

Climatologie océanique par satellite: un succès d'ERS

M. Olagnon

Ifremer, Centre de Brest, Plouzané, France

P. Lasnier

MétéoMer, Puget-sur-Argens, France

G. Paci

ESA/ESRIN, Remote Sensing Exploitation Dept., Frascati, Italy

Les paramètres météo-océaniques que sont la houle et le vent sont des facteurs déterminants de la conception des navires et des ouvrages en mer. Pour l'ingénieur, ces données proviennent de statistiques d'états de mer aux emplacements d'intérêt, dont les sources ne présentent pas toujours la qualité voulue.

La disponibilité de mesures de hauteurs significatives des vagues en provenance des satellites dotés d'altimètres a permis d'envisager d'y trouver une source nouvelle. Ce n'est toutefois qu'avec l'utilisation du SAR en mode vague d'ERS-1 et d'ERS-2, qu'on a pu répondre à l'essentiel des attentes des ingénieurs, pour lesquels la période et la direction de la houle ne peuvent être ignorées. Les satellites offrent une couverture dense de la surface des océans, et après plusieurs années d'exploitation, il est devenu possible de les utiliser à la construction de statistiques fiables, comme l'illustre le service CLIOSat, développé par Ifremer et MétéoMer.

Besoins des utilisateurs en paramètres météo-océaniques

Pour la construction de navires ou de plates-formes offshore, comme lors de la préparation d'opérations de remorquage ou d'installation sur site, on recherche la statistique des conditions qu'on sera susceptible de rencontrer tant aux moments cruciaux que dans des conditions normales d'opération. On peut distinguer trois types de conditions déterminantes pour le dimensionnement: communes, pour prévoir la fatigue des matériaux, extrêmes, pour parer aux tempêtes exceptionnelles, et critiques, pour éviter que des conditions sévères, mais non extrêmes, ne surviennent au moment inopportun d'une situation délicate.

La fatigue des structures en mer

La fatigue des matériaux est la conséquence de charges alternées répétées. Sous l'effet de ces charges, des micro-fissures s'initient dans les matériaux, principalement l'acier, puis se propagent et pourraient même conduire à la ruine d'une structure qui ne serait pas redondante et où ces fissures n'auraient pas été détectées à temps. La présence dans les plates-formes offshore de nombreuses jonctions de barres par des noeuds tubulaires soudés introduit, de par les soudures, des hétérogénéités et des défauts microscopiques à partir desquels les fissures peuvent se produire: dès la conception ce risque doit être pris en compte. Le problème est le même pour les navires, en ce qui concerne les tôles et les éléments raidisseurs (couples, lisses, cloisons).

La principale source d'efforts alternés en mer est bien évidemment la houle. Il s'y ajoute dans nombre de cas une réponse résonante de la structure, à des vibrations d'origine artificielle (machines, lignes d'arbre) ou naturelle (turbulence, vent, courant). Le vent et le courant peuvent également représenter des facteurs d'accentuation de l'intensité des efforts dus à la houle (Fig. 1).



Figure 1. Navire sous l'effet de la houle

On caractérise la fatigue par un coefficient d'endommagement, calculé à partir des contraintes dans le matériau, qui s'incrémente au fur et à mesure des efforts subis, et pour lequel la réglementation impose de ne pas dépasser un seuil donné sur l'ensemble de la durée de vie de l'ouvrage.

L'endommagement dû à l'action directe de la houle varie comme une puissance comprise entre 2 et 5 de la hauteur significative, suivant le type de structure et la nature de l'acier utilisé, ordinaire ou à haute limite d'élasticité. Il est d'autre part proportionnel au nombre de cycles alternés de chargement, et donc inversement proportionnel à la période de la houle. On voit donc l'importance de connaître avec précision la hauteur significative de la houle pendant toute la durée de vie prévisible de la structure, l'endommagement y étant très sensible. La période ayant une influence moindre, une précision inférieure peut être acceptée en ce qui la concerne. Toutefois, la période pourrait s'avérer déterminante pour certains types de structures dont elle gouverne la résonance. Même dans ce dernier cas, on évite la plupart du temps de risquer cette résonance, et on garde une large marge de sécurité autour des périodes propres de la structure, si bien qu'une précision de l'ordre de la seconde est suffisante.

Les conditions extrêmes

La réglementation, tout comme les intérêts des opérateurs, ont fixé des niveaux de risque à ne pas outrepasser pour les biens et les personnes à la mer. Par exemple, en offshore, la probabilité de ruine d'une structure portant du personnel lors d'une année quelconque de sa durée de vie ne doit pas excéder 1%. Cette condition est exprimée dans le langage courant comme centennale, ou ayant une période de retour de cent ans.

On doit donc estimer avec une excellente précision la distribution des conditions auxquelles l'ouvrage sera soumis, afin de pouvoir l'extrapoler, avec une confiance suffisante, à des niveaux de probabilité annuelle inférieurs à $10(\exp -2)$. De plus, ces conditions extrêmes résultent de la conjonction de plusieurs facteurs : houle, vent, courant, qui, pris individuellement, ne causeraient pas nécessairement le même niveau de réponse. Il faut, pour savoir comment les combiner, disposer des distributions conjointes ou conditionnelles des différents paramètres.

Chacun de ces phénomènes doit également être décrit de manière détaillée: on calculera en effet le plus souvent une structure en simulant l'effet de la vague dite de design. La hauteur de cette vague individuelle se déduit de la hauteur significative de l'état de mer correspondant par l'application de modèles simples et bien validés. La période de la vague individuelle détermine la cinématique dans l'eau, qui elle-même définit les forces hydrodynamiques qui s'exercent sur la structure. Cependant, cette période ne peut se déduire de la simple hauteur de la vague, mais demande que soit connue la période moyenne de l'état de mer. D'autre part, une structure offre généralement plus de résistance dans certaines directions que dans les autres. Il importe donc de connaître les directions dans lesquelles se présenteront les sollicitations maximales pour implanter l'ouvrage en conséquence (Fig. 2).

