

## **CHAPITRE 5 MARÉES ET COURANTS**

### **1. INTRODUCTION**

Le but de ce chapitre est de fournir à l'hydrographe et au lecteur les informations de base dont ils ont besoin pour comprendre et utiliser les hauteurs d'eau et leurs produits dérivés, les niveaux de référence et les courants marins, pour conduire sur le terrain les levés hydrographiques et exécuter les travaux nécessités par la cartographie. L'hydrographe n'est pas seulement concerné par le niveau de la mer qui est largement affecté par les marées ; il l'est aussi par celui des lacs et des rivières qui ne le sont pas. Le terme « marée » est traditionnellement utilisé par les hydrographes en relation avec l'instrumentation utilisée pour mesurer la hauteur de la surface de la mer, quoique le terme « niveau de la mer » soit techniquement plus correct. De la même manière, le terme « courant » est utilisé dans de nombreuses régions en rapport avec les courants de marée bien que les courants en général soient affectés par bien d'autres phénomènes que la force génératrice de la marée. Les termes spécifiques « flot » et « jusant » ou « flux » et « reflux » sont souvent utilisés au lieu du terme générique « courant de marée ».

L'étude de la marée joue un rôle tellement important dans la plupart des travaux hydrographiques que nous nous bornerons dans ce chapitre à décrire en termes généraux le potentiel générateur et les variations fondamentales de la marée en renvoyant aux références techniques appropriées. Il est important pour l'hydrographe de comprendre pourquoi les caractéristiques de la marée, les hauteurs d'eau et les courants marins varient dans le temps et dans l'espace afin qu'il prenne ces phénomènes en compte dans la planification et l'exécution des travaux qui lui permettront de conduire à terme des levés hydrographiques qualifiés et de produire des cartes marine précises.

Les procédures et les pratiques de mesure et d'utilisation des hauteurs d'eau, des marées et des courants varient d'un pays à l'autre ; ce chapitre en décrit les principes généraux en les illustrant par des exemples.

### **2. MARÉES ET HAUTEURS D'EAU**

#### **2.1 Principes des marées et des hauteurs d'eau**

La marée observée en un port donné est le résultat de nombreux facteurs, incluant la réponse du bassin océanique à la force génératrice de la marée, l'influence des petits fonds dans les baies et les fleuves ainsi que les effets régionaux et locaux de la météorologie sur le niveau de la mer.

##### **2.1.1 Forces astronomiques génératrices de la marée**

L'attraction gravitationnelle de la Terre qui est orientée vers son centre de masse répartit l'océan sur sa périphérie. Cependant, l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil ainsi que la force centrifuge du système Soleil-Terre-Lune exercent sur l'océan une force d'attraction qui, en se surimposant à la force gravitationnelle, étire l'océan horizontalement et produit la marée en différents points de la surface de la Terre.

Une pleine mer est produite par l'accumulation des flux horizontaux vers les régions d'attraction maximale des forces gravitationnelles lunaires et solaires combinées. Une autre pleine mer se produit du côté symétrique du globe terrestre, là où la force centrifuge l'emporte sur l'attraction gravitationnelle luni-solaire. Les basses mers sont créées par un retrait compensateur dans les régions situées à mi-chemin entre les deux protubérances causées par les marées hautes. L'alternance des hautes et des basses mers résulte de l'effet de la rotation quotidienne (ou diurne) de la Terre sur les

deux protubérances et dépressions de la marée. Les différents temps d'arrivée des ondes marée correspondant à deux pleines mers ou basses mers consécutives en un endroit donné sont le résultat de plusieurs facteurs. La force génératrice de la marée a deux composantes principales dues au Soleil et à la Lune.

### 2.1.1.1 Origine de la force génératrice des marées

Pour un observateur terrien, la Lune semble tourner autour de la Terre, alors qu'en réalité les deux planètes tournent autour d'un barycentre commun. Les deux corps astronomiques ont tendance simultanément à être attirés l'un vers l'autre par attraction gravitationnelle et rejetés par la force centrifuge générée par leur rotation autour du barycentre. L'attraction gravitationnelle et la force centrifuge sont de même module mais de directions contraires aussi la Terre et la Lune sont-elles en équilibre l'une par rapport à l'autre. Le système Terre-Soleil obéit à un même principe, quoique distinct du système Terre-Lune, chaque couple étant à l'origine des composantes lunaire et solaire.

Les forces gravitationnelles et centrifuges ne sont équilibrées qu'aux centres de masse des corps respectifs ; en tout autre point, les deux forces ne sont pas équilibrées et produisent des marées océaniques, atmosphériques et terrestres. Du côté de la Terre située face à la Lune et/ou au Soleil, la force résultante produit une marée dirigée dans le sens de l'attraction luni-solaire ; du côté symétrique, la marée est dans la direction de la force centrifuge dominante, à l'opposé de la Lune et/ou du Soleil.

### 2.1.1.2 Force centrifuge

Le barycentre du système Terre/Lune se trouve à un point situé environ à 1 700 km sous la surface de la Terre, côté Lune, sur l'axe reliant les centres de masse de la Terre et de la Lune (figure 5.1). Le centre de masse de la Terre décrit une orbite (E1, E2, E3...) autour du barycentre (G) alors que le centre de masse de la Lune décrit sa propre orbite mensuelle (M1, M2, M3...) autour de ce même point.

Les cercles en traits pleins et tiretés représentent des sections quasi-équatoriales de la Terre par le plan de l'orbite de la Lune contenant leur barycentre commun G. Les points E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> et M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> sont les positions correspondantes des centres de masse respectifs de la Terre et de la Lune.

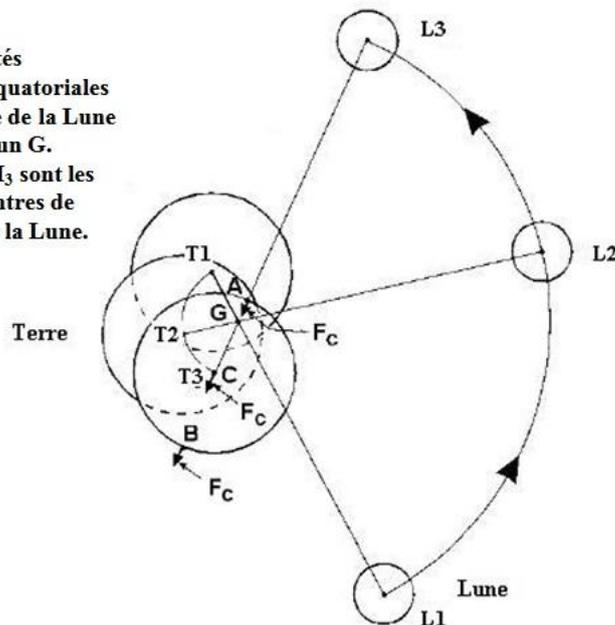


Fig. 5.1

La Terre tournant autour du barycentre G du système Terre-Lune, la force centrifuge produite en son centre de masse est dirigée dans la direction opposée au point G, de même qu'une fronde qu'on ferait tourner autour de la tête exerce une certaine résistance sur la main qui tient la ficelle. Comme le centre de masse de la Terre est du côté opposé à la Lune par rapport au barycentre, la force centrifuge à laquelle il est soumis est dans la direction opposée à la Lune. Tout point situé à l'intérieur ou à la surface de la Terre sera soumis à une force centrifuge de même module et de même direction, représentée par les flèches F<sub>c</sub> des points A, C et B de la figure 5.1 et par les flèches fines F<sub>c</sub> des mêmes

points de la figure 5.2. Le même principe s'applique au système Terre/Soleil, à cette différence près que le barycentre commun se trouve beaucoup plus près du Soleil en raison de sa masse.

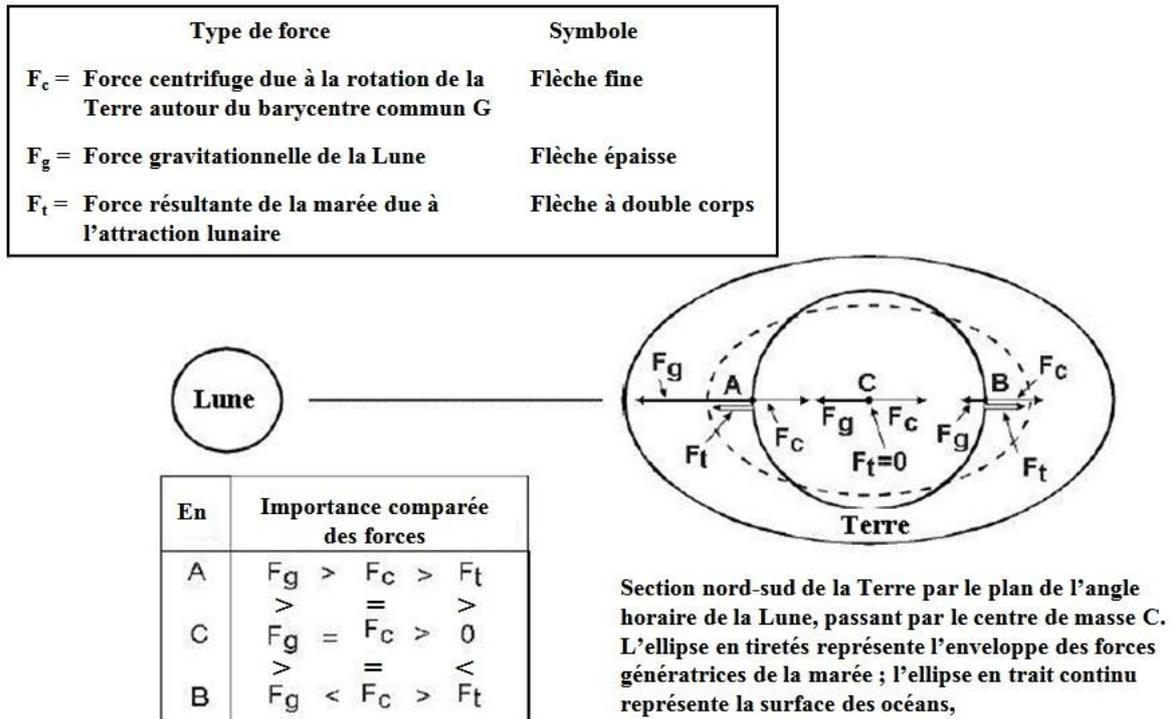


Fig. 5.2

Il est important de noter que la force centrifuge produite par la rotation journalière de la Terre sur son axe propre est sans conséquence sur la théorie de la marée. Elle ne joue aucun rôle dans le potentiel générateur de la marée car elle est constante en tout point dans le temps, ce qui fait que la surface de l'eau est toujours en équilibre par rapport à elle.

### 2.1.1.3 Force d'attraction gravitationnelle

Tandis que l'effet de la force centrifuge externe est constant en tout point de la Terre, l'effet de la force d'attraction gravitationnelle produite par un autre corps astronomique varie d'un point à un autre. Ceci est dû au fait que le module de la force gravitationnelle exercée par un corps varie avec l'inverse du carré de sa distance. Ceci se traduit dans la théorie de la marée par l'introduction d'un nouveau facteur basé sur les différentes distances des points de la surface de la Terre au centre de masse de la Lune. L'attraction gravitationnelle relative exercée par la Lune en différents points de la Terre est indiquée sur la figure 5.2 par les flèches  $F_g$  qui sont plus conséquentes que celles représentant la force centrifuge.

De même que la force centrifuge de la Terre tournant autour de son axe n'exerce aucun rôle dans la marée, sa force gravitationnelle propre n'en exerce pas davantage car elle demeure constante dans le temps en tout lieu.

### 2.1.1.4 Forces différentielles génératrices de la marée

La force centrifuge qui s'exerce au centre de la Terre par suite de sa rotation autour du barycentre G du système Terre-Lune est de module égal et de direction opposée à la force gravitationnelle exercée par la Lune. Ces deux forces sont représentées au point C de la figure 5.2 par deux flèches, fines et épaisses respectivement, de même longueur mais de direction opposée. Leur résultante, ou force génératrice de la marée ( $F_t$ ) en C, est nulle.

Le *point sublunaire* A de la figure 5.2 est approximativement 6 400 km plus près de la Lune que le point C. En A, la force d'attraction gravitationnelle produite par la Lune est plus grande qu'en C. La force centrifuge étant partout égale et en opposition à l'attraction gravitationnelle de la Lune au centre de masse de la Terre, l'attraction gravitationnelle en A l'emporte sur la force centrifuge et la force de marée résultante indiquée sur la figure 5.2 par une flèche à double corps est dans la direction de la Lune. L'onde marée résultante est connue sous le nom de marée directe.

De l'autre côté de la Terre, le *point antipode* B est plus loin d'environ 6 400 km du point C et la force gravitationnelle de la Lune en ce point est inférieure à celle du point C. Comme la force centrifuge au point B est plus grande que l'attraction gravitationnelle de la Lune au point C, la force de marée résultante en B sera orientée dans le sens opposé au centre de la Terre ; elle est représentée par une flèche à double corps. La marée produite au point antipode est connue sous le nom de *marée opposée*.

Il existe également un ensemble similaire de forces différentielles dans le système Terre/Soleil.

### 2.1.1.5 Force d'attraction

La force génératrice des marées ne représente environ que les 9 millièmes de l'attraction gravitationnelle de la Terre ; elle est donc très insuffisante pour contrer les effets de la pesanteur et les marées sont produites en fait par sa composante horizontale. En n'importe quel point de la surface de la Terre, la force génératrice des marées peut être représentée par ses deux composantes : l'une verticale ou perpendiculaire à la surface de la Terre et l'autre horizontale ou tangentielle à la surface de la Terre. Parce que la composante horizontale ne s'oppose pas à la gravité, elle peut attirer librement les particules d'eau de la surface de la Terre vers le point sublunaire et le point antipode.

La composante attractive horizontale est le vrai mécanisme générateur des marées ; cette composante est nulle aux points sublunaires et aux points antipodes où la force génératrice des marées est entièrement verticale et où les eaux attirées en ces deux points ont tendance à constituer un bourrelet stable. Il existe donc une tendance constante d'attraction de l'eau en tout lieu de la surface de la Terre vers les points sublunaire A et antipode B de la figure 5.2, formant ainsi en ces points deux protubérances de marée. La force génératrice des marées est un cas particulier de la loi de la gravitation universelle de Newton ; elle varie avec l'inverse du cube de la distance entre un point donné à la surface de la Terre et le centre de masse du corps attracteur.

Dans une bande autour de la Terre située approximativement à mi-chemin entre le point sublunaire et le point antipode, la composante attractive est aussi égale à zéro, puisque la force génératrice des marées y est verticale. Il y a, par conséquent, une tendance à la formation d'une dépression stable dans cette région.

### 2.1.1.6 Enveloppe des forces génératrices des marées

Si les eaux des océans répondaient exclusivement aux forces attractrices et si la Terre était couverte d'eau sans continent, la surface de l'eau prendrait alors la forme d'un sphéroïde dont le grand axe serait dans la direction de la ligne reliant les centres de masse Terre-Lune et le petit axe serait centré perpendiculairement au grand axe. Les deux bourrelets et dépressions de la marée seraient représentés respectivement par l'enveloppe des forces dans les directions du grand axe et du petit axe du sphéroïde. D'un point de vue purement théorique, les effets de la rotation quotidienne de la masse terrestre sur les deux bourrelets et dépressions de la marée, seraient perçus comme étant la cause de la marée lunaire. En ce qui concerne le Soleil, les bourrelets et dépressions correspondants seraient perçus comme étant la cause des marées solaires.

Avec une Terre en rotation, on pourrait s'attendre à une pleine mer suivie d'une basse mer au même endroit six heures plus tard, puis une deuxième pleine mer douze heures plus tard et ainsi de suite. Ceci correspondrait à peu près au cas idéal d'une Terre sans continent et uniformément recouverte d'eau, soumise à la seule force d'attraction d'une Lune positionnée invariablement en distance et en

orientation par rapport à la Terre et au Soleil et où il n'y aurait ni accélérations ni retards susceptibles d'affecter la circulation des eaux. Mais c'est loin d'être le cas pour les trois raisons suivantes :

Tout d'abord, l'enveloppe des forces de marée lunaire est associée à une enveloppe des forces de marée solaire qui est la résultante d'une composante gravitationnelle et d'une composante centrifuge créée par la révolution de la Terre autour du centre de masse du système Terre-Soleil. Cette enveloppe change de position avec la position orbitale de la Terre par rapport au Soleil. Par suite des énormes différences de distances moyennes Terre-Lune (384 400 km) et Terre-Soleil (150 000 000 km), la composante lunaire de la force génératrice de la marée est approximativement 2,5 fois plus grande que la composante solaire, bien que le Soleil soit beaucoup plus massif que la Terre.

Ensuite, plusieurs composantes astronomiques entrent dans la formation du potentiel générateur de la marée. Parmi ces composantes il y a la variation des distances Terre-Lune et Terre-Soleil, l'angle formé par l'orbite de la Lune avec le plan de l'équateur, l'angle formé par le Soleil avec le plan de l'orbite terrestre durant sa trajectoire annuelle et les phases de la Lune. Les principales composantes de la marée résultant de ces diverses influences astronomiques sont décrites ci-après.

Enfin, d'autres effets s'ajoutent qui se traduisent par des changements du niveau de l'eau par rapport aux causes astronomiques initiales, incluant notamment les obstacles à la circulation des eaux représentés par les continents et les phénomènes météorologiques.

### 2.1.2 Caractéristiques de la marée

Les caractéristiques réelles de la marée en n'importe quel point du globe diffèrent de l'enveloppe théorique évoquée plus haut. Tout d'abord, l'eau est un liquide visqueux qui ne réagit pas immédiatement à la force génératrice des marées. Plus significativement, la Terre n'est pas une sphère lisse uniformément recouverte d'eau. Les marées sont affectées par les frictions avec le fond et avec les courants océaniques ; les continents interrompent, limitent et réfléchissent les ondes de marée ; les formes et les volumes des bassins océaniques amplifient ou atténuent la force génératrice des marées.

Les marées montantes (flux, montant, montée) et descendantes (baissée, perdant, reflux) ne se produisent pas à un rythme régulier. À partir de l'étale de basse mer, la marée commence par monter très lentement, puis le taux de montée accélère pendant environ trois heures jusqu'à atteindre sa valeur maximum, après quoi il décélère pendant environ trois heures jusqu'à l'étale de pleine mer. La baissée suit un chemin similaire à celui de la montée, c'est à dire accroissement du taux de baissée, passage par un maximum puis décroissance. Quand le flux et le reflux sont visualisés graphiquement, la courbe ressemble à une sinusoïde. Cependant, à n'importe quel emplacement de la courbe, la montée et la baissée sont le produit d'une variété de composantes qui diffèrent sensiblement d'un lieu à l'autre et qui définissent un spectre caractérisé par trois paramètres principaux : l'établissement du port<sup>♦</sup>, l'amplitude et le type de marée. L'hydrographe doit comprendre et prendre en considération ces trois paramètres dans le but de calculer et d'appliquer les réductions de marée aux sondages.

#### 2.1.2.1 Établissement

Une Lune stationnaire passerait une fois par jour au méridien du lieu, cependant, comme elle tourne autour de la Terre dans la direction de la rotation de cette dernière mais à une vitesse supérieure, tout point de la Terre prend chaque jour un retard de 12,5° par rapport à la Lune. Ces 12,5° sont parcourus en 50 minutes environ, ce qui conduit à une « journée de marée » de l'ordre de 24 heures et 50 minutes.

---

<sup>♦</sup> NdT: Certains termes utilisés dans ce chapitre n'étant pas exactement équivalents en français et en anglais, on rappelle ci-après quelques définitions extraites du Dictionnaire hydrographique de l'OHI, S-32, 5<sup>ème</sup> édition :

**Art. 1710 (Fr) : établissement du port** : HEURE de la PLEINE MER les jours de SYZYGIE en un lieu donné. Elle est exprimée en temps vrai local et s'entend de la pleine mer qui suit le midi vrai, c'est à dire la pleine mer du soir.

**Art. 1710 (En) : establishment of the port.** See ESTABLISHMENT.

L'établissement<sup>▼</sup> correspond au décalage de la pleine mer par rapport au passage de la Lune au méridien du lieu. Il est à peu près équivalent au terme anglais *lunitidal interval*<sup>♦</sup> (ou *High Water Interval 'HWI'*) qui correspond à l'intervalle de temps séparant le passage de la Lune au méridien du lieu et la pleine ou la basse mer suivante. Les établissements ne sont pas réguliers le long d'un méridien donné ; leur variation dépend des obstacles à la progression de l'onde marée, créés par les masses terrestres et par les frottements sur le fond quand l'onde se propage vers les petits-fonds.

Les intervalles définis ci-dessus ne sont constants nulle part mais varient périodiquement dans des limites relativement étroites par suite des interactions entre les forces luni-solaires. Entre la nouvelle Lune et le premier quartier ainsi qu'entre le dernier quartier et la pleine Lune, cette interaction peut accélérer le temps d'arrivée de la marée. Inversement, entre la pleine Lune et le premier quartier ainsi qu'entre le dernier quartier et la nouvelle Lune, l'interaction entraîne un retard de la marée.

Ces intervalles sont définis à la fois pour le passage de la Lune au méridien de Greenwich et pour son passage au méridien local. Ils prennent alors les noms respectivement d'intervalle *lunitidal* de Greenwich et d'intervalle *lunitidal* local. Les intervalles de Greenwich sont plus utiles car ils peuvent être utilisés pour établir des concordances entre les établissements en divers endroits. L'établissement est un paramètre fondamental dans l'analyse et la prédiction de la marée ainsi que dans le calcul des corrections des zones de marée.

### 2.1.2.2 Le marnage

La différence de hauteur entre la pleine mer et la basse mer en n'importe quel lieu a pour nom marnage. En plein océan, la hauteur de crête de l'onde marée est relativement faible et uniforme (habituellement 1 m ou moins). Les variations et les grands marnages ne deviennent sensibles que quand les ondes se déplacent vers les petits fonds, le long des masses terrestres et dans les chenaux étroits.

