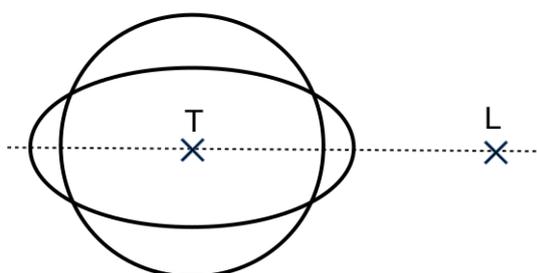


Les marées

I – Formation des marées sur la Terre, un cas idéal et théorique : l'action de la Lune

La figure ci-dessous représente la Terre vue du dessus, le cercle correspondant à l'équateur, le point L étant la Lune. Le « ballon de rugby » donne l'image de l'effet que l'attraction lunaire engendrerait si la Terre n'était qu'un océan : formation d'une marée haute aux points situés au plus près et à l'opposé de la Lune, et d'une marée basse aux points situés sur la perpendiculaire à la ligne TL. Sans autre effet, le marnage, différence de niveau de la mer entre marée haute et marée basse, ainsi engendré serait de 54 cm.



En raison de l'attraction de la Lune, chaque point de l'équateur subirait deux marées hautes et deux basses par jour. Et sa hauteur varierait suivant une fonction sinusoïdale de période 12 h 25 min, le décalage de 25 min étant dû au déplacement journalier de la Lune par rapport à la Terre. On peut s'étonner de cette forme en ballon de rugby car, quand on pense à l'effet de l'attraction d'un astre sur la Terre, on imagine plutôt une marée haute du côté de l'astre et une marée basse de l'autre côté. En fait, il faut considérer que l'astre et la Terre forment un système qui tourne autour de son centre de gravité. Dans le cas de la Terre et de la Lune, ce point se situe un peu en dessous de la croûte terrestre (il varie selon les positions respectives des deux astres). La rotation autour de ce point engendre une force centrifuge qui provoque également une marée haute au point opposé à l'astre.

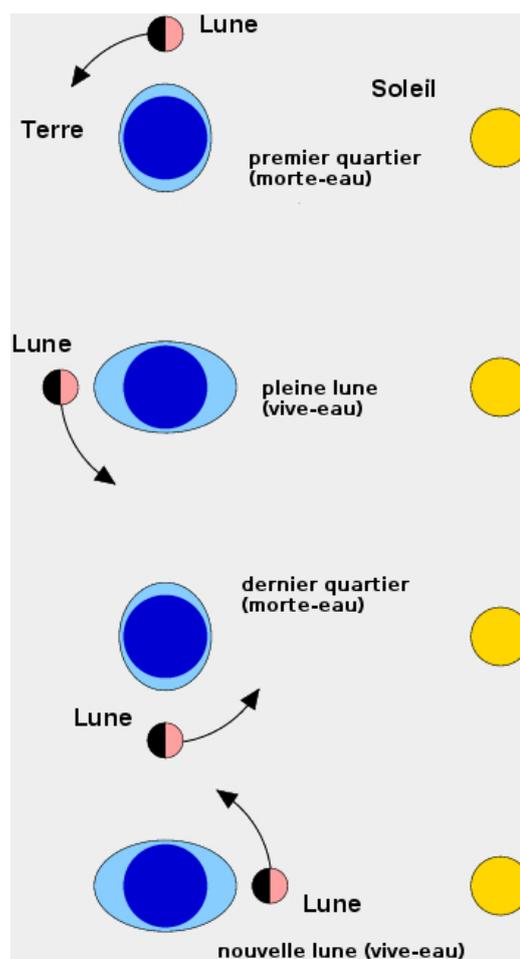
II – Action du Soleil

Le Soleil aussi provoque une attraction sur la Terre. Comme il est beaucoup plus gros que la Lune, on pourrait penser que son effet est plus fort. Ce n'est pas le cas, car il en est beaucoup plus éloigné : si l'attraction est proportionnelle à la masse, elle est inversement proportionnelle au cube de la distance qui sépare les astres.

