



ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DE L'INSTRUMENTATION POUR LA MESURE IN-SITU DES PARAMETRES D'ETATS DE MER

P. REGNAULT

Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement

Abstract

The Oceanography Division of the Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement (STNMTE) maintains a long duration wave measurement network along the French coasts.

So, naturally, its engineers noticed the evolution of wave measurement systems technology during the last few years.

The author makes a state-of-the-art concerning the instrumentation that can be used to measure sea-state parameters.

The experience of the STNMTE in the use of the directional wave measurement WAVESCAN buoy is exposed.

The estimation of wave parameters depends on :

- *the instrumentation which is used to measure,*
- *the treatment retained to process the data.*

Nevertheless, the in-situ measurement remains the most reliable source of data.

Thanks to the recent technological development, the number of commercialised wave measurement systems increased while the average cost decreased. Because of the interest of directional wave parameters, this should progressively lead to the generalization of directional wave measurement campaigns.

INTRODUCTION

Les problèmes de défense contre la mer, le développement des loisirs nautiques, la protection de l'environnement, la recherche de compétitivité des ports, conduisent à la réalisation d'un grand nombre d'aménagements maritimes de nature et d'importance variables.

Les études correspondantes nécessitent toutes de connaître avec précision les conditions d'agitation au droit des ouvrages à construire, et ce, pour diverses raisons telles que :

- le dimensionnement d'ouvrages,
- l'estimation de l'efficacité des infrastructures projetées,
- l'évaluation de la rentabilité économique du projet.

Pour établir des statistiques d'états de mer significatives, l'ingénieur souhaite pouvoir disposer de données de qualité en quantité suffisante. Cette double condition est rarement observée, les données disponibles en quantité résultant le plus souvent d'observations visuelles tandis que les mesures in-situ, généralement de qualité, couvrent le plus souvent une courte période.

Les capteurs satellitaires et la modélisation numérique d'états de mer offrent aujourd'hui de nouvelles perspectives en ingénierie côtière ; toutefois, la mesure in-situ reste, pour longtemps encore, le seul moyen

d'obtenir des informations à proximité d'un site à aménager.

On ne saurait trop conseiller aux responsables de projets de réaliser une campagne de mesures in-situ pour corréler les données du large à celles observées sur le site et qualifier les méthodes utilisées pour transférer les informations disponibles au large vers la côte.

Pour mener de telles campagnes, l'ingénieur projeteur a à sa disposition une grande variété de houlographes. Tous n'utilisent pas les mêmes procédés de mesure et ne restituent pas les mêmes paramètres d'états de mer.

L'article présente ces matériels et relate l'expérience du Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement (STNMTE) en matière de mesures directionnelles d'états de mer.

Il apparaît que les houlographes existants ne restituent pas tous avec la même précision les principales grandeurs caractéristiques d'états de mer.

Une synthèse de quelques campagnes de mesures comparatives réalisées afin d'évaluer la capacité de chaque houlographe à estimer les principales grandeurs représentatives d'un état de mer est présentée.

DESCRIPTION DES MATERIELS

Les matériels utilisés pour la mesure de houle peuvent être scindés en deux sous-groupes selon qu'ils permettent ou non de restituer les paramètres directionnels d'états de mer.

L'intégration des développements récents en électronique et la mesure des paramètres directionnels d'états de mer constituent les principales améliorations constatées ces dernières années dans les catalogues des fabricants de houlographes.

- Les houlographes omnidirectionnels

*** La bouée mesurant l'accélération verticale**

Le houlographe omnidirectionnel le plus répandu reste la bouée WaveRider du constructeur Datawell. Il s'agit d'une bouée sphérique dans laquelle est monté un accéléromètre sur une plate-forme stabilisée. On mesure ainsi l'accélération verticale qui est intégrée deux fois afin de restituer un signal analogique correspondant à l'élévation de la surface libre.

La bouée émet vers la station de réception, constituée d'un récepteur et d'un micro-ordinateur compatible PC sur lequel s'effectue le traitement qui, à partir des données brutes, fournit les grandeurs caractéristiques des vagues.

Fonctionnant initialement dans la bande des 27 MHz fortement perturbée par les cibistes, ces bouées peuvent désormais émettre en 31 MHz. Leur localisation pour le suivi en cas de déradage et la transmission des grandeurs caractéristiques calculées à bord sont possibles à l'aide

des satellites ARGOS ; ceci permet, en s'affranchissant des problèmes liés aux transmissions hertziennes, d'accroître de façon significative l'efficacité des campagnes réalisées à l'aide de ces houlographes.

*** La perche à houle**

Une mesure de houle peut également être effectuée à l'aide de perches capacitatives ou résistives. La mesure porte sur une variation de la capacité ou de la résistance en fonction de la partie immergée du capteur, la relation entre la grandeur mesurée et la hauteur d'eau étant connue. Ce type d'appareil est généralement mis en place le long d'ouvrages et est donc, en conséquence, mieux adapté à la mesure d'agitation portuaire.

*** Les houlographes à pression**

Il s'agit de houlographes immergés, généralement posés sur le fond. Le principe n'est pas nouveau puisque dès les années 60, VALEMBOIS avait développé le houlographe à pression du Laboratoire National d'Hydraulique. Les améliorations essentielles concernent les capteurs utilisés pour mesurer les variations de pression dues à la houle. Ils sont désormais de taille réduite. On mesure des variations de caractéristiques électriques occasionnées par les variations de pression auxquelles sont soumis les capteurs (Digiquartz, capacité électrostatique, transducteur,...), le passage des unes aux autres étant parfaitement connu. On peut citer les produits SBE 26 (Sea Bird Electronics), MicroWave (Coastal Leasing) et S4 (Inter Ocean).