Le marnage en un point donné n'est pas constant mais varie d'une journée à l'autre. Une partie de sa variation est causée par le vent et la météorologie, mais il reste pour l'essentiel un phénomène périodique lié aux positions du Soleil et de la Lune relativement à la Terre. Au fil des jours, la marée répond à trois variations liées chacune d'elles à un mouvement particulier de la Lune.

Effets des phases de la Lune : vive-eau et morte-eau : En la plupart des endroits de la Terre, les phases de la Lune exercent une grande influence sur le marnage. Ainsi qu'on vient de le voir, la marée est générée par les effets combinés des forces d'attraction luni-solaires. En raison du déplacement de la Lune par rapport à la Terre et au Soleil (figure 5.3) au cours du mois lunaire, ces forces agissent différemment le long de leur axe commun mais sous des angles différents l'un par rapport à l'autre.

---

▼ **Art. 1709 (Fr) : établissement** : Intervalle de temps qui sépare l'heure du PASSAGE AU MÉRIDIDIEN (supérieur ou inférieur) de la LUNE et l'heure de la PLEINE MER qui suit, en un lieu donné.

**Art. 1709 (En) : establishment.** The interval of time between the transit (upper or lower) of the moon and the next high water at a place. The average establishment at the time of full or new moon is called *vulgar* or *common establishment*, or *high water full and change*. Also called *high water lunitidal interval*, or *establishment of the port*. See LUNITIDAL INTERVAL.

♦ **Art. 2974 (En) : lunitidal interval** (pas de terme équivalent en français). The interval of time between the TRANSIT (upper or lower) of the MOON over the LOCAL or GREENWICH MERIDIAN and the next HIGH WATER or LOW WATER at a place. The interval is assumed to be local unless otherwise specified. The average of all high water intervals is called *mean high water lunitidal interval*, *high water interval*, or *corrected establishment*. The average of all low water intervals is called *mean low water lunitidal interval*, or *low water interval*. The expressions *higher high water interval*, *lower high water interval*, *higher low water interval*, and *lower low water interval* are used when there is considerable DIURNAL INEQUALITY. See ESTABLISHMENT.

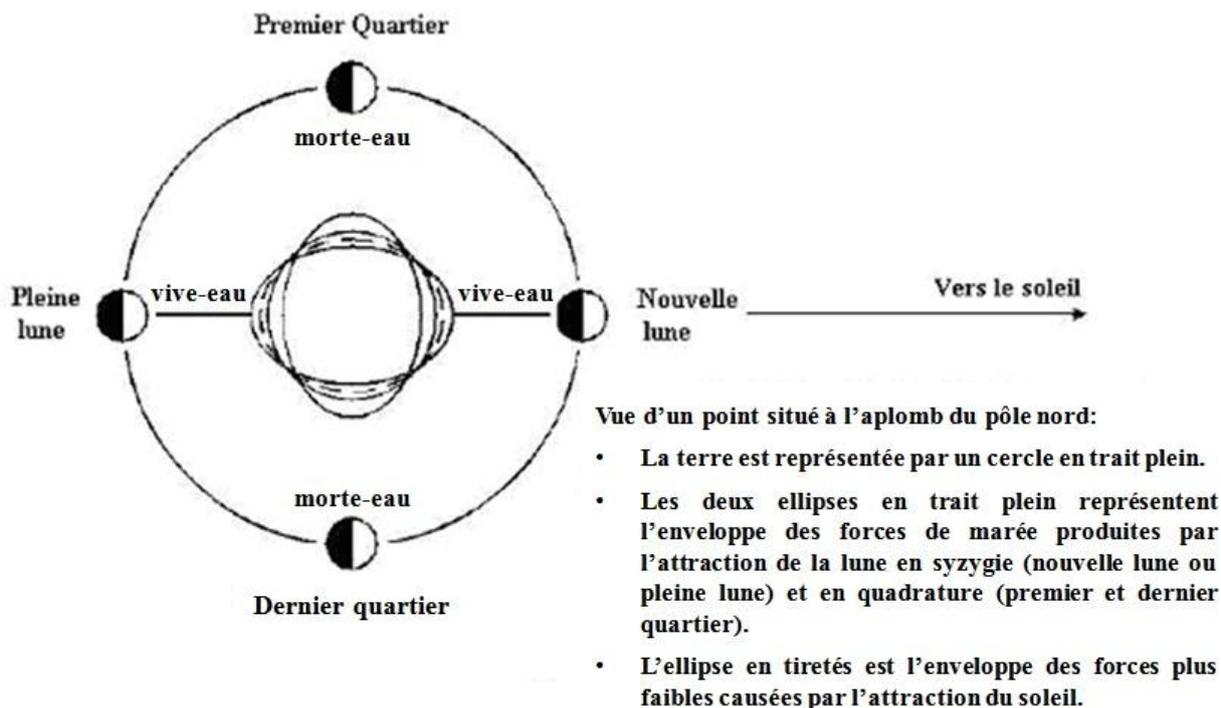


Fig. 5.3

Lors d'une nouvelle ou d'une pleine Lune (ces deux phases sont appelées syzygie), les attractions gravitationnelles de la Lune et du Soleil se renforcent l'une et l'autre et la marée résultante est augmentée d'autant, la pleine mer étant plus haute que la moyenne et la basse mer plus basse que la moyenne. Ceci signifie qu'en tout point, le marnage est plus grand entre les hautes et les basses mers consécutives. La marée de syzygie où le marnage est le plus important est dite de *vive-eau* ; elle correspond au terme anglais de *Spring tide* qui n'a rien à voir avec le printemps<sup>^</sup>.

Lors du premier et du dernier quartier de la Lune (phases dites en *quadrature*), les forces d'attraction luni-solaires sont à 90 degrés et tendent à s'opposer l'une à l'autre. Dans l'enveloppe des forces de marée résultantes, les maxima et les minima ont des valeurs réduites ; la pleine mer est moins haute qu'en moyenne et la basse mer est moins basse qu'en moyenne. Les marées de faible marnage sont dites de *morte-eau*, elles correspondent au terme anglais de *Neap tide*.

#### Effets de la parallaxe (Lune et Soleil) :

Par suite de l'orbite elliptique de la Lune (figure 5.4), la distance Terre-Lune varie d'environ 50 000 km chaque mois et l'attraction gravitationnelle qui est inversement proportionnelle au cube de la distance Terre-Lune, conformément à loi de Newton, variera d'autant. Une fois par mois, quand la Lune est plus proche de la Terre (périgée), les forces génératrices de la marée seront plus élevées que d'habitude et les marées plus fortes qu'en moyenne. Deux semaines plus tard, quand la Lune est à son apogée, la composante lunaire sera plus faible et les marées inférieures à la moyenne. De même pour le système Soleil-Terre, quand la Terre est plus proche du Soleil (périhélie – aux environs du 2 janvier de chaque année), le marnage augmente tandis qu'il diminue quand la Terre est plus loin du Soleil (aphélie – aux environs du 2 juillet de chaque année).

<sup>^</sup> NdT : mais plutôt avec le fait que la marée s'élève plus haut (*to spring*) que d'habitude.

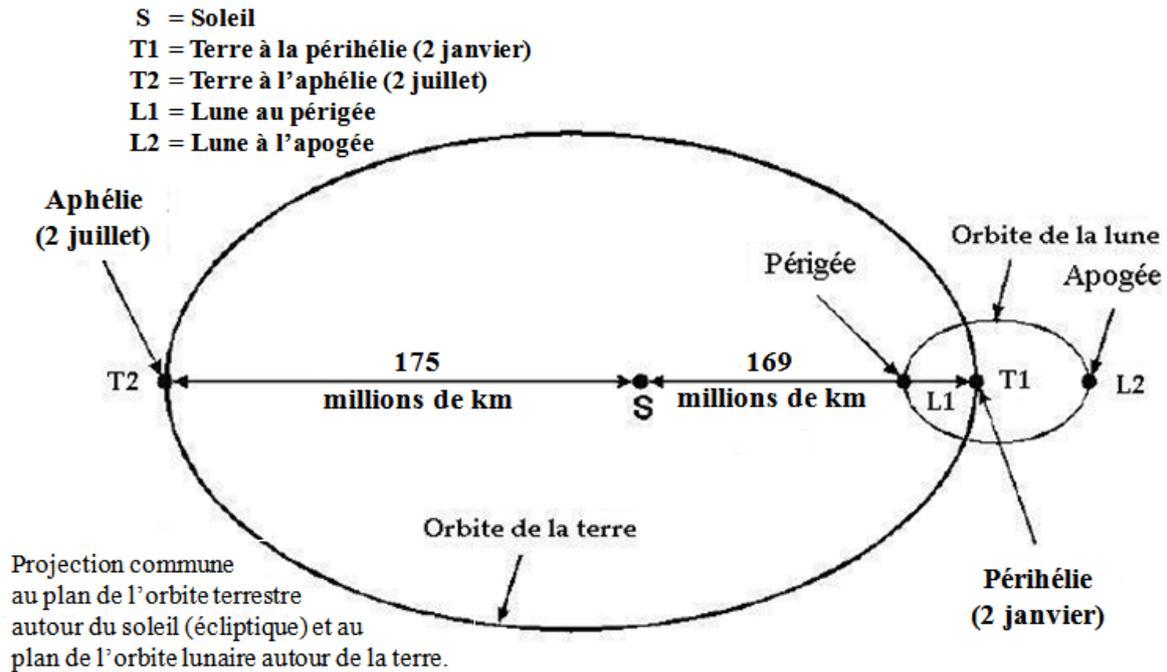


Fig. 5.4

Quand le périgée, le périhélie, et la nouvelle ou la pleine Lune se produisent approximativement au même moment, les marées augmentent très fortement. Inversement, quand l'apogée, l'aphélie, et le premier ou le dernier quartier de la Lune ont lieu au même moment, les marées diminuent très fortement.

Effets de la déclinaison lunaire - 'Inégalité Diurne' :

Le plan de l'orbite lunaire est incliné de  $5^\circ$  seulement par rapport à l'orbite terrestre (écliptique) si bien que la Lune, au cours de sa révolution mensuelle, demeure assez proche de l'écliptique.

L'écliptique est incliné de  $23,5^\circ$  par rapport à l'équateur. Vu d'un observateur terrestre, le Soleil semble le parcourir en une année terrestre, passant successivement six mois au nord, puis six mois au sud, en fonction des saisons. De façon similaire, la Lune effectue une révolution autour de la Terre une fois par mois au cours de laquelle elle passe la moitié du temps au nord de l'équateur et l'autre moitié au sud. La distance angulaire de la Lune mesurée à partir de l'équateur définit sa *déclinaison*.

Deux fois par mois, la déclinaison s'annule. La figure 5.5 représente la Lune en tiretés quand elle « traverse » ainsi l'équateur ; l'enveloppe correspondante des forces de marées est représentée également par une ellipse en tiretés. Les marées qui se produisent quand la déclinaison de la Lune est voisine de zéro sont appelées *marées équatoriales*, celles qui se produisent lorsque la déclinaison lunaire est maximale au nord ou au sud sont appelées *marées tropiques*.

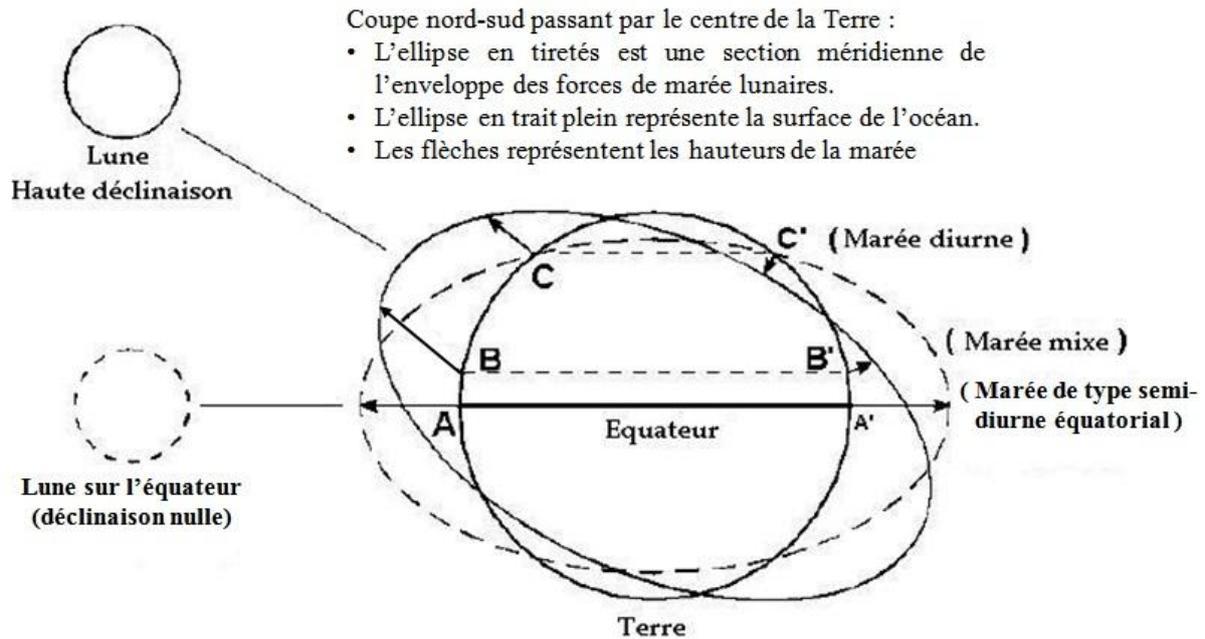


Fig. 5.5

### Variabilité :

Même s'ils sont présents partout sur la Terre, les effets de phase, de parallaxe et de déclinaison ne sont pas uniformes. Les inégalités de phases sont généralement les plus grandes mais en certains endroits, l'un des trois peut l'emporter sur les autres et imposer son influence sur le marnage. La durée d'une lunaison (intervalle entre deux nouvelles Lunes), ou *mois synodique*, est approximativement de 29,5 jours. L'intervalle de temps entre deux périgées lunaires, ou *mois anomalistique*, est approximativement de 27,5 jours. L'intervalle de temps entre deux passages de la Lune au point vernal, ou *mois tropique*, est de 29,3 jours. Il en résulte que des variations importantes de marnage peuvent se produire n'importe où par suite de changements relationnels entre ces trois variables. Par exemple, à Seattle, le marnage moyen est d'environ 2,3 m, mais deux marnages consécutifs peuvent varier de 1,5 m à 4,5 m dans la même journée.

Le marnage est sujet à d'autres variations périodiques (par exemple les différences de parallaxe solaire déjà expliquées), mais les trois paramètres étudiés auparavant sont les principaux. Le fait que les variations correspondantes se produisent à l'intérieur d'un cycle de 29,5 jours ou moins, explique la raison pour laquelle l'hydrographe doit procéder à des observations d'une durée de 30 jours au moins. Même si le marnage peut varier d'un mois à l'autre, une observation de 30 jours consécutifs utilisée conjointement avec les données d'observatoires permanents est souvent suffisante pour réduire la marée des levés hydrographiques. Une importante dérive à long terme des marnages est due à la lente variation de l'orientation de l'orbite de la Lune dite *précession nodale*. Cette variation mesurable du marnage impose des corrections lors des prédictions de marée et des analyses harmoniques ainsi que pour les déterminations des différents niveaux de référence hydrographiques (voir § 2.1.4).

### 2.1.2.3 Types de marée

Parmi les trois paramètres principaux de la marée, le type de marée est le plus caractéristique. Si les marées en deux lieux sont de même type mais qu'elles diffèrent par le marnage et l'établissement, elles peuvent être reliées l'une à l'autre par une concordance simple et précise. Cette propriété permet à l'hydrographe d'extrapoler les zéros hydrographiques et de réaliser des réductions précises dans des zones où les observations sont de courtes durées. *A contrario*, si les types de marée en deux lieux sont différents mais que les marnages et les établissements se ressemblent, il ne faut pas en déduire qu'il existe une relation simple entre elles. Les différences de marnages et d'établissements ne concernent que des valeurs, alors que les différences de types de marée touchent à la nature même du phénomène.

Les types de marée se rapportent aux caractéristiques du flux et du reflux enregistrés sur les marégrammes. Bien que ceux-ci soient différents d'un lieu à l'autre, ils peuvent être regroupés en trois grandes catégories ou types, qui correspondent aux marées semi-diurnes, aux marées diurnes et aux marées mixtes.

Dans la figure 5.5, les points A et A' sont situés sur le grand axe de l'ellipse; la hauteur de la pleine mer en A est la même que celle qui se produit en A', 12 heures plus tard. Quand la Lune est sur l'équateur, ou à une déclinaison telle que les forces de marée sont en équilibre, les deux pleines mers et basses mers d'une journée donnée sont similaires en hauteurs ; elles se succèdent deux fois par jour à des intervalles de temps presque égaux : il s'agit de la *marée semi-diurne*. La courbe de la marée semi-diurne est représentée à la figure 5.6. La marée semi-diurne est un type de marée où le cycle complet pleine mer / basse mer se produit en une demi-journée. Il y a deux pleines mers et deux basses mers pour chaque journée lunaire de 24 heures 50 minutes. Pour une marée classée semi-diurne, les deux cycles de la journée doivent se ressembler et même s'ils ne sont pas exactement identiques, les deux pleines mers et les deux basses mers ne doivent pas être trop différentes.

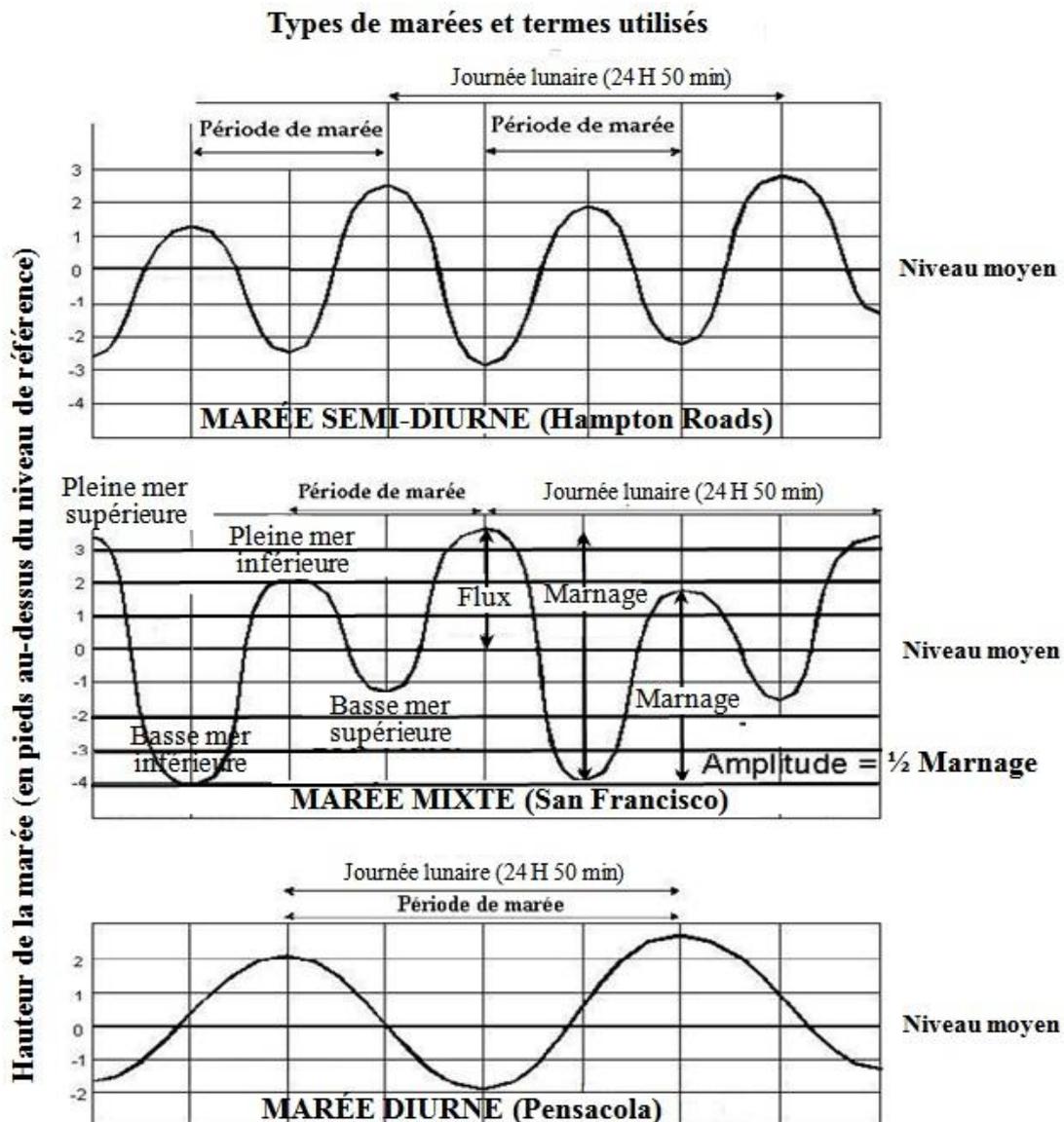


Fig. 5.6

Cependant, avec le changement de signe de la déclinaison lors du passage de la Lune à l'équateur (figure.5.5), l'épaisseur de l'enveloppe des forces de marée lunaires diminue et des différences de

hauteurs entre marées d'une même journée commencent à apparaître. Le phénomène résultant de ces variations et des effets gravitationnels associés est connu sous le nom *d'inégalité diurne*.

Sur la figure 5.5, le point B est à l'intérieur de l'enveloppe des forces de marée lunaires. Une demi-journée plus tard, le point B' est toujours à l'intérieur de cette enveloppe, mais la hauteur de la marée n'est plus aussi grande qu'en B : il y a deux marées journalières présentant des inégalités de hauteurs successives des pleines et/ou des basses mers. Ce type de marée marqué par une grande inégalité diurne est connu sous le nom de *marée mixte* (voir le diagramme à la figure 5.6) car il cumule les propriétés de la marée diurne et de la marée semi-diurne. Une marée mixte comporte deux pleines mers et deux basses mers chaque jour, mais celles-ci présentent des différences de hauteur marquées.

