

SERVICES HYDROGRAPHIQUES CENTRE DE FORMATION EN RELEVÉS HYDROGRAPHIQUES



NIVEAUX D'EAU ET FLUX

COURANTS DE MARÉE

Traduit par le Dr G. Jan

1. INTRODUCTION

Il est indispensable de disposer d'informations fiables sur le mouvement horizontal des masses d'eau. Le document HQAIs-GSI F spécifie les exigences et les conditions dans lesquelles les observations doivent être faites. Le présent document décrit et explique l'origine de ce mouvement ainsi que les techniques et l'équipement utilisés pour le mesurer.

En raison des différents termes utilisés pour identifier le mouvement de l'eau, le Chapitre 3 fournit des définitions de ces termes et explique en quoi ils sont importants pour l'ingénieur hydrographe. Le Chapitre 4 décrit l'origine et la nature des mouvements de l'eau tels que les courants de marée et les courants océaniques généraux.

Les divers techniques et instruments utilisés par la Royal Navy ainsi que les autres instruments et méthodes de mesure du mouvement de l'eau sont décrits dans le Chapitre 5, notamment les méthodes les plus récentes faisant appel à la télédétection.

Le Chapitre 6 donne un aperçu de la manière dont les résultats de mesure sont interprétés puis utilisés dans les différents documents publiés par l'UKHO (Service hydrographique du Royaume-Uni) et autres organismes.

2. INFLUENCE DU MOUVEMENT DE L'EAU SUR LES OPÉRATIONS MARITIMES

Les opérations maritimes sont influencées par le mouvement de l'eau sur toute la colonne, de la surface aux fonds marins. Pendant de nombreuses années, seules les données relatives à la couche superficielle (10 m) étaient exigées afin d'aider la navigation des vaisseaux de surface, mais de nos jours, des données sont également nécessaires pour d'autres opérations maritimes. Les données les plus importantes sont décrites dans les paragraphes suivants.

2.1. NAVIGATION DES VAISSEAUX À FORT TIRANT D'EAU

Le mouvement de l'eau perpendiculairement à la route d'un navire influence le cap à suivre. Cela ne pose aucun problème en soi, mais lorsqu'un navire est à l'étroit dans un coureau, le courant transversal réduit la largeur effective du chenal. Dans les zones relativement peu profondes, où l'eau a une profondeur de 20 à 40 mètres, aux endroits où le mouvement de l'eau est maximal, plus la profondeur augmente, plus le frottement avec le fond marin entraîne des variations de la vitesse et de la direction. La déviation de la trajectoire est influencée par le mouvement de l'eau dans toutes les couches.

2.2. NAVIGATION SOUS-MARINE

La couche superficielle a (très) peu d'importance, mais comme les vaisseaux à fort tirant d'eau, ces vaisseaux sont affectés par le mouvement des couches d'eau plus profondes. Au cours des exercices navals, les vaisseaux de surface et de sub-surface sont soumis à différents mouvements qui, pour un même cap à suivre, produisent des routes différentes relativement au fond.

2.3. EFFETS SUR LE TRANSPORT DE SÉDIMENT SUR LES FONDS MARINS

Les courants de marée transportent des sédiments sur les fonds marins. Dans la mer du Nord méridionale, d'immenses rides de sable se déplacent sous l'influence du mouvement de l'eau et peuvent présenter un danger pour la navigation. Lorsque des structures artificielles modifient la direction et la force des courants de marée, ceux-ci peuvent déplacer d'importantes quantités de sédiment auparavant inaffecté, comme à Weston Mill Lake Jetty, Plymouth Royaume-Uni.

2.4. EFFETS SUR LES STRUCTURES FIXES

Les plateformes, les jetées, les balises etc. sont affectées par les mouvements de l'eau. La résistance des structures est affectée soit directement par érosion, soit parce que les sédiments sur lesquels elles reposent sont emportés par la mer.

2.5. EFFETS SUR LES MINES DE FOND

L'effet sur les mines de fond est double :

- a. Le courant de marée crée un affouillement sous la mine, dans lequel la mine finit par s'effondrer.
- b. Les sédiments déplacés par le courant de marée recouvrent la mine. Les fonds marins sableux favorisent ce phénomène (mer du Nord méridionale).

2.6. RECHERCHES SUR LES COURANTS OCÉANIQUES ET AUTRES PHÉNOMÈNES

Ces recherches portent notamment sur les ondes internes. Pour expliquer le mouvement du courant océanique, il est impératif d'étudier le mouvement de l'ensemble des couches d'eau.

La colonne d'eau est stratifiée en différentes couches qui se déplacent toutes dans différentes directions. Des effets tels qu'El Niño ne peuvent s'expliquer que par le mouvement de l'eau chaude de l'Asie vers l'Amérique, d'où la présence de nombreuses stations d'observation dans le Pacifique.

3. DÉFINITIONS

3.1. COURANT DE MARÉE

Le mouvement des particules d'eau est **uniquement dû aux forces de marée**. La vitesse et la direction de chaque particule varient avec le temps, et chaque particule revient à son point de départ (approximativement, puisque les forces de marée présentent également des changements sur de longues périodes) après un cycle de courant (12 heures pour les courants semi-diurnes, 25 heures pour les courants diurnes).

Ce mouvement est modifié par les changements météorologiques et par les effets de tout courant général présent. La direction et la vitesse du courant à chaque instant peuvent varier en fonction de la profondeur sous la surface, d'où l'importance de connaître la profondeur à laquelle les observations sont faites.

(Lorsque l'on utilise un pole logship, on obtient le mouvement moyen sur la partie de la colonne égale à la profondeur du logship).

Sauf indication contraire, les prédictions font toujours référence au courant de marée pur.

3.2. FLUX DE MARÉE

Mouvement réel, tenant compte des effets météorologiques, des courants généraux et des erreurs aléatoires de mesure. Par convention, le flux et le courant sont exprimés comme étant la vitesse dans une certaine direction, par exemple 1,4 nœud, (vers) 137°.

3.3. MOUVEMENT RÉSIDUEL

Composante du flux de marée comprenant le véritable courant et les effets météorologiques de courte durée.

3.4. COURANT GÉNÉRAL

Les courants généraux sont principalement d'origine météorologique et sont souvent également affectés par les changements de masse volumique. Leur vitesse et leur direction sont quasiment constantes d'un jour à l'autre, mais elles peuvent changer d'un mois à l'autre selon un cycle annuel. Sur le terrain, il est impossible d'obtenir le véritable courant général en moins de 29 jours d'observations continues du courant de marée.