La marée solaire est ainsi environ deux fois plus faible que la marée lunaire (2,15 fois en moyenne).

Ces deux mouvements se conjuguent pour former des marées importantes dites de vive eau lorsque le Soleil et la Lune sont alignés avec la Terre, c'est-à-dire

aux pleines Lunes et aux nouvelles Lunes, et des marées plus faibles dites de morte eau lorsque la Lune est en premier ou en dernier quartier car dans ces périodes la Lune est à la perpendiculaire de l'axe Terre-Soleil. À l'approche des équinoxes, lorsque le Soleil est dans le plan de l'équateur et donc à peu près dans celui de la Lune, les grandes marées seront encore plus fortes.



Lorsqu'on s'éloigne de l'équateur, d'autres forces viennent interférer car la force d'attraction, dirigée vers l'astre n'est plus verticale et provoque une onde supplémentaire. Lorsque on s'approche des pôles cette onde devient diurne, car la force centrifuge ne s'exerce plus. Sa période est alors de l'ordre de 24 h. Les quatre principales ondes prises en compte dans les calculs sont donc les deux ondes semi-diurnes lunaires et solaires et les deux ondes diurnes correspondantes plus faibles.

III – Action ou réaction provoquées par la forme des continents

Tout se passerait de façon relativement simple, s'il n'y avait pas... les continents !

Les ondes lunaire et solaire sont ainsi stoppées et renvoyées, provoquant selon les endroits des effets de résonance pouvant augmenter ou diminuer les amplitudes. En certains points, ce marnage est même nul. D'autre part, les hauts fonds, en freinant le déplacement de l'onde, peuvent également provoquer une forte augmentation d'amplitude ; c'est le cas de la Manche dont la profondeur ne dépasse jamais 200 m. Ces augmentations dépendent beaucoup de la forme des rivages : plus de 12m dans la baie du Mont Saint-Michel contre environ 2m sur la côte anglaise en face.

Pour faire des prévisions précises, il faut encore tenir compte d'autres forces dues à de légères variations du mouvement de la Lune : ellipticité de l'orbite, variation de cette orbite par rapport au plan de l'équateur...

Une légère différence d'attraction entre les deux sommets du ballon de rugby engendre la formation de nouvelles ondes diurnes. Toutes ces ondes diurnes sont peu perceptibles dans l'Atlantique, mais observables en certains endroits du Pacifique.

