

# COURS DE MAREE

## Introduction

La marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil, astres dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des périodes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années. L'un des buts principaux de l'étude des marées est la recherche des relations existant entre le mouvement des astres et la réponse des océans à l'action de ces forces gravitationnelles afin d'établir des formules de prédiction. A ces mouvements d'allure régulière se superposent des variations de hauteur d'eau d'origine météorologique, appelées surcotes-décotes dont l'étude relève essentiellement de méthodes statistiques. Une difficulté vient du fait que l'influence météorologique n'est pas purement aléatoire. On peut, par exemple y détecter des cycles saisonniers dus aux variations annuelles des champs de pression atmosphérique ou des cycles diurnes provenant des vents thermiques. Ces signaux sont souvent difficiles à distinguer des signaux d'origine gravitationnelle car leurs périodes peuvent être identiques. En pratique, on appellera marée, la partie pouvant être prédite des variations de hauteur, en y incluant la partie pouvant être prédite de ces variations d'origine atmosphérique, appelée, selon un anglicisme, "marée radiationnelle".

Les surcotes-décotes, différence entre les hauteurs d'eau observées et la marée prédite, ne font pas partie de la marée à proprement parler. Il est cependant légitime de s'y intéresser car leur étude permet d'obtenir des résultats importants dans de nombreux domaines (navigation, hydrographie, aménagements portuaires, études climatiques).

Les courants de marée constituent un autre aspect, parfois méconnu de la marée dont l'intérêt est évident, non seulement pour la navigation, mais également pour l'étude de paramètres biologiques, sédimentologiques ou écologiques.

## I. GENERALITES

### I.1 HISTORIQUE

#### I.1.1 Théories anciennes

Aux environs de 330 avant Jésus-Christ, le grec Pytheas partit de Marseille, qui était alors une colonie grecque, pour un long voyage vers les Îles Britanniques. Il observa alors des marées d'amplitude insoupçonnée dans le monde méditerranéen et fit une découverte fondamentale: la marée était d'une manière ou d'une autre contrôlée par le mouvement de la Lune. Non seulement il constata qu'il y avait deux pleines et basses mers par jour lunaire, mais également que l'amplitude de la marée dépendait des phases de la Lune. Cette découverte peut être considérée comme le point de départ des recherches sur la théorie des marées.

Vers la même époque, Sélerrens de Babylone observait les marées du Golfe Persique et signalait les effets de la déclinaison des astres sur l'amplitude de la marée.

Quelque 150 ans plus tard, un astronome grec Selukos, observant la marée de la Mer Rouge, découvrit les inégalités diurnes et relia leur amplitude à la déclinaison de la Lune.

Au premier siècle avant J.-C., Posidanius de Rhodes établit pour les marées des côtes d'Espagne, un tableau donnant la concordance de leurs variations diurnes, semi-diurnes et mensuelles avec les mouvements de la Lune et du soleil. Strabon au début de l'ère chrétienne décrit les marées du Portugal, d'Angleterre, du Danemark d'Italie et du Golfe Persique. Vers la même époque, Pline l'Ancien mentionne l'établissement, l'âge de la marée et les variations annuelles de l'amplitude des vives-eaux.

Ainsi, il y a plus de deux millénaires, les caractéristiques les plus importantes de la marée étaient connues, grâce en particulier aux observations des Grecs dans les Îles Britanniques et en Mer Rouge. Il fallut pourtant attendre plus de 1700 ans avant qu'une explication satisfaisante fût donnée à ce phénomène.

Pendant cette période les explications les plus étranges ont pu être avancées, parfois dues à des esprits scientifiques éminents.

Bede the Venerable, un moine britannique (673-735) pensait que le jusant était dû au souffle de la Lune sur l'eau, le flot intervenant lorsque l'astre s'éloignait.

Un savant arabe Zakariya al-Qwazwini (1203-1283) tenta la première explication scientifique. Selon lui, la marée montante était due à l'expansion thermique de l'eau échauffée par la Lune et le Soleil. Son hypothèse cependant ne pouvait à l'évidence pas expliquer pourquoi la Lune jouait le rôle le plus important.

L'astronome allemand Kepler (1571-1630) était convaincu que l'explication devait être recherchée dans une force attractive de la Lune et du Soleil, force qui devait être une sorte de magnétisme. Il était probablement inspiré par la récente découverte du magnétisme terrestre par Gilbert.

Le physicien et astronome italien Galilée (1564-1642) se dit surpris que Kepler s'intéressât à l'action de la Lune sur l'eau et à des phénomènes occultes et autres enfantillages. Lui-même croyait, soutenant la théorie de Copernic de la rotation de la terre, que les marées étaient générées par l'effet combiné de la rotation de la terre autour de son axe et de son mouvement orbital autour du soleil. Ces mouvements étaient censés engendrer des oscillations des océans qui se manifesteraient par la marée.

Descartes (1596-1650), quant à lui défendit l'idée de l'origine lunaire des marées. Selon lui, la lune et la terre sont chacune entourées d'un grand tourbillon. La pression exercée par le tourbillon de la lune sur celui de la terre était transmise à la surface de la terre et générait les marées.

Le mathématicien anglais Wallis (1642-1727) proposa en 1666 une version amendée de la théorie de Galilée en cherchant à y inclure l'influence de la lune. Il proposa d'expliquer les oscillations de la marée non seulement par le mouvement de la terre autour du soleil, mais également par son mouvement autour du centre de gravité du système terre-lune.

### I.1.2 Newton, La théorie statique

En 1687, Isaac Newton (1642-1727) publia la théorie de la gravitation dans son "Philosophiæ naturalis principia mathematica", donnant ainsi la première explication réellement plausible de l'origine des marées.

Il montre que celle-ci réside dans l'attraction exercée sur les molécules des océans, d'une part par la lune en raison de sa proximité, d'autre part par le soleil en raison de sa masse, les planètes ayant une influence parfaitement négligeable. Un calcul simple de mécanique céleste montre que la force génératrice de la marée est la différence entre la force d'attraction gravitationnelle qui s'exerce sur un corps isolé situé à la surface de la terre et celle que subirait ce corps s'il était situé au centre de la terre.

Avec cette théorie, Newton pouvait expliquer les trois propriétés remarquables des marées: la période fondamentale de 12 heures lunaires, la relation entre l'amplitude et les phases de la lune et l'inégalité diurne. Il put également calculer les forces génératrices de la marée, exercées respectivement par le soleil et la lune. Pour le soleil, en utilisant la perturbation de l'orbite lunaire, il calcula que cette force était égale à  $1/12\ 900\ 000$  fois la force de gravité lorsque l'astre était au zénith ou au nadir, et à sa distance moyenne. Cette valeur est remarquablement proche de celle qui est admise actuellement. Mais en analysant les rapports entre les amplitudes en vive-eau et en morte-eau d'après les observations effectuées sur les côtes anglaises, il trouva que la force exercée par la lune était 4,5 fois celle exercée par le soleil, alors que la valeur réelle est 2,2. Ainsi, il surestima l'influence de la lune approximativement d'un facteur 2.

En fait la mécanique des fluides était trop peu avancée à l'époque de Newton pour qu'il pût donner une théorie plus approchée des marées. La théorie statique qu'il développa repose sur l'idée qu'à tout instant, la surface des mers prend la figure d'équilibre correspondant à la position de l'astre attirant. Elle aboutit à un échec car elle est inconciliable avec l'inertie des masses d'eau et la rapidité du mouvement des astres. Elle est inapte à expliquer en particulier le retard, appelé âge de la marée, des vives eaux sur le moment de la syzygie (pleine-lune ou nouvelle-lune) ou l'importance des amplitudes observées le long des côtes. Bernoulli (1700-1782) publia en 1740 une étude basée sur la théorie de Newton, mais sans résultat réellement intéressant, si ce n'est qu'en analysant les observations de marées faites à Brest entre 1714 et 1717, il trouva un rapport de 2,5, proche de la valeur théorique entre les marées lunaire et solaire.

Les découvertes fondamentales de Newton, bien que d'une certaine manière, décevantes pour expliquer le phénomène des marées, avaient néanmoins posé les bases fondamentales pour les traitements mathématiques ultérieurs.

### I.1.3 Laplace, théorie dynamique

Il fallut attendre près d'un siècle pour qu'un progrès fût réalisé dans l'explication du phénomène. Dans une théorie présentée à l'Académie Royale des sciences en 1775, Laplace (1749-1827) introduisit le potentiel générateur de la marée. Plus tard, il développa considérablement cette théorie et l'introduisit en 1799 dans son traité de mécanique céleste. Il fut le premier à traiter la marée comme un problème de mouvement de masses d'eau et non comme un problème statique.