L'ingénieur hydrographe effectuant les observations des courants de marée souhaite mesurer le courant de marée sans que les mesures soient « contaminées » par les effets météorologiques ou des courants généraux. Cela serait réalisable dans des conditions idéales. Dans les faits, toutes les mesures sont affectées par des facteurs indépendants de la marée. Lorsque l'on valide les mesures d'un courant de marée, on fait l'hypothèse que les autres effets sont négligeables.

4. ORIGINE ET NATURE DES COURANTS DE MARÉE ET DES COURANTS OCÉANIQUES

4.1. ORIGINE DES COURANTS DE MARÉE : ONDES PROGRESSIVES ET STATIONNAIRES

La marée astronomique issue de la théorie de la gravitation de Newton est constituée de deux bourrelets de marée symétriques, situés sous la Lune et le Soleil et aux antipodes.

Figure 1 : mouvement de l'eau résultant des forces de marée

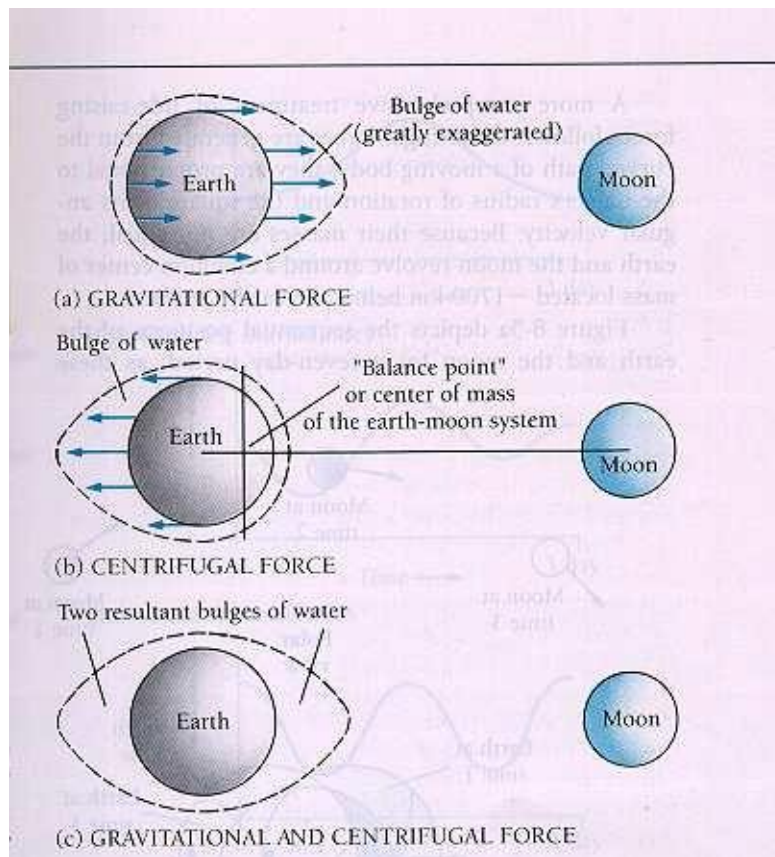
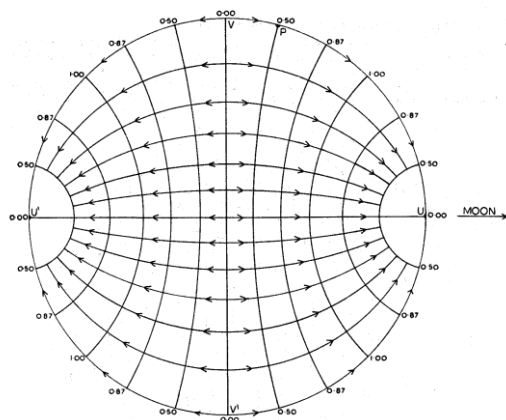


Figure 2 : forces tractives

Les forces attractives exercées par le Soleil et la Lune provoquent un mouvement horizontal des masses d'eau sur toute la surface de la Terre. Ces masses d'eau se déplacent initialement sous la forme d'ondes progressives continues et peuvent créer un système d'ondes stationnaires.



Les mouvements de l'eau à la surface de la Terre doivent obéir aux lois physiques, ce qui signifie qu'elles doivent se propager sous forme d'ondes progressives. Les phénomènes naturels modifient l'onde progressive et finissent par la transformer en une onde stationnaire.

Les ondes empruntent leur comportement aux ondes progressives et aux ondes stationnaires. Les propriétés de ces deux formes d'onde vont être décrites ci-dessous.

Ondes progressives

L'onde de marée progressive décrite dans ce paragraphe présente certaines caractéristiques :

- L'amplitude de l'onde est faible en comparaison avec la profondeur, et la profondeur est faible en comparaison avec la longueur d'onde.

Lorsque l'onde progressive dépasse un certain point fixe, on observe une succession de niveaux hauts et bas de la mer. Localement, lorsque la mer est pleine, le courant est maximal dans la direction de la propagation de l'onde, mais lorsque la mer est basse, le courant est dans la direction opposée.

Rappelons que ceci est valable pour une onde progressive.

Ondes stationnaires : réflexion et résonance

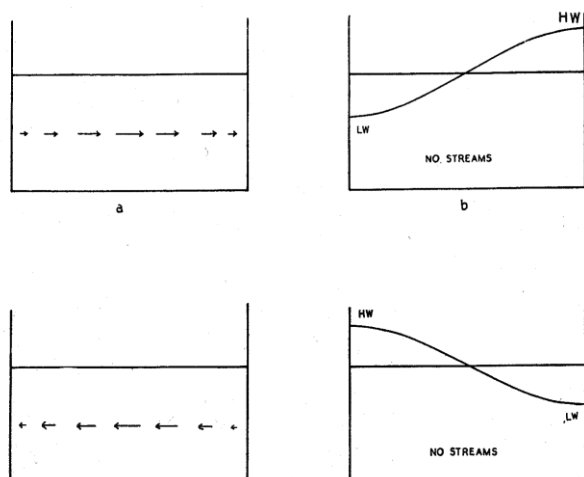
Toute propagation d'une onde autour de la Terre d'est en ouest serait entravée par les limites continentales nord-sud. La région autour du continent antarctique et le bassin arctique sont les seules latitudes permettant un mouvement circumpolaire non entravé.

Pour une onde progressive, les courants, dont le maximum local est atteint dans la direction de la propagation des ondes lorsque la mer est pleine, sont rectilignes, mais cela ne se produit qu'au niveau des côtes escarpées ou dans les chenaux étroits. Dans les véritables océans, les marées ne peuvent pas se propager indéfiniment sous forme d'ondes progressives. Elles subissent une réflexion lorsque la profondeur change brutalement et à proximité des côtes. L'onde réfléchie et l'onde incidente se combinent pour donner l'onde totale observée.

