



Utilisation des données satellitaires pour une approche fiable des paramètres dimensionnants d'états de mer à la côte

P.Charriez, Ingénieur (MétéoMer), Puget-sur-Argens

M. Olagnon, Ingénieur (Ifremer), Brest

Abstract

A good knowledge of local sea-states climates is a key factor for the design and requalification of offshore structures, for the preparation and the supervision of marine operations, and for the optimization of shipping routes.

Common practice is to construct the wave and wind probability distributions from field measurements and observations when available, to use hindcast models or to carry out measurements campaigns if time and budget allow, and to accept the coarse grid and large uncertainties of an atlas in all other cases.

Recently, a new alternative appeared with the availability of satellite data from, at present time, GEOSAT, ERS1 and TOPEX-POSEIDON. These satellites offer a dense coverage of the world's oceans, a number of them have been up and measuring for several years now, they are unaffected by bad weather conditions, and thus the question comes of using them as partial or full replacement data sources for the present, sometimes costly, sometimes unaccurate ones.

We first present the design wave estimation in a reliability approach. Then, we briefly discuss the correctness of satellite wave measurements, and their operational use for the prediction of extreme design offshore wave, with an application on the Figueira da Foz area in Portugal. Next, we present an operational procedure implemented for the transfer to the coast of satellite-based offshore databases, and the resulting coastal extreme wave prediction, with an application on the same location. Lastly, we discuss about the validity of satellite data based procedures for a reliability approach of design wave estimation, for offshore needs and coastal specifications.

1. Introduction

Désormais, les hauteurs significatives (H_s) altimétriques des différents satellites fournissent une alternative de qualité pour les études de conditions extrêmes d'états de mer. Leur utilisation a pu être étudiée sur plusieurs sites au large, correspondant à différentes conditions climatologiques (Mer du Nord, Océan Atlantique, Côtes de l'Afrique, Sud et Est de la Mer de Chine) [2, 10, 13]. Quoiqu'il en soit, l'altimètre peut mettre quelques secondes pour fournir de nouveau des mesures correctes lorsque sa trace au sol passe de la terre à la mer. Ceci implique que les conditions côtières ne sont pas directement accessibles à l'aide de ces capteurs altimétriques. Ainsi, pour ce type d'étude, la base de données préalablement construite au large doit être transférée sur la zone où la bathymétrie a une influence. Cette étape de transfert nécessite de compléter, comme nous le verrons, les H_s altimétriques avec des périodes et directions, paramètres qui

peuvent être apportés par les mesures SAR en mode vague du satellite ERS1 et par des modèles météo-océaniques.

2. Analyse et prédiction des conditions extrêmes d'états de mer

Les méthodes que nous avons utilisées pour l'analyse des états de mer et la prédiction des conditions extrêmes sont les suivantes :

2.1 Analyse de stationnarité

Une étude de stationnarité est nécessaire afin d'identifier les différents états de mer individuels et de leur associer des durées respectives [9]. En considérant ces états de mer individuels et en ne retenant que le Hs maximum pour chacun, on améliore considérablement l'indépendance des échantillons initiaux, en vue de l'extrapolation. On peut trouver des détails sur la mise en oeuvre de cette méthode en [15].

2.2 Prédiction des Hs extrêmes

Cette procédure [4] est implémentée dans le logiciel STEXOM (STatistiques EXtrêmes pour les Ouvrages en Mer) [9] et fournit, pour une durée de projet donnée, la distribution de la valeur maximale d'un paramètre, et donc les probabilités de dépassement et les intervalles de confiance associés. Les trois étapes sont les suivantes :

- Ajustement d'un modèle paramétrique à la distribution empirique, avec une focalisation sur la qualité de la modélisation sur la queue de distribution [13].
- Détermination du type de la loi de Fisher-Tippet vers laquelle converge la distribution du maximum sur la durée physique initiale ; calcul des paramètres associés.
- Extrapolation depuis la durée physique initiale jusqu'à la durée de projet considérée. Les intervalles de confiance résultant de l'ajustement statistique peuvent être transformés en « modèles d'encadrement » sur la distribution initiale ; modèles qui sont à leur tour extrapolés pour fournir des intervalles de confiance sur les paramètres déterminés précédemment.