Revenons une dernière fois à la figure 5.5 : Le point C est situé sur l'enveloppe des forces de marée et à l'intérieur du bourrelet des marées hautes ; cependant, quand il gagne la position C', une demi-journée plus tard, il est positionné au-dessous de ce bourrelet c'est à dire qu'il n'y a plus de marée haute. Dans cette configuration dite de *marée diurne*, la force de marée ne génère plus qu'une unique pleine mer et une unique basse mer pour chaque jour lunaire, représentées sur le dernier diagramme de la figure 5.6. Les périodes de montée et de baissée de la marée diurne sont d'environ 12 heures, contrairement à la marée semi-diurne où elle était de 6 heures.

Des exemples de chacun de ces trois types sont visualisés à la figure 5.6, qui présente trois journées d'observations de marée à Hampton Roads en Virginie, à San Francisco en Californie et à Pensacola en Floride. La ligne horizontale à travers chaque courbe de Pensacola, représente le niveau moyen de la mer, et l'amplitude de la montée et de la baissée de la marée au-dessus et en dessous de ce niveau moyen sont indiqués par une échelle à gauche.

La courbe supérieure de Hampton Roads est celle d'une marée semi-diurne, caractérisée chaque jour par deux pleines mers et deux basses mers présentant une légère différence entre la marée du matin et celle du soir. Le marégramme de Pensacola correspond à une marée diurne comportant une pleine mer et une basse mer chaque jour. La courbe de San Francisco est celle d'une marée mixte<sup>▼</sup> comportant deux pleines mers et deux basses mers chaque jour, très différentes le matin et l'après-midi. Dans ce cas particulier, la différence est visible aussi bien pour les pleines mers que pour les basses mers.

La différence entre les marées du matin et du soir, ou inégalité diurne<sup>\*</sup>, provient du fait que l'orbite de la Lune est inclinée par rapport au plan de l'équateur. Cette inclinaison qui est présente dans les forces de marée diurnes et semi-diurnes affecte la montée et la baissée d'une manière qui dépend de la configuration des lieux et qui résulte principalement de la réponse des bassins aux sollicitations hydrodynamiques, lesquelles se manifestent par différentes amplitudes. En fait, la distinction entre les marées mixtes et les marées semi-diurnes est entièrement basée sur cette différence d'amplitude.

La courbe de marée de San Francisco de la figure 5.6 est celle d'une marée mixte qui présente une inégalité importante entre les pleines mers et les basses mers, celles des basses mers étant encore plus marquées. À Hampton Road, l'inégalité n'est pas très grande et visible principalement pour les marées hautes. Telles qu'illustrées à la figure 5.7, les inégalités peuvent se faire sentir au niveau des basses mers, ou des pleines mers, ou affecter également les unes et les autres. Il convient aussi de noter que les inégalités diurnes affectent l'établissement aussi bien que la hauteur de la marée. L'inégalité des hauteurs varie d'un lieu à l'autre et d'un jour à l'autre ; il en sera de même pour la durée des flux et des reflux ainsi que pour l'établissement.

▼ NdT : La marée mixte se comporte tantôt comme une marée semi-diurne (deux pleines mers et deux basses mers par jour lorsque la Lune est à l'équateur), tantôt comme une marée diurne (une pleine mer et une basse mer par jour lorsque la déclinaison de la Lune est proche de son maximum).

\* NdT : Aux trois types précités, l'école hydrographique française en distingue un quatrième, dit des *Marées semi-diurnes à inégalité diurne*, qui diffère des marées mixtes par le fait que la composante diurne est moins marquée et qu'il y a toujours deux cycles de marée par jour, quelle que soit la déclinaison de la Lune.

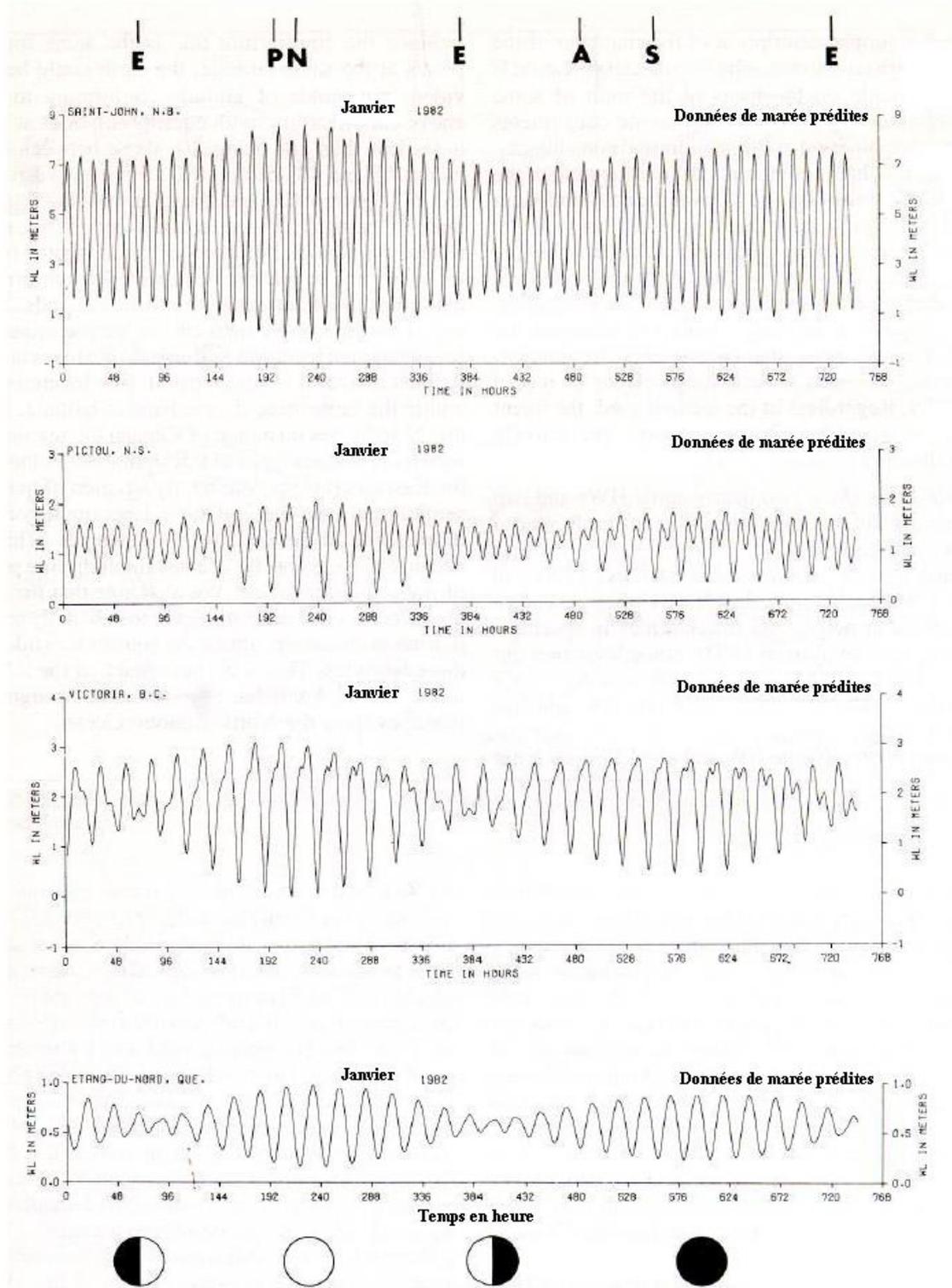


Fig. 5.7

Pour distinguer les deux marées de la journée, des qualificatifs leur ont été donnés : les marées hautes sont appelées « *pleines mers supérieures* » et « *pleines mers inférieures* » tandis que les marées basses prennent les noms de « *basses mers inférieures* » et « *basses mers supérieures* » (voir figure 5.6), ce qui correspond respectivement aux abréviations anglaises HHW, LHW, LLW et HLW. Pour la mesure de l'inégalité diurne, les termes « *inégalité de plein mer* » (DHQ pour *Diurnal High water ineQuality*) et « *inégalité de basse mer* » (DLQ) sont utilisés, le premier étant défini comme la différence entre les

moyennes des pleines mers supérieures et les moyennes des pleines mers, et le second comme la différence entre les moyennes des basses mers inférieures et les moyennes des basses mers.

L'examen de séries d'observations mensuelles, telles que les courbes de la figure 5.7, montre que l'inégalité diurne varie en amplitude en fonction de la déclinaison lunaire. Elle est minimale du 3<sup>e</sup> au 5<sup>e</sup> jour et du 18<sup>e</sup> au 20<sup>e</sup> jour, lorsque la Lune est voisine de l'équateur (E), puis maximale du 11<sup>e</sup> au 13<sup>e</sup> jour et du 25<sup>e</sup> au 27<sup>e</sup> jour lorsque la Lune est à sa déclinaison maximale nord (N) ou sud (S).

#### **2.1.2.4 Effets de côtes et de bassins océaniques**

Bien que les ondes de marée soient générées principalement par la Lune et le Soleil, les dimensions et la forme des bassins océaniques déterminent souvent les caractéristiques de la marée. Par exemple, Pensacola qui n'est certainement pas près du pôle (mais dans une région qui, d'après la figure 5.5, devrait avoir exclusivement des marées diurnes) possède quand même un régime de marées diurnes. Dans le même registre, San Francisco et Hampton Roads qui sont pourtant à la même latitude ont des caractéristiques de marée différentes. De même que l'eau d'une baignoire peut être forcée à osciller d'un bord à l'autre, les mouvements de la marée dans une mer confinée peuvent être accentués par la période naturelle de résonance du bassin. L'océan Pacifique, qui accentue les composantes diurnes des marées, aura tendance à avoir des marées diurnes ou mixtes, tandis que l'Atlantique favorisera les composantes semi-diurnes. Un exemple plus localisé est le nord du Golfe de Mexique qui répond principalement aux composantes diurnes de la marée.

Le type prédominant de marée peut changer sur des distances relativement courtes. Par exemple, la côte est de Floride possède une marée semi-diurne, la plus grande partie de la côte ouest une marée mixte et le reste de la péninsule une marée diurne.

Certaines configurations des fonds et des côtes peuvent augmenter fortement le marnage. De même que les vagues se creusent et déferlent en arrivant sur une plage, l'onde marée augmente en hauteur lorsqu'elle rencontre des petits fonds ou est focalisée par la forme de la côte. L'observation des marnages des observatoires côtiers indique presque toujours une augmentation quand la marée entre dans une baie ou un bras de mer. Le bassin de Cook, en Alaska, qui a la forme d'un entonnoir et des fonds en pente dégradée en offre un bon exemple. Au fur et à mesure de sa progression le long du golfe d'Alaska, le marnage qui était d'environ 3 mètres à l'entrée augmente pour atteindre 10 mètres près d'Anchorage. Au-dessus d'Anchorage, dans le bras de Turnagain, le chenal rétrécit et devient de moins en moins profond. Lors des plus hautes marées, le flot remontant le bras de mer rencontre le jusant résiduel, formant un mur d'eau de près de 2 mètres. Un tel phénomène est connu sous le nom de *mascaret*. Les mascarets se produisent dans de nombreux fleuves ou estuaires du monde soumis à une grande amplitude de marée quand la configuration des côtes et des fonds s'y prête.

#### **2.1.3 Variations du niveau de la mer non liées aux marées**

Les variations du niveau de la mer observées le long des côtes ne sont pas dues seulement aux marées mais résultent également d'autres forces intervenant à d'autres échelles de temps. Aux plus hautes fréquences, le niveau de la mer peut être affecté par les tsunamis, les seiches et les ondes de tempête. Les vents locaux et les changements de pression barométrique peuvent exercer une grande influence, surtout dans les eaux peu profondes. Les vents soufflant du large et les basses pressions barométriques causeront généralement des surcotes par rapport aux niveaux prédits alors que les vents de Terre et les hautes pressions auront l'effet inverse. Les systèmes météorologiques saisonniers très marqués auront des effets sur les niveaux mensuels. Les oscillations d'*El Niño* (*El Niño Southerly Oscillation – ENSO*) affectent les niveaux moyens mensuels dans l'océan Pacifique de manière particulièrement sensible. Des phénomènes à court terme ou saisonniers se rencontreront aussi dans les estuaires sujets à de forts courants de vidange provoqués par l'écoulement naturel des bassins versants ou par le délestage des barrages en amont. Les Grands Lacs sont sensibles aux cycles d'évaporation annuelle et aux gains ou pertes de volume d'eau. Les variations saisonnières de circulation océanique et les singularités des tourbillons peuvent affecter également les hauteurs d'eau à la côte. Selon l'échelle spatiale des phénomènes météorologiques, les effets peuvent être observés dans les grands bassins océaniques, à

l'échelle régionale ou locale. L'hydrographe doit être informé de ces facteurs lors de la préparation et de la conduite des levés afin de distinguer, dans la mesure des hauteurs d'eau, les écarts dus à des causes naturelles et ceux liés au mauvais fonctionnement des marégraphes.

#### 2.1.4 Marée et niveaux de référence

L'hydrographe doit être capable de rapporter les profondeurs mesurées à une référence commune, ou *datum*, indépendamment de l'état de la marée ou du niveau de la mer à l'époque du sondage. Le niveau de référence vertical à partir duquel sont comptées, positivement vers le nadir, les sondes portées sur les cartes marines, et positivement vers le zénith, les hauteurs de marée, s'appelle « zéro hydrographique » ou « zéro des cartes marines ». La plupart des zéros hydrographiques liés à la marée sont calculés sur une période spécifique de 19 ans. Cette période évoquée au § 2.1.2.2 est importante en raison de la modulation des composantes lunaires par la variation à long terme de l'orientation du plan de l'orbite lunaire appelé précession des nœuds.

Le niveau de référence auquel toutes les sondes d'un levé hydrographique sont rapportées est connu sous le nom de « niveau de réduction des sondes » ou « zéro des sondes »\*. Aux États-Unis, les basses mers inférieures moyennes (*Mean Lower Low Water - MLLW*) sont utilisées comme zéro des cartes et zéro des sondes dans les eaux côtières. Ces zéros sont calculés à partir des observations de marée réalisées pendant la période de 19 ans s'étendant de 1983 à 2001 dite NTDE (*National Tidal Datum Epoch*), période qui peut être mise à jour après analyse des changements relatifs des niveaux moyens (cf. § 2.2.8.2). Certains zéros des cartes peuvent aussi être extrapolés à partir d'analyses harmoniques d'observations et de prédictions de marées réalisées sur une période de 19 ans. Au Canada, le zéro des cartes correspond aux basses mers inférieures de vive-eau (*Lower Low Water, Large Tide - LLWLT*) qui est plus bas que le niveau des plus basses mers normales (*Lower Normal Tide - LNT*) anciennement utilisé. Les cartes marines britanniques utilisent maintenant, comme la France depuis longtemps, « la basse mer astronomique extrême » (*Lowest Astronomical Tide - LAT*) » basée sur une prédiction couvrant une période de 19 ans. La LAT est déterminée par analyse harmonique des observations en un lieu donné, suivie d'une prédiction de la plus basse mer pendant la période de 19 ans utilisant les constantes harmoniques résultantes. L'usage de la LAT a été adopté par l'OHI. L'analyse harmonique a également été utilisée pour déterminer d'autres zéros des cartes, tels que la Basse mer moyenne de vive-eau (*Mean Low Water Springs - MLWS*) ou encore la Basse mer de vive-eau des Indes (*Indian Spring Low Water - ISLW*) qu'on trouve sur quelques-unes des cartes marines les plus anciennes du Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO). Les MLWS et les ISLW sont déduites des niveaux moyens locaux par soustraction de la somme des amplitudes des principales constantes harmoniques.

Dans les régions où les marées sont faibles ou nulles, d'autres *datums* sont utilisés. En Mer Noire, le niveau moyen fournit la référence. Dans les Grands lacs, le Canada et les États-Unis utilisent une référence fixe calée sur les basses eaux (*Low Water Datum - LWD*), différente pour chaque lac et basée sur les analyses des moyennes mensuelles en périodes de basses eaux. Dans les lagunes et les baies des États-Unis où se fait la transition entre les marées et l'absence de marée, le zéro hydrographique des basses eaux (LWD) est déterminé par soustraction de 0,2 m du niveau moyen local, déterminé par observations et ajusté sur une période de 19 ans.

Il existe aussi toute une variété de zéros locaux pour les estuaires soumis à la marée. Aux États-Unis, certains zéros des cartes sont calculés à partir de mesures effectuées pendant les périodes d'étiage d'une certaine durée et sont conservés tels quels par la suite pour des raisons de stabilité cartographique. Par exemple, les zéros hydrographiques des rivières Hudson et Columbia sont dérivés des MLLW calés sur les observations effectuées pendant les périodes d'étiage annuelles.

---

\* NdT : Le zéro des sondes est en principe identique au zéro hydrographique (cf Dictionnaire hydrographique S-32 5<sup>ème</sup> édition – Art. 1225). Il peut cependant subsister une ambiguïté dans le cas du levé d'une zone jamais hydrographiée où le directeur technique est contraint d'adopter un zéro provisoire pour la réduction des sondages. Après analyse des observations de marée, ce zéro des sondes est modifié ; il devient alors le zéro hydrographique.

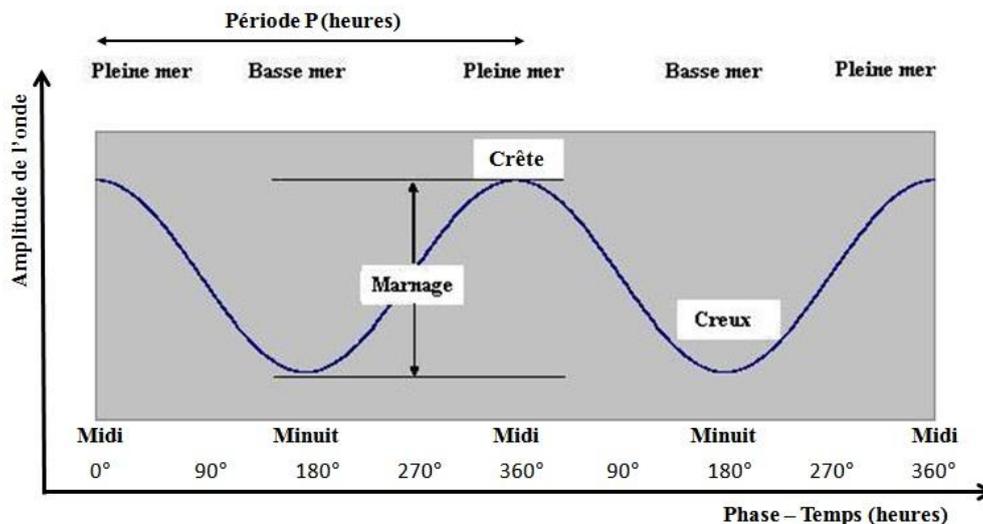
Le niveau de référence est un plan local coté qui ne s'applique que dans les zones pour lesquelles des mesures de hauteur d'eau ont été effectuées. Qu'il soit situé ou non dans une zone soumise aux marées, ce plan est toujours rattaché au nivellement terrestre par cheminement entre l'observatoire de marée et le réseau de repères de nivellement. Les procédures de calcul pour la détermination du zéro hydrographique seront décrites ultérieurement.

Les zéros hydrographiques sont complètement différents des références géodésiques verticales. Actuellement les États-Unis et le Canada utilisent le Système de référence altimétrique nord-américain de 1988 (*North American Vertical Datum - NAVD 88*) et le Système international des Grands Lacs de 1985 (*International Great Lakes Datum - IGLD 1985*) pour les besoins géodésiques. Les relations entre le NAVD 88 (ou l'IGLD 85) et les niveaux moyens locaux varient énormément d'un lieu à l'autre. En réalité, il est impossible de passer d'un zéro hydrographique en un lieu donné à un autre par simple nivellement géodésique sans prendre en considération les conditions locales de la marée. Cependant, le réseau géodésique permet d'établir la relation entre les différents repères de marée d'Amérique du Nord et le système de référence vertical. Ce dernier peut alors être utilisé pour retrouver, par nivellement topographique ou par GPS, les zéros hydrographiques locaux quand les repères de marée ont disparu.

### 2.1.5 Analyse harmonique et prédiction de la marée

Chaque composante de la marée décrite auparavant peut être représentée par une sinusoïde telle que schématisée à la figure 5.8. L'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical l'amplitude de la force génératrice. Les crêtes représentent les maximums d'amplitude et les creux les minimums. Par exemple, sur la figure 5.8 qui est relative au système Soleil-Terre, le midi avec le Soleil à la verticale correspond à la première crête. Six heures plus tard l'onde passe par un minimum. Un deuxième maximum se produit à minuit avec une deuxième crête, suivi par un deuxième creux à l'aube et retour vers la crête originale à midi.

Chacune des forces génératrices de la marée, connue sous le nom de composante de la marée ou d'onde de marée, peut être représentée par une sinusoïde. Par exemple la composante ci-dessus est la composante semi-diurne solaire principale ; elle est associée au symbole alphanumérique  $S_2$  où  $S$  représente le Soleil. On associera de même au symbole  $M_2$  la composante semi-diurne lunaire principale,  $M$  désignant la Lune. L'indice « 2 » signifie qu'il y a deux cycles complets pour chaque cycle astronomique, c'est à dire que les composantes sont semi-diurnes. Par ailleurs, les composantes sont caractérisées par leur période  $P$  (temps séparant deux mêmes extremums) ; ainsi la période de  $S_2$  est-elle de 12 heures solaires ; celle de  $M_2$  est de 12,42 heures solaires.



From S. Hicks (2004)

Fig. 5.8 « Onde de marée »

Chaque composante est souvent décrite par sa vitesse angulaire (ou fréquence, en degrés par heure). La sinusoïde étant divisée en  $360^\circ$  (de crête à crête), la vitesse angulaire  $n$  de la composante est  $360^\circ/P$ . Pour  $S_2$ ,  $n = 360^\circ/12,00 = 30^\circ/\text{heure}$  ; pour  $M_2$ ,  $n = 360^\circ/12,42 = 28,984^\circ/\text{heure}$ .