Les mesures sont généralement stockées sur mémoire morte au niveau du houlographe et récupérées via une sortie série RS 232. Une liaison par câble est physiquement possible mais peu utilisée en raison des problèmes de tenue dans le temps.

La figure 1 donne les dimensions caractéristiques de l'un de ces houlographes.

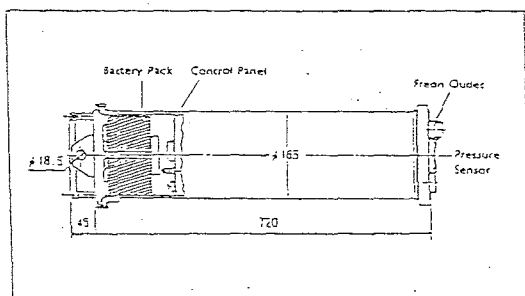


Fig. 1 : Dimensions caractéristiques d'un houlographe à pression

Le houlographe doit être relevé régulièrement (autonomie de l'ordre de trois semaines) afin de récupérer les données à l'aide d'un micro-ordinateur compatible PC.

Pour passer des fluctuations de pression mesurées au signal élévation de la surface libre, on procède de la façon suivante :

- Une transformée de Fourier du signal fluctuation de pression est effectuée,

- Un coefficient correcteur dépendant de la fréquence est appliqué aux coefficients de Fourier de cette transformée pour obtenir la transformée de Fourier du signal élévation de la surface libre.

Ce coefficient correcteur découle de la théorie de la houle linéaire et conduit à une importante correction dans les hautes fréquences. On est donc obligé de définir une fréquence de coupure au-delà de laquelle le bruit devient prépondérant dans la phase de correction.

On applique une transformée de Fourier inverse pour obtenir le signal temporel élévation de la surface libre. Il est important de noter que la fréquence de coupure est choisie en fonction de la profondeur.

Ces houlographes sont généralement conçus pour être placés en faible profondeur (de l'ordre de 20 m).

*** L'écho-sondeur**

L'écho-sondeur est utilisé en tant que houlographe suivant deux modes :

- soit posé sur le fond, pointant vers le haut (ECOMAR),

- soit aérien, monté sur une structure fixe, pointant vers le bas (ORCA Instrumentation,...).

Il mesure dans ces conditions l'agitation au pied de l'ouvrage sur lequel il est installé.

L'appareil émet de courts trains d'onde ultra-sonores vers la surface. La mesure du temps de propagation (aller-retour) permet de déterminer la hauteur d'eau au-dessus du capteur ou l'épaisseur de la tranche d'air entre le capteur et la surface libre.

Le signal est stocké et récupérable de la même manière qu'avec les houlographes à pression.

La mesure directionnelle de houle

L'emploi de houlographes permettant la restitution des paramètres directionnels d'états de mer s'est développé ces dernières années et devraient encore s'accroître étant donné l'apparition récente de matériels moins coûteux que par le passé.

Rappels théoriques

Nous parlons généralement abusivement de mesures directionnelles de houle. En fait, les houlographes directionnels ne mesurent pas la direction des vagues. Ils mesurent trois grandeurs à partir desquelles un traitement fondé sur certaines hypothèses, permet de restituer les principaux paramètres directionnels permettant de caractériser un état de mer.

Les grandeurs mesurées peuvent être :

- accélérations verticales et pentes suivant deux axes perpendiculaires,

- accélérations verticales et horizontales suivant deux axes perpendiculaires,

- hauteur des vagues et composantes du courant induit par la houle suivant deux axes perpendiculaires.

Quelles que soient les grandeurs mesurées, on peut se ramener au cas où on dispose des trois signaux :

- z, élévation de la surface libre,
- $\partial z / \partial x$, pente suivant l'axe des x,
- $\partial z / \partial y$, pente suivant l'axe des y.

L'hypothèse principale consiste à supposer que z correspond à la superposition d'une infinité d'ondes sinusoïdales indépendantes, de périodes et de directions distinctes.

On suppose de ce fait que z est un processus gaussien. Ceci est généralement bien vérifié en grande profondeur où la théorie de la houle linéaire est applicable.

On cherche à estimer la répartition en fréquence et direction de l'énergie des vagues ; le spectre directionnel s'écrit :

$$F(f, \alpha) = E(f) S(f, \alpha) \quad \text{où,}$$

$E(f)$ est l'énergie comprise dans la bande de fréquence Δf centrée en f et $S(f, \alpha)$ est une fonction d'étalement.

La méthodologie la plus employée, développée par Longuet-Higgins, consiste à déterminer les cinq premiers coefficients de la transformée de Fourier de $F(f, \alpha)$ en fonction de α :

$$F(f, \alpha) + A_0 + A_1 \cos \alpha + B_1 \sin \alpha + A_2 \cos 2\alpha + B_2 \sin 2\alpha + \dots$$

Ceux-ci s'expriment sous la forme de combinaisons des coefficients des transformées de Fourier en fonction de f des trois signaux mesurés.

On ne peut estimer que les cinq premiers coefficients de la transformée de $F(f, \alpha)$, d'où une estimation imparfaite du spectre directionnel. Par ailleurs, il est fait l'hypothèse que l'énergie se répartit symétriquement autour d'une direction moyenne dans une bande de fréquence donnée.

Pour chacune de ces bandes, le traitement fournit l'énergie et la direction principale de propagation.

La direction moyenne pour une séquence d'acquisition en est déduite.

Par ailleurs sont calculées la hauteur significative et la période moyenne ainsi qu'un indicateur de la dispersion angulaire.