2.3 Prédiction à court terme du Hmax

Des détails sur les distributions à court terme du Hmax peuvent être trouvés en [14]. On peut montrer que la distribution du Hmax suit une distribution de Gumbel, dont les paramètres sont donnés par :

$$\begin{aligned} \infty &= H_s / (2 \sqrt{2} \times \text{Ln}(N)) \text{ pour l'échelle,} \\ \text{et } u &= H_s * (\sqrt{(\text{Ln}(N) / 2)}) \text{ pour le mode.} \end{aligned}$$

N est le nombre de vagues dans l'état de mer. En l'absence d'informations spectrales spécifiques, l'hypothèse de bande étroite peut être utilisée [14], et une relation simple $T_{moy} = \sqrt{a} H_s + b$ peut être appliquée pour estimer le nombre de vagues pour un segment stationnaire ($N = T_{stat} / T_{moy}$). On peut noter que la sensibilité du Hmax au nombre de vagues est faible.

3. La fiabilité des mesures satellitaires de l'environnement marin

L'altimètre et le SAR en mode vague sont utilisés conjointement pour la détermination de conditions extrêmes d'état de mer. Une description du principe général de la mesure est donnée dans les références [2, 4, 6, 7, 11, 16]. En résumé, l'altimètre fournit des hauteurs significatives d'état de mer tandis que le Radar à Ouverture Synthétique (SAR) en mode vague permet la caractérisation de spectres directionnels d'état de mer, après l'application d'un processus d'inversion [5, 6, 7]. Dans la suite, nous discuterons de la validité des paramètres réduits issus de l'altimètre et du SAR en mode vague [11]. Une description détaillée de ce travail est donnée en [3].

3.1 Altimètre

Pour la comparaison avec des mesures in-situ, nous utilisons le concept de zone locale climatologiquement cohérente, choisie soigneusement par un météorologue, dans laquelle les données satellitaires sont sélectionnées. Plusieurs comparaisons ont été effectuées entre des Hs altimétriques et des mesures in-situ, sur différentes zones au large. La figure 1 montre la comparaison entre les probabilités cumulées des Hs altimétriques et in-situ, pour la zone Frigg (Mer du Nord), de Nov. 86 à Nov.88. Pour les Hs altimétriques ERS1, un biais significatif [12] a été déterminé et une formule de correction proposée. Les données de Topex-Poséidon sont, elles, très proches des mesures in-situ.

En conclusion, une fois les corrections effectuées [3], le Hs altimétrique nous donne une estimation des états de mer très fiable, spécialement en condition de tempête.

3.2 Spectres directionnels d'états de mer issus du SAR

Les spectres directionnels SAR inversés peuvent être utilisés pour le calcul des paramètres spectraux Hs, estimations spectrales du Tmoyen (T_{01} , T_{02} ,...), Tpic, θ_{moyen} , θ_{pic} [8]. Une procédure opérationnelle a été développée pour l'inversion en routine des produits SAR en mode vague [5, 6, 7]. Dans un premier temps, cette procédure d'inversion a été appliquée dans la zone Nord Atlantique de l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie), depuis octobre 1993. Des comparaisons ont été effectuées, d'une part entre les Hs altimétriques et SAR colocalisés, et d'autre part entre le Tpic, et le θ_{pic} , du SAR et des sorties spectrales de modèles, pour une période allant d'octobre à décembre 1993. Ces comparaisons nous amènent à des estimations des incertitudes associées aux Tpic et θ_{pic} respectivement de l'ordre de 1s et 15°. En plus de ces premières comparaisons, des intercalibrations ont été effectuées avec des mesures in-situ, sur cinq zones climatologiques. Considérant des critères de temps, d'espace et d'homogénéité météorologique, 58 couples de spectres directionnels (SAR - in-situ) ont été trouvés de juin 1993 à décembre 1994 ; les résultats peuvent être résumés comme suit :

- Pour le T_{pic} , la valeur moyenne du SAR et des mesures in-situ sont respectivement de 11.6 s et 11.3 s, avec un écart type de 1 s et un coefficient de corrélation de 0.92.