Selon le point de vue de Laplace qui n'a jamais été remis en cause, la réponse de la mer à la force génératrice de la marée prend la forme d'ondes générées de manière diffuse à travers les océans. Ces ondes se propagent avec des vitesses qui dépendent de la profondeur, et comme toutes les ondes, en fonction du milieu de propagation, elles sont réfléchies, réfractées et dissipées. Il s'ensuit que la marée observée en un point est le résultat de la superposition de toutes ces ondes élémentaires arrivant de tous les points des océans et qui, chacune sur son trajet, a rencontré des conditions de propagation différentes. Ces ondes peuvent évidemment interférer entre elles, renforçant ou au contraire atténuant certaines fréquences.

Les équations hydrodynamiques formulées par Laplace ne pouvaient pas être résolues avec les moyens de calcul de l'époque, mais elles sont à la base de tous les développements ultérieurs et surtout, elles permirent d'établir une formule dite formule de Laplace applicables aux prédictions, en s'appuyant sur deux principes essentiels:

- celui des oscillations forcées suivant lequel les masses d'eau soumises à une force périodique exécutent des oscillations de même période
- celui de la superposition des petits mouvements suivant lequel le mouvement total d'un système soumis à de petites forces est égal à la somme des mouvements élémentaires.

Ces principes posent en fait l'hypothèse de la linéarité de la réponse des océans à la sollicitation de la force génératrice des marées. Il se trouve que cette hypothèse est assez bien vérifiée pour Brest dont les observations de marée furent utilisées par Laplace pour tester sa théorie. La formule de Laplace admet donc que, puisque la force génératrice de la marée peut être décomposée en forces périodiques élémentaires, la marée peut elle même être décomposée en oscillations de mêmes périodes. L'hypothèse de linéarité n'est pas incompatible avec le fait que les facteurs de proportionnalité et les déphasages entre la marée et la force génératrice peuvent dépendre de la fréquence. Ils dépendent également des conditions hydrauliques de propagation de l'onde marée, différente d'un point à l'autre et doivent en pratique être déterminées expérimentalement en analysant les observations de marée disponibles.

Un aspect fondamental de la formule de Laplace est la mise en évidence pour la marée générée par la lune comme pour celle qui est générée par le soleil, de trois termes distincts correspondant respectivement à une oscillation à longue période, une oscillation diurne et une oscillation semi-diurne.

Cette séparation est restée le fondement de la théorie des marées, mais l'intérêt principal de la formule de Laplace réside probablement dans son aptitude à fournir une méthode pratique de prédiction. C'est l'Ingénieur Hydrographe Chazallon qui, en 1839 publia le premier annuaire des marées calculé de manière scientifique. Les heures et hauteurs des pleines et basses mers à Brest étaient calculées à l'aide de la formule de Laplace, tandis que pour les autres ports, elles étaient obtenues à l'aide de "concordances" avec la marée de Brest. Malgré quelques réticences initiales dues au poids des habitudes, l'annuaire des marées s'imposa rapidement auprès des navigateurs en remplacement des tables, établies empiriquement, qui étaient alors publiées ici ou là mais dont la précision laissait probablement beaucoup à désirer.

La formule de Laplace est restée à la base du calcul de l'Annuaire des côtes de France pendant plus de 150 ans. Avant l'avènement des ordinateurs, aucune méthode concurrente n'a

pu, en effet se prévaloir de fournir une meilleure précision pour le calcul de la marée de Brest. Pourtant, en raison de l'hypothèse de linéarité qui en est la base, cette formule ne pouvait prétendre être applicable universellement. En fait, elle n'a jamais été utilisée que pour le calcul de la marée de Brest et, bien que dans ce cas l'hypothèse de linéarité soit assez bien vérifiée, il a fallu lui apporter quelques retouches pour corriger certains écarts systématiques.

Par la suite, il faut noter les travaux des anglais Whewell et Airy qui s'intéressèrent particulièrement à la propagation de l'onde marée, le premier dans les océans, le second dans les canaux et les rivières, en tenant compte des frottements.

Mais il faudra attendre la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et les travaux de Sir William Thomson (Lord Kelvin) pour qu'un progrès décisif soit apporté au calcul des prédictions de marée.

#### I.1.4 La méthode harmonique

Déjà Thomas Young avait suggéré l'importance de l'observation et de l'analyse de la totalité de la courbe de marée et non seulement les pleines et basses mers comme le faisait Laplace. Airy apporta aussi sa contribution en établissant les bases de l'analyse harmonique. Mais il revient à Kelvin le mérite d'avoir développé une méthode pratique d'analyse des observations de marée. En 1867, la "British Association for the Development of Science" mit en place un comité destiné à promouvoir l'amélioration et la généralisation de l'analyse harmonique des marées. Le Rapport de ce comité fut rédigé par Kelvin et publié l'année suivante. Quelques rapports complémentaires parurent sur ce sujet, mais la contribution la plus importante a été apportée par le rapport publié en 1883 par G. H. Darwin où apparaissait un développement du potentiel générateur de la marée, qui a été universellement utilisé et qui a été longtemps à la base de tous les travaux sur les marées.

Encore aujourd'hui, les composantes harmoniques sont désignées sous les noms attribués par Darwin et les méthodes de calcul qu'il a mises au point, adaptées aux moyens de l'époque, ont souvent été transposées telles qu'elles sur les ordinateurs. Pourtant son développement, qui repose sur une ancienne théorie lunaire dans laquelle tous les éléments sont rapportés à l'orbite, n'est pas entièrement satisfaisant car il n'est pas purement harmonique. En effet, des facteurs correctifs doivent être introduits pour tenir compte de variations des termes du développement. Cependant, les variations étant suffisamment lentes ces facteurs correctifs, d'une part, peuvent être considérés comme constants sur des périodes d'environ une année, d'autre part, ont été calculés pour de nombreuses années et sont disponibles sous forme de tables. Le fait d'avoir recours à des tables n'est pas satisfaisant lorsque les calculs se font sur ordinateur, mais n'est pas une gêne pour le calcul manuel.

C'est probablement la raison pour laquelle la méthode de Darwin a continué à être utilisée si longtemps, alors que dès 1921, un développement purement harmonique, donc plus satisfaisant, était disponible. C'est encore à un Anglais, A. T. Doodson que l'on doit ce progrès. Il publia dans le "Proceedings" de la "Royal Society" (A, vol 100, p 305), un développement plus précis pour la longitude et la latitude de la lune, tels qu'ils sont donnés par Brown dans une nouvelle théorie lunaire. Ils sont rapportés à l'écliptique et le nouveau développement est purement numérique et harmonique. Il donne un bien plus grand nombre de termes que ceux donnés par Darwin. Ne nécessitant pas de facteurs correctifs, le recours à des tables n'est plus nécessaire, ce qui facilite leur traitement automatique. D'autres développements, plus complets ou plus précis ont été proposés depuis, mais pour les applications pratiques en calculs de marée, ils n'apportent pas de progrès significatif et le développement de Doodson reste la référence.

### I.1.5 les modèles

La méthode harmonique, grâce aux travaux de Darwin et de Doodson a pu être développée et exploitée jusqu'à ses derniers retranchements pour fournir une méthode pratique, précise et potentiellement de portée universelle de prédiction de marée. Elle n'est cependant pas fondamentalement différente de la Méthode de Laplace en ce sens qu'elle s'appuie sur une formulation théorique dont un certain nombre de paramètres sont à déterminer expérimentalement en analysant les observations disponibles. Pour obtenir une bonne précision, celles-ci doivent être de durée suffisante. Typiquement, lorsque l'amplitude de la marée est du même ordre de grandeur que celle que l'on observe sur les côtes françaises de la Manche ou de l'Atlantique, une année de mesures de bonne qualité sont nécessaires pour obtenir la précision requise pour les besoins de la navigation. Les résultats ne sont alors utilisables que pour le site où les observations ont été réalisées.

Une approche plus ambitieuse consistant à résoudre directement le problème physique de la génération et de la propagation de l'onde marée dans son milieu a été envisagée depuis longtemps. Les pionniers en sont Bernouilli, Whewell, Poincaré, Harris. Mais compte tenu de la complexité de la bathymétrie et du trait de côte des bassins océaniques, il n'était pas envisageable d'obtenir une solution exacte de ce problème sans de puissants moyens de calcul. Des solutions analytiques ont néanmoins permis d'expliquer qualitativement les grands traits de la propagation de la marée dans des bassins océaniques tels que l'Atlantique. En particulier, l'existence de point amphidromiques, où l'amplitude de la marée est nulle et autour desquels tournent les ondes de marée a pu être établie analytiquement.