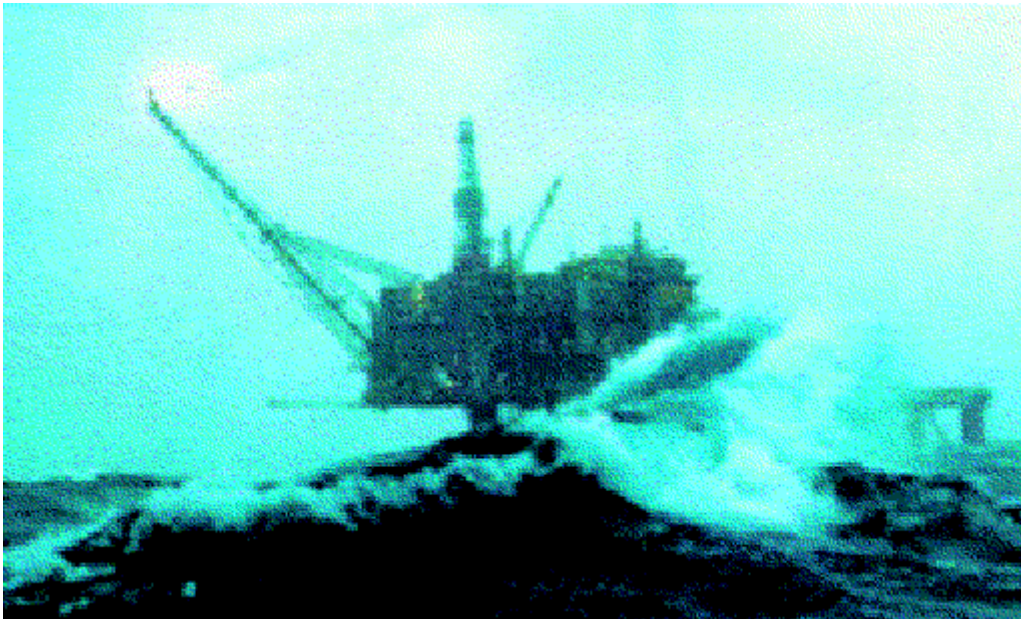


Figure 2. Plate-forme attaquée par la houle

En résumé, la houle représentant la source principale des efforts, on cherchera à disposer de la hauteur significative centennale, de la distributions des périodes associées, de celle des directions correspondantes, des conditions de vent associées, et éventuellement de courant, encore que le courant soit souvent largement indépendant des phénomènes précédents et quasi déterministe.

Les opérations en mer

L'exploitation pétrolière offshore se trouve à l'origine de transports océaniques inhabituels, comme le remorquage, en flottaison ou sur barge, de plates-formes entières ou d'importants modules composant les installations à bord, depuis les chantiers de construction jusqu'au lieu d'implantation finale. L'installation en place est alors elle aussi une opération délicate. Elle

demande en particulier de bénéficier d'un créneau météo océanique de conditions inférieures à un seuil donné, qui peut lui même dépendre des moyens choisis pour mener à bien l'opération.

En ce qui concerne les transports, les mêmes types d'études préparatoires que pour les structures doivent être conduits: fatigue durant le trajet, et conditions extrêmes rencontrées. La fatigue se calcule pour une durée plus courte, mais concerne des composants de la structure qui sont sollicités d'une manière inhabituelle, ainsi que le système d'arrimage sur la barge, et peut donc jouer un rôle déterminant dans le dimensionnement. Les statistiques météo-océaniques cherchées sont alors mensuelles ou trimestrielles. Elles concernent la hauteur significative de la houle, sa direction par rapport au trajet du convoi, l'existence possible de houles croisées, les périodes susceptibles d'engendrer des réponses résonantes en roulis, et les occurrences simultanées de vents forts, du fait du fardage important de la structure remorquée. La zone considérée s'étend, au long des routes possibles, sur de grandes distances.

Comme une structure fixe, un transport doit être dimensionné en fonction des conditions de réponse extrême. Cependant, compte tenu d'une durée d'exposition bien moindre et parfois de la possibilité de gagner un abri, on utilisera des conditions décennales, voire annuelles. Les paramètres influents sont les mêmes que pour la fatigue, et on a là, encore plus que pour les structures fixes, un important besoin de statistiques conjointes.

Les opérations sont principalement conditionnées par la hauteur significative. L'essentiel de l'aspect météo-océanique y réside dans la prévision à court terme en temps réel, mais les statistiques jouent auparavant un rôle important pour les études de faisabilité et le choix des moyens mis en oeuvre, comme par exemple la capacité de levage de la grue.

Une réponse aux besoins: les mesures satellitaires

Les enjeux économiques liés à l'exploitation pétrolière offshore sont considérables. Le coût d'une plate forme de production se chiffre le plus souvent en centaines de millions de dollars, et peut même pour certaines dépasser le milliard de dollars. Une journée de retard dans une opération peut faire perdre plusieurs centaines de milliers de dollars. De telles sommes ne peuvent se risquer sur le coup de dés d'une connaissance imprécise des conditions météo océaniques.

Faute d'instrumentation adéquate, la pratique courante consistait jusqu'à présent à rétro simuler les conditions de mer lorsque le budget le permettait, ou à se contenter des observations consignées dans un atlas, comme le GWS (Global Wave Statistics). Malgré tout le soin apporté tant aux observations par les commandants de navires, qu'à leur compilation par les auteurs de ces ouvrages, il n'est pas possible de se libérer des limitations inhérentes à ce type de données. On peut ainsi citer l'imprécision de la mesure par observation humaine, la résolution spatiale insuffisante en dehors des grandes routes maritimes, ou les biais statistiques introduits par le contournement des tempêtes par les navires et par l'effet de l'état de la mer sur leur vitesse, et donc les proportions inégales de temps passé dans les zones de beau ou de mauvais temps.

Les modèles de rétro-simulation eux-mêmes ne sont pas exempts de reproches. Ils sont très sensibles à la qualité des champs de vent utilisés, qui sont souvent mal connus, en particulier dans l'hémisphère sud, bien que des progrès considérables aient été récemment réalisés grâce au recalage par rapport aux champs de vent mesurés par satellite, en particulier par le

diffusiomètre d'ERS. Ils présentent une forte inertie et rendent mal compte des changements rapides de temps. La propagation lointaine de la houle reste imparfaitement modélisée. Ils sont ajustés à l'aide des conditions les plus fréquentes, et non en conditions extrêmes, avec les conséquences que cela implique pour ces dernières.

L'ingénieur et l'océanographe ont souvent des exigences différentes. L'ingénieur cherchera à caractériser un état de mer par sa hauteur significative, H_s , qui représente l'énergie des vagues. Il s'intéressera également à la période, qui détermine la cinématique, et donc les forces sur les structures, qui peut décider de comportements résonants, et qui définit le nombre de cycles en fatigue. La direction, qu'elle soit relative au cap suivi par un navire ou à celle de meilleure résistance d'un ouvrage, peut présenter un certain intérêt.

Le vent est fréquemment moins déterminant que la houle, mais son action doit cependant être ajoutée à celle des vagues. En certains endroits, les courants peuvent avoir une influence importante, mais dans la plupart des cas, les conséquences d'une amélioration de leur connaissance sont sans commune mesure avec celles de la réduction des incertitudes sur la houle extrême, par exemple.

Hauteur significative des vagues

La hauteur significative habituelle en ingénierie est définie par 4σ , où σ est l'écart-type de l'élévation de la surface libre, traditionnellement estimé en un point fixe sur une durée de l'ordre de 20 minutes. Il est nécessaire d'estimer avec une excellente précision la partie haute de sa distribution à long terme. En effet, une incertitude supplémentaire de 50 cm sur les hauteurs significatives mesurées se traduirait par environ 1,50 m sur la vague maximale, et pourrait augmenter le coût d'un ouvrage typique de près de 10%.