D'autres méthodes de traitement ont été développées pour pallier aux limitations de la méthode de Longuet-Higgins qui ne permet pas de restituer certains états de mer complexes tels que ceux caractérisés par la superposition de plusieurs trains d'onde de directions différentes et de périodes voisines.

Les logiciels de traitement proposés avec certains houlographes intègrent quelques-unes de ces méthodes :

- méthode du maximum de vraisemblance,
- méthode du maximum d'entropie.

Le STNMTE suit actuellement, pour le compte du METT, une étude réalisée par le LNH qui vise à comparer la capacité des méthodes de traitement existantes à restituer les paramètres directionnels pour des états de mer type.

Instrumentation

Les houlographes directionnels sont de différents types selon la nature des grandeurs qu'ils mesurent.

* Les bouées pilonnement-roulis-tangage

Ce sont des bouées d'un diamètre avoisinant les 2,5 mètres conées pour suivre les mouvements de la surface libre. Elles ont donc une forme généralement torique, certaines étant équipées d'une queue afin d'éviter d'éventuels retournements. Dans ce cas, la fonction de

transfert de la bouée est prise en compte dans le traitement.

Les produits existants aujourd'hui sont la WAVESCAN (Seatex-Norvège), la WADIBUOY (Néréides-France), la WAVEC (Datawell, Pays-Bas), la NORWAVE (Oceanor, Norvège).

Toutes les bouées utilisent le capteur HIPPY (40 ou 120) de chez Datawell qui permet une mesure du pilonnement et des pentes suivant deux axes perpendiculaires. Un compas magnétométrique permet de se rapporter au nord magnétique.

Le traitement peut être effectué à bord ou à terre et les données transmises en VHF ou UHF, ou bien encore via satellite.

* Les bouées mesurant les accélérations suivant trois axes

Il s'agit des WaveRider Directionnelle (Datawell).

Ce sont des bouées sphériques de 0,9 mètres de diamètre équipées d'un capteur de pilonnement, roulis, tangage, d'un compas et de deux accéléromètres montés suivant deux axes perpendiculaires.

Les informations roulis-tangage sont utilisées pour convertir les accélérations mesurées suivant x et y en accélérations suivant les axes nord-ouest dans le plan horizontal.

A partir de ces signaux, un traitement du type de celui présenté précédemment est effectué.

* La bouée du type pendule inversé

Il s'agit de la WAVETRACK (Endeco-USA).

C'est une bouée sphérique de 0,9 mètres de diamètre en dessous de laquelle se trouve un pendule.

La bouée est équipée d'un accéléromètre, de capteurs de gîte suivant deux axes perpendiculaires et d'un compas permettant de se rapporter aux axes N-S et E-W.

Le principe de mesure consiste à considérer que les courants orbitaux induits par la houle provoquent l'inclinaison de la bouée.

Les inclinaisons sont corrélées avec le déplacement vertical obtenu à l'aide de l'accéléromètre.

La méthode du zero-up crossing permet d'obtenir les hauteurs et périodes des vagues.

L'analyse détermine la direction du courant orbital lorsqu'une vague d'une certaine période est observée. Est obtenue ainsi la direction de propagation des vagues ayant cette période.

Une méthode particulière de traitement est associée à ce type de mesures.

Il s'agit de calculer la direction moyenne à partir de la direction associée à chaque crête de vague identifiée par la méthode du zero-up crossing.

Les autres méthodes (Longuet-Higgins, MLM, MEM) peuvent également être employées.

* La mesure directionnelle de houle par radar

La mesure directionnelle de houle par radars au sol est réalisée soit :

- à l'aide de systèmes Hautes Fréquences (3-30 MHz). La zone couverte peut atteindre alors 150 à 250 km (CODAR-USA / MAREX-Grande Bretagne) ;

- à l'aide de systèmes micro-ondes (6 GHz). La zone couverte est alors inférieure à 10 km (MIROS-Norvège).

La mesure de houle par radar utilise le fait que la réflexion des ondes radioélectriques dépend de la surface équivalente d'écho effective de la surface de la mer, c'est-à-dire l'état de la mer. C'est la puissance des ondes radioélectriques réfléchies par la surface qui est mesurée.

A l'aide d'un radar, on peut obtenir la hauteur significative.

Les paramètres directionnels d'état de mer peuvent être obtenus à l'aide de deux radars ou d'un radar pointant dans une direction variable.

**Les houlographes directionnels immergés*

Ces houlographes associent aux principes de mesure de l'élévation de la surface libre présentés dans la première partie une mesure du courant orbital suivant deux axes perpendiculaires dans un plan horizontal. Les courantomètres utilisés sont généralement du type électromagnétique ; l'eau se déplaçant dans un champ électromagnétique créé par l'instrument, produit un voltage proportionnel à sa vitesse.

Ces houlographes se montrent particulièrement intéressants pour une application en zone côtière (faibles profondeurs). Ils sont peu encombrants et permettent d'obtenir une information directionnelle pour un investissement proche de celui correspondant à l'acquisition d'une bouée de mesure omnidirectionnelle et de sa station de réception. Citons les matériels :

- DWM (ECOMAR),
- S4DW (Inter Ocean),
- Ophiure (Océano Service).

LA MESURE DIRECTIONNELLE DE HOULE AU STNMTE

Dans le cadre de son activité de gestion d'un réseau de mesures de houle pour le compte de la DPNM, le STNMTE maintient deux points de mesures directionnelles de houle. Le premier correspond à une instrumentation pour la mesure de pilonnement, roulis et tangage installée sur la bouée-phare mouillée au large de Ouessant. Le second est situé dans le golfe normand-breton. Nous présentons ci-après les résultats des campagnes réalisées en insistant davantage sur l'expérience acquise avec la bouée WAVESCAN qui constitue le second point de mesure.