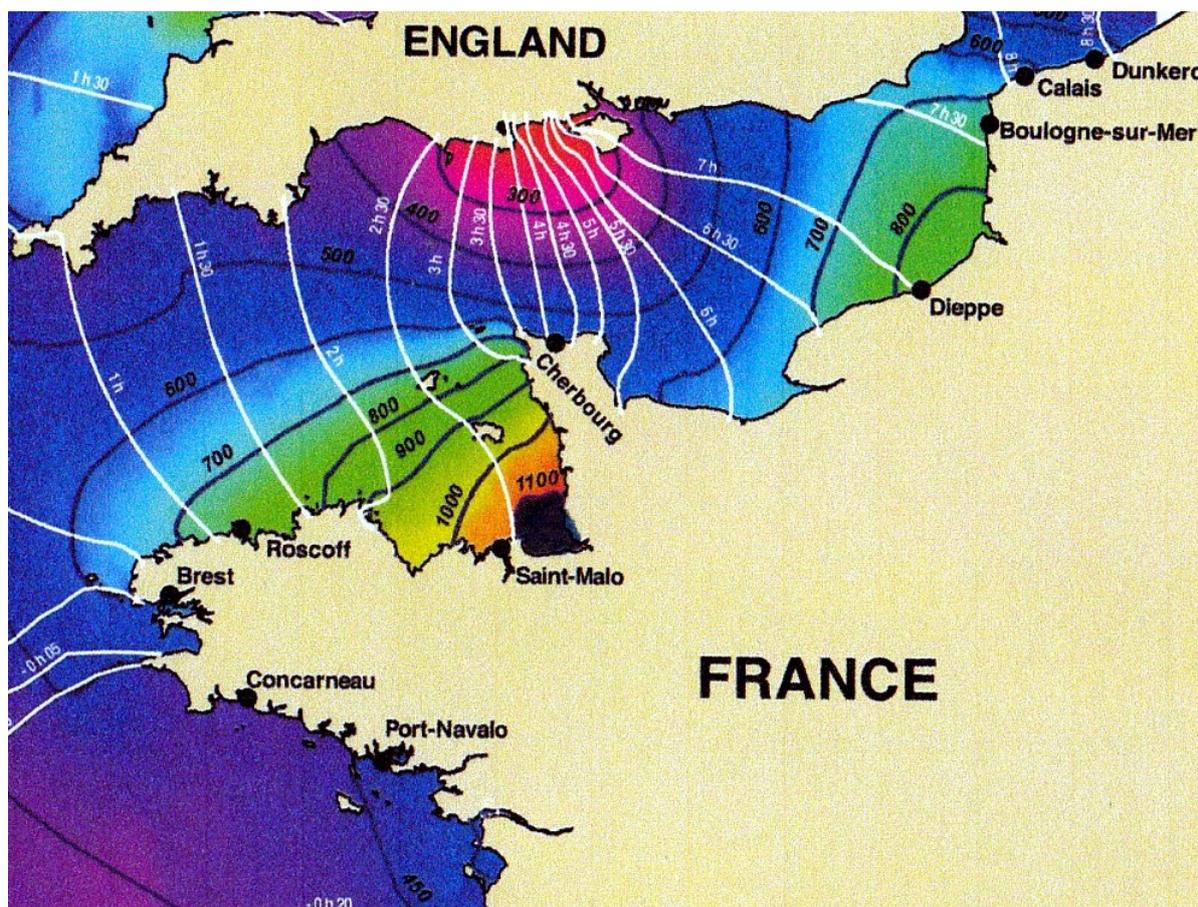
Ajoutez un zeste de force de Coriolis (ces forces faibles dues à la rotation de la Terre et qui s'expriment en particulier dans le sens de la spirale d'écoulement de

l'eau dans un lavabo : le sens de la spirale dans l'hémisphère nord est opposé à celui de l'hémisphère sud), mélangez le tout, et vous aurez une idée de la complexité du problème.

Pour faire un calcul précis, il faut connaître le déphasage éventuel entre le passage de l'astre au zénith et l'heure de la marée haute réelle, ainsi que l'amplitude de chaque composante au point considéré : c'est le travail des services hydrographiques, les marins ne font jamais ces calculs et se munissent toujours d'annuaires — quand ils existent.

Sur la carte ci-dessous, les lignes blanches indiquent le décalage de l'onde de marée par rapport à celle de Brest, siège des services du SHOM (Service hydrographique et océanique de la Marine nationale, qui fait les calculs de prévisions de marées. À Ouistreham, une marée haute ou basse se produira 6 h après celle de Brest, à la pointe du Raz, elle se produira 15 min avant.

Les lignes noires indiquent la hauteur du marnage pour une marée moyenne de vive eau de coefficient 95, soit plus de 11 m à St Malo, moins de 3 m près de l'île de Wright.



IV – Les marées dans le monde

En certains endroits particuliers, il est possible de prévoir de façon approximative l'heure de la marée. Sur

une île située non loin de l'équateur et entourée d'un océan profond (Tuamotu nord, îles du Cap vert) ou près d'une côte peu découpée (côte mauritanienne par

exemple), vous pourrez vous attendre à observer le régime classique dit semi-diurne à dominante lunaire et prévoir que, en période de vive eau la marée sera haute aux alentours de midi (et de minuit) et que dans tous les cas de figure elle sera basse au moment du lever et du coucher de la Lune. D'une façon générale, surtout si on s'éloigne de l'équateur, lorsqu'on est sûr que le rythme est semi-diurne, ce qu'il faut connaître, c'est le déphasage éventuel entre la marée basse et le lever de la Lune ou, ce qui revient au même, le décalage entre le moment où l'attraction est la plus faible et la basse mer réelle. Ce décalage, quand il existe, est à peu près fixe et cela permet de prévoir approximativement la marée dans les endroits pour lesquels il n'existe pas d'annuaire. Cela peut être utile pour entrer dans une passe d'un atoll des Tuamotu par exemple : le courant étant généralement sortant, il vaut mieux entrer lorsque la marée est haute, car le courant est plus faible ou nul.