- Pour le θ_{pic} , la valeur moyenne de la déviation absolue est égale à 15 degrés. Le coefficient de corrélation est de 0.98.

En première conclusion, on peut dire que les résultats concernant les périodes et directions du SAR en mode vague ont désormais un niveau de qualité [1] tel que l'on peut les utiliser pour des études, en association avec le Hs altimétrique.

4. Utilisation des données satellitaires pour la prédiction de valeurs extrêmes d'états de mer au large

Une description détaillée de la procédure utilisée pour la prédiction de données extrêmes au large d'un site est fournie en [3]. Les phases principales et les résultats importants sont explicités ci-après.

4.1 Construction d'une base de données satellitaires

La construction d'une base de données satellitaires d'états de mer au large d'un site repose sur l'utilisation des mesures de Hs altimétriques. Pour cette étude (juil. 94), nous avons cinq ans de données satellitaires fournies par Geosat (de Nov.86 à Sept.89), ERS1 (depuis Déc.91) et Topex-Poséidon (depuis Août 92). Aujourd'hui, ces satellites offrent environ 7 ans de données autour du monde. Afin de construire une base de données statistiquement fiable, une zone locale climatologiquement cohérente est définie autour du point d'étude par une analyse météorologique fine de la région (figure 2 : zone locale avec les traces d'ERS1; cycle de répétitivité: 35 jours). Les données altimétriques de Hs sont sélectionnées dans cette zone. On applique les routines d'élimination des valeurs aberrantes et les formules de correction systématiquement pour chacun des satellites, avec une attention particulière sur les fortes valeurs. Du fait de l'échantillonnage spatial et temporel du satellite, certaines tempêtes peuvent être manquées dans cette zone climatologique locale. Donc, afin de compléter la distribution initiale, une zone complémentaire au large est définie. Les tempêtes mesurées dans cette zone sont individuellement identifiées, analysées, propagées dans la zone locale, et finalement additionnées à la base de données si elles ont affecté cette zone à un moment où le satellite ne la survolait pas. Ainsi, de Novembre 1986 à Avril 1994, 9 647 Hs altimétriques ont été sélectionnés dans la zone locale à Figueira da Foz. Les valeurs moyennes et maximum des Hs sont respectivement 2.4 m et 9.5 m avec un écart type égal à 1.2 m. Pour la phase de prédiction à venir, nous avons choisi un seuil d'analyse égal à 6 m. Comme la plupart des tempêtes ont été identifiées à l'aide de la précédente méthode, la durée initiale de la population altimétrique est égale à 5 ans. La figure 3 montre l'histogramme des Hs pour la zone locale, représentative du large de Figueira da Foz.

4.2 Analyse de la population d'états de mer au large et extrapolation

En appliquant les procédures d'analyse des états de mer et de prédiction des conditions extrêmes décrites plus haut, on obtient les résultats suivants :

Durée de projet(an)	(Hs) max (m)	Intervalles de confiance à 90 % (m)	Hmax (m)
1	9.3	8.8 < < 9.8	15.3
5	10.9	10.2 < < 11.7	17.8
10	11.6	10.8 < < 12.4	18.9
20	12.3	11.4 < < 13.2	19.9
30	12.7	11.7 < < 13.7	20.5

Table 1 : (Hs) max les plus probables et Hmax associés.

