

N° 1 - 1992

# SOURCES de DONNEES MÉTÉO-OCÉANIQUES pour L'INGÉNIERIE MARINE

MICHEL OLAGNON

*IFREMER*

FRANÇOISE BECQ et PATRICK CHARRIEZ

*MÉTÉOMER*

Retrouvez le [catalogue en ligne](#) des publications récentes du Service des Editions de l'Ifremer à l'adresse.

Découvrez également un ensemble de documents scientifiques, accessibles gratuitement, dans [Archimer](#).



REPÈRES OCÉAN N° 1 - 1992

**SOURCES de DONNÉES  
MÉTÉO-OCÉANIQUES  
pour  
L'INGÉNIERIE MARINE**

Michel OLAGNON  
*Ifremer,*  
Françoise BECQ, Patrick CHARRIEZ  
*Météomer, Puget-sur-Argens*



Cette monographie  
a été réalisée par l'  
INSTITUT FRANÇAIS de RECHERCHE pour l'EXPLOITATION de la MER (IFREMER)  
Direction de l'ingénierie, de la technologie et de l'informatique (DITI)  
IFREMER - DITI - BP 70 – 29280 PLOUZANÉ

et

MÉTÉOMER  
Route nationale 7 – 83480 Puget-sur-Argens

à l'incitation du  
CLUB pour les ACTIONS de RECHERCHE sur les OUVRAGES en MER

*Service de la Documentation et des Publications*  
*(S D P)*  
**IFREMER - Centre de Brest**  
B.P. 70 - 29280 PLOUZANÉ  
Tél. : 98.22.40.13 - Télécopie 98.22.45.86

ISSN 1240-1153

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	5
1 SOURCE DE DONNÉES .....	7
Observations Visuelles.....	9
Paramètres .....	11
Les vagues.....	11
Le vent .....	11
Le courant .....	13
Répertoires et bases de données .....	13
Mesures in situ .....	19
Paramètres .....	19
Les vagues.....	19
Le vent .....	21
Le courant .....	22
Bases de données.....	23
Modèles numériques de vagues .....	24
Concepts fondamentaux .....	24
Structure d'un modèle de vagues .....	24
Classification des modèles de calculs de vagues.....	27
Recensement des modèles de vagues .....	30
Emploi des modèles en exploitation.....	30
Mesures satellitaires.....	34
Concepts généraux .....	34
Les capteurs passifs .....	38
Les capteurs actifs .....	39
Conclusion .....	48
Qualité des données.....	48
Comparaison des sources .....	48
2 MÉTHODES D'UTILISATION - Quelques exemples .....	49
Calcul statique.....	51
Paramètres météo-océaniques utilisés.....	51
Besoins en quantité et qualité des données .....	52
Apport des différentes sources de données .....	52

Calcul en fatigue .....	55
Paramètres météo-océaniques utilisés .....	55
Besoins en quantité et qualité des données .....	55
Apport des différentes sources de données .....	55
Calcul en dynamique .....	57
Paramètres météo-océaniques utilisés .....	57
Besoins en quantité et qualité des données .....	57
Apport spécifique des sources de données .....	57
Programmation d'opérations à la mer .....	58
Paramètres météo-océaniques utilisés .....	58
Besoins en quantité et qualité des données .....	58
Apport spécifique des sources de données .....	58
CONCLUSION .....	59
BIBLIOGRAPHIE .....	60
ANNEXES .....	63
Nomenclature .....	65
Adresses .....	67
Modèles numériques des vagues.....	70

## INTRODUCTION

La connaissance fine des conditions d'environnement est un point de passage obligé quand il s'agit de concevoir un ouvrage maritime : jetée, digue, structure en mer, telle une plateforme pétrolière, ... ou de préparer une opération à la mer : campagne de mesures, pose de conduites sous-marines : câbles, oléoducs..., transport sur barges, etc.

Il est bien rare qu'une étude de site détaillée soit justement déjà disponible pour l'emplacement concerné. Conduire cette étude de site, ou même simplement obtenir des informations qui puissent suffire au stade de l'avant-projet, représente un travail important.

Ce document se veut une aide pratique à l'ingénieur en génie océanique pour le problème, délicat, et donc souvent contourné, de la connaissance et du choix des sources où se procurer les données d'environnement nécessaires à son projet. Il doit également permettre à ceux qui sont chargés de recueillir et d'archiver ces données de mieux comprendre comment et par qui elles seront utilisées par la suite, et de les préparer en conséquence.

Il se décompose en deux volets.

- **Présentation** appliquée des différentes sources de données
- Exemples de leur choix et de leur utilisation pour des calculs d'ouvrages : fatigue, statique et dynamique et pour la programmation des opérations à la mer.

Si le premier chapitre s'efforce d'être très général, dans le second, on suppose la connaissance préalable de notions concernant :

- la nature des paramètres météo-océaniques auxquels il est fait référence,
- les différentes méthodologies et caractérisations des phénomènes météo-océaniques utilisées pour les calculs d'ouvrages, la détermination des valeurs extrêmes, les calculs en fatigue, ...

En raison de l'aspect appliqué du document et par souci de concision, de nombreuses considérations techniques et/ou scientifiques concernant les données en sont volontairement omises. Des références à des ouvrages sont alors fournies au lecteur\*.

On ne prétend pas, non plus, éviter le recours à des organismes spécialisés qui disposent généralement d'une vaste panoplie d'outils opérationnels et performants, mais fournir les éléments d'un dialogue fructueux avec ceux-ci. De même, pour le domaine de la télémessure, on pourra contacter des organismes du domaine spatial afin d'obtenir plus de renseignements de fond sur le sujet.

---

\* Les renvois à la bibliographie sont indiqués sous la forme [3].



# CHAPITRE 1

## SOURCES DE DONNÉES

Dans ce chapitre, nous présentons au lecteur les différentes sources de données météorologiques existant à l'heure actuelle. Cette étude évoque ces sources de données sous un aspect appliqué pour l'ingénieur :

- quels phénomènes physiques représentent-elles ?
- quels paramètres opérationnels peut-on en déduire ?
- quelles incertitudes ou limitations leur associer ?
- comment se procurer ces données ?

Il ne s'agit pas de traiter l'ensemble des disciplines concernant chacune de ces sources de données.

On ne développe que peu ou pas

- . l'aspect "physique de la mesure et des capteurs", particulièrement dense dans le cas de mesures *in situ* et spatiales,
- . le volet "modélisation des phénomènes physiques" pour les modèles numériques,
- . la partie "traitement statistique d'enregistrements".

L'ingénieur trouvera plutôt des axes opérationnels pour la connaissance de chacune des sources de données et le choix de l'une ou l'autre, ou une combinaison entre elles, afin de répondre aux besoins de ses calculs ou aux autres problèmes soulevés par les travaux à la mer.

Ainsi qu'on le verra dans les exemples du second chapitre, l'utilisation optimale des sources de données passe le plus souvent par un choix adapté à chaque nouveau cas et par une judicieuse combinaison des informations disponibles. Nous invitons donc le lecteur à se méfier des solutions toutes prêtes et à se livrer à une analyse critique de ses premières impulsions avant d'y céder.



Figure 1 - Exemple de liste d'observation de navires fournies par Météo France  
Explication de la signification des codes associés

```

82040100140S1443EVLFR 111411020211 9
82040112143S1498EGWED 161611030311 9
82040200 0303
82040212 0302
82040300 0302
82040312 0302
82040400 0202
82040412138S1447EVLFR 141612020212 9
82040500 0202
82040512 0202
82040600144S1490EVLCO 111712030212 9
82040612 0302
82040700140S1441EVLDT 0939120401120907041
82040712 0302
82040800 0302
82040812 0302
82040900093S1458EGWUE 2812110203112806021
82040912 0202
82041000149S1454EVJYR 161712010221 9
82041012 0202
82041100133S1498EZCSH 1819110302111505051
82041112123S1490EZCSH 1916110302111406051
82041200 0302
82041212 0302
82041300 0302
82041312 0302
82041400145S1450ESHIP 201611030299 9
82041412140S1442ESHIP 230611030111 9
82041500 0302
82041512 0302
82041600 0404
82041612 0305
82041700094S1453EGCV 2810110202111307051
82041712 0202
82041800128S1490EGCV 1217110303111407061
82041812135S1499EGCV 1225110406111309081
82041800102S1481EPGLS 0000110406111309071
82041812 0405
82041900 0404
82041912 0303
82042000142S1488EVKAE 1117110202111414041
82042012 0202
82042100111S1476EPHUQ 1014110402111510031
82042112101S1466EPHUQ 1510110202111512041
82042200 0202
82042212 0404
82042300145S1452EGXOZ 1525110505111405042
82042312135S1451ESHIP 154111050699 9
82042400 0404
82042412 0303
82042500134S1495EJQDP 1617110302111405031
82042512 0302
82042600119S1485EZCSL 1417110203111406031
82042612 0303
82042700149S1491EJMSI 0917110402110905031
82042712 0402
82042800140S1441ESHIP 170811040299 9
82042812 0302
82042900144S1449EVLFR 1416120201121112021
82042912 0201
82043000150S1454EVLFR 1816120201121814021
82043012 0201
82050100150S1454EVLFR 111211010111 9
82050112150S1454EVLFR 1916120201121814021
82050200150S1454EVLFR 152111030311 9
82050212150S1454EVLFR 1823110302111814031
82050300109S1489EFATL 131711070311 9
82050312104S1480ESHIP 141911070311 9
82050400093S1460EPGDV 1217110303111507021
82050412142S1442ESHIP 121611030399 9
82050500092S1440ESHIP 141911060211 9
82050512 0502
82050600 0402
82050612 0402
82050700 0302
82050712 0302
82050800148S1454EVJYR 141211020211 9
82050812 0202
82050900 0202
82050912 0202
82051000 0302
82051012145S1478EP1LG 161411040211 9
82051100092S1453EP1LG 1517110403111705042
82051112 0302
82051200 0302
82051212 0302
82051300 0302
82051312 0302
82051400117S1477EPGCT 1406110101111306031
82051412130S1490EPGCT 181711020211106051
82051500 0202
82051512 0202
82051600091S1440E9VRQ 1316120102221412021
82051612 0202
82051700126S1494EZCSB 1319110305111007051
82051712102S1473EPGCV 1117110202111308061
82051800 0404
82051812 0404
82051900142S1447EVJYR 101711030411 9
82051912 0404
82052000 0404

```

Format du fichier d'observations brutes :

POSIT	LONG	CONTENU
01-02	2	année
03-04	2	mois
05-06	2	jour
07-08	2	Heure TU
09-12	4	latitude en 1/10 de degrés
13-17	5	longitude en 1/10 de degrés
18-22	5	indicatif
23-24	2	direction de provenance du vent (rose 36)
25-26	2	force du vent en noeuds
27-27	1	contrôle de qualité de la provenance du vent
28-28	1	contrôle de qualité de la force du vent
29-30	2	période de la mer du vent (secondes)
31-32	2	hauteur de la mer du vent (1/2 mètres)
33-33	1	contrôle de qualité de la période de la mer du vent
34-34	1	contrôle de qualité de la hauteur mer du vent
35-36	2	direction de provenance de la houle1 (rose 36)
37-38	2	période de la houle1 (secondes)
39-40	2	hauteur de la houle1 (1/2 mètres)
41-41	1	contrôle de qualité de la houle1

41 caractères

Spécification des contrôles de qualité

- 0 : aucun contrôle n'a été effectué
- 1 : l'élément semble correct
- 2 : l'élément ne semble pas compatible avec un autre
- 3 : l'élément semble douteux
- 4 : l'élément semble faux
- 5 : l'élément a été modifié à la suite du contrôle
- 9 : la valeur de l'élément fait défaut

NOTA : si un des éléments de la mer du vent est manquant, l'autre n'est pas contrôlé mais noté '1'.