Il y a un nombre infini de composantes pour décrire la plupart des perturbations dues aux mouvements relatifs du Soleil, de la Lune, et de la Terre (y-compris les distances et la déclinaison), mais les effets résiduels des composantes au-delà de la  $37^\circ$  environ sont extrêmement faibles pour la plus grande partie des côtes des États-Unis. Cependant, dans les régions complexes influencées par les marées d'estuaires, telles qu'Anchorage en Alaska et Philadelphie en Pennsylvanie, il faut plus de cent composantes pour décrire convenablement la courbe de marée. Les composantes supplémentaires sont des artifices de calcul qui combinent les composantes fondamentales diurnes et semi-diurnes pour produire des termes à haute fréquence (de 3 à 13 cycles par jour) introduits afin de décrire les effets non linéaires des frottements sur le fond dans les eaux peu profondes.

Les représentations des divers paramètres astronomiques et la détermination de leurs périodes et vitesses angulaires sont essentielles pour comprendre les techniques de l'analyse harmonique. Le développement des composantes utilisées pour décrire les frottements, les eaux peu profondes et les influences complexes agissant sur la marée n'est pas inclus dans ce chapitre.

La composante semi-diurne **principale solaire**  $S_2$  représente la rotation, rapportée au Soleil, de la Terre autour de son axe. En 24 heures solaires moyennes, la Terre tourne de  $360^\circ$ , soit une vitesse angulaire de l'ordre de  $360^\circ/24 = 15^\circ/\text{h}$ . Cependant, le maximum de force génératrice se produit à midi sous le Soleil et à minuit du côté opposé, aussi la période (entre maximums) de la composante est-elle de 12 heures solaires moyennes et la vitesse angulaire de  $S_2$  est  $360^\circ/12 = 30^\circ/\text{heure}$ .

La composante semi-diurne **principale lunaire**  $M_2$  représente la rotation, rapportée à la Lune, de la Terre autour de son axe. Comme la Lune progresse vers l'est, il lui faut 24,8412 heures solaires moyennes pour qu'elle retrouve la même position et comme il y a également deux maximums pendant une journée lunaire, la période moyenne n'est que de 12,4206 heures solaire et la vitesse de l'onde  $M_2$  est égale à  $360^\circ/12,4206 = 28,984^\circ/\text{heure}$ .

Le passage en phase de  $S_2$  et  $M_2$  (alignement des maximums) et leur passage en opposition (alignement du maximum de l'un avec le minimum de l'autre) produisent respectivement la vive-eau et la morte-eau (figure 5.3). Les marées de vive-eau se produisent lors de la pleine Lune et de la nouvelle Lune alors que les marées de morte-eau se produisent lors du premier et du dernier quartier. La révolution de la Lune autour de la Terre relativement au Soleil, appelée mois synodique ou lunaison, se fait en 29,5306 jours. Du fait des deux maximums, il se produit une marée de vive-eau tous les  $29,5306/2 = 14,765$  jours, suivie par une marée de morte-eau 7,383 jours plus tard.

Les composantes semi-diurnes **majeure elliptique lunaire**  $N_2$  et **mineure elliptique lunaire**  $L_2$  sont conçues pour simuler le cycle de passage à deux périgées consécutifs (mois anomalistique). Ce sont des composantes entièrement artificielles contrairement à  $S_2$  et à  $M_2$  qui sont en relation directe avec l'enveloppe luni-solaire des forces génératrices de la marée. Le mois anomalistique vaut 27,5546 jours, soit 661,31 heures solaires moyennes et la vitesse du périgée est donc  $360^\circ/661,31 = 0,544^\circ/\text{h}$ . Comme le phénomène est lié à la Lune et que la vitesse de  $M_2$  est de  $28,984^\circ/\text{h}$ , les vitesses angulaires des composantes  $N_2$  et  $L_2$  sont par conséquent :

$$\begin{aligned} N_2 : & 28,984 - 0,544 = 28,440^\circ/\text{h}. \\ L_2 : & 28,984 + 0,544 = 29,528^\circ/\text{h}. \end{aligned}$$

Ainsi, quand  $N_2$  et  $L_2$  sont en phase chaque mois anomalistique, ils s'ajoutent à  $M_2$  pour simuler la proximité de la Lune (périgée). 13,7773 jours plus tard,  $N_2$  et  $L_2$  sont en opposition et simulent alors son éloignement (apogée).

La composante diurne de **déclinaison luni-solaire**  $K_1$  et la composante diurne **principale lunaire**  $O_1$  sont aussi des composantes artificielles conçues pour simuler le cycle de passage à deux déclinaisons identiques consécutives de la Lune. Ce cycle se produit tous les 27,3216 jours (mois tropique) soit 655,72 heures solaires moyennes ; il est le même pour les déclinaisons nord et sud, le passage d'un extrême à l'autre se faisant en  $655,72/2 = 327,86$  heures et la vitesse angulaire qui s'ajoute ou se retranche à celle de  $M_2$  étant alors de  $360^\circ/327,86 = 1,098^\circ/h$ . Comme le maximum ne se produit qu'une fois par jour, les vitesses angulaires des composantes  $K_1$  et  $O_1$  seront divisées par 2 :

$$\begin{aligned} K_1 : & \quad (28,984 + 1,098)/2 = 15,041^\circ/h. \\ O_1 : & \quad (28,984 - 1,098)/2 = 13,943^\circ/h. \end{aligned}$$

Ainsi, quand  $K_1$  et  $O_1$  sont en phase, tous les 13,6608 jours (soit la moitié des mois tropiques rapportés à l'équinoxe du printemps), ils s'ajoutent à  $M_2$  pour simuler la déclinaison maximale de la Lune vers le nord ou vers le sud. Ils expliquent l'inégalité diurne due à la Lune (les deux marées hautes et/ou les deux marées basses quotidiennes inégales) et dans le cas extrême, les marées diurnes (une pleine mer et une basse mer quotidienne).

La composante diurne de **déclinaison luni-solaire**  $K_1$ , et la composante diurne **principale solaire**  $P_1$ , sont conçues pour simuler le cycle de passage à deux déclinaisons identiques consécutives du Soleil. Ce cycle se produit tous les 365,2422 jours (année tropique) soit 8 765,81 heures solaires moyennes ; il est le même pour les déclinaisons nord et sud, le passage d'un extrême à l'autre se faisant en  $8\,765,81/2 = 4\,382,91$  heures et la vitesse angulaire qui s'ajoute ou se retranche à celle de  $S_2$  étant alors de  $360^\circ/4\,382,91 = 0,082^\circ/h$ . Comme le maximum ne se produit qu'une fois par jour, les vitesses des constituantes  $K_1$  et  $P_1$  seront divisées par 2 :

$$\begin{aligned} K_1 : & \quad (30,000 + 0,082)/2 = 15,041^\circ/h. \\ P_1 : & \quad (30,000 - 0,082)/2 = 14,959^\circ/h. \end{aligned}$$

Ainsi, quand  $K_1$  et  $P_1$  sont en phase tous les 182,62 jours (soit la moitié de l'année tropique comptée à partir de l'équinoxe du printemps), ils s'ajoutent à  $S_2$  pour simuler la déclinaison maximale nord ou sud du Soleil. Ces composantes contribuent aussi à l'inégalité diurne.

Les amplitudes théoriques relatives des différentes composantes sont également intéressantes. Cependant, on doit se souvenir qu'elles sont calculées à partir des forces génératrices et ne sont pas nécessairement celles de la marée observée. Elles sont basées sur la valeur de  $M_2$ , qui est habituellement la composante dominante. Les amplitudes relatives des composantes, exprimées en % par rapport à  $M_2$ , en regard de leurs périodes ( $360^\circ/vitesse$ ), sont :

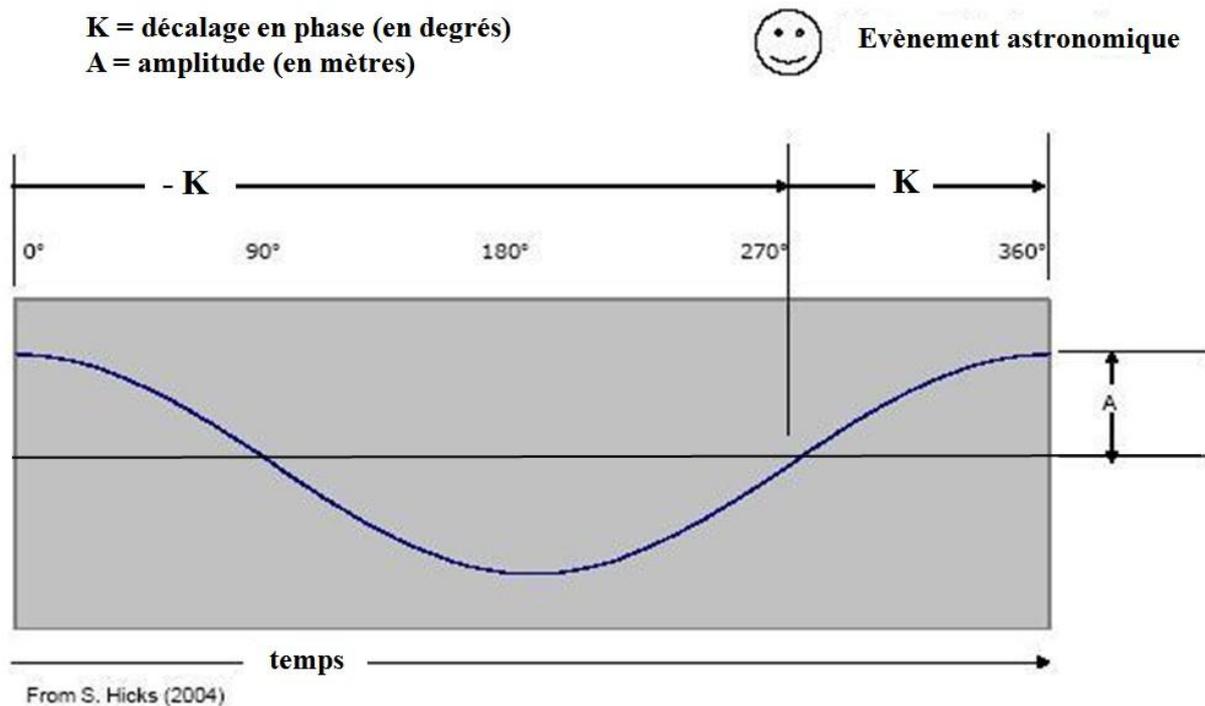
$M_2$	100	12,42 h.
$S_2$	46	12,00 h.
$O_1$	41	25,82 h.
$K_1$	40	23,93 h.
$N_2$	20	12,66 h.
$P_1$	19	24,07 h.
$L_2$	03	12,19 h.

### 2.1.5.1 Analyse harmonique

Le processus mathématique consistant à déterminer une composante à partir d'une période suffisamment longue d'observations est appelée « analyse harmonique ». Généralement, une année d'observations est souhaitable mais un mois peut fournir des résultats adéquats quand les marées semi-diurnes sont dominantes. Aux États-Unis, les analyses sont exécutées normalement pour 37 composantes bien que nombre d'entre elles aient des valeurs insignifiantes en plusieurs endroits.

L'analyse harmonique d'une série chronologique d'observations permet de déterminer deux valeurs

pour chaque composante de la marée. La première est l'amplitude, ou distance verticale entre le niveau moyen et la crête de la sinusoïde ; la seconde est le décalage en phase, ou époque. Le décalage en phase est le temps écoulé entre l'événement astronomique et le premier maximum de la composante correspondante. Ce décalage est exprimé habituellement en degrés sur la sinusoïde complète (360°) de la composante. Ces deux valeurs sont connues sous le nom de **constantes harmoniques** et sont illustrées à la figure 5.9. Il faut souligner qu'elles sont spécifiques du lieu où elles ont été observées. Les composantes harmoniques sont considérées comme constantes alors que dans la réalité, elles ne le sont pas totalement car les valeurs calculées sont affectées par le bruit du signal, la durée des observations, etc. Les constantes utilisées sont considérées comme les meilleures approximations des valeurs réelles, quoiqu'inconnues. Quand une modification de la topographie intervient, qu'elle soit naturelle ou non, telle qu'un projet d'infrastructure, dragage ou construction d'épi, phénomène d'érosion ou d'engrèvement, etc. une nouvelle analyse harmonique doit être exécutée.



**Fig. 5.9 « Amplitude et décalage en phase d'une composante harmonique »**

### 2.1.5.2 Prédiction de la marée

Pour prédire la marée, pendant une année par exemple, il est nécessaire de connaître les constantes harmoniques (amplitudes et phases) pour chaque port où les prédictions sont demandées. Celles-ci sont obtenues par analyse harmonique en chaque zone comme décrit ci-dessus. Les ajustements sont calculés à partir des configurations astronomiques du début de l'année. Pour une composante donnée, le premier maximum de chaque sinusoïde suivant un événement astronomique est obtenu en ajoutant la constante de décalage en phase. L'amplitude de chaque sinusoïde est celle de l'analyse harmonique.

Après addition de toutes les amplitudes pour toutes les heures de l'année, on aboutit à une courbe résultante très semblable en forme et en dimension aux marégrammes observés.

Les heures et les hauteurs des pleines mers et des basses mers sont listées dans les annuaires de marée pour l'année suivante. Le grand nombre de prédictions contenues dans ces annuaires est réalisé en appliquant les corrections aux lieux dont les constantes harmoniques ont été déterminées, dits ports de

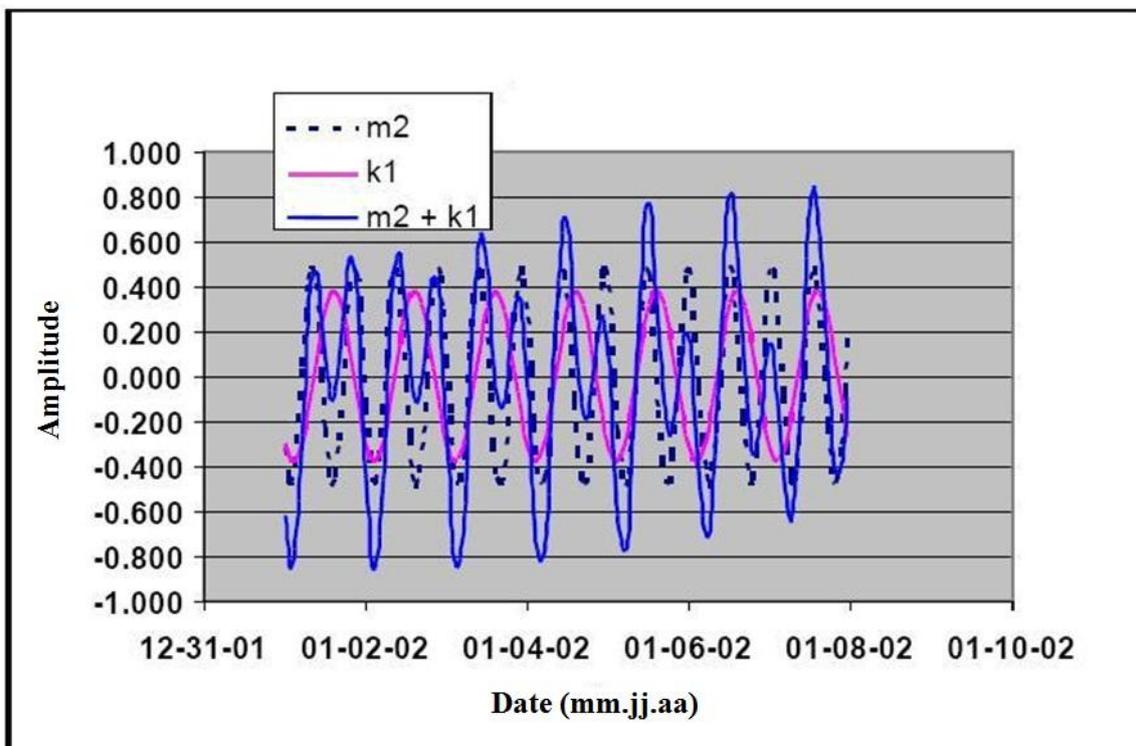
référence ; elles s'appliquent également aux ports secondaires (sans constantes harmoniques) qui sont raccordés aux ports de référence avoisinants par des formules empiriques.

Le type de marée en un lieu donné est largement fonction des déclinaisons du Soleil et de la Lune qui varient constamment. Il en résulte que les marées changent tous les mois et toute l'année en de nombreux endroits. Il existe un système de classification plus rigoureux utilisant le rapport suivant des amplitudes des principales composantes en chaque zone :

$$\frac{K1 + O1}{M2 + S2}$$

Quand ce ratio est inférieur à 0,25, la marée est classée comme semi-diurne ; quand il est compris entre 0,25 et 1,5 la marée est semi-diurne à inégalités diurnes ; quand il est compris entre 1,6 et 3, la marée est mixte et quand il est supérieur à 3, elle est diurne.

La variation bimensuelle de l'inégalité diurne peut être expliquée en observant la combinaison des composantes diurnes et semi-diurnes de la marée représentées sur la figure 5.10. La composante semi-diurne est représentée par des tiretés noirs et la composante diurne par un trait continu violet. Il apparaît clairement que la marée résultante en trait continu bleu est la somme des deux composantes.



**Fig. 5.10 « L'inégalité diurne expliquée par la somme des composantes diurnes et semi-diurnes »**

Les marnages relatifs des deux composantes, ainsi que leurs époques en tous points, dépendent non seulement de l'amplitude relative et de la phase des forces génératrices de la marée, mais aussi des caractéristiques hydrodynamiques du bassin. Pour cette dernière raison, une même force de marée peut générer des composantes diurnes et semi-diurnes différentes en temps et en amplitude selon les zones. La figure 5.10 représente un cas simple de marée semi-diurne à forte inégalité diurne où les marnages des deux composantes sont voisins, mais où les heures relatives et les amplitudes des pleines mers et des basses mers résultantes varient selon que les deux composantes sont en phase ou non. Dans la partie gauche du diagramme où les minimums des deux composantes sont en phase, l'inégalité se manifeste surtout aux basses mers tandis que dans la partie droite où ce sont les maximums des composantes qui sont en phase, l'inégalité se manifeste au niveau des pleines mers. Enfin, pour la partie intermédiaire où les deux composantes passent par le niveau moyen au même moment,

l'inégalité se manifeste autant sur les pleines mers que sur les basses mers. Ce diagramme est représentatif des trois subdivisions qui caractérisent les inégalités diurnes.

Pour les marées réelles, non seulement les époques des composantes évoluent différemment mais il en est de même pour leurs marnages respectifs. En se référant au diagramme 5.10, si le marnage de la composante semi-diurne (en tiretés) demeurait sans changement alors que celui de la composante diurne (en trait continu violet) augmentait, on remarquerait que la pleine mer inférieure deviendrait plus basse tandis que la basse mer supérieure deviendrait plus haute. Quand le marnage de la composante diurne devient le double de celui de la composante semi-diurne, la pleine mer inférieure et la basse mer supérieure deviennent égales en hauteurs et produisent une marée évanescence. Le marnage de la composante diurne augmentant de plus en plus, il finira par ne plus y avoir qu'une seule pleine mer et une seule basse mer par jour, c'est-à-dire une marée diurne. En combinant les effets de phase et de marnage, on constate que si l'amplitude de la composante diurne est inférieure à deux fois celle de la composante semi-diurne, il y aura deux pleines mers et deux basses mers chaque jour ; si le marnage diurne est compris entre deux et quatre fois celui de la composante semi-diurne, il peut y avoir deux pleines mers et deux basses mers quotidiennes, ou une seule de chaque ; si le marnage diurne dépasse quatre fois le semi-diurne, il n'y aura plus qu'une pleine mer et une basse mer par jour.

Il convient enfin de noter que les amplitudes des deux forces diurnes et semi-diurnes varient au cours du mois, la première étant plus grande aux déclinaisons maximales nord et sud, alors que la seconde est au maximum lorsque la Lune est au-dessus de l'équateur. En conclusion, en un lieu donné, la marée est sujette à toutes sortes d'inégalités, quelle que soit la quinzaine.

En réalité, il y a plus de 70 composantes qui se combinent pour produire la marée résultante. Parmi celles-ci, il y a quatre composantes semi-diurnes majeures et trois composantes diurnes majeures qui se combinent entre elles pour produire la marée résultante représentée à la figure 5.11.

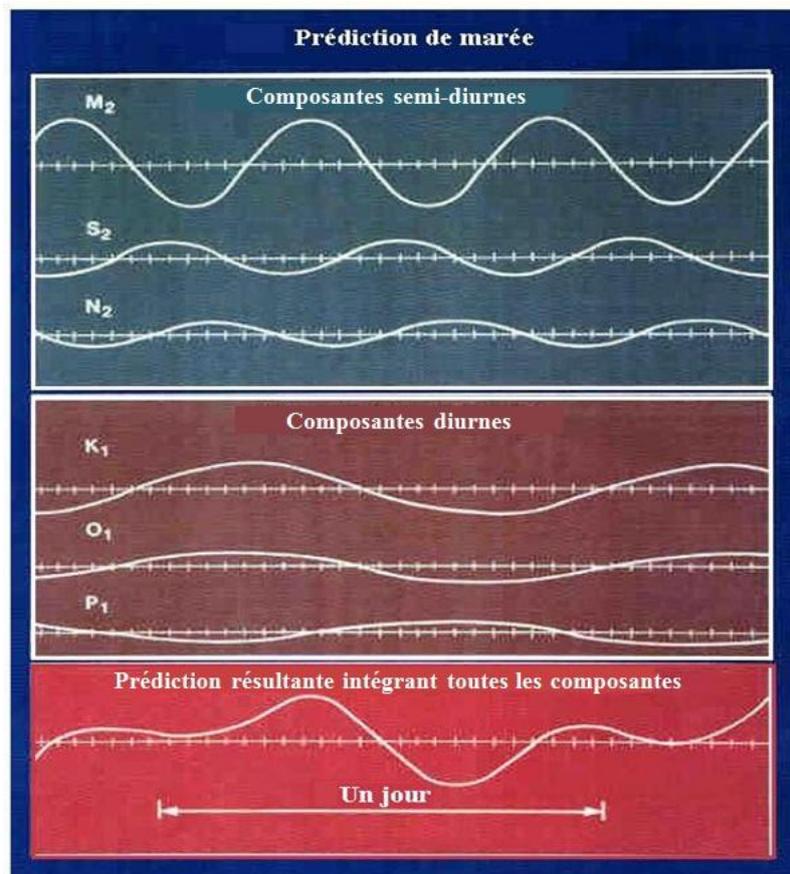


Fig. 5.11

Chaque composante dépend du mouvement de la Terre, de la Lune ou du Soleil ou d'une combinaison des trois. Les plus importantes de ces composantes effectuent leur cycle en un mois et toutes, sauf les plus insignifiantes, le complètent approximativement en 18,6 ans. La durée d'observation de 19 ans requise pour un observatoire de marée de référence est basée sur cette valeur. Un entier de 19 ans est préféré à la période des 18,6 ans de la précession des nœuds lunaires parce que les variations saisonnières sont souvent beaucoup plus grandes que certaines composantes astronomiques mineures.

