



APPORT DES DONNÉES SATELLITAIRES À LA CARACTÉRISATION MÉTÉO-OCÉANIQUE DE SITES. CAS D'ÉTUDE

P. CHARRIEZ et P. LASNIER ⁽¹⁾, M. OLAGNON ⁽²⁾ et H. de SURY ⁽³⁾

⁽¹⁾ MétéoMer, Puget-sur-Argens, ⁽²⁾ IFREMER, Brest, ⁽³⁾ Bouygues Offshore, Montigny-le-Bretonneux

Résumé

Le dimensionnement ou la requalification de structure marines, la conduite d'opérations à la mer et l'optimisation des routes de navigation requièrent une bonne connaissance des climatologies locales états de mer et de vents.

Dans un contexte opérationnel, les caractérisations climatologiques de sites souffrent souvent des limitations des informations classiques disponibles: manque de mesures in situ, imprécisions des observations de navires, échantillonnages spatio-temporels grossiers et incertitudes des atlas, coûts et délais d'une reconstitution complète de données.

Face à cela, les mesures satellitaires ont depuis peu apporté une révolution des moyens de l'investigation de l'environnement marin: les radars des satellites Geosat, ERS1 et Topex fournissent des mesures de vents et d'états de mer, fiables, tous temps et avec une couverture mondiale.

En particulier, une méthode opérationnelle de détermination de hauteurs significatives extrêmes à partir de données satellitaires, a été mise au point dans le cadre d'un projet industriel Français.

Elle a permis d'obtenir des paramètres dimensionnants de même qualité que ceux apportés par la mesure in situ, et ce sur des sites présentant des conditions météo-océaniques fort diverses.

L'utilisation industrielle de cette méthode pour la détermination de paramètres dimensionnants d'états de mer est illustrée dans cet article avec une étude de caractérisation du tracé côtier d'un pipeline, zone sur laquelle n'existe aucune information météo-océanique classique.

Des recherches sur le point d'aboutir vont compléter et enrichir ce type d'étude par la caractérisation supplémentaire des périodes et directions d'états de mer, apportée par le radar à synthèse d'ouverture en mode vague du satellite ERS1.

INTRODUCTION

La caractérisation météo-océanique de sites d'opération consiste en la fourniture aux ingénieries des paramètres dimensionnants de l'environnement marin, selon les trois axes du calcul de structure: statique, fatigue et dynamique.

En l'absence de mesures in situ, des méthodes peuvent être désormais utilisées opérationnellement pour cette caractérisation, méthodes dont les points forts résident dans l'utilisation des mesures satellitaires de l'environnement marin, de modèles météo-océaniques -pour le calcul de spectres directionnels d'états de mer au large ou à la côte- et d'outils dédiés à l'analyse et à l'extrapolation de données de vents, vagues et courants.

Dans un premier temps, nous présenterons de façon générale les données satellitaires et modèles utilisés pour des études de caractérisations météo-océaniques de sites.

Puis, dans un second temps, nous illustrerons ces points à l'aide des différents résultats d'une étude réalisée par MétéoMer et Bouygues Offshore.

Il s'agit d'obtenir des paramètres dimensionnants d'états de mer (hauteurs significatives, périodes moyennes et pic, direction d'énergie maximale) le long du tracé côtier d'un pipe. Les conditions en sont caractéristiques de la plupart des études météo-océaniques: absence de mesures in situ, limitations bien connues des observations de navire, coûts et délais d'une reconstitution complète de données.

Dans ce contexte, l'utilisation des mesures satellitaires, ici des hauteurs significatives déterminées par l'altimètre de Geosat, prend tout son sens, permettant l'établissement de climatologies moyennes et extrêmes d'états de mer, du fait de leur fiabilité et de leur couverture dense et tous-temps des océans.

LES MESURES SATELLITAIRES DE L'ENVIRONNEMENT MARIN

Principe général de la mesure

Les informations satellitaires sur l'environnement marin sont apportées de façon générale par:

- les satellites géostationnaires: imageries visibles, infrarouge et micro-ondes, fournissant des approches qualitatives de structures météo-océaniques,
- les satellites défilants, Geosat (nov.1986-sept.1989), ERS1 (depuis juillet 1991) et Topex (depuis août 1992) mesurant cette fois les hauteurs significatives des états de mer (Hs), et les forces de vent (altimètre), les champs de vent (diffusiomètre) et les spectres directionnels bruts d'intensité d'états de mer (SAR, radar à synthèse d'ouverture, en mode vague de ERS1).

Ces capteurs ne mesurent pas directement le vent et l'état de mer, au sens classique des instrumentations in situ.

D'une façon générale, ces radars émettent des impulsions dans la gamme des GHz et mesurent l'énergie rétrodiffusée par la surface de la mer, au cours de temps et par direction (pour le SAR et le diffusiomètre). Cette énergie rétrodiffusée dépend de l'état de surface de la mer, via essentiellement les pentes des vagues, pour l'altimètre ("réflexion spéculaire") et les ondes de capillarité, pour le diffusiomètre et le SAR mode vague ("diffraction de Bragg").

Dès lors, les mesures d'énergie rétrodiffusée, dépendant directement des conditions physiques de vents et d'états de mer, peuvent être reliées aux grandeurs classiques (Hs et spectre directionnel d'état de mer, intensité et direction du vent) par l'intermédiaire de représentations statistiques

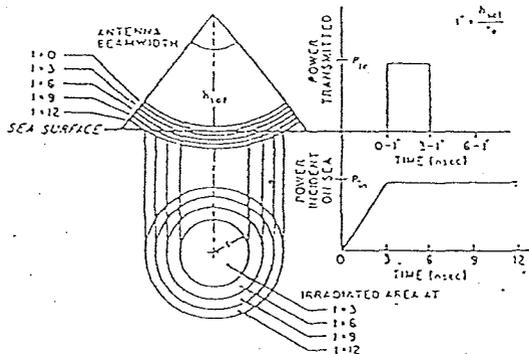


Fig. 1a. Caractéristiques de la réflexion d'une impulsion radar sur une surface plane. L'illustration représente une impulsion de 3 nsec. (SEASAT)
Tiré en partie de Walsh et al. (1978).

