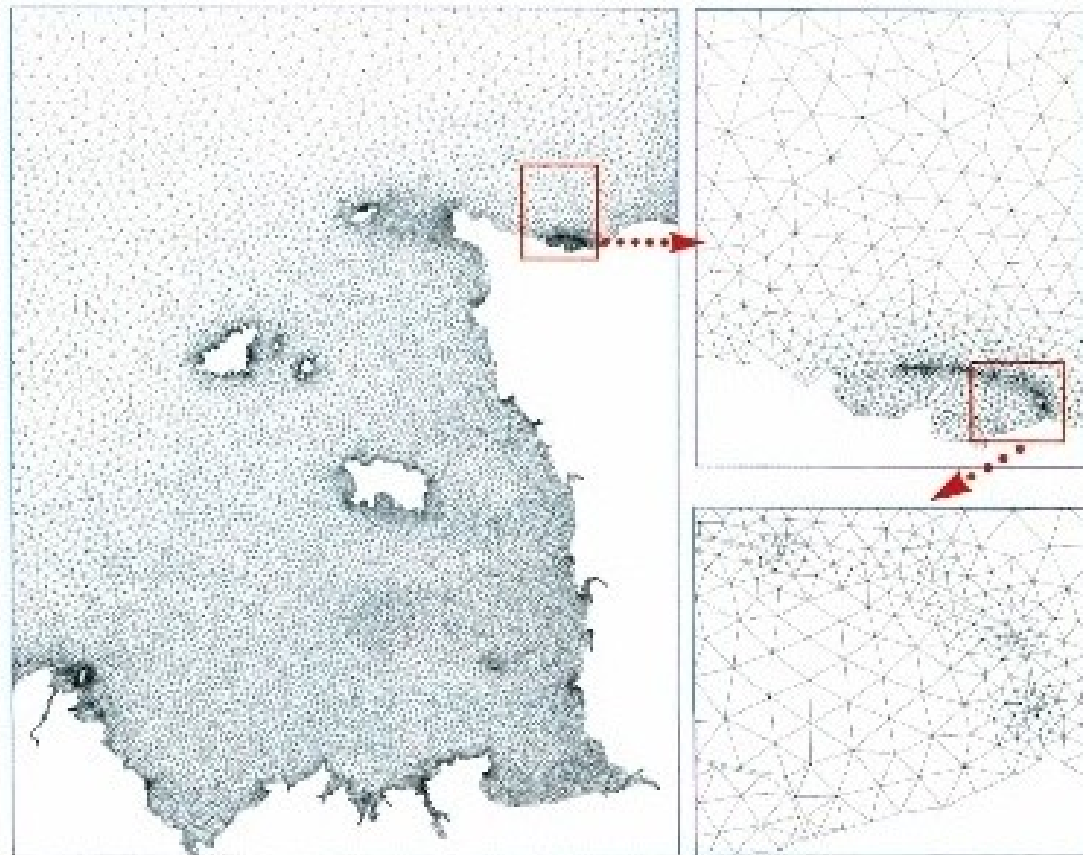


# marnage dans le golfe de Gascogne



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

# modélisation numérique



*La modélisation numérique : maillage de grille normand-breton*

maillage aux éléments finis du golfe normand-breton