5. Estimation des conditions extrêmes sur un site côtier : application au site de Figueira da Foz

Les étapes précédentes nous ont conduit à construire une base de données de Hs altimétriques et à déterminer des conditions dimensionnantes sur plusieurs durées de projet. Pour le site de Figueira da Foz, une procédure permettant le transfert de cette base de données à la côte (profondeur : 20 m) est implémentée. Elle permettra la détermination des conditions extrêmes d'état de mer sur un site côtier. Ces conditions sont déterminées par le Hs, les périodes et directions, pics et moyennes, associés sur différentes durées de projet. La procédure comprend les trois étapes ci-dessous :

5.1 Etape 1 : association des périodes et directions aux Hs altimétriques

Une base de données, constituée de spectres directionnels d'états de mer, est d'abord construite sur la position de la bouée située au large de Figueira da Foz (profondeur : 70 m). Le but est d'associer des périodes et directions aux Hs altimétriques et d'aider à la caractérisation du transfert du large vers la côte. Du fait du manque de données SAR en nombre significatif, à l'époque de l'étude, une base de données de spectres directionnels d'états de mer est reconstituée sur une année, avec un pas de 1 heure, sur la position de la bouée au large. Cette reconstitution est effectuée à l'aide d'un modèle ponctuel de calcul d'état de mer, utilisant les champs de vent du CEP (Centre Européen de Prévision) sur l'Atlantique Nord [3]. Ainsi, environ 7 500 spectres directionnels sont calculés sur cette position au large, spectres desquels les paramètres réduits (Hs, périodes et directions moyennes et pics) sont calculés en routine. Un exemple de spectre directionnel de tempête au large, pour le 13/01/1987 est donné en figure 4.

Puis, les Hs altimétriques et les spectres directionnels d'états de mer sont sélectionnés par saison. Pour chacune des saisons, les probabilités conditionnelles (T_{02}/Hs) et ($\theta_{moy}/(Hs, T_{02})$) sont calculées à partir de la base de données de Hs altimétriques. Ainsi, on obtient une population de triplets (Hs, T_{02} , θ_{moy}) " de tempêtes " sur la zone locale au large de Figueira da Foz, avec le même seuil (6m) que celui de la phase d'extrapolation.

5.2 Etape 2 : transfert de cette base de données du large vers la côte

Le but de cette étape est de mettre au point une procédure nous permettant de transférer la base de données de triplets (Hs, T_{02} , θ_{moy}). Cette procédure est basée sur le transfert complet de la base de données de spectres directionnels d'états de mer déterminée auparavant. Le modèle utilisé permet le transfert de spectres

directionnels et prend en compte la réfraction, le shoaling, les interactions avec les courants et vents locaux, la friction sur le fond et le déferlement. Ce modèle a la même approche que celui du large [7], en résolvant l'équation de la conservation de l'action le long de rais rétropropagés. Un exemple de grille bathymétrique pour la zone Figueira da Foz et les rais rétropropagés correspondants est donné pour la période 14s en figure 5. Le spectre directionnel d'état de mer au large est donc transféré, et on obtient le spectre correspondant à la côte (voir figure 6 pour la tempête du 13/01/1987). Une procédure opérationnelle utilisant ce modèle permet le transfert en routine de toute la base de données de spectres directionnels au large et le calcul de leurs paramètres réduits (H_s , T_{02} , T_{pic} , θ_{moy} , θ_{pic}) [8], à la fois au large et à la côte. Un point clé de cette méthode est l'analyse en termes de spectres directionnels : le coefficient de transfert H_s côte/ H_s large représente le transfert d'un état de mer, complètement décrit par son spectre directionnel. Pour des paramètres dimensionnants à la côte, basés sur la qualité du transfert pour les fortes valeurs de la distribution, l'influence du transfert de spectres est déterminante. A partir du transfert de cette base de données, des probabilités conditionnelles entre les hauteurs, les périodes au large et à la côte sont déterminées et appliquées à la base de données de triplets (H_s , T_{02} , θ_{moy}). Ainsi, à la fin de cette étape 2, une base de données constituée de triplets (H_s , T_{02} , θ_{moy}) est obtenue sur le point à la côte.