## OBSERVATIONS VISUELLES

Actuellement, la principale source de données, à l'échelle océanique, est constituée par l'ensemble des observations de routine effectuées à bord de certains navires :

- les "*navires sélectionnés*", navires marchands ou autres, faisant partie de la "Flotte d'Observateurs Volontaires" (VOF - Voluntary Observing Fleet),
- les "*navires météorologiques stationnaires*" du réseau de l'Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M.).

D'autres observations visuelles proviennent de *stations météorologiques* côtières.

Les paramètres observés sont :

- les vagues
- le vent
- le courant de surface
- autres: précipitations, brouillard, température de l'air et de l'eau, bathymétrie, marée astronomique.

La forme sous laquelle Météo-France fournit les observations de navires est explicitée à la figure 1.

Figure 2 -

## ÉCHELLE ANÉMOMÉTRIQUE BEAUFORT

(A la hauteur normalisée de 10 mètres au-dessus d'un terrain plat et découvert)

CHIFFRE BEAUFORT	TERME DESCRIPTIF	VITESSE DU VENT ÉQUIVALENTE À LA HAUTEUR NORMALISÉE DE 10 MÈTRES AU-DESSUS D'UN TERRAIN PLAT ET DÉCOUVERT				SPÉCIFICATIONS			Hauteur* probable des vagues en mètres	Hauteur* probable des vagues en pieds
		Vitesse moyen- ne en nœuds	m s <sup>-1</sup>	km h <sup>-1</sup>	m.p.h.	Sur terre	Au large	Près des côtes		
0	Calme	< 1	0-0,2	< 1	< 1	Calme; la fumée s'élève verticalement	La mer est comme un miroir	Calme	—	—
1	Très légère brise	1-3	0,3-1,5	1-5	1-3	La direction du vent est révélée par l'entraînement de la fumée, mais non par les girouettes	Il se forme des rides ressemblant à des écailles de poisson, mais sans aucune crête d'écume	Les bateaux de pêche ont juste un peu d'erre	0,1 (0,1)	¼ (¼)
2	Légère brise	4-6	1,6-3,3	6-11	4-7	Le vent est perçu au visage; les feuilles frémissent; une girouette ordinaire est mise en mouvement	Vaguelettes, courtes encore, mais plus accusées; leurs crêtes ont une apparence vitreuse, mais elles ne déferlent pas	Le vent gonfle la voilure des bateaux qui filent environ de 1 à 2 nœuds	0,2 (0,3)	½ (1)
3	Petite brise	7-10	3,4-5,4	12-19	8-12	Feuilles et petites branches constamment agitées; le vent déploie les drapeaux légers	Très petites vagues; les crêtes commencent à déferler; écume d'aspect vitreuse; parfois quelques moulons épars	Les bateaux commencent à giter et filent de 3 à 4 nœuds	0,6 (1)	2 (3)
4	Jolie brise	11-16	5,5-7,9	20-28	13-18	Le vent soulève la poussière et les feuilles de papier; les petites branches sont agitées	Petites vagues devenant plus longues; moulons franchement nombreux	Jolie brise efficace; les bateaux portent toute leur toile et prennent une bonne gîte	1 (1,5)	3/4 (5)
5	Bonne brise	17-21	8,0-10,7	29-38	19-24	Les arbustes en feuilles commencent à se balancer; de petites vagues avec crêtes se forment sur les eaux intérieures	Vagues modérées prenant une forme plus nettement allongée; naissance de nombreux moulons (éventuellement des embruns)	Les bateaux diminuent leur toile	2 (2,5)	6 (8½)
6	Vent frais	22-27	10,8-13,8	39-49	25-31	Les grandes branches sont agitées; les fils télégraphiques font entendre un sifflement; l'usage des parapluies est rendu difficile	Des lames commencent à se former; les crêtes d'écume blanche sont partout plus étendues (habituellement quelques embruns)	Les bateaux prennent deux ris à la grand-voile; la pêche exige des précautions	3 (4)	9/4 (13)
7	Grand frais	28-33	13,9-17,1	50-61	32-38	Les arbres sont agités en entier; la marche contre le vent est assez pénible	La mer grossit; l'écume blanche qui provient des lames déferlantes commence à être soufflée en trainées qui s'orientent dans le lit du vent	Les bateaux restent au port; ceux qui sont en mer flèchent la cape	4 (5,5)	13/4 (19)
8	Coup de vent	34-40	17,2-20,7	62-74	39-46	Le vent casse des rameaux; la marche contre le vent est généralement rendue très difficile	Lames de hauteur moyenne et plus allongées; du bord supérieur de leurs crêtes commencent à se détacher des tourbillons d'embruns; l'écume est soufflée en très nettes trainées orientées dans le lit du vent	Tous les bateaux rallient le port s'il est proche	5,5 (7,5)	18 (25)
9	Fort coup de vent	41-47	20,8-24,4	75-88	47-54	Le vent occasionne de légers dommages aux habitations (arrachement de tuyaux de cheminées et d'ardoises)	Grosses lames; épaisses trainées d'écume dans le lit du vent; les crêtes des lames commencent à vaciller, s'écrouler et déferler en rouleaux; les embruns peuvent réduire la visibilité	—	7 (10)	23 (32)
10	Tempête	48-55	24,5-28,4	89-102	55-63	Rare à l'intérieur des terres; arbres déracinés; importants dommages aux habitations	Très grosses lames à longues crêtes en panache; l'écume produite s'agglomère en larges bancs et est soufflée dans le lit du vent en épaisses trainées blanches; dans son ensemble, la surface des eaux semble blanche; le déferlement en rouleaux devient intense et brutal; la visibilité est réduite	—	9 (12,5)	29 (41)
11	Violente tempête	56-63	28,5-32,6	103-117	64-72	Très rarement observé; s'accompagne de ravages étendus	Lames exceptionnellement hautes (les navires de petit et de moyen tonnage peuvent par instants être perdus de vue); la mer est complètement recouverte de bancs d'écume blanche élongés dans la direction du vent; partout le bord des crêtes des lames est soufflé et donne de la mousse; la visibilité est réduite	—	11,5 (16)	37 (52)
12	Ouragan	64 et plus	32,7 et plus	118 et plus	73 et plus	—	L'air est plein d'écume et d'embruns; la mer est entièrement blanche du fait des bancs d'écume dérivante; la visibilité est très fortement réduite	—	14 (—)	45 (—)

\* Cette table est conçue pour servir uniquement de guide indiquant grosso modo les conditions qu'on peut s'attendre à rencontrer en haute mer, loin des côtes. Elle ne doit jamais être utilisée de la manière inverse, c'est-à-dire pour déterminer l'état de la mer en vue de le consigner ou de le signaler. Dans les mers intérieures ou près des côtes, avec un vent de terre, la hauteur des vagues sera plus petite et leur escarpement plus fort. Les chiffres entre parenthèses indiquent la hauteur maximale probable des vagues.

## PARAMÈTRES

### Les vagues

Les observateurs reçoivent de l'O.M.M. un certain nombre de recommandations. Ces recommandations, relatives aux observations visuelles de vent et de vagues, peuvent être consultées dans les articles [19] et [13] cités en référence.

Il est en particulier demandé :

- de distinguer la mer du vent de la houle,
- d'observer, pour chaque système de vagues, les périodes et hauteur moyennes de *"15 à 20 vagues bien formées choisies au centre des groupes, ainsi que la direction d'où elles viennent en l'affectant au plus proche échelon de 10° sur l'échelle 01-36"*,
- dans les stations côtières, d'observer les vagues en un endroit où elles ne sont déformées ni par leur réflexion, ni par leur entrée dans des eaux peu profondes (réfraction).

Les paramètres obtenus, pour la houle et la mer du vent, sont :

$H_v$  : Hauteur des vagues estimée par observation visuelle.

$T_v$  : Période des vagues estimée par observation visuelle.

$\theta$  : Direction d'où viennent les vagues.

Les données ainsi recueillies ne sont pas toujours aisées à comparer avec celles collectées au moyen d'instruments. Il est généralement admis que la hauteur des vagues observée visuellement tend à être assez voisine de la hauteur significative. Différentes méthodes ont été utilisées en vue de convertir plus exactement les données visuelles en hauteur significative. Citons notamment les relations, applicables pour une distribution statistique des états de mer :

$$H_s = 1.68H_v^{0.75}$$

$$T_z = 0.82T_v^{0.96}$$

D'autres formules peuvent être utilisées pour des sites particuliers.

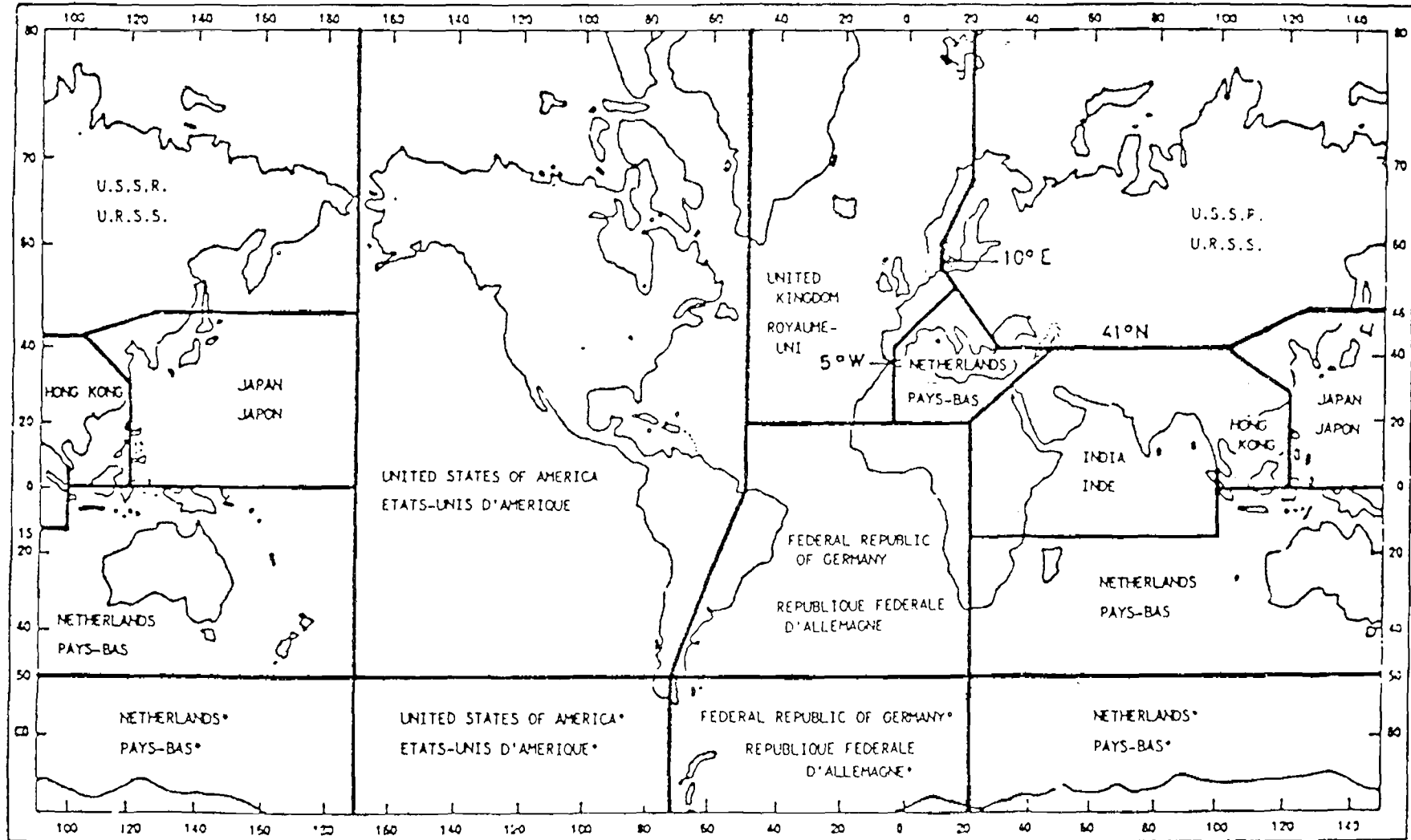
L'observation visuelle des périodes donne par contre des résultats beaucoup moins fiables que leur mesure, parce que l'oeil tend à se fixer sur les vagues, de périodes courtes, les plus proches et les plus escarpées, au détriment des vagues de périodes longues aux pentes moins abruptes.