Les H_s altimétriques sont mesurées comme quatre fois l'écart-type de l'élévation de la surface libre sur un ovale d'environ 40 square kilometres. Si les vagues se déforment au cours de leur propagation, leurs propriétés statistiques globales ne varient que lentement, et on peut estimer que la mesure altimétrique de H_s est équivalente à celle qui serait effectuée au point fixe, au centre de la tache, pendant une durée égale au diamètre de la tache divisé par la vitesse de groupe. La qualité de l'estimateur dépend, elle, du nombre de vagues utilisées. En se fixant des conditions typiques, soit une période des vagues de 10 secondes, et un rapport de 10 entre longueur de crêtes et longueur d'onde, il y a environ 160 vagues dans une tache, et donc un nombre comparable à ce qui est observé en 20 à 30 minutes au point fixe. L'estimateur de H_s fourni par l'altimètre d'un satellite est donc très semblable à celui de la pratique courante des mesures in situ.

Des calibrations effectuées par rapport à des mesures quasi simultanées et quasi-colocalisées de bouées ou de houlomètres radar installés sur des plates-formes pétrolières ont montré que les différences n'excèdent pas 30 cm, validant ces résultats bien au delà des attentes lors des spécifications initiales.

En raison des difficultés à trouver des mesures colocalisées en temps et en espace, ces calibrations pourraient n'apparaître que peu probantes, surtout pour des conditions s'écartant de la norme. Quand on compare les mesures effectuées sur la bouée Béatrice de séparation du trafic d'Ouessant avec celles de l'altimètre de Geosat pendant la même période, on constate qu'en dehors des faibles états de mer où les limites de sensibilité des capteurs apparaissent, les erreurs sur la distribution à long terme ne dépassent vraisemblablement pas 10 cm.

Toutefois, les données altimétriques requièrent plus de soin dans le pré traitement que celles d'autres sources, en particulier au voisinage des côtes où il faut quelques secondes à l'altimètre pour se stabiliser quand la trajectoire quitte la terre, et là où des îles sont susceptibles de fausser la mesure radar.

Cela signifie également que les zones côtières ne peuvent bénéficier qu'indirectement de l'apport des mesures satellitaires, par le biais de modèles de propagation appliqués à des spectres mesurés au large.

Périodes des vagues

La période apparente des vagues peut être caractérisée à partir de la représentation fréquentielle de l'élévation de la surface libre (spectre). On utilise principalement deux valeurs caractéristiques: la période du pic du spectre, qui correspond en quelque sorte à la composante la plus énergétique de la houle, et la période moyenne, laquelle correspond à la décomposition d'un historique de surface libre en vagues successives, la séparation se faisant au passage par le niveau moyen.

L'ingénieur pourra aussi souhaiter quantifier l'aspect 'multipic' du spectre, pour reconnaître des états de mer où se combinent des houles et des mers de périodes et de directions différentes.

Pour les mesures satellitaires, les périodes sont issues du SAR en mode vagues, qui est le seul capteur à pouvoir les mesurer. En mode vague, l'imagette SAR fait 5 km de côté, elle est obtenue en faisant la moyenne de trois vues successives, ce qui réduit la taille du pixel à 1620 m, et elle est fournie en routine sous forme de spectre d'image avec une définition réduite (12 raies en fréquence et 12 secteurs directionnels dans le demi plan). Le sens de propagation ne pouvant être discriminé, l'image est en effet symétrique par rapport à l'origine.

On peut comparer la transformée de Fourier bi dimensionnelle de l'imagette à un spectre directionnel des pentes de la surface libre. Toutefois, plusieurs phénomènes compliquent la relation entre cette transformée de l'imagette et le spectre directionnel de la houle, principalement:

1. l'intégration spatiale à effectuer pour passer des pentes à l'élévation de la surface libre,
2. l'interaction hydrodynamique entre vagues et vaguelettes,
3. le 'range bunching': influence de l'élévation de la surface libre sur le temps de retour du signal,
4. le 'velocity bunching': effets du déplacement des facettes induit par la vitesse orbitale à la surface des vagues, qui introduit un décalage Doppler dans le signal réfléchi.

De plus, la transformée de l'imagette est 'indiscriminée', c'est-à-dire qu'elle contient une ambiguïté de 180° sur la propagation des vagues.

Ce processus d'imagerie SAR peut être modélisé par un ensemble de transformations parfois fortement non linéaires. La résolution du problème inverse a fait l'objet de recherches poussées, en particulier en Allemagne, en Norvège et en France. Il utilise l'apport d'une 'ébauche', spectre directionnel calculé à partir d'un modèle numérique simulant la houle à partir des champs de vent, d'une part pour discriminer entre les deux sens possibles de propagation, d'autre part pour compléter dans le domaine des hautes fréquences (mer du vent)

l'information rendue inaccessible par la taille des pixels de l'imagette et par l'atténuation due au 'velocity bunching'.

La Figure 3 illustre ces points en présentant un spectre SAR observé et le spectre directionnel de houle reconstruit par inversion. La période du pic du spectre, $T(\text{sub } p)$, est robuste vis à vis de la procédure d'inversion des spectres SAR. Toutefois, il s'agit plus souvent d'un paramètre de climatologue que d'ingénieur, ce dernier s'intéressant principalement à la période moyenne de passage par le niveau moyen, déterminante pour le calcul en fatigue.

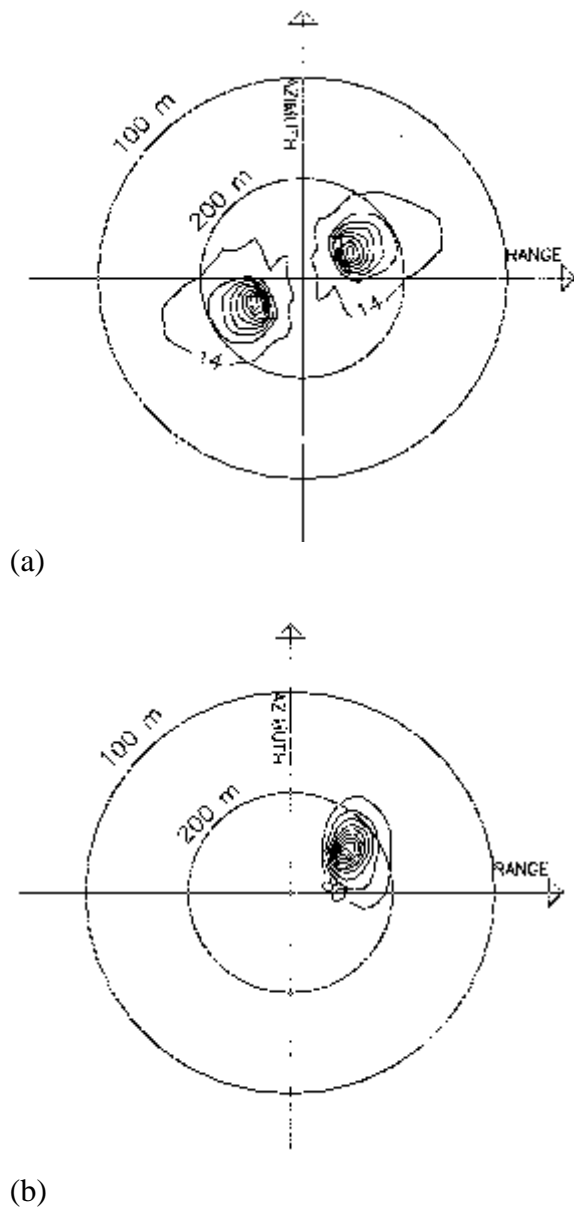


Figure 3. Spectre directionnel SAR observé (a) et inversé (b)

