



Campagne de mesure de houle/courant en Méditerranée Orientale Déroulement et résultats.

Agnès Robin, Michel Paillard, Marc Prevosto
IFREMER Centre de Brest - DITI/GO/SOM

Résumé

Une instrumentation de mesure de houle directionnelle et de courant a été déployée sur un site méditerranéen situé en Crète. L'instrumentation était composée de 3 bouées DATAWELL (2 directionnelles et 1 non directionnelle), d'un courantomètre INTEROCEAN S4DW et de courantomètres AANDERAA. La campagne a duré près de 10 mois, l'accent ayant été mis sur la qualité de l'acquisition des données en continu des mesures de houle. Après une description de la campagne de mesure certains résultats sont présentés: évolution du large vers la côte des états de mer, intercalibration de deux systèmes directionnels (Bouée, S4DW) en terme de paramètres synthétiques d'état de mer et de dissymétrie crête-creux.

1. Présentation du site

Le site, choisi dans le cadre du projet WAVEMOD [1,2] pour sa situation méditerranéenne avec un fetch relativement long et des conditions hydrodynamiques intéressantes [3], est situé sur la côte nord-ouest de l'île de Crète. C'est une petite baie exposée au nord et située à proximité du port de Rethymnon. Sa topographie n'est pas très complexe, la pente est de l'ordre de 2.5%, induisant des phénomènes de réfraction et de diffraction peu importants.

1.1 Conditions météo-océaniques : vent, houle, courant, marée

Le site est exposé aux vagues générées par les régimes de vents locaux à dominance Ouest et Nord-Ouest. Les régimes de Nord-Est proviennent généralement des dépressions des régions orientales de la Méditerranée. En été, le site est soumis aux vents étésiens de type Meltem. Ainsi, les conditions météo-océaniques du site sont assez différentes en été et en hiver, mais des conditions sévères peuvent se rencontrer à chaque saison. Les marées ne sont pas significatives: quelques dizaines de centimètres. La circulation générale est faible (quelques cm/s). Les courants locaux sont donc essentiellement générés par les vents.

1.2 Contraintes logistiques

Liées aux activités anthropiques : Les contraintes principales tiennent à la présence d'une activité de pêche artisanale sur toute la zone, à la fois au large et à la côte.

Liées au suivi de l'instrumentation : La réception des signaux HF émis par les

bouées oblige à choisir une base à terre appropriée face au site qui permet, également, un suivi visuel de l'instrumentation.