### Le vent

La vitesse du vent est estimée visuellement à partir de l'état de la mer. Les informations concernant le vent se présentent le plus souvent sous forme de rose, associant fréquence d'apparition, vitesse et direction. La vitesse est en général exprimée :

- en m/s,
- en noeuds ( $\approx 0.5$  m/s),
- en échelle Beaufort (intensité de 0 à 12, décrite figure 2.).

Figure 3 - Areas of responsibility and responsible members for marine climatological summaries



\* The U.S.S.R. is responsible for the compilation of a complete data set and the preparation of the summaries for these sea areas.

## Le courant

Seuls les courants de surface, souvent liés à la marée, peuvent être obtenus par des observations visuelles.

Les documents comportant les informations sur les courants apériodiques de surface ont été obtenus à partir de la compilation des journaux de bord de bâtiments marchands, par étude de la dérive.

## RÉPERTOIRES ET BASES DE DONNÉES

### Observations

Les observations visuelles de hauteurs, périodes et directions des vagues sont effectuées par les navires depuis 1949 ; les vitesses de vent (échelle Beaufort), ainsi que les directions et hauteurs de vagues, selon un code élémentaire, depuis 1854.

Ces observations ont été collectées sous la coordination de l'Organisation Météorologique Mondiale et archivées par les agences météorologiques nationales de huit pays membres désignés, chacun étant responsable d'une zone déterminée. La figure 3 indique cette répartition.

Comme ces observations ont été faites selon les recommandations de l'OMM, elles constituent des données homogènes. Elles couvrent également la plupart des zones présentant un intérêt pratique, avec une concentration le long des principales routes marchandes.

Pour une étude climatologique sur une zone spécifique donnée, tout organisme spécialisé peut donc prendre contact avec l'agence nationale ayant la responsabilité météorologique du secteur englobant cette zone afin d'obtenir ces observations selon des critères de temps et d'espace. La figure 3. présente la répartition géographique des responsabilités entre nations.

A titre d'exemple, le télex de la figure 4. constitue la réponse de la Météorologie Hollandaise (KNMI) à une demande de désarchivage en Méditerranée.

Figure 4 - Conditions de désarchivage d'observations de navire, par K.N.M.I. sur une zone méditerranéenne

FROM THE AREA 35N/37N AND 14E/16E WE HAVE SEVERAL SHIPS' OBSERVATIONS - DEVIDED IN THREE PERIODS WE HAVE:

1949 - 1960 : 4588,  
1961 - 1970 : 25979,  
1971 - 1980 : 16953 OBSERVATIONS ON TAPE WITH SPECIFICATIONS: 1600 BPI - 1/2 INCH. ASCII FORMATED.

DELIVERY TIME WILL BE APPROXIMATELY 10 DAYS AFTER YOUR CONFIRMATION.

THE PRICE CONTAINS TWO PARTS, ONE FIXED AMOUNT OF DFL. 450,-- FOR COMPUTER TAPE HANDLING AND CPU-TIME, AND ONE AMOUNT DEPENDING ON HOW MANY RECORDS ARE TO BE DELIVERED. THE PRICE PER OBSERVATION IS DFL. 0,01 E.G. THE OBSERVATIONS OVER THE PERIOD 1961 - 1970 WILL COST DFL. 450,-- + DFL. 259,79 = DFL. 709,79, WHILE OVER THE PERIOD IN TOTAL IT WIL?L COST DFL. 450,-- + DFL. 475,20 = DFL. 925,20

Les adresses des agences nationales chargées de cet archivage figurent dans le fascicule donné en référence [3].

L'ingénieur désireux d'utiliser ces observations de navires à des fins opérationnelles doit en connaître les principaux inconvénients :

- les observations, notamment les paramètres caractérisant les vagues, sont estimatives et subjectives ;
- ces observations constituent des données ponctuelles et non pas des enregistrements en continu ;
- la signification statistique des observations de mauvais temps est dégradée car les navires évitent autant que possible les tempêtes. Dans le cas contraire, le nombre d'observations est artificiellement plus élevé car leur vitesse de transit est réduite...
- les observations rendent mal compte des états de mer complexes et des houles longues.

## Atlas

Un nombre considérable d'atlas rassemblant des données statistiques dérivées de ces observations a été publié, en complément de plusieurs séries périodiques, "*Monthly Climatological Summaries*", rédigées par les agences chargées de l'archivage [20]. Le lecteur trouvera dans la bibliographie quelques références d'atlas.

En dehors des problèmes inhérents aux observations visuelles, mentionnés précédemment, les résultats statistiques fournis par les différents atlas présentent de nombreuses limitations qui doivent demeurer à l'esprit lors de leur utilisation.

- La résolution temporelle (au mieux aspect saisonnier) et spatiale des données statistiques apparaît très médiocre, en particulier dans l'atlas "*Global Wave Statistics*" dont deux extraits sont donnés en figures 5 et 6. Notamment, les statistiques sont basées sur des observations couvrant une large zone, souvent non représentative de la petite région que l'on désire étudier, ce qui pose problème en particulier pour les sites côtiers.
- La précision des périodes de vagues est aussi réduite à des régions dominées par la houle plutôt que par des mers localement générées.
- Sans précision supplémentaire (apports d'autres sources de données, connaissance climatologique du site considéré) et sans l'expérience d'un organisme spécialisé, il semble difficile de réduire au dessous de 30 % les incertitudes sur ces données statistiques en elles-mêmes.

Citons ici toutefois les importants efforts d'homogénéisation et de cohérence effectués pour l'établissement du "Global Wave Statistics". Notamment, un paramètre de houle, appelé hauteur significative, et sur lequel aucun facteur de correction n'a besoin d'être appliqué, est utilisé dans tout l'atlas. De même, les estimations de périodes des vagues sont améliorées et sont représentées par le paramètre  $T_z$  ou des diagrammes de dispersion (scatter diagrams)  $H_s - T_z$  (ref. [3]).

## “Pilot Charts” et “Routing Charts”

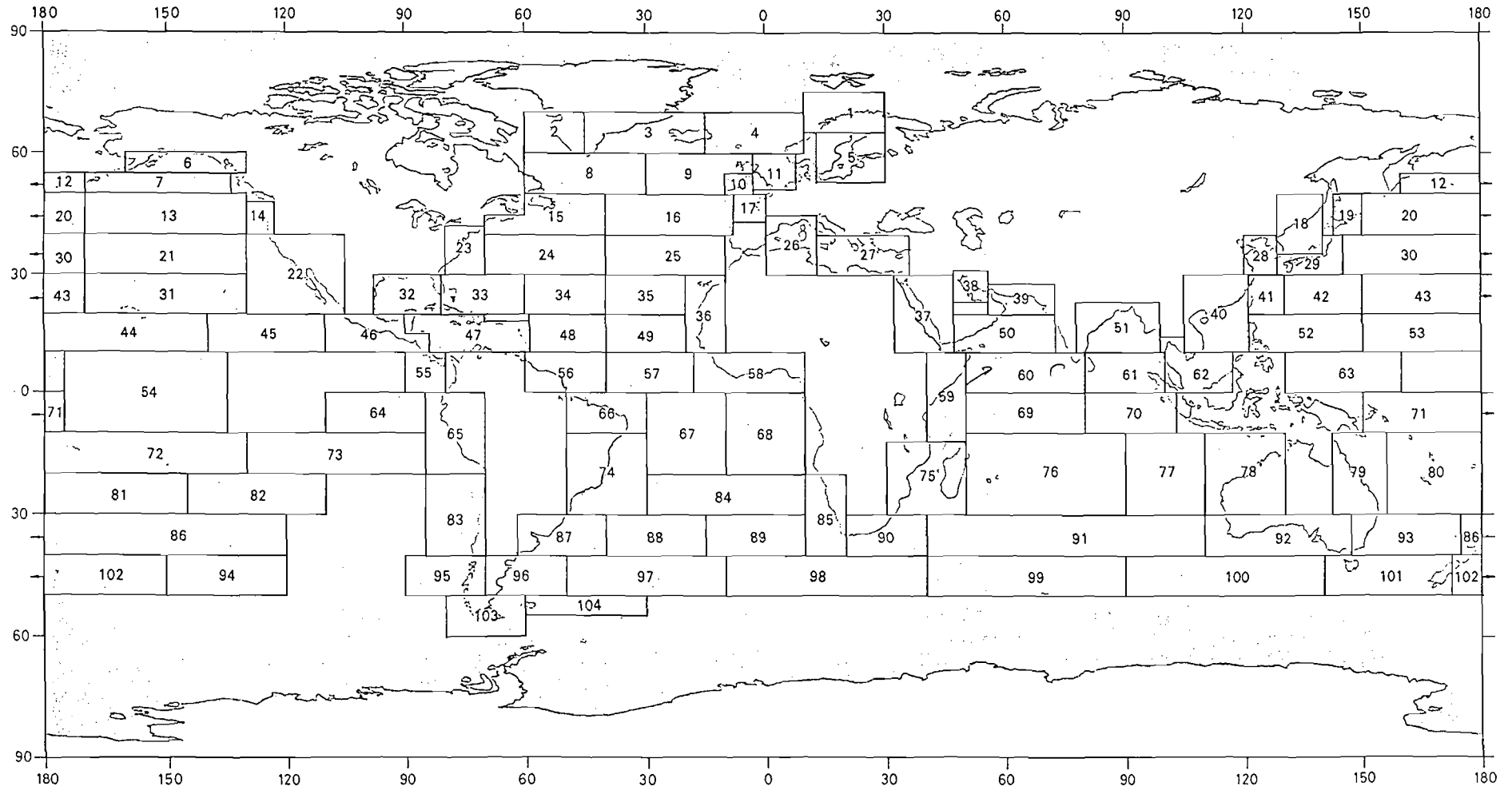
Ces documents, publiés par les services américains pour le premier et anglais pour le second, fournissent des résultats statistiques à partir des observations de navires. Ils sont édités sous forme de cartes générales mensuelles. Le pas de résolution est de 5° géographiques dans les deux cas. Les informations fournies concernent les éléments suivants.

- Le vent  
Forces par fréquence d'apparition pour les Routing Charts.  
Force moyenne pour les Pilot Charts.  
Directions (avec un pas de 45°).
- Les vagues  
Courbes de fréquences d'apparition pour les hauteurs de vagues supérieures à 12 pieds (Pilot Charts).
- Les courants de surface  
Vitesse.  
Direction prédominante des courants de surface et variabilité directionnelle.
- D'autres paramètres météorologiques.

