

# LES MARÉES

## Données théoriques

### Rappels physiques sur la genèse des marées

Le phénomène des marées est un phénomène périodique, créé par l'attraction des astres sur la masse d'eau océane, laquelle est également soumise à la force centrifuge provenant de la rotation de la Terre sur elle-même. Toutefois, comme celle-ci est constante en un point déterminé, nous ne tiendrons pas compte de son influence pour expliquer les variations de la hauteur d'eau.

Les astres en cause sont essentiellement au nombre de deux : la Lune et le Soleil, la masse et/ou l'éloignement des autres planètes rendant négligeable leur influence.

La loi de Newton nous apprend que cette force d'attraction est proportionnelle à la masse de l'astre, mais inversement proportionnelle au carré de la distance de la Terre à cet astre. Ceci fait que, malgré sa masse très supérieure, l'influence du Soleil est deux à trois fois moins forte que celle de la Lune, beaucoup plus proche.

Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil, d'une part, et ceux de la Lune autour de la Terre d'autre part entretiennent ce mouvement et expliquent sa quasi-périodicité, les variations d'amplitude et... la diminution de la vitesse de rotation de la Terre!

Ces phénomènes généraux sont de plus influencés par des phénomènes locaux: les marées ne se traduisent véritablement que dans les océans (les mers fermées ont une masse trop faible pour être mise vraiment en mouvement). Certains endroits, où se produisent des phénomènes de résonance ou des effets d'entonnoir, voient des marées de très grande amplitude (baie de Fundy, baie du Mont Saint-Michel, golfe de Gabès en Méditerranée[!]); à l'opposé, il n'y a que de très faibles marées dans la mer des Caraïbes, pourtant dépendante de l'Océan Atlantique.

### Différents types de marées

La théorie des marées permet de décomposer ce phénomène périodique ou quasi-périodique en plusieurs composantes (analyse harmonique des marées, voir plus bas):

- Les ondes semi-diurnes, dont la période est de l'ordre de 12 heures;
- Les ondes diurnes, dont la période est très proche de 24 heures;
- Les ondes de longue période, mensuelles à annuelles, pouvant atteindre 16 ans 2/3; cette période, appelée saros, est retrouvée dans celle des éclipses.
- Enfin, à l'opposé, des ondes quart- ou tiers-diurnes (3 ou 4 heures).

Les ondes diurnes et semi-diurnes sont prépondérantes, expliquant l'importance des marées semi-diurnes. En effet, la prépondérance de chaque type permet de classer les marées en:

- Marées diurnes: il y a une pleine mer et une basse mer par 24 heures, de façon quasi-immuable (cas du Tonkin ou... de Copenhague!);
- Marées semi-diurnes: il y a par jour deux basses mers et deux pleines mers, avec une périodicité voisine de 12h 25 minutes<sup>1</sup>. Ces marées sont retrouvées sur les côtes océanes de la France métropolitaine, ce seront celles qui nous intéresseront par la suite; nous pourrions les caractériser par leur hauteur, voire des coefficients de marée.
- Marées semi-diurnes à inégalité diurne: les deux phénomènes précédents s'additionnent, ce qui fait qu'il y a deux BM et PM par jour, avec des hauteurs totalement différentes (Djibouti);
- Marées de type mixte (Antilles).

---

<sup>1</sup> La rotation apparente de la Lune a une période de  $1+1/29$  jours, soit 24 heures et 50 minutes.

### Marées de vives-eaux et de mortes-eaux; Coefficients de marée.

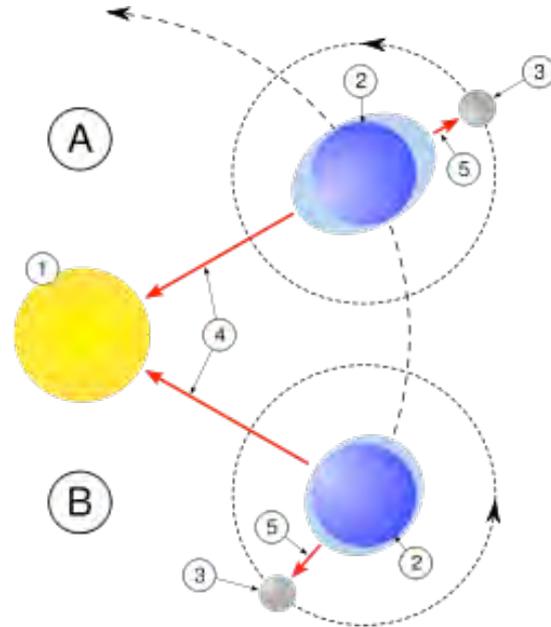
La position relative du Soleil et de la Lune par rapport à la Terre explique que la force d'attraction sur la masse hydrique résultant de ces deux astres varie:

Lors d'un alignement Soleil-Terre-Lune (pleine lune) ou Soleil-Lune-Terre (nouvelle lune), les forces s'ajoutent: on est en période de vives-eaux. Au niveau astronomique, cette situation est décrite par le doux nom de syzygie, représentée en A.

Lorsque les lignes joignant la Terre et chacun des deux astres sont perpendiculaires, les forces d'attraction s'annihilent partiellement; au niveau astronomique, on parle de quadrature. La marée est appelée "marée de mortes eaux", représenté en B.

1: Soleil; 2: Terre; 3: Lune; 4: force d'attraction du Soleil; 5: force d'attraction de la Lune.

Cette syzygie se produit deux fois par mois, avec une périodicité de 14,765295 jours (mois synodique)



Toutefois, d'autres phénomènes astronomiques contribuent à la variation de l'amplitude des marées:

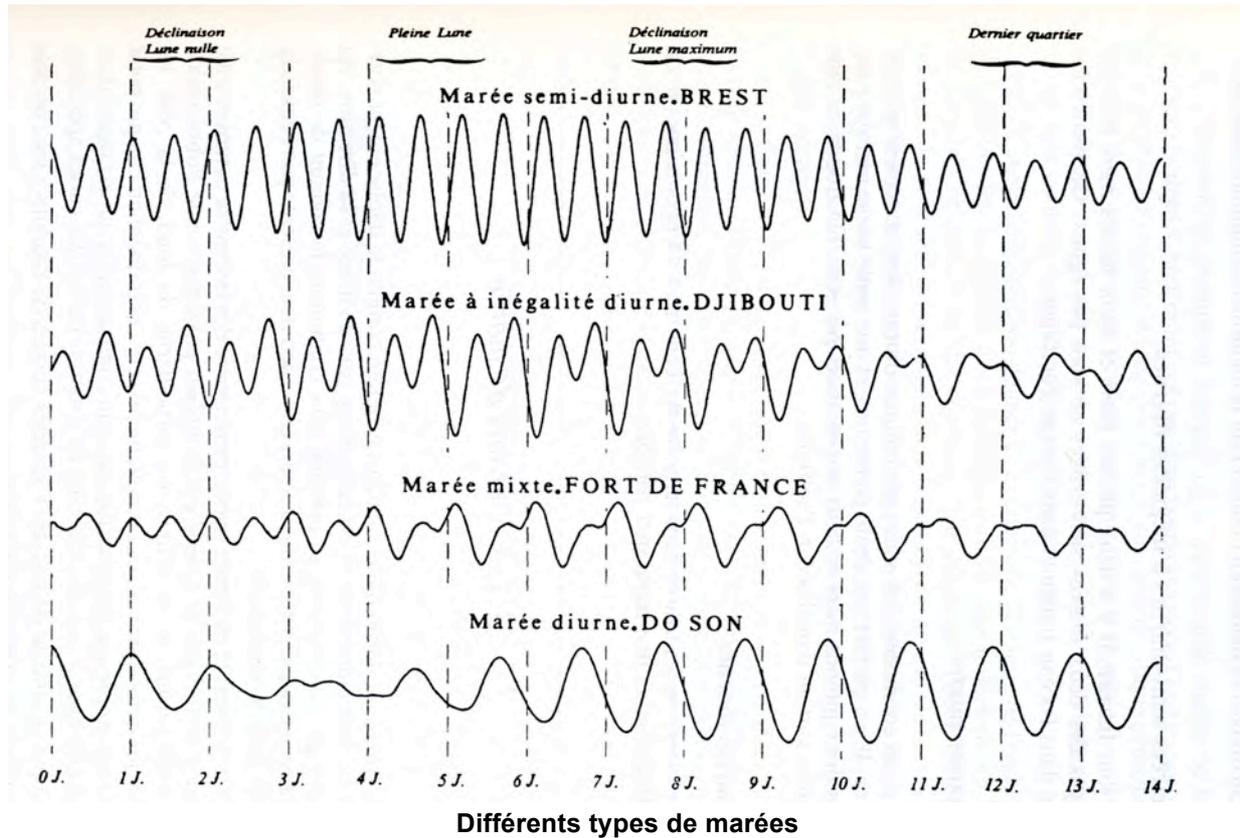
- Le passage du Soleil au nœud ascendant lunaire (point d'intersection de l'orbite de la Lune avec l'écliptique, du sud au nord), c'est-à-dire le passage du Soleil dans le plan de l'orbite lunaire : celui-ci se produit deux fois par an (à la régression du nœud près), et détermine les « saisons à éclipse » (ce sont pendant celles-ci que les éclipses de soleil ou de lune se produisent). Les marées sont alors plus importantes en syzygie (voir le point précédent) en raison du meilleur alignement Terre-Lune-Soleil. La période précise est de 173,310038 jours, moitié de la durée que l'on qualifie d'année draconitique (ou année écliptique).
- Le passage du Soleil dans le plan équatorial, qui se fait aux équinoxes, donc deux fois par an. La période précise est de 182,621095 jours, la moitié d'une année tropique. Il s'agit d'un phénomène en lien avec la position de la terre par rapport au soleil, dans lequel la lune ne joue aucun rôle direct (même si les effets dus à la lune et ceux dus au soleil s'additionnent, on peut raisonner comme si la Lune n'était pas là). Ce phénomène n'a donc rien à voir avec l'alignement Lune-Terre-Soleil, qui a lieu toutes les deux semaines et se réalise d'autant mieux lorsqu'il coïncide avec le cycle draconitique de 173 jours: l'alignement est alors exact.
- Le passage de la Lune au périégée, moment auquel les forces de marée exercées par la Lune sont donc les plus importantes. À la différence du nœud lunaire, qui régresse sur l'écliptique, le périégée avance. Le temps entre deux passages de la Lune au périégée est le mois anomalistique, de 27,5545499 jours et l'année anomalistique de 365,259635864 jours. Le calcul de la position du périégée lunaire est soumis à énormément de perturbations.
- Le passage de la Terre au périhélie, moment auquel les forces de marée exercées par le Soleil sont donc les plus importantes. Le périhélie terrestre progresse sur l'écliptique; le temps séparant deux passages de la Terre au périhélie est l'année anomalistique de 365,259636 jours. Il se produit actuellement le 3 janvier de l'année.

On assiste donc à un phénomène périodique, dont la fréquence est quasi-constante mais dont l'amplitude est variable. Les marées, de type semi-diurne, ont lieu deux fois par jour; la basse mer est la hauteur la plus basse atteinte au cours d'un cycle, et la haute mer est la plus élevée.

A noter: il existe un décalage entre le moment où l'action astrale est maximale et celui de la marée: c'est l'âge de la marée (autour de 36 heures à Brest).