La période moyenne T_z peut s'estimer à partir des moments spectraux d'ordre 0 et 2 (barycentre du spectre SAR), on parle alors de $T_{0,2}$. Toutefois, elle est alors fortement affectée par les effets sur le moment d'ordre 2 de la coupure azimutale liée au 'velocity bunching' et de la gamme de fréquences couverte. Il est donc nécessaire de compléter le contenu spectral par une information haute fréquence adéquate.

Il est reconnu que la qualité de simulation de la mer du vent dépend quasi-exclusivement de l'exactitude des champs de vent utilisés. Or, la fauchée de mesure du diffusiomètre recouvre largement la position de l'imagette SAR, permettant ainsi un calcul de grande qualité, puisque simultané et colocalisé. On peut donc compléter avec un excellent niveau de confiance les spectres issus de l'inversion SAR grâce à un modèle local qui génère la partie manquante à partir d'un champ de vent recalé sur la mesure diffusiométrique.

La précision sur $T(\text{sub } z)$ corrigée est alors de l'ordre de celle sur $T(\text{sub } p)$, qui a pu être estimée à environ 1 s à partir de comparaisons avec des mesures de bouées.

Par contre, les $H(\text{sub } s)$ en provenance du SAR sont largement affectées par la discrétisation et l'étroitesse de bande des produits fournis. Lorsque cela est possible, on recommandera donc d'utiliser de préférence les $H(\text{sub } s)$ altimétriques.

Cependant, on utilise généralement les périodes dans des distributions conjointes qui sont robustes vis à vis d'erreurs limitées sur les hauteurs, et pour lesquelles une moins grande précision est requise car on s'intéresse d'abord aux valeurs les plus probables. On peut d'ailleurs également, dans une certaine mesure, améliorer les $H(\text{sub } s)$ SAR à partir des mesures altimétriques simultanées les plus voisines (200 km) et du modèle ayant servi à constituer les ébauches. Cela permet que les distributions conjointes hauteurs périodes ou hauteurs directions soient suffisamment précises pour les besoins d'ingénierie.

Directions des vagues

De même, pour les périodes, la direction moyenne souffre d'une large incertitude en raison des atténuations et coupures haute fréquence. L'incertitude peut être réduite par l'adjonction d'une mer du vent calculée à partir des champs de vent du diffusiomètre. Toutefois, du fait de la dépendance de la cinématique en $\cos(\Theta)$, la direction moyenne ne représente que très rarement un paramètre plus pertinent que la direction du pic principal d'énergie.

L'ordre de grandeur de l'incertitude sur la direction des pics principaux a pu être évalué, toujours par comparaison avec des mesures de bouées, à environ 15° , soit le pas de discrétisation des produits SAR mode vague.

Le vent

La limitation dans la mesure du vent altimétrique aux alentours de 22-25 m/s limite ses applications à l'estimation des conditions les plus fréquentes sur une zone. Le vent issu du diffusiomètre est moins limité, mais reste peu fiable dans les très grandes valeurs. Le calcul des extrêmes risque donc d'en être pénalisé. En raison des difficultés à le mesurer in situ, il est délicat d'avancer des chiffres quant à la précision des mesures diffusiométriques du vent, précision dont l'ordre de grandeur est sans doute meilleur que 2 m/s pour la vitesse, et une dizaine de degrés pour la direction. Elles sont cependant généralement considérées comme d'aussi bonne qualité que celles issues d'autres capteurs. Elles répondent donc bien aux besoins des ingénieurs, qui se satisfont déjà de ces dernières.

Critères géographiques

Les cycles orbitaux des satellites sont fréquemment assez longs par rapport aux échelles de temps des variations de la hauteur significative. Lorsqu'on cherche les caractéristiques en un

point donné, la question est donc de savoir jusqu'à quelle distance on peut s'en éloigner pour recueillir des données, sans pour autant cesser de considérer des mesures relevant d'une population statistique unique.

Une délimitation attentive de la zone par un météorologue, et l'enrichissement de la distribution par la propagation vers la zone des tempêtes mesurées sur une plus grande région l'englobant, se sont avérés plus efficaces qu'une méthode de tests statistiques automatiques sur des régions circulaires et annulaires.

La taille de la zone ainsi définie est habituellement telle qu'elle est recoupée par un satellite unique une à deux fois par jour en moyenne. Plusieurs états de mer peuvent généralement être identifiés sur chacun de ces segments de trace. Les produits SAR mode vague ne sont mesurés que tous les 200 km environ, et la cadence moyenne est donc inférieure, de l'ordre d'un tous les deux jours. Ce taux semble cependant suffisant pour estimer l'allure générale des distributions des périodes et directions conditionnellement à $H(\text{sub } s)$.

Critères de durées observées

Les statistiques sont rapportées, en ingénierie, à des durées. Il peut s'agir du temps pendant lequel une action s'exerce sur un ouvrage, ou du temps d'exposition à un niveau de risque donné.

Les satellites utilisables pour la mesure météo océanique sont exclusivement des satellites défilants, et le problème se pose donc de rapporter leurs mesures à des durées pour pouvoir exprimer la signification réelle des statistiques. D'autre part, les satellites ne passent exactement au dessus du même point qu'avec une période orbitale de plusieurs jours. Il importe donc de déterminer si des passages sur des orbites voisines peuvent être regroupés pour la constitution d'un unique échantillon statistique.

On doit donc définir une notion de durée équivalente, reposant sur celle des états de mer. Un état de mer au point fixe peut être défini comme un morceau stationnaire du processus des hauteurs significatives, et identifié, par une analyse adéquate. En ne conservant alors qu'une valeur de hauteur significative pour tout l'état de mer, on se crée une indépendance statistique suffisante entre les événements pour pouvoir utiliser les procédures d'extrapolation classiques et déterminer les hauteurs significatives extrêmes nécessaires dans les phases de conception.