## **2.2 Place des marées dans les levés hydrographiques**

Les paragraphes qui suivent traitent de la réduction des sondes et des niveaux de référence dans un levé hydrographique. Cette réduction porte sur les aspects suivants :

- a. spécifications relatives à la marée et aux niveaux de réduction des sondes ;
- b. détermination préalable des zones de marée et des niveaux de réduction des sondes ;
- c. mise en œuvre et contrôle des observatoires de référence ;
- d. installation, mise en œuvre et démontage des observatoires secondaires ;
- e. contrôle de qualité des données marégraphiques, traitement, et mise en forme ;
- f. calcul du zéro hydrographique et récupération d'un zéro historique ;
- g. réduction des sondages bathymétriques.

### **2.2.1 Budget d'erreurs**

La réduction des sondes au zéro hydrographique est une correction très significative, particulièrement dans les eaux peu profondes soumises à un marnage relativement important ; les erreurs qui lui sont associées ne dépendent généralement pas des profondeurs. La contribution de la réduction des sondes au bilan d'erreurs doit être examinée en regard des autres erreurs afin de s'assurer que le budget total des erreurs ne sera pas dépassé. Une contribution admissible de l'erreur de réduction des sondes au budget total des erreurs du levé pourrait être de 0,20 m à 0,45 m selon la complexité de la marée.

L'erreur totale imputable à la marée et à la réduction des sondes comporte :

- a. L'erreur de mesure du marégraphe/capteur et l'erreur de réduction des sondes au niveau de référence (Voir S-44 de l'OHI, 5<sup>e</sup> édition 2008, Chapitre 3). L'erreur de traitement inclut l'interpolation de la marée au moment exact du sondage. Une valeur standard de l'erreur de traitement est de 10 cm (avec un degré de confiance à 95%).
- b. L'erreur de calcul due à l'application d'un premier algorithme de réduction des sondes et à l'extrapolation des observations de courte durée sur la période de 19 ans. Plus la durée des observations sera courte, moins précis sera le zéro de référence et plus grande l'erreur. De même, un mauvais choix d'observatoire de référence diminuera la précision. Le NOAA a conclu que l'erreur estimée, pour un niveau de référence établi sur un mois d'observations, est de 8 cm pour les côtes de l'Atlantique et du Pacifique et de 11 cm pour le Golfe de Mexique (avec un degré de confiance à 95%).
- c. L'erreur de traitement des zones de marée : ce traitement consiste à extrapoler ou à interpoler en chaque point de la zone levée les différences de temps et de marnage observés dans une ou plusieurs stations de référence connues. Plus l'extrapolation ou l'interpolation est grande, plus il y aura d'incertitudes et d'erreurs. Un ordre de grandeur standard pour une erreur de ce type est de l'ordre de 20 cm, avec un degré de confiance à 95%. Cependant, cette erreur peut facilement dépasser 20 cm si les caractéristiques de la marée sont complexes ou mal définies et si la marée est influencée par des facteurs météorologiques variables dans la zone du levé.

### **2.2.2 Spécifications relatives à la marée et aux niveaux de réduction des sondes**

La planification des spécifications relatives à la marée et aux niveaux de référence pour un levé hydrographique nécessite de prendre en compte chacun des sept aspects cités au § 2.2. En vue de réaliser un levé complet incluant l'élaboration d'un produit final, cette planification implique :

- a) la détermination du budget d'erreur ;
- b) l'étude des caractéristiques de la marée et des niveaux de réduction des sondes ainsi que l'environnement météorologique et océanographique ;
- c) la détermination des observatoires de référence et des points de contrôle vertical existant dans la zone, la mise en place et l'entretien des observatoires temporaires, sans oublier le GPS différentiel et les rattachements au réseau géodésique ;
- d) la construction d'un diagramme de lignes cotidales ou d'égal marnage ;
- e) la mise au point d'une méthode opérationnelle d'acquisition de données, de contrôle de qualité, de traitement des données et de méthodes d'analyse ;
- f) l'adoption des zones de marée et des niveaux de réduction (zéro hydrographique) définitifs, la correction des sondes portées sur les minutes de bathymétrie et l'estimation du budget d'erreur final.

La planification du projet a pour objet de minimiser et d'équilibrer les sources potentielles d'erreurs en rationalisant la mise en œuvre des marégraphes, la répartition des observatoires et des durées d'observation et en choisissant les zones de marée en fonction des limites de la zone et de la durée du levé. Les limites pratiques dépendent des caractéristiques de la marée et de la configuration de la côte pour l'installation et la mise en œuvre des marégraphes.

L'hydrographe doit organiser les travaux de façon à obtenir des observations marégraphiques précises et continues. Toute interruption de la série de mesures affecte la réduction des sondes et le modèle de marée qui devra être complété par interpolations. Si en un emplacement critique pour le levé, la marée ne peut pas être transmise ou enregistrée, un marégraphe indépendant de secours ou un système redondant de recueil des hauteurs d'eau devra être mis en œuvre pendant les travaux.

Les emplacements des marégraphes doivent être sélectionnés de façon à répondre à deux critères. Premièrement, le réseau d'observatoires doit être suffisamment dense et bien réparti pour décrire convenablement le régime de la marée dans la zone à sonder. Deuxièmement, les sites spécifiés doivent permettre d'effectuer des mesures précises sur toute l'étendue du marnage.

La densité et la distribution des marégraphes doit être adaptée aux variations des hauteurs d'eau (normalement dues à la marée) dans la zone du levé. La sensibilité des enregistrements doit permettre de mesurer toute variation de 10 cm dans les zones où le marnage est  $\leq 3$  m, 20 cm dans les zones où il dépasse 3 m et de déterminer des intervalles de temps de 0,3 heure.

Pour la détermination des besoins, les caractéristiques de la marée doivent être évaluées dans leur contexte géographique général. Les régimes de marée et les changements de types (semi-diurne, diurne ou mixte) sont analysés. Le déplacement de l'onde marée et sa force sont évalués en fonction des caractéristiques météorologiques locales et saisonnières. Les transitions intertidales sont particulièrement importantes car la détermination des basses eaux dans les zones non soumises à l'influence de la marée font l'objet d'un traitement particulier.

On passe ensuite au contexte géographique local. La marée subit des changements complexes dans les chenaux étroits, les petits-fonds étendus et les passages resserrés. Les lagunes peuvent connaître un phénomène de *cutoff* lors de la baissée et le débit constant des fleuves affecte la marée à tous les stades. Dans les golfes peu profonds sujets à un faible marnage, le vent joue un rôle important et affecte la marée en temps et en hauteur. Il en est de même pour les plateaux ou le long des côtes bordées par des eaux peu profondes. Les interventions humaines, telles que digues, dragages, barrages, levées, prises d'eau, opérations de déversements, etc., peuvent aussi avoir des impacts significatifs.

Ces analyses étant faites, les emplacements approximatifs des marégraphes sont identifiés. Des stations sont normalement implantées de part et d'autre des obstacles significatifs à la progression de l'onde marée, à intervalles réguliers dans les zones de petits-fonds et dans les étranglements d'estuaires, à la limite des zones navigables et hydrographiées des fleuves et des cours d'eau, des deux côtés des limites des zones sujettes ou non à la marée et des transitions entre types diurnes, mixtes ou semi-diurnes. Les marégraphes sont généralement implantés à la périphérie de la zone à lever afin d'éviter les extrapolations. Quand le levé concerne un chenal à peine plus profond que les tirants d'eau

des navires qui l'empruntent, les hauteurs d'eau fournies par un unique marégraphe côtier peuvent être insuffisantes pour une réduction précise des sondes et il peut être souhaitable d'installer un marégraphe supplémentaire à l'ouvert. Une certaine redondance est normalement assurée de telle sorte que la zone du levé soit couverte par deux marégraphes au moins. Cette redondance facilite les interpolations et offre une sécurité en cas de mauvais fonctionnement de l'un des marégraphes

Dans de nombreux cas, les sources historiques peuvent aider à la planification de la couverture marégraphique. Les informations sur les observatoires principaux et secondaires ainsi que sur les données marégraphiques recueillies lors des levés précédents fournissent de bonnes indications sur le nombre et l'emplacement des marégraphes nécessaires pour le nouveau levé. Quand l'information historique fait défaut, le responsable de la planification doit estimer les besoins en analysant les données des régions environnantes présentant des caractéristiques physiques similaires. Dans de tels cas, il vaut mieux surévaluer le nombre de marégraphes plutôt que d'être incapable de couvrir la totalité de la zone du levé car les sondages acquis avec un contrôle insuffisant des hauteurs d'eau ne peuvent pas être corrigés avec les données de marégraphes implantés après coup.

### **2.2.3 Détermination préalable des zones de marée et des niveaux de réduction des sondes.**

Le découpage en zones de marée ayant un même zéro hydrographique est un outil pour l'interpolation ou l'extrapolation des variations de hauteurs d'eau à partir des observations des marégraphes proches de la zone du levé. Parfois, l'interpolation ou l'extrapolation n'est pas nécessaire et les réductions peuvent être observées directement sur un marégraphe calé sur le zéro hydrographique, mais dans la plupart des cas, les stations existantes ne sont pas assez proches de la zone du levé ; ou il n'est pas réaliste d'implanter suffisamment de marégraphes pour fournir un contrôle direct en chaque endroit. Les erreurs d'interpolation et d'extrapolation doivent être analysées en regard du budget d'erreur total. Plus il y aura de marégraphes dans la zone, moins grande sera l'erreur de découpage en zones de marée, mais plus coûteux et logistiquement complexes seront les travaux.

Tout schéma de découpage en zones de marée nécessite une étude océanographique de la variation du niveau de la mer dans la région du levé. Dans les régions soumises aux marées, une carte de lignes cotidales en fonction du temps et du marnage est construite à partir des données historiques, de modèles hydrodynamiques et d'autres sources d'information. En se basant sur la rapidité de progression de l'amplitude et du marnage dans la région du levé, on utilise les lignes cotidales pour définir des zones discrètes présentant les mêmes caractéristiques de temps et de marnage. Une fois la carte construite, des corrections de temps et d'amplitude peuvent être appliquées aux différents points situés entre les marégraphes implantés dans la zone.

Les techniques décrites ci-dessus doivent fournir des algorithmes de correction dans le voisinage des marégraphes. Il arrivera cependant que certaines parties de la zone du levé se trouveront entre deux observatoires de marées différentes ; les algorithmes de correction de ces zones intermédiaires devront alors être interpolés, ce que le découpage doit permettre de faire. À défaut d'un tel découpage, ou si celui-ci est inadapté, l'hydrographe devra établir des cartes de lignes cotidales et d'iso-marnage à partir des données observées au préalable.

Une carte cotidale représente les lieux des points où la marée se produit à la même heure ; le tracé en cours de levé représentera les lignes reliant les points où les pleines mers et basses mer se produisent à des intervalles de temps donnés par rapport à l'heure de la marée de l'observatoire de référence.

Par analogie, les cartes d'isomarnage représentent les lignes d'égale amplitude caractérisées par un même écart par rapport à l'observatoire de référence. Ce rattachement aux observatoires de référence facilite la préparation des algorithmes de réductions des sondages. Les figures 5.12 et 5.13 sont des exemples de cartes de lignes cotidales et d'isomarnage établies pour un levé fictif.

*Carte de lignes cotidales :* Elles sont construites généralement au moyen d'un SIG. L'exemple de la figure 5.12 est une méthode manuelle simple destinée à illustrer les principes de construction. Pour dresser une carte cotidale, l'hydrographe commence par porter sur une minute de la région du levé les observatoires de référence ainsi que les marégraphes secondaires, tertiaires et de courte durée. Les meilleurs résultats sont obtenus quand la zone à lever est située à l'intérieur d'un triangle équilatéral

ou d'un quadrilatère formée par les marégraphes. On note en chaque station le décalage de temps entre l'arrivée de la pleine mer ou de la basse mer et celles de l'observatoire de référence.

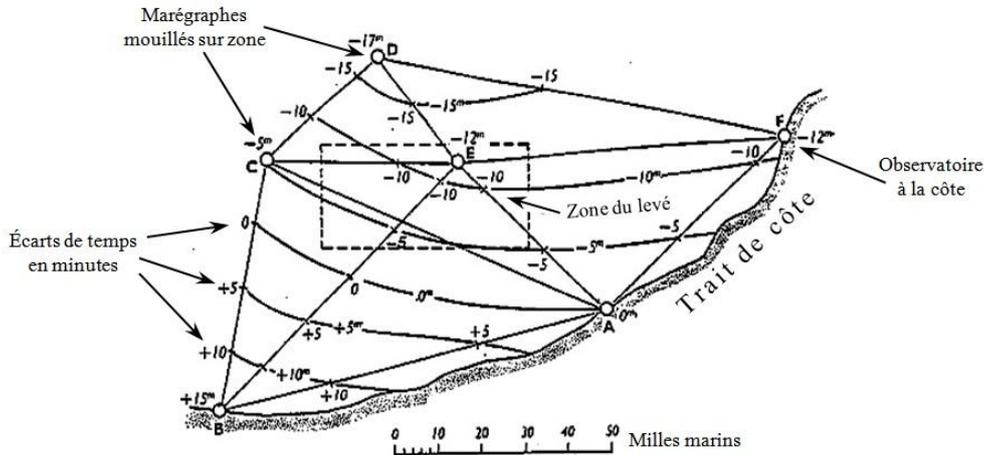


Fig. 5.12 « Construction d'une carte de lignes cotidales »

Les stations adjacentes et opposées sont reliées par des droites sur lesquelles sont portés les intervalles de temps choisis en fonction du marnage et de la précision de réduction recherchée, 5 à 10 minutes dans la plupart des cas. Les lignes correspondant aux mêmes intervalles sont tracées en continu. Quand deux points interpolés sont en conflit, la préférence est donnée à la ligne la plus courte et aux courbes qui coupent les droites le plus perpendiculairement possible. Dans de nombreux cas, les zones sont trop complexes pour une interpolation aussi simple que celle décrite ci-dessus et les cartes cotidales doivent être construites par un océanographe à l'aide d'un SIG.

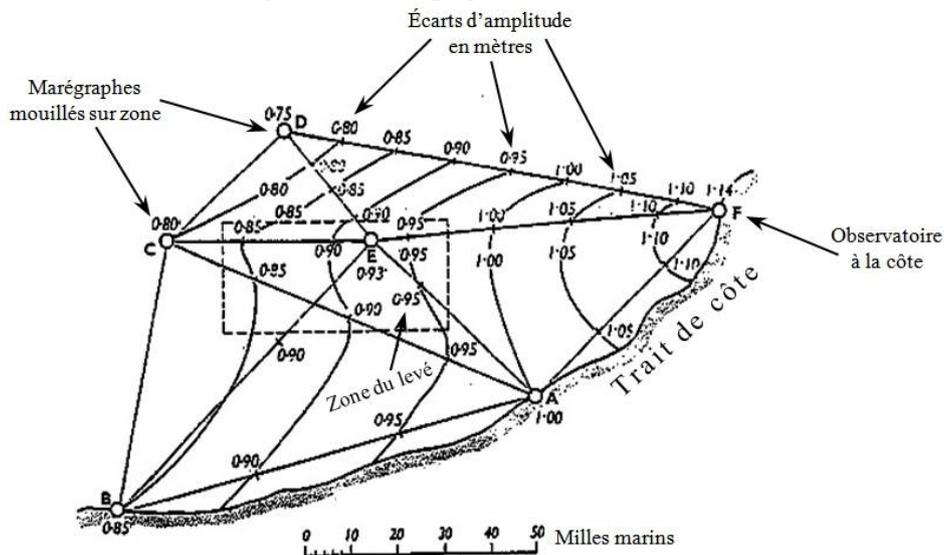


Fig. 5.13 « Construction d'une carte de lignes d'isomarnage »

*Cartes de lignes d'isomarnage* : Comme le montre la figure 5.13, ces cartes ressemblent à des cartes cotidales sur lesquelles les lignes tracées indiquent des différences de marnage par rapport aux observatoires de référence, selon un espacement de 5 à 10 cm. Les lignes d'isomarnage sont dessinées entre les graduations interpolées sur chaque droite, comme pour les lignes cotidales.

*Carte de zones de marée* : Les cartes de zones de marée sont construites par superposition des cartes de lignes cotidales sur celles des lignes d'isomarnage. Elles permettent à l'hydrographe d'accéder en chaque point aux corrections de temps et de marnage à appliquer aux temps et aux hauteurs correspondantes de l'observatoire de référence. L'examen des figures 5.12 et 5.13 montre que les

lignes cotidales et les lignes d'isomarnage ne sont pas parallèles ; cette configuration classique la plupart du temps conduit souvent à adopter des zones de marée de forme irrégulière et d'exploitation difficile. Pour faciliter les corrections préliminaires, l'hydrographe pourra être amené à simplifier les contours des zones de marée afin d'en réduire les contraintes opératoires ; par exemple, si les profils du levé sont orientés est-ouest, il pourra être plus efficace de privilégier le découpage de zones de marée en bandes est-ouest, le choix entre précision et considérations opérationnelles étant une question de jugement. Indépendamment du découpage arrêté par l'hydrographe en cours de levé, le choix final des zones de marée sera basé sur une analyse complète des hauteurs d'eau observées afin d'obtenir la précision maximale.

*Découpage des zones de marée au large :* Quand il devient impossible de ceinturer la région du levé par des marégraphes, les zones de marée au large doivent être construites à partir de considérations plus théoriques. L'onde marée progresse parallèlement au rivage en venant du large sur la plus grande partie de la côte Est des États-Unis qui possède un plateau continental étendu. Il en résulte des différences de temps et d'amplitude conséquentes entre le large et la côte alors que sur la côte ouest, l'onde marée est approximativement perpendiculaire au rivage et les écarts de temps et de marnage entre le large et la côte sont minimaux. Pour la réduction des sondes au large, les corrections de temps et de marnage à appliquer aux hauteurs d'eau observée à la côte seront déterminées à partir des cartes cotidales ou des modèles hydrologiques existants.

#### **2.2.4 Mise en œuvre et contrôle des observatoires de référence**

Les observatoires de référence sont ceux pour lesquels un niveau de réduction des sondes (zéro hydrographique) a déjà été calculé et qui sont toujours en fonction pendant les sondages ; ils peuvent être mis en œuvre par le service ou le pays qui procède aux sondages ou relever d'une autre institution. Ces observatoires permanents servent normalement aux prédictions de marées ainsi que de référence à la réduction des sondes et aux zones de marée ; ils peuvent en plus servir de ports de référence pour l'établissement des concordances avec les marégraphes temporaires. Ces observatoires font généralement partie du réseau national d'observation du niveau de la mer de chaque pays.

#### **2.2.5 Installation, mise en œuvre et démontage des observatoires secondaires**

Les observatoires secondaires sont utilisés pour fournir des enregistrements continus des hauteurs d'eau pendant le levé, des niveaux de référence et pour contribuer au découpage des zones de marée, tous éléments qui entrent dans la réduction des sondages. L'emplacement des stations et les spécifications peuvent être modifiés après la reconnaissance du terrain ou en cours de travaux.

L'observation de la marée doit durer pendant au moins 30 jours sauf pour les marégraphes utilisés pour la détermination des zones de marée. L'acquisition des données doit commencer au moins 4 heures avant le début des sondages et s'achever 4 heures après. Les marégraphes mis en place pour 30 jours sont les principaux observatoires secondaires entrant dans la détermination des niveaux de réduction des sondes d'un levé donné et dans les analyses permettant de calculer les constantes harmoniques. Pour ces observatoires, les données doivent être recueillies pendant toute la durée des sondages de la zone concernée et sur une période d'au moins 30 jours continus afin de déterminer précisément le zéro hydrographique. En complément, des marégraphes supplémentaires et/ou de secours peuvent être aussi déployés si la complexité hydrodynamique et/ou les conditions d'environnement le requièrent.

La mise en œuvre complète d'un observatoire secondaire consiste à :

- a) installer un système de mesure des hauteurs d'eau comprenant un marégraphe, des capteurs d'environnement (si nécessaire), une plate-forme d'acquisition de données ou un enregistreur *datalogger* et un récepteur satellite (si nécessaire), ainsi qu'un abri et une échelle de marée (si nécessaire) ;

- b) retrouver ou implanter un nombre minimum de repères de marée rattachés par nivellement au marégraphe et à l'échelle de marée lors de l'installation et du démontage de l'observatoire. Des mesures GPS en mode statique doivent également être exécutées sur quelques repères de marée.

### 2.2.5.1 Systèmes de mesure des hauteurs d'eau

#### 2.2.5.1.1 Observatoires de marée et plates-formes d'acquisition de données

Plusieurs types de capteurs et d'observatoires sont envisageables et de nombreux modèles de marégraphe sont utilisés pour les levés hydrographiques exécutés par les différents pays. Les États-Unis utilisent des marégraphe numériques acoustiques et à barboteur pneumatique (marégraphe à bulles) pour les observatoires principaux et secondaires dans les régions à marée et des systèmes à flotteurs dans les Grands Lacs, voir figure 5.14. Beaucoup d'autres marégraphe à flotteurs et à pression sont déployés dans le monde.