### Modélisation du phénomène "marées"

La théorie gravitationnelle de Newton a été la première explication du phénomène des marées, mais elle ne rend pas compte des différents types de marées, illustrées sur le schéma ci-dessous.



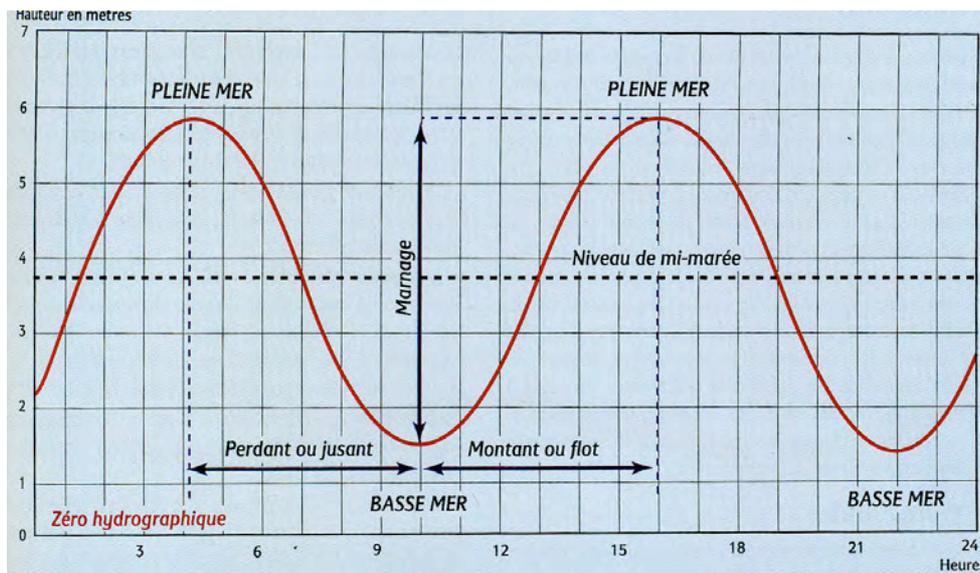
Cette théorie gravitationnelle a donc dû être modifiée, et cette théorie ainsi amendée est toujours le support du calcul des marées par les services de l'Amirauté anglaise.

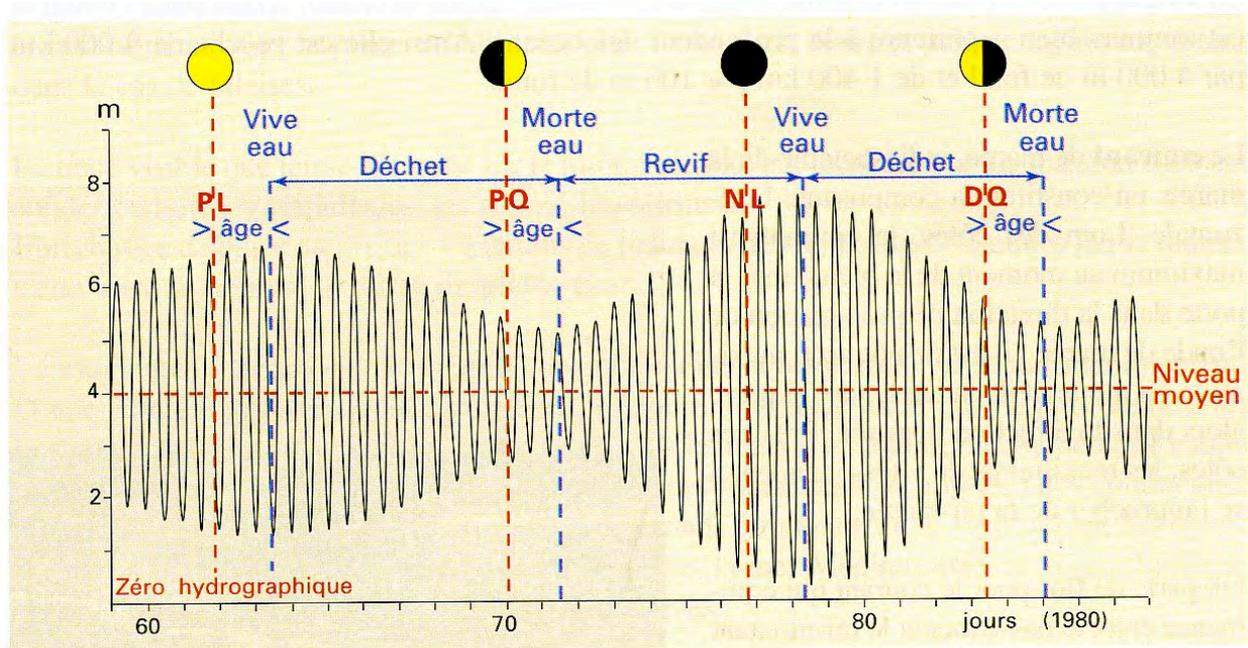
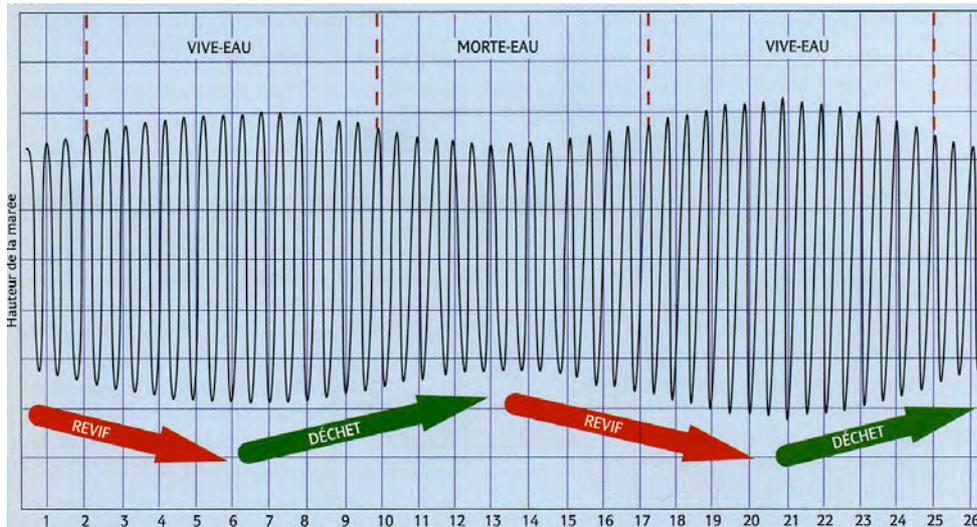
Toutefois, les progrès concernant l'analyse harmonique, surtout aux 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> siècle ont permis à Laplace de décomposer l'onde de marée en une somme d'ondes de fréquences multiples (harmoniques) ou non de plusieurs fréquences fondamentales, donnant naissance à la théorie harmonique des marées, plus tard complétée par Lord Kelvin. Cette technique est celle de référence du SHOM (France). A noter qu'il y a plusieurs fréquences, sans commune mesure entre elles, du fait de la non-linéarité de la réponse du mouvement de l'eau aux forces de marée.

### Définitions

- **Le marnage:** c'est la différence de hauteur entre une basse mer et la pleine mer suivante.
- **L'amplitude** de la marée: c'est la différence entre la pleine mer (ou la basse mer) et le niveau moyen. Cette amplitude est souvent confondue avec le marnage, alors qu'elle en vaut la moitié.

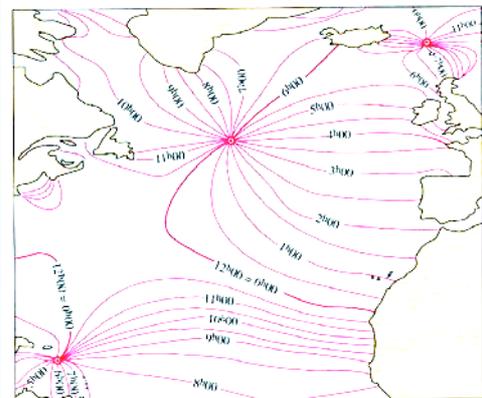
- **L'intervalle**: c'est le temps qui sépare une basse mer de la pleine mer suivante (ou l'inverse); le sixième de cet intervalle est appelé **heure-marée**.
- **L'étale**: c'est la durée pendant laquelle la hauteur d'eau reste stationnaire. On parle d'étale de basse mer et d'étale de pleine mer. A noter que l'étale de pleine mer peut être exceptionnellement longue, par suite de phénomènes locaux (courants...): c'est le phénomène de la "tenue du plein".
- **Le coefficient** de marée: c'est le quotient de l'amplitude par l'unité de hauteur, dans le port de Brest. Il est exprimé en centièmes. L'unité de hauteur est ainsi définie: "valeur moyenne de l'amplitude de la plus grande marée qui suit d'un jour et demi environ l'instant de la pleine ou de la nouvelle lune, lors de l'équinoxe" (on retrouve l'âge de la marée: 36 heures). Elle correspond donc à la valeur moyenne de l'amplitude des marées d'équinoxe. Ce coefficient de marée varie entre 20 et 120.
- **Le flot**: c'est la période pendant laquelle la mer monte.
- **Le flux**: c'est le courant au moment du flot.
- **Le jusant**: c'est la période pendant laquelle la mer descend.
- **Le reflux**: c'est le courant au moment du jusant.
- **L'estran**: c'est la zone côtière comprise entre les plus hautes mers et les plus basses mers.
- **Les laisses**: trace que laisse sur le rivage la mer, au moment de son plus haut (laisse de haute mer) ou de son plus bas (laisse de basse mer).





Courbe de marée pendant une lunaison

Enfin, à titre anecdotique, il existe des points où le marnage est nul. Ces points sont appelés points amphidromiques; il y a en un dans l'océan Atlantique, trois dans la mer du Nord. Les ondes de marée semblent tourner autour de ces points.



## Vitesse de la marée

Du fait de la prédominance des phénomènes semi-diurnes sur les côtes de la France métropolitaine, le phénomène de marée présente, entre les deux extrêmes que sont la basse mer et la haute mer une allure grossièrement sinusoïdale: à partir de la basse mer, la vitesse de la marée croît progressivement pour être maximale au moment où le niveau moyen est atteint, pour décroître ensuite et être nulle au moment de la haute mer.

Ce phénomène peut être modélisé de deux manières: la règle des douzièmes et la projection circulaire, qui peuvent donner toutes les deux matière à résolution graphique. Ces deux méthodes font l'approximation que la hauteur de la mer est une fonction sinusoïdale du temps.

### Règle des douzièmes:

Elle s'exprime de la façon suivante: A partir du moment de la basse mer:

- Pendant le premier sixième de l'intervalle, la mer monte de 1/12 du marnage;
- Pendant le deuxième sixième, elle monte de 2/12 du marnage (total: 3/12);
- Pendant le troisième sixième, elle monte de 3/12 du marnage (total: 6/12);
- Pendant le quatrième sixième, elle monte de 3/12 du marnage (total: 9/12);
- Pendant le cinquième sixième, elle monte de 2/12 du marnage (total: 11/12);
- Pendant le dernier sixième, elle monte de 1/12 du marnage (total: 12/12).

Bien sûr, il en est de même pour le jusant: pendant le premier sixième de l'intervalle, la mer baisse de 1/12 du marnage... etc.