Figure 3 : oscillations de l'eau dans une boîte rectangulaire fermée

L'interférence entre les deux ondes produit un régime fixe d'*ondes stationnaires* qui présentent alternativement des **nœuds**, positions où l'amplitude est nulle, et des **antinœuds**, positions où l'amplitude est maximale. Ces nœuds sont espacés d'une distance $\lambda/4$ où λ est la longueur d'onde de l'onde progressive initiale. Au niveau des nœuds, la variation nette du niveau de l'eau est nulle, mais l'amplitude des courants est maximale, tandis qu'au niveau des antinœuds, la variation du niveau de l'eau est maximale mais les courants sont nuls. Ceci est illustré sur la Figure 3.

Dans une boîte fermée à une extrémité, des ondes stationnaires peuvent également se former, mais en réponse aux



Oscillations de courants entrants et sortants à l'autre extrémité ouverte. Les formes irrégulières des lacs et des océans réels produisent plusieurs périodes naturelles d'oscillation, en mode latéral et longitudinal, d'où une forte ressemblance des oscillations au cycle diurne et semi-diurne des forces de marée.

Les systèmes soumis à un forçage par des oscillations proches de leur période naturelle présentent une réponse d'amplitude élevée, un phénomène appelé **comportement résonant**. Dans la nature, les oscillations résonantes forcées ne peuvent pas se développer indéfiniment puisque les pertes d'énergie dues au frottement augmentent plus rapidement que l'amplitude des oscillations elles-mêmes. Par ailleurs, les ondes réfléchies sont plus petites que les ondes incidentes en raison de la réflexion imparfaite au niveau de la côte.

Tableau 1 : oscillations naturelles dans les différents bassins

Exemples de la période d'oscillation naturelle des masses d'eau			
	Longueur	Profondeur	Période
Baignoire	1,5 m	0,2 m	2,1 s
Piscine	10 m	2,0 m	4,5 s
Loch Ness, Écosse	38 km	130 km	35 min

La théorie des oscillations et de la résonance explique comment, dans le monde réel, les forces de marée créent des mouvements d'eau verticaux et horizontaux considérables. Bien que le mouvement vertical soit linéaire et facile à mesurer, il en est autrement des courants de marée, puisque leur direction et leur vitesse sont variables dans le temps et qu'ils circulent à une certaine profondeur sous la surface. Les courants peuvent présenter des caractéristiques semi-diurnes ou diurnes, ou un mélange des deux (inégalité diurne), auquel cas ils varient en fonction de la déclinaison du Soleil et de la Lune.

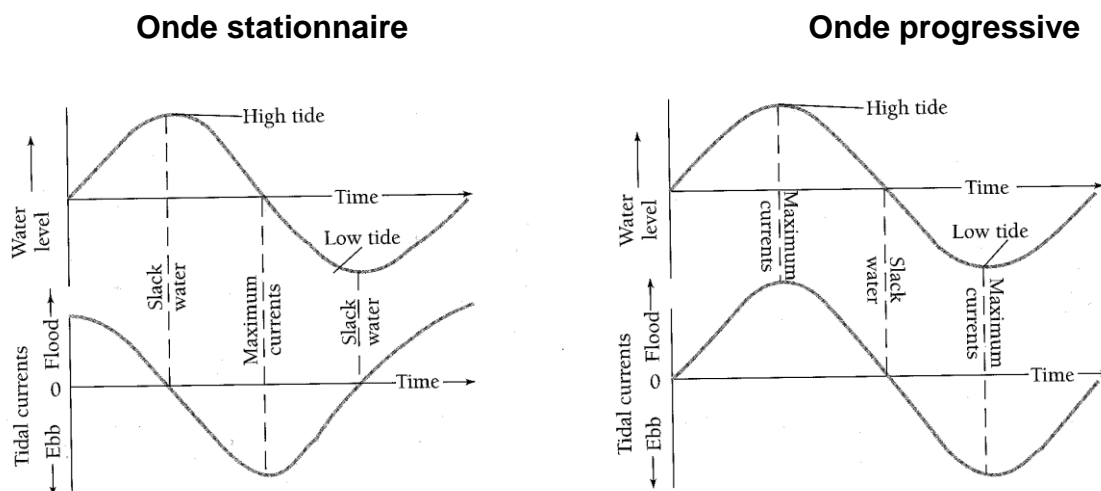
Résumé

Selon que le courant de marée s'inscrit dans un régime d'ondes stationnaires ou d'ondes progressives, il présente une certaine relation avec la haute mer et la basse mer.

- Onde stationnaire : Au niveau des nœuds, la variation nette du niveau de l'eau est nulle mais les courants possèdent leur amplitude maximale, tandis qu'au niveau des antinœuds, la variation du niveau de l'eau est maximale mais les courants sont nuls.
- Onde progressive : Localement, lorsque la mer est pleine, le courant est maximal dans la direction de la propagation de l'onde, mais lorsque la mer est basse, le courant est dans la direction opposée.

La *Figure 4* illustre les relations théoriques entre la hauteur de marée et le courant de marée dans le cas d'une onde stationnaire et d'une onde progressive. En réalité, une onde n'est jamais totalement progressive ou totalement stationnaire. Les Figures 21 et 22 des pages 91 et 92 du manuel Tidal Handbook N° 1 illustrent les véritables relations entre hauteur de marée et courant de marée.

Figure 4 : relation entre hauteur de marée et courant de marée



4.2. NATURE DES COURANTS DE MARÉE

Une onde de marée progressive théorique est associée à des courants rectilignes. Cependant, d'après les observations, on sait que dans la plupart des cas, les courants de marée ne s'écoulent pas simplement dans un sens puis dans l'autre suivant une direction, mais changent de direction et *tournent* au cours de la période de marée. Au large, les courants de marée présentent par nature un mouvement giratoire. Ils ne tendent à s'écouler dans un mouvement de va-et-vient dans des directions opposées (rectiligne) que lorsque des terres émergées ou des hauts-fonds les y contraignent.

Le sens de rotation, horaire ou anti-horaire, dépend de nombreux facteurs, et aucune règle simple ne permet de déterminer quels sont les effets les plus importants. Dans certains cas le sens de rotation peut être différent en haut et en bas de la colonne d'eau. Dans ce paragraphe, les effets suivants seront examinés brièvement :

- a. Forces de marée.
- b. Accélération de Coriolis.
- c. Côte en pente douce.
- d. Combinaisons d'oscillations et d'ondes progressives.
- e. Bathymétrie.