5.3 Etape 3 : analyse de la base de données à la côte : prédiction des paramètres dimensionnants de H_s et détermination des périodes et directions moyennes et pics associées

5.3.1 Prédiction des valeurs extrêmes de H_s

Pour la présente étude, l'ajustement d'une loi est effectuée sur la queue de la distribution (le seuil est égal à 6.0 m). Le meilleur ajustement est obtenu par une loi Pareto 1 (voir figure 7), correspondant à une distribution de type Fisher-Tippet 1 pour les extrêmes. Les résultats des prédictions sont donnés dans la table 2 suivante. Pour chaque durée de projet, on détermine les distributions des paramètres extrêmes. Dans la table 2, figurent donc les valeurs les plus probables et les incertitudes associées (90 %). On peut noter que le transfert à la côte de la base de données au large réduit la dispersion de la partie haute de la queue de distribution et nous amène ainsi à des intervalles de confiance plus étroits associés aux valeurs dimensionnantes à la côte comparés à ceux du large (table 1). Ainsi, la procédure mise en place pour le transfert à la côte de la base de données satellitaires et de spectres reconstitués nous permet de déterminer les distributions des paramètres H_s extrêmes, avec une estimation correcte des intervalles de confiance, comme si les données satellitaires étaient directement prélevées dans la zone côtière. La figure 8 montre la densité de probabilité correspondant au modèle Pareto 1 ajusté sur la distribution, la loi Fisher-Tippet 1 correspondant au maximum observé (sur une durée de 5 ans), et la densité de probabilité prédite par la durée de projet à 30 ans, avec les densités de probabilité qui l'encadrent à 90%.

5.3.2 Détermination des périodes et directions associées à l'aide d'une étude de paramètres conjoints

Le but de cette étape est d'associer les paramètres T_{02} , T_{pic} , θ_{moy} et θ_{pic} aux valeurs de H_s extrême à la côte. Pour ce faire, on utilisera la base de données de spectres directionnels obtenus précédemment à la côte, desquels sont déduits les principaux paramètres H_s , T_{02} , T_{pic} , θ_{moy} et θ_{pic} , qui seront étudiés de façon conjointe. Ainsi, on peut remarquer que le transfert à la côte des états de mer de tempête montre un déplacement et une concentration des θ_{pics} dans le secteur (285 - 300°), lié au phénomène bien connu de la réfraction.

5.3.3 Résultats finaux : états de mer extrêmes à la côte

Les étapes précédentes permettent d'avoir les résultats suivants concernant les paramètres extrêmes d'états de mer à la côte :

Durée de projet (an)	(Hs) max (m)	Intervalle de confiance à 90 %	T_{02} (s)	T_p (s)	θ_{moy}	θ_{pic}
1	8.0	7.9<<8.1	12.8	16.5 - 17	285 << 295	290 << 300
5	9.1	8.9<<9.2	13.5	17.5 - 18	285 << 295	290 << 300
10	9.5	9.3<<9.7	13.8	18 - 18.7	285 << 295	290 << 300
20	10.0	9.8<<10.2	14.1	18.5 - 19.2	285 << 295	290 << 300
30	10.2	10.0<<10.5	14.2	18.7 - 19.5	285 << 295	290 << 300

Table 2 : Paramètres dimensionnants à la côte.

6. Conclusion

Des procédures opérationnelles existent pour le transfert des données satellitaires à la côte. Elles s'appuient sur l'utilisation d'une base de données de spectres directionnels que les mesures satellitaires du SAR en mode vague peuvent à l'heure actuelle partiellement fournir. Cette base de données de spectres directionnels permet l'association des périodes et directions aux H_s altimétriques, et au delà, une caractérisation plus précise du transfert à la côte. Finalement, une analyse stochastique est effectuée, aboutissant à des intervalles de confiance du même ordre que dans le cas où ces données satellitaires seraient disponibles à la côte. On peut remarquer que l'utilisation combinée des données satellitaires, de modèles météo-océaniques et de méthodes pour l'analyse et la prédiction des états de mer s'intègre dans des procédures qui peuvent être adaptées aux conditions de l'étude (mers ouvertes ou fermées, conditions au large ou à la côte, bathymétrie...). Pour des zones complexes, ou pour déterminer des paramètres spécifiques non fournis par ces procédures, une campagne de mesures in-situ restreinte peut être mise en oeuvre. Enfin, l'augmentation continue du nombre de données satellitaires, multipliée par le nombre de futurs satellites (ERS2, ENVISAT,...) va dans le sens d'une amélioration continue des climatologies de H_s climatiques ainsi que des statistiques de périodes et directions apportées par le SAR en mode vague.