### Projection circulaire

C'est une méthode équivalente, mais qui demande une construction graphique assez simple: on trace un cercle dont les extrémités supérieure et inférieure correspondent aux hauteurs de la PM et de la BM. Puis on partage un des deux demi-cercles (à gauche ou à droite du diamètre vertical) en sixièmes, donc en angles de 30°. La projection sur une verticale des points du cercle correspondant à ces angles donc directement la hauteur d'eau aux moments ainsi déterminés, espacés l'un de l'autre par 1/6<sup>ème</sup> d'intervalle.

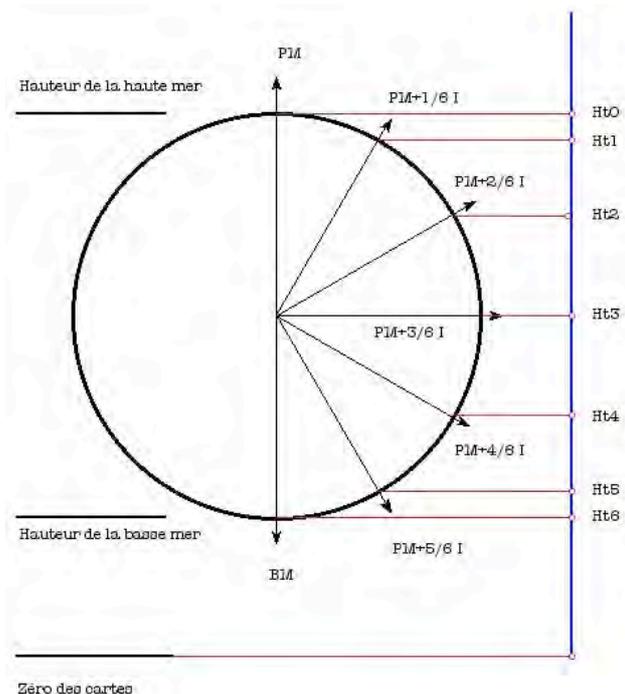
**Note de construction:** pour porter les angles convenables, il suffit de tracer des droites qui partagent en deux la distance entre le centre et:

- Le point de haute mer: on a H+2;
- Le point de basse mer: on a H+4;
- Le point H+3: on a H+1 et H+5.

Cette technique assimile le mouvement des marées à un mouvement sinusoïdal, ce qui est une très bonne approximation.

On peut comparer les deux méthodes

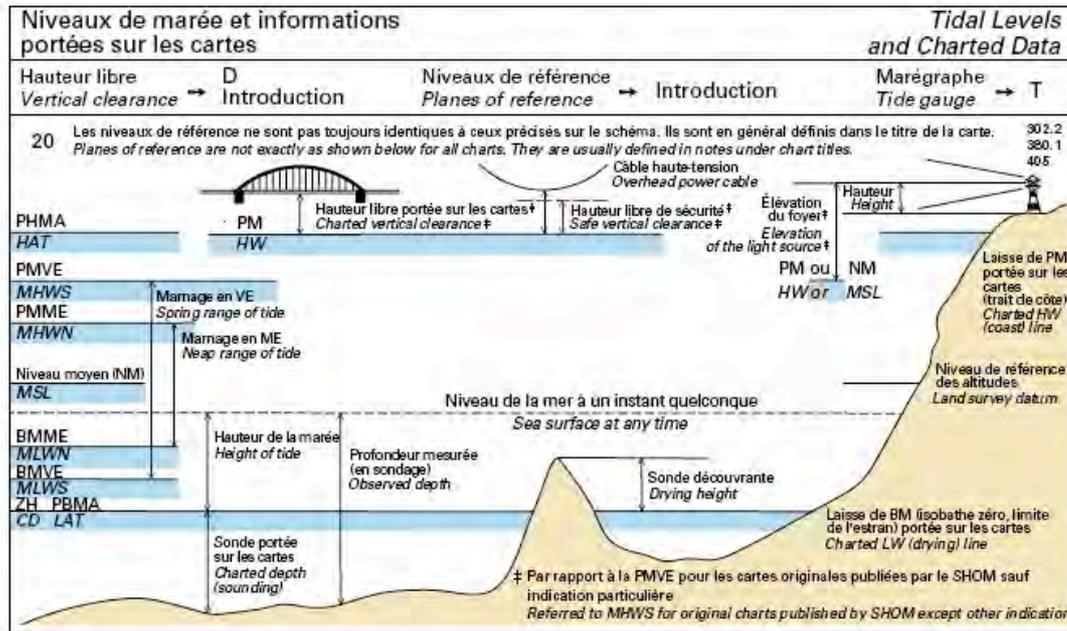
Heure	"1/12"	Cercle
+1	1=0,0833	0,0670
+2	3=0,25	0,25
+3	6=0,50	0,50
+4	9=0,75	0,75
+5	11=0,9167	0,9330



Les résultats donnés par les deux méthodes sont donc extrêmement proches.

## Applications pratiques

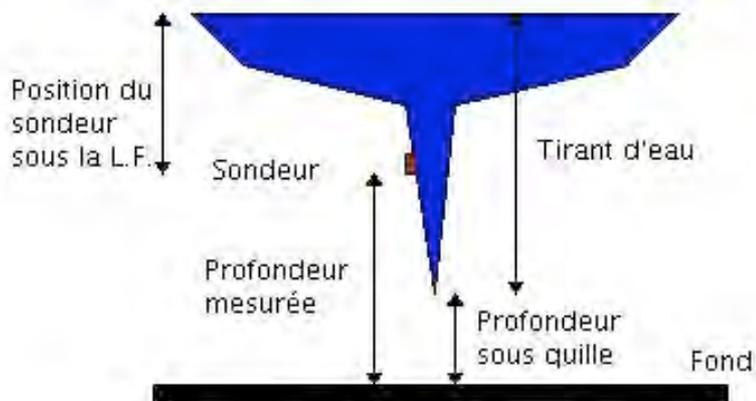
### Rappel des notations cartographiques



### Importance de la position du sondeur

La position du sondeur, généralement à une position intermédiaire sur la coque entre la ligne de flottaison et le bas de la quille, doit être connue exactement de manière à corriger les données de ce sondeur. Toutefois certains sondeurs sont réglables de façon à ce qu'ils indiquent exactement la profondeur effectivement disponible sous la quille.

Si on se rapporte à la figure ci-contre, on se rend bien compte que la valeur donnée par le sondeur doit être corrigée afin d'obtenir la hauteur d'eau réellement disponible sous la quille: la profondeur sous quille est égale à la somme de la profondeur mesurée et de la position du sondeur, diminuée de la valeur du tirant d'eau ou, ce qui revient au même:



$$\text{Profondeur sous quille} = \text{profondeur mesurée} - \text{distance sondeur-quille.}$$

### Importance du type de sonde

Le type de sonde: "couvrante/découvrante" ou "toujours immergée" a une influence directe sur le calcul de l'eau disponible au dessus de cette sonde, à un instant déterminé.

Si la sonde est positive (c'est à dire s'il s'agit d'un obstacle toujours immergé), la hauteur d'eau au dessus de ce point sera égale à la valeur de la sonde augmentée de la hauteur d'eau en rapport avec la marée.

Si la sonde est négative (roche couvrant et découvrant), la hauteur d'eau au dessus de ce point sera égale à la hauteur d'eau en rapport avec la marée, diminuée de la valeur de la sonde (qui, rappelons-le, est soulignée, mettant en évidence que cette sonde est négative).

Exemple: si le calcul de marée donne une hauteur de 8,45m, une sonde positive de 2m sera recouverte de  $(2+8,45)=10,45$  mètres, alors qu'une sonde négative de 3m sera recouverte de  $(8,45-3)=5,45$  mètres d'eau.

### **Le pied de pilote**

Le "pied de pilote" est une précaution élémentaire à prendre quand on fait un calcul de marée. Il consiste à augmenter de la valeur d'un pied (30 à 50 cm) la hauteur d'eau exigible sous un bateau, et de faire les calculs en ce sens : s'il s'agit d'un bateau de 10 m de tirant d'eau, il faudra prendre en compte dans les calculs un tirant de 10,5 mètres.

### **Source des données**

Les données concernant les marées sont calculées de différentes façons selon le pays (mais les résultats sont tout à fait superposables). En France, elles sont publiées dans des documents officiels (annuaire des marées, publié par le SHOM) ou reprises dans diverses publications, de l'Almanach du marin breton aux encarts publicitaires. Le seul véritable problème est qu'il faut faire très attention à l'heure de référence: soit c'est l'heure TU (ex GMT), qui est le temps universel, présentant avec l'heure officielle un retard de 1 heure en hiver ou de 2 heures en été, soit c'est l'heure "d'hiver" (en retard de une heure sur l'heure officielle pendant l'été), soit c'est l'heure légale. Ces décalages horaires sont un piège...

Les indicateurs des marées comportent trois grands groupes de données:

- ⊙ des données horaires (heures des BM et des PM);
- ⊙ des données métriques (hauteur d'eau au dessus du niveau des PBMA en BM et PM)
- ⊙ des données symboliques: le coefficient de la marée (voir plus haut).

Enfin, les marées sont calculées pour des "ports principaux", auxquels sont rattachés des ports secondaires pour lesquels on donne le décalage des heures de BM et de PM et, le cas échéant, les corrections de hauteur.

### **Calcul d'une hauteur d'eau due à la marée**

Dans le cas d'un port secondaire, il faut préalablement à tout calcul, déterminer les heures effectives de BM et PM, ainsi que les hauteurs d'eau correspondantes.

#### **Bases du calcul:**

On sait que tous les 1/6 d'intervalle la hauteur de la mer s'élève d'une quantité calculable soit par la règle des 1/12èmes soit par la construction circulaire;

On connaît, grâce aux tables de marée, la hauteur d'eau en BM et en PM, on peut en déduire le marnage.

#### **Méthodologie:**

##### **Démarche 1: calcul de l'heure-marée**

L'heure-marée est le 1/6<sup>ème</sup> de l'intervalle, durée qui sépare le moment de la BM et celui de la PM (ou vice-versa). On calcule donc cet intervalle puis, en le divisant en 6, on atteint la valeur de l'heure-marée.

##### **Démarche 2: calcul du marnage**

Connaissant la hauteur d'eau en BM et en PM, on en déduit par différence le marnage.

**Démarche 3: calcul de la hauteur d'eau**

Aux multiples entiers de l'heure-marée, la hauteur d'eau due à la marée est égale à la hauteur d'eau mesurée à la BM augmentée de la hauteur d'eau calculable soit par la règle des 1/12èmes, soit par la méthode circulaire.

**Exemple:** La basse mer a lieu à 8h34; la haute mer a lieu à 14h59. La hauteur d'eau au moment de la BM est de 8,45m et au moment de la HM de 13,14m.