Ces informations se révèlent d'assez bonne qualité compte tenu des problèmes d'observation visuelle déjà mentionnés. De plus, elles offrent de meilleures résolutions spatiotemporelles que les atlas. Elles s'avèrent donc très intéressantes pour les études statistiques de routes.



Figure 5 - Échantillonnage spatial du Global Wave Statistics







# MESURES IN SITU

## PARAMÈTRES

### Les vagues

#### *Les différents types de capteurs*

Les systèmes d'enregistrement des hauteurs de vagues comportent trois catégories d'appareils situés :

*au-dessous de la surface* : manomètres, échosondeurs inversés,...

*à la surface* : bouées accélérométriques ou houlographes embarqués, pour les eaux profondes à "semi-profondes", perches à houle dans les eaux peu profondes, ...

*au-dessus de la surface* : radar, stéréographie, laser, ... établis sur des structures fixes ou des supports mobiles : télémesure satellitaire.

Il convient de faire quelques remarques quant à l'utilisation de certains capteurs :

- **Les bouées accélérométriques non directionnelles** sont actuellement les dispositifs les plus utilisés. Il s'agit de capteurs classiques, dont les mesures ont été utilisées à des fins scientifiques et techniques, parfois intégrés à un ensemble complet {acquisition - transmission - traitement spectral} fort intéressant lors de campagnes d'assistance océano-météorologiques notamment. Toutefois, ces capteurs sont soumis aux intempéries et aux risques de collision. L'importance de la mesure des événements de grande amplitude pour le calcul des valeurs extrêmes souligne l'intérêt d'une "nouvelle philosophie" d'utilisation de ces capteurs reposant sur :
  - la connaissance climatologique préalable du site permettant de définir des segments de mesure en fonction des périodes de tempêtes,
  - la compétence technique en vue de la réalisation et du contrôle régulier de mouillages ad hoc.
- Plusieurs types de **bouées accélérométriques directionnelles** sont utilisés depuis une dizaine d'années. Ces capteurs fournissent, suivant une discrétisation en bandes de fréquence, et pour chacune de ces bandes, l'énergie, la direction moyenne de propagation, la dispersion angulaire et d'autres paramètres statistiques. Sur un plan opérationnel, il est à noter que ces systèmes sont coûteux (environ 300 KF pour la bouée "Waverider" directionnelle de DATAWELL et le système associé de traitement spectral des mesures, contre 150 KF pour le même capteur non directionnel). De plus, leur résolution angulaire laisse encore à désirer. Enfin, l'intérêt de l'information directionnelle est à définir par l'ingénieur selon le type de structures, la profondeur d'eau, le type et les méthodologies de calcul, ...
- Les problèmes de maintenance des bouées accélérométriques ont amené l'industrie offshore à utiliser des **capteurs de télémesure**, fixés sur des plates-formes par exemple. La comparaison entre les données mesurées par un radar altimétrique et par une bouée accélérométrique ont montré :
  - la meilleure fiabilité de l'instrumentation fixe, plus précise pour les hautes vagues,
  - la mise en évidence plus fine des caractéristiques non gaussiennes des vagues par l'altimètre radar (phénomènes de dissymétrie entre crête et creux par exemple).Enfin, la très petite largeur du faisceau permet d'éliminer tous les effets de dispersion et ceux causés par le lissage de la surface de l'eau. Si le coût à court terme est plus élevé pour ce type de capteur que pour une bouée non directionnelle, les problèmes de maintenance tendent à inverser cette différence lors d'une utilisation à long terme.
- Il faut noter enfin l'existence de systèmes "hybrides" de mesure - acquisition - transmission de données, faisant appel à la mesure *in situ* et à la transmission d'informations par satellite. C'est le cas notamment du "SPEAR F", combinaison de la bouée non-directionnelle DATAWELL, du logiciel de traitement SPEAR F développé par l'IFREMER et du réseau de communication satellitaire ARGOS.

## ***L'enregistrement et son traitement***

Les enregistrements sont habituellement effectués pendant des périodes de 20 à 30 minutes toutes les trois heures, à la fréquence de 2 hertz environ. Pendant les périodes de tempête, les enregistrements ont lieu toutes les heures ou même plus fréquemment. Ces fréquences et durées d'acquisition répondent plus ou moins bien aux critères statistiques sous-jacents à l'analyse des mesures de houle, tels qu'exposés dans la partie "calcul des valeurs extrêmes" du guide [2].

Si nous pouvions recommander une politique de mesure, elle consisterait à calculer et conserver les paramètres statistiques : hauteur significative et maximale, période moyenne, ..., de manière quasi-continue, et à conserver les historiques de l'élévation de la surface libre, ou les spectres, aux intervalles de l'ordre de trois heures évoqués précédemment.

Lorsque la connaissance de la largeur spectrale est nécessaire, il convient également d'augmenter la fréquence d'échantillonnage jusqu'à 5Hz, par exemple.

L'analyse statistique des enregistrements numérisés peut s'effectuer soit dans le domaine temporel (analyse vague par vague, par down-zero-crossing), soit dans le domaine spectral. L'ensemble des paramètres statistiques, dits valeurs réduites, pouvant être ainsi obtenus est décrit dans le document de l'Association internationale de recherche hydraulique (AIRH) [9].

Avant toute utilisation pratique, et pour l'ensemble des phénomènes physiques mesurés (vagues, vent, courant), une validation de ces paramètres, notamment pour les grandes valeurs, est nécessaire. Cette validation se fait par une analyse de cohérence et un contrôle des valeurs réduites, a priori incertaines, et peut requérir

- un retour aux valeurs brutes de l'enregistrement associé,
- une analyse climatologique correspondant à cette date,
- une comparaison avec d'autres sources de données.

Ainsi, l'intervention d'organismes spécialisés s'avère primordiale, tant pour la définition, l'orientation technique et physique, le choix de la période d'acquisition de la mesure que pour son analyse. La connaissance climatologique du site conditionne également fortement ces choix.

## Le vent

Les mesures de la vitesse et de la direction du vent sont moyennées sur une durée de 10 minutes ou d'une heure (en général). Les mesures de la vitesse du vent sont ramenées à une altitude arbitraire de 10 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer.

Cette pratique soulève quelques interrogations, encore mal résolues à l'heure actuelle : comment rapporter les différentes moyennes fournies à une durée homogène, d'une part, et quelles sont les erreurs sur la mesure du vent par une bouée induites par les vagues, d'autre part ? En effet, on conçoit que la mesure, tantôt au fond des creux, tantôt au sommet des vagues, par une petite bouée, puis extrapolée à 10 m. d'altitude, soit assez différente d'une mesure effectuée à une altitude fixe de 40 m. sur une plateforme avant d'être ramenée à une élévation fictive de 10 m.

Il faut néanmoins mentionner que les données de vent archivées par l'O.M.M (cf. p.19) sont de plus en plus issues des mesures effectuées par les navires du V.O.F. à l'aide d'anémomètres portables ou fixés de façon permanente. La qualité de ces données archivées et des statistiques qui en sont déduites devrait ainsi s'en trouver améliorée.

La justification et les différentes formes de caractérisation du vent (vitesses - directions moyennes et/ou spectre d'énergie) sont développés dans différents chapitres du guide pratique "Environmental Forces on Offshore Structures" [2].

Notons simplement que l'ingénieur maritime s'intéresse particulièrement à deux types d'actions du vent :

- sur les structures,
- sur la surface de la mer, dans le processus de formation des vagues.

Nous y revenons succinctement au paragraphe "Modèles numériques". L'importance d'une détermination précise du vent dans la couche limite et au niveau de l'interface avec l'océan est cruciale dans la modélisation. Toutefois, les formules approchées et empiriques de transfert du vent à l'altitude standard de 10 m, mentionnées dans le chapitre 1.4 du guide pratique[2], sont suffisantes pour des besoins opérationnels.

L'expérience montre, comme nous l'avons déjà mentionné, l'intérêt d'une ré-analyse des fortes valeurs, en raison notamment de biais instrumentaux en conditions de tempête.

## Le courant

La vitesse et la direction du courant doivent être mesurées sur le site, de préférence pendant plusieurs années. Il est souhaitable d'effectuer les mesures à plusieurs profondeurs, afin de pouvoir, d'une part, différencier les types de courant au sein de la tranche d'eau et, d'autre part, établir un profil de courant, afin d'en déduire des actions sur les parties immergées des structures.

Les vitesses et directions de courant sont moyennées sur une durée généralement inférieure ou égale à 20 mn.

L'existence de zones à forte courantométrie, comme par exemple certaines régions du golfe de Guinée, et le développement d'ouvrages en eaux profondes montrent la nécessité pour l'ingénierie de la connaissance précise des profils de courant sur la tranche d'eau considérée. Afin de répondre à ce besoin, de simplifier les problèmes de maintenance d'une ligne de courantomètres classiques et de réduire les pertes fréquentes de données avec de tels dispositifs, sont apparus sur le marché des **courantomètres acoustiques à effet Doppler**. Un seul appareil fournit, pour des profondeurs allant jusqu'à 400 m, des profils de courants horizontaux à deux composantes, établis avec un maximum de 32 niveaux de mesure.

Le problème principal devient alors la manière d'utiliser ces données pléthoriques, les techniques actuelles ne permettant pas d'en faire des statistiques satisfaisantes sur le plan de la définition de "profils de design".

Sachant ainsi qu'un tel capteur peut remplacer avantageusement sur les plans technique et opérationnel une trentaine de courantomètres classiques, les coûts suivants (été 1991) sont laissés à la réflexion de l'opérateur.

- ADCP : 400 KF profileur Doppler RDI
- AANDERA : 30 KF courantomètre rotor
- S4 : 100 KF courantomètre électromagnétique

Pour ces deux derniers, le coût ne comprend que le capteur lui-même.

## BASES DE DONNÉES

Certaines régions, notamment les plateaux continentaux à fortes activités industrielles océaniques, sont raisonnablement bien dotées de données instrumentales de qualité.

L'IFREMER comprend un service, dénommé SISMER (Systèmes d'Informations Scientifiques pour la Mer), ayant pour mission de concevoir et de mettre en oeuvre les systèmes d'informations scientifiques relatifs au domaine marin. Il entretient un répertoire de ces systèmes et des bases de données dans les différents laboratoires et organismes français. Par ailleurs, il en établit les normes de qualité et les règles de diffusion.

Parmi les bases de données qu'il développe, on peut citer celles  
du Réseau de surveillance microbiologique (REMI),  
du Réseau de surveillance phytoplanctonique (REPHY),  
du Réseau national d'observation de la qualité du milieu (RNO),  
des Campagnes océanographiques françaises  
des Températures de subsurface TOGA/WOCE.

Pour les campagnes océanographiques hauturières, le SISMER assure l'archivage et une gestion centralisée de certaines données de base : navigation, bathymétrie, gravimétrie, magnétisme, hydrologie, bathysonde et courantométrie. La consultation des catalogues pourra sous peu se faire en ligne, sur un serveur informatique.

Depuis une dizaine d'années, les sociétés pétrolières disposent d'enregistrements de houle effectués soit à bord de barges de forage, soit à l'occasion de campagnes météorologiques. Ces données peuvent être éventuellement rachetées par les nouveaux venus sur un site maritime.

La Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO a créé un centre chargé de répertorier les endroits où des données de vagues ont été collectées. Ce centre, appelé CNDOR (vagues), est géré par la "Marine Information and Advisory Service" de l'Institut britannique des sciences océanographiques. Il publie régulièrement un catalogue résumant la teneur des informations qu'il détient (contenu des formulaires reçus, cartes mondiales et régionales, index géographique et nominal). Pour les données mesurées de courants affectant toute la tranche d'eau, les seules sources d'information sont les rapports scientifiques publiés par certains organismes à la suite de campagnes océanographiques\*. Citons :

- **en France**  
le SHOM, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine,  
l'IFREMER, Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer,  
(SISMER),  
l'ORSTOM, Institut Français de Recherche en Coopération.
- **aux Etats-Unis**  
l'US Army Beach Erosion Board,  
l'US Navy Hydrographic Office,  
l'US Naval Oceanographic Office.  
des services scientifiques tels que : Journal of Geophysical Research,  
Journal of Marine Research.
- **en Grande-Bretagne**  
le Service Hydrographique Anglais,  
la Royal Meteorological Society,  
la Royal Society.

---

\* Les adresses des organismes cités se trouvent en fin d'ouvrage.



## MODÈLES NUMÉRIQUES DE VAGUES

L'objet de la modélisation des vagues est de reproduire, à partir des connaissances théoriques et des données pertinentes, l'état de la mer sous une forme utilisable de manière pratique pour les prévisionnistes, les ingénieurs, les marins ou le grand public.

### CONCEPTS FONDAMENTAUX

La modélisation des vagues intéresse directement les météorologistes et leurs clients, principalement dans deux domaines : la prévision de l'état de la mer et la climatologie des hauteurs et périodes de vagues. Qu'il s'agisse d'un site isolé ou d'une vaste zone géographique, il faut, dans le premier cas, savoir comment la surface de la mer réagit aux influences météorologiques. Les informations nécessaires au second s'obtiennent généralement en analysant des données d'observation ou de mesures. Ces données sont malheureusement souvent insuffisantes, soit en nombre, soit parce qu'elles ont été recueillies trop loin de la zone considérée ou durant une période trop courte pour les rendre représentatives ; on fait alors appel aux modèles en vue de combler ces lacunes.

La description complète du champ de vagues à laquelle on recourt le plus fréquemment est celle fournie par le spectre de la densité d'énergie tant en fréquence qu'en direction :  $E(f, \theta)$ , où  $f$  est la fréquence et  $\theta$  la direction de propagation. On peut déduire de ce spectre la plupart des paramètres que doit procurer un modèle d'exploitation, à savoir :

- la hauteur significative des vagues,
- la période de passage à zéro,
- le spectre de fréquences,
- la fréquence du pic et celles des maxima secondaires,
- la répartition spectrale directionnelle,
- les directions principales et secondaires des vagues,

Tous les modèles ne font pas appel à cette représentation. Certains d'entre eux, plus simples, reposent sur l'estimation directe de la hauteur significative des vagues ou ne traitent que le spectre adirectionnel, et les indications sur la direction proviennent alors d'une analyse des données de vent.

### STRUCTURE D'UN MODÈLE DE VAGUES

Nous ne mentionnons que les points clés de la modélisation des vagues. Le lecteur désireux d'avoir plus d'informations sur le sujet pourra notamment consulter l'excellente synthèse du "Guide de l'Analyse et de la Prévision des Vagues" [15].

La structure générale des modèles de calcul de vagues, fondamentalement la même, est résumée sur le schéma de la figure 7. Les différents concepts de base intervenant dans la modélisation sont les suivants :

## Vent

Le mouvement de l'atmosphère au dessus de l'océan est sans aucun doute le point clé de la modélisation. On se sert dans les modèles informatiques d'un historique ou d'un pronostic du vent obtenu en exploitant les champs de vent fournis à une série de pas temporels par un modèle atmosphérique.

### Apport et dissipation de l'énergie

Il existe des relations entre la couche limite de l'atmosphère et le champ de vagues. En fait, l'apport d'énergie au champ de vagues est régi par un mécanisme de rétroaction qui dépend de la quantité d'énergie présente dans le dit champ de vagues.

$S_{in}$  représentera le rythme du transfert d'énergie au champ de vagues.

$S_{ds}$  représente le rythme auquel le champ de vagues perd de l'énergie.

En eau profonde, la perte d'énergie résulte principalement du déferlement ; en eau peu profonde, elle peut résulter d'une interaction avec le fond.

### Interactions

Il s'agit essentiellement de la redistribution de l'énergie que provoquent, au sein du spectre de vagues, les interactions non linéaires faibles entre deux composantes  $S_{ni}$ .

### Propagation des vagues et de leur énergie

Dans la modélisation des vagues, on traite de paramètres tels que la densité d'énergie, et c'est donc la vitesse de groupe qui importe.

Les effets de propagation et de dispersion des vagues sont représentés par la divergence du flux de la densité d'énergie.

### Profondeur de l'eau

Elle influe notamment sur :

- la propagation des vagues (réfraction, diffraction, réflexion, ...),
- le renforcement des interactions non linéaires,
- la création d'autres effets dissipateurs (frottements, percolation, ...).

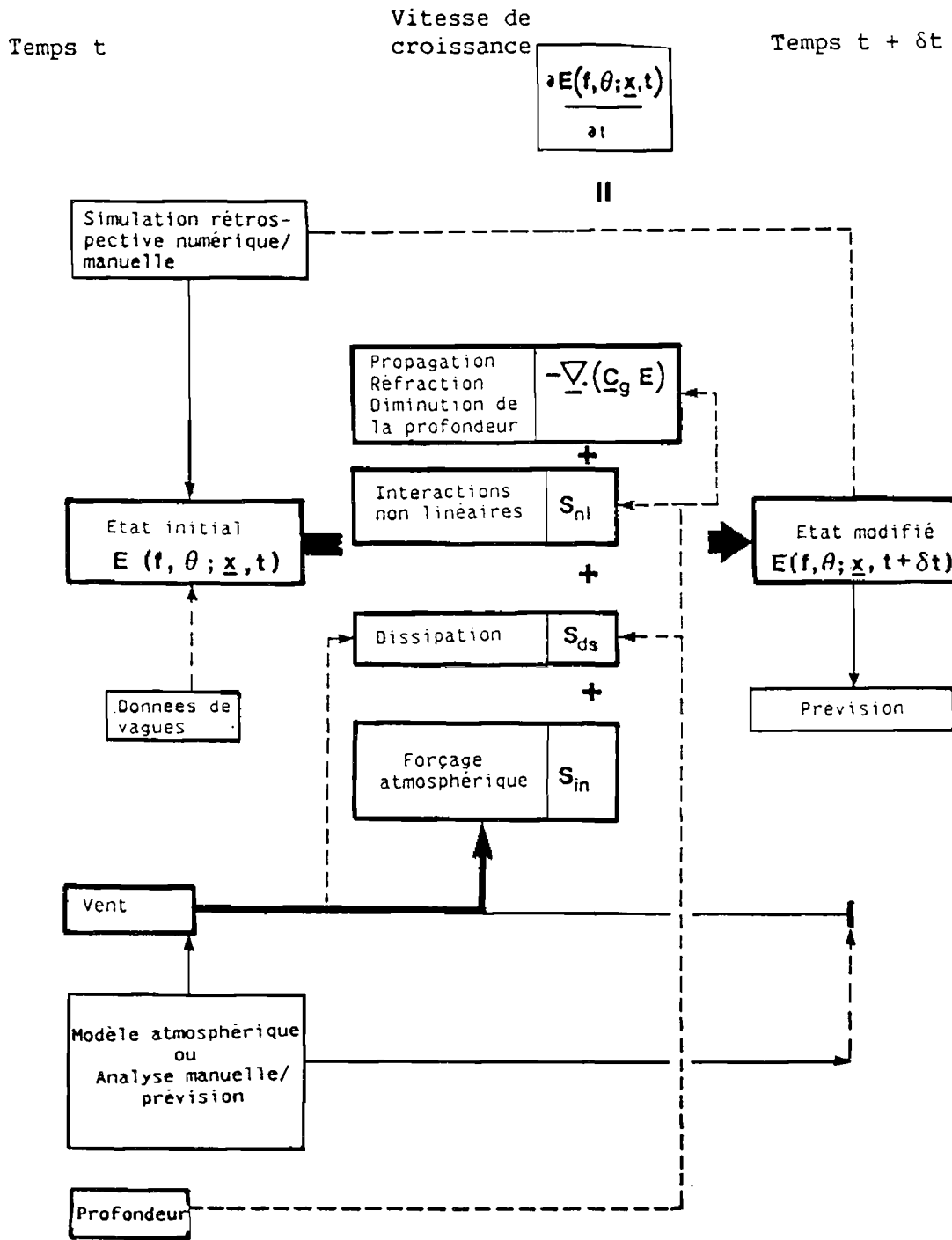


Figure 7 - Structure générale d'un modèle de vagues

## CLASSIFICATION DES MODÈLES DE CALCULS DE VAGUES

La représentation dans les modèles des concepts évoqués ci-dessus s'effectue de maintes façons. La formulation la plus générale repose sur l'application de l'équation du bilan énergétique :

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla(C_g E) = S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

avec :  $E = E(f, \theta, x, t)$  ;  $C_g = C_g(t, \theta)$  : vitesse de groupe.

L'équation générale ci-dessus se résout par de nombreuses voies qui diffèrent non seulement sous l'angle de l'approche numérique, mais encore sous celui des paramètres modélisés et de la formulation des termes de base.

Les modèles de vagues se répartissent actuellement en trois grandes catégories, selon la représentation du terme non linéaire de base  $S_{nl}$  , le plus difficile à appréhender. Citons simplement ces trois familles de modèles :

- **Couplés discrets (CD)**

Ils sont fondés sur des composantes spectrales discrètes, avec un terme non linéaire exprimé au moyen des termes de plusieurs composantes. Ces modèles exigent souvent de longs calculs.

- **Découplés avec propagation (DP)**

On se passe du terme de couplage  $S_{nl}$  . Les interactions non linéaires faibles sont incluses dans la formulation de  $S_{in} + S_{ds}$  .

- **Couplés hybrides (CH)**

Les termes non linéaires gouvernent la forme des spectres des mers grossissantes : on se réfère à un spectre caractéristique (Jonswap, par exemple). La forme spectrale et l'équation du bilan sont exprimées de façon paramétrique. Ce modèle de mer du vent est connecté à un modèle découplé avec propagation de la houle.

Figure 8 - Cartes représentant des champs de vagues prévus.

Les isolignes correspondent aux hauteurs significatives des vagues formées par la combinaison de la mer, du vent et de la houle, les directions du vent et de la houle sont indiquées par des flèches (*Meteorological Office du Royaume-Uni*).