Les mêmes méthodes de découpage en morceaux stationnaires peuvent être appliquées aux hauteurs significatives altimétriques le long des traces d'un satellite, fournissant ainsi des portions (spatiales) stationnaires. En utilisant les considérations de vitesse de groupe et de nombres de vagues évoquées plus haut, on peut associer des durées équivalentes à chacune de ces portions. On peut alors comparer le nombre d'états de mer observés par satellite sur une zone et pendant une période donnée, au nombre total qui aurait été mesuré au point fixe par un enregistrement continu, et en déduire un taux de couverture temporelle.

Lorsqu'on souhaite extrapoler aux conditions extrêmes, on peut améliorer la procédure en recherchant, dans les archives météo rologiques, les plus fortes tempêtes ayant affecté la zone. Si certaines de ces tempêtes peuvent avoir été 'manquées' par la mesure satellitaire, elles ont néanmoins la plupart du temps été mesurées, à un stade antérieur ou postérieur, en un lieu peu éloigné. On peut alors modéliser leur évolution recalée sur cette mesure, et enrichir la queue de la distribution correspondant à la zone des tempêtes qui l'ont affectée. Bien entendu, on

doit alors utiliser une méthode d'extrapolation qui ne repose que sur les mesures au delà d'un certain seuil.

Les produits ERS

Avant de parler des produits ERS utilisés en climatologie, leur génération et leur distribution à la communauté des utilisateurs, il est fort utile de repenser aux années '80 lorsque le Comité consultatif pour les programmes de télédétection de l'ESA recommanda, après de longs débats, d'embarquer à bord de ERS-1 un SAR imageur et de l'opérer également en un mode appelé 'mode vague'. Le mode vague proposé consiste en une séquence d'observations du SAR, tous les 200 km, sur une période de temps très courte afin de permettre l'enregistrement des données à bord du satellite. Le compromis choisi a permis une exploitation globale des océans, tout en conservant l'information sur les caractéristiques essentielles des vagues. En fait, comme cela a déjà été mentionné, les données du SAR en mode vague ont joué et jouent un rôle essentiel dans l'opérationnalisation de l'utilisation des données ERS en particulier pour la climatologie océanique.

A l'époque où la mission a été conçue, il était facile de supporter l'embarquement d'un radar altimètre pour mesurer la hauteur des vagues alors qu'il n'était pas évident de justifier un SAR imageur pour fournir le spectre des vagues. En effet, les mesures du radar altimètre sont très convaincantes: l'altimètre génère une impulsion très courte par comparaison à la distance de la crête aux creux des vagues et explore très précisément les ondulations de la surface de la mer de sorte que la hauteur des vagues peut être aisément et précisément extraite de la forme du signal retourné. A l'inverse, les mesures du SAR en mode vague sont plus complexes à analyser. D'une part, si les vagues sont visibles, personne ne peut comprendre sur l'image la direction de leur mouvement. D'autre part, le SAR pour produire une image, a besoin de construire une antenne synthétique. Ce mécanisme demande un temps considérable, de l'ordre d'une seconde, et le mouvement des vagues crée alors de sévères distorsions dans l'image. De plus, un spectre de vague peut être constitué d'un large éventail de composantes spectrales, alors que le SAR ne peut ni reconstituer les vagues ayant de courtes longueurs d'onde, étant limité en résolution, ni reconstituer les vagues ayant de très longues longueurs d'ondes à cause de la période limitée d'observation. Le choix du SAR en mode vague avait été fortement soutenu par une équipe d'experts et plus particulièrement par le professeur Hasselmann sur la base d'une synergie entre le développement des modèles de vagues et les mesures du satellite et vice versa. C'est effectivement ce qui est arrivé ces dernières années, avec le développement de techniques d'assimilation des données des satellites dans les modèles.

Les mesures satellitaires utilisées en climatologie océanique, sont, en plus de celles du SAR en mode vague, les mesures de vagues et de vent issues de l'altimètre et les champs de vent provenant du diffusiomètre, c'est-à-dire toutes les mesures des capteurs dits 'à basse cadence' (low bit rate - LBR) à l'exception des mesures de l'ATSR et de la mesure radar de l'altimètre.

Immédiatement après leur acquisition, les mesures sont traduites en produits utilisateurs dans les stations d'acquisition de l'ESA puis distribuées et délivrées en moins de 3 heures. Ces produits, URA (User Radar Altimeter), UWI (User Wind) et UWA (User Wave) sont appelés 'produits à livraison rapide' (fast delivery products - FD). Ces données peuvent être déjà utilisées pour les applications liées à la connaissance des états de mer. Une base de données climatologiques peut être alors construite à partir d'acquisitions journalières de ces produits à livraison rapide.

Ceci n'est bien sûr réalisable que dans le cas de projets développés en parallèle à la distribution des données ERS LBR FD, d'où l'importance de disposer d'une archive et de services 'off line' pour ces produits. Il existe d'autres raisons justifiant le maintien d'un service off line. En effet, la production FD a subi de nombreuses évolutions depuis la période initiale de validation jusqu'à la phase de production de routine et les algorithmes, et donc les logiciels de traitement associés, ont été plusieurs fois modifiés. A fin de disposer de séries historiques homogènes, il a été nécessaire de re-traiter de larges quantités de données et particulièrement celles du SAR en mode vague et du diffusiomètre. Ceci explique l'importance considérable, pour l'application que nous présentons ici, des centres de traitement et d'archivage des données (Processing Archiving Facilities - PAF) qui fournissent off line également les données FD. Le centre de traitement et d'archivage des données basse cadence ERS, pour les applications océano graphiques, est situé en France, dans un bâtiment du Centre de Brest de l'Ifremer. Ce PAF est appelé CERSAT (Centre ERS d'Archivage et de Traitement). Etant lié à un institut de recherche océanographique, il a joué et joue actuellement un rôle important dans le développement des applications pour l'environnement marin.

Une réponse opérationnelle: CLIOSat

L'ESA a accordé à MétéoMer plusieurs projets pilotes depuis 1991, qui ont permis les études de faisabilité et les développements conduisant à l'élaboration de CLIOSat. Le CNES, dans le cadre du programme AVALSAR, a financé les projets de l'ESA et particulièrement ceux relatifs à l'extraction de paramètres directionnels à partir de mesures SAR mode vague. Les années de mesures disponibles actuellement ont été validées par rapport à des mesures in situ dans le cadre de différents travaux de recherche menés par l'Ifremer et de recherche finalisée menés par MétéoMer dans le cadre du CLAROM (Club pour les Actions de Recherche sur les Ouvrages en Mer) et le FSH (Fonds de Soutien des Hydrocarbures).

Concept

Depuis quelques années, les industriels ont recours aux données satellitaires pour la caractérisation météo-océanique fine des sites spécifiques, particulièrement dans les zones peu ou imparfaitement pourvues en mesures in situ.

A cet effet, des méthodologies opérationnelles ont été développées en Europe, plus particulièrement à MétéoMer qui combinent données satellitaires, modèles météo-océaniques, stochastiques, bathymétrie, etc. La complexité de ces procédures s'accroît principalement avec le caractère côtier des sites étudiés. Les délais de réalisation de tels travaux, de l'ordre de 4 à 6 semaines, représentent une réduction d'un facteur 10, au moins, par rapport aux coûts d'une campagne in situ.