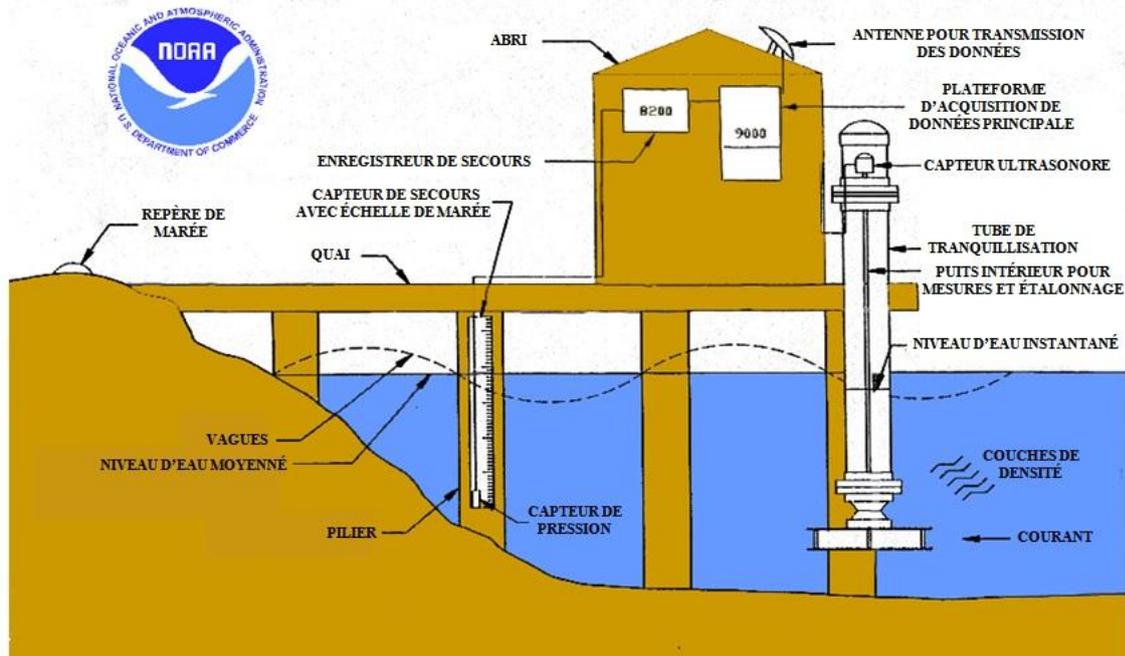


Fig. 5.14 « Observatoire de marée nouvelle génération »

La gamme de mesure du marégraphe doit être plus grande que le marnage prévu. Le capteur doit être étalonné au début et à la fin des travaux et la précision de l'étalonnage doit être basée sur un standard national ou international. La résolution recherchée du capteur est fonction du marnage relatif dans la zone du levé : pour un marnage inférieur ou égal à 5 mètres, la résolution doit être de l'ordre du millimètre ou mieux ; pour un marnage compris entre 5 et 10 mètres, elle doit être de l'ordre de 3 millimètres ou mieux et pour un marnage supérieur à 10 mètres, de 5 millimètres ou mieux.

Les systèmes d'acquisition de données doivent enregistrer les hauteurs d'eau selon une cadence adaptée aux variations observées. Les États-Unis utilisent un intervalle de 6 minutes afin de tabuler les pleines mers et les basses mers en dixièmes d'heure. Des intervalles d'échantillonnage plus longs peuvent être envisagés pour les lacs et les zones non soumises à l'influence de la marée, mais ils doivent être suffisamment courts pour mesurer les seiches. Plusieurs capteurs utilisent la méthode d'échantillonnage en rafale (*burst sampling*) pour calculer une valeur lissée dans l'intervalle prévu. Le NOAA moyenne les lectures sur une rafale de 3 minutes pour chaque intervalle de 6 minutes. Des modèles statistiques de valeurs aberrantes et des écarts types sont ensuite utilisés pour le contrôle de qualité, quant aux horloges associées aux échantillonnages, elles doivent avoir une marche de l'ordre d'une minute par mois. Les sources d'erreurs connues doivent être contrôlées pour chaque capteur au moyen de mesures auxiliaires et/ou d'algorithmes de corrections. Parmi les exemples d'erreur, on peut citer les variations de densité de l'eau et les corrections barométriques pour les marégraphe à

pression, les différences de températures de l'air pour les systèmes acoustiques et l'influence des vagues et des courants pour tous les types de marégraphes.

Pour les mesures de niveaux de référence, il est important d'étalonner régulièrement les marégraphes et les capteurs ou de procéder à des échanges de capteurs étalonnés pour les observatoires permanents. Le « zéro » du capteur doit être nivelé avec précision par rapport à l'échelle de marée et/ou aux repères de nivellement. La stabilité verticale (physique et fonctionnelle) du « zéro » du capteur doit être suivie et tout déplacement doit être pris en compte dans la réduction des sondes et le calcul du zéro.

Une échelle de marée doit être installée à l'observatoire si le zéro du marégraphe ne peut pas être rattaché par nivellement direct aux repères de marée locaux ; ceci s'applique en particulier aux marégraphes à bulles dont l'orifice est placé près du fond de la mer. Même si un marégraphe à pression peut être stationné, la lecture à l'échelle reste nécessaire pour contrôler les dérives de l'instrument dues aux changements de densité de la colonne d'eau dans le temps. L'échelle de marée doit être montée indépendamment du marégraphe afin de découpler leurs stabilités respectives ; le marégraphe ne doit pas être monté sur le même pilier que l'échelle et celle-ci doit être nivelée à la verticale. Quand deux ou plusieurs échelles sont assemblées pour en former une plus longue, l'hydrographe doit veiller à conserver la même précision sur toute la longueur. La distance entre le zéro de l'échelle et son bord supérieur doit être mesurée avant installation et après démontage et noté sur la fiche de l'observatoire.

#### 2.2.5.1.2 Échelles de marée

Dans les zones de fort marnage et de larges plages en pente (exemple : Rivière de Cook en Alaska, Golfe Normand-Breton), l'installation et la maintenance des marégraphes et des échelles de marée peuvent être difficiles et coûteuses. Dans ces cas, l'installation physique d'une échelle de marée peut être remplacée par la mesure systématique de la dénivelée entre le niveau de l'eau et le repère de marée le plus proche. Ce repère joue alors le rôle de « bord supérieur » de l'échelle de marée et sa hauteur au-dessus de la surface de l'eau devient la « lecture à l'échelle ».

Dans le cas des marégraphes à pression, on doit comparer les mesures du marégraphe aux lectures à l'échelle pendant une fraction de 3 heures au moins du cycle de la marée, lors de l'installation et du démontage, ainsi qu'à intervalles fréquents d'une durée d'une heure au moins en cours de levé.

En règle courante, l'échelle de marée et le marégraphe doivent être lus et enregistrés simultanément une fois par jour, avec un minimum de 3 jours par période de 7 jours pendant toute la durée du levé. La moyenne des lectures entre l'échelle et le marégraphe doit être appliquée aux hauteurs d'eau afin de les rapporter au zéro de référence. Des comparaisons fréquentes entre l'échelle et le marégraphe (au moins trois fois par semaine ou huit fois par mois) durant le déploiement sont requises pour assurer la stabilité des mesures et réduire les erreurs de traitement. Un nombre élevé de lectures indépendantes à l'échelle réduit l'incertitude des mesures rapportées aux repères et zéro de l'observatoire. Si le maintien d'un observateur à demeure ou l'exécution de tournées régulières des observatoires situés loin de la zone du levé soulèvent des difficultés logistiques, il vaut mieux procéder à des « rafales » de lectures pendant quelques heures plutôt que d'effectuer une seule lecture épisodiquement\*.

Si une échelle de marée est détruite pendant la campagne, une nouvelle échelle doit être installée pour la période restante des travaux et il faut déterminer de nouvelles constantes de raccordement.

#### 2.2.5.1.3 Repères de marée et nivellement

L'implantation d'un réseau adéquat de repères de marée fait partie intégrante de l'observation des hauteurs d'eau. Un repère de marée est un objet physique scellé ou une borne durable utilisée comme

---

\* NdT : L'usage, en France, est de procéder à un contrôle quotidien en cours de sondage.

référence verticale et/ou horizontale du réseau géodésique. Les repères de marée des observatoires sont utilisés pour référencer le zéro hydrographique local, déterminé à partir des analyses harmoniques des hauteurs d'eau. Le raccordement des repères de marée au marégraphe est réalisé par nivellement géométrique ; il s'ensuit que la qualité du zéro hydrographique dépend à la fois de la qualité des repères de marée et de la précision du nivellement entre ces repères et le marégraphe.

#### **2.2.5.1.4 Nombre et type de repères de marée**

Le nombre et le type de repères de marée requis dépendent de la durée des observations. Chaque observatoire possède un repère de nivellement qualifié de fondamental (*Primary Bench Mark* - PBM) qui doit servir de référence pour chaque visée. Le repère fondamental est la borne la plus stable de l'observatoire. Un repère de marée idéal pour les observations GPS aura un dégagement de 360° à partir d'un site de 10° au-dessus du plan horizontal. Si un repère fondamental est considéré comme instable ou a disparu, un nouveau repère fondamental devra être créé ou choisi parmi les repères existants. La date du changement et les différences de cotes entre l'ancien et le nouveau repère fondamental doivent être documentées. Les observatoires occupés pendant une durée de plus d'un mois doivent disposer de 3 à 5 repères de marée convenablement nivelés.

#### **2.2.5.1.5 Nivellements de contrôle**

Un nivellement de troisième ordre au moins doit être réalisé pour tout observatoire secondaire activé pendant moins d'un an. Les visées doivent être effectuées entre le marégraphe et/ou l'échelle de marée et le nombre prescrit de repères de marée lorsque l'observatoire est installé, modifié (par exemple lorsque le marégraphe est remplacé) ou démonté. Un nivellement est requis tous les six mois au moins quand le marégraphe est en fonction et est recommandé après les tempêtes, cyclones, tremblements de Terre, etc., afin de confirmer la stabilité de l'observatoire.

Pour obtenir des observations de qualité, des nivellements de contrôle par rapport à un nombre de repères spécifiés (5 pour un observatoire de 30 jours) doivent être exécutés 30 jours au moins avant le démontage d'un marégraphe ou tous les 6 mois pour un observatoire permanent.

#### **2.2.5.1.6 Stabilité par rapport au repère fondamental**

En cas de dérive inexplicée du marégraphe ou du zéro de l'échelle de marée par rapport au repère fondamental, entre deux nivellements ou pour un écart supérieur à 1 cm, l'hydrographe doit reprendre le nivellement entre les zéros instrumentaux et le repère fondamental. Le seuil de 1 cm ne doit pas être confondu avec la tolérance de fermeture du nivellement de précision.

#### **2.2.5.1.7 Observation GPS à l'aplomb des repères de marée**

Des mesures GPS en mode statique doivent être effectuées sur un repère de marée au moins, et deux repères si possible, en chaque observatoire secondaire installé pour les besoins du levé. Des observations GPS doivent être conduites simultanément, dans la mesure du possible, sur un repère de nivellement du réseau national (NAVD 88 dans le cas des États-Unis), pour rattacher directement le zéro hydrographique en utilisant les hauteurs orthométriques fournies par le GPS.

Des observations statiques différentielles de haute précision seront obtenues avec un récepteur GPS à longueur d'onde entière de qualité géodésique, double fréquence, et muni d'au moins 10 canaux satellites. Une antenne *choke-ring* est recommandée, mais une antenne *ground-plane* de qualité géodésique peut également convenir. Il est primordial que les mêmes antennes ou des antennes identiques soient utilisées durant toute la période d'observation, faute de quoi une correction de phase (modélisation de champ) devra être appliquée, ce qui est extrêmement critique pour obtenir des hauteurs précises. La longueur du câble de l'antenne doit être réduite au minimum possible, dix mètres étant une longueur standard. Si un câble plus long est nécessaire, il doit être fabriqué en coaxial faible perte (référence RG 233 pour un câble de moins de 30 m et RG 214 au-delà de 30 m).

Un repère de marée idéal pour les observations GPS aura un dégagement horizontal de 360° pour tous les sites supérieurs à 10°. Cette configuration devra être présente à l'esprit quand on implante de nouveaux repères de marée.

Quand elles sont disponibles, les données météorologiques (température de l'air, pression barométrique et humidité relative) doivent être recueillies pendant les observations GPS à proximité du centre de phase de l'antenne. Tous les équipements doivent être étalonnés périodiquement.

### 2.2.5.2 Dossiers d'observatoires de marée

Contenu des dossiers :

- a. Installation de l'observatoire ;
- b. nivellement ;
- c. maintenance des marégraphes et des repères de marée ;
- d. démontage de l'observatoire.

Un dossier d'observatoire de marée inclut généralement :

- a. Une documentation d'étalonnage pour le marégraphe et les capteurs auxiliaires, établie à partir d'une source indépendante du fabricant ;
- b. une fiche d'observation illustrant la configuration de l'observatoire et ses métadonnées ;
- c. un extrait à jour de carte marine ou un document équivalent indiquant l'emplacement exact de l'observatoire, avec le numéro ou le nom et l'échelle de la carte ;
- d. un croquis à grande échelle de l'observatoire et un fichier numérique SIG montrant l'emplacement du marégraphe, de l'échelle de marée, des repères de marée et toute autre indication utile pour leur description. Le croquis doit être orienté et comporter un titre, la latitude et la longitude du marégraphe (lues sur un GPS portatif), l'échelle de marée et les repères de marée ;
- e. un itinéraire à partir d'un détail topographique remarquable ;
- f. des photos numériques de tous les composants de l'observatoire. Les photos doivent représenter au minimum le marégraphe *in situ*, ses capteurs auxiliaires et les repères de marée en gros plan, une vue de face de l'échelle de marée et des vues de l'environnement illustrant l'emplacement de l'observatoire. Toutes les photos doivent être référencées avec le N° de la station, son emplacement et la date de prise de vue.
- g. une description des repères de nivellement ;
- h. une liasse de marégrammes renseignés et une documentation sur les équipements ;
- i. un carnet de contrôle comportant les détails des rattachements des zéros instrumentaux aux repères de marée.

## 2.2.6 Contrôle de qualité des données marégraphiques, traitement, et mise en forme

### 2.2.6.1 Contrôle de qualité

Les données utilisées dans les algorithmes de réduction des sondes et pour la détermination du zéro hydrographique sont des enregistrements chronologiques et continus des hauteurs d'eau mesurées pendant une période d'échantillonnage discrète et intégrée sur une durée spécifiée\*. La qualité de ces hauteurs d'eau doit être contrôlée afin d'éliminer les données invalides ou suspectes avant de procéder à l'élaboration du produit final. Ce contrôle porte sur la continuité des enregistrements, le lissage des

---

\* Note : les périodes d'échantillonnage standard sont de 6 à 10 minutes, mais on retient 6 minutes dans ce manuel.

données, les dérives du zéro de réduction des sondes, les données aberrantes ou situées en dehors des tolérances prévues telles que les valeurs maximales et minimales et les dérives anormales des niveaux qui pourraient être dues à des déplacements verticaux des différents capteurs et des repères de marée.

Le contrôle de qualité doit inclure des comparaisons avec les données mesurées simultanément par les marégraphes auxiliaires, les marées prédites ou les données des observatoires voisins. L'édition des données et le complétage des trous d'observation par des valeurs estimées doit se faire à l'aide d'algorithmes mathématiques et de procédures fiables. La traçabilité de tous les changements apportés aux données éditées doit être assurée. Les valeurs estimées (non-observées) doivent être *flaggées*. Les hauteurs d'eau de chaque observatoire doivent être rapportées à une référence commune<sup>▼</sup> ; cette référence est une donnée arbitraire qui ne doit pas être confondue avec un zéro hydrographique tel que le MLLW (basses mers inférieures moyennes). Toutes les discontinuités, sauts ou autres changements observés sur les marégrammes (se référer au manuel spécifique de l'utilisateur du marégraphe), qui peuvent être dus à des déplacements verticaux des marégraphes, de l'échelle de marée ou des repères de marée doivent être complètement renseignés. Pour éviter toute confusion, les données doivent être enregistrées en heure TU (Temps Universel Coordonné ou heure de Greenwich – GMT) et les unités de mesure correctement indiquées sur tous les fichiers analogiques et numériques.

### 2.2.6.2 Traitement des données et annuaires de marée

Les hauteurs d'eau à intervalles de 6 minutes sont utilisées pour produire les annuaires de marée standard. Ces annuaires incluent les heures et les hauteurs des pleines et des basses mers quotidiennes, la date, les heures et les hauteurs des plus hautes et des plus basses mers mensuelles et les valeurs moyennes mensuelles d'un certain nombre de paramètres<sup>▲</sup>. Un exemple d'annuaire établi pour un port d'Amérique du nord est à la figure 5.15. Les heures et les hauteurs des pleines mers et des basses mers sont interpolées à partir des courbes de hauteurs d'eau toutes les 6 minutes. Les hautes et les basses mers successives ne figurent sur les tables que si elles sont interpolées sans ambiguïté par rapport aux bruits haute fréquence non assimilables à des ondes de marée. Les hauteurs horaires sont également interpolées sur les courbes de hauteurs d'eau à 6 minutes. Les moyennes mensuelles des hauteurs de la mer ou d'autres étendues d'eau sont calculées à partir des moyennes des hauteurs horaires de chaque mois calendaire. Les données doivent être rapportées à un repère référencé tel que le zéro de l'échelle de marée, ou à une référence convenue, ou au MLLW, etc. pendant toute la durée des observations. Les procédures générales relatives au traitement des données peuvent être trouvées notamment dans les documents suivants : Annuaires des marées, Guide des mesures marégraphiques du SHOM (version 2.1 - 2010), Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer (COI) et répertoires des références altimétriques maritimes (zéros hydrographiques).

### 2.2.6.3 Données reconstituées par interpolation

Si les données d'un capteur de secours ne sont pas disponibles, les interruptions d'enregistrements toutes les 6 minutes ne doivent pas être reconstituées par interpolation si les intervalles sont supérieurs à trois jours consécutifs. L'interpolation, quand elle est justifiée, nécessite des algorithmes mathématiques et scientifiques et des procédures fiables ; sa traçabilité doit être assurée. Les trous de moins de 3 heures peuvent être interpolés ; ceux de plus de 3 heures doivent être reconstitués à partir d'observations extérieures telles que celles d'un observatoire voisin. Les données reconstituées par interpolation telles que les hauteurs horaires, les pleines mers et les basses mers ainsi que les moyennes quotidiennes doivent être identifiées comme telles.

▼NdT : L'usage en France est d'adopter pour cette référence le zéro des sondes lorsqu'il est connu.

▲ NdT : dont le coefficient dans le cas des côtes atlantiques françaises.

### 2.2.6.4 Calcul des moyennes mensuelles

Quand les annuaires de marée sont présentés par mois calendaires, les moyennes mensuelles des différents paramètres de la marée sont utilisées pour la détermination du zéro hydrographique et le contrôle de qualité. La moyenne mensuelle des hauteurs d'eau est un paramètre important pour observer les variations saisonnières et à long terme. Le calcul des moyennes mensuelles ne doit pas être entrepris si les interruptions d'enregistrements sont supérieures à 3 journées consécutives.

**Figure 5.15 « Exemple de tableau mensuel d'annuaire de marée »**

#### PLEINES MERS / BASSES MERS

Octobre 2002

Organisme : *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*

Observatoire : 8454049

Système horaire : UT (Greenwich - 0 W)

Nom : Quonset Point, Rhode Island

Unités de hauteur : mètres

Type : marée mixte

Niveau de référence : *Datum* de l'observatoire

Notes : < pleine mer supérieure / basse mer inférieure

[Hauteur reconstituée]

Contrôle de qualité : effectué

Pleine mer			Basse mer		Pleine mer			Basse mer	
Jour	Heure	Hauteur	Heure	Hauteur	Jour	Heure	Hauteur	Heure	Hauteur
1	7.5	8.037	2.4	7.326	16	<9.7	[8.292]	2.6	7.394
	<20.2	8.071	<12.9	7.197		<21.3	8.782	14.6	7.563
2	8.8	8.000	2.6	7.173	17	10.6	8.345	<6.0	7.470
	<21.4	8.176	<14.3	7.066		<22.8	8.323	<15.4	7.245
3	9.5	8.233	3.2	7.157	18	10.7	8.257	4.0	7.248
	<22.3	8.314	<15.6	7.049		23.3	8.230	16.7	7.196
4	10.5	8.525	4.1	7.163	19	<11.8	8.296	<4.3	7.140
	<23.1	8.599	<16.3	7.057		<23.4	8.292	17.1	7.204
5	<11.5	8.632	4.4	7.109	20			<5.0	7.066
	23.8	8.466	<17.1	6.873		12.4	8.209	<17.5	6.994
6			<5.8	6.670	21	0.4	[8.128]	5.8	7.036
	12.2	8.477	18.2	6.832		<12.8	8.297	18.1	7.090
7	<0.5	8.582	<6.4	6.961	22	0.9	8.142	<6.5	6.999
	<13.3	8.819	19.2	6.969		<13.4	8.216	19.0	7.040
8	1.3	8.457	6.9	6.888	23	1.4	[8.075]	<6.9	7.013
	<14.0	8.644	<20.1	6.877		<13.7	[8.180]	<19.1	6.915
9	2.3	8.355	<7.9	6.852	24	2.1	7.934	7.3	6.969
	<14.9	8.631	20.9	6.986		<14.7	8.164	19.9	7.093
10	3.4	8.316	<8.2	6.969	25	2.9	[7.993]	<8.0	7.047
	<15.8	8.497	21.2	7.086		<15.4	8.156	<20.3	7.136
11	4.3	8.240	<9.4	7.129	26	3.8	[8.061]	8.3	7.204
	<16.7	8.455	22.1	7.305		<16.2	8.607	23.5	7.389
12	5.2	8.295	<10.3	7.380	27	4.6	7.974	<9.1	7.090
	<17.7	8.462				<17.1	8.216	21.9	7.348
13	5.9	8.266	0.5	7.481	28	5.4	7.860	<10.5	7.064
	<18.7	8.344	11.8	7.461		<17.9	8.008		
14	6.8	8.077	<2.2	7.401	29	6.2	7.949	1.5	7.243
	<20.1	8.161	<12.7	7.190		<18.6	8.042	<11.6	7.109
15	8.3	8.156	2.0	7.349	30	7.3	[8.052]	<1.5	7.197
	20.9	8.273	<14.1	7.344		<20.0	[8.154]	13.0	7.211
					31	8.3	8.215	2.1	7.239
						<20.7	8.290	<14.1	7.222

Pleine mer supérieure : 8,819 13,3 heures 7 octobre 2002

Basse mer inférieure : 6,670 5,8 heures 6 octobre 2002

**Moyennes mensuelles :** Moyenne des pleines mers supérieures (MHHW) 8,357  
Moyenne des pleines mers (MHW) 8,272  
Niveau moyen (MTL) 7,707

Niveau diurne de la marée	(DTL)	7,724
Niveau moyen de la mer	(MSL)	7,668
Moyenne des basses mers	(MLW)	7,141
Moyenne des basses mers inférieures	(MLLW)	7,091
Moyenne des inégalités diurnes de pleines mers	(DHQ)	0,085
Marnage tropique (solstice)	(GT)	1,266
Marnage moyen	(MN)	1,131
Moyenne des inégalités diurnes de basses mers	(DLQ)	0,050
Établissement du port (pleine mer)	(HWI)	0,42 heure
Établissement du port (basse mer)	(LWI)	6,13 heures

### 2.2.7 Calcul du zéro hydrographique et récupération d'un zéro historique

Les zéros hydrographiques sont des niveaux de basses mers astronomiques extrêmes ; ils ne doivent pas être extrapolés pour des zones ayant des caractéristiques hydrographiques différentes sans avoir des observations à l'appui. Dans le but de les retrouver, les zéros hydrographiques sont rapportés à des repères physiques connus sous le nom de repères de marée.