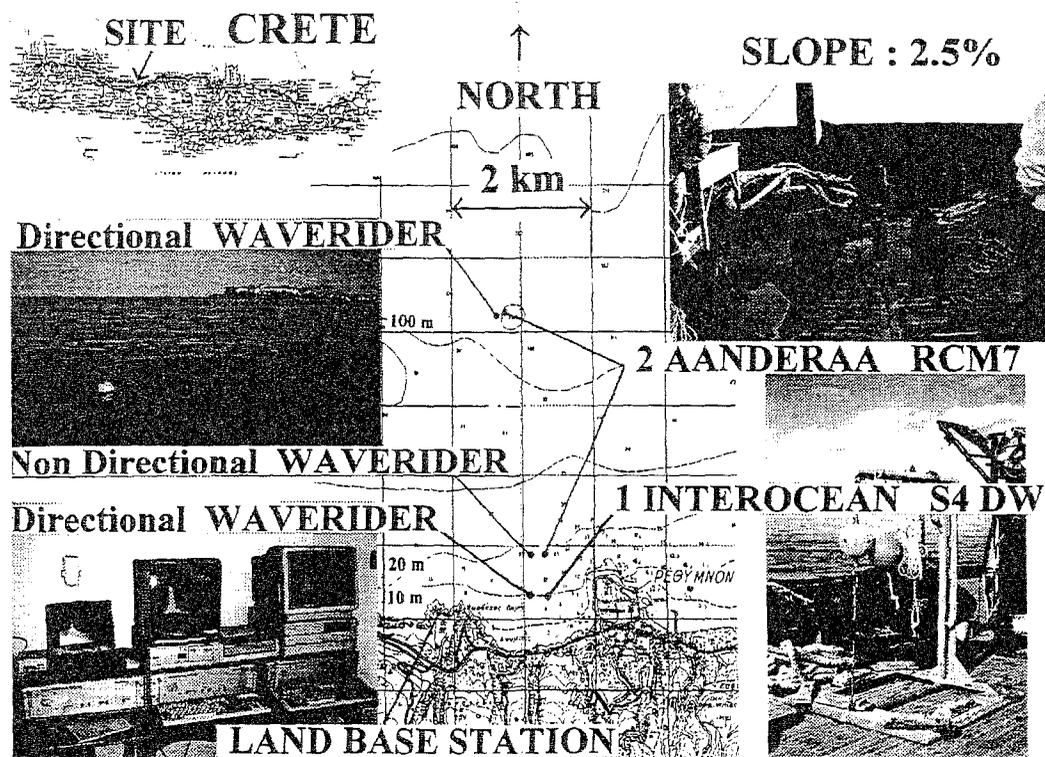


Figure 1 : Carte du site et implantation des matériels

2. Présentation de l'instrumentation

La topographie du site a conduit à installer 3 bouées (2 bouées DATAWELL directionnelles et 1 bouée DATAWELL non directionnelle) alignées sur un axe quasiment Nord (figure 1) au niveau d'isobathes choisies de façon à bien étudier les variations de propagation de la houle :

- bouée directionnelle sur fonds de 100 m (4 km de la côte)
- bouée non directionnelle sur fonds de 20 m (1.5 km de la côte)
- bouée directionnelle sur fonds de 10 m (moins de 1 km de la côte)

Afin d'appréhender l'influence des courants sur la houle, des courantomètres situés à 8.5 m sous la surface furent installés à proximité de chaque bouée. Sur fonds de 10 m, ce fut un courantomètre électromagnétique INTEROCEAN S4 DW donnant, également, des informations sur la houle directionnelle et sur la marée.

En raison de l'absence de mesures locales, une station météorologique fut installée à terre, sur la station permanente de réception des signaux VHF. Le contrôle-qualité, le conditionnement et le pré-traitement des données y étaient effectués.

3. Déroulement

La campagne s'est déroulée sur près de 10 mois, du 1er février au 26 novembre 94. Elle a été organisée en vue d'acquérir en continu des données de qualité. La nécessité d'intervention sur les bouées, soit dans le cadre de la maintenance régulière, soit en cas d'incident a rendu nécessaire la présence d'un technicien en permanence sur le site durant l'ensemble de la campagne. La mise en place et le suivi de l'instrumentation ont été effectués, sous contrat, par la SCOP METEOMER. Toutes les cinq semaines, les mouillages étaient vérifiés par un plongeur professionnel et toutes les dix semaines, ils étaient relevés, nettoyés et vérifiés.

Pendant la campagne, le site fut exposé à de nombreuses mais courtes tempêtes qui ont généré des états de mer importants avec des hauteurs significatives Hs supérieures à 3 m et pouvant atteindre 5 m (figure 2).

De plus, une bathymétrie complémentaire à celle disponible a été réalisée au cours de la campagne.

4. Analyse de la campagne

4.1 Limitations liées au site

La comparaison des conditions enregistrées sur le site avec celles attendues à partir des atlas permet de constater un déficit en vent, notamment en été, et donc en houles de valeurs significatives pendant 8 mois sur les 10 mois de campagne. Les conditions des mois de mars et de novembre ont été supérieures aux statistiques. Les distributions de direction des houles ont toutefois été conformes à notre attente.

4.2 Limitations liées au matériel

4.2.1 Bouées

Les bouées, et/ou leur mouillage et/ou la transmission de données ont entraîné tout au long de la campagne, principalement lors des forts états de mer, des pertes d'informations ou des informations erronées. Les pertes d'information sont plus importantes sur la bouée sur fonds de 10 m située lors des tempêtes, au niveau de la zone de déferlement : 2% de perte sur l'ensemble de la campagne et plus de 10% sur la durée des tempêtes. Ces résultats permettent d'appréhender les limites d'utilisation de ces bouées par faibles fonds en fonction de différents états de mer.