La bouée WAVESCAN

Le STNMTE a fait l'acquisition, en 1992, d'une bouée WAVESCAN fabriquée par la société SEATEX. Elle est mouillée au large de Saint-Malo, dans le sud-ouest du plateau des Minquiers, en un point où la profondeur d'eau est de 40 mètres.

Il s'agit d'une bouée torique d'un diamètre de 2,5 mètres surmontée d'un mât supportant l'antenne d'émission-réception et une antenne ARGOS, le service bouée-ancrée étant utilisé afin de localiser aisément la bouée en

cas de rupture d'ancrage. Il est possible d'équiper la bouée de capteurs météorologiques.

Cette bouée a une queue et un lest afin d'éviter d'éventuels retournements (fig.2). Le poids total de la bouée est de 924 kg.

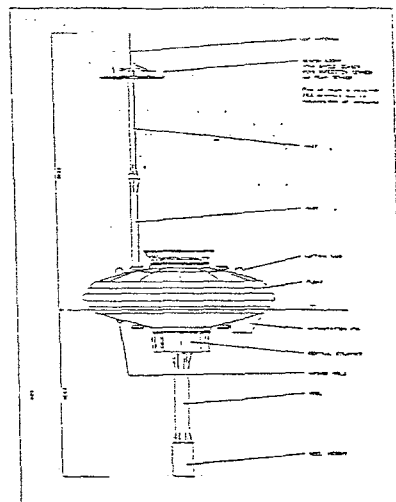


Fig. 2 : La bouée WAVESCAN

Le mouillage en matériaux synthétiques est tendu dans sa partie inférieure à l'aide d'un gros flotteur de subsurface, la partie supérieure de la ligne étant équipée de petits flotteurs afin d'assurer sa flottaison. Au point de mesure, les courants peuvent atteindre quatre noeuds. Les craintes initiales sur la tenue du mouillage dans ces conditions de courant ont été rapidement dissipées, la bouée n'ayant pas déradée, aucune gîte particulière n'ayant été constatée.

Pour la maintenance du houlographe, le STNMTE collabore avec la subdivision Phares et Balises de Saint-Malo qui dispose des moyens nautiques suffisants.

Le STNMTE a choisi de transmettre vers la station à terre l'intégralité des données brutes, afin de pouvoir utiliser ces données dans le cadre de recherches sur les méthodes de traitement des mesures directionnelles.

La transmission radioélectrique se fait dans la bande des 151,650 MHz vers la station de réception situé au cap Fréhel.