Mais c'est l'avènement des ordinateurs et l'introduction des méthodes numériques qui a véritablement permis de progresser dans cette direction. En particulier, les travaux de l'Allemand Hansen (1949), ont été à l'origine de nouvelles tentatives de résolution des équations de Laplace pour les océans réels. Le désaccord entre les différents modèles, comme ceux de Bogdanov et Magarik (1967), Pekeris et Accard (1969), Hendershott (1972), Zahel (1977) et Schwiderski (1981) montrent la nécessité d'améliorer non seulement la connaissance du milieu et en particulier la bathymétrie, mais également d'affiner la mise en équation. En effet, des problèmes physiques majeurs, associés à la dissipation de l'énergie des marées restent posés.

L'altimétrie et la trajectographie satellitaires ont suscité des besoins nouveaux de connaissance précise de la marée au large et provoqué un regain d'intérêt pour la modélisation de la marée océanique. Par ailleurs, l'altimétrie satellitaire a fourni de nouvelles méthodes de mesures et il semble que l'on s'oriente vers des techniques de calcul permettant d'assimiler cette source de données susceptible de devenir très abondante.

## I.2 LES DIVERS ASPECTS DE LA MAREE

### I.2.1 La courbe de marée, définitions

La courbe représentant les variations de la hauteur de la marée en fonction du temps s'appelle courbe de marée (Figure I-1).

Chaque minimum de la courbe s'appelle basse mer et chaque maximum pleine mer. De la basse mer à la pleine mer, le niveau s'élève pendant la phase appelée flux ou montant et il s'abaisse de la pleine mer à la basse mer pendant le reflux ou perdant.

La différence de hauteurs entre une pleine mer et une basse mer consécutives s'appelle le marnage.

Les hauteurs sont rapportées à un niveau de référence qui est généralement le zéro hydrographique, encore appelé zéro des cartes.

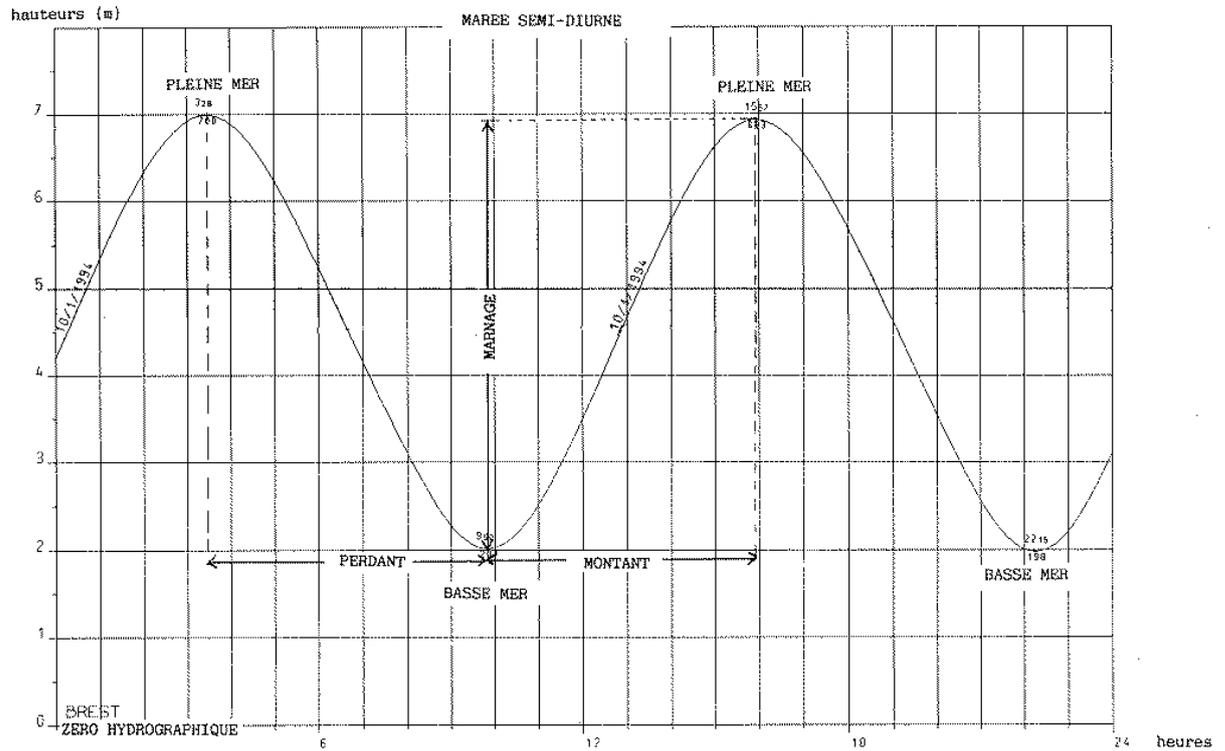
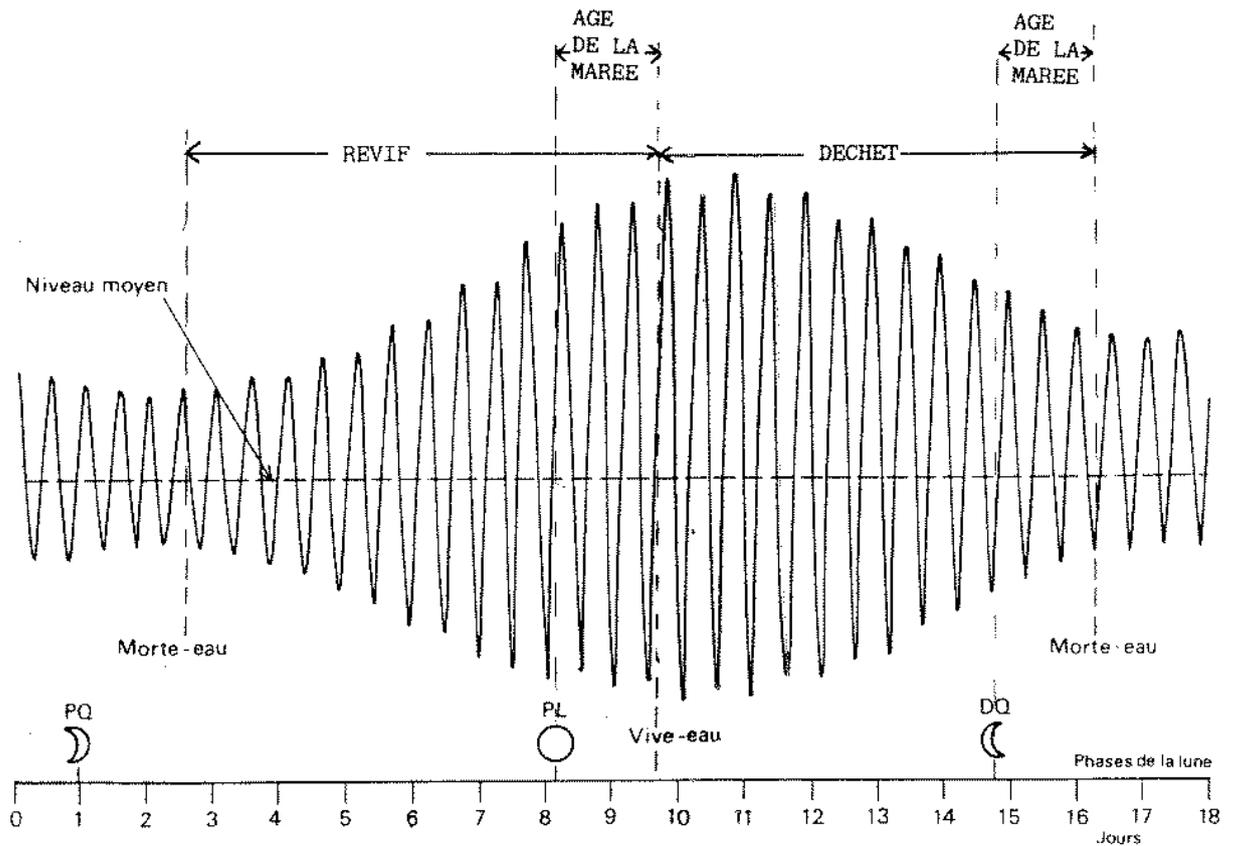


Figure I-1 courbe de marée

La figure I-2 représente un exemple de courbe de marée sur une quinzaine de jours. On remarque les variations du marnage, passant d'un minimum, appelé morte-eau, à un maximum appelé vive-eau. Le revif correspond à la phase d'augmentation du marnage et le déchet à la phase de diminution.