4.2.2 Courantomètres

AANDERAA RCM7 : Un problème d'enregistrement a été rencontré sur les 2 courantomètres AANDERAA. Les pertes de données sont principalement liées à l'absence de contrôle en temps réel dans une zone à forte activité anthropique. Les courantomètres sont mouillés pour des durées variant de quelques semaines (S4) à 10 semaines (AANDERAA). La transmission en temps réel des données via un émetteur flottant en surface n'est pas satisfaisante car cette solution entraîne des surcoûts et de nouveaux risques logistiques (pêcheurs).

S4 DW : sa version de base manque d'autonomie en mode vague (enregistrement des vitesses orbitales).

5. Bilan sur les résultats : continuité, qualité des mesures

De février à novembre 94, aucun problème majeur n'a été rencontré, hormis avec les AANDERAA et les coupures quotidiennes du réseau électrique local, impliquant une vigilance accrue. La continuité des données de houle a été assurée à plus de 96 %. La qualité de ce travail a pu être assurée par la fiabilité du matériel et par la possibilité de contrôles continus des mesures. Les quelques défauts de qualité de données sont dus essentiellement aux limites d'utilisation des bouées par faibles fonds. En résumé :

Houle : continuité sur l'ensemble de la campagne (10 mois) pour les 3 bouées sur Hs et périodes. Le bilan est satisfaisant.

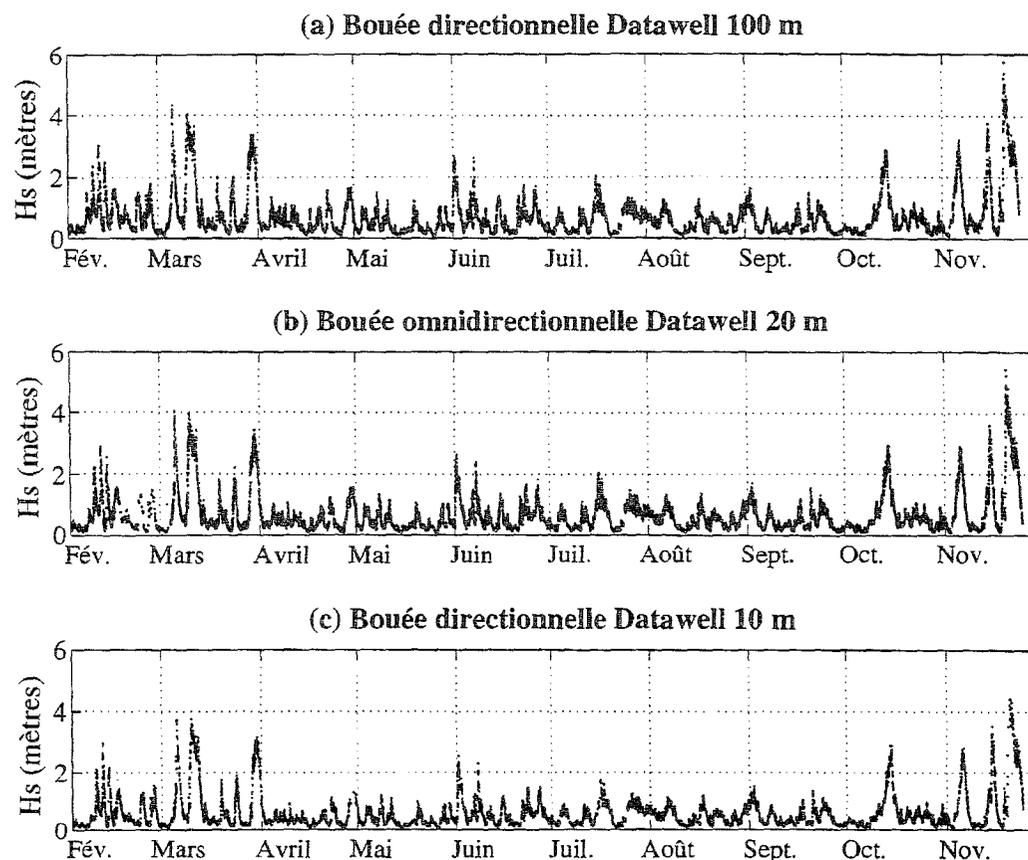
Courant :

S4 DW : 75 % d'acquisition, en raison de 2 mois de test.

AANDERAA : moins de 50 % en raison de nombreux problèmes techniques.

Vent : continuité sur l'ensemble de la campagne. Le bilan est satisfaisant.