Forces de marée

Si le Soleil et la Lune restaient dans le plan de l'équateur de la Terre à distances fixes, la rotation de la Terre produirait des courants de marée d'est en ouest à l'équateur, et giratoires ailleurs, dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et dans le sens inverse dans l'hémisphère Sud. La trajectoire d'une particule d'eau serait elliptique, allant d'un cercle au pôle à une ligne droite à l'équateur. Cela est dû aux forces tractives qui ont des composantes vers l'est et vers le nord, dépendantes de la latitude, de la longitude et de la déclinaison.

Dès que le Soleil et la Lune quittent le plan de l'équateur et que les autres effets tels que les variations de distance sont pris en compte (à savoir les plus de 400 facteurs de marée, le courant devient giratoire, même à l'équateur, et la trajectoire

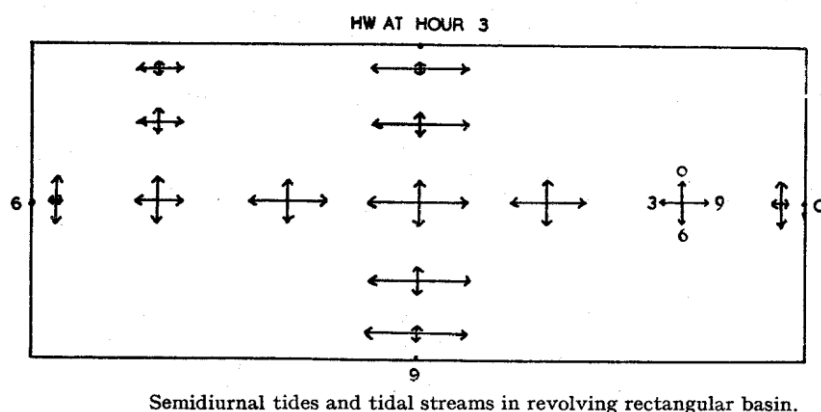
réelle d'une particule devient très complexe.

Accélération de Coriolis

Prenons le cas d'un courant de marée dans l'hémisphère Nord se déplaçant d'est en ouest selon une période de 12 heures. Lorsqu'il commence à se déplacer à l'est à +0 heure, la force de Coriolis confère au courant une composante vers le sud qui atteint un maximum à +6 heures, moment auquel le courant tourne et les composantes vers l'est deviennent nulles. Lorsqu'il commence à se déplacer à l'ouest, la force de Coriolis induit une composante vers le nord qui atteint un maximum à +12 heures, moment auquel la composante vers l'est, après avoir été négative, devient à nouveau nulle. Il en résulte une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord.

Courants côtiers

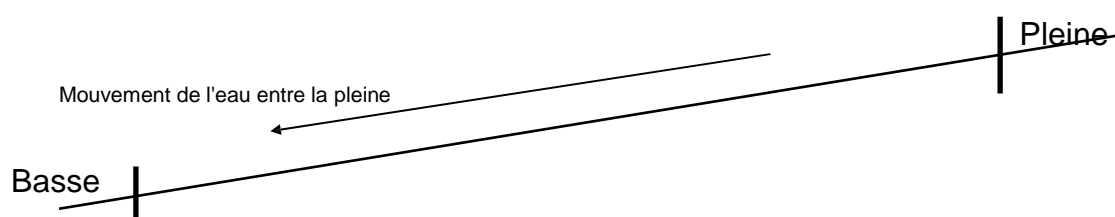
Figure 5 : marées semi-diurnes et courants de marée giratoires dans un bassin rectangulaire.



Lorsque la mer est pleine et basse (heure 3 et 9), des courants *transversaux* ne sont pas nécessaires puisqu'il n'existe pas d'augmentation de l'élévation. À mi-marée (heure 0 et 6), toutefois, les courants transversaux atteignent leur vitesse maximale dans le cas d'une côte en pente douce où le niveau de l'eau de HW (pleine mer) et LW (basse mer) est à des positions sensiblement différentes, par exemple une plage.

Ces courants viennent s'ajouter aux niveaux maximums des courants de marée *le long de la côte* à pleine mer et à basse mer. Ceci est illustré sur la Figure 5 et 6. (explication plus détaillée dans NP120 p. 184.)

Figure 6 : courants giratoires au niveau des côtes en pente douce



Combinaison d'oscillations et d'ondes progressives.

En se combinant, deux oscillations stationnaires de directions et de périodes différentes créent un courant giratoire.

En se combinant, une onde progressive et une oscillation stationnaire créent un courant giratoire dont la forme et les directions varient entre les périodes d'oscillation.

Une description complète de la formation des ondes stationnaires et des oscillations figure dans le document AMHS Vol. II, Chapitre 2.

Bathymétrie.

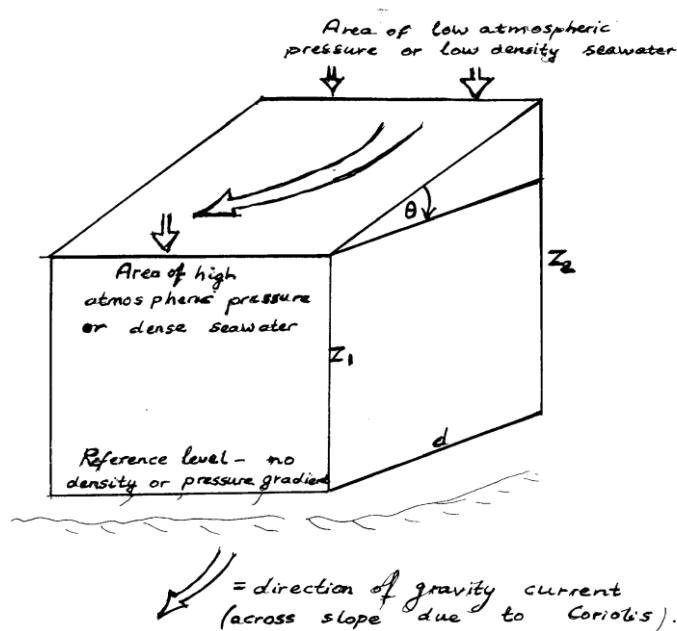
Sur le plateau continental, le sens de rotation dépend généralement de la bathymétrie et de la réflexion des vagues sur la côte, comme dans le cas d'une côte en pente douce.