L'intervalle de temps qui sépare une pleine-lune ou une nouvelle lune de la vive-eau qui la suit immédiatement s'appelle âge de la marée.



Variations d'une marée de type semi-diurne en fonction des phases de la lune.

Figure I-2 courbe de marée de type semi-diurne

### I.2.2 Les types de marée

La figure I-2 montre une courbe de marée dans laquelle on observe chaque jour deux pleines mers et deux basses mers ayant sensiblement même hauteur. C'est le type de marée qui domine sur les côtes de l'Océan Atlantique, et en particulier en Europe, mais comme le montre la figure I-3, d'autres types de marée sont susceptibles d'être rencontrés.

Bien que d'une manière parfois arbitraire, il est d'usage de définir quatre types de marée. Outre la marée semi-diurne qui a été définie plus haut, on distingue:

a) la marée semi-diurne à inégalité diurne (exemple Cap St-Jacques)

On observe chaque jour deux pleines mers et deux basses mers, mais il existe des différences qui peuvent être très importantes entre les hauteurs des pleines mers et des basses mers d'une même journée et entre les durées du montant et du perdant. La différence de hauteurs, appelée inégalité diurne est maximale lorsque la déclinaison des astres est voisine de leur maximum.

L'inégalité diurne est observée sur les côtes d'Europe (30 cm environ à Brest), mais elle est faible. En revanche elle est très forte dans l'Océan Indien et en de nombreux ports du Pacifique.

b) la marée mixte (exemple Qui-Nhon)

Dans les ports à marée mixte, on observe successivement au cours d'une lunaison, une période où la marée est semi-diurne et une période où la marée est diurne.

Ce type de marée est fréquent en Indonésie, en Indochine, sur les côtes de Sibérie et d'Alaska.

On le rencontre également aux Antilles (Fort-de-France).

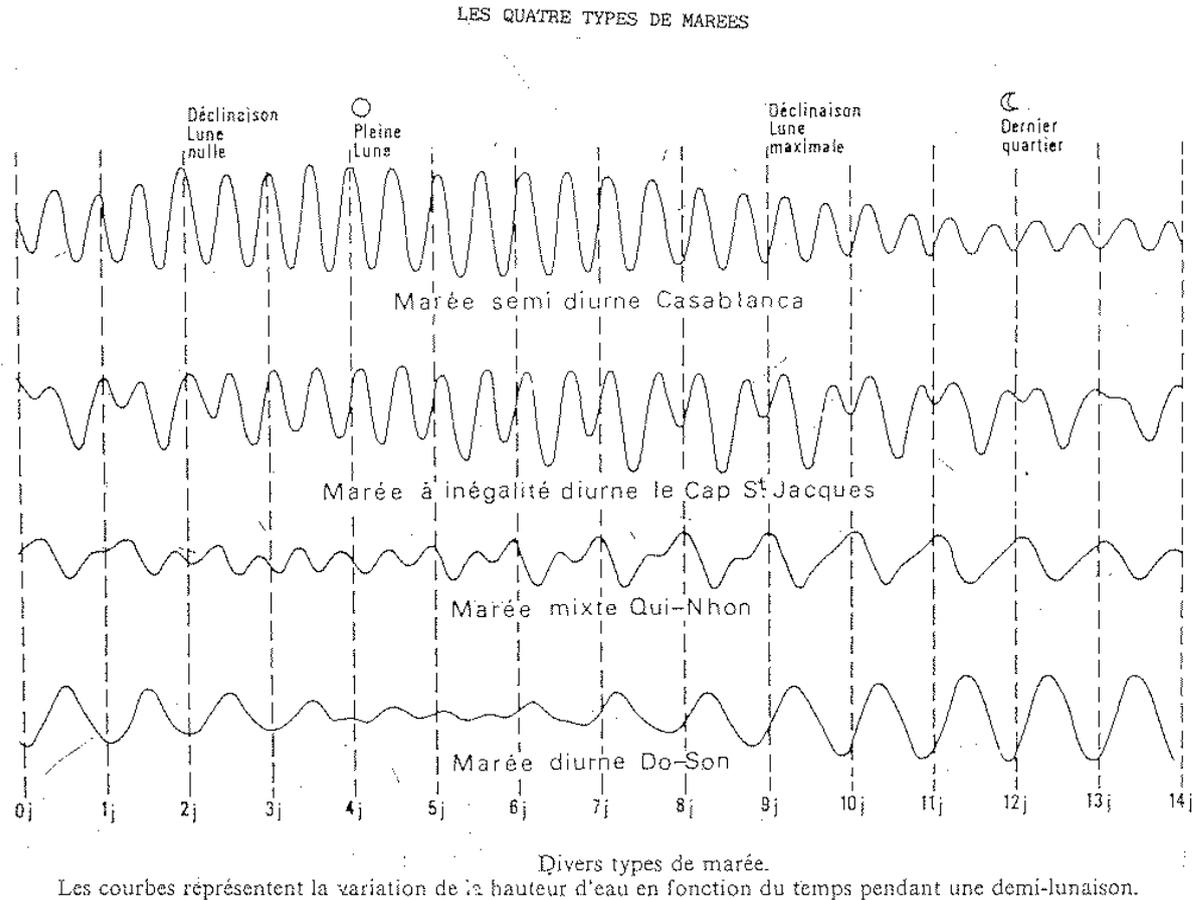


Figure I-3 les différents types de marée

c) la marée diurne (exemple Do-Son)

Dans les ports à marée diurne, on n'observe qu'une seule pleine mer et une seule basse mer par jour lunaire. Le marnage varie avec la déclinaison des astres.

Ce type de marée est assez rare. On l'observe surtout dans l'Océan Pacifique, sur les côtes de Sibérie où son marnage est très important, en Alaska et aussi en Asie du sud-est.

La figure 4 montre très schématiquement la répartition des différents types de marée sur le globe.

### 1.2.3 Les marnages

Sur la figure I-4 les chiffres indiquent les amplitudes de marée en vive-eau. On voit que les marnages observés à la surface du globe sont très variables. Dans les mers fermées, les marées

sont très faibles. Elles sont insensibles en Mer Noire. En Méditerranée, sur la côte sud de France, le marnage est d'environ 10 à 20 cm, du même ordre de grandeur que les effets météorologiques dont il est difficile de distinguer la marée. Il est un peu plus important en Adriatique (0,5 m à Venise) et dans le Golfe de Gabès (1,8 m). Dans les grands fonds océaniques, le marnage est généralement faible, mais la faible marée du large s'amplifie souvent près des côtes et peut atteindre des valeurs considérables si les conditions de propagation sur le

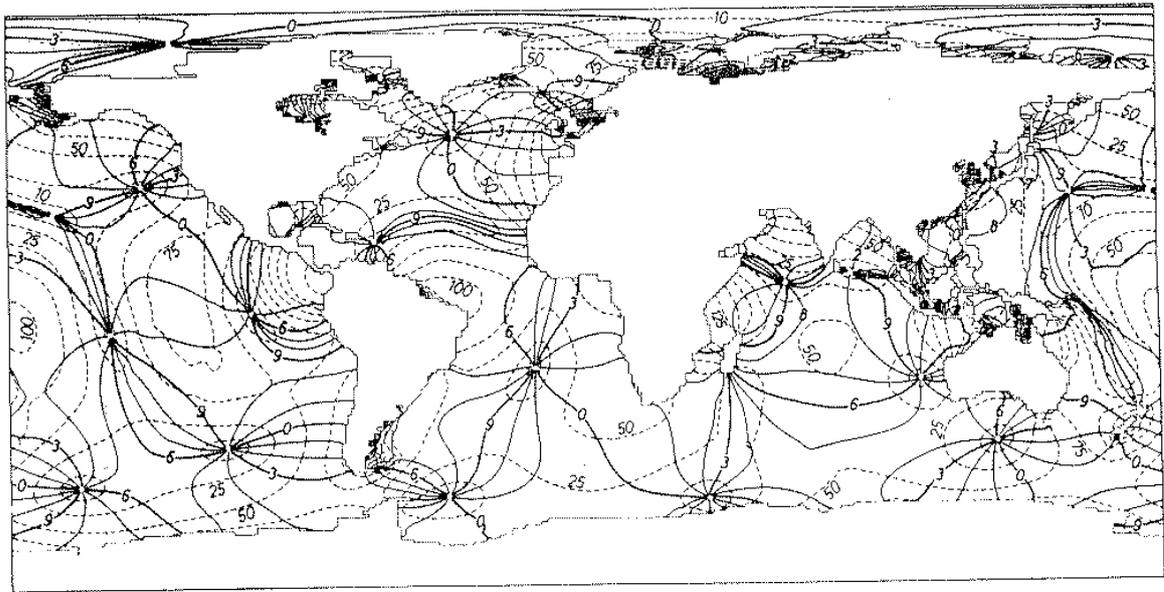


Figure 10 — Carte cotidiale de  $M_2$  (ZAHÉL, 1977)  
 — lignes cotidales en heures de temps moyen lunaire de Greenwich  
 - - - lignes d'isomarnage (amplitude en cm)