Figure 2 : Hauteurs significatives pour les 3 bouées Datawell sur l'ensemble de la campagne Wavemod, site grec (Crète).



6. Résultats bruts

Sont traitées dans cet article les séquences simultanées soit aux trois bouées, soit

au S4 et à la bouée 10m, avec généralement un seuil minimum sur Hs de 0.5 mètre sur les fonds de 10 mètres. A titre indicatif, la base de données est constituée d'environ 13 000 triplets de séquences simultanées (20 mn) de houle sur les trois bouées, dont 4400 au delà du seuil de 0.5 mètre, et plus de 500 au delà d'un seuil de 2 mètres (respectivement environ 1400, 600 et 60 pour les S4 et bouée 10m). Les acquisitions sont de 20 minutes toutes les 30 minutes à 1.28 Hz pour les deux bouées directionnelles, 20 minutes en continu à 2.56 Hz pour la bouée omnidirectionnelle et 10 minutes toutes les 3 heures à 2 Hz pour le S4.

6.1 Paramètres synthétiques d'états de mer à partir des bouées Datawell

La figure 2 représente les historiques complets des Hs calculés à partir des enregistrements bruts de surface libre pour les trois bouées Datawell. La sauvegarde des données brutes permet de disposer, dans le cadre du projet, d'historiques simultanés pour tous les paramètres souhaités [5] : périodes, directions spectrales moyennes ou pic, hauteurs maximales, crêtes maximales... Ainsi, pour chaque enregistrement brut (élévation de la surface libre et déplacements horizontaux pour les bouées directionnelles), une analyse temporelle vague par vague ainsi qu'une analyse spectrale directionnelle sont effectuées. Certains des paramètres usuels sont présentés dans les paragraphes suivants.

6.2 Comparaison S4 et bouée 10 m

A partir de chaque séquence temporelle de pression et vitesses orbitales, l'élévation de surface libre est calculée, sous l'hypothèse d'une houle linéaire, ainsi que le spectre directionnel. L'immersion du capteur étant environ 8.50 mètres, la nature de la fonction de transfert vertical impose l'utilisation d'une fréquence de coupure, au delà de laquelle le rapport signal sur bruit est trop faible. Elle a été choisie à 0.3 Hz. Les séquences obtenues sont alors traitées comme celles des bouées.

La figure 3 présente les paramètres calculés à partir du S4 en fonction des mêmes paramètres simultanés issus de la bouée à 10 mètres.

6.2.1 Hauteurs significatives et directions

On note un excellent accord au niveau des Hs (figure 3a), avec une faible dispersion (tableau 1 : écart-type de 10 cm) ainsi que sur la direction du pic du spectre (figure 3b) malgré une dispersion plus forte (écart-type de 10 degrés).