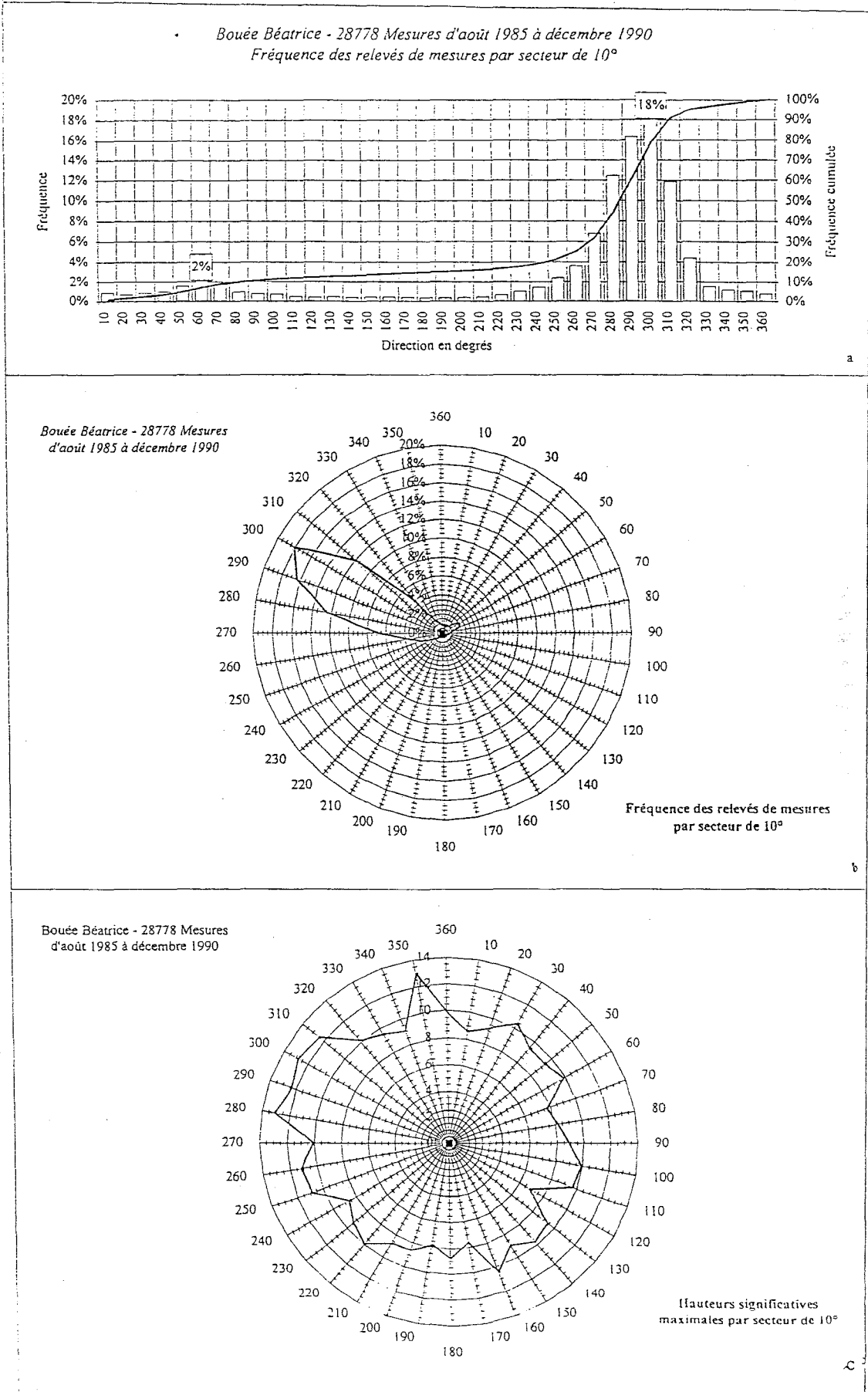
Expérience acquise

La bouée a été mouillée le 15 janvier 1992, la réception se faisant initialement à Saint-Malo.

Bien que les recommandations du constructeur concernant l'installation de la station de réception aient été respectées (hauteur d'antenne fonction de la distance de transmission), et que des essais préalables avaient été réalisés en Norvège dans des conditions plus défavorables si l'on s'en tient aux seuls critères distance de propagation - hauteur d'antenne - puissance d'émission, des problèmes de transmission ont été rencontrés.

Plus généralement, notre expérience nous a montré que les spécifications des constructeurs en matière de distance de transmission en mode VHF ne sont pas valables le

Figure 3



long de nos côtes, des perturbations étant observées pour des distances inférieures.

Ces problèmes nous ont conduit à déplacer la station de réception vers le cap Fréhel, plus proche du point d'émission et offrant une hauteur d'antenne plus élevée. La puissance d'émission a également été légèrement modifiée, ce qui a conduit à une réduction de l'autonomie de la bouée.

Le comportement à la mer de la bouée WAVESCAN est apparu bon. Seule une rupture d'ancrage, provoquée par un pêcheur, a été constatée ; la localisation par satellite (service MBM de CLS ARGOS) nous a permis de récupérer rapidement le houlographe.

L'inconvénient majeur du système réside dans son coût de fonctionnement élevé en raison du remplacement annuel des piles au lithium alimentant l'instrumentation à bord de la bouée. Ce problème de coût a depuis été résolu par le constructeur qui propose désormais une version solarisée de son houlographe.

Notre expérience nous conduit à faire les recommandations suivantes pour la rédaction d'un cahier des charges en vue de l'acquisition d'un houlographe directionnel :

- fixer des contraintes I,s aux coûts prévisibles de fonctionnement du système ;
- faire référence aux normes françaises en matière de télécommunications et plus particulièrement à celles spécifiant les caractéristiques des émetteurs-récepteurs.

Résultats

Afin d'illustrer l'intérêt de la mesure directionnelle de houle pour les aménageurs côtiers, nous présentons ci-après quelques résultats obtenus dans le cadre des campagnes réalisées au large de Ouessant (fig. 3 et 4) et de Saint-Malo (fig. 5).

L'histogramme du nombre de séquences d'acquisition par secteur de direction permet de mettre en évidence les directions privilégiées de propagation de la houle. Une présentation en coordonnées polaires est également possible.

La figure 3c montre la hauteur significative maximale enregistrée à Ouessant par secteur.

Le point de mesure étant très au large, on constate que les hauteurs significatives peuvent être importantes dans toutes les directions, les houles d'ouest / nord-ouest étant tout de même les plus fortes.

La figure 4 montre, pour les principaux secteurs de propagation observés, les histogrammes des hauteurs significatives et périodes moyennes. On constate que la répartition des périodes est fonction de la direction.

Ce genre de représentation par secteurs de direction apporte un plus à l'ingénieur qui cherche à isoler des conditions types (hauteur-période-direction) caractérisant un site.