**Question 1:** Calculez les hauteurs d'eau pour les multiples de l'heure-marée.

On calcule tout d'abord:

L'intervalle: 14h59-8h34=6h25, soit 385 minutes

L'heure-marée: (6h25)/6, soit 1h 4min 10 secondes (ou 385/6=64min 10 secondes)

Le marnage: 13,14-8,45=4,69 mètres soit 469 cm

Au début: 8h34, la hauteur d'eau est de 8,45m

A la première heure-marée, soit 8h34+1h 4min 10s=9h 38min 10s, la hauteur d'eau a augmenté de (469cm/12)=39,08 cm; elle est donc de 8,45+0,39=8,84 m

A la deuxième heure-marée, soit 9h 38min 10s + 1h 4min 10s = 10h 42min 20s, la hauteur d'eau a encore augmenté de 2 douzièmes, soit 3 douzièmes au total, ou  $3 * \frac{469}{12}$  soit 117,25cm. Elle est donc de 8,45+1,17=9,62 mètres.

A la troisième heure-marée, soit 10h 42min 20s+1h 4min 10s=11h 46min 30s, la hauteur d'eau a encore augmenté de 3 douzièmes, soit un total de 6 douzièmes, ou  $6 * \frac{469}{12} = 234,5\text{cm}$ . Elle est donc maintenant de 8,45+2,34=10,79 mètres

A la quatrième heure marée: 11h46min30s+1h4min10s=12h50min40s, la hauteur d'eau a augmenté de nouveau de 3 douzièmes, soit 9 au total, correspondant à  $9 * \frac{469}{12} = 351,8\text{cm}$ . Elle est de 8,45+3,52=11,97 mètres.

A la cinquième heure-marée, soit 13h54min50s, la hauteur d'eau s'est accrue de 2 douzièmes, elle est de 11 douzièmes:  $11 * \frac{469}{12} = 430\text{cm}$ . Elle est de 8,45+4,30=12,75 mètres.

A la sixième heure-marée, on a atteint la marée haute.

On peut résumer ce résultat dans un tableau:

Heure	Hauteur	Heure	Hauteur
8h 34min	8,45m	9h 38min 10s	8,84m
10h 42min 20s	9,62m	11h 46min 30s	10,79m
12h 50min 40s	11,97m	13h 54min 50s	12,75m

Nota: pour les calculs de hauteur de marée, il vaut mieux, afin de diminuer les erreurs d'arrondi, calculer le supplément de hauteur d'eau apporté par la marée à partir de la BM plutôt que du calcul immédiatement précédent

**Question 2:** Quelle est la valeur de la hauteur d'eau à 10 heures, sachant que la pression atmosphérique est de 1023 mBar?

Pour répondre à cette question, il faut effectuer une interpolation prenant en compte les deux valeurs immédiatement inférieure et supérieure. La donnée "10h" est comprise entre 9h38min10s et 10h42min20s.

L'intervalle de temps est 64 minutes (on peut négliger les 10 secondes); pendant celui-ci, la mer monte de deux douzièmes, soit  $2 * \frac{469}{12} = 78,17\text{cm}$ . La mer monte donc, par minute, de  $\frac{78,17}{64}$  cm.

Entre 9h38 et 10h, l'intervalle de temps est de 22 minutes. Pendant ces 22 minutes, la mer va monter de  $22 * \frac{78,17}{64} = 27\text{cm}$ . La hauteur de la mer à 10 h sera donc 8,84+0,27=9,11 mètres, qu'il faut corriger pour la pression, en enlevant 10cm, soit finalement 9,01 mètres.

**Question 3:** *A quelle heure la hauteur d'eau sera-t-elle de 10 mètres?*

On voit que la valeur "10" s'inscrit entre les deux valeurs de la table: 9,62 et 10,79, qui correspondent à 10h42 et 11h46. Pour monter de  $(10,79-9,62)=1,17$  mètres ou 117 cm, il faut 64 minutes; pour monter de 1 cm, il faut donc  $\frac{64}{117}$  minutes. La hauteur de 10m correspond à 38 cm au

dessus de la valeur atteinte à 10h42min20s. Pour monter de ces 38cm, il faudra  $38 * \frac{64}{117} = 20,78$  min ou 20 min et  $60 * 0,78 = 47$  secondes. L'heure à laquelle cette côte sera atteinte est donc 11h03min07s.

**Exercice:** *Mêmes questions, avec la méthode circulaire (voir le schéma page 11).*

La méthode circulaire nécessite le calcul de l'heure-marée; celle-ci doit être effectuée de manière conventionnelle. Elle permet le calcul des hauteurs d'eau et des heures correspondant à une hauteur d'eau donnée de façon plus précise puisqu'il n'y a pas d'interpolation à effectuer; la variation "sinusoïdale" avec le temps est automatiquement prise en compte.

Temps 1: détermination de l'intervalle: il est de 385 minutes; cet intervalle correspond à la valeur d'un demi-cercle sur la construction, donc  $180^\circ$ . Un degré correspond ainsi à  $\frac{385}{180}$  minutes et, de même,

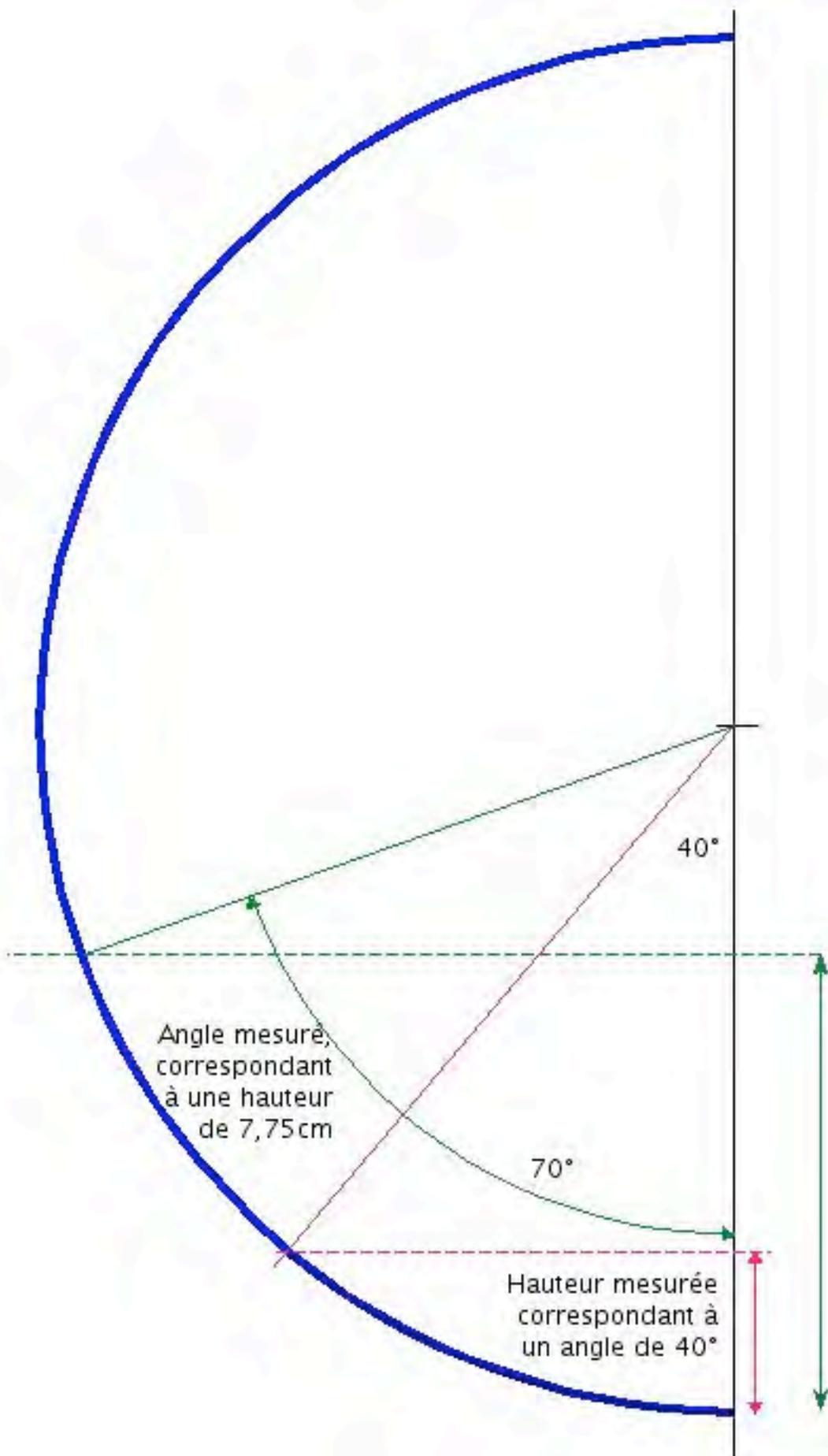
une minute est représentée par  $\frac{180}{385}$  degrés.

Temps 2: choix d'une échelle. Le marnage est de 4,69m. Pour avoir la précision la meilleure, on va prendre pour échelle 5cm sur la feuille=1m de marnage. Le rayon du demi-cercle sera de  $4,69 * 5 = 23,45$  cm.

Question 1: on trace les angles qui correspondent aux multiples successifs des heures-marées: 150; 120; 90; 60;  $30^\circ$  et on mesure les valeurs correspondantes, transformées en mètres selon l'échelle choisie et auxquelles on ajoute la valeur de la BM, soit 8,45 mètres:

Question 2: 10 heures correspond à  $10h-8h34=1h26$ min, soit 86 minutes après la basse mer. Ces 86 minutes correspondent à un angle, mesuré à partir de la BM, donc du point inférieur du cercle, de  $86 * \frac{180}{385} = 40^\circ$ . En reportant cette valeur (toujours à partir du point bas, représentant la BM) on obtient une distance de 27,5mm, soit 0,55 m d'eau au dessus du niveau de la BM, soit finalement  $8,45m+0,55m=9,00$  mètres (constructions figurées en rose).

Question 3: 10 m d'eau correspondent à  $10-8,45=1,55$  mètres au dessus du niveau de la BM. On reporte donc la longueur qui correspond à ces 1,55 m, soit 7,75 cm à partir de la partie inférieure du diamètre; en reportant cette valeur sur le cercle, on mesure l'angle ainsi déterminé, qui vaut  $70^\circ$ , et qui correspond à  $70 * \frac{385}{180} = 149,72$  minutes.. L'heure cherchée est donc  $8h34+2h30$ min=11h04 (constructions en vert).



Comparer les résultats obtenus par les deux méthodes

En ce qui concerne les hauteurs d'eau correspondant à des multiples successifs de l'heure-marée, la réponse a déjà été apportée. La différence qu'on constate entre les deux méthodes pour la réponse aux questions 2 et 3 est due au fait que l'interpolation par la méthode circulaire est de bien meilleure qualité que l'interpolation linéaire utilisé par la méthode des douzièmes.

### **Autres éléments influençant la hauteur d'eau**

En, plus des marées, la hauteur de l'eau peut être influencée par:

#### **La pression atmosphérique**

Il faut se représenter la surface de l'eau surmontée d'une colonne d'air, qui "appuie" sur la surface de la mer. Cette force est plus ou moins marquée selon la pression atmosphérique; il est facile de s'imaginer que, si cette pression baisse, le niveau d la mer va monter, et vice-versa.

Une variation de 10 mb de pression induit une variation du niveau de l'eau de 10 cm.

#### **Le vent**

Il agit sur la hauteur d'eau par deux actions:

- Localement, il repousse ou au contraire éloigne du rivage la masse d'eau: un vent de terre va diminuer la hauteur d'eau, un vent de mer l'augmenter;
- À distance, il génère de la houle qui augmente l'amplitude des vagues et ajoute à la hauteur d'eau un terme supplémentaire, de valeur moyenne nulle, mais qui peut conduire au talonnage! il faut alors majorer le pied de pilote.