#### Procédures opératoires

- Observations : le zéro hydrographique est calculé à partir d'observations continues du niveau de la mer réalisées pour une période de temps spécifiée dans des observatoires de marée. Chaque observatoire est constitué d'un marégraphe ou capteur de niveau d'eau, d'une plate-forme d'acquisition de données ou d'un enregistreur, d'un système de transmission de données et d'un ensemble de repères de marée établis à proximité. Aux États-Unis, le *National Ocean Service* du NOAA recueille les hauteurs d'eau à intervalle de 6 minutes\*.
- Traitement des observations : après contrôle de qualité et interpolation des petites interruptions, les hauteurs des pleines mers et des basses mers ainsi que les hauteurs horaires quotidiennes sont mises en tableau. Ces paramètres sont ensuite moyennés par mois calendaire pour les enregistrements de longue durée ou sur une durée de quelques jours pour les enregistrements de courte durée.
- Calcul du zéro hydrographique : les zéros de réduction des sondes pour une zone donnée sont déterminés directement par calcul des valeurs moyennes des paramètres de la marée sur la période NTDE de 19 ans (cf. § 2.1.4). L'extrapolation sur la période NTDE pour les observations de courte durée est obtenue par concordance avec l'observatoire du port de référence.
- Cotes des repères de marée : le zéro hydrographique ayant été calculé, la cote du zéro instrumental est transposée aux repères de marée de l'observatoire par nivellement géométrique pendant le fonctionnement du marégraphe. En France, les cotes et les descriptions des repères de marée sont enregistrées dans la base de données du SHOM et diffusées sous forme de fiches d'observatoires de marée. Les repères de marée sont rattachés au réseau géodésique national (NGF pour la France, NGS 1997 pour les États-Unis) par nivellement topographique ou par technique GPS.

Les emplacements des stations marégraphiques sont hiérarchisés comme suit :

- Observatoires permanents (ou de référence) : opérationnels depuis 19 ans ou plus dans les ports principaux et destinés à être maintenus en fonction dans l'avenir, les observatoires permanents sont prévus pour fournir des enregistrements continus des hauteurs d'eau dans une zone de marée, alimenter le réseau national d'observation du niveau de la mer et servir de référence pour les applications nationales.

\* N.d.T: 5, 10 ou 15 minutes pour la France

- b. Observatoires secondaires : ces observatoires ne sont pas nécessairement en fonction depuis 19 ans mais ont une durée de vie planifiée sur plus d'un an. Ils fournissent une référence pour les baies et estuaires dont les marées diffèrent de celles des observatoires permanents. Les observations réalisées dans un observatoire secondaire ne sont généralement pas suffisantes pour une détermination précise et indépendante du zéro hydrographique, mais des résultats satisfaisants peuvent être obtenus par concordance avec un observatoire permanent convenablement choisi.
- c. Observatoires occasionnels : marégraphes en fonction pendant plus d'un mois mais moins d'un an. Les observations de courte durée des observatoires secondaires et occasionnels peuvent être extrapolées sur la période de 19 ans par concordance mathématique avec un observatoire permanent situé à proximité.

Les observatoires permanents, secondaires et occasionnels sont implantés aux endroits stratégiques choisis pour assurer la couverture du réseau. Les critères de sélection des emplacements sont fixés en fonction de leur capacité à offrir une couverture spatiale des changements de caractéristiques de la marée relatifs à son type, son marnage, son établissement et les tendances à long terme de variation de son niveau moyen. D'autres considérations incluent la navigation dans des zones critiques et de transition, les sites historiques, la proximité du réseau géodésique et la disponibilité des infrastructures existantes, telles que les quais susceptibles d'accueillir un observatoire scientifique.

### **Détermination par concordance du zéro hydrographique**

La détermination par concordance du zéro hydrographique d'un observatoire de courte durée comprend les étapes suivantes :

- a. choix de la durée de comparaison des observations simultanées ;
- b. choix d'un observatoire de référence ;
- c. récupération des enregistrements simultanés de l'observatoire de référence et de l'observatoire rattaché. Calcul des moyennes mensuelles ;
- d. transposition à l'observatoire rattaché du zéro hydrographique de l'observatoire de référence (calculé par exemple sur le NTDE de 19 ans aux États-Unis) ;
- e. calcul des différences et/ou des rapports des heures et des hauteurs de l'observatoire de référence et de l'observatoire rattaché pendant la période de comparaison ;
- f. application des différences moyennées et des rapports ci-dessus aux valeurs de l'observatoire de référence pour obtenir le zéro hydrographique de l'observatoire rattaché, équivalent à un zéro calculé sur le NTDE de 19 ans.

### **Cote des repères de marée**

Le zéro hydrographique ainsi déterminé est transposé aux repères de marée de l'observatoire par nivellement géométrique comme indiqué à l'alinéa d. des procédures opératoires ci-dessus (cf. *Specification and Deliverables*, NOS 2000 et Guide technique de la marée, SHOM 2011).

#### **2.2.7.1 Récupération d'un zéro hydrographique**

Lorsqu'un observatoire est installé sur un site utilisé antérieurement, il convient de retrouver le zéro hydrographique établi antérieurement en nivelant le zéro du marégraphe ou de l'échelle de marée par rapport à plusieurs repères de marée de cote connue, afin de transposer le niveau des plus basses mers historiques au « nouveau » marégraphe et de le comparer à celui calculé à partir des nouvelles observations rapportées au même zéro. Les facteurs qui affectent cette comparaison incluent la durée des observations, la position géographique, les caractéristiques de la marée, le temps écoulé depuis l'installation précédente, la variabilité du niveau de la mer dans la région et l'observatoire de référence utilisé. En se basant sur tous ces facteurs, la récupération du zéro hydrographique peut varier de plus

ou moins 3 à 8 cm ; cette opération constitue également un contrôle de qualité des plus utiles. Une fois récupéré le zéro hydrographique et confirmée la pérennité des repères de marée, la valeur historique du zéro de réduction des sondes doit être utilisée comme référence du levé hydrographique.

### 2.2.7.2 Contrôle de qualité des niveaux de référence

Il est important, pour le contrôle de qualité du zéro hydrographique, d'exécuter la totalité des procédures de traitement de données et de nivellement. Il faut également être prudent dans le calcul du zéro des estuaires ou des zones dont le régime de marée est inconnu. Les comparaisons entre observatoires rattachés et observatoires de référence permettent souvent de détecter des écarts anormaux qui doivent être examinés, car ils peuvent révéler un mauvais fonctionnement du marégraphe ou un déplacement des capteurs. Le zéro hydrographique doit être rattaché à plusieurs repères de marée et les dénivelées entre repères doivent être en accord avec les valeurs historiques. Tout écart entre ces dénivelées doit être élucidé avant de clore la procédure de récupération du zéro hydrographique. La précision du zéro de la station rattachée dépend de différents facteurs, mais les plus importants sont la validité et le choix d'un observatoire de référence ayant les mêmes caractéristiques de marée, le même niveau moyen journalier, les mêmes variations saisonnières et les mêmes tendances de variation des hauteurs d'eau. La durée des observations détermine aussi la précision ; plus elle est longue, plus précis sera le zéro hydrographique et meilleurs seront le contrôle de qualité et le degré de confiance accordé à l'analyse des écarts entre marégraphes rattachés et observatoire de référence. Dans le cas de la réoccupation d'un observatoire historique, le zéro hydrographique doit être calculé à partir des nouvelles observations et comparé aux références antérieures.

### 2.2.7.3 Rattachement aux réseaux de nivellement nationaux

Les zéros hydrographiques sont des surfaces locales qui peuvent varier énormément d'un lieu à l'autre tandis que les réseaux de nivellement nationaux sont des plans de référence fixes utilisés pour la mesure des altitudes terrestres. Le réseau *North American Vertical Datum* NAVD 88 est la référence officielle des États-Unis rattachée au système géodésique national NGS par un réseau de stations GPS permanentes\*. Les relations entre zéros hydrographiques et réseaux géodésiques nationaux servent dans de nombreuses applications hydrographiques, cartographiques et d'ingénierie côtière incluant l'observation de l'évolution du niveau des mers, la mise en œuvre des ECDIS, etc. Dans de nombreux pays, les références locales du niveau moyen sont souvent confondues avec les références géodésiques nationales car ces dernières sont déterminées à l'origine à partir de mesures du niveau moyen de la mer réalisées sur certains marégraphes<sup>†</sup>. Cependant, comme le niveau moyen change en fonction des déplacements verticaux de la surface terrestre et de la montée du niveau des mers, les références géodésiques sont dissociées du niveau moyen océanographique. Le NAVD 88, par exemple, n'utilise qu'un marégraphe unique comme référence de départ et ne peut être considéré comme une surface de référence corrélée au niveau moyen de la mer.

Les repères géodésiques existant au voisinage d'un observatoire rattaché doivent être identifiés. Aux États-Unis, on peut accéder à ces repères sur le site <http://www.ngs.noaa.gov><sup>‡</sup>. Un rattachement par nivellement géométrique et observations GPS rapportées à l'ellipsoïde est requis pour tout observatoire secondaire qui dispose de repères de nivellement géodésiques à proximité. Le NGS fournit les cotes NAVD 88 des repères de nivellement et leurs altitudes orthométriques de Helmert. La précision des hauteurs GPS ellipsoïdiques est conforme à la norme de précision à 2 ou à 5 cm (cf. *NOAA Technical Memorandum NOS NGS-58*). À ce jour, les hauteurs GPS ellipsoïdiques requises pour les travaux hydrographiques doivent satisfaire à la norme à 2 cm. Voir la publication du

\* NdT : Il en est de même pour la France métropolitaine avec le système géodésique spatial RGF 93 et la référence altimétrique NGF-IGN 69.

† NdT : Marseille et Ajaccio pour les systèmes NGF-IGN 69 (France métropolitaine) et NGF-IGN 78 (Corse).

‡ NdT : Il en est de même pour la France avec le site <http://www.geoportail.fr/>.

NOAA/NOS intitulée *GPS Observations and User's Guide*, section 4.2.8, à jour de sa révision de janvier 2003.

Le nivellement géométrique est préféré aux observations GPS ellipsoïdal pour un rattachement au réseau NAVD 88. Ce mode est requis pour tout repère de nivellement (jusqu'à 5 repères) situé dans un rayon de 0,8 km autour de l'observatoire secondaire. Si les repères de nivellement listés dans la base de données du NGS sont situés entre 0,8 km et 10 km de l'observatoire, un rattachement GPS sera réalisé pour la détermination des hauteurs ellipsoïdales. Si on ne retrouve pas cinq repères de marée au minimum dans un rayon de 1 km de l'observatoire secondaire et qu'il n'existe pas de repères de nivellement NGS dans un rayon de 10 km, cinq nouveaux repères de marée doivent être mis en place, détaillés et nivelés ; de plus, des observations GPS doivent être réalisées sur l'un des cinq repères au moins (ref. *User's Guide for Writing Bench Mark Description* du NOAA, édition de janvier 2002 et *User's Guide for GPS Observation* du NOAA/NOS, édition de janvier 2003, notamment sa section 4.2.8, *GPS observations*). La validation du nivellement ou le rattachement par GPS aux hauteurs ellipsoïdiques doit être réalisé sur deux repères de nivellement au moins pour le contrôle de qualité.

## **2.2.8 Réduction des sondages bathymétriques**

Les zéros relatifs aux plus basses mers des observatoires occasionnels installés pour un levé ou d'un observatoire de référence doivent être utilisés pour la réduction des sondes au zéro de la carte, soit directement, soit par l'intermédiaire des zones de marée. Qu'elles soient observées directement ou non, les hauteurs d'eau rapportées aux plus basses mers ou à un autre niveau de référence et appliquées à la réduction des sondages sont appelées « corrections de marée » ou « corrections de hauteur d'eau ».

### **2.2.8.1 Construction d'un modèle définitif de zones de marée**

Comme les caractéristiques de la marée varient spatialement, les observations des marégraphes mis en œuvre ne sont pas exactement représentatives des niveaux d'eau dans la zone du levé. Le découpage en zones de marée doit permettre d'obtenir des corrections de hauteurs d'eau en tout point compatibles avec la précision recherchée pour ce paramètre. Le NOS utilise généralement une méthode de découpage de la zone du levé en cellules discrètes partageant les mêmes caractéristiques de marée. Une nouvelle cellule est créée pour tout changement de marnage de 6 cm et dès que l'écart en heures TU des pleines mers et des basses mers atteint 0,3 heure. Des corrections de déphasage et d'amplitude par rapport au marégraphe le mieux placé sont appliquées à chaque cellule.

Le découpage préalable, basé sur des données historiques et sur des modèles généraux ou applicables dans les estuaires, est rapporté à un observatoire de référence dont les prédictions sont utilisées lors du levé. Pour le traitement final, le découpage préalable en zones de marée doit être remplacé par une répartition finale qui tienne compte des observatoires des marégraphes rattachés mis en œuvre durant le sondage. Avec le modèle final de zones de marée, les corrections en chaque zone doivent être déterminées à partir d'un marégraphe rattaché implanté spécialement pour le sondage au lieu de la station de référence utilisée pour le découpage préliminaire. Les erreurs induites par les zones de marée doivent être minimisées pour faire en sorte qu'une fois combinées aux erreurs de mesure des hauteurs d'eau et de réduction au zéro des cartes, elles produisent une erreur finale de réduction des sondes inférieure aux tolérances prescrites. Le modèle définitif des zones de marée et toutes les données utilisées pour sa mise au point doivent être renseignés et inclus dans le dossier du levé.

### **2.2.8.2 Fichiers de corrections de marée et rapport final**

Après validation, les enregistrements des observatoires rattachés sont rapportés au zéro de réduction des sondes (zéro des cartes) par le calcul. Les hauteurs d'eau acquises par les marégraphes à intervalles de six minutes et réduites au zéro des cartes sont utilisées soit directement, soit par l'intermédiaire des zones de marée, de telle sorte que les corrections soient conformes aux tolérances spécifiées. Un chapitre du rapport particulier (voir figure 5.6) doit être consacré à la marée pour

chaque étape du levé, contenant des informations sur la correspondance entre les marégraphes et les zones de marée associées afin d'expliciter les corrections finales de hauteur d'eau. Un exemple et un graphique définitif de zones de marée sont fournis aux figures 5.16 et 5.17 respectivement.

<b>DATE :</b>	<b>22 décembre 1999</b>
<b>MISSION HYDROGRAPHIQUE :</b>	<b>Alaska</b>
<b>RÉFÉRENCE DES IT :</b>	<b>OPR-P342-RA-99</b>
<b>INDEX DU LEVÉ :</b>	<b>H-10910</b>
<b>ZONE GÉOGRAPHIQUE :</b>	<b>Cook Inlet</b>
<b>ÉPOQUE DU LEVÉ :</b>	<b>du 22 juillet au 20 août 1999</b>
<b>OBSERVATOIRE DE MARÉE :</b>	<b>945-5711 Cap Kasilof, Alaska</b>
<b>LATITUDE :</b>	<b>60°20.2'N</b>
<b>LONGITUDE :</b>	<b>151°22.8'W</b>
<b>NIVEAU DE RÉFÉRENCE :</b> <b>(Plus basse mer astronomique)</b>	<b>0,000 mètre (LAT) .</b>
<b>HAUTEUR DE LA HAUTE MER AU-DESSUS DU ZÉRO :</b>	<b>5,850 mètres .</b>

**REMARQUES : ZONES DE MARÉE RECOMMANDÉES :**

Utiliser les zones identifiées par les numéros suivants : CK394, CK395, CK399, CK400, CK401, CK407, CK408, CK409, CK434, CK435, CK441, CK442, CK443, CK467, CK468, CK469, CK470, CK477, CK480, CK481, CK482, CK483, CK493 et CK494.

**Les informations relatives aux zones de marée sont en appendice.**

**Note 1 :** Enregistrements marégraphiques en mètres ; zéro de réduction des sondes rapporté aux plus basses mers astronomiques (LAT) ; heures TU.

**Note 2 :** L'observatoire permanent de Nikiski, en Alaska, a été utilisé comme port de référence pour les marégraphes rattachés et pour le découpage en zones de marée de ce levé hydrographique.

Le zéro hydrographique de cet observatoire a fait l'objet d'une mise à jour récente, qui modifie sensiblement la valeur précédente.

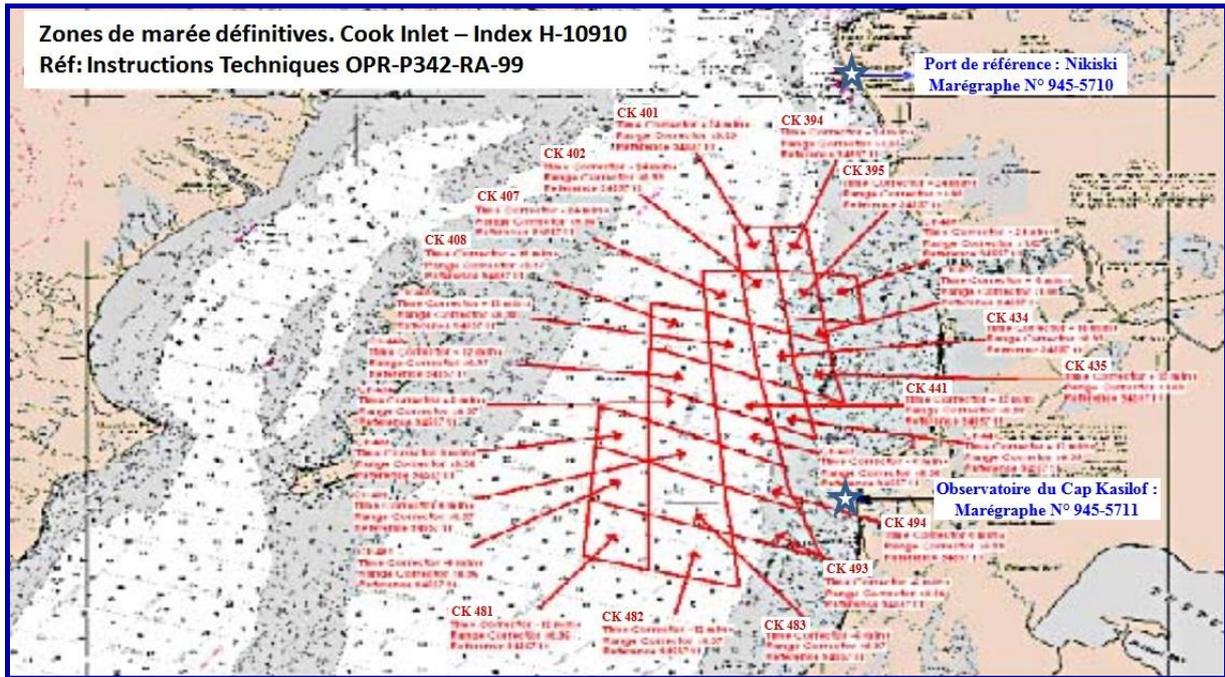
**Fig. 5.16 « Exemple de rapport final sur la marée »**

Quand ce rapport a été rédigé, la période de 19 ans utilisée pour le calcul des zéros hydrographiques des observatoires était le *National Tidal Datum Epoch* (NTDE) 1960-78. Ce type de période est normalement réajusté tous les 20-25 ans quand des changements importants du niveau moyen sont détectés par analyse des hauteurs d'eau observées par le réseau national d'observation du niveau de la mer (NWLON)\*.

Les époques NTDE sont remises à jour afin de s'assurer que le zéro hydrographique est précis, adapté aux besoins de la navigation, des levés hydrographiques et des travaux d'ingénierie côtière, et qu'il représente bien la réalité des hauteurs d'eau.

L'époque NTDE en vigueur aujourd'hui (2011) correspond à la période 1983-2001.

\* NdT: RONIM pour la France



**Fig. 5.17 « Exemple de graphique définitif de zones de marée »**

Les observations finales de hauteurs d'eau doivent être exprimées en mètres à trois décimales (mm), en heures TU et doivent être rapportées à l'observatoire du port de référence. Les corrections finales de marée doivent être rapportées aux plus basses mers astronomiques (LAT)<sup>▲</sup> et à l'heure TU.