4.3. NATURE DES COURANTS OCÉANIQUES

Les courants océaniques profonds sont régis par un certain nombre de mécanismes :

- les forces de marée d'origine astronomique
- la force de Coriolis
- les vents dominants (ondes de gravité générées par le vent)
- les courants de gravité causés par les gradients de pression atmosphérique
- les courants de gravité causés par les gradients de masse volumique. La masse volumique varie en fonction de la salinité, de la température et de la pression (profondeur).

Figure 7 : courants océaniques



Le régime océanique est donc extrêmement complexe. Les effets se font souvent ressentir dans les eaux peu profondes et entraînent des complications additionnelles. En raison de cette complexité, les courants de marée peuvent ne pas s'inverser exactement au moment de la pleine mer (HW) et de la basse mer (LW), et la présence d'un mouvement horizontal à ces heures-là indique souvent la présence d'un courant général.

5. **OBSERVATIONS - ÉQUIPEMENT ET PROCÉDURES**

5.1. **MESURE DU COURANT DE MARÉE**

Cette tâche n'est pas simple, et les observations des courants de marée ou des courants généraux nécessitent une planification et une application méthodiques afin de garantir la fiabilité des résultats. Autrefois, l'ensemble des ressources d'un navire hydrographique étaient mobilisées pendant au moins une journée, la majeure partie des autres activités étant abandonnées en raison de l'arrêt du navire. Ce procédé d'acquisition de données par ailleurs discontinues était très coûteux. En outre, même si les mesures étaient effectuées avec le plus grand soin, les courants de marée prédits résultants ne pouvaient jamais être aussi précis que les mouvements de marée verticaux prédits. En effet, les erreurs aléatoires de mesure étaient généralement importantes en comparaison avec les quantités mesurées, et le temps disponible pour réduire les erreurs en répétant les analyses était réduit (en comparaison avec les observations de la marée, où il est relativement aisé d'obtenir des données sur 30 jours).

Il a donc fallu doter les navires d'instruments permettant une acquisition continue des données pendant leur progression. Cela a tout naturellement conduit au courantomètre fixé sur une bouée.

Idéalement, les observations devraient être faites à intervalles d'une heure ou d'une demi-heure, pendant un mois lunaire (29 jours). Dans la pratique, à moins de disposer d'un courantomètre à enregistrement à distance fixé sur une bouée, une période de temps bien plus courte sera allouée aux observations des courants. D'où :

- a. Obtention d'un minimum de 25 heures de mesures à intervalles d'une heure ou d'une demi-heure, et si possible de 50 heures (pour les marées diurnes, les observations sur 50 heures doivent être obtenues au cours des périodes de marnage important).
- b. Les observations doivent être faites par beau temps.
- c. Les observations doivent être faites en vive-eau, lorsque les courants de marée sont les plus forts et les erreurs sont minimales.
- d. Si possible, répéter hors période de vive-eau.

Techniques de mesure

Elles se répartissent en deux grandes catégories : -

- a. Techniques lagrangiennes - Repérage et suivi d'un volume d'eau (par exemple pole logship).
- b. Techniques eulériennes - surveillance du flux en un point (par exemple courantomètre).

Pole Logships

- a. Soit en flottement libre soit attachés par un câble, donnent le débit et la direction moyens sur toute la profondeur du pole. La longueur des poles doit correspondre au tirant d'eau attendu des navires dans la zone.

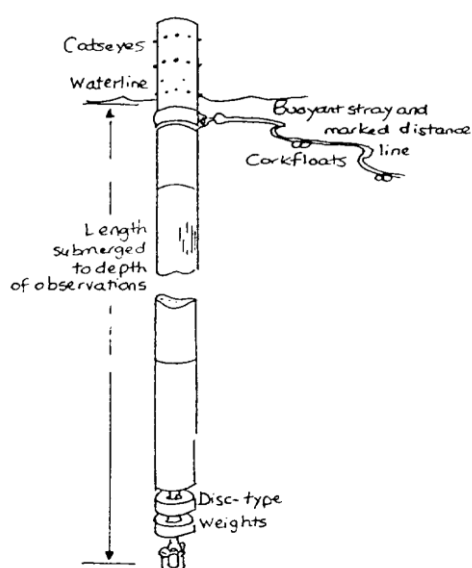
Inconvénients :

Mobilisation du navire ou du bateau et du personnel pendant de longues périodes. Problèmes de manipulation.
Positionnement précis nécessaire.
Résultats imprécis.

Procédure

- a. Immerger les logships pendant environ 24 heures pour qu'ils soient saturés d'eau, puis lester selon les besoins pour laisser environ 18 pouces (46 cm) au-dessus de la surface de l'eau.
- b. Préparation dans le bateau ou le navire :- ancrer ou fixer à une bouée dans la position d'observation et préparer le matériel suivant.
- c. Mouillage et manœuvre, chronomètre, H183, journal des courants de marée et des courants généraux (VIERGE), compas à pointe sèche, équerre à griser ou répétiteur de gyrocompas, règle parallèle, lampe Aldis, crayons en nombre suffisant, logships (immergés préalablement et pesés), mouillage de courantomètres.

Figure 8 : pole logship



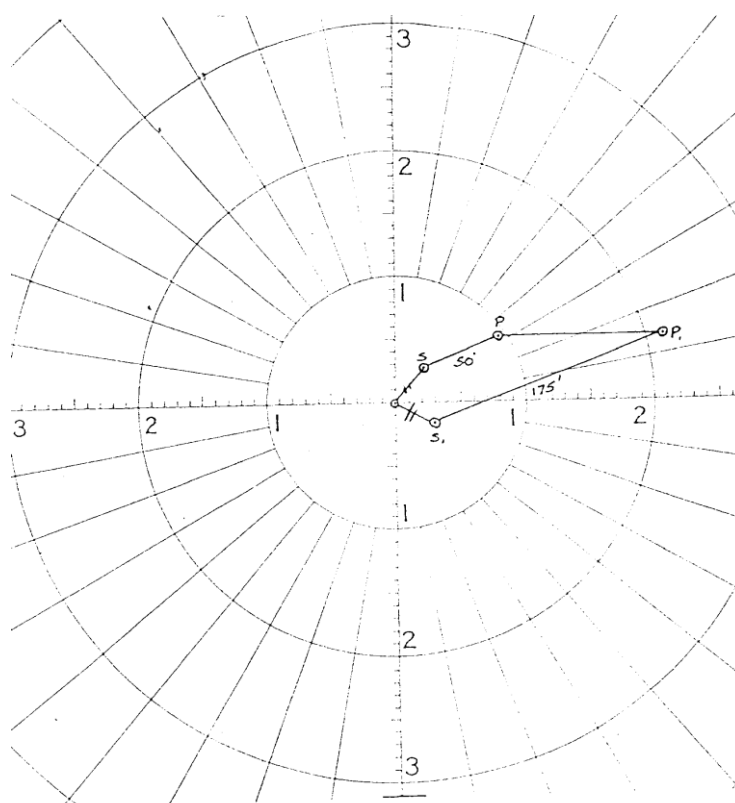
Le logship a habituellement une longueur de 15 ou 30 pieds (4,5 ou 9 m), une section transversale uniforme, est lesté pour flotter en position droite tout en ne dépassant que de quelques pouces (quelques dizaines de cm) au-dessus de la surface, afin de réduire au maximum la résistance au vent tout en pouvant repérer l'instrument. La partie supérieure du pole est équipée d'une petite lampe alimentée par batterie, et parsemée d'yeux de chat pour le repérage nocturne.