### **Autres techniques de calcul de la marée**

Deux techniques purement graphiques (c'est à dire sans calculs!) et facilement applicables peuvent être utilisées en pratique pour le calcul des marées... mais pas pour l'épreuve du permis hauturier: l'abaque développé par le SHOM et la règle "FLASH-TIDE". Ces deux techniques sont exposées ci-dessous, en annexe.

## **ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES**

- **La marée**, in "Cours d'océanographie", DRO/LPO, IFREMER [www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr)
- **La marée**, in "Le Vagnon de la Voile", par M. Olivier, pp 520 à 550. Éditions du Plaisancier, 2004
- **La marée**, in "Traité de navigation", par M;Caillou, D. Laurent et F. Percier. 4ème édition, INFOMER, 2005
- **La marée**, COLLECTION "LES GUIDES DU SHOM", S.H.O.M., Brest, 1997
- **La marée et ses rythmes**, in "Cours des Glénans", pp 890 à 896, 5ème édition, Le Seuil, Paris.
- **Marées, vents et courants**, par Jean-Louis Guéry. Série "comprendre", Voiles et Voiliers
- **Tout savoir sur les marées**, par O.Guérin. Éditions Ouest-France, 2004

# EXEMPLE DE FEUILLE DE CALCUL

## CALCULS COMMUNS

**Marnage:** Hauteur pleine mer - hauteur basse mer =  $l_{\text{PM}}, l_{\text{PM}} - l_{\text{BM}}, l_{\text{BM}} = l_{\text{M}}, l_{\text{M}}$   
**Douzième:** Marnage/12 =  $l_{\text{M}}, l_{\text{M}} / 12 = l_{\text{D}}, l_{\text{D}}$  mètres (VD)  
**Intervalle:** Heure de pleine mer - heure de basse mer =  $l_{\text{HPM}}, l_{\text{HPM}} \text{ min} - l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}} \text{ min}$   
 (si marée desc.) (HPM) (HBM) Soit, en minutes:  $l_{\text{I}}, l_{\text{I}}$  min  
 Heure de basse mer - heure de pleine mer =  $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}} \text{ min} - l_{\text{HPM}}, l_{\text{HPM}} \text{ min}$   
 (si marée montante) (HBM) (HPM) Soit, en minutes:  $l_{\text{I}}, l_{\text{I}}$  min  
**Heure-marée:** Intervalle/6 =  $l_{\text{I}}, l_{\text{I}} \text{ min} / 6 = l_{\text{HM}}, l_{\text{HM}} \text{ min}$  ou  $l_{\text{HM}}, l_{\text{HM}} \text{ min}$

## CALCUL DE LA HAUTEUR CONNAISSANT L'HEURE

**En marée montante:** l'heure donnée (HD):  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  h  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  min se situe à:  
 $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$  h  $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$  min (HBM) -  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  h  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  min (HD) =  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  min après la basse mer  
**En marée descendante:** l'heure donnée (HD):  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  h  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  min se situe à:  
 $l_{\text{HPM}}, l_{\text{HPM}}$  h  $l_{\text{HPM}}, l_{\text{HPM}}$  min (HPM) -  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  h  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  min (HD) =  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  min après la pleine mer

On peut alors dresser le tableau:

Entre	et	la mer monte/descend de m douzièmes	Cumul de: C douzièmes
HBM ou HPM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	HBM ou HPM+HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	1 douzième	1 douzième
HBM ou HPM + HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	HBM ou HPM +2HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	2 douzièmes	3 douzièmes
HBM ou HPM +2HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	HBM ou HPM +3HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	3 douzièmes	6 douzièmes
HBM ou HPM +3HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	HBM ou HPM +4HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	3 douzièmes	9 douzièmes
HBM ou HPM +4HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	HBM ou HPM +5HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	2 douzièmes	11 douzièmes
HBM ou HPM +5HM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	HBM ou HPM +6HM =HPM ou HBM $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ h $l_{\text{HBM}}, l_{\text{HBM}}$ min	1 douzième	12 douzièmes

Cet écart entre HD et HBM ou HPM correspond à  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}} \text{ L } l_{\text{HM}}, l_{\text{HM}} = l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  fois l'heure-marée, avec un reste (r) de  $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  minutes.

On est donc entre les heures HBM ou HPM+ $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  (n) HM et HBM ou HPM+ $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  (n+1) HM

Dans cet intervalle d'une heure-marée =  $l_{\text{HM}}, l_{\text{HM}}$  minutes, la mer varie de  $r/\text{HM}$  fois le nombre (m) de douzièmes correspondants, soit  $s = m \times r / \text{HM} = l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}} \times l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}} / l_{\text{HM}}, l_{\text{HM}} = l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  douzièmes.

Finalement, la mer monte/descend de (C+s) douzièmes (attention! La valeur de C correspond à la ligne HBM ou HPM+nHM), donc  $D = l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  douzièmes, soit  $D \times \text{VD} = l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  mètres.

Et, en ajoutant/soustrayant cette valeur à la hauteur de basse mer/haute mer, on obtient le résultat final:  
 $l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}} \text{ +/- } l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}} = l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}, l_{\text{HD}}$  mètres.

# ABAQUE DU SHOM

## Description

L'abaque du SHOM, dont est ici présentée la version "modifiée" par le CCS (Suisse) est un abaque permettant de résoudre les deux problèmes: calculer la hauteur d'eau connaissant l'heure, et calculer l'heure à laquelle on aura une hauteur d'eau donnée.

Cet abaque comporte deux "régions", reliées entre elles au niveau d'une courbe de forme sinusoïdale.

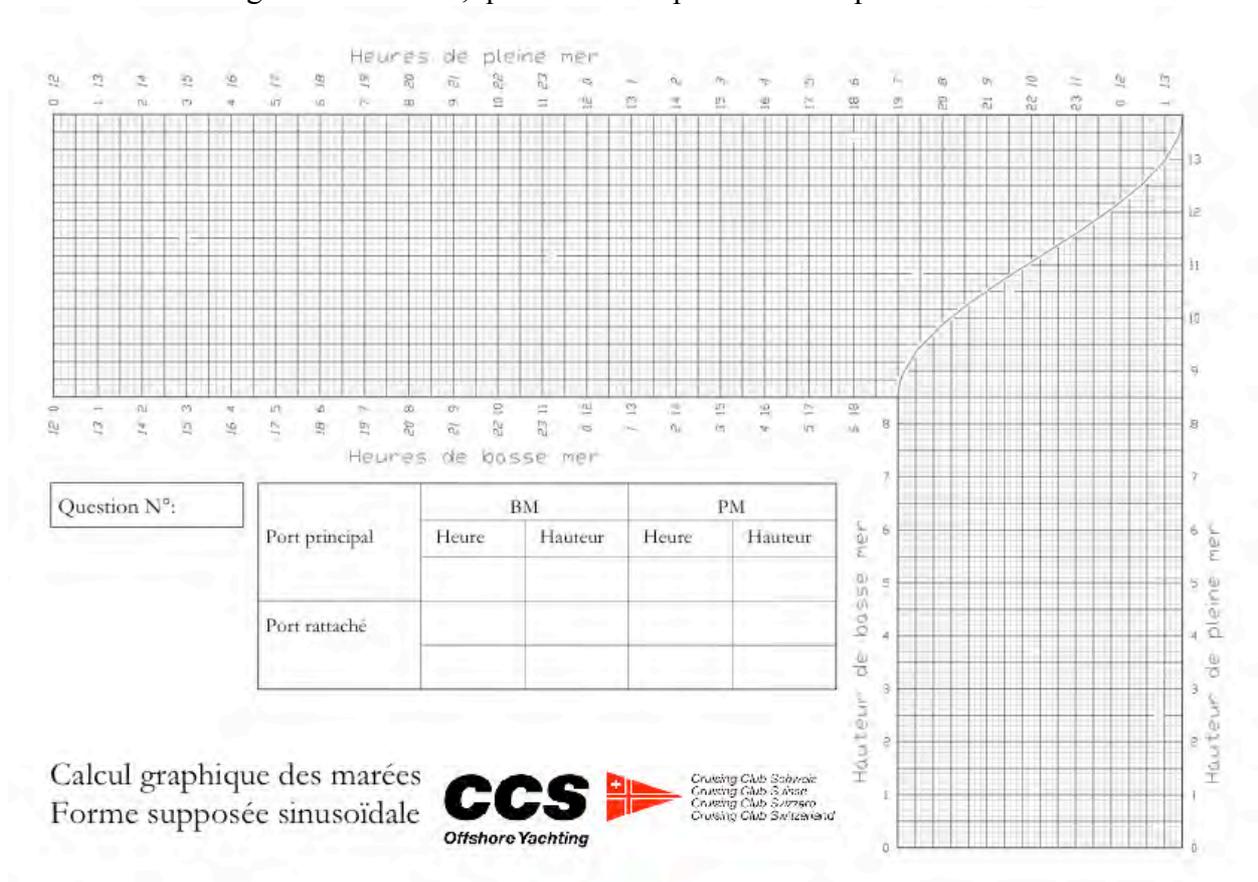
- La partie supérieure et gauche, correspond aux heures: l'heure de pleine mer est en haut, celle de basse mer en bas.
- La partie inférieure et droite correspond aux hauteurs d'eau au dessus du niveau de référence, à droite pour la pleine mer, à gauche pour les basses mers.

## Mode d'emploi

### Préparation

- Sur la partie (supérieure gauche) destinée aux heures: on porte le segment de droite qui joint l'heure de la haute mer (en haut) à l'heure de la basse mer (en bas).
- Sur la partie (inférieure droite) destinée aux hauteurs, on trace de la même manière le segment de droite qui relie la hauteur d'eau en pleine mer (à droite) et celle en basse mer (à gauche).

On a donc deux segments de droite, qui vont servir pour les deux problèmes.