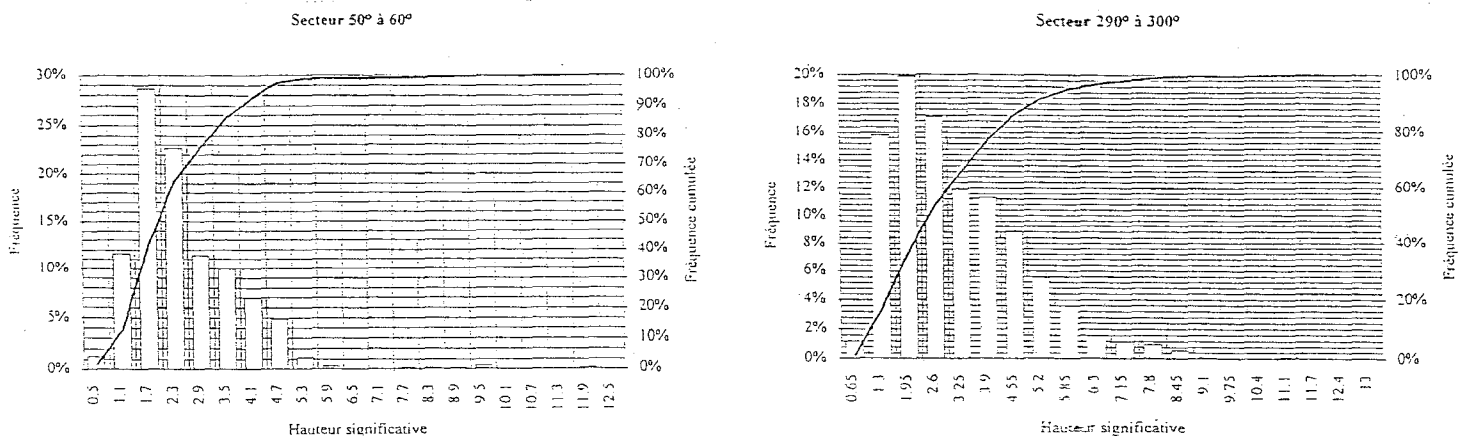


Fig. 4a

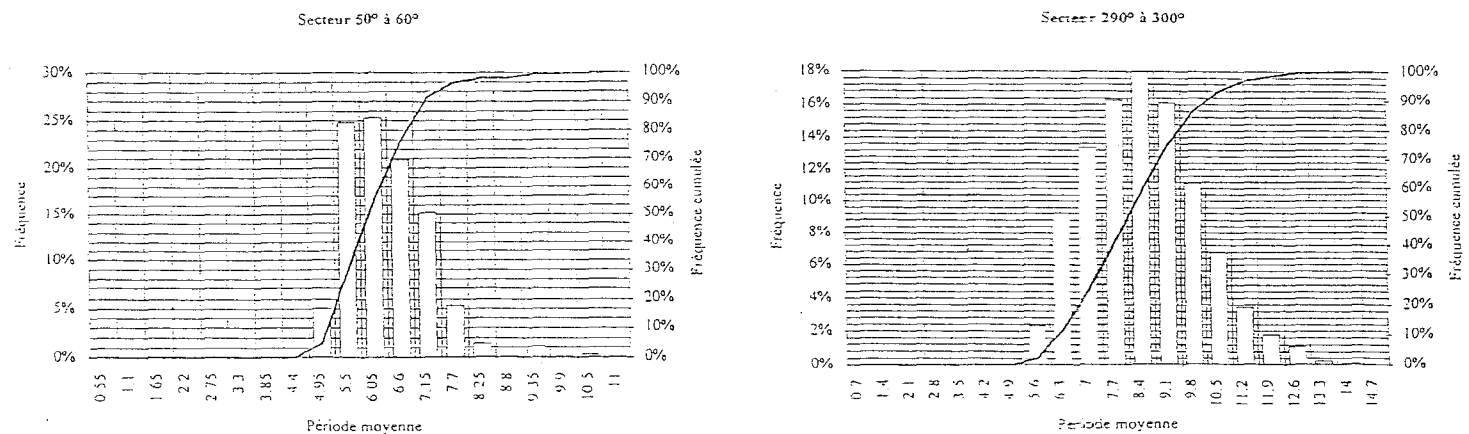
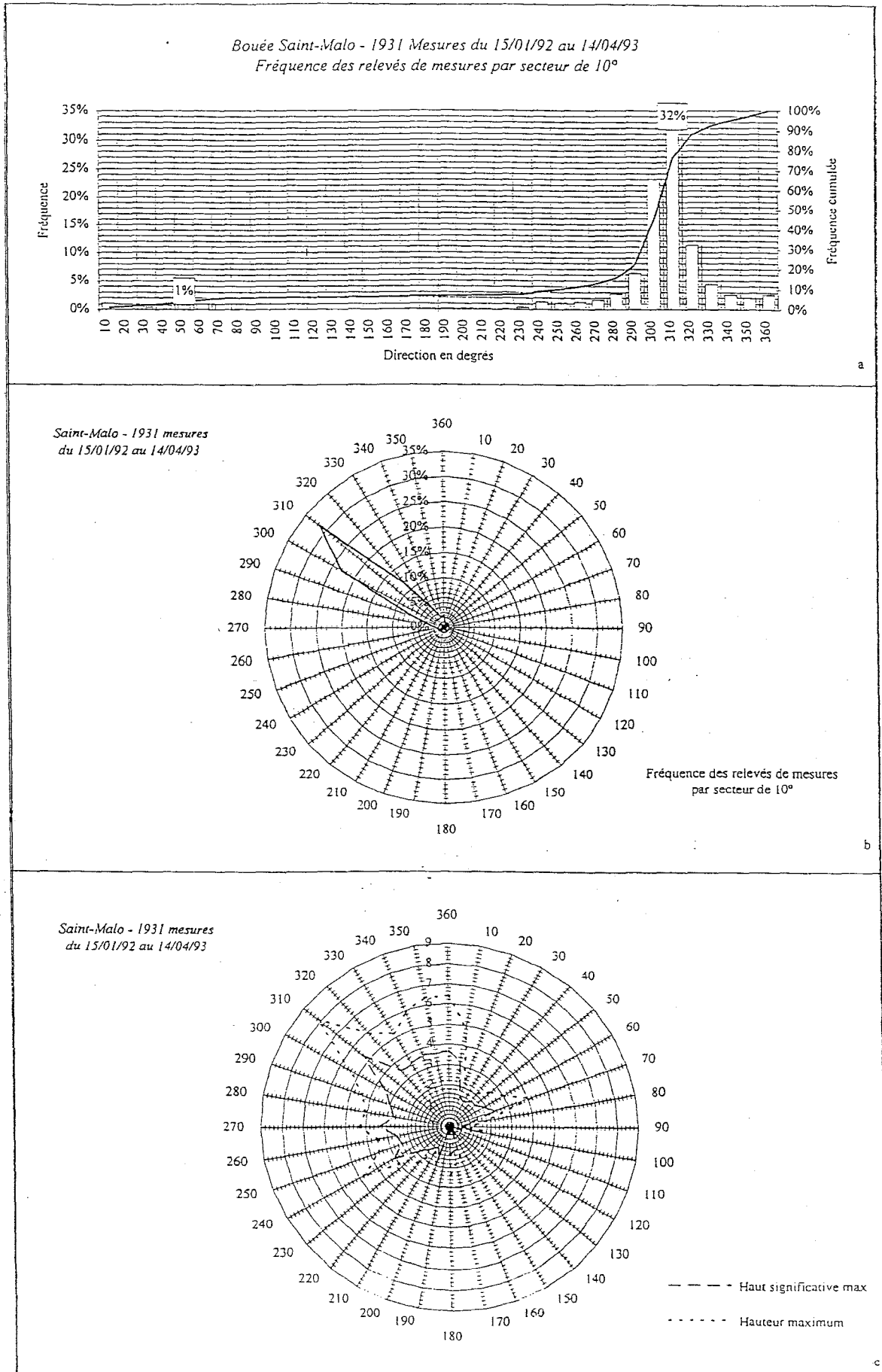