Sur les côtes françaises, si vous vous souvenez de

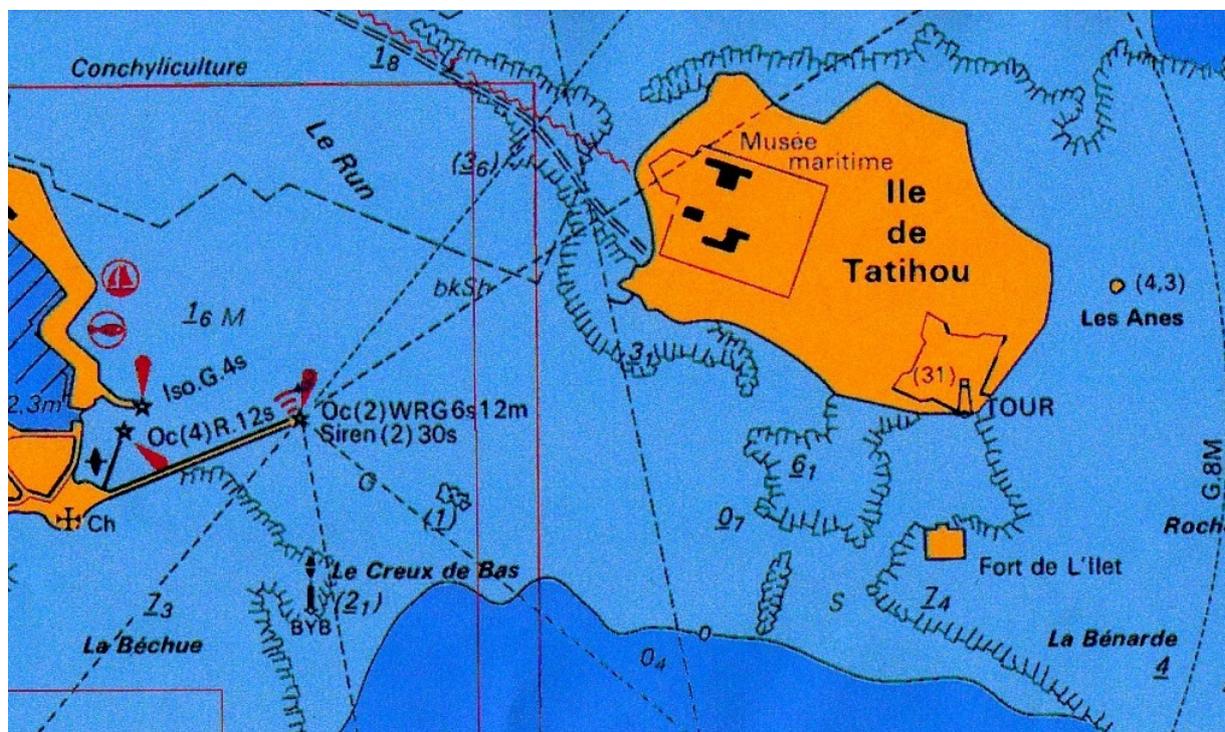
l'heure d'une marée de vive-eau en un endroit, vous pouvez prévoir que, à une heure près, toutes les autres marées de vive-eau se reproduiront dans les mêmes tranches horaires à cet endroit. Cela s'explique par le fait que les ondes solaires ont des périodes de 12 h et 24 h — donc pas de décalage journalier — et que ces marées de vive-eau sont précisément celles où la Lune s'accorde avec le Soleil.