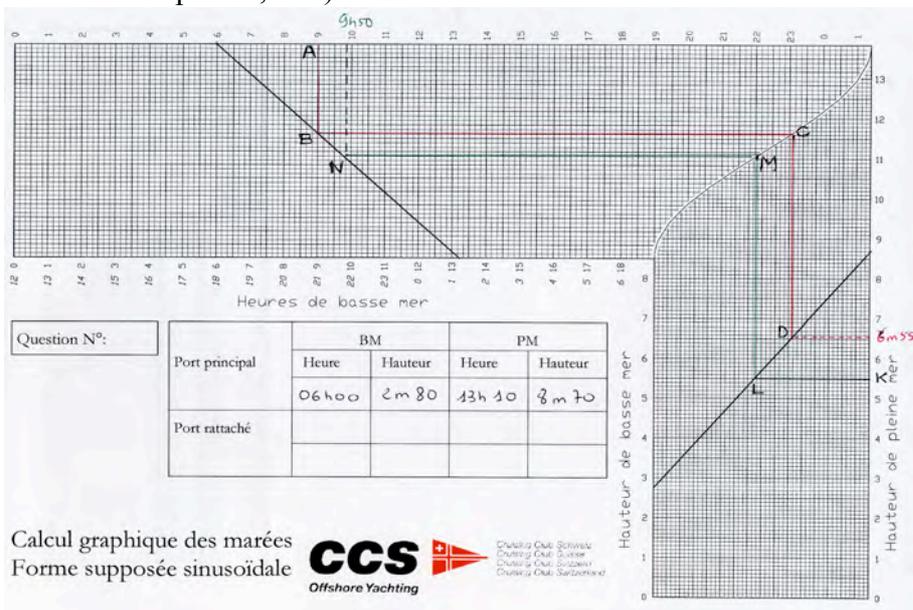


### Utilisation

- Si on veut chercher une **hauteur d'eau connaissant l'heure**, on effectue les constructions géométriques suivantes:
  - ▶ on reporte cette heure sur l'un des deux côtés (supérieur ou inférieur) de la partie "heures" de l'abaque (point A);
  - ▶ on cherche le point situé à l'intersection de la ligne verticale menée par ce point A et la ligne tracée précédemment, joignant les heures de pleine mer et de basse mer; soit B ce point;
  - ▶ par ce point B on trace une horizontale, qui coupe la sinusoïde (partageant les deux parties de l'abaque) en un point C;
  - ▶ Par ce point C on mène une ligne verticale qui coupe en D la ligne tracée précédemment entre les deux hauteurs (PM et BM).
  - ▶ On lit alors la hauteur d'eau correspondant à ce point C: c'est la réponse à la question!
- Si on veut chercher une **heure connaissant la hauteur d'eau**, on effectue les constructions géométriques du même type que ci-dessus:
  - ▶ on porte la hauteur d'eau sur l'un des deux côtés (gauche ou droite) de la partie "hauteur" de l'abaque (point K);
  - ▶ on cherche le point situé à l'intersection de la ligne horizontale menée par ce point K et la ligne tracée précédemment, joignant les hauteurs de pleine mer et de basse mer; soit L ce point;
  - ▶ par ce point L on trace une verticale, qui coupe la sinusoïde (partageant les deux parties de l'abaque) en un point M;
  - ▶ Par ce point M on mène une ligne horizontale qui coupe en N la ligne tracée précédemment entre les deux heures (PM et BM).
  - ▶ On lit alors l'heure correspondant à ce point N: c'est la réponse à la deuxième question!

**Application:** sachant que la basse mer a lieu à 13h10 avec une hauteur de 2,80m, et que la pleine mer a lieu à 6h00, avec une hauteur de 8,70m: quelle est la hauteur d'eau à 9h? À quelle heure la hauteur sera de 5,50 mètres?

L'utilisation de l'abaque (en rouge: détermination de la hauteur à 9h; en vert: détermination de l'heure pour 5,50m) donne 6m55 et 9h50.



# NOTE TECHNIQUE: RÈGLE FLASH-TIDE

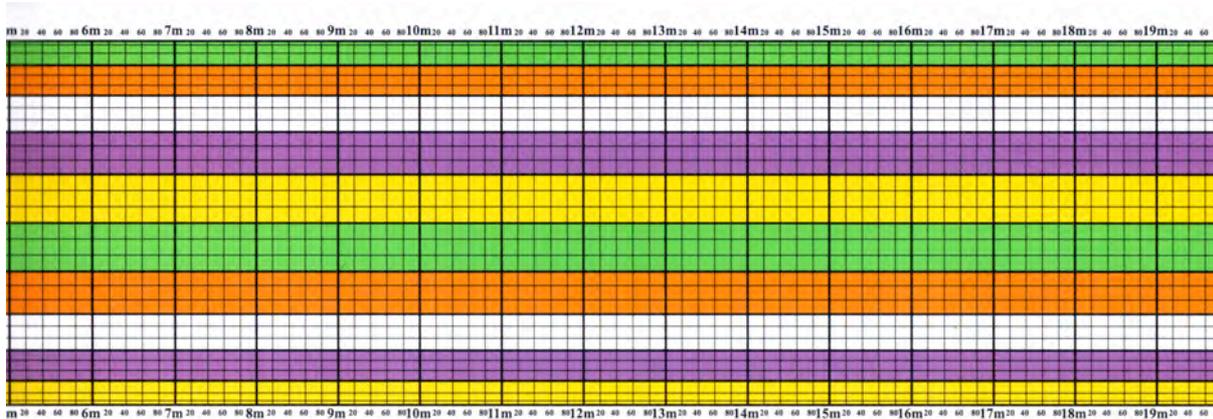
## Description

La règle "Flash Tide" est une règle permettant de résoudre, par simple construction graphique, les deux problèmes de la recherche de la hauteur à une heure déterminée et de la recherche de l'heure pour une hauteur donnée.

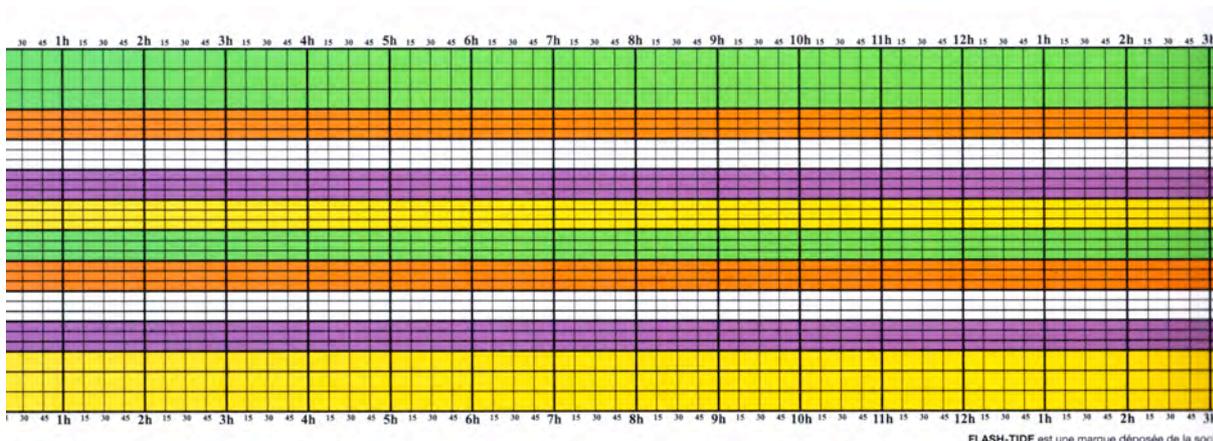
Il s'agit d'une règle double face: une pour la hauteur d'eau, l'autre pour les intervalles de temps. Ces deux faces portent en commun un quadrillage coloré selon des lignes horizontales, l'espacement entre ces lignes étant variable; cette variabilité de l'espacement découle directement de l'application de la règle des douzièmes. En pratique, le premier et le dernier douzième n'apparaissent pas d'une couleur différente du deuxième ou de l'avant dernier, respectivement. À l'exception de ces deux secteurs, les autres douzièmes sont partagés chacun en trois, de façon égale.

Il existe cependant une différence entre les deux faces de la règle en ce qui concerne la largeur de chacun de ces secteurs colorés; sur la face correspondant aux hauteurs d'eau (repérée par l'inscription des valeurs en mètres), les valeurs moyennes sont les plus larges; au contraire, sur la face opposée, correspondant aux données horaires, l'espacement le plus important se situe aux extrémités (haut et bas) de la règle.

Enfin, sur la droite de la règle "hauteur", se trouvent les corrections de la hauteur d'eau pour la pression atmosphérique.



Règle de calcul des marées, face hauteur d'eau



Règle de calcul des marées, face horaire

## Mode d'emploi

### Préparation

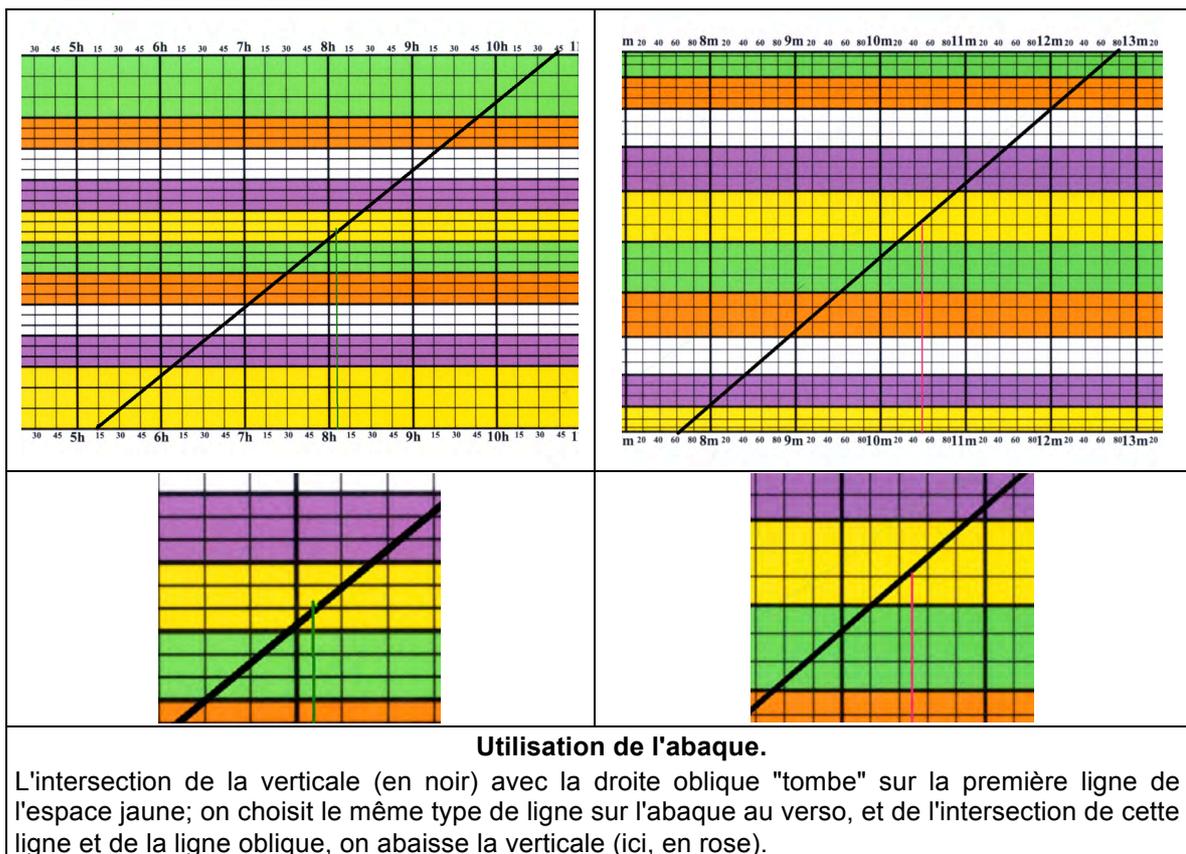
On reporte, à l'aide d'un crayon (effaçable!):

- **Sur la face "heures"**: l'heure de la basse mer sur la graduation située sur le côté inférieur de la règle (matérialisé par un bateau échoué...), l'heure de la haute mer sur la graduation du côté supérieur (bateau qui navigue), et on joint ces deux points par un trait, qui coupe tous les secteurs colorés et les lignes.
- **Sur la face "hauteur"**, on effectue la même manipulation avec les hauteurs de basse mer (bord inférieur) et de haute mer (bord supérieur), également reliés par un trait. Si la pression atmosphérique modifie cette hauteur, on la corrige à l'aide de l'abaque.