Figure I-4 les marées du globe

plateau continental s'y prêtent. Par exemple, le marnage en vive-eau moyenne passe de 4 m environ au fond du Golfe de Gascogne, à 6 m à Brest et à plus de 12 m dans la Baie du Mont Saint-Michel. Le marnage le plus important du monde est observé au Canada, sur la côte Atlantique, en baie de Fundy où il atteint 13 m en vive-eau moyenne. Les marnages des marées diurnes sont généralement plus faibles que ceux des marées semi-diurnes, mais ils peuvent néanmoins atteindre des valeurs considérables comme à Sunrise en Alaska (10 m) ou dans le golfe de Penzhin en mer d'Okhotsk où il est le plus important du monde (11 m).

#### I.2.4 marée en eaux peu profondes

La figure I-5 montre des courbes de marée observée sur les côtes de la Manche et de la Mer du Nord en des points qui n'ont été atteints par l'onde marée qu'après une longue progression sur le plateau continental dans des zones de faible profondeur. D'allure sinusoïdale à l'origine, elle s'est peu à peu déformée, les composantes périodiques issues de la force génératrice s'étant combinées entre elles et ayant généré des harmoniques qui ont pu se propager indépendamment. La figure 6 montre la déformation type subie par l'onde marée lors de sa progression dans un estuaire (ici la Gironde). D'après les lois de l'hydrodynamique, la célérité

C d'une onde est donnée par la formule  $C = \sqrt{gH}$  où H est la profondeur. Lorsque celle-ci est grande, la dénivellation entre la pleine mer et la basse mer ne modifie pas de façon appréciable la vitesse de propagation. Au contraire, par faible profondeur, la dénivellation n'est plus négligeable par rapport à la profondeur. Le sommet de l'onde avance plus vite que le creux. En d'autres termes, la crête de l'onde a tendance à rattraper le creux qui la précède. La montée est plus rapide que la baissée. Déjà à Brest, cet écart est de 16 minutes. Mais comme le montre l'exemple de la Gironde, le phénomène est particulièrement net dans les estuaires. Dans les cas extrêmes, on obtient un mascaret.

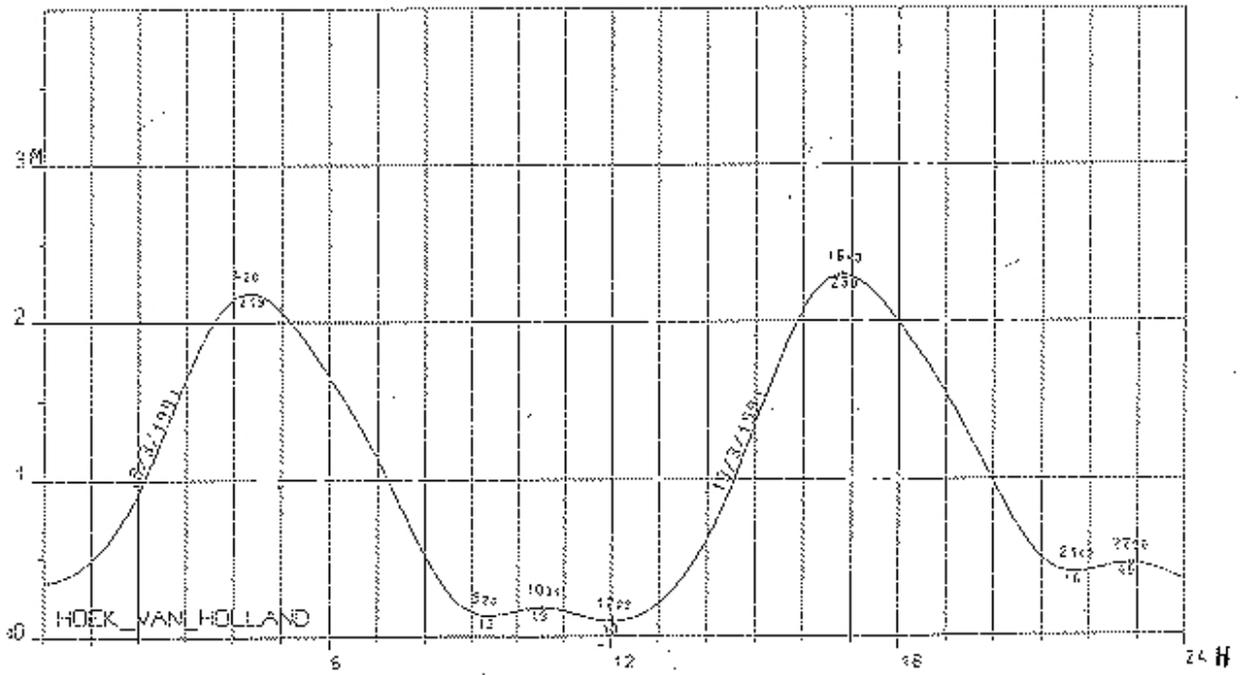
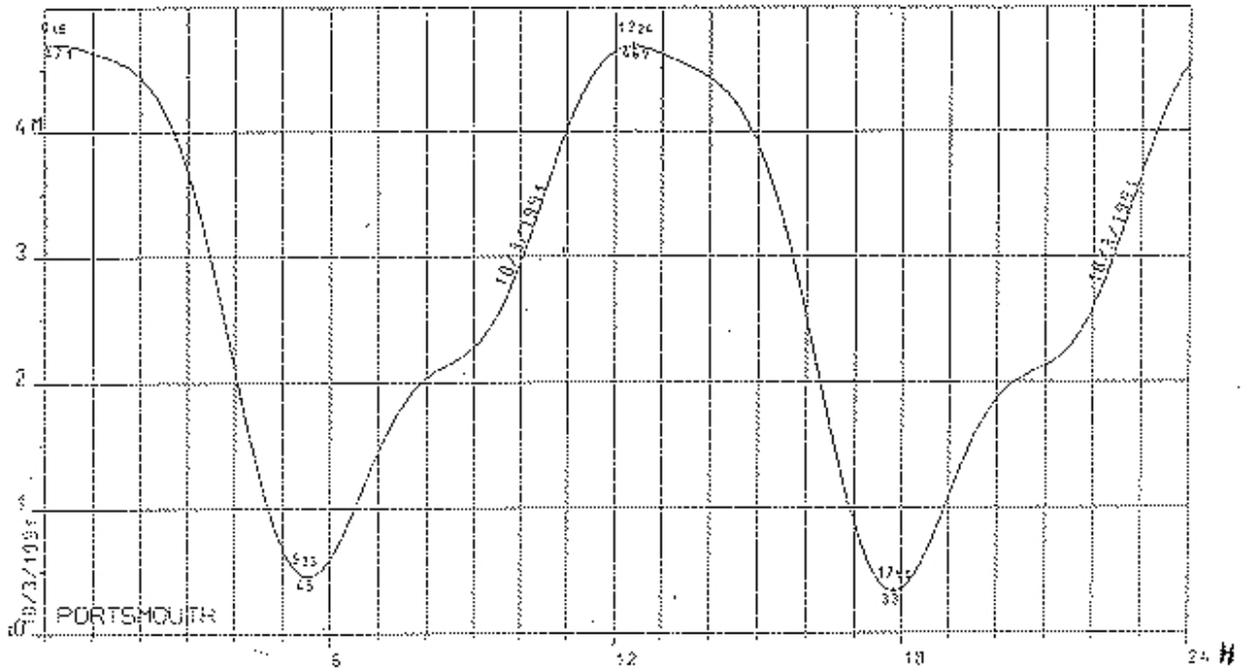