Dans certains endroits du Pacifique sud, la marée solaire est prédominante, et donc la marée haute suit le Soleil. Elle est donc haute à midi et à minuit. C'est le cas dans l'archipel de la Société, à Papeete par exemple, alors qu'aux Tuamotu nord, à seulement 300 km, le régime est lunaire. Dans le pacifique nord ou près du Viet Nam, on trouve même des marées diurnes (une seule par jour) parce que les ondes diurnes à période deux fois plus longue peuvent s'y développer, c'est les cas également aux Antilles Françaises mais comme le marnage est faible le phénomène est peu perceptible.

V – Un cas concret : à quelle heure pourrez-vous entrer dans le port de Saint-Vaast-la-Hougue ? (et en sortir !)

Le 24 septembre 2016, pour entrer au port de Saint-Vaast, vous avez besoin d'une hauteur d'eau d'au moins 4,50 m. Votre tirant d'eau est de 2m, le passage entre Ta-

tihou et le port, découvert à marée basse, se situe à plus de 2m au dessus du 0 des cartes ; de plus, la sécurité impose de garder un pied de pilote (sécurité sous la quille) de 50 cm. L'indicateur des marées prévoit une marée basse à 11h05 avec une hauteur d'eau de 2,30m, et la pleine mer à 16h46 avec une hauteur d'eau de 5,60 m.



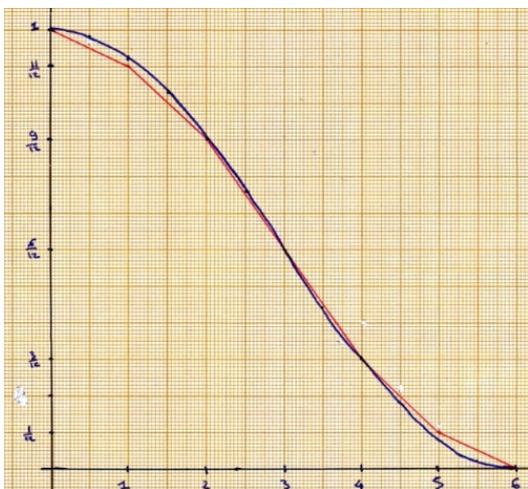
VI – Dans la pratique, les marins utilisent la règle des douzièmes : une approximation mathématique raisonnable

Cette règle permet de prévoir la hauteur d'eau dans un endroit donné en fonction de l'heure de la marée.

Elle stipule que, si on connaît la durée de la marée d , différence entre l'heure de la marée haute et celle de la marée basse, il faut calculer d_m , « l'heure marée » égale à $\frac{d}{6}$, alors au cours de ces 6 « heures » ainsi définies, la

variation de hauteur sera respectivement de 1,2,3,3,2,1 douzième du marnage.

Rappelons que le marnage m est la différence de hauteur entre la marée haute et la marée basse.



La figure ci-dessus met en évidence le fait que cette règle est une approximation linéaire par morceaux (en rouge) d'une fonction cosinus (en bleu). Avant l'invention des calculatrices, c'était un outil remarquable pour résoudre simplement ce type de problème. Désormais si on souhaite un calcul assez précis, il peut être plus simple de programmer la fonction.

Cette règle reste cependant excellente pour une évaluation grossière par calcul mental, évaluation souvent suffisante.

Pour faire « coller » la fonction cosinus à la règle des douzièmes, il suffit de chercher la fonction de type $f(t) = a \cos(\omega t) + b$ vérifiant $f(0) = m$ et $f(d) = 0$. On trouve $a = b = m/2$ et $\omega = \frac{\pi}{d}$. Ceci donne $f(t) = \frac{m}{2} \cos(\frac{\pi t}{d}) + \frac{m}{2}$. Lors de la program-

mation de cette fonction sur une calculatrice, celle-ci doit être en mode radians et t et d_m doivent être exprimés dans la même unité (minutes ou heures).