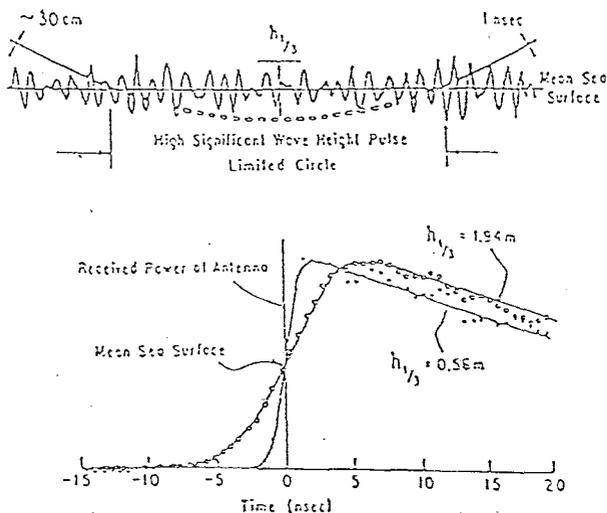


Fig. 1b. Caractéristiques de la réflexion d'une impulsion radar sur une mer agitée. La figure supérieure montre la géométrie de l'interaction d'une impulsion de 1 nsec. avec un état de mer caractérisé par un $H_{1/3}$ de 3m. La déformation verticale des vagues est approximativement de 175:1. La figure inférieure montre les courbes empiriques et ajustées (max. de vraisemblance) pour 2 hauteurs significatives.
Tiré en partie de Walsh et al. (1978).

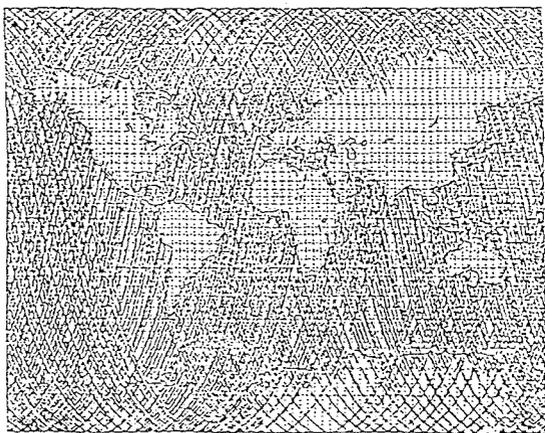


Fig. 2. Traces du satellite ERS1 pour un cycle de répétitivité de 35 j.

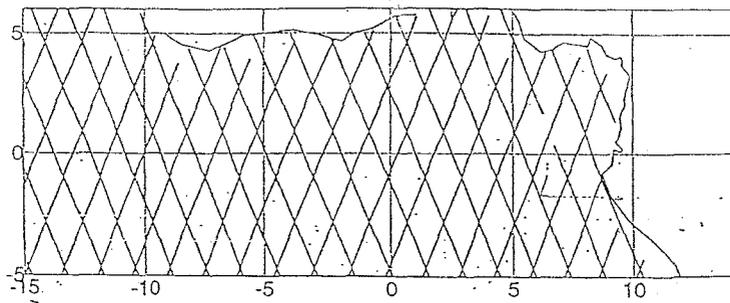


Fig. 3. Couverture spatiale de Geosat sur un cycle de 17 jours

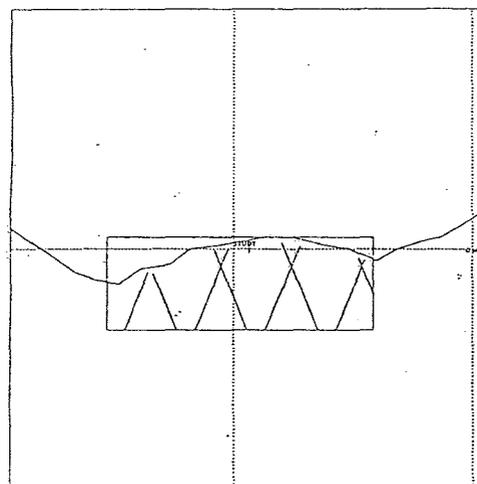


Fig. 4. Trace Geosat sur la zone climatologique locale

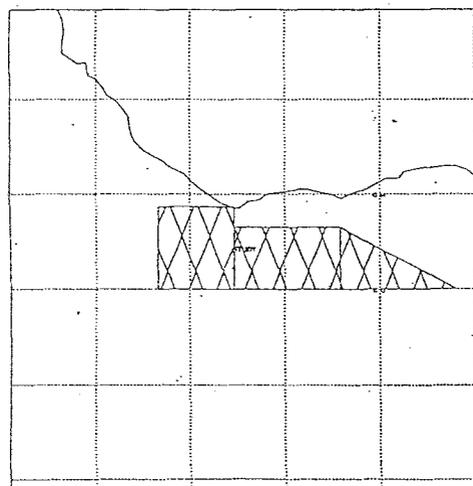


Fig. 5. Zone complémentaire au large pour l'enrichissement en tempêtes

(distribution des pentes et élévation gaussienne de la surface libre) pour l'état de mer et de relations empiriques (énergie rétrodiffusée - vent créant la rugosité) pour le vent.

La mesure altimétrique de la hauteur significative de l'état de mer

L'étude réalisée avec Bouygues Offshore repose de façon déterminante sur l'utilisation de la mesure altimétrique de la hauteur significative de l'état de mer. Il est donc utile de rappeler ci-après succinctement le principe de cette mesure.

Un radar émet des impulsions électromagnétiques à une fréquence de 13,5 Ghz pour Geosat, qui sont réfléchies par la surface de l'état de mer et analysées en retour. La figure 1 illustre les différentes phases de la réflexion d'une impulsion sur une surface plate de mer. On peut voir que l'amplitude du signal réfléchi suit une pente constante avec le temps, quand la surface éclairée s'élargit (fig. 1a), et reste constante par la suite (jusqu'à ce que l'anneau illuminé sorte du lobe de l'antenne, créant alors une décroissance de l'amplitude réfléchie).