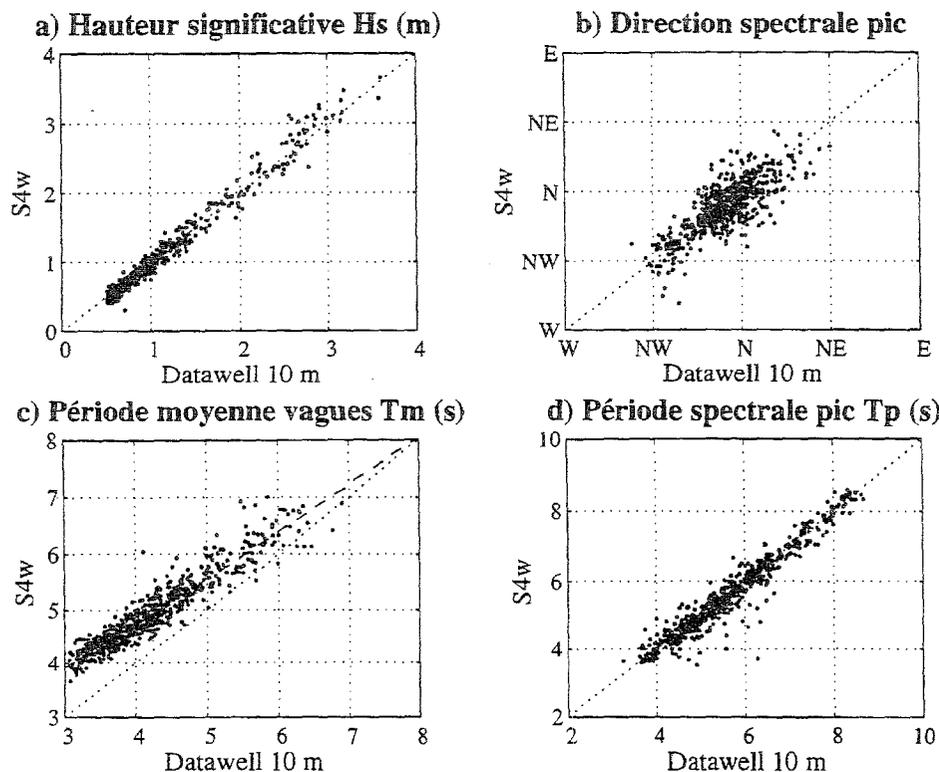
Tableau 1 : Ecarts S4 - Datawell 10m

	écart-type $\sigma(\Delta)$	max. $ \Delta $	98 % éch.
$\Delta = H_{s_{S4}} - H_{s_{bouée}}$	10 cm	60 cm	< 30 cm
$\Delta = T_{p_{S4}} - T_{p_{bouée}}$	0.3 s	2.6 s	< 1 s
$\Delta = D_{pic_{S4}} - D_{pic_{bouée}}$	10 deg.	40 deg.	< 30 deg.

Au niveau des périodes, on constate un très bon accord pour la période pic T_p (figure 3d) avec un écart inférieur à 1 seconde pour 98 % de l'échantillon (tableau 1) contrairement à la période moyenne T_m issue de l'analyse vague par

vague (figure 3c).

Figure 3 : Comparaison de paramètres issus des mesures simultanées S4 mode vague et bouée directionnelle Datawell sur fond de 10 mètres.



Cet écart se retrouve sur les périodes moyennes estimées à partir des moments spectraux [4], non présentées ici. Il s'explique entièrement par la présence de la fréquence de coupure dans les traitements sur le S4. En effet, un test mené en imposant une fréquence de coupure similaire de 0.3 Hz sur les données de la bouée, permet de recalibrer parfaitement les périodes moyennes, qu'elles soient temporelles ou spectrales. Ce problème est inhérent au principe de mesure de l'élévation via la pression dynamique de sub-surface et ne peut trouver de solution satisfaisante : diminuer l'immersion du capteur, ce qui permet de repousser la fréquence de coupure, n'est possible que pour des houles de faibles amplitudes et donc de périodes plus courtes, la bande énergétique du spectre est alors elle aussi décalée.

Le calcul de la période pic s'avère donc particulièrement important car non biaisé par la fréquence de coupure utilisée mais il est fortement influencé par la discrétisation de la densité spectrale. Une méthode d'interpolation par lissage permet de passer d'une dispersion sur T_p de 2 s à une dispersion de l'ordre de 0.5 s (figure 3d).

6.2.2 Conclusion

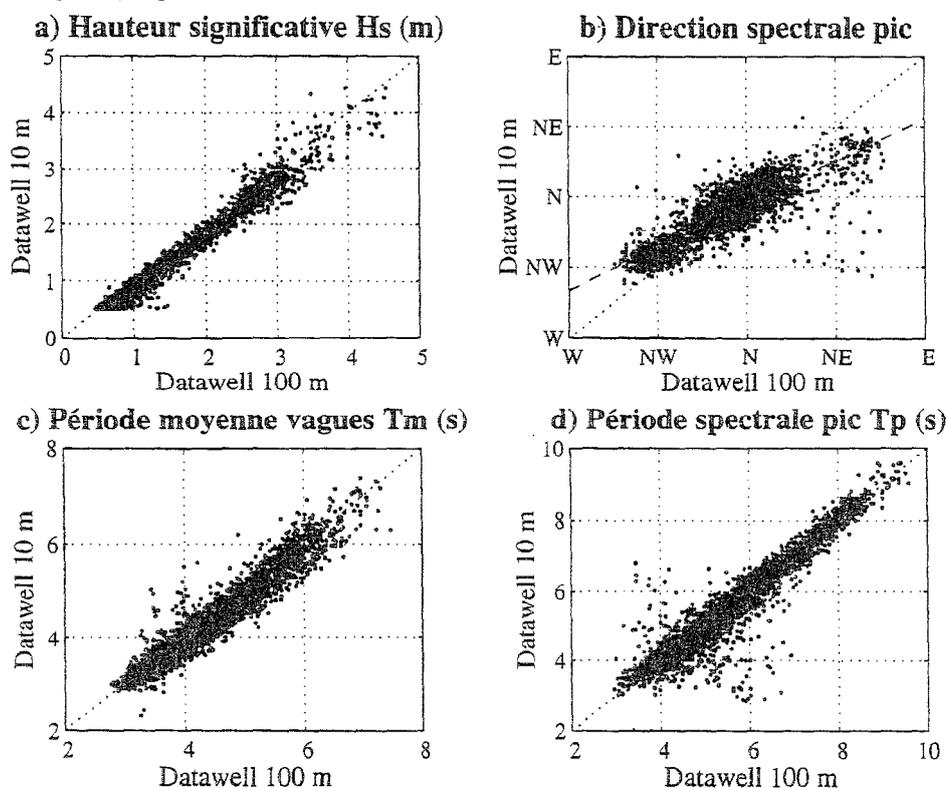
La comparaison des données S4 et bouée 10m montre un très bon accord au niveau des H_s , périodes pic et des directions, avec, pour H_s et T_p , une dispersion très fai-