Procédure - Logship attaché par un câble

- Le pole est fixé au navire par l'intermédiaire d'une ligne flottante dont les 15 à 30 premiers mètres sont constitués d'une houache sans marquage, le reste de la ligne étant marqué comme une ralingue de plomb.
- Une méthode de mesure précise des mouvements de l'observateur est nécessaire, par exemple par DGPS (système de positionnement mondial différentiel). Il est faux de croire que le navire pivote autour de son ancre lorsque le câble est tendu.
- Laisser le logship dériver librement sur la houache, hors de la zone d'influence du navire.
- Lorsque la ligne de loch est à zéro, démarrer le chronomètre, positionner le navire, noter l'orientation du navire et le relèvement du logship (gyrocompas à la poupe).
- Après 1 ou 2 minutes, en fonction du courant, arrêter le chronomètre, positionner le navire, noter le relèvement du logship, l'orientation du navire et la longueur de ligne sortie (tendre) (1 nœud = 100 pieds/min, ou 31 m/min).
- Obtenir 3 séries d'observations, si possible en succession rapide. Les résultats obtenus peuvent alors être ramenés au temps d'observation moyen. Noter les conditions météorologiques ; utiliser le formulaire H183.
- Reporter les 3 analyses et les combiner pour obtenir la vitesse et la direction moyennes de l'écoulement. La représentation doit tenir compte du mouvement du navire au cours de l'analyse.

Représentation des observations effectuées à l'aide d'un logship attaché par un câble

Figure 9 : représentation des données obtenues par un logship



Étant donné que la poupe d'un navire ancré ne reste pas stationnaire pendant une analyse de 1 ou 2 minutes, il convient de représenter le mouillage/manœuvre à grande échelle, centré sur la position d'ancrage du navire.

Les données brutes doivent être enregistrées dans un journal de passerelle/de sondage pour faciliter les vérifications. Reporter la position de la poupe du navire au premier repère, à savoir le zéro de la ligne de loch marquée = position S. Reporter la position du pôle (P) selon le relèvement et la distance de S. Reporter la position de la poupe du navire à la fin de l'analyse (S1). Reporter la position du fond du pôle (p1) selon le relèvement et la distance. (Rappel : dist + 50'). En reliant P et P1, on obtient la direction et le courant de marée. La distance en pieds entre P et P1 divisée par 100'/min donne la vitesse du courant total. La moyenne de chaque ensemble d'OBS doit être enregistrée dans le formulaire H138.

Procédure - Logship attaché par un câble

- a. Il est possible d'utiliser le même pôle, sans filin d'écartement. La position d'observation doit être marquée par une petite bouée
- b. Le logship est largué par un bateau en amont de la bouée. Dès qu'il dérive librement, sa position est déterminée, mais il est important que le barreur du bateau n'approche pas trop du logship, pour éviter de le perturber.
- c. À intervalles adéquats, le pôle est de nouveau positionné à deux ou trois reprises, les temps de positionnement étant notés à la seconde la plus proche
- d. Le logship est récupéré, et la séquence répétée une ou deux fois en succession rapide. Noter les conditions météorologiques.
- e. Reporter les positions déterminées du logship, calculer la vitesse et la direction pour chaque analyse, les moyenner, et les ramener au temps d'observation moyen.

(Un logship en flottement libre peut également être suivi par un radar haute définition, tant que le réflecteur radar du pôle ne présente par une résistance significative au vent. Bien entendu, il convient de corriger le mouvement du navire).

Débitmètres.

Le courantomètre est la méthode la plus polyvalente pour mesurer la vitesse et la direction de l'écoulement quelle que soit la profondeur, y compris dans les eaux océaniques profondes. Il peut être attaché à un navire par un câble ou fixé sur une bouée. L'équipement proprement dit est coûteux en comparaison avec un logship, mais en raison des économies réalisées en temps de navigation et en main d'œuvre, ces appareils de mesure sont bien plus rentables, en particulier s'il s'agit de dispositifs autoenregistreurs pouvant être laissés sans surveillance. Il existe de nombreux modèles d'appareils de mesure sur le marché, nombre d'entre eux étant conçus pour les grandes profondeurs. Les données sont soit lues directement sur une unité de commande située sur le navire en surface, soit enregistrées à distance sur une bande magnétique incorporée à l'appareil de mesure. Certains débitmètres peuvent télémétrer les informations vers une bouée de surface en vue de l'enregistrement ou de la transmission directe vers un navire.

Les appareils de mesure actuels emploient l'une des trois méthodes de mesure de la vitesse et de la direction :

- i. Impulseur ou rotor.
- ii. Courantomètres électromagnétiques.
- iii. Profileurs de courant à effet Doppler (ADCP).

Impulseur ou rotor.

L'impulseur tourne dans le courant, à une vitesse proportionnelle à la vitesse du courant, et un agencement de girouettes incorporées maintient l'intégralité de l'instrument face au courant.

Un couplage magnétique entraîne une came hexagonale à l'intérieur du corps étanche rempli d'huile, produisant six contacts électriques par révolution de l'impulseur. Une succession d'impulsions est envoyée à l'unité de commande par l'intermédiaire d'une liaison ombilicale, où la vitesse du courant est affichée directement en nœuds ou en mètres/s sous la forme d'une tension dépendant de la fréquence de répétition des impulsions. La direction est généralement déterminée par un compas magnétique de type aéronaval incorporé à l'unité subaquatique, et est souvent compensée pour tenir compte de la déviation résiduelle. En raison de leur coût élevé, les gyrocompas sont rarement utilisés dans ces dispositifs.