Fig. 4b

Figure 5



La figure 5 synthétise les enregistrements effectués au large de Saint-Malo.

La répartition du nombre de mesures par secteurs de direction est proche de celle observée au large de Ouessant. Ceci n'est pas étonnant et illustre le fait que les conditions météorologiques génératrices des états de mer à Ouessant et Saint-Malo sont généralement les mêmes. Ainsi, la mesure de la direction permet de corrélérer plus aisément les mesures faites sur deux sites distincts et d'enrichir éventuellement un site pauvre en données à l'aide d'un site riche en mesures.

La figure 5c met en évidence l'importance des houles de secteur Nord à Saint-Malo, qui, bien que leur probabilité d'occurrence soit faible, peuvent néanmoins être importantes.

En fait, les informations directionnelles recueillies sont beaucoup plus riches que celles représentées ici puisqu'elles portent sur des spectres directionnels d'états de mer.

Le développement de ce type de mesure pose le problème de la représentation des données en fonction des besoins des ingénieurs.

Un travail de mise en forme synthétique comparable à celui qui a été fait pour la mesure omnidirectionnelle est à entreprendre afin d'aboutir à une représentation standard répondant au mieux aux demandes des aménageurs côtiers.

COMPARAISONS

Nous avons présenté, dans la première partie de cet article, l'ensemble des moyens de mesure in-situ des paramètres d'états de mer existants à l'heure actuelle.

Nous avons pu voir que ceux-ci utilisent des principes de mesure variés et parfois des méthodes de traitement différentes.

Dès lors, on est en droit de s'interroger sur la qualité associée aux paramètres obtenus à l'aide des différents systèmes. Afin de répondre à ce type d'interrogation, des campagnes de mesures comparatives ont été réalisées.

L'une des plus importantes a été réalisée dans le cadre du projet WADIC (Wave Direction Measurement Calibration Project).

Le STNMTE a, quant à lui, en collaboration avec l'université de Caen, réalisé une courte campagne de mesure destinée à comparer les mesures issues d'une bouée Datawell omnidirectionnelle à celles provenant d'un houlographe à pression immergé.

Par ailleurs, des comparaisons ont été réalisées afin d'évaluer la qualité de la bouée WaveRider Directionnelle de Datawell.

Présentation du projet WADIC

Le projet WADIC avait pour objectif d'évaluer les systèmes de mesures directionnelles de houle disponibles sur le marché dans des conditions de mer difficiles.

La campagne correspondante a eu lieu à proximité d'une plate-forme pétrolière en mer du Nord et s'est déroulée principalement au cours de l'année 1985, les conditions observées allant de la mer calme jusqu'à 11 mètres de hauteur significative.

Les principaux systèmes commercialisés testés et susceptibles d'intéresser l'ingénierie côtière ont été :

- les bouées WAVEC, WAVESCAN, NORWAVE et WADIBUOY basées sur le principe de la mesure de pilonnement, roulis et tangage,
- le radar micro-onde MIROS,
- la bouée WAVETRACK du type pendule inversé ;
- des houlographes immergés du type capteur de pression + courantomètres.

La mesure de référence a été établie à partir des données issues de plusieurs houlographes montés sur la plate-forme pétrolière.

Résultats

Les principales conclusions des campagnes réalisées sont reprises ci-après.

La WAVERIDER sous-estime la hauteur significative. Pour des enregistrements supérieurs à 4 mètres, le biais est de 20 cm ; il atteint 27 cm pour des hauteurs significatives supérieures à 6 mètres.

La WAVETRACK surestime les hauteurs de vague. Dans le domaine des fréquences, une forte surestimation est constatée pour les fréquences inférieures à 0,1 Hz et supérieures à 0,2 Hz. L'estimation n'est pas fiable en-dessous de 0,12 Hz.

Pour les bandes de fréquences comprises entre 0,12 et 0,3 Hz, la WAVETRACK estime correctement les directions, le biais avoisinant toutefois 5°. Notons que depuis cette expérimentation, la société ENDECO a sorti une nouvelle bouée et a revu les méthodes de traitement ce qui, a priori, a dû accroître la qualité de ce système.

La NORWAVE surestime les hauteurs significatives sauf lorsque celles-ci sont très élevées.

L'étalement du spectre est surestimé pour toutes les classes d'états de mer et plus particulièrement pour les forts états de mer. La bouée équipée d'une queue n'a pas montré de problèmes de tenue à la mer.

La WAVEC sous-estime les hauteurs significatives. En moyenne, cette sous-estimation est de 23 cm pour les Hs supérieurs à 6 mètres. Le spectre est sous-estimé en moyenne au-dessus de 0,1 Hz. Les directions de propagation sont bonnes avec un biais moyen de 4°.

Un problème de tenue à la mer a été rencontré avec un retournement lors de forts états de mer.