### Utilisation

Elle est très simple!

- Si on veut chercher une **hauteur d'eau connaissant l'heure**, on reporte cette heure sur la face adéquate de la règle, et on repère (couleur, n° de ligne) l'endroit où la ligne verticale passant par cette heure coupe l'oblique pré-tracée. On reporte alors ce point sur la face opposée de la règle, sur l'oblique joignant les deux hauteurs de marée, tracée à la phase précédente. La verticale passant par ce point donne la hauteur de la mer à l'instant choisi.



- Si on cherche, cette fois, **l'heure à laquelle la marée atteint une certaine hauteur**, on reproduit la manipulation dans le sens opposé: on trace la verticale passant par la hauteur donnée, on repère le point d'intersection avec l'oblique, on reporte ce point sur l'autre face de la règle, on abaisse la verticale qui coupe l'axe horizontal à l'heure cherchée.

# UTILISATION D'UNE CALCULATRICE POUR LES PROBLÈMES DE MAREE

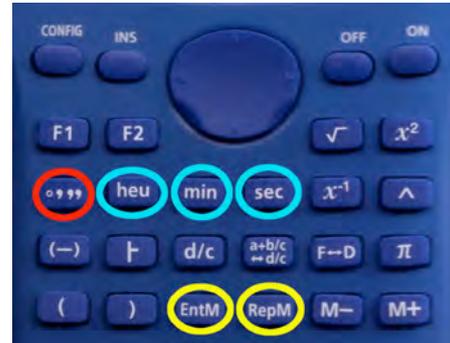
La calculatrice utilisée est la CASIO FX JUNIOR PLUS, simple, non programmable, dont le principe a fait l'objet de l'annexe C; elle présente un réel intérêt pour le calcul des marées; du fait de ses possibilités de manipulations sur les nombres hexagésimaux.

## Rappel

Pour ce calcul, on fera appel aux fonctions suivantes:

### Entrée des nombres sexagésimaux:

Elle est réalisée par la touche  (repérée en rouge sur la photo ci-contre), utilisée bien sûr conjointement avec le clavier numérique.



Cette entrée est réalisée par l'appui, après la saisie au clavier de chaque groupe de données (heures; minutes; secondes) de cette touche, en se rappelant que un groupe "zéro" doit être entré au clavier ("0"). Une fois l'heure rentrée de cette façon, apparaissant sur la ligne supérieure de l'afficheur, un appui sur la touche  permet son affichage sur la ligne inférieure.

### Conversion des nombres sexagésimaux

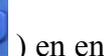
Les trois touches entourées en en bleu clair:    permettent de transformer une valeur entrée sous la forme précédente hhhmmss en valeur décimale. Cette fonction n'a qu'un intérêt très réduit dans la mesure où cette conversion n'aura pas besoin d'être utilisée.

### Stockage en mémoire

Bien que la machine possède trois mémoires (mémoire Mem et facteurs constants F1 et F2), seule la mémoire Mem est capable de stocker les résultats d'un calcul, y compris sous forme sexagésimale; les facteurs constants F1 et F2 pourront être utilisés pour y stocker des données entrées à l'aide du clavier.

#### Mémoires "F1" et "F2"

Avant toute mise en mémoire, il convient de "purger" les mémoires par l'association des touches  et  (pour la mémoire F2, c'est la même chose!). Ensuite on peut entrer soit une valeur "seule", qui peut être décimale ou hexadécimale, soit une valeur avec opérande

(signes    ) en entrant en premier le nombre, suivi ou non de l'opérande et terminé par la touche . De cette façon, un nouvel appui sur  rappellera soit la valeur seule, soit l'opération effectuée avec cette valeur.

## Mémoire "MEM"

Cette mémoire peut servir à stocker le résultat d'une opération, en faisant faire très attention à la méthode. En particulier, après une opération, il ne faut pas utiliser la touche  puis la touche , mais uniquement la touche . En effet, l'appui sur la séquence  peut réaliser deux fois l'opération, et donner alors un résultat complètement farfelu (voir un exemple ci-dessous).

## Application aux problèmes de marées

### Premier problème: détermination de la hauteur d'eau à une heure donnée

#### Préliminaire

On va déjà se débarrasser du cas où les heures H1 et H2 sont situées de part et d'autre de minuit par une "astuce" simple: on décale le problème de 12 heures, ce qui supprime la contrainte des calculs sur des heures espacées de 24 heures.

Exemple: Si H1=23h14min13s, H2=4h41min24s et H3=1h0min0s, puisque H1 et H2 sont de part et d'autre de minuit, on remplace ce jeu de données par H1=11h14min13s; H2=16h41min24s et H3=13h0min0s, et on résoud le problème de la manière "classique" exposée ci-dessous.

#### Résolution du problème

Prenons les mêmes valeurs: H1 (basse mer) est à 4h12min17s, H2 (pleine mer) à 9h58min3s; N1=3,57m et N2=10,12m. On cherche la hauteur d'eau à 6h30min.

On commence par calculer:

- ▶ Le marnage (différence de hauteur entre basse mer et haute mer) en effectuant le calcul avec le clavier numérique, et en notant le résultat; ici, le marnage vaut 6,55m; on en déduit la valeur du douzième en divisant le résultat par 12, ce qui donne comme valeur 0,5458m (on s'arrête au millimètre ou, au plus, au dixième de mm)
- ▶ L'intervalle (différence entre l'heure H2 et l'heure H1), en entrant les heures en notation sexagésimale. Ici, l'intervalle vaut 5h45min46s. On en déduit la valeur de l'heure-marée, égale au sixième de l'intervalle; on l'obtient simplement en divisant le résultat précédent par 6. Mais comme on va le mettre en mémoire, on ne va pas appuyer sur , mais directement sur , ce qui aboutit à l'affichage de 0h57'37,67". Vous pouvez essayer d'appuyer sur  puis sur , et regarder le résultat...

Cette heure-marée est maintenant stockée dans la mémoire, et on va pouvoir désormais calculer la première colonne du tableau; celle donnant les heures-clés. Pour cela, on réintroduit par le

clavier la première heure 4h12min17s, sans appuyer sur  et on ajoute, de façon répétitive, le contenu de la mémoire (appui sur ,  et ) en notant à chaque fois le résultat affiché, donnant la suite de valeurs:

5h9'54,67"; 6h7'32,33"; 7h5'10"; 8h2'47,67"; 9h0'25,33"; 9h58'3". Cette dernière correspond bien à H2.

On calcule ensuite les hauteurs d'eau correspondant à ces heures, en ajoutant (voir le cours) le nombre adéquat de douzièmes. Pour ce faire, on met dans la mémoire F1 la valeur du douzième (ici, 0,5458, calculé plus haut) selon la technique exposée plus haut, sans l'opérande de

l'addition. Il suffit ensuite d'entrer la hauteur d'eau au moment de la basse mer: 3,57m, puis d'ajouter la hauteur d'eau correspondant au nombre de douzièmes par la combinaison des touches   et , en répétant ces opérations en fonction du nombre de douzièmes. C'est ainsi qu'on obtient successivement 4,1158; 5,2074; 6,8448; 8,4822; 9,5738; et enfin 10,1196 qui correspond à N2.

*Nota: si on était en jusant, il suffirait de retrancher la valeur du douzième à la hauteur de la haute mer; le tableau serait de la même forme, et le raisonnement identique*

On peut alors remplir le tableau "classique"

De	A	La mer monte de	et passe de	A
4h12min17s	5h09min54,7s	1/12	3,57m	4,116m
5h09min54,7s	6h07min32,3s	2/12	4,116m	5,207m
6h07min32,3s	7h 5min 10s	3/12	5,207m	6,845m
7h 5min 10s	8h2min47,7s	3/12	6,845m	8,482m
8h2min47,7s	9h0min25,3s	2/12	8,482m	9,574m
9h0min25.3s	9h58min3s	1/12	9,574m	10,12m

On s'aperçoit alors que l'heure donnée: 6h30 se situe entre 6h07min54,7s et 7h5min10s, intervalle de temps pendant lequel la mer monte de 3 douzièmes. On réalise alors une interpolation classique, en calculant tout d'abord l'écart entre l'heure donnée et celle du début de l'intervalle, puis en divisant le résultat par la valeur de l'heure-marée; la calculatrice permet en effet de diviser des nombres sexagésimaux entre eux. On effectue donc au clavier la différence 6h30min0s-6h07min32s, soit 0h22'28" (affichage obtenu après touche ). On entre ensuite le signe  de la division, puis, par la touche , la valeur de l'heure-marée, puisqu'elle est toujours stockée dans la mémoire Mem; la touche  donne le résultat: 0,3898..., qu'il suffit de multiplier par 3 (nombre de douzièmes), puis par la valeur du douzième (qui, normalement, est toujours dans la mémoire F1...) pour obtenir 0,638 m. Cette valeur est alors à ajouter à la hauteur d'eau à 6h07min55s, soit 5,207m pour obtenir le résultat cherché: 5,85m (arrondi au cm).

## Deuxième problème: détermination de l'heure correspondant à une hauteur d'eau donnée

**Enoncé du problème:**

**On connaît:**

L'heure de pleine mer (ou de basse mer) H1

La hauteur d'eau à ce moment: N1

L'heure de basse mer (ou de pleine mer) immédiatement suivante: H2

La hauteur d'eau à ce moment: N2.

**On cherche** l'heure Hx à laquelle la hauteur d'eau Nx sera atteinte

Pour ne pas détailler outre mesure des calculs déjà exposés plus haut, on va prendre les mêmes données de marée que dans le cas précédent. On va également raisonner de la même manière pour le cas où H1 et H2 sont situées de part et d'autre de minuit; la seule différence avec le problème précédent est, que dans ce cas, il faudra également corriger l'heure Hx.

**Résolution du problème**

La première partie du raisonnement et des calculs est strictement identique au cas précédent, permettant d'aboutir au même tableau:

De	A	La mer monte de	et passe de	A
4h12min17s	5h09min54,7s	1/12	3,57m	4,116m
5h09min54,7s	6h07min32,3s	2/12	4,116m	5,207m
6h07min54,7s	7h 5min 10s	3/12	5,207m	6,845m
7h 5min 10s	8h2min47,7s	3/12	6,845m	8,482m
8h2min47,7s	9h0min25,3s	2/12	8,482m	9,574m
9h0min25.3s	9h58min3s	1/12	9,574m	10,12m

On cherche à quelle heure la hauteur de 9 m sera atteinte. Cette hauteur est comprise entre 8,48 et 9,57m et l'heure correspondante est comprise entre 8h2min47,7s et 9h0min25,3s.

Pendant cet intervalle de temps, la mer monte de 2 douzièmes; on va procéder à un calcul d'interpolation simple:

- On détermine la différence de hauteur entre la donnée 9m et 8,484m, soit 0.516m;
- On divise cette différence par deux douzièmes (rappel: normalement, la valeur du douzième est en mémoire...): la valeur est affichée: 0,4727.
- On multiplie enfin ce résultat par la valeur de l'heure-marée (0h57min37,67s) entrée en notation hexadécimale, aboutissant à l'affichage de 0h27'14,44s qu'on ajoute enfin, toujours en système hexadécimal, à 8h2min 47,7s, amenant ainsi au résultat cherché: 8h30'2,14".