ble. Elle révèle la forte influence de la fréquence de coupure utilisée dans la fonction de transfert, malgré la faible immersion du capteur (ici, moins de 9 mètres) qui invalide, pour le S4, tous les paramètres estimés à partir du spectre complet telles les périodes moyennes. L'estimation du pic du spectre devient donc essentielle.

7. Propagation

La figure 4 présente les résultats de la bouée directionnelle à 10 mètres en fonction des résultats à 100 mètres. On observe une diminution moyenne du H_s de 10% du large à la côte qui se traduit par un nuage de point situé globalement sous la diagonale (figure 4a). La propagation à la côte se traduit de plus par une modification des longueurs d'ondes. On constate que les périodes moyennes et pic se conservent (figures 4c, 4d), comme dans le cas d'une houle linéaire sans friction ni déferlement. La réfraction apparaît au niveau des directions (figure 4b) qui s'incurvent vers le nord, direction perpendiculaire à la côte, et que révèle la rotation de l'axe du nuage de point par rapport à la diagonale.

Figure 4 : Comparaison de paramètres issus des mesures simultanées des bouées directionnelles Datawell sur fond de 100 mètres et 10 mètres.



Le tableau 2 donne le rapport moyen entre les mesures 10 mètres et 100 mètres d'une part, et entre 20 mètres et 100 mètres d'autre part, dans le cas des forts états de mer ($H_s \geq 2m$). Pour H_s , on retrouve la décroissance mentionnée précédemment

(rapport égal à 0.93) entre 10 et 100 mètres, décroissance déjà sensible à 20 mètres pour cette classe de H_s (rapport 0.95). On retrouve, en accord avec la figure 4, des valeurs proches de 1 pour les périodes. Même résultat pour la hauteur maximale crête-à-creux (H_{max}) normalisée, ce qui tend à indiquer que la hauteur maximale n'est influencée, lors de la propagation, que par la modification de H_s . Il n'en est pas de même pour les crêtes maximales puisque le rapport atteint 1.08 entre 10 et 100 mètres.

Tableau 2 : Rapport moyen entre capteurs (seuil $H_s > 2$ m)

	H_s	T_m	T_p	$\frac{H_{max}}{H_s}$	$\frac{A_{cmax}}{H_s}$	$\frac{A_{tmax}}{H_s}$
10m / 100m	0.93	0.99	1.00	0.99	1.08	0.96
20m / 100m	0.95	0.97	1.00	1.00	1.03	0.99

8. Non linéarité et dissymétrie crête-creux

Les non-linéarités présentes dans l'état de mer que sont la non-linéarité de surface libre et celle de profondeur finie induisent une dissymétrie entre les crêtes et les creux des vagues et ceci au bénéfice des crêtes. Ces non-linéarités peuvent modifier par petits fonds (relativement à la longueur d'onde) d'une manière non négligeable les effets de la cinématique sur le fond ou les efforts induits sur une structure et ceci par rapport à une approche linéaire. Il est donc intéressant de quantifier pour un état de mer donné (houle ou mer du vent) leur ordre de grandeur et leurs caractéristiques.