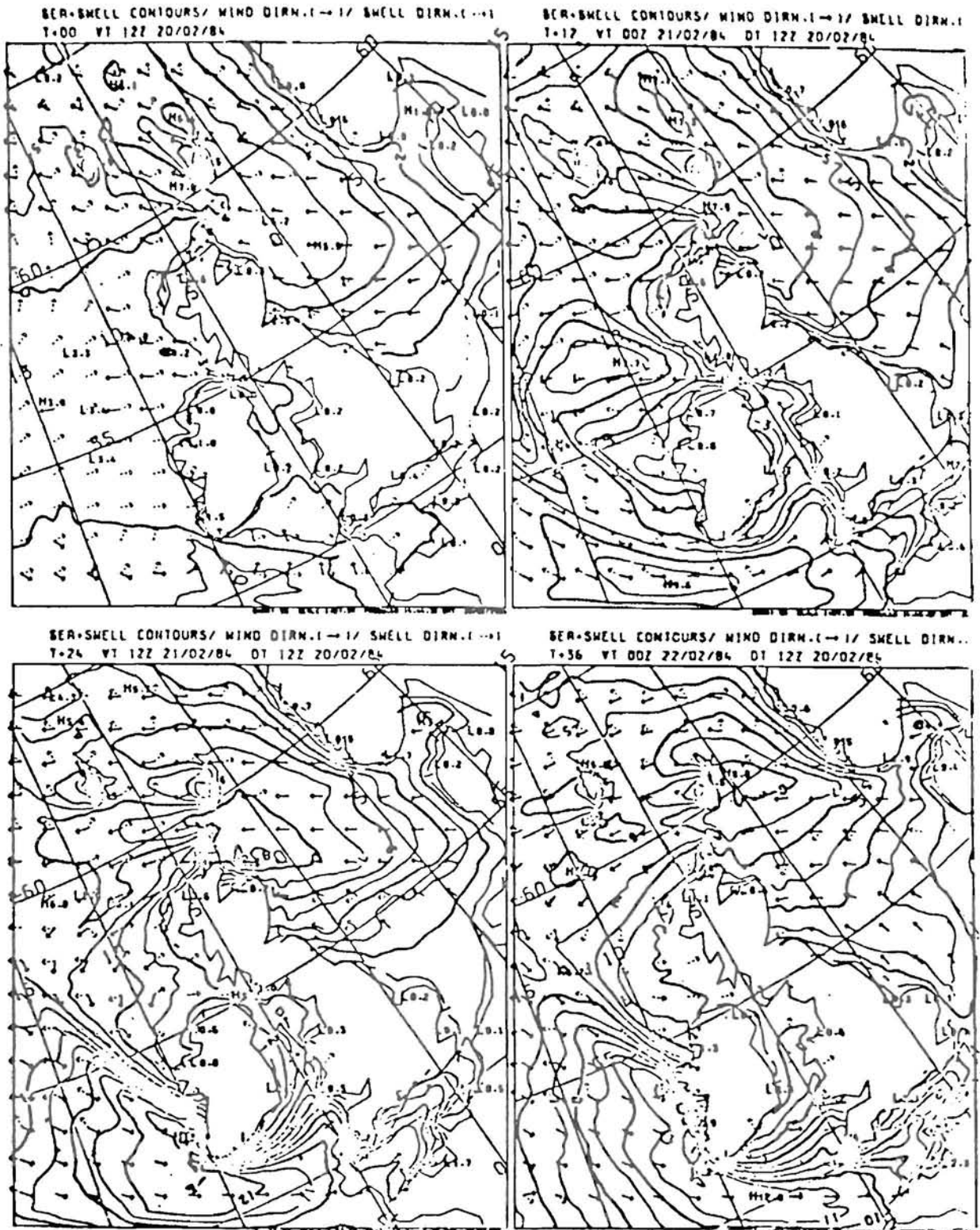
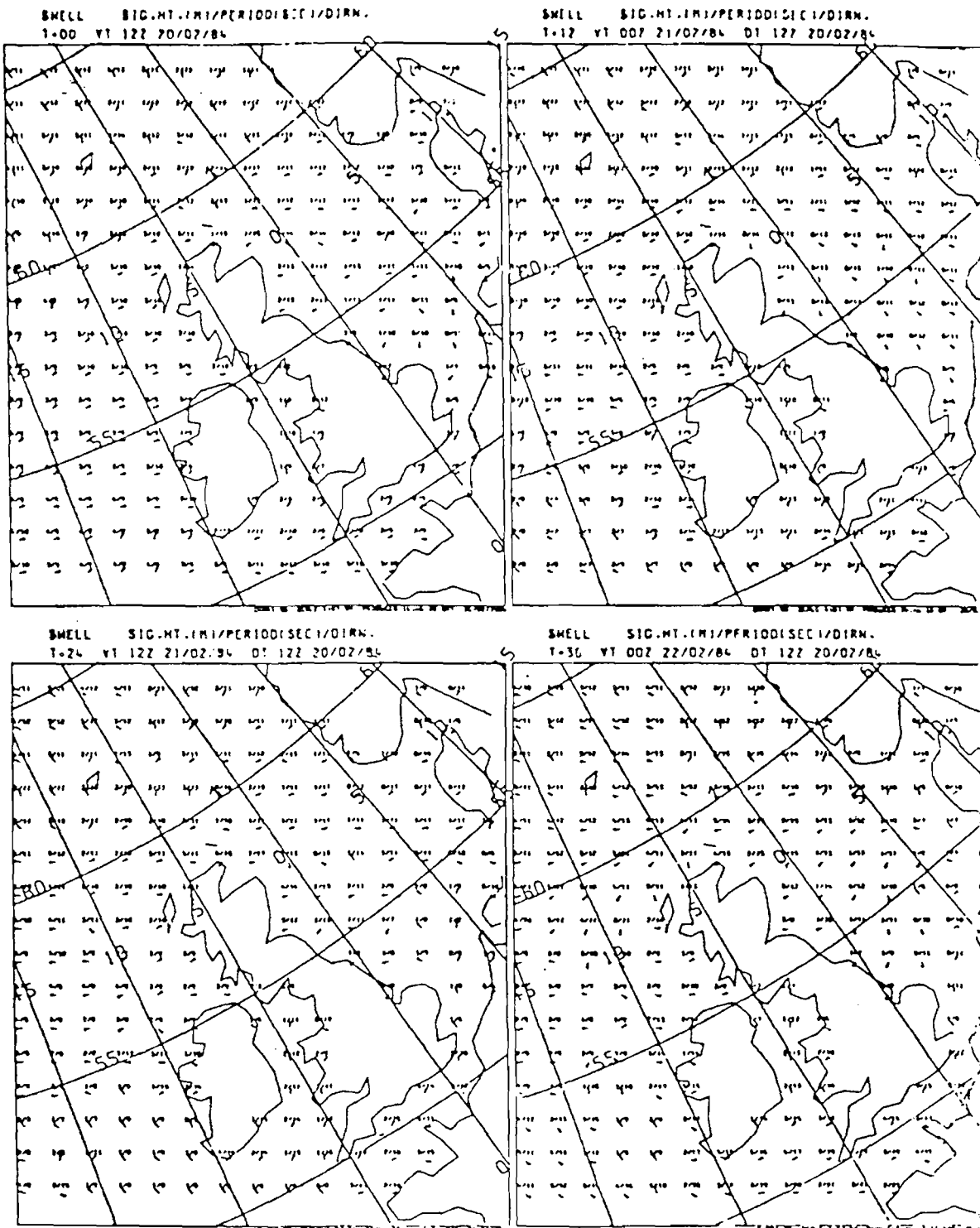


Figure 9 - Exemples de présentation aux points de grille de données relatives aux vagues.  
 Les flèches indiquent les hauteurs significatives et les périodes de passage par zéro des ondes de houle  
 (Meteorological Office du Royaume-Uni).



## RECENSEMENT DES MODÈLES DE VAGUES

Les tableaux figurant en annexe (A.1) sont extraits du guide déjà mentionné [15]. Ils contiennent la liste et une brève description des modèles de vagues recensés en 1985.

Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances dans le domaine pourra se référer notamment :

- à la référence OMM [16]
- au catalogue Mias [12]
- à la référence SWAMP Group [24]

## EMPLOI DES MODÈLES EN EXPLOITATION

Comme avec tous les modèles simulant une réalité physique, on se heurte à la difficulté d'interpréter la masse de données très complexes qui découlent de leur utilisation. L'utilisateur final ne s'intéresse en effet d'ordinaire qu'à une petite portion des informations qu'on peut en extraire.

### Choix des paramètres

L'expérience enseigne que la plupart des utilisateurs maritimes souhaitent connaître la hauteur significative, les périodes moyennes  $T_z$  ou  $T_p$ , la direction des vagues, ainsi que leur différenciation en houle et mer du vent le cas échéant.

### Présentation des résultats de modèles

L'ingénieur peut être parfois confronté à des sorties synthétisées de modèles d'organismes nationaux, telles que celles données en exemple aux figures 8 et 9. Dans ce cas, qu'il s'agisse de cartes ou de produits codés, ce dernier pourra trouver de nombreux renseignements dans les manuels de l'OMM cités en référence [17, 18].

Enfin, il faut surtout noter que chaque société de service spécialisée peut avoir recours, de par son expérience ou à la demande spécifique de ses clients, à la fourniture d'autres paramètres et à l'utilisation d'autres formes de représentation. Un exemple d'un tel bulletin particularisé d'assistance météo-océanique est fourni par la figure 10.

Figure 10 - Exemple de bulletin météo-océanique

```

ZCZC
++++
TO: XXXXXXXX          ATTN: MR XXXXXXXX
TO: XXXXXXXX          ATTN: CDT XXXXXXXX

FM: METEOMER
N/TLX: .....

BULLETIN METEO-OCEANOGRAPHIQUE: 11/12/91 - 1800UTC
ZONE: .....

JJ-HHHH  WIND          H 1/3    T H1/3  H1/3 SWELL    T SWELL  H MAX
  UTC    KNOTS         METRES  SEC.    METRES        SEC.    METRES
19-1900  SSE  10/20    0.5/1.0  2 TO 3  ESE  1.0/1.5    4 TO 7  1.5/2.0
20-0000  S   15/20    0.5/1.0  2 TO 3  ESE  1.5/2.0    5 TO 7  2.0/2.5
   0600  SSW  15/20    0.5/1.0  1 TO 3  ESE  1.5/2.0    5 TO 7  2.0/2.5
   1200  SSW  20/25    1.0/1.5  3 TO 4  ESE  1.0/1.5    4 TO 7  2.0/2.5
   1800  S   20/25    1.0/1.5  3 TO 4  ESE  1.0/1.5    4 TO 7  2.0/2.5
21-0000  S   20/25    1.0/1.5  3 TO 4  ESE  1.0/1.5    4 TO 7  2.0/2.5
   0600  S   15/20    0.5/1.0  2 TO 4  ESE  1.0/1.5    4 TO 7  1.5/2.0
   1200  S   10/15    0.2/0.5  2 TO 3  E'LY 0.5/1.0  4 TO 6  1.0/1.5
   1800  S'LY  5/15    0.2/0.5  1 TO 3  E'LY 0.5/1.0  4 TO 6  1.0/1.5

ETC.....

++END
NNNN

```

## Simulation rétrospective

On entend par cette expression (*hindcast* en anglais) des calculs effectués à partir des champs de vent analysés. Il s'agit d'une application différée des modèles numériques dans le domaine plus général de la climatologie des vagues. A l'instar des conditions météorologiques, les conditions de vagues varient d'une année à l'autre, de sorte qu'il faut disposer de données s'étendant sur plusieurs années, et bien souvent recueillies simultanément en de nombreux endroits, afin de procéder à un traitement statistique et climatologique satisfaisant. Collecter ces données étant une opération coûteuse et techniquement difficile, on est loin de posséder actuellement toutes celles qui seraient nécessaires à de multiples fins pratiques : conception d'ouvrages côtiers, études d'érosion et de transport de sédiments, études mésologiques relatives notamment à la dissémination des produits pétroliers lors d'accidents en mer, estimation de l'énergie des vagues, enquêtes d'assurance ou évaluation des sinistres en mer.

Ainsi, un modèle numérique de vagues bien étalonné et vérifié permet de réunir rétrospectivement une base de données relativement fiables et de qualité acceptable.