Les données brutes de hauteurs d'eau et les corrections utilisées pour rapporter ces données au zéro de réduction des sondes doivent être conservées jusqu'à une décision écrite ou pendant deux ans au moins après la fin du levé. Toutes les méthodes de conversion et algorithmes utilisés pour les corrections doivent être accompagnés d'étalonnages, de notes de maintenance, de cahiers de nivellement et s'appuyer sur des pratiques hydro-océanographiques éprouvées. Les capteurs utilisés pour la conversion des données (exemple : transformation des pressions en hauteurs d'eau) doivent être étalonnés et entretenus pendant toute la période d'acquisition.

### 2.2.9 Utilisation du GPS cinématique pour le contrôle vertical

L'utilisation du GPS cinématique pour le contrôle vertical du levé hydrographique est devenue pratique courante après avoir fait l'objet de recherche pendant des années. Le GPS cinématique fournit un positionnement différentiel de précision centimétrique au moyen d'un récepteur de phase installé sur le mobile (navire ou vedette hydrographique) couplé à une station fixe de référence.

Le GPS différentiel nécessite des références horizontales et verticales précises afin de déterminer la position de chaque sonde dans un système géodésique tel que le NAD 83 et de déterminer la profondeur exacte de chaque sonde rapportée à un niveau de référence tel que le LAT ou le MLLW. L'écart entre les altitudes GPS (hauteurs ellipsoïdiques) et le zéro des cartes doit être défini pour chaque levé. Cet écart n'est pas constant et peut être complexe ; sa détermination peut nécessiter des observations supplémentaires pour comprendre la complexité de la géodésie et les caractéristiques de la marée dans la zone du levé. Un écart constant est généralement appliqué aux petites zones tandis que les régions plus étendues doivent faire l'objet d'interpolations simples ou complexes ; il faut parfois même recourir à une modélisation continue. Les zéros hydrographiques, la bathymétrie et la géodésie doivent être exprimés dans le même système de référence avant de commencer les travaux.

<sup>▲</sup> NdT : La référence aux plus basses mers astronomiques (LAT) a été substituée dans cet exemple à la hauteur moyenne des basses mers inférieures (MLLW) utilisée aux États-Unis.

L'utilisation du GPS cinématique doit être envisagée dès la préparation et si nécessaire, un contrôle géodésique du niveau de référence de la marée doit être effectué avant le début des travaux pour définir la relation entre le zéro hydrographique et la surface GPS de référence dans la zone du levé afin d'être en mesure d'exprimer les sondes en hauteurs ellipsoïdales. La quantité de travail requis dépend de la qualité des couvertures géodésiques et marégraphiques dans la zone (cf. NOS 2000).

### 3. COURANTS DE MARÉE

#### 3.1 Introduction

L'hydrographe doit avoir une connaissance pratique des conditions océanographiques et météorologiques observées et prédites dans la zone pour naviguer en toute sécurité et exécuter ses travaux. Générés par les flots et les jusants, les courants de marée sont des facteurs prédominants qui influent sur les sondages, lesquels ne sont pas destinés à la seule production cartographique. Il convient également de décrire la marée et les courants pour alimenter les instructions nautiques et les annuaires, aussi l'hydrographe sera-t-il souvent appelé à mouiller et à relever des courantomètres.

#### 3.1 Principes des courants de marée

Les courants sont des mouvements horizontaux des masses d'eaux qui peuvent être induits par la marée ou par d'autres phénomènes. Les courants de marée sont causés par l'interaction gravitationnelle entre le Soleil, la Lune et la Terre et font partie du même mouvement général des océans qui se manifeste par des montées et des baissées. Les autres types de courant non directement liés à la marée incluent les courants permanents du système de circulation océanique ainsi que les courants temporaires causés par les variations météorologiques.

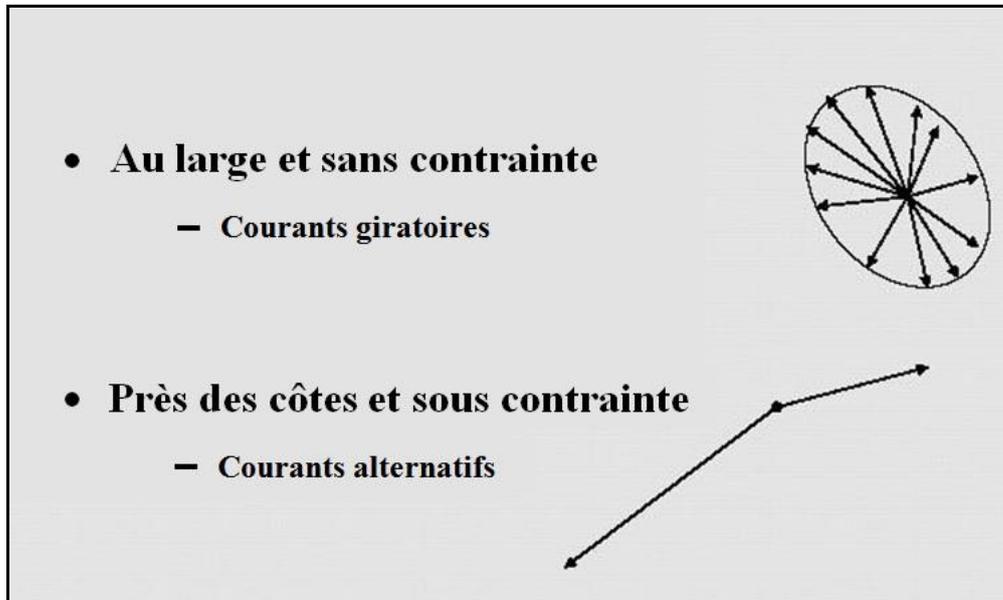
Comme pour les marées, les pays utilisent différentes terminologies pour décrire le même phénomène. Le Royaume-Uni utilise le terme *tidal streams*, les États-Unis *tidal currents* et la France *courants de marée*. Le courant total, qui est la somme des composantes dues ou non à la marée reçoit en anglais le nom de *tidal flow*.

Les écarts sont parfois attribués à la différence entre les courants de marée observés et prédits ou à la différence entre le courant total et le courant de marée. Bien que les courants de marée soient dus aux mêmes forces génératrices, ils sont beaucoup plus variables et difficiles à prédire que les hauteurs de marées. Les mouvements de marée sont des scalaires (variation des hauteurs d'eau) tandis que les courants de marée sont des vecteurs (variation en direction et en force). La vitesse et la direction des courants en un lieu donné varient en fonction du temps, mais aussi des profondeurs. De plus, les caractéristiques d'un courant local ne peuvent pas être extrapolées, en particulier dans les zones de morphologie complexe (topographie du trait de côte) où la bathymétrie des eaux peu profondes et la configuration des chenaux peuvent créer des tourbillons de différentes tailles. Il est fréquent d'observer des cisaillements provoqués par des courants opposés en direction et en amplitude aussi, par suite de cette variabilité spatiale, les prédictions déduites des mesures ponctuelles d'un courantomètre ne peuvent être étendues ni à la région ni à la colonne d'eau.

Les courants non directement liés à la marée comprennent :

- les courants de circulation océanique générale ;
- les tourbillons, les courants circum-océaniques (*Western and Eastern Boundary currents*), le contre-courant équatorial ;
- les courants de circulation thermohaline ;
- les seiches ;
- les courants induits par le vent (spirale d'Ekman) ;
- les courants fluviaux et les courants de pente.

Les courants océaniques, induits ou non par la marée, ont naturellement tendance à être giratoires (figure 5.18). Si la Terre était complètement recouverte d'eau, les courants de marée à l'équateur oscilleraient théoriquement selon l'axe est-ouest sous l'effet de la force génératrice de la marée quand la Terre et le Soleil sont alignés dans le plan de l'équateur. De rectiligne à l'équateur, la rose des courants prend progressivement une forme ellipsoïdale en fonction de la latitude jusqu'aux pôles où elle devient circulaire. Cette variation, qui est fonction de la déclinaison de la Lune et du Soleil, est encore accentuée par la force de Coriolis qui infléchit les courants vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

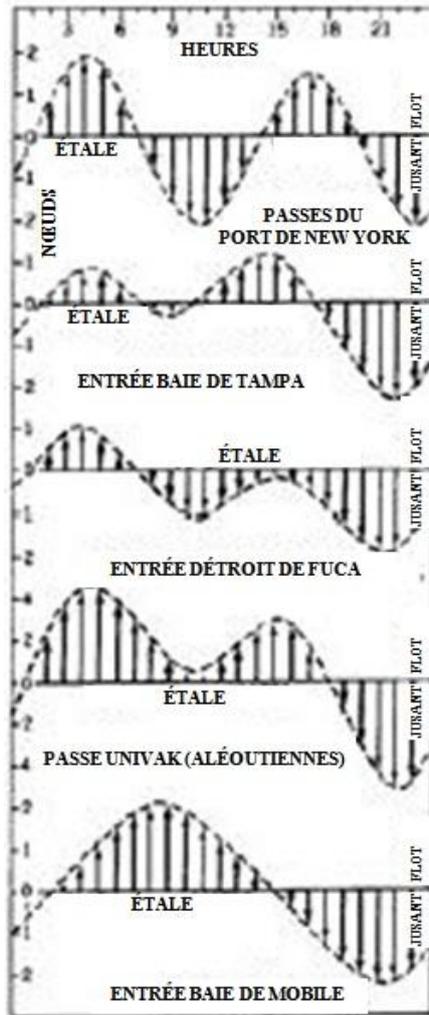


**Fig. 5.18 « Courants de marée »**

Dans les zones côtières, les courants et les flots ont tendance à être alternatifs en réponse naturelle à la bathymétrie et à la topographie des estuaires et des baies (figure 5.19). Les phases de courants alternatifs sont décrites comme ayant des périodes d'étale et de flux et de reflux maximaux. L'étale est la période de courte durée située entre le flot et le jusant. En général, le flot provient du large et se dirige vers la côte ou les petits fonds tandis que le jusant provient de la côte et se dirige vers le large et les grands fonds. Ces courants présentent des caractéristiques similaires à celles des marées de la région et sont de types semi-diurnes, diurnes ou mixtes. Leurs vitesses et leurs amplitudes sont sensibles aux variations de déclinaisons de la Lune et du Soleil ainsi qu'aux cycles périégée/apogée et périhélie/aphélie de la figure 5.4. Les flots et les jusants associés aux régimes de marées mixtes présentent des inégalités diurnes tout comme les hauteurs de marée.

La direction du courant, parfois appelée '*set*' en anglais, est par convention la direction du compas vers laquelle le flot se dirige ; la vitesse du courant, parfois appelée '*drift*' en anglais, est exprimée en nœuds par les navigateurs et en mètres par seconde par les scientifiques (1 nœud = 0,51444 m/s).

Les courants de pente sont dus aux différences de hauteurs d'eau entre deux bassins interconnectés (par ex. Hell's Gate à New York, canal du cap Cod et canal Chesapeake & Delaware). Les différences de hauteurs de marée sont causées par les différences de phase aux deux extrémités d'un détroit ou d'un bras de mer. Les courants de pente se produisent aux interconnexions des Grands Lacs et uniquement dans la direction descendante.



**Fig. 5.19 « Courants alternatifs dans des passages resserrés »**

En théorie, les courants de marée devraient être corrélés en temps et en force avec les heures et les hauteurs des pleines mers et des basses mers, car ils sont générés par la même force génératrice. Cependant, la réponse des bassins et des estuaires à cette force et la relation qui en résulte entre les courants et les hauteurs de marée est complexe et variable en fonction du lieu. En certains endroits, les courants maximums se produisent à mi-marée tandis qu'en d'autres, ils se produisent plus près des heures de pleines mers et de basses mers.

### 3.3 Mesures des courants

Il y a deux méthodes distinctes pour mesurer les courants : la méthode Lagrangienne utilise des flotteurs, des colorants à la fluorescéine, des cartes flotteurs, des ancres flottantes, des drogues, etc. et la méthode Eulérienne utilise un courantomètre mouillé en un point. Les deux techniques ont leurs avantages et leurs inconvénients selon le but recherché. La méthode Lagrangienne nécessite de pister les concentrations et les trajectoires des éléments à la dérive en fonction du temps ; elle est utile en trajectographie, pour suivre les dérives des nappes d'hydrocarbures et produits dangereux\* et pour étudier la circulation dans les estuaires. Les flotteurs subsurface peuvent être aussi déployés pour suivre les courants en profondeur. Les courantomètres eulériens fournissent des séries de mesures de courant à des emplacements et des profondeurs déterminés, utilisables pour les prédictions classiques de courants de marée à l'usage de la navigation commerciale, des pêcheurs et de la plaisance. Les deux types de mesure sont utiles pour une compréhension complète des régimes de courant et pour la

\* NdT : Classe HAZMAT aux États-Unis, HAZCHEM dans les pays du Commonwealth

mise au point et l'étalonnage des modèles hydrodynamiques de circulation. Les navires hydrographiques peuvent être appelés à mouiller différents types d'appareils de mesure de courant adaptés aux zones de sondages et aux informations recherchées.

Les premiers systèmes de mesure de courant étaient Lagrangiens et consistaient à observer les trajectoires de navires à la dérive ou de perches dérivantes déployées à partir de navires. Pour les travaux côtiers, cette méthode fut remplacée par des courantomètres mouillés, utilisant divers procédés mécaniques et électromécaniques. Ces systèmes comportent plusieurs courantomètres répartis à différentes profondeurs le long d'une ligne de mouillage verticale subsurface dont la longueur est fonction de la hauteur de la colonne d'eau ; le premier courantomètre est fixé le plus près possible de la surface. Les courantomètres mécaniques utilisent une combinaison d'ailettes, de rotors et d'hélices pour mesurer la direction et la vitesse du courant et comportent généralement un système d'enregistrement interne. Les mouillages sont de courte durée et ne dépassent pas quelques mois. Les courantomètres modernes, ou ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*), utilisent l'effet doppler pour mesurer les profils de courant dans la colonne d'eau à partir d'un appareil mouillé au fond. Les courantomètres doppler peuvent être aussi déployés horizontalement pour mesurer les courants latéraux à différentes profondeurs dans les chenaux ou être remorqués pour mesurer les courants en fonction de la profondeur selon des coupes perpendiculaires aux chenaux. Ces courantomètres peuvent également être fixés sur des bouées de surface et orientés vers le fond dans une configuration qui permette la transmission des données en temps réel, soit par transmission acoustique soit par fil conducteur. Les courantomètres doppler fournissent des profils de vitesse et de direction du courant par cellules fixes, ou *bins*, le long de la colonne d'eau. La figure 5.20 montre quelques exemples de mise en œuvre de courantomètres.



**Fig. 5.20 « Mise en œuvre de courantomètres Doppler (ADCP) »**

De nouveaux systèmes de radars HF ont été développés récemment pour produire des cartes de courants de surface sur des zones étendues, ce qui est particulièrement utile pour les travaux hydrographiques. Ces systèmes côtiers sont constitués d'un réseau d'antennes d'émission et de réception ; ils fournissent quasiment en temps réel des vecteurs de courant pour des cellules fixes (*bins*) de la zone (voir figure 5.21).

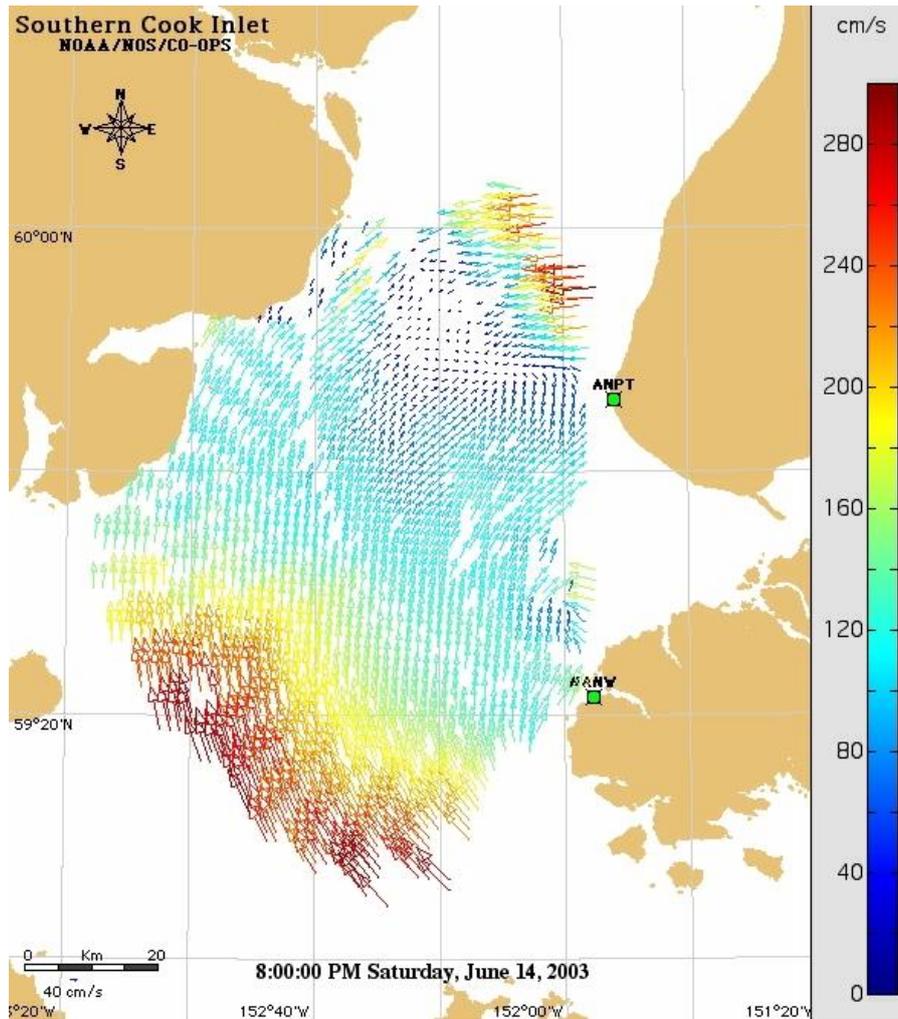


Fig. 5.21 « Carte de courants établie par radar HF à ondes de surface »

### 3.4 Prédiction des courants de marée

Les courants de marée, comme les hauteurs de marée, peuvent être prédits car ils sont causés par l'interaction du système bien connu Terre-Lune-Soleil. De même que pour les marées, ces courants peuvent être prédits par analyse harmonique des mesures réalisées sur une période de 29 jours de préférence, afin de couvrir un mois lunaire. Un minimum de 15 jours peut néanmoins être utilisé, car l'expérience montre qu'il est matériellement difficile de réaliser de plus longues durées d'observations pour une station de courantométrie ordinaire. Bien que la théorie et les méthodes soient les mêmes pour l'analyse harmonique des marées et des courants, l'analyse des courants de marée demeure plus complexe. Par exemple, dans le cas des courants alternatifs, l'analyse fournit deux ensembles de constantes pour les deux axes correspondant aux forces minimales et maximales du courant, l'axe du courant le plus fort étant la direction principale. De plus, l'analyse doit tenir compte des composantes du courant non induit par la marée.

Les navigateurs sont généralement intéressés par les durées et les forces des quatre phases du cycle du courant de marée. Les tables de prédiction des courants de marée du NOAA incluent l'étale de basse mer (*slack before flood*), le flot (*maximum flood current*), l'étale de pleine mer (*slack before ebb*) et le jusant (*maximum ebb current*). Dans les zones où le courant n'est jamais à l'étale (vitesse non nulle), les valeurs résiduelles du faible courant d'étale de pleine mer (*slack flood current*) et du faible courant d'étale de basse mer (*slack ebb current*) sont également prédites. Les stations de courants de marée prédits utilisent les mêmes concepts de ports de référence et de ports secondaires que les annuaires de

marée, mais ils ont recours à des coefficients pour corriger les prédictions journalières des stations de référence afin de calculer la force des courants en un lieu donné.

L'utilisation des prédictions de courants de marée est soumise aux mêmes restrictions que les prédictions de hauteurs d'eau. Une extrême circonspection doit être observée avant d'extrapoler une prédiction de marée ou de courant de marée au-delà de la zone d'observation. C'est particulièrement le cas des estuaires peu profonds et des fleuves où les courants de marées sont sujets à des variations spatiales en vitesse et en direction sous l'influence de phénomènes non liés à la marée tels que l'écoulement des rivières, les vent dominants et les courants d'advection indépendants des marées. Comme pour les hauteurs d'eau, les prédictions du courant de marée sont beaucoup moins fiables dans les zones où le rapport signal sur bruit est faible, c'est-à-dire quand le forçage dû à la marée est faible par rapport aux causes extérieures.

## RÉFÉRENCES

*Admiralty Manual of Hydrographic Surveying*, Volume 2, The Hydrographer of the Navy, U.K., Chapter 2, *Tides and Tidal Streams*, 1969.

“*Canadian Tidal Manual*”, Warren D. Forrester, Ph. D. sous contrat du Ministère des Pêches et des Océans, Ottawa, 1983.

“*Computational Techniques for Tidal Datums*”, rapport technique du NOAA/NOS CO-OPS 2, U.S. Department of Commerce, NOAA/NOS, décembre 2003.

“*Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoid Heights (Standards: 2CM and 5CM)*”, version 4.3, mémoire technique du NOAA/NOS NGS-58, novembre 1997.

“*Manual of Tide Observations*”, U.S. Department of Commerce, Publication 30-1, édition 1965.

“*NOS Hydrographic Survey Specifications and Deliverables*”, NOAA/NOS, Office of Coast Survey, Silver Spring, Maryland, U.S.A., mars 2003.

“*NOS RTK Team Final Report*”, rapport collectif final NOAA/NOS, 31 août 2000.

“*Standards and Specifications for Geodetic Control Networks*”, U.S. Federal Geodetic Control Committee, septembre 1984.

“*Tide and Current Glossary*”, U.S. Department of Commerce, NOAA/NOS, octobre 1989.

“*Tidal Datum Planes*”, U.S. Department of Commerce, Publication spéciale No.135, Marmer, 1951.

“*Tidal Datums and Their Applications*”, Publication spéciale N° CO-OPS 1, NOAA/NOS, juin 2000.

“*Understanding Tides*”, Steacy Dopp Hicks, décembre 2004.

“*Variability of Tidal Datums and Accuracy in Determining Datums from Short Series of Observations*”, rapport technique du NOAA/NOS 64, Swanson, 1974.