Si la surface de la mer n'est pas plate, c'est-à-dire en présence de vagues, la réflexion commence sur la première crête, avant $t = 0$ et s'interrompt sur le dernier creux, après $t = t_1$ (fig. 1b).

Fedor *et al.* [9] ont montré que le signal rétrodiffusé est la triple convolution du signal réfléchi par une surface plate et de la densité de probabilité de l'élévation de la surface libre. La hauteur significative de l'état de mer, prise comme $H_s = 4\sigma$, où σ est l'écart-type de cette élévation libre, peut alors être aisément déterminée.

ETAT DE L'ART POUR L'UTILISATION PRATIQUE DES MESURES SATELLITAIRES

Les remarques générales suivantes peuvent être faites au sujet de l'utilisation des mesures satellitaires pour des études de climatologies :

- Le satellite offre une couverture dense du globe. La densité est illustrée par deux figures : l'une générale (fig. 2), montrant la couverture spatiale du globe par ERS1 durant un cycle de 35 jours ; l'autre montrant cette couverture sur une zone de $10^\circ \times 25^\circ$ (fig. 3), sur laquelle Geosat a réalisé en 3 ans environ 300000 mesures de hauteurs significatives d'états de mer.

- Le satellite offre des mesures tous temps : ainsi, l'altimètre fournit des mesures fiables de hauteurs significatives d'états de mer, [6, 15, 19], notamment lors de conditions de tempêtes. Ceci est d'un grand intérêt pour la reconstitution d'événements forts et l'établissement de climatologies extrêmes, puisque ces dernières reposent sur une bonne description de la queue de distribution.

- Le produit SAR mode vague, avant utilisation opérationnelle, nécessite l'application d'un module d'inversion [8], afin d'obtenir un spectre directionnel classique d'énergie et d'en déduire les principaux paramètres -périodes et directions- utiles à l'ingénieur. Des travaux vont aboutir à très court terme, (résultats en cours de validation au moment de l'écriture de cet article). Ce produit doit s'avérer rapidement d'un apport opérationnel prépondérant, car offrant une mesure

mondiale et tous-temps d'un spectre directionnel d'état de mer, qui apportera dès lors la plupart des paramètres utiles à l'ingénierie marine.

- Le diffusiomètre offre des champs de vents encore de qualité inégale, mais dont certains permettent déjà de préciser des analyses utilisées par la suite en entrée de modèles de calcul d'états de mer.

- L'utilisation de ces mesures satellitaires nécessite le passage par des schémas d'analyse complexes (modèles de représentation des états de mer, d'extrapolation, météo-océaniques), qui ne peuvent être le fait que d'organismes spécialisés, et que nous présentons succinctement dans les paragraphes suivants.

MODÈLES UTILISÉS POUR L'ÉTUDE

Modèles météo-océaniques

Une chaîne opérationnelle de modèles météo-océaniques a été utilisée pour la présente étude. Cet ensemble de logiciels :

- utilise des champs de vent, issus de différents modèles météorologiques. Ces vents sont traités, avant utilisation dans des modèles de calcul d'états de mer : interpolation dans le temps et dans l'espace, afin d'affiner la représentation des phénomènes, validation à l'aide d'éventuelles mesures de champs de vents fournies par le diffusiomètre du satellite ERS1, et expertise d'un analyste,

- calcule ponctuellement des spectres directionnels d'états de mer au large à partir des vents précédents. Ce modèle de calcul au large, ponctuel, est issu des méthodes de décomposition spectro-angulaire, c'est-à-dire qu'il calcule la génération, la propagation et l'amortissement des composantes spectrales de l'énergie des vagues, sur un faisceau de caractéristiques -orthodromies- convergeant vers le point de prévision [2, 20]. De ces spectres peuvent être déduits les principaux paramètres opérationnels [11], tels les estimations spectrales des hauteurs significatives, périodes moyennes et pic, directions du maximum d'énergie. Ce calcul au large peut être désormais validé grâce aux mesures satellitaires de l'environnement marin : en énergie à l'aide du H_s altimétrique et dans un futur proche, en période et direction à l'aide du SAR mode vague.

- transfère ces spectres directionnels en tout point d'un ouvrage côtier, avec la prise en compte des phénomènes physiques suivants : réfraction, shoaling, interaction avec les vents et courants sur la zone côtière, frottement sur le fond et déferlement.

Les étapes du calcul de transfert local du spectre directionnel sont au nombre de trois :

- reconstitution d'une grille bathymétrique,
- calcul des orthogonales réfractées - Collins [4] -, par rétropropagation depuis le point de calcul à la côte jusqu'à l'isobathe définie comme celle du large,
- transfert des spectres directionnels d'états de mer du large.

Dans le cas de l'étude support de cet article, seuls les phénomènes de réfraction-shoaling sont pris en compte et l'équation d'évolution de l'énergie le long d'une orthogonale est alors :

$$\frac{d}{ds}(CC_G S(\omega, \theta)) = 0$$

où :

- C : célérité de la vague considérée
- C_G : vitesse de groupe
- $S(\omega, \theta)$: spectre directionnel d'énergie

Modèles d'analyse des états de mer et d'extrapolation

L'analyse et l'extrapolation des hauteurs significatives d'états de mer [7, 5, 14] repose sur des concepts développés par Labeyrie. Afin de répondre à tous les critères d'analyse de phénomènes météo-océaniques pour la conception d'ouvrages, cette approche permet de :

- tenir compte des différentes échelles de temps (stationnarité, durée d'enregistrement, durée physique représentée par les données, durée du projet...),
- mettre en évidence la dynamique des grandes valeurs [16],
- prendre en compte les aspects saisonniers et directionnels,
- quantifier les niveaux d'incertitudes (estimation des paramètres, choix d'un modèle, statistiques extrêmes).

Analyse de stationnarité des états de mer

L'étude de stationnarité est un préalable indispensable, qui permet d'associer une durée physique à chaque état de mer, caractérisé par le paramètre exhaustif qu'est sa hauteur significative, et de réaliser l'indépendance des échantillons initiaux, en vue de l'extrapolation.