Notons ici l'importance de la validation du modèle de vagues pour une étude de site donnée, qu'il s'agisse de climatologie ou de prévision d'états de mer. En effet, l'expérience montre souvent des divergences entre les modèles ou en comparaison avec des mesures, dès que l'on s'écarte des conditions moyennes, et donc pour les tempêtes en particulier. Nous reviendrons sur ce point crucial lorsque nous traiterons des applications de la télémessure spatiale.



## Jeux de données de simulation rétrospective disponibles

Des simulations rétrospectives ont été exécutées avec plusieurs des modèles décrits précédemment et les "données" résultantes sont archivées. La plupart des études porte cependant sur de courtes périodes, car leur objet est de servir à des vérifications ou à l'analyse de conditions exceptionnelles, telles que les tempêtes ayant occasionné de graves dommages en mer ou sur les côtes. Elles sont trop nombreuses pour qu'on en donne une liste ici. L'ingénieur maritime aura avantage à contacter une société de service spécialisée afin de savoir si son étude particulière peut bénéficier de jeux disponibles. Citons en quelques unes.

Le *Fleet Numerical Oceanography Center*, qui effectue, au moyen du modèle GSOWM (Global Spectral Ocean Wave Model, qui a succédé en 1986 à SOWM), des calculs sur les deux hémisphères, par pas de 2.5°, avec chaque enregistrement contenant, deux fois par jour, la direction et la vitesse du vent et le spectre directionnel de vagues pour 12 bandes de fréquences et 24 directions. Il est à noter que les données de SOWM remontent jusqu'en 1964 pour le Pacifique Nord et 1956 en ce qui concerne l'Atlantique Nord.

En octobre 1990, le *National Climatic Data Center* ne fournissait que des cassettes de données globales, à savoir : données formatées ASCII, par pas de 2.5 degrés, sur une grille 73 par 144 commençant à 90 N, 60 E. Les enregistrements comprennent deux analyses par jour, à 0 et 12 heures TU, des directions et intensités de vent, et des spectres directionnels d'énergie.

La possibilité de sélectionner des zones restreintes en longitude et latitude serait opérationnelle depuis fin 1990. Un mois d'analyse complet requiert deux cassettes, de coût unitaire d'environ 200 \$ US.

L'*U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station*, qui a effectué au moyen d'un modèle couplé discret en eau profonde une simulation rétrospective de l'état de mer à proximité du littoral des Etats-Unis d'Amérique, sur 20 ans.

L'*Institut Météorologique Norvégien* (NMI), qui a effectué, au moyen d'un modèle couplé discret, une simulation rétrospective, s'étendant sur 30 ans, des vagues dans les mers de Norvège, du Nord et de Barentz.

Le *British Meteorological Office* (BMO), dont le modèle utilise les champs de vent fournis par le Centre Européen de Prévision (CEP).

Il fournit des spectres directionnels d'états de mer comportant 13 bandes de fréquences pour 16 directions, selon un maillage en longitude de 1.875°, en latitude 1.5°.

Résumé des modalités d'obtention :

- disponibilité depuis le 15 octobre 1986,
- deux observations par jour jusqu'au 15 juin 1988, puis quatre,
- fourniture sur cassettes ou disquettes,
- coût : 200 livres sterling par point de grille et par an,
- délai de livraison de l'ordre de quatre semaines.

L'utilisation opérationnelle des modèles numériques comme bases de données d'environnement pour les différents types de calcul (statique, fatigue, dynamique) sera développée dans le chapitre 2.

**Il est important de noter que l'utilisation optimale de tels modèles nécessite l'ensemble des compétences d'un organisme spécialisé.**

- Analyse critique des champs de vent en entrée, qu'il s'agisse de données issues de modèles numériques, de mesures satellitaires ou de reconstitution. C'est là, en effet, le point-clé de la modélisation.
- Utilisation spécifique d'outils et de codes informatiques dédiés à ces calculs d'états de mer, selon les besoins de l'ingénierie marine.
- Analyse critique des résultats du modèle, en fonction d'autres sources de données dont dispose cet organisme (observations de navires, télémesure, ...) et de sa connaissance climatologique des sites.
- L'apport des données satellitaires devrait être prépondérant pour valider et caler les modèles sur un site donné, en apportant une description plus fine des champs de vent, une correction des énergies et la direction calculée des vagues. Ces données recalées présentent un très grand intérêt pour l'utilisateur, notamment au niveau de la réduction du volume de mesures in situ à effectuer. Nous y revenons dans la partie suivante et au chapitre 2.

## MESURES SATELLITAIRES

Nous présentons ici, dans leurs applications à l'ingénierie du domaine maritime, les principaux capteurs embarqués sur satellite : principes physiques, apports pratiques, limitations d'utilisation.

### CONCEPTS GÉNÉRAUX

La télédétection consiste à mesurer "à distance" des propriétés d'un milieu. Les informations sont transportées par des ondes de diverse nature : électromagnétiques, acoustiques, ... et analysées par des capteurs situés hors de l'élément à étudier.

Pour le milieu océanique, les grandeurs accessibles à la mesure par télédétection sont :

- la topographie de la surface océanique, qui dépend de la forme du fond et de la circulation générale,
- la vitesse et la direction du vent,
- la hauteur significative et le spectre directionnel des vagues,
- la "couleur" de l'océan, liée au contenu en substances chimiques et biologiques,
- la température et la circulation de surface.

Même s'il reste bien des problèmes à résoudre, si certaines de ces mesures ne sont pas aujourd'hui opérationnelles, leur faisabilité est une chose démontrée, en particulier depuis le lancement de Seasat (été 1978).

La télédétection spatiale apporte dans toutes ces mesures l'étendue de sa couverture : le diffusiomètre de Seasat a réalisé plus de mesures du vent à la surface de la mer que les navires n'en ont faites pendant un siècle...

Ces capacités ont des implications considérables sur le plan scientifique et bien sûr technique et économique.

La mise en oeuvre de la télédétection spatiale est complexe, car elle fait appel à des domaines variés : trajectographie du satellite, cartographie, traitement d'image et traitement du signal,...

On peut classer les méthodes suivant plusieurs critères :

- la longueur d'onde : visible, infrarouge, micro-ondes, ...,
- le type de fonctionnement : on distingue :
  - instruments passifs* (radiomètres), qui reçoivent le rayonnement naturel émis, réfléchi, ou diffusé par la surface de la mer,
  - instruments actifs* (radars) qui illuminent eux-mêmes la scène qu'ils observent : altimètres, diffusiomètres, radars imageurs :
    - SAR = Synthetic Aperture Radar
    - SLAR = Side Looking Aperture Radar.

Outre les limitations propres aux mesures faites depuis l'espace, le satellite ne permet pas d'obtenir tous les échantillonnages spatiotemporels imaginables. L'échantillonnage se révèle un compromis entre l'orbite du satellite et les caractéristiques propres de fonctionnement du capteur (fauchée, direction de visée et cycle de fonctionnement).

A titre d'illustration, le lecteur trouvera en annexes trois figures, concernant :

- la configuration géographique des capteurs ERS-1 (figure 11),
- la couverture et la répétitivité des informations ERS-1 (figure 12),
- le réseau des stations au sol ERS-1 (figure 13).

Figure 11 - ERS - Configuration géographique

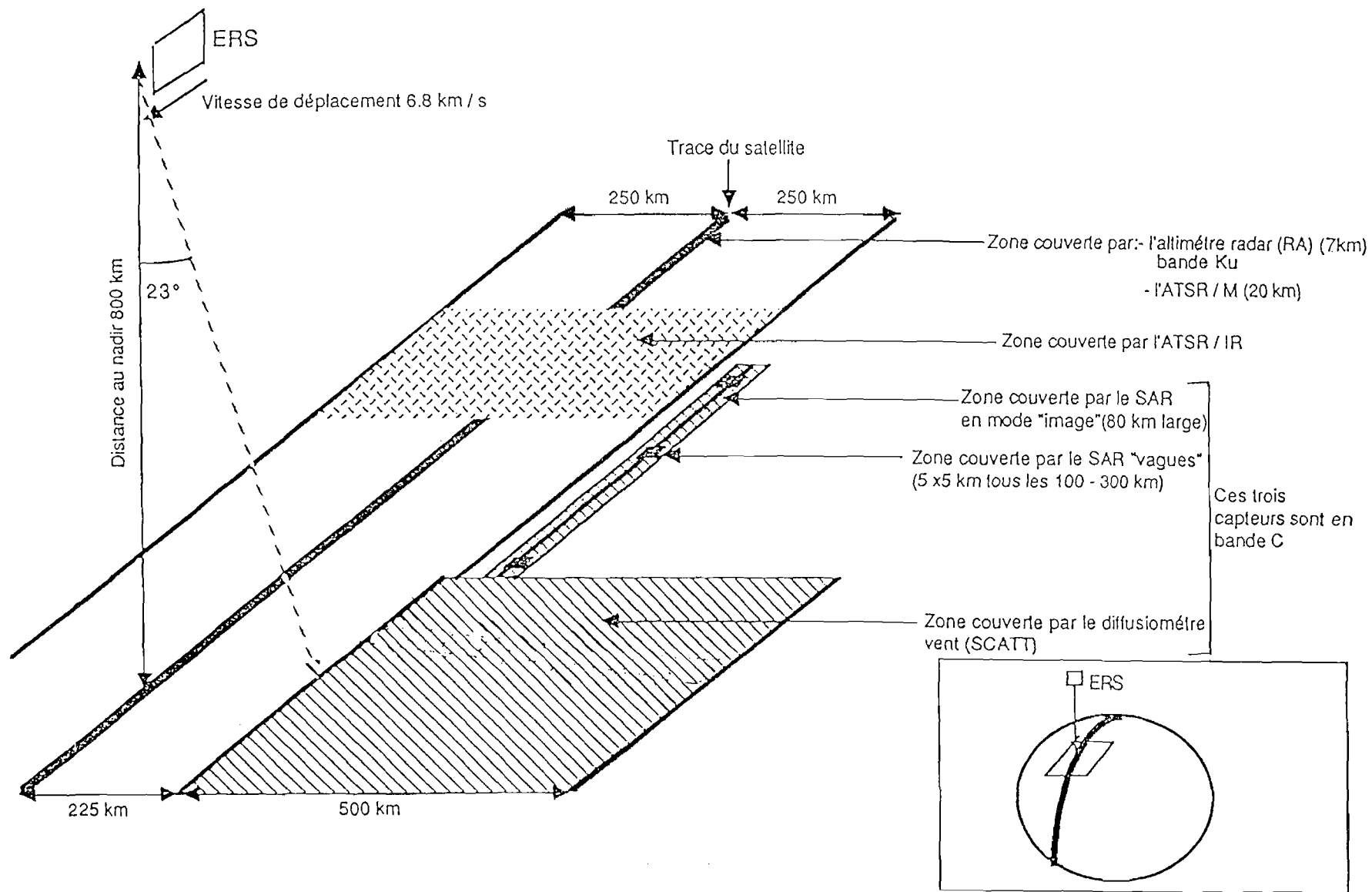
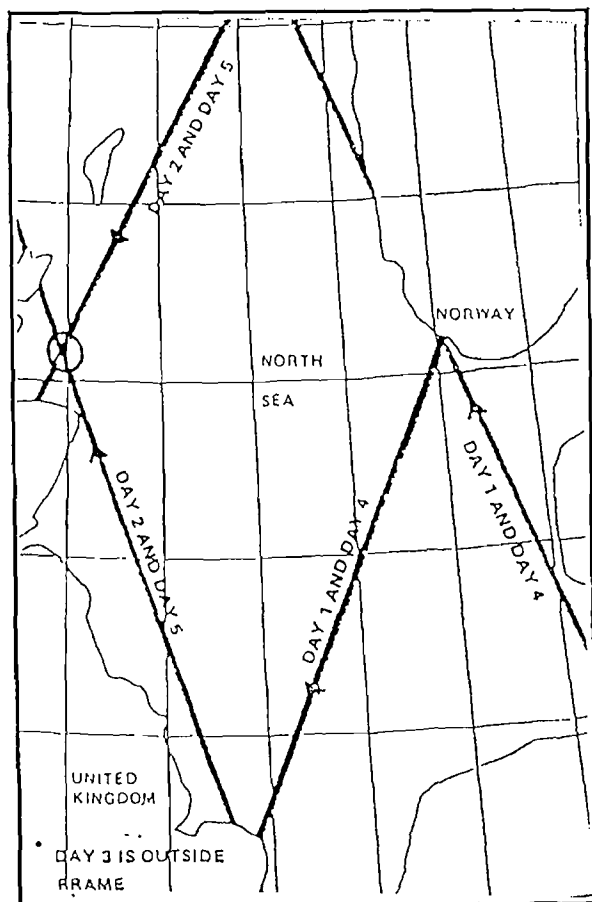
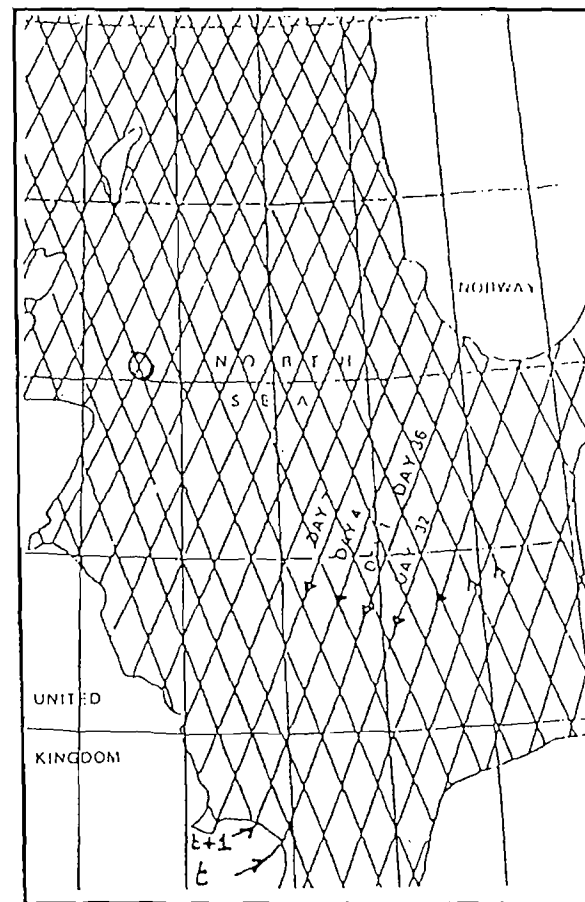