Tableau 3 : Moyenne de crête max./0.5 H_s par classe de T_p (en indice, le nombre de séquences utilisées)

T_p	bouée (100m)	bouée 20m	bouée 10m	S4 10m
5 - 6 s	1.72 1400	1.71 1400	1.73 1400	1.67 230
6 - 7 s	1.71 800	1.71 800	1.75 800	1.67 130
≥ 7 s	1.71 700	1.75 700	1.82 700	1.82 110

Les données mesurées sur le site grec ont été analysées dans ce sens et ont permis de comparer deux systèmes de mesure (bouée et S4) pour l'évaluation de la dissymétrie crête-creux.

Les deux systèmes de mesure possèdent chacun un inconvénient majeur. En ce qui concerne la bouée, le principe de mesure de ses déplacements par des accéléromètres oblige à filtrer les basses fréquences dans lesquelles se trouve une bonne partie des non-linéarités d'une mesure par un système flottant librement [6]. La mesure par pression du S4 quant à elle impose (§ 6.2) de filtrer les fréquences élevées dans lesquelles se trouvent toutes les non-linéarités d'une mesure par système fixe.

Si l'on observe les moyennes des hauteurs de crête maximum (par séquence, normalisée par le H_s , ramenée à 200 vagues [7]) on observe que sur des fonds de 100 mètres (tableau 3) on suit le modèle dérivé d'un modèle de houle irrégulière linéaire bande étroite (valeur théorique = 1.72). Sur des fonds de 20 mètres on voit apparaître l'effet de la non-linéarité de profondeur finie lorsque la période pic augmente (d'où augmentation de la longueur d'onde). L'effet est encore plus net sur des fonds de 10 mètres où le rapport atteint la valeur 1.82. L'estimation du même paramètre à partir du S4 montre une mauvaise concordance pour des T_p inférieurs à 7s et ceci par l'effet combiné de la coupure en haute fréquence et de l'extrapolation à la surface par modèle de houle linéaire. Une sous-estimation d'un tel paramètre entraîne par là même une sous-estimation de la prédiction des valeurs de hauteur de crête de «design».

9. Conclusion

La campagne de mesure menée en Crète a permis de construire une base de données précieuse de mesure de houle en continu sur 10 mois, complétée par des informations sur les amplitudes des courants. Elle a permis d'une part, au sein du projet WAVEMOD, de mener des travaux d'intercomparaison modèle-données terrain et d'autre part d'analyser la capacité à mesurer les non-linéarités de l'élévation et les hauteurs vraies de crêtes de deux instruments très différents que sont la bouée et le S4.

Remerciements. Ces travaux ont été en partie financés par la Commission de la Communauté Européenne, Direction Générale Science Recherche et Développement dans le cadre du programme MAST II sous le contrat n° MAS2-CT92-0025.

Bibliographie

- [1] PREVOSTO, M., PAILLARD, M., 1994 "Projet MAST WAVEMOD Probabilistic Methodology for Coastal Site Investigation based on Stochastic Modelling of Wave and Current", Journées Nationales "Génie civil - Génie Côtier", Sète.
- [2] BARSTOW, S.F., PAILLARD, M., GUEDES SOARES, C., 1994 "Field Measurements of Coastal Wave and Currents in Portugal and Greece in the Wavemod Project", Colloque OCEANS'94, Brest.
- [3] PAILLARD, M., 1995 "The Greek Field Experiment in the MAST2 WAVEMOD Project" WAVEMOD Project, Report n° TEC 1.3-02.
- [4] AIRH, 1986 "Paramètre des états de mer", Supplément au bulletin n°52 de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques.
- [5] ROBIN, A., 1995 "Wave-Wind-Current Data collected on the North Coast of Crete" WAVEMOD Project, Report n° TEC 1.3-02.
- [6] PREVOSTO, M., ROBIN, A., 1995 "Assymetry and non-linear characteristics of waves in shallow water -Greek site data base analysis-", WAVEMOD Project, Report n° TEC 2.3-01.
- [7] ROBIN, A., OLAGNON, M., 1991 "Occurence of extreme waves with respect to significant wave height", Proc. of 10th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Artic Engineering, Vol. 2, pp. 1-11.