7. Remerciements

Cette étude a été effectuée dans le cadre du projet Français « Amélioration des méthodes de détermination d'état de mer de design », comprenant Ifremer, STCPMVN, STNMTE et MétéoMer. Dans ce projet, un marché intitulé « Contribution des données satellitaires et de l'analyse climatologique pour la détermination des états de mer de design » a été commandé par le STCPMVN à MétéoMer. Tous ces organismes en sont remerciés ici.

8. Références

- [1] Becq, F. ' Validation des données SAR', *Ifremer-Elf report*, DITI/GO (1994).
- [2] Charriez, P., Olagnon, M., & Tournadre, J. 'Confidence intervals associated with satellite measurements of wave and wind environment', *Proc. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE Vol. 2 (1992) pp. 313-320.
- [3] Charriez, P., Olagnon, M. ' Relevance of satellite data for a reliability approach of design wave estimation', to be published in *Proc. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. OMAE (1995)
- [4] Doucet, Y., Labeyrie, J. & Thebault, J. ' Validation of Stochastic Environmental Design Criteria on Frigg Field', *Modelling the Offshore Environment 1987*, S.U.T. (ed.), London.
- [5] Hajji, H., Bonicel, D., Chapron, B., Lasnier, P., & Loeul, S. ' Use of SAR-Wave mode, altimeter and wind scatterometer data in operational wave forecasting system', *Proc. European Space Agency 2nd ERS1 Symposium*, Hamburg (1993).
- [6] Hasselmann, K. & Hasselmann, S. ' On the Nonlinear Mapping of an Ocean Wave Spectrum into a SAR image Spectrum and Its Inversion', *J. of Geophys. Res.*, Vol 96, C6(1991) pp. 10,713-10.729.
- [7] Krogstad, H.E., Samset, O. & Vachon, P.W. ' Generalizations of the Nonlinear Ocean-SAR Transformation and a Simplified SAR Inversion Algorithm', *Atmosphere and Ocean*, Vol. 32 (1994) pp. 61-82.
- [8] International Association for Hydraulic Research ' List of Sea State Parameters' Supplement to bulletin No 52 (1986).
- [9] Labeyrie, J. 'ST.EX.OM : a statistical package for the prediction of extreme values', *Proc. 4th Int. Conf. on Engineering Software*, Springer Verlag, Berlin, ch.15 (1985) pp. 17-32.
- [10] Labeyrie, J. ' Stationary and transient states of random seas'. *Marine Structures*, 3. 1 (1990) pp. 43-58.
- [11] Olagnon, M. , Chen, Q.L., Charriez, P. & Lasnier, P. ' Validity of satellite data for design wave estimation in Chinese offshore areas', *Proc. Special Offshore Symposium China*, Beijing (1994) pp. 599-612.
- [12] Queffelec, P. ' Altimeter wind and Wave measurements'. *Cersat News*, February 1994, Ifremer, France.
- [13] Regnault, P., Charriez, P., Olagnon, M., De Graauw, A., Peltier, E. & Piet, M. ' Comparative study of several methods used in coastal engineering for the prediction of extreme wave conditions'. *Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conf.* , ISOPE; 1994.
- [14] Robin, A. & Olagnon, M. ' Occurrence of Extreme Waves with respect to Significant Wave Height', *Proc. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE Vol.2a (1991) pp. 1-9.
- [15] De Sury, H., Charriez, P., Lasnier, P. & Olagnon, M. ' Contribution of satellite data to meteo-oceanic site characterization : A case study', *Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conf.*, ISOPE, 1994.
- [16] Tournadre, J. & Ezraty, R. ' Wind and Sea State Local Climatology by Means of Satellite Radar Altimeter Measurements', *Proc. Space and Sea Colloquium*, E.S.A. SP132 (1990) Paris.