Cette procédure a été décrite par Labeyrie [13]. Elle peut être appliquée à tout enregistrement continu de mesures, in situ ou satellitaire le long d'une trace.

La détection des transitions repose sur l'hypothèse que la succession des H_s , dans un état de mer, est de la forme $V_i + \theta_i$, où θ_i est une variable aléatoire de distribution normale à moyenne nulle $N(0, \sigma)$. Après une transition, la distribution de θ_i devient $N(\mu, \sigma)$, avec $\mu \neq 0$. Le détecteur de rupture doit ainsi tester les deux hypothèses : $\theta_i \in N(0, \sigma)$ et $\theta_i \in N(\mu, \sigma)$.

Le lecteur pourra trouver plus de détails sur la mise en oeuvre de ce test dans [21].

Deux analyses peuvent alors être effectuées :

Estimation du H_s de l'état de mer extrême

Cette procédure est implémentée dans STEXOM 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 associées.

Les trois étapes sont les suivantes :

- ajustement d'un modèle paramétrique à la distribution empirique, avec une focalisation sur la qualité de la modélisation de la queue de distribution,
- détermination du type de la loi 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.

Estimation du H_{max} au sein d'un état de mer

Le but est ici d'estimer la hauteur maximale la plus probable au sein d'un état de mer, caractérisé par ses paramètres exhaustifs H_s et T_{stat} - durée de stationnarité.

On montre [17] que H_{max} suit une loi de Gumbel :

$$P(H_{max} < x \mid H_s) = e^{-e^{-\frac{x-u}{\alpha}}}$$

avec le paramètre d'échelle : $\alpha = \frac{H_s}{\sqrt{2 \log N}}$

et la valeur modale

$$u = H_s \frac{\sqrt{2 \log \left(\frac{2N\sqrt{1-\varepsilon^2}}{1+\sqrt{1+\varepsilon^2}} \right)}}{C(\varepsilon)}$$

N le nombre de vagues dans l'état de mer et le paramètre de largeur du spectre.

En l'absence d'informations spectrales spécifiques, l'hypothèse d'un spectre à bande étroite peut être faite [17] et la relation $T_z = \sqrt{aH_s + b}$ peut être appliquée afin d'estimer le nombre de vagues durant un segment stationnaire. On notera la faible variabilité de H_{max} avec le nombre de vagues.

CAS D'ÉTUDE

Objectifs

Bouygues Offshore désire connaître les conditions extrêmes d'états de mer en plusieurs points d'un futur pipe côtier ; cette caractérisation devant inclure au moins les paramètres réduits H_s , périodes moyenne et pic, ainsi que direction du maximum d'énergie associées.

Ce site se caractérise par une carence d'informations météo-océaniques locales : pas de mesures in situ et des observations de navire compilées dans le Global Wave Statistics [10], avec des résolutions spatiales -rectangle de 3000 km de côté- et temporelles -trimestrielles- ne pouvant en aucun cas permettre une analyse locale. De plus, ces observations sont imprécises du fait de leur nature, et le plus souvent absentes lors de tempêtes, ce qui limite sérieusement leur utilisation pour l'établissement de conditions extrêmes.

Dans ce contexte, l'utilisation des satellites est donc déterminante, car offrant des mesures fiables de l'environnement marin, dont la couverture et la densité permettent d'obtenir des échelles spatiales et temporelles adaptées.

Les mesures satellitaires utilisées

Les mesures satellitaires que nous avons utilisées sont les hauteurs significatives d'états de mer, fournies par Geosat de novembre 1986 à septembre 1989 (les données

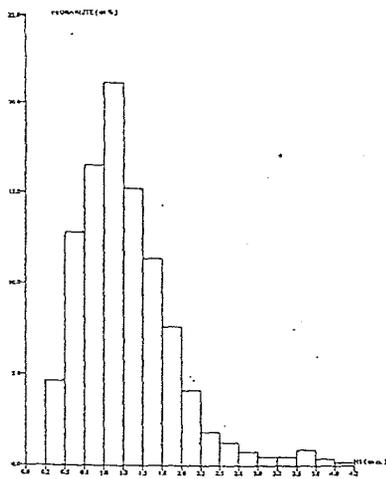


Fig. 6. Histogramme des Hs.