Par exemple, si le marnage (différence de hauteur entre marée haute et marée basse) est de 6 m et la durée de la marée de 363 min, la hauteur d'eau sera de $f(t) = 3 \cos(\frac{\pi t}{363}) + 3$.

Deux heures vingt minutes (soit 140 min) après l'heure de la marée haute, la hauteur d'eau sera $f(140) = 4,05$ m au dessus de celle de la basse mer indiquée sur l'annuaire. Afin de connaître la hauteur d'eau sous le bateau, et donc de vérifier avec le sondeur, cette hauteur devra être ajoutée à celle de la marée basse et à celle indiquée sur la carte à cet endroit.

Si la durée de la marée descendante n'est pas égale à celle de la marée montante, on utilisera deux fonctions. Avec une calculatrice en mode degrés, il faut bien sûr prendre $f(t) = \frac{m}{2} \cos(\frac{180t}{d}) + \frac{m}{2}$

Pour la même approximation, le SHOM propose $f(t) = m \cos^2(\frac{90t}{d})$. En appliquant la formule $\cos(2x) = 2 \cos^2(x) - 1$, on peut vérifier que c'est la même fonction.

VII - Corrections liées à la météo

On ne doit pas perdre de vue que les estimations faites correspondent aux conditions atmosphériques des annuaires : pas de vent et pression normale. Près des côtes, un fort vent de terre peut faire baisser sensiblement le niveau de la marée, de même qu'une situation anticyclonique (haute pression). Il convient de prévoir 10 cm de hauteur d'eau en moins pour 10 hPa (hectopascals) en plus. Sous un anticyclone de 1040 hPa, il faudra retrancher 25 cm. Inversement, lors d'une dépression de 950 hPa, il faudrait ajouter 65 cm. Mais dans ce cas, la sécurité impose d'être rentré au port !

Bibliographie

Les marées, Guide du navigateur, Service hydrographique et Océanique de la Marine (ouvrage assez difficile d'accès, disponible dans les magasins spécialisés ou par internet ; De nombreux écrits sur ce sujet en proviennent, ce texte n'en est qu'une vulgarisation modeste et assez grossière).

Voineson G. & Jan G., *Notions fondamentales sur la marée*, diaporama disponible à l'url :

http://refmar.shom.fr/documents/10227/146428/Voineson%26Jan_Journees-REFMAR-2013.pdf

Almanach du marin breton, éditions de l'Œuvre du marin breton.

Bloc marine (pour les horaires et coefficients, un grand classique de librairie maritime et un livre de référence pour les marins).

Michel Soufflet

Appendice : Didier Bessot traite les calculs détaillés du cas concret proposé au paragraphe V.

I – Par la méthode des « 1-2-3-3-2-1 »

Marée basse : 11h05, 2,30 m.
 Marée haute : 16h46, 5,60 m.
 Le marnage m est 3,30 m, soit 330 cm, et son douzième est $\frac{m}{12} = 27,5$ cm. La durée de la marée est : $d = 5$ h 41 min, soit 341 min arrondi à 342, qui est divisible par 6. On a $\frac{d}{6} = \frac{342}{6} = 57$, donc l'heure marée est $d_m = 57$ min.

La hauteur d'eau de 4,50 m est atteinte entre 13h56 et 14h53. L'heure où cette hauteur est de 4,50 m peut être précisée par une interpolation linéaire :