La WADIBUOY surestime largement les hauteurs (plus de un mètre pour les petits états de mer). Il semble que les mesures soient bruitées ce qui conduit à une surestimation de l'énergie dans toutes les bandes de fréquence. Le biais moyen sur les directions est de 9°, une grande variabilité ayant été observée.

La WAVESCAN n'a pas montré de différences significatives avec la mesure de référence.

Le radar-MIROS sous-estime les hauteurs de 15 cm en moyenne. La sous-estimation est plus importante lorsque Hs est inférieur à 4 mètres. La période de pic est surestimée, particulièrement pour les forts états de mer. Une ambiguïté de 180° sur la direction est constatée. Une fois celle-ci levée, on constate un écart de 10° en moyenne avec la mesure provenant des autres systèmes.

Houlographe immergé : En raison de la coupure en dessous de 5 secondes, la période moyenne est

surestimée. Pour les faibles états de mer, l'énergie dans les basses fréquences est sous-estimée. En raison de l'atténuation du courant orbital avec la profondeur, la direction des vagues et l'étalement directionnel sont mal estimés au-dessus de 0,2 - 0,3 Hz.

Le STNMTE a entrepris, avec l'université de Caen, une campagne de comparaison portant sur la mesure des hauteurs et périodes de houle à l'aide d'une WAVERIDER et d'un houlographe immergé S4DW. Le site d'étude était caractérisé de la façon suivante :

- profondeur 15 mètres,
- marnage pouvant atteindre 14 mètres (Saint-Malo).

La campagne a duré deux mois et n'a pu se dérouler qu'en période estivale ; aussi aucun fort état de mer n'a pu être observé. Toutefois, on a pu constater les points suivants :

- une bonne corrélation apparaît entre les hauteurs,
- pour les périodes, si les deux houlographes traduisent une même évolution, le S4DW, avec la fréquence de coupure choisie ($f_c = 0,166$ Hz), sous-estime les périodes (fig. 6).

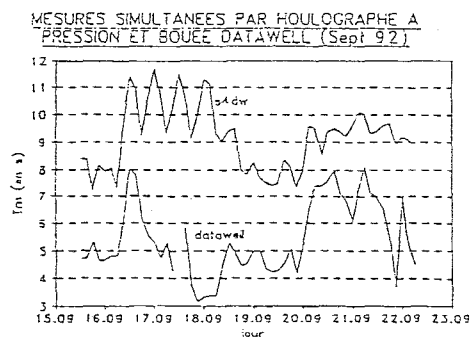


Figure 6

Cela montre l'importance du choix de cette fréquence de coupure qui doit être choisie en fonction de la profondeur. Cela rend difficile l'utilisation de ce type de houlographe en zone côtière où le marnage est du même ordre de grandeur que la profondeur d'eau.

Récemment Datawell a commercialisé une Directional WaveRider présentant d'importants avantages sur le plan pratique (faibles dimensions, faible consommation,...).

OCEANOR, compagnie océanographique norvégienne a comparé cette bouée à une bouée intermédiaire entre la NORWAVE et la WAVESCAN, et ce sur quatre mois et demi de mesure au large (profondeur 180 m).

Il a été trouvé que la Directional WaveRider sous-estime les hauteurs significatives mais fournit des données directionnelles de qualité.

CONCLUSIONS

Ces dernières années, les houlographes commercialisés se sont multipliés. Les principaux efforts des constructeurs ont porté sur le développement d'instruments compacts et légers destinés à être immergés sur le fond.

Ces houlographes sont particulièrement bien adaptés aux zones côtières où les profondeurs sont inférieures à 20 mètres et où le marnage reste faible par rapport à la profondeur.

Les développements récents ont conduit également à l'apparition d'un plus grand nombre de houlographes directionnels. L'exploitation faite des données recueillies par le STNMTE met en évidence l'intérêt de ce type de données pour l'aménageur côtier.

Toutefois, les procédés de mesure et les méthodes de traitement utilisés pour restituer les paramètres directionnels d'états de mer sont multiples et permettent d'obtenir un grand nombre de renseignements concernant les spectres directionnels d'états de mer.

Actuellement, tous ne sont pas exploités par les ingénieurs projeteurs et se pose le problème du choix d'une représentation synthétique standardisée de la mesure directionnelle de houle.

Une des conséquences de la multiplicité des instrumentations et méthodes de traitement est la dispersion observée entre les estimations d'un même paramètre d'état de mer obtenues par des houlographes différents.

L'un des intérêts principaux de la mesure in-situ étant d'offrir la possibilité de caler les méthodes utilisées pour estimer les conditions d'agitation en zone côtière, il apparaît indispensable, dès lors qu'une campagne est programmée, d'évaluer la capacité des houlographes utilisés à restituer fidèlement les caractéristiques d'états de mer.

Bibliographie

Allender J, Audunson T, Barstow S.F, Bjerken S, Krogstad H.E, Steinbakke P, Vartdal L, Gorgman L.E and Graham C. The Wadic project : A comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation, *Ocean Engineering*, 16, 505-536.

Broche P, Forget P, de Maistre J.C, Devenon J.L, Crochet M. VHF radar for ocean surface current and sea state remote sensing, *Radio Science*, 22, 1, 69-75.

Barstow F, Kollstad T, Field Trials of the Directional Waverider. ISOPE 91.

Dagfin Dr, Brodtkorb C, Oistein Gronlie Dr and Andersson F. A method of simultaneous measurement of directional wave spectra, Surface current and rig notion.

Regnault P. 1990. Traitement des mesures directionnelles de houle. Application aux données recueillies au cours des tempêtes exceptionnelles du début de l'année 1990. Journées CEIFICI n°335, Travaux à la mer, côtes, ports & off-shore