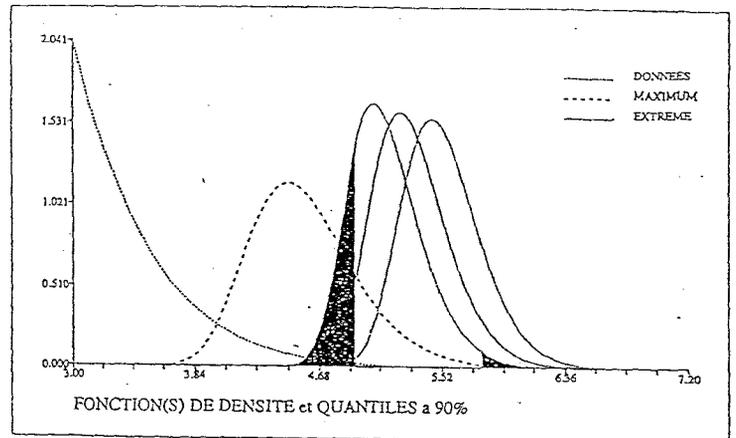


Fig. 9. Les 3 étapes de la prédiction de Hs extrêmes

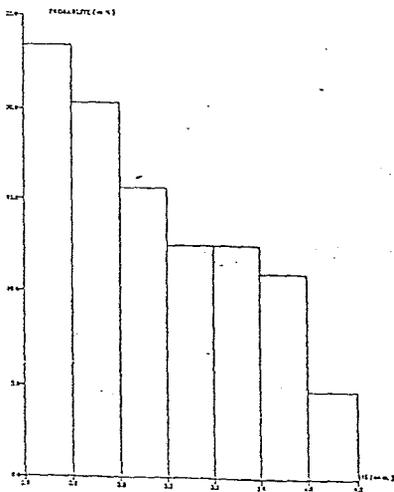


Fig. 7. Queue de distribution des Hs, après enrichissement en tempêtes

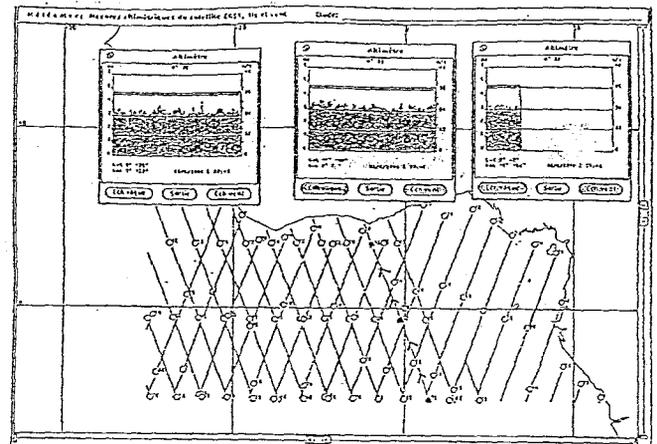


Fig. 10. Mesures de Geosat lors de la tempête du 15.06.88

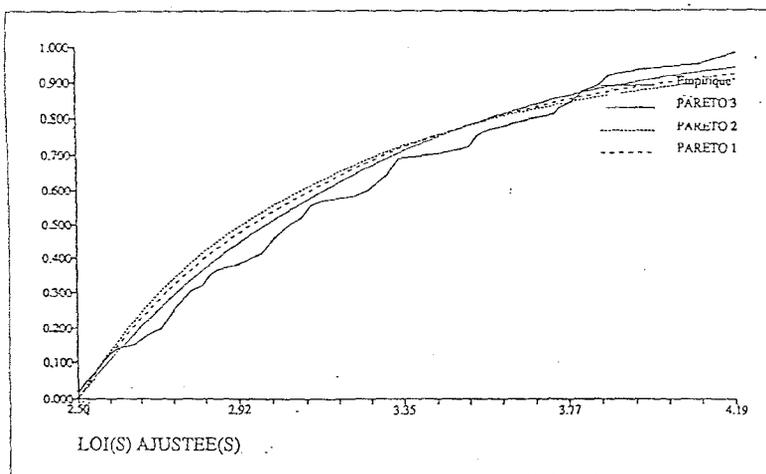


Fig. 8. Ajustement de modèles de queue sur la distribution des Hs

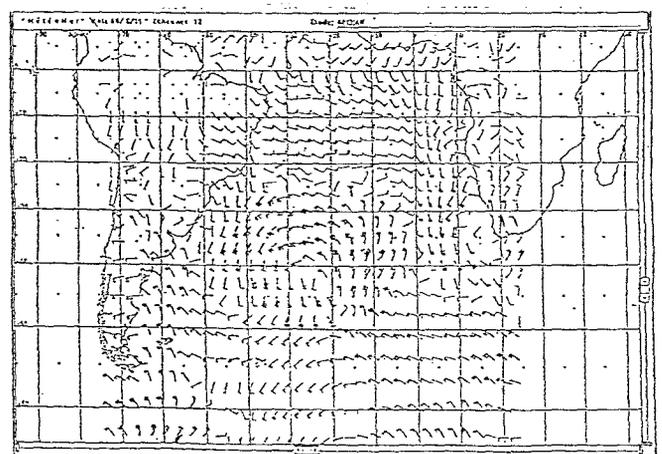


Fig. 11. Exemple d'un champ de vent générateur de la tempête du 15.06.88

ERS1 n'étant pas encore disponibles aisément lors de la réalisation de cette étude).

La méthode utilisée

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude combine les données satellitaires et modèles décrits précédemment selon les trois étapes suivantes :

- Etape 1 : Caractérisation des climatologies moyenne et extrême des états de mer au large du site, à l'aide des mesures satellitaires altimétriques de hauteurs significatives,

- Etape 2 : Reconstitution météo-océanique d'une tempête type mesurée au large du site par le satellite. Cette reconstitution permet de déterminer un spectre directionnel type d'état de mer extrême, duquel pourront être calculés les paramètres périodes moyennes ($T_{0,2}$), pic (T_p) et direction de l'énergie (θ_{max}), venant compléter l'information sur les Hs extrêmes obtenues précédemment,

- Etape 3 : Transfert de ce spectre directionnel extrême vers les points côtiers le long du tracé du pipe. De ces spectres directionnels à la côte, calculés en différents points de l'ouvrage, peuvent être déduits les mêmes paramètres dimensionnants que précédemment au large - hauteurs, directions et périodes d'états de mer.

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

Etape 1 : Estimation des Hs extrêmes des états de mer au large (eaux profondes)

Pour cette étape, une méthode, déjà validée sur des zones aussi différentes que la Mer du Nord, l'Atlantique Nord et le Golfe de Guinée, a été utilisée. Elle repose sur les phases suivantes :

* détermination de la zone climatologique locale sur laquelle les mesures altimétriques de Hs sont sélectionnées (fig. 4),

* réalisation d'une étude de stationnarité sur chaque trace au sein de cette zone, et sélection du Hs maximal dans chaque état de mer identifié,

* transfert vers la zone locale de tempêtes mesurées au large et manquées localement du fait de l'échantillonnage spatio-temporel du satellite. La zone au large retenue pour cette recherche de tempêtes est représentée sur la figure 5.

La densité des traces Geosat permet d'avoir une mesure toutes les six heures sur cette zone. Sept tempêtes, non mesurées sur la zone locale ont pu ainsi être identifiées au large, pendant la durée de vie de Geosat.

Une fois ces phases réalisées, les distributions des Hs sur la zone locale sont obtenues :

- histogramme total et statistiques associées (fig. 6),
- histogrammes des fortes valeurs de Hs, seuillées à 2,5m et enrichies avec les tempêtes précédentes (fig. 7),
- . Estimation des conditions extrêmes, via la procédure précédemment décrite.

Les résultats (fig. 8 et 9) de l'extrapolation des mesures de Hs sont résumés dans le tableau 1.