$$\frac{4,50 - 3,950}{4,775 - 3,950} = \frac{0,55}{0,825} = \frac{2}{3};$$

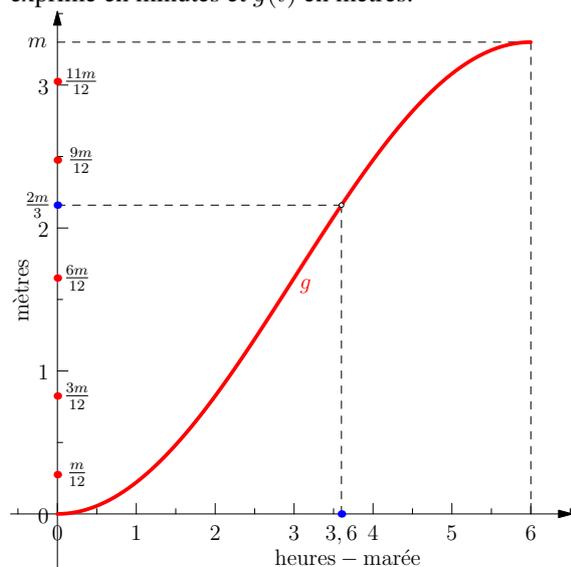
$$\frac{2}{3} \times 57 \text{ min} = 38 \text{ min.}$$

On obtient donc 13h56 + 38 min = 14h34.
 L'entrée au port est possible à partir de 14h34.

II – Par l'usage de la fonction trigonométrique

La fonction $f(t) = \frac{m}{2} \cos(\frac{\pi t}{d}) + \frac{m}{2}$ est décroissante sur l'intervalle de temps considéré ; elle convient donc à une situation de marée descendante.

La fonction g de même type $g(t) = a \cos(\omega t + \varphi) + b$ exprimant la montée de la mer pendant la durée de la marée doit vérifier $g(0) = 0$ et $g(d) = m$, d'où $a = \frac{-m}{2}$, $b = \frac{m}{2}$, $\omega = \frac{\pi}{d}$, $\varphi = 0$, puis $g(t) = \frac{m}{2} - \frac{m}{2} \cos(\frac{\pi t}{d})$. Pour le cas étudié la fonction g devient $g(t) = 1,65 - 1,65 \cos(\frac{\pi t}{342})$ où le temps t est exprimé en minutes et $g(t)$ en mètres.



Résolution graphique

Dans le cas d'espèce étudié, l'élévation de l'eau nécessaire pour atteindre une hauteur totale de 4,50 m est de 4,50 m – 2,30 m = 2,20 m, ce qui correspond aux deux tiers du marnage de 3,30 m. Cette éléva-

Variation du temps	Heure	Coeff.	Variation de hauteur	Hauteur d'eau
	11h05			2,300 m
+ 57 min	12h02	1	+1×0,275	2,575 m
+ 57 min	12h59	2	+2×0,275	3,125 m
+ 57 min	13h56	3	+3×0,275	3,950 m
+ 57 min	14h53	3	+3×0,275	4,775 m
+ 57 mn	15h50	2	+2×0,275	5,325 m
+ 57 min	16h46	1	+1×0,275	5,360 m

tion est atteinte à partir de 3,63 « heures-marées », soit 3,63×57 min, soit 207 min, soit 3 h 27 min après la basse mer. On obtient donc 11h05 + 3 h 27 min = 14h32.

La hauteur totale d'eau s'obtient en ajoutant la hauteur de l'eau à marée basse, soit ici 2,30 m donnant la fonction h définie par $h(t) = 3,95 - 1,65 \cos(\frac{\pi t}{342})$.

La programmation de cette fonction sur Casio Graph 35® permet d'établir les tableaux ci-dessous, qui constituent une recherche par approximations successives.

Tableau 1

Durée t en min	Hauteur d'eau $h(t)$
0	2,300
57	2,521
114	3,125
171	3,950
228	4,775
285	5,379
342	5,600

Tableau 2

Durée t en min	Hauteur d'eau $h(t)$
171	3,950
190	4,237
209	4,514
228	4,775

Tableau 3

Durée t en min	Hauteur d'eau $h(t)$
195	4,311
200	4,384
205	4,457
210	4,529

Tableau 4

Durée t en min	Hauteur d'eau $h(t)$
205	4,457
206	4,471
207	4,486
208	4,500
209	4,514

La hauteur d'eau atteint et dépasse 4,50 m après 208 min, soit 3 h 28 min, de marée montante. La basse mer ayant eu lieu à 11h05, l'entrée au port est possible à partir de 14h33.