Néanmoins, ces contraintes de coûts et de délais, bien que représentant un progrès énorme, limitaient, jusqu'à présent l'extension de l'usage des données satellitaires, car une information utile au niveau de la faisabilité d'un projet ou pour l'estimation rapide des conditions moyennes régnant le long d'un trajet donné, se doit d'être accessible de façon quasi immédiate et à très faible coût. CLIOSat, réalisé conjointement par Ifremer et MétéoMer, a été conçu pour répondre à cette attente. En effet, les sept années de mesures actuellement disponibles et notamment, les quatre années de mesures directionnelles fournies par le SAR mode vague d'ERS-1 permettent, d'ores et déjà, l'établissement de climatologies complétant et affinant des traits déjà connus des climats maritimes.

Le concept de CLIOSat se base uniquement sur l'utilisation de mesures satellitaires de vents et de vagues fournies par les satellites Geosat, Topex-Poseidon et plus particulièrement ERS-1/2 qui, seuls, apportent les mesures spectrales d'états de mer et donc, les périodes et directions. CLIOSat s'appuie sur la constitution d'un système d'interrogation et d'archivage de toutes les données satellitaires de l'environnement marin disponibles à l'échelle mondiale, en vue de leur restitution rapide sous forme de produits climatologiques utiles aux ingénieries.

On distingue, en particulier, deux modes dans CLIOSat:

1. un atlas informatisé fonctionnant sur PC et présentant, pour 169 zones prédéfinies couvrant les océans, des statistiques annuelles et trimestrielles ainsi que les ordres de grandeurs des valeurs extrêmes de hauteur significative;
2. un service personnalisé, 'en ligne', destiné à fournir des produits climatologiques identiques à ceux de l'atlas, mais sur des zones et selon des critères établis à la demande.

Les paramètres ainsi fournis caractérisent des régions océaniques définies au préalable ou à la demande, mais ne correspondent cependant pas à des grandeurs à la côte ou à des sites d'extension très réduite. Par conséquent, ils peuvent ne pas suffire lors des phases poussées de conception d'ouvrages (design), mais conviennent à une rapide évaluation, au stade de l'avant projet.

Elaboration de produits climatologiques

Cohérence climatologique

Une analyse des grandes tendances et des phénomènes météo-océaniques affectant les différentes parties des océans révèle l'existence de zones aux caractéristiques distinctes et bien définies, au sein desquelles les états de mer susceptibles d'être rencontrés appartiennent à la même population statistique. Contrairement aux observations de navires essentiellement regroupées le long des principales routes maritimes, la couverture dense, homogène et tout temps des océans et mers du globe offerte par les différents satellites d'observation de l'environnement marin autorise la fourniture de statistiques fiables de paramètres d'états de mer et de vent sur chacune des zones ainsi mises en évidence.

Dans l'Atlas CLIOSat, un découpage global et précis en zones de cohérence climatologique des mers et océans du monde a été effectué par un expert météo océanographe. C'est dans ces zones de cohérence climatologique que les données satellitaires sont rassemblées puis traitées. Dans le cadre du service en ligne de CLIOSat, ce principe de cohérence est appliqué pour réduire au minimum la taille d'une zone caractérisant un site d'intérêt opérationnel. Cependant, en cas de zone côtière ou de faible extension géographique, on se heurtera au problème de la cohérence statistique du résultat; une solution, sortant du cadre propre à CLIOSat étant apportée par l'utilisation combinée de données satellitaires et de modèles météo-océaniques.

Constitution des produits climatologiques

La constitution des produits climatologiques repose sur les étapes suivantes:

- Traitement des données reçues des fournisseurs (Eurimage pour les données ERS-1/2, CNES AVISO pour les données Topex-Poseidon) pour l'extraction de paramètres géophysiques utiles.
- Elaboration des données intégrées (vent, vagues).
- Archivage des données intégrées.
- Désarchivage et élaboration des statistiques constituant les produits climatologiques.

Parmi les données reçues des fournisseurs, on distinguera celles offrant des mesures directement exploitables après contrôle de leur qualité et correction de biais éventuels et celles requérant un traitement plus sophistiqué, telles les données issues du SAR ERS en mode vague fournies par Eurimage.

Pour la constitution d'histogrammes et de statistiques de hauteurs significatives et de force du vent, les mesures altimétriques de ERS-1 sont compilées avec celles issues de Topex-Poseidon et Geosat. Ceci permet, en effet, de disposer d'une durée de mesures de l'ordre de 7 années, avec une couverture particulièrement dense depuis l'exploitation du satellite Topex-Poseidon, en août 1992. Une analyse semi automatisée, basée sur un test de vraisemblance, permet de s'affranchir d'éventuelles aberrations en particulier au voisinage des côtes ou en cas de perturbation du signal. Enfin, l'application de formules de corrections déterminées lors des campagnes de validation des altimètres permet de disposer d'un ensemble homogène de données fiables.

Les mesures de vent issues du diffusiomètre, force et direction, sont quant à elles, susceptibles d'être utilisées directement car on leur applique un algorithme correctif permettant la levée d'éventuelles ambiguïtés de direction par comparaison avec les sorties de modèles météorologiques classiques. Ces données servent à la détermination d'histogrammes de direction du vent et de diagrammes d'occurrences conjointes de force et direction. En revanche, on préférera leur substituer les mesures altimétriques pour l'élaboration d'histogrammes de forces du vent, la durée ainsi couverte, sept années, étant supérieure à celle offerte par les données diffusiométriques actuellement disponibles.

Les paramètres caractéristiques des états de mer, hauteurs significatives, périodes et directions, sont issus du traitement des données SAR en mode vague. La procédure utilisée, évoquée plus avant, est assez complexe. En effet, la relation entre la donnée initialement fournie (spectre d'intensité d'image analogue au spectre des pentes de la surface) et le spectre directionnel d'état de mer associé n'est pas linéaire et dépend aussi, dans une certaine mesure, de l'état de mer observé. De plus, cette donnée initiale présente une ambiguïté à 180° sur le sens de propagation de ses composantes. La méthode 'd'inversion' employée pour traiter l'ensemble des données SAR mode vague reçues nécessite l'usage de quatre années de champs de vents globaux afin d'obtenir, à l'endroit et à l'instant de chaque mesure, une ébauche de spectre d'état de mer nécessaire à la levée de cette ambiguïté. L'information sur les hautes fréquences, périodes inférieures à 7,5 s, absente du fait de la physique de la mesure, est restituée à partir d'un modèle utilisant en entrée les données de vent concomitantes issues du diffusiomètre. Le résultat des traitements ainsi effectués est ensuite analysé puis vérifié par des météo océanographes, par rapport à des situations typiques ou extrêmes connues. On obtient ainsi, à l'échelle globale, une information spectrale directionnelle couvrant des périodes s'étalant de 2 à 25 secondes, dépassant de fait les limitations classiques des