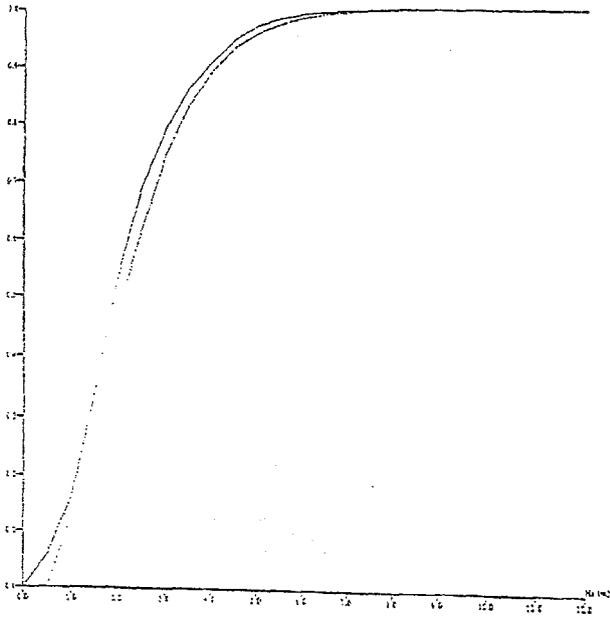


Fig. 1 : comparaison entre les fonctions de répartition des Hs altimétriques et in situ sur la zone de Frigg (Mer du Nord) de nov. 76 à nov. 88

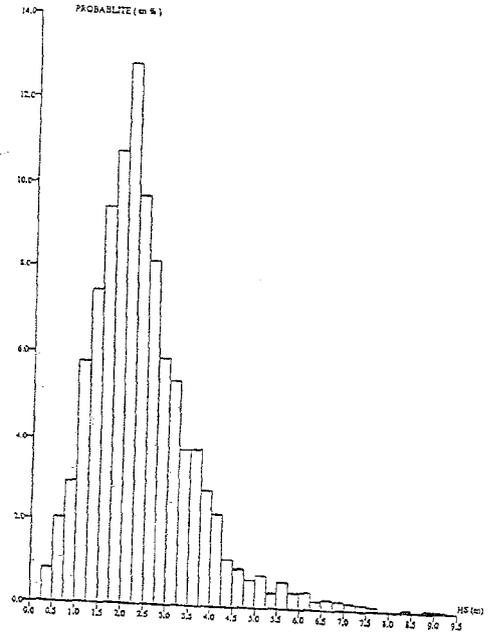


Fig. 3 : Histogramme des Hs satellitaires sur la zone climatologique locale, au large de Figueira da Foz

Fig. 2 : traces de ERS1 (en cycle de 35 jours) sur la zone climatologique locale au large de Figueira da Foz

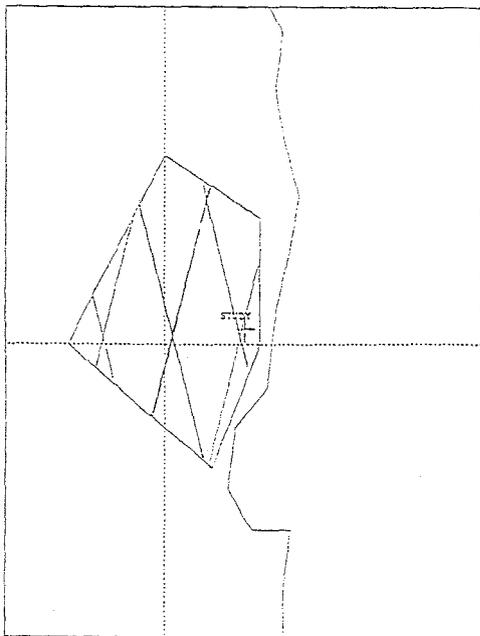


Fig. 4 : Spectre directionnel d'état de mer au large - tempête du 13.01.1987