Les types utilisés par la Royal Navy sont :

Courantomètre DNC-3N. Le courantomètre DNC-3N a été introduit dans la Royal Navy pour remplacer certains de ses appareils de mesure vieillissants et à présent obsolètes, bien que lui-même tende également à être remplacé par des courantomètres plus modernes. L'instrument comporte deux parties : l'unité subaquatique et l'unité de surface, reliées par un câble océanographique standard monté sur un enrouleur. Le système tel que livré est capable de mesurer la *vitesse* et la *direction*

- **DNC-3N : Description du système**

L'unité subaquatique est constituée de trois parties : la pointe avant, le tube arrière et l'ensemble de protection des ailettes/de l'impulseur. La partie pointe avant contient la prise d'entrée destinée au câble de données tandis que les capteurs et les composants électroniques se trouvent dans le tube arrière. Une masse de lestage est suspendue sous la partie principale de l'unité et assure que l'unité est horizontale lors des mesures du courant.

L'unité de surface est constituée d'un boîtier portable étanche aux projections, qui contient l'électronique de l'équipement. L'avant de l'unité est constitué de l'interrupteur MARCHE/ARRÊT, d'un écran d'affichage à cristaux liquides doté d'une commande de l'intensité et d'un dispositif de commande de compensation atmosphérique. Une plaque passe-câbles contenant le raccordement des bornes aux alimentations externes et aux périphériques se trouve à une extrémité de l'unité de surface. Puisque le panneau avant lui-même n'est pas étanche aux éclaboussures, au cours du fonctionnement il est recommandé de garder le couvercle en plastique sur l'ensemble, dans la mesure du possible.

Le câble d'interconnexion entre les deux unités est d'un type océanographique qui combine les fonctions de câble de contrainte et de

transfert des données.

- **DNC-3N : Paramètres individuels**

Direction: la direction du courant est déterminée par un compas enregistrant en double précision qui est échantillonné 3 fois par seconde. Le signal numérique résultant est converti en un signal analogique et est transmis à la surface.

Vitesse. L'impulseur est couplé magnétiquement à un mécanisme de détection optique qui convertit la rotation en un signal électrique.

- **DNC-3N : Fonctionnement du courantomètre**

Pour utiliser l'équipement, suivre la séquence d'opérations suivante :

- Relier l'unité subaquatique au câble, en veillant à ce que la boucle soit correctement fixée à l'instrument.
- Relier le câble d'interconnexion de l'enrouleur de câble à l'unité de surface.
- Relier tout cordon d'alimentation secteur nécessaire à l'unité de surface (soit secteur soit 24 V CC).
- À l'allumage de l'unité, un indicateur vert clignotant doit apparaître sur le panneau avant tandis qu'un message d'« ouverture de session » doit apparaître à l'écran. Après ce message initial, le résumé des modules installés apparaît. L'instrument doit à présent passer par une série d'auto-vérifications. Si un défaut est détecté, un message d'erreur s'affiche alors que si toutes les opérations sont correctes, l'instrument fonctionne normalement.
- Pour une meilleure précision, il convient d'appliquer des compensations de la pression atmosphérique en appuyant sur le bouton de compensation atmosphérique pendant l'allumage de l'unité. Cela permet de déterminer la profondeur indépendamment de la pression atmosphérique ambiante. Cependant, cette compensation de pression ne sera valable que pendant de courtes périodes. Lorsque la correction a été actionnée, l'écran indique « COMPENSATION DE PRESSION DÉMARRÉE ». Pendant que la compensation se poursuit, le signe décimal du nombre indiquant la profondeur est remplacé par deux points. Si l'unité est arrêtée, la compensation de pression doit être réinitialisée au redémarrage.
- L'unité doit alors être redescendue aux profondeurs requises et les mesures prises selon les besoins.
- Lors du retour à la surface et avant que l'unité subaquatique ne soit arrimée, il convient de la rincer à l'eau douce et de la sécher.

Courantomètres électromagnétiques.

En raison de l'absence de pièces en mouvement, le risque d'interférence par des débris flottants est nul. Ces appareils de mesure utilisent la loi de Faraday relative à l'induction électromagnétique en mesurant la tension induite par l'écoulement de l'eau sur deux paires d'électrodes placées de manière orthogonale dans un champ magnétique généré localement. En résolvant les deux mesures orthogonales, il est possible d'obtenir un vecteur de coordonnées polaires qui représente la vitesse et la direction de l'écoulement. Au Service de levés hydrographiques (HSS), on utilise le courantomètre S4. Pour les détails techniques, se reporter au manuel.

Profileurs de courant à effet Doppler (ADCP).

Ceux-ci ne comportent pas non plus de pièces en mouvement. Ils emploient une configuration de transducteurs pour examiner les décalages de fréquence par effet Doppler causés par les transmissions acoustiques en présence d'un flux d'eau. Typiquement, des impulsions très courtes sont transmises entre des paires de récepteurs, la géométrie étant conçue pour donner des mesures précises indépendantes de la vitesse de propagation acoustique locale. Les mesures orthogonales sont là encore résolues pour obtenir la vitesse et la direction de l'écoulement. La théorie des mesures Doppler est expliquée dans le paragraphe suivant.

5.2. THÉORIE DE DOPPLER ET FONCTIONNEMENT DES ADCP

L'effet Doppler est une variation de la hauteur (sonore) observée qui résulte du mouvement relatif. Un exemple de l'effet Doppler est le son produit par un train qui passe. La hauteur du sifflet augmente lorsque le train s'approche et diminue lorsqu'il s'éloigne. Ce changement de hauteur est directement proportionnel à la vitesse du train. Par conséquent, en mesurant la hauteur et ses variations, on peut en déduire la vitesse du train.

Imaginons que vous vous trouvez près d'une étendue d'eau et que vous regardez les vagues passer. Lorsque vous restez immobile, vous voyez huit vagues passer devant vous pendant un intervalle de temps donné. À présent, si vous commencez à marcher dans la même direction que les vagues, plus de huit vagues passent devant vous pendant ce même intervalle. La fréquence des vagues semble donc plus élevée. Si vous marchez dans l'autre direction, moins de huit vagues passent pendant ce même intervalle et leur fréquence semble inférieure. C'est l'effet Doppler. Le décalage par effet Doppler est la différence entre la fréquence que vous entendez lorsque vous restez immobile et celle que vous entendez lorsque vous vous déplacez.