Figure I-5 courbes de marée de petits fonds

MAREE DANS LES ESTUAIRES

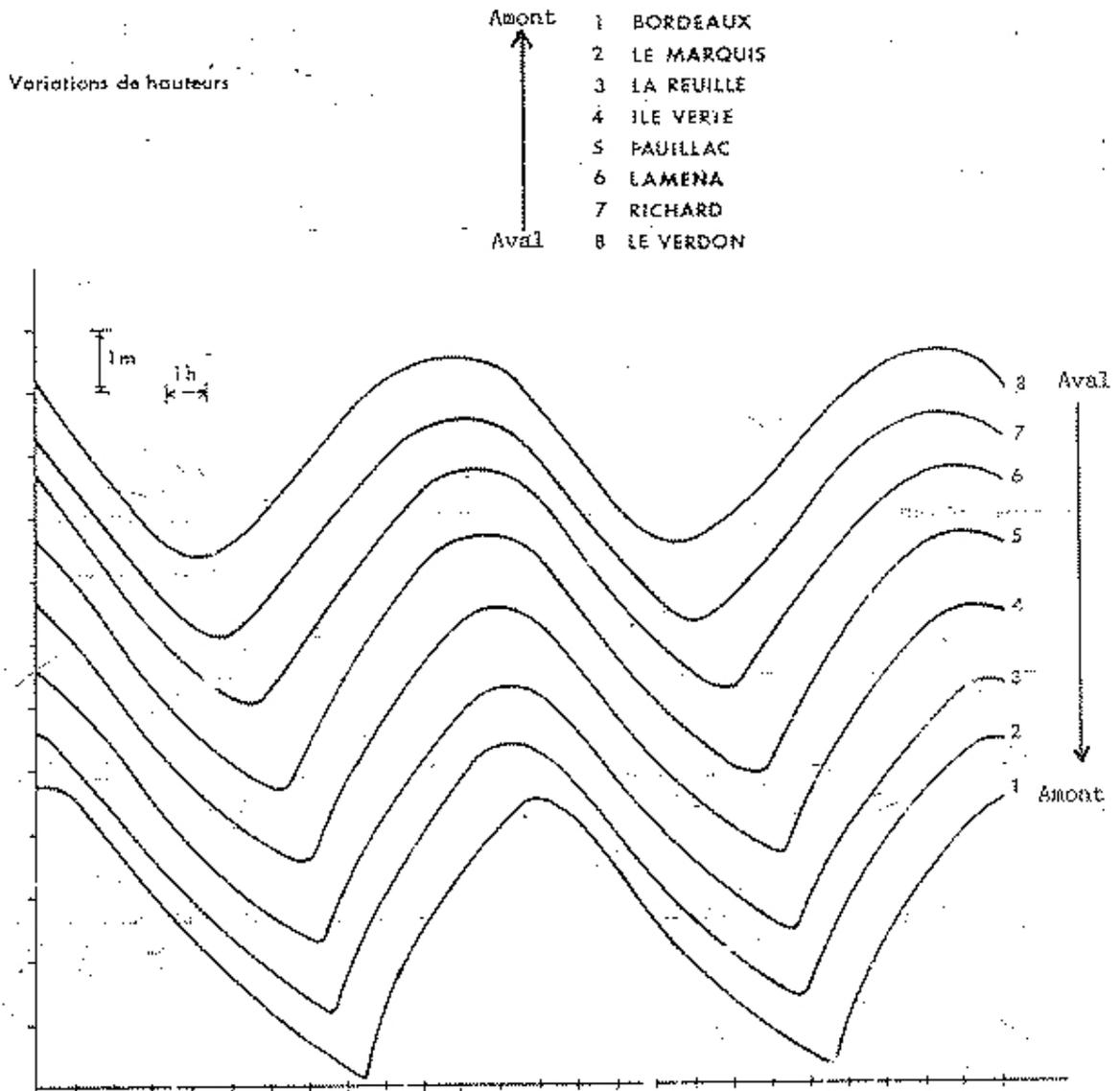


Figure I-6 courbes de marée en Gironde

### I.2.5 caractéristiques spectrales de la marée

La représentation spectrale de la marée, bien qu'elle résulte d'un calcul, n'est en fait qu'un mode de représentation du phénomène qui n'est en rien opposable à telle ou telle théorie. Compte tenu de la nature du signal étudié, c'est un mode de représentation particulièrement

bien adapté auquel il sera fait sans cesse référence et avec lequel il importe de se familiariser. Nous ne nous attacherons pas à une définition exacte du spectre. Il importe seulement de savoir qu'il représente l'amplitude, ou l'énergie en fonction de la fréquence.

La figure I-7 montre un spectre à faible résolution (séparation imparfaite des fréquences voisines) d'une marée semi-diurne.

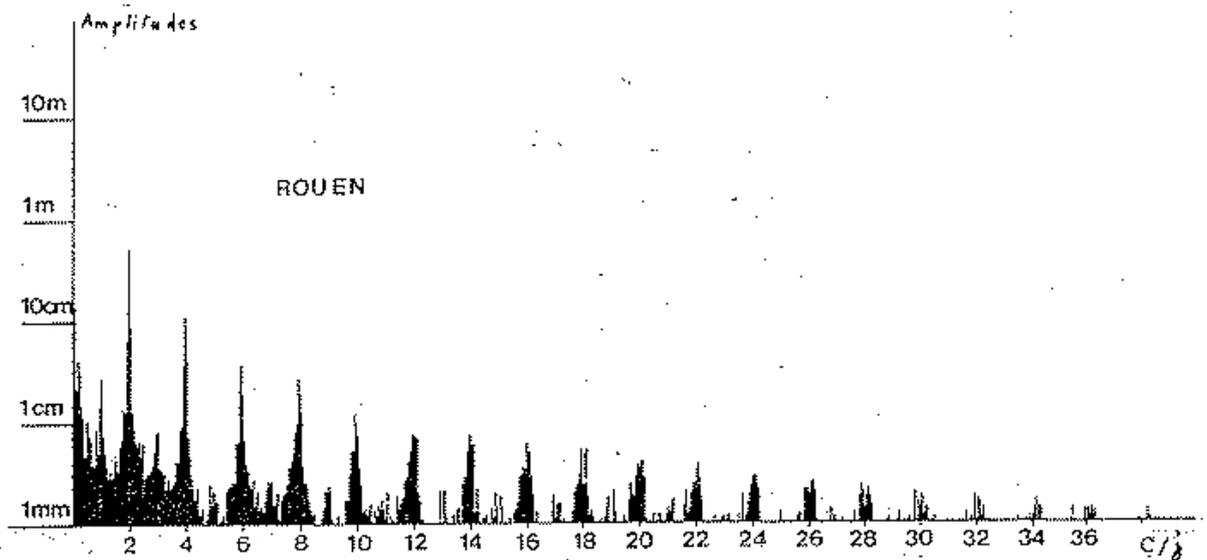
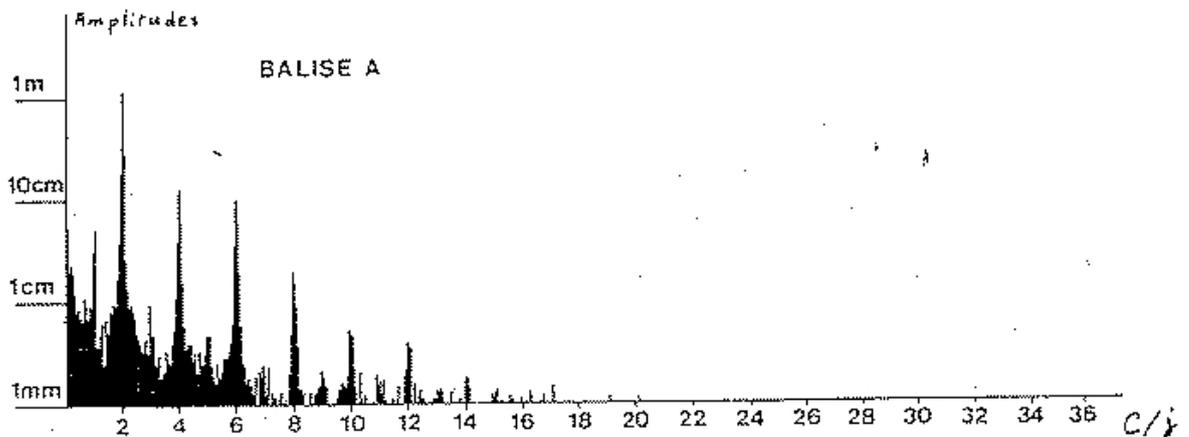


Figure I-7 spectre de marée à faible résolution

On remarque que les raies sont réparties en groupes bien distincts séparés par des intervalles assez larges.