Les données satellitaires utilisées représentent une durée initiale de 3 ans, et l'extrapolation a été réalisée avec un seuil d'analyse à 2.5 m.

Les résultats fournis dans le tableau 1 représentent les valeurs les plus probables, mais les distributions ont

Project life (years)	Offshore $H_{S_{max}}$ (m)	Confidence interval (90%)
1	4.35	4.15 < < 4.75
10	4.95	4.65 < < 5.60
20	5.35	5.05 < < 5.75
50*	5.55	5.25 < < 5.95
100*	5.70	5.35 < < 6.05

Tabl. 1 : Hs extrêmes les plus probables, au large, en eaux profondes (* : à titre indicatif)

aussi été déterminées pour chacune des durées de projet. Par exemple, la distribution sur 20 ans est une Fisher-Tippet III :

$$f(x) = e^{-\left(\frac{x_0 - x}{\alpha}\right)^\beta}$$

avec $x_0 = 7,20$, $\alpha = 2,22$ et $\beta = 8,60$. Les intervalles de confiance à 90% pour α et β sont respectivement 2,02-2,39 et 7,49-9,71. Les valeurs à 50 et 100 ans ne sont fournies qu'à titre indicatif.

Toutefois, les mesures satellitaires et la méthode d'extrapolation utilisée mettent en évidence une loi de distribution bornée supérieurement, avec une limite physique. Dès lors, ces valeurs à 50 et à 100 ans ne sont pas sans signification.

Etape 2 : Caractérisation météo-océanique d'une tempête type au large de la zone d'étude

L'étape 1 a permis d'estimer les hauteurs significatives d'états de mer extrêmes, à l'extrémité du pipe dans des conditions d'eaux profondes (profondeur ≥ 200 m).

Le but est ici de compléter l'information Hs précédente grâce à la reconstitution d'une tempête type au large, permettant une estimation des paramètres périodes, moyennes et pic, et direction de l'énergie maximale. Les phases sont les suivantes :

- Analyse préliminaire des genèses de tempêtes et choix d'un événement, mesuré par le satellite au large, en eaux profondes. Nous avons retenu la tempête mesurée le 15 juin 1988 à 18h par Geosat (fig. 10),

- Désarchivage des champs de vent, issus du modèle du Centre Européen de Prévision (CEP), générateurs de cette tempête (exemple en fig. 11),

- A partir des champs de vent précédents, fournis au pas de 6h, calcul des spectres directionnels sur l'extrémité du pipe vers le large à l'aide des modèles météo-océaniques présentés précédemment (exemple de tableau d'énergie sur la figure 12).

L'analyse de la forte tempête du 15.06.1988 à 18h UTC nous montre que l'énergie se concentre autour des périodes 16-19s. ($T_{pic} \sim 19s$; $T_{0,2} \sim 16s$). Ceci nous

Project life (years)	Offshore H_{Smax} (m)	Confidence interval (90%)	T_Z (s)	T_P (s)	Main direction (deg.)
1	4.35	4.15 < < 4.75	16	19	210-215
10	4.95	4.65 < < 5.60			
20	5.35	5.05 < < 5.75			
30	5.40	5.15 < < 5.85			
40	5.50	5.20 < < 5.90			
50*	5.55	5.25 < < 5.95			
100*	5.70	5.35 < < 6.05			

Tabl. 2 - Conditions d'états de mer dimensionnants au large, en eaux profondes (* : à titre indicatif)

amène à obtenir les caractérisations des états de mer extrêmes au large, résumés dans le tableau 2 ci-après :

Etape 3 : Transfert du spectre directionnel de tempête vers les points côtiers le long du tracé du pipe

Cette étape permet donc de transférer les conditions extrêmes - hauteurs significatives, périodes et directions - déterminées précédemment au large, vers les points de l'ouvrage côtier.

La procédure du transfert, décrite précédemment de façon succincte, est illustrée par les figures :

- 13 : exemple de spectre directionnel au large,
- 14 : faisceau d'orthogonales rétropropagées de la côte vers le large,
- 15 : spectre directionnel correspondant sur un point à 20 m de profondeur.

Ce transfert montre par exemple pour le 15/06/88 des évolutions de Hs de 2,85 m à 3,55 m, des modifications de direction d'énergie maximale de 215° à 190°, des périodes moyennes stables de l'ordre de 16 s, lorsque l'on se déplace le long du pipe, de l'extrémité la plus au large (100 m), vers celle la plus côtière (20 m).

Synthèse des résultats

Les étapes précédentes permettent donc d'obtenir, pour des durées de projet allant de 1 à 100 ans, et sur les points côtiers le long du pipe :

- avec précision les paramètres (Hs) max et les incertitudes associées,
- une estimation des périodes, moyenne et pic, associées, ainsi que la direction du maximum d'énergie.

Ces paramètres sont résumés sur le tableau 3 ci-après, pour un point à 20 m sur le tracé du pipe :

Project life (years)	Offshore H_{Smax} (m)	Confidence interval (90%)	T_Z^* (s)	T_P^* (s)	Main direction* (deg.)
1	4.65	4.45 < < 5.05	16	19	190
10	5.45	5.15 < < 5.85			
20	5.65	5.35 < < 6.05			
50*	5.85	5.55 < < 6.25			
100*	5.95	5.70 < < 6.35			

Tabl. 3 : Conditions d'états de mer dimensionnants à la côte (20 m) (* : à titre indicatif)

CONCLUSION

La présentation de la méthode mise en oeuvre dans le cadre de cette étude souligne la nécessité de compléter et de traiter les mesures satellitaires -ici hauteurs significatives altimétriques- à l'aide d'outils dédiés à l'étude de l'environnement marin : modèles météo-océaniques, ainsi que d'analyse de stationnarité des états de mer et d'extrapolation.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'apport nouveau et déterminant des mesures satellitaires pour la détermination de certains paramètres de l'environnement marin, ici (Hs)max, utiles à l'ingénieur de structures, en l'absence de mesures in-situ. Notamment, l'analyse des fortes valeurs de la population des Hs a pu permettre de mettre en évidence la dynamique saturée, caractéristique de cette région.