• Manière dont les ADCP utilisent le son rétrodiffusé pour mesurer la vitesse

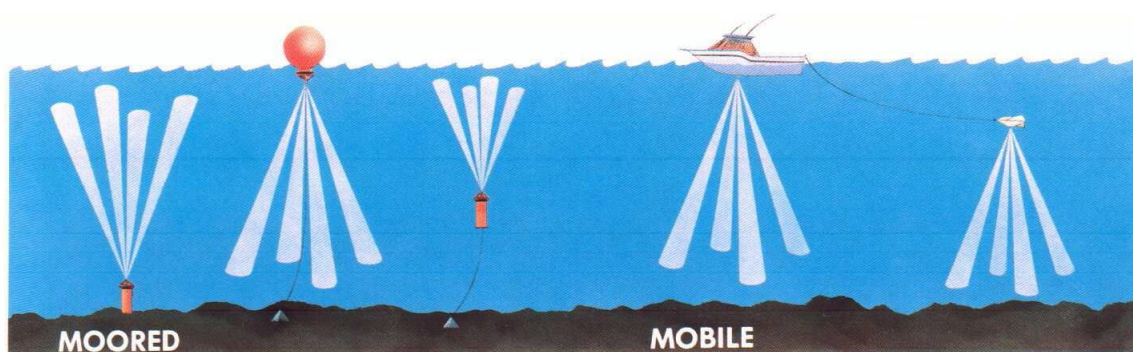
Les ADCP utilisent l'effet Doppler en transmettant le son à une fréquence fixe et en écoutant les échos provenant des diffuseurs de son présents dans l'eau. Ces diffuseurs de son sont de petites particules ou du plancton qui renvoient le son à l'ADCP. Les diffuseurs sont omniprésents dans l'océan. Ils flottent dans l'eau et en moyenne ils se déplacent à la même vitesse horizontale que l'eau (noter qu'il s'agit d'une hypothèse essentielle !). Voici quelques exemples de diffuseurs types présents dans l'océan : les ptéropodes, les copépodees et les euphausia.

Les diffuseurs diffusent le son dans toutes les directions. La majeure partie du son se propage vers l'avant sans être affecté par les diffuseurs. La petite quantité qui est réfléchiée est décalée par effet Doppler.

- **Faisceaux multiples**

Lorsqu'un ADCP utilise plusieurs faisceaux pointant dans différentes directions, il détecte différentes composantes de vitesse. Par exemple, si l'ADCP dirige un faisceau vers l'est et un autre vers le nord, il mesure les composantes est et nord du courant. Si les faisceaux de l'ADCP pointent dans d'autres directions, des relations trigonométriques peuvent convertir la vitesse du courant en composantes nord et est. Un point clé est qu'un faisceau est nécessaire pour chaque composante du courant. Par conséquent, pour mesurer trois composantes de vitesse (par exemple est, nord et plus), au moins trois faisceaux acoustiques sont nécessaires. Quatre faisceaux sont souvent utilisés dans la « configuration de Janus », tel qu'illustré sur la Figure 10.

Figure 10 : possibilités de déploiement d'un ADCP



Les **possibilités de déploiement** d'un ADCP sont :

- Fixé sur des plateformes stationnaires.
- En suspension sur un mouillage.
- Logé dans des structures reposant sur le fond.
- Fixé à des bouées de surface.
- Remorqué par des navires ou monté sur des navires (en surface ou immergé).

Précision : Quelques précisions importantes sont indiquées ci-dessous :

- Cap : $\pm 2^\circ$
- Vitesse : $\pm 2\%$ $\pm 0,02$ cm/s

5.3. TÉLÉDÉTECTION

Rétrodiffusion radar.

Des systèmes commerciaux de rétrodiffusion radar VHF et HF et des systèmes expérimentaux utilisant des radars militaires ont montré les bénéfices possibles de la couverture horizontale de grande ampleur. La technologie a évolué et compte à présent divers systèmes.

L'interprétation n'est pas aussi simple et les comparaisons entre les mesures par radar et par dériveur sont importantes. Clairement, les systèmes radar donnent souvent d'excellentes informations. Cependant, seul le mouvement de surface est détecté, et par conséquent, les courants de surface dus à l'action du vent peuvent masquer le flux de marée.

Les observations par satellite des courants océaniques et du vent font depuis longtemps l'objet de recherches. Le passage des modèles de rétrodiffusion radar développés en laboratoire aux mesures satellite nécessite davantage d'observations à l'échelle intermédiaire où les systèmes commerciaux de rétrodiffusion radar fournissent des données, afin de pouvoir confirmer les données des systèmes radar.

6. INTERPRÉTATION ET ANALYSE DES DONNÉES

6.1. INTERPRÉTATION DES DONNÉES DES COURANTS DE MARÉE

Les HQAIs-GSI F.5.1 à F.5.3 indiquent les enregistrements de courant de marée à interpréter. Dans le cas des observations par S4 (ou d'un autre courantomètre dont les observations sont stockées sur disque), une copie papier et les données numériques brutes doivent être intégrées à l'Annexe J du rapport d'expertise. Si une analyse a été réalisée, il est recommandé de présenter les tableaux et les graphes comme dans l'AMHS.

6.2. ANALYSE DES DONNÉES DES COURANTS DE MARÉE

Les procédures d'analyse des observations des courants de marée sont décrites dans l'AMHS Vol. II, Chapitre 2 (voir également HQAIs-GSI F.4.1). Cette publication de 1967 décrit deux méthodes d'analyse des données des courants de marée :

- **Analyse harmonique**, assez similaire à celle utilisée pour le mouvement vertical des marées.
Lorsque l'on ne dispose que de 25 ou 50 heures d'observations, seuls les quatre principaux constituants de marée peuvent être déterminés.
- **Méthodes semi-graphiques** pour obtenir une relation empirique entre le courant de marée à un endroit et la marée dans un port de référence adéquat. Cette méthode est incapable de traiter les inégalités diurnes du courant de marée et suppose que les courants de marée sont complètement semi-diurnes.

Avec l'introduction du courantomètre S4 et donc des données numériques, l'UKHO préfère recevoir les données brutes et les analyser en interne. Dans le cas des observations par logship, cependant, l'ingénieur doit réaliser l'analyse à bord et à la page 109 de l'AMHS Vol. II, Chapitre 2, les enregistrements à interpréter sont indiqués en *f*.

Étant donné que l'utilisation du logship va progressivement disparaître, en particulier grâce aux développements dans le domaine de la télédétection, on prévoit que l'analyse sera de plus en plus souvent réalisée par les bureaux hydrographiques.

7. **RÉFÉRENCES**

Admiralty Manual of Tides, NP120

Admiralty Tidal Handbook, N° 1

Tides, Surges and Mean Sea Level - DT Pugh

Oceanography - Paul R Pinet

Admiralty Manual of Hydrographic Surveying, Vol 2, Chapitre 2 - Tides & Tidal Streams

Sea Technology Juin 1997 : Historical overview - Current Measurement Technology

RD Instruments - Acoustic Doppler Current Profilers: Principles of Operation

HQAIs