Le groupe le plus important est le groupe semi-diurne. Il paraît plus large que les autres, mais il s'agit en réalité d'un artefact dû au fait que la série analysée est nécessairement de durée finie.

On remarque que l'on trouve de l'énergie jusque dans les fréquences très élevées (voisines de douze cycles par jour). En fait, il s'agit d'un spectre de marée observée dans la Seine (au voisinage de l'embouchure), où des composantes de petits fonds ont été générées. Seuls les groupes diurne, semi-diurne et tiers-diurne représentent (en majeure partie) la marée astronomique directement générée par la lune et le soleil. Les autres groupes apparaissent lors de la propagation de la marée par petits fonds.

On remarque que l'énergie est appréciable vers les basses fréquences. Il provient des variations de niveau d'origine atmosphérique, constituant l'essentiel des surcotes-décotes.

La figure I-8 représente le spectre à haute résolution de la marée à Brest, issu de l'analyse de plus de 120 années d'observations quasi continues. On remarque que le spectre de la marée est réellement un spectre de raies, ce qui justifie sa représentation en série harmonique.

On constate en outre qu'il existe un grand nombre de composantes bien identifiées. La figure I-9 qui montre un agrandissement de la partie du spectre voisine de M2 (onde lunaire principale) en donne une illustration frappante. Il est vrai que beaucoup de ces composantes sont de faible amplitude. On imagine sans peine qu'il serait possible d'en négliger quelques unes, mais il faut se garder de croire que toutes les petites composantes peuvent être ignorées sous prétexte qu'elles ont toutes les chances de se compenser lorsqu'on les combine pour reconstituer la marée. En fait, le système des trois corps, constitué par le soleil, la terre et la lune ne possède que six degrés de libertés. Il en résulte que toutes ces composantes, qui sont en fait générées par ce système, ne sont pas indépendantes. Chacune d'entre elles prise individuellement pourrait être négligée, mais par leur nombre, elles acquièrent une importance certaine.

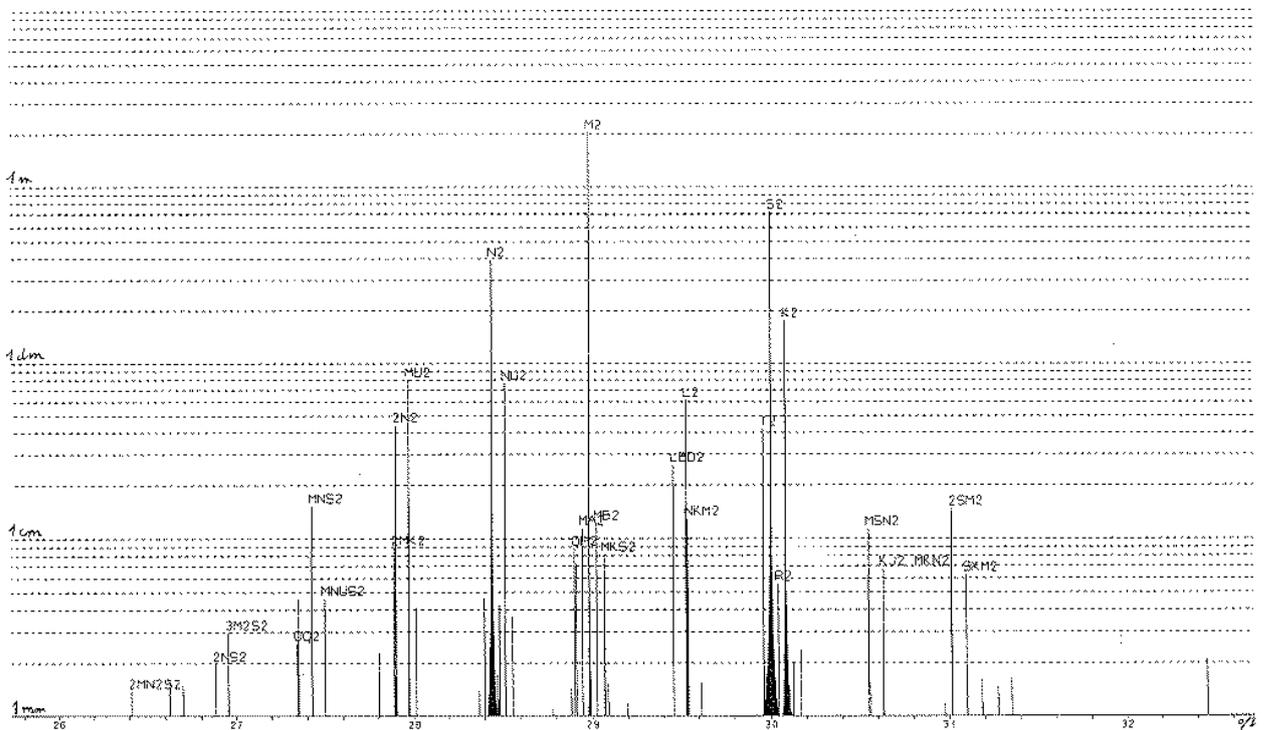


Figure I-8 spectre semi-diurne à Brest

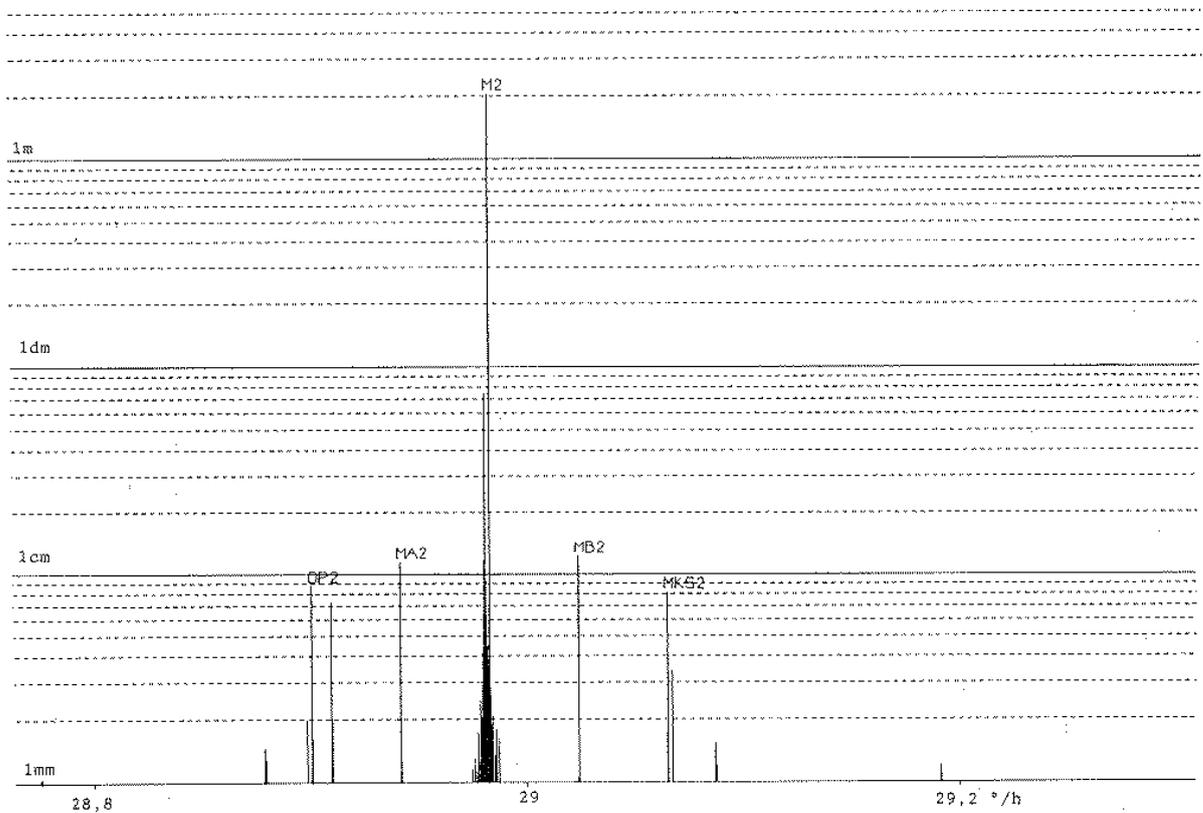


Figure I-9 spectre au voisinage de  $M_2$

La figure I-10 montre de manière frappante l'augmentation du nombre d'harmoniques lorsque l'onde marée progresse de l'embouchure d'un fleuve (Balise A à l'embouchure de la Seine) jusqu'à Rouen, situé à une centaine de kilomètres en amont.