L'utilisation supplémentaire de spectres directionnels d'états de mer, fournis par le radar à synthèse d'ouverture du satellite ERS1 devrait augmenter la part de la mesure satellitaire dans cette méthode et préciser considérablement l'estimation des périodes -moyennes et pic- et directions associées aux conditions extrêmes de Hs.

Par ailleurs, l'accroissement quotidien de la banque de données de mesures satellitaires, multiplié par le nombre des satellites (ERS1, ERS2, Topex...), doit se traduire par une amélioration des résultats climatologiques :

- qualité de l'ajustement du modèle paramétrique,
- augmentation de la durée initiale représentée par les mesures, et donc extrapolation vers des durées de projet supérieures (dans le cas de dynamiques non saturées),
- réduction des incertitudes associées aux conditions extrêmes.

	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
160	0.9	7.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	11.2
165	-1.1	5.1	0.4	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	7.0
170	1.3	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5
175	1.2	1.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1
180	0.4	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
185	0.3	1.0	1.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5
190	0.0	0.2	1.7	0.3	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7
195	0.0	0.1	1.3	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.7	4.9
200	0.0	0.1	0.0	8.3	3.4	0.4	0.0	12.1	1.3	25.7
205	0.0	0.0	0.1	8.3	2.1	0.0	35.7	87.9	0.1	134.0
210	0.0	0.0	0.2	8.1	1.5	3.1	88.9	80.5	0.0	182.4
215	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	54.9	88.2	59.4	0.0	202.9
220	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.4	59.8	0.0	0.0	118.2
225	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	2.8
230	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
235	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
240	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5.2	18.8	9.2	26.8	11.2	119.9	272.7	239.9	2.1	0.0

H1/3 = 3.2
Hmax = 4.8

Fig. 12. Tableau d'énergie du spectre directionnel au large, 15.06.88

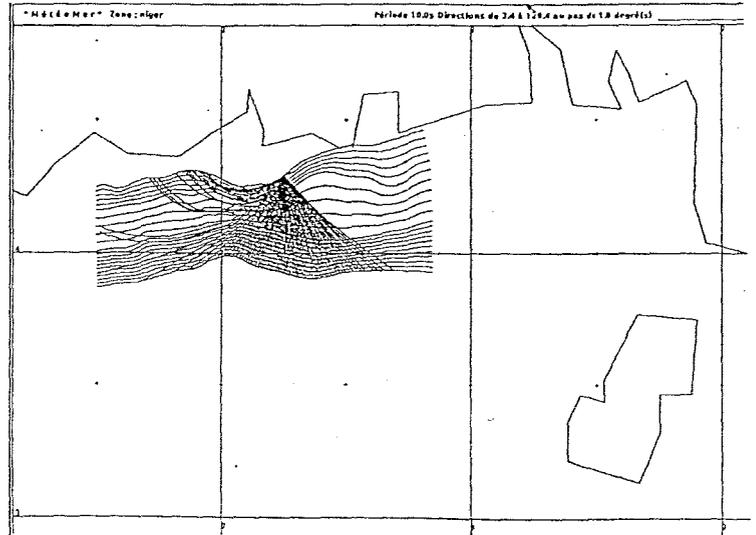


Fig. 14. Orthogonales rétropropagées pour la période 15s.

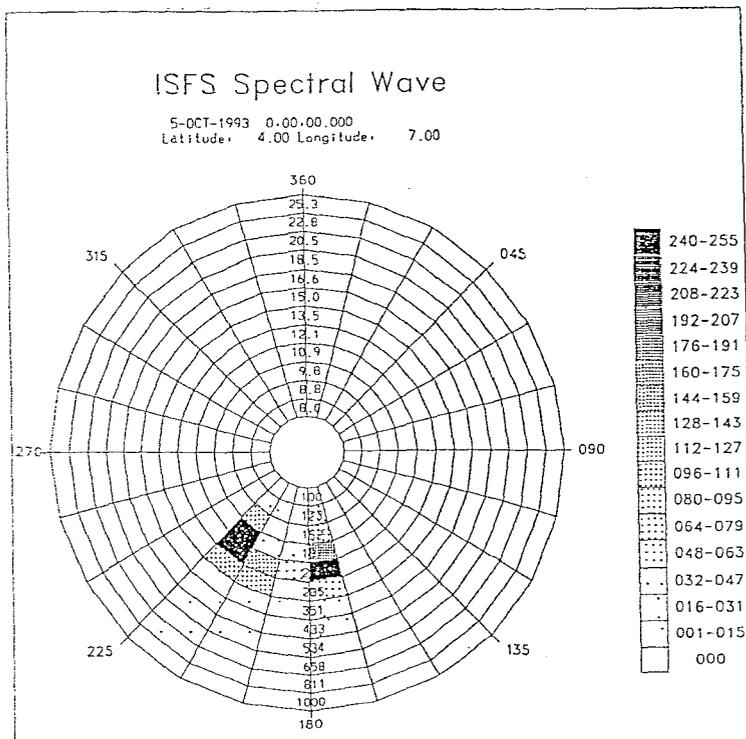


Fig.13. Visualisation du spectre directionnel au large, 15.06.88
L'axe vertical représente les périodes, en sec. (en haut) et les longueurs d'onde, en mètres (en bas).
Le pas d'affichage en direction est de 15°.