*Rappel: si on avait ajouté 12 heures aux données initiales pour résoudre le cas où les heures encadrent minuit, il faudrait alors enlever (ou ajouter, c'est le même résultat...) 12 heures à la valeur ici trouvée.*

### Cas de la marée descendante

Le traitement du cas "jusant" est similaire à celui du cas "flot"; le raisonnement est le même, en soustrayant au lieu d'ajouter.

#### Enoncé du problème:

En reprenant les mêmes valeurs numériques, mais en supposant que la première donnée corresponde à la haute mer, on aurait comme données:

Haute mer à 4h12min17s, niveau d'eau 10,12m;

Basse mer à 9h58min3s, niveau d'eau à 3,57m;

On cherche la hauteur d'eau à 6h30min.

#### Résolution du problème

Intervalle, heure-marée, marnage et douzième ne changent pas; seules les hauteurs d'eau sont modifiées, puisque on retranche les douzièmes au lieu de les ajouter; le tableau est alors:

De	A	La mer baisse de	et passe de	A
4h12min17s	5h09min54,7s	1/12	10,12m	9,574m
5h09min54,7s	6h07min32,3s	2/12	9,574m	8,482m
6h07min54,7s	7h 5min 10s	3/12	8,482m	6,845m
7h 5min 10s	8h2min47,7s	3/12	6,845m	5,207m
8h2min47,7s	9h0min25,3s	2/12	5,207m	4,116m
9h0min25.3s	9h58min3s	1/12	4,116m	3,57m

La suite du raisonnement est calqué sur le premier type:

L'heure donnée: 6h30 se situe entre 6h07min54,7s et 7h5min10s, intervalle de temps pendant lequel la mer descend de 3 douzièmes. On calcule tout d'abord l'écart entre l'heure donnée et celle du début de l'intervalle (affichage: 0h22'5,3"), et on divise le résultat par la valeur de l'heure-marée, exactement comme ci-dessus. La valeur obtenue en multipliant cette valeur par 3 puis

par le douzième, soit 0,628m est, cette fois, à soustraire de la hauteur d'eau (8,482m), donnant finalement comme résultat 7,85m. (arrondi au cm).

## RESUME PRATIQUE

### Démarche commune: élaboration du tableau

RAZ de F1 et introduction de l'heure (la plus petite) dans F1	
RAZ de l'affichage, entrée de l'heure la plus grande, calcul et affichage de l'intervalle	
Calcul, mise en mémoire, affichage de l'HM	
Calcul et affichage de la deuxième <sup>2</sup> heure	
Calcul et affichage de la troisième heure	
Calcul <sup>3</sup> et affichage des heures suivantes (répéter)	
<b>Vérification:</b> La 7ème heure doit être égale à la plus grande des heures données	
Calcul du marnage et du douzième	
RAZ de F2 et introduction du douzième dans F2	
Calcul de la hauteur au début 2 <sup>ème</sup> heure	
Calcul de la hauteur au début 3 <sup>ème</sup> heure	
Calcul de la hauteur au début 4 <sup>ème</sup> heure	
Calcul de la hauteur au début 5 <sup>ème</sup> heure	
Calcul de la hauteur au début 6 <sup>ème</sup> heure	
Calcul de la hauteur du début de la 7 <sup>ème</sup> heure	
<b>Vérification:</b> Cette dernière valeur correspond à la hauteur maximale.	

<sup>2</sup> La première heure est la plus petite des heures données; la première heure-marée est comprise entre la première heure (celle donnée) et la deuxième heure calculée ici.

<sup>3</sup> L'appui sur la touche "égale" permet de répéter l'opération



# UTILISATION D'UNE TABLEUR "EXCEL" POUR LES PROBLÈMES DE MAREE

Les moyens modernes permettent de résoudre de façon élégante (et sûre...) les problèmes de calcul de marées. Un exemple est donné par le tableur Execl "CALMAR", de développement personnel. Son intérêt réside plus dans son aspect didactique que dans le calcul proprement dit, qui ne pose aucune difficulté majeure. Il est basé sur la règle des 1/12, puisque c'est cette méthode française qui est "la règle" officielle ... des examinateurs!

Ce tableur est protégé pour éviter d'écraser les formules; toutefois la lecture de celles-ci est accessible.

## Introduction des données de base

Ces données sont les heures et hauteurs de basse mer et de pleine mer (quel que soit l'ordre, le système les remet dans le bon ordre).

Heures (hh:min)	13:00	19:00
Hauteur (mètres)	1,15	14
	<i>Basse mer</i>	<i>Haute mer</i>

Une fois ces données entrées, le système élabore le tableau donnant l'heure-marée et la valeur du douzième, puis le calcul classique de la montée (ou descente) du niveau d'eau pendant chaque heure-marée est affiché:

Durée PM-BM	5:44 (hh:mm)
Heure-marée	0:57:20 soit 57,33 min
Marnage	12,85 mètres
Douzième	1,07 mètres

Pendant la...	Qui s'étend		La mer Monte de	Et passe	
	De	à		de	à
1ère heure-marée	13:00:00	13:57:20	1,07	1,15	2,22
2ème heure-m.	13:57:20	14:54:40	2,14	2,22	4,36
3 ème heure-m.	14:54:40	15:52:00	3,21	4,36	7,58
4 ème heure-m.	15:52:00	16:49:20	3,21	7,58	10,79
5ème heure-m.	16:49:20	17:46:40	2,14	10,79	12,93
6 ème heure-m	17:46:40	18:44:00	1,07	12,93	14

## Calculs

Les deux problèmes classiques sont traités indépendamment par le tableur:

### Calcul de l'heure pour le besoin d'eau

Le besoin d'eau peut être indiqué directement (illustration ci-contre)...

Si vous recherchez une heure de passage, remplissez le tableau suivant ou précisez le besoin d'eau:  mètres

Ou calculé en indiquant les éléments nécessaires pour ce calcul:

Tirant d'eau (en mètres)	1,1
Pied de pilote (en mètres)	0,35
Pression atmosphérique (en mBar)	1000
Indication de la sonde (en mètres)	-1
(Par rapport PBMA, donc >0 si soulignée, <0 en général)	
Besoin d'eau (en mètres):	1,15 (Valeur calculée)

Après vérification que ce besoin d'eau est dans les limites entre la BM et la PM, la valeur de l'heure de passage est indiquée, ainsi que la trame du raisonnement:

La valeur donnée fait partie de la 1<sup>ère</sup> heure-marée.  
 Pendant celle-ci, la mer monte de 1,07 m  
 La différence entre la valeur donnée et la hauteur au début de cette heure-marée est de 0 m, soit 0%, qui correspondent à 0 min 0s  
**Il faudra passer au point donné après 13 h 0 min 0 s**

### Calcul de la hauteur connaissant l'heure

Il suffit de renseigner la case correspondante:

Si vous cherchez la hauteur disponible à une heure déterminée, donnez cette heure:  (hh.mm)

Le raisonnement et le résultat s'affichent:

Cette heure est dans la 1<sup>ère</sup> heure-marée (13h0min-13h57min)  
 L'écart de 0 min représente 0 % de l'heure-marée,  
 et correspond à une hauteur de 0 m, à ajouter  
 à la hauteur à 13h0min, soit 1,15m.  
 Finalement la hauteur de la mer au dessus du niveau  
 des PBMA est, à 13h 0min de 1,15 mètres

Et cette valeur est reprise en fonction du besoin d'eau, précisé dans une démarche antérieure:

En tenant compte d'un besoin d'eau de 1,15 m, il manque une hauteur de 0 mètre

*NB Les affichages ont été revus, avec prise en compte dans le paragraphe précédent de la correction à apporter en raison de la pression atmosphérique.*

## PLAN DU COURS 4" LES MARÉES "

<b>LES MARÉES .....</b>	<b>1</b>
DONNÉES THÉORIQUES .....	1
<i>Rappels physiques sur la genèse des marées .....</i>	<i>1</i>
<i>Différents types de marées.....</i>	<i>1</i>
<i>Marées de vives-eaux et de mortes-eaux; Coefficients de marée.....</i>	<i>2</i>
<i>Modélisation du phénomène "marées".....</i>	<i>3</i>
DÉFINITIONS .....	3
VITESSE DE LA MARÉE .....	6
<i>Règle des douzièmes:.....</i>	<i>6</i>
<i>Projection circulaire .....</i>	<i>6</i>
APPLICATIONS PRATIQUES .....	7
<i>Rappel des notations cartographiques .....</i>	<i>7</i>
<i>Importance de la position du sondeur .....</i>	<i>7</i>
<i>Importance du type de sonde.....</i>	<i>7</i>
<i>Le pied de pilote .....</i>	<i>8</i>
<i>Source des données.....</i>	<i>8</i>
<i>Calcul d'une hauteur d'eau due à la marée.....</i>	<i>8</i>
Bases du calcul: .....	8
Méthodologie:.....	8
Démarche 1: calcul de l'heure-marée .....	8
Démarche 2: calcul du marnage .....	8
Démarche 3: calcul de la hauteur d'eau .....	9
<i>Autres éléments influençant la hauteur d'eau.....</i>	<i>12</i>
La pression atmosphérique .....	12
Le vent .....	12
<i>Autres techniques de calcul de la marée .....</i>	<i>12</i>
ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES .....	12
<b>EXEMPLE DE FEUILLE DE CALCUL.....</b>	<b>13</b>
<b>ABAQUE DU SHOM.....</b>	<b>14</b>
DESCRIPTION .....	14
MODE D'EMPLOI .....	14
<i>Préparation.....</i>	<i>14</i>
<i>Utilisation .....</i>	<i>15</i>
<b>NOTE TECHNIQUE: RÈGLE FLASH-TIDE.....</b>	<b>16</b>
DESCRIPTION .....	16
MODE D'EMPLOI .....	17
<i>Préparation.....</i>	<i>17</i>
<i>Utilisation .....</i>	<i>17</i>
<b>UTILISATION D'UNE CALCULATRICE POUR LES PROBLÈMES DE MAREE .....</b>	<b>18</b>
RAPPEL.....	18
<i>Entrée des nombres sexagésimaux:.....</i>	<i>18</i>
<i>Conversion des nombres sexagésimaux .....</i>	<i>18</i>
<i>Stockage en mémoire.....</i>	<i>18</i>
Mémoires "F1" et "F2" .....	18
Mémoire "MEM" .....	19

---

APPLICATION AUX PROBLÈMES DE MARÉES .....	19
<i>Premier problème: détermination de la hauteur d'eau à une heure donnée</i> .....	19
Preliminaire.....	19
Résolution du problème.....	19
<i>Deuxième problème: détermination de l'heure correspondant à une hauteur d'eau donnée</i> .....	20
Enoncé du problème: .....	20
Résolution du problème.....	20
<i>Cas de la marée descendante</i> .....	21
Enoncé du problème: .....	21
Résolution du problème.....	21
RESUME PRATIQUE .....	22
<i>Démarche commune: élaboration du tableau</i> .....	22
<b>UTILISATION D'UNE TABLEUR "EXCEL" POUR LES PROBLÈMES DE MAREE</b>	<b>23</b>
INTRODUCTION DES DONNÉES DE BASE.....	23
CALCULS .....	23
<i>Calcul de l'heure pour le besoin d'eau</i> .....	23
<i>Calcul de la hauteur connaissant l'heure</i> .....	24