observations de navires liées à la difficulté, voire l'impossibilité, pour un observateur, d'estimer visuellement et à partir d'un repère mobile les périodes des houles supérieures à 10 s ou des états de mer à multiples composantes. L'analyse spectrale des données SAR mode vague traitées offre alors les moyens d'une étude fine de chacune des composantes spectrales. On peut ainsi présenter une description détaillée des états de mer multiples et discriminer parfaitement les périodes et directions des différents pics spectraux présents en leur sein (présence d'une ou deux houles et d'une mer de vent), mettant ainsi en valeur une simultanéité des phénomènes encore souvent insoupçonnée. Une fois déterminés ces différents pics spectraux, la direction du pic principal d'énergie peut être également évaluée. Enfin, comme évoqué précédemment, le calcul des moments spectraux d'ordre 0 et 2 permet également la détermination des hauteurs significatives et des période moyennes utilisées dans la construction de diagrammes d'occurrences conjointes.

Une sauvegarde des données ainsi traitées et validées est ensuite réalisée, constituant ainsi la base de données utile à CLIOSat. Son interrogation, selon des critères spatio-temporels, uniques et prédéfinis dans le cas de l'atlas CLIOSat sur PC, déterminés à la demande pour le service en ligne, permet alors l'extraction des informations qui constitueront par la suite histogrammes et diagrammes d'occurrences.

L'atlas CLIOSat sur PC

Les produits climatologiques présentés dans l'atlas CLIOSat sur PC ont été définis en accord avec un Comité d'expertise et d'orientation composé d'utilisateurs industriels de données climatologiques, représentés, en particulier, par les principales ingénieries françaises des domaines offshore, portuaires et maritimes.

Ainsi, l'Atlas de climatologies océaniques satellitaires CLIOSat disponible pour PC présente pour 169 zones de cohérence climatologiques prédéfinies par des experts météo-océanographes, des statistiques annuelles et trimestrielles de paramètres de vents et d'états de mer et des ordres de grandeur des valeurs extrêmes de hauteur significative (Fig. 4a-b). Utilisant les sept années de données altimétriques issues des satellites Geosat, Topex-Poseidon et ERS-1 et les quatre années de mesures directionnelles d'état de mer provenant du SAR mode vague embarqué sur ERS1, il offre les produits climatologiques suivants:

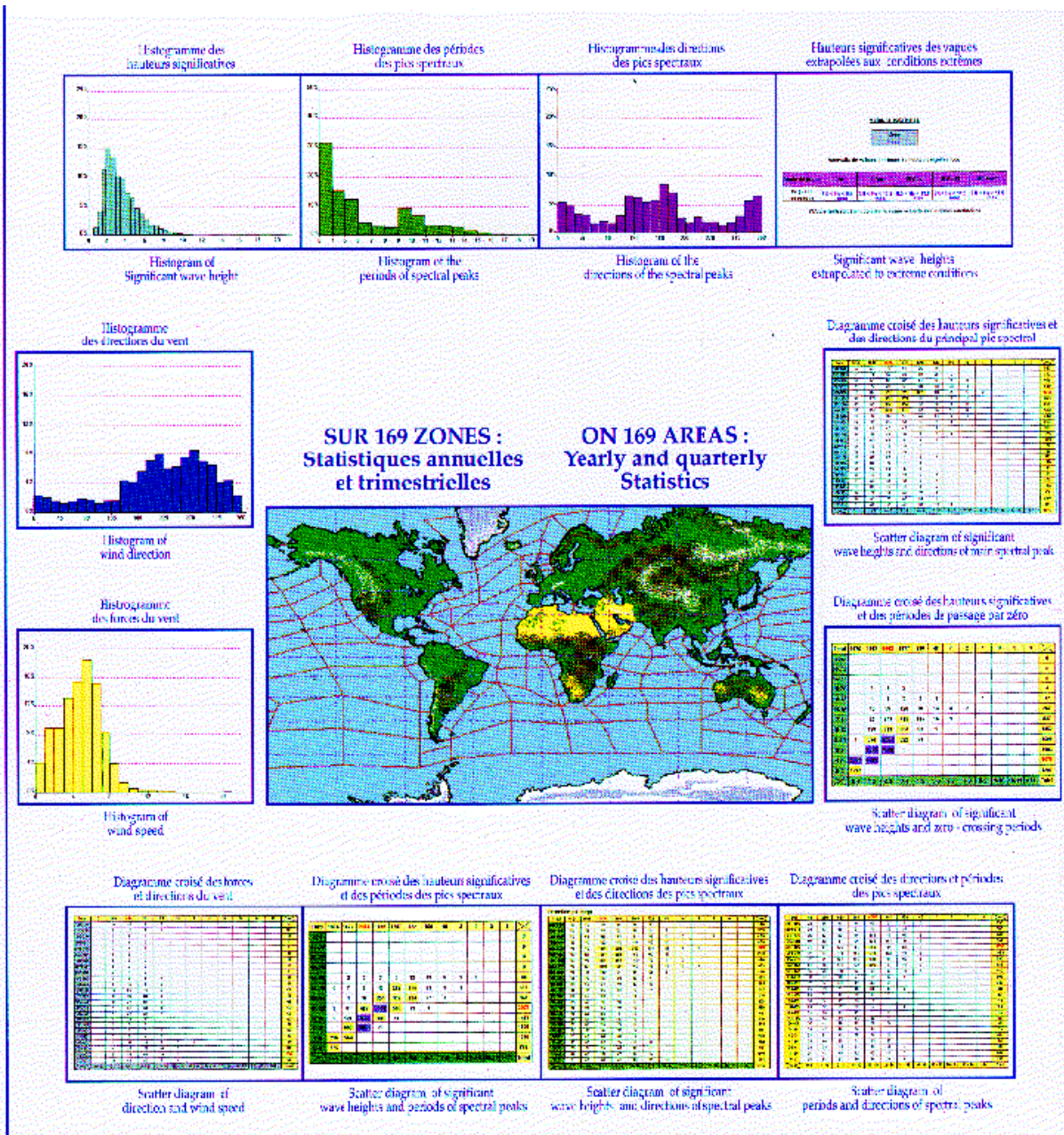


Figure 4a. Les 169 zones couvertes par l'Atlas CLIOSat

Areas pre-defined by Pierre LASNIER / MétéoMer 95

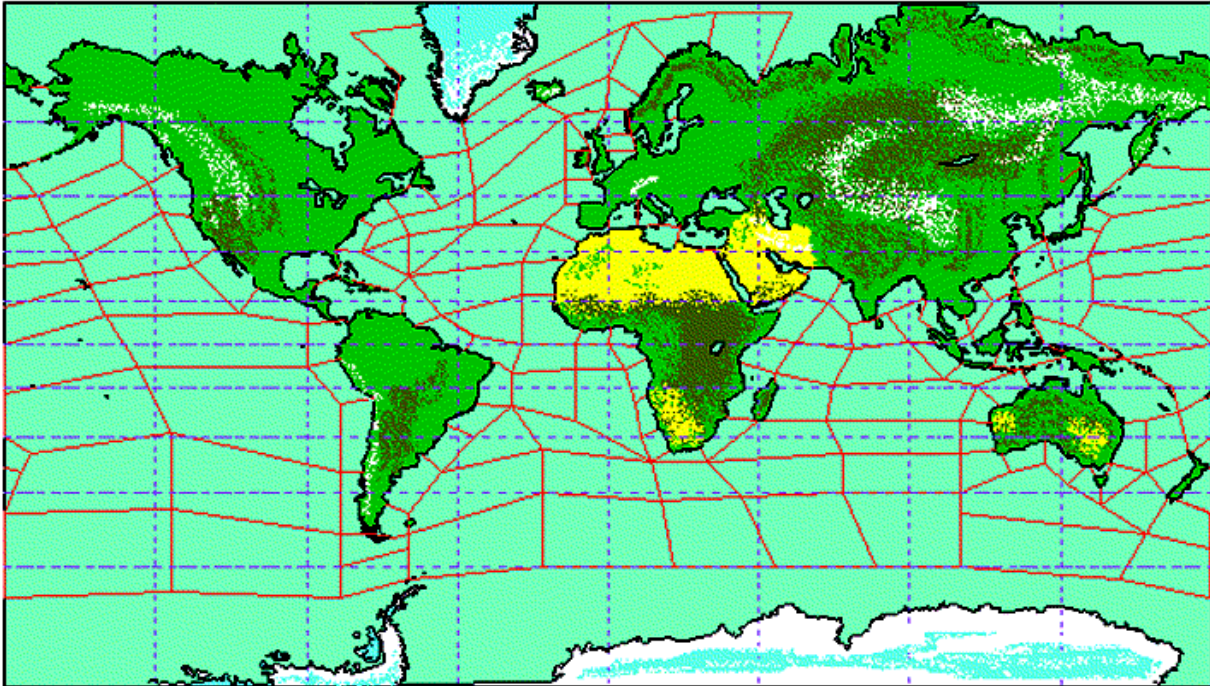


Figure 4b. Carte agrandie des 169 zones de l'Atlas

Des histogrammes

1. Vagues:

- hauteur significative
- périodes pics (incluant houle et mer du vent)
- directions pics (incluant houle et mer du vent).

2. Vent:

- force
- direction.

Des diagrammes croisés - vagues

1. Systèmes mer du vent et houle:

- périodes pics/directions pics
- périodes pics/hauteurs significatives
- directions pics/hauteurs significatives

(chaque diagramme fourni avec le pourcentage des états de mers présentant de multiples composantes).

2. Etat de mer caractérisé dans sa totalité:

- hauteur significative/période moyenne
- hauteur significative/direction du pic principal.

Des diagrammes croisés - vents

- direction/force du vent.

Des hauteurs significatives extrapolées aux conditions extrêmes

Pour chaque zone climatologique prédéfinie et pour chacune des durées considérées, l'Atlas CLIOSat fournit un intervalle dans lequel se trouvent, avec 90% de confiance, les valeurs extrêmes de H(sub s) possibles. Cet intervalle traduit la disparité des états de mer due à l'étendue de zones prédéfinies, toutefois cohérentes climatologiquement.

Bien entendu, des réactualisations annuelles, rendues possibles par l'important flot continu des données et l'existence des programmes spatiaux à venir, sont prévues.

Service en ligne CLIOSat

Les informations présentées dans l'Atlas CLIOSat concernent les climatologies générales des zones prédéfinies par des experts météo océanographes. Cependant, un utilisateur peut nécessiter des informations de type similaire, sur un site spécifique. Le service en ligne de CLIOSat permet à son utilisateur d'obtenir en 24 heures, sur une zone définie, selon son besoin, par ses soins ou à l'aide de spécialistes météo océanographes et, selon des critères temporels personnalisés, des climatologies suffisamment précises pour pouvoir esquisser les grandes lignes d'un projet. Il repose sur les mêmes principes d'élaboration des produits climatologiques que ceux mis en oeuvre pour l'atlas CLIOSat, mais ne fournit pas des valeurs de paramètres à la côte, ni de paramètres météo-océaniques plus complets comme des spectres directionnels de conditions types ou de tempêtes, au large et à la côte, dont l'élaboration est hors du cadre propre à CLIOSat. Ce service offre donc des produits analogues à ceux de l'atlas CLIOSat à l'exception des valeurs extrêmes de H(sub s). Pour des zones locales de faible étendue, du fait de l'échantillonnage des données satellitaires, certains événements forts sont susceptibles de ne pas être perçus, ce qui nuit à la qualité des extrapolations. La constitution d'une base de données locales pour la prédiction des conditions extrêmes sur un site spécifique nécessite donc un enrichissement de la queue de distribution des fortes valeurs de hauteurs significatives à l'aide de reconstitutions de tempêtes calées sur les mesures satellitaires les plus proches. De par son degré d'élaboration, cette procédure opérationnelle ne peut être mise en oeuvre dans des délais compatibles avec ceux d'un service en ligne.

En résumé, le service en ligne permet à l'utilisateur:

- de définir sa propre zone d'intérêt (localisation, taille),
- de choisir ses critères temporels: annuels, trimestriels, mensuels,
- et, soit, de bénéficier de l'expertise d'un spécialiste en météo-océanographie qui analysera ce choix, au vu, notamment, de la cohérence climatologique et de la consistance statistique des résultats escomptés; soit, de laisser les opérateurs du service définir eux-mêmes une aire de cohérence climatologique.

Conclusion

Le service en ligne CLIOSat est opérationnel, et les premiers atlas personnels pour PC ont été livrés en décembre 1995.

On a ainsi pu mettre sur pied, au service des ingénieurs impliqués dans le transport maritime et l'exploitation offshore, une offre en paramètres météo océaniques, état de mer et vent, qui constitue une révolution par rapport aux moyens disponibles dans un passé encore très récent. Le progrès est particulièrement sensible en ce qui concerne la qualité des données dans les zones où la principale source consistait antérieurement en des observations de navires, et, pour l'exploitation des hydrocarbures, en ce qui concerne le coût et la durée des campagnes d'instrumentation in situ nécessaires à la détermination des paramètres du dimensionnement.

De plus, avec la poursuite des programmes spatiaux d'observation des océans, les bases de données s'accroissent continuellement, renforçant la confiance qu'on peut accorder aux statistiques qui en sont issues. Des méthodes ont été développées, et continuent à l'être, pour étendre leur domaine de validité, spécialement en ce qui concerne les régions côtières et les mers fermées.

ESA Bulletin Nr. 86.

Published May 1996.