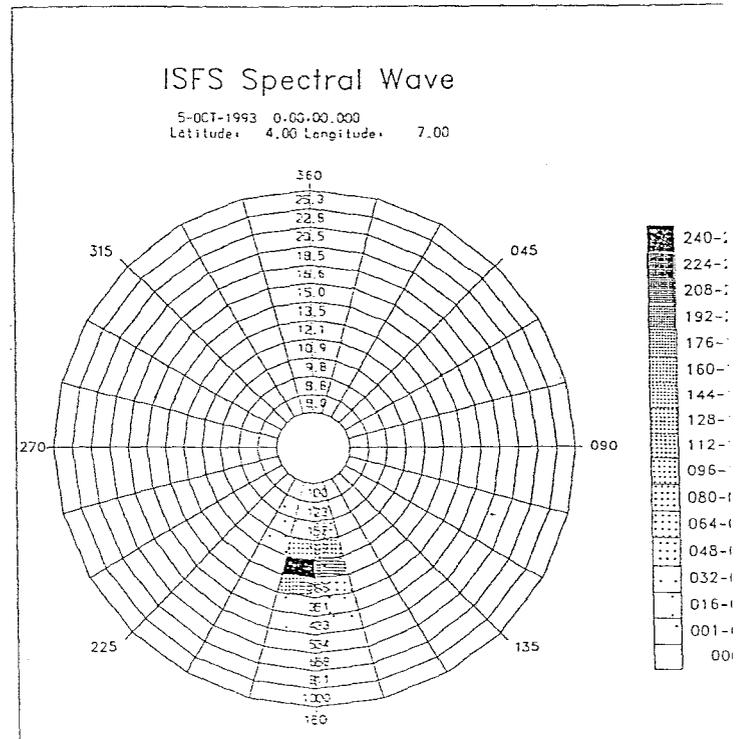


Fig. 15. Visualisation du spectre directionnel à la côte. On pourra noter la concentration d'énergie dans le secteur 180°-195°.

Enfin, les caractéristiques de la mesure satellitaire, couverture dense, mondiale et tous-temps du globe, permettent de réaliser ce type d'étude sur des sites nouveaux de par le monde, en adaptant les différentes étapes présentées ici aux caractéristiques spécifiques de la zone (mer ouverte ou fermée, zone au large ou à la côte,...).

Remerciements

La méthode opérationnelle de climatologies extrêmes à partir des Hs altimétriques a été développée dans le cadre du projet CLAROM « Apport des données satellitaires à la connaissance appliquée de l'environnement marin ». Ses participants - Bureau Veritas, Elf Aquitaine, IFP, Ifremer, STNMTE et MétéoMer en sont vivement remerciés.

Références

- [1] Brown G.S. 1978. Backscattering from a Gaussian distributed, perfectly conducting rough surface. IEEE Trans. Antennas Propagation, AP-26, 472-482.
- [2] Cazale M., Gelci R. et Vassal J.P. 1953. Prévion de la houle: méthode des densités spectro-angulaires. Bulletin du Comité d'Océanographie et d'Etudes des Côtes.
- [3] Charriez P., Olagllon M. et Tournadre J. 1992. Confidence intervals associated with satellite measurement of wave and wind environment. Proc. Offshore Mechanics and Artic Engineering, OMAE, 2, 313-320.
- [4] Collins,J.I. 1953. J. of Geophysical Research, 77, 2693-2707.
- [5] Dacunha-Castelle D., Deheuvels P., Labeyrie J. et Wschebor M. 1986. Extreme Values and Level-Crossing Statistics - The Case of Water Waves (in French). Clarom-Arae Report, IFP 34311.
- [6] Dobson E.B., Monaldo F.M., Goldhirsh J. et Wilkerson J. 1987. Validation of Geosat altimeter-derived wind speeds and wave heights using buoy data. J. of Geophysical Research, 92 , 10719-10731.
- [7] Doucet, Y. Labeyrie, J et Thebault J. 1987. Validation of Stochastic Environmental Design Criteria on Frigg Field, Modelling the Offshore Environment , S.U.T. (ed.), London, 45-59.
- [8] Hasselmann K. et Hasselmann S. 1991. On the non-linear mapping of an ocean wave spectrum into a SAR image and its inversion. J. of Geophysical Research, 96 , 10713-10729.
- [9] Fedor L.S., Godbey T.W., Gower J.F.R., Guptill R., Hayne G.S., Rufenach C.L. and Walsh, E.J. 1979. Satellite measurements of seastate - An algorithm comparison. J. of Geophysical Research, 87, 3991-4001.
- [10] Hogben,N., Dacunha N.M.C. and Olliver G.F. Global Wave Statistics. British Marine Technology Limited, Felthen, UK.
- [11] International Association for Hydraulic Research. 1986. List of Sea State Parameters. Supplement to bulletin, 52.
- [12] Labeyrie,J. 1985. ST.EX.OM : a statistical package for the prediction of extreme values. Proc. 4th Int. Conf. 071 Engineering Software, Springer Verlag, Berlin, 15, 17-32.
- [13] Labeyrie J. 1990. Stationary and transient states of random seas. Marine Structures, 3-1, 43-58.
- [14] Labeyrie J. 1991. Time Scales and Statistical Uncertainties in the Prediction of Extreme Environmental Conditions. Reliability Engineering and Safety, 32 , 243-266.
- [15] Monaldo F.M. 1988. Expected differences between Buoy and Radar Altimeter estimates of Wind speed and Significant Wave Height and their Implications on Buoy-Altimeter Comparisons. J. of Geophysical Research, 93, 2285-2302.
- [16] Regnault, P., Charriez, P., Olagnon, M., De Graauuw A., Peltier E. et Piet M. 1994. Comparative study of several methods used in coastal engineering for the prediction of extreme wave conditions. Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conf., ISOPE.
- [17] Robin A. and Olagnon M. 1991. Occurrence of Extreme Waves with respect to Significant Wave Height. Proc. Offshore Mechanics and Artic Engineering, OMAE, 2a, 1-9.
- [18] Tiago de Oliveira J. and Ivette Golnes M. 1984. Two test statistics for choice of univariate extreme models. Statistical Extremes and Applications, NATO ASI Series, REIDEL Pub, 651-668.
- [19] Tournadre J. and Ezraty R. 1990. Wind and Sea State Local Climatology by Means of Satellite Radar Altimeter Measurements. Proc. Space and Sea Colloquium, E.S.A., SP132, Paris.
- [20] Vassal J.P. 1980. Utilisation de la méthode DSA2 pour le calcul de la houle sur le site de Staffjord. Service Météorologique Métropolitain.
- [21] Willsley A.S. and Jones A.L. 1976. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. I.E.E.E. Trans. Automatic Control, AC-21, 1.