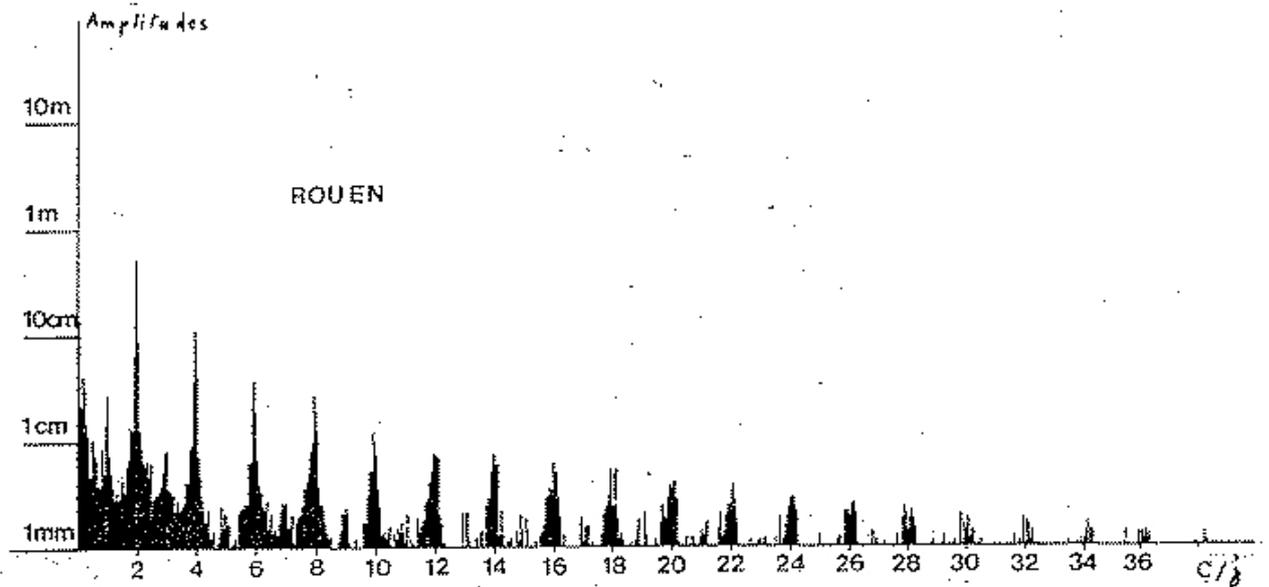
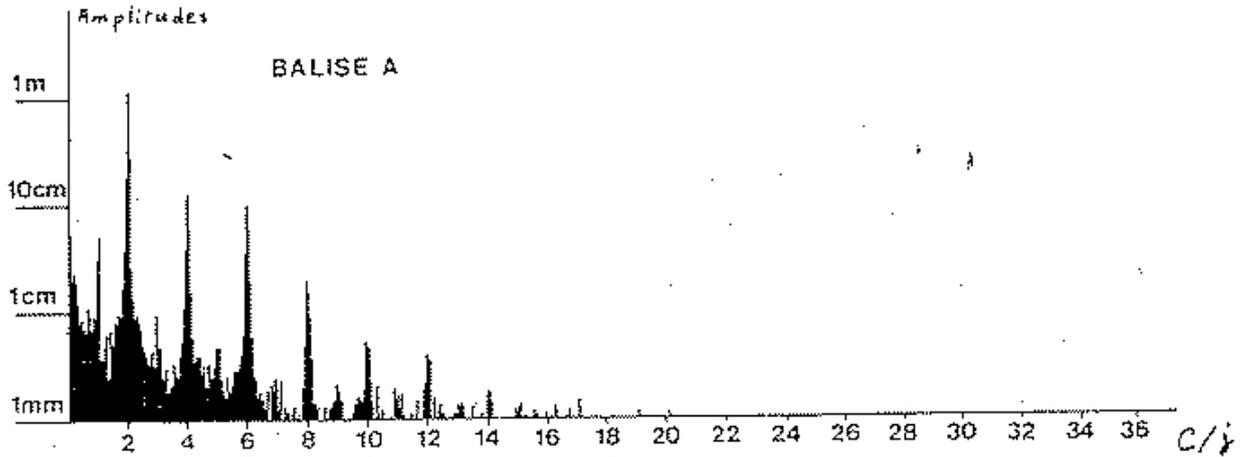


Figure I-10 spectre de marée en estuaire

### I.2.6 courants de marée

La marée est un mouvement oscillatoire que l'on pourrait comparer à la houle dans les couches superficielles; dans les deux cas, les molécules d'eau décrivent des trajectoires fermées dans un plan vertical. Mais, à la différence de la houle, la longueur d'onde de la marée est toujours bien supérieure à la profondeur des océans. Il en résulte que le mouvement dû à ce phénomène intéresse toute la hauteur d'eau. Toutes les molécules d'une même verticale décrivent des orbites sensiblement égales et extrêmement aplaties. Le mouvement vertical constitue la marée proprement dite; les mouvements horizontaux, incomparablement plus importants forment les courants de marée.

L'étude des courants de marée peut être faite comme celle de la marée, mais elle présente plus de difficultés en raison d'une part de la rapidité avec laquelle leurs caractéristiques peuvent varier d'un point à l'autre, et d'autre part de leur moins grande régularité dans le temps. Néanmoins, en raison d'une moins grande exigence de précision, il sera possible, pour confectionner les atlas de courant pour la navigation, d'avoir recours à la modélisation numérique.

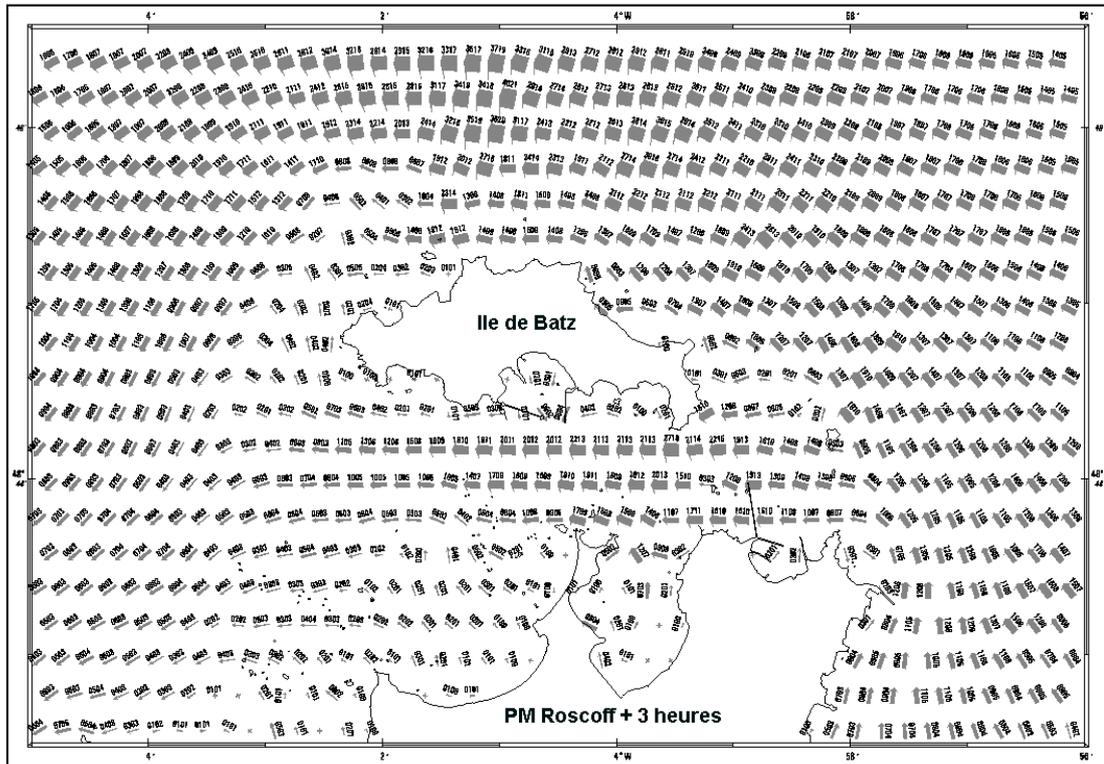


Figure I-11 Exemple de résultats de modélisation de courant