Figure 12 - Couverture et répétitivité des informations



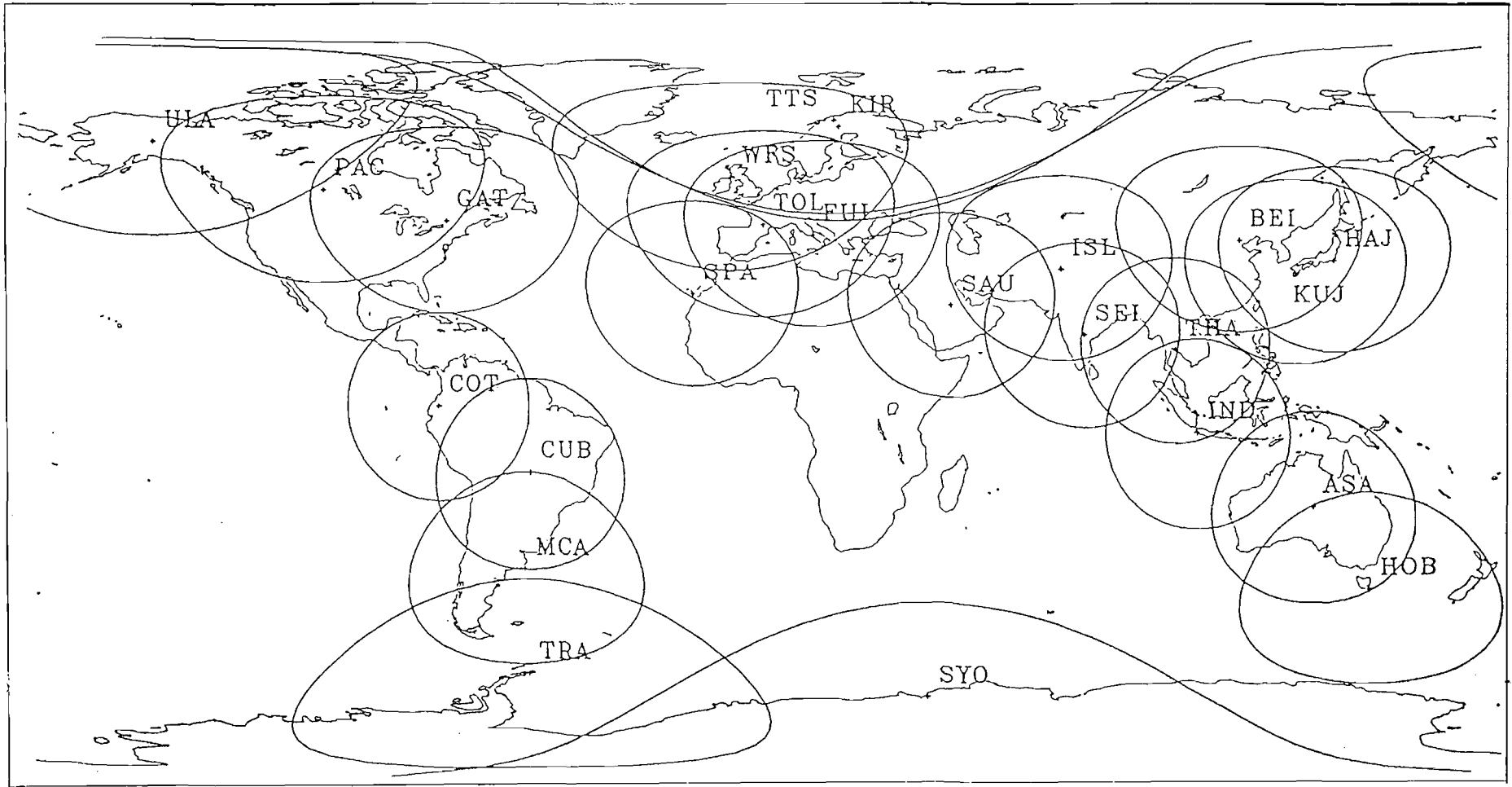
Période de 3 jours  
Distance entre trace : 500 km (à 60° latitude)



Période de 35 jours  
Distance entre trace : 40 km (à 60° latitude)

Le point cerclé est couvert deux fois à 12 heures d'intervalle

Figure 13 - Réseau des stations au sol ERS 1



## LES CAPTEURS PASSIFS

Un radiomètre reçoit le rayonnement émis, réfléchi ou diffusé par l'océan. Il se caractérise avant tout par sa gamme de fréquence. La plupart des appareils sont multicanaux, c'est-à-dire qu'ils utilisent simultanément plusieurs longueurs d'onde appartenant généralement à la même gamme. Ces radiomètres sont des instruments imageurs, qui observent donc une répartition bi-dimensionnelle de pixels. Deux phénomènes physiques interviennent :

- la rétrodiffusion et la réflexion de sources extérieures, du soleil essentiellement (capteurs dans le visible et l'infrarouge),
- l'émission propre des points observés (phénomène dominant dans l'infra-rouge thermique et en hyperfréquence).

### Radiomètres dans la gamme visible

Le signal réfléchi ou rétrodiffusé peut, dans cette gamme, avoir pénétré à quelques dizaines de mètres : matière en solution, en suspension - phytoplancton, particules -, fond de la mer en eaux peu profondes.

#### *Applications*

Ce sont principalement la localisation des zones à forte productivité biologique (phytoplancton), le suivi des panaches d'estuaire et de l'apparition des "upwellings", et la mesure des courants littoraux pour les sédiments transportés.

#### *Limitations*

- . Les observations doivent être diurnes.
- . Toute application quantitative nécessite une correction atmosphérique rigoureuse, une analyse fine des divers phénomènes physiques en jeu, et une corrélation du signal océanique résiduel avec les phénomènes à observer.

### Capteurs infrarouge

Pour ce type de capteur, l'émission propre du corps observé devient prépondérante par rapport à l'énergie réfléchi ou rétrodiffusée. La mesure de l'énergie émise va servir à déterminer la température du corps émetteur, après correction des effets perturbateurs. Ces corrections sont nécessaires si l'on veut des mesures absolues. En leur absence, on ne saura mesurer valablement que des variations spatiales relatives de température (fronts thermiques).

#### *Applications*

Des sociétés de services météo-océaniques ont développé l'exploitation de la donnée à haute résolution temporelle qu'offrent les satellites géostationnaires (Météosat, GOES) pour le suivi de l'évolution des nappes polluantes. Ainsi, même si la résolution de 5 km des images acquises dans l'infrarouge ne permet pas l'observation des nappes de polluants ou des dégazages, elle fournit par temps clair une information sur les structures du champ de température de surface marine. Les informations, disponibles à une résolution temporelle de 3 h, sont communiquées avec des analyses des champs de vent météorologiques, lesquels peuvent être assimilés dans des modèles de simulation de dérive de nappes.

Dans le cas de faibles perturbations atmosphériques et de contrastes thermiques, ces images permettent une bonne identification des masses d'eau en mouvement.

### *Limitations*

- . Il est nécessaire d'apporter des corrections atmosphériques afin d'obtenir une température absolue.
- . La mesure infrarouge a son origine dans une couche de surface épaisse de seulement 0.02 mm. Elle peut donc ne pas être totalement significative de la température de l'océan dans l'ensemble de la couche la plus intéressante pour l'ingénieur.

## **Capteurs hyperfréquences**

Pour ceux-ci, une fois les effets atmosphériques corrigés, la mesure conduit alors au produit *émissivité*  $\times$  *température de surface*. De ces deux paramètres, le premier est celui qui varie le plus, en fonction de l'indice de réfraction et de l'état de surface de la mer.

### *Applications*

Des algorithmes, pour une part empiriques, permettent de séparer les différentes causes de variation du produit *émissivité*  $\times$  *température de surface* et ainsi d'obtenir :

- la concentration et l'âge de la glace (variation d'émissivité),
- la vitesse du vent (modification d'émissivité liée à la présence du vent :  $T_b$  augmente d'environ 1° K par m/s)
- la température de surface de la mer.

## **LES CAPTEURS ACTIFS**

Ils utilisent les hyperfréquences et appartiennent à la catégorie des radars. Il existe deux grandes familles d'instruments :

- la plus large est constituée des *radars à visée latérale*, par exemple, le SAR et le diffusiomètre,
- l'autre comprend les instruments qui visent uniquement sous le satellite, les *altimètres*.

La grandeur mesurée est la section efficace de rétrodiffusion  $\sigma_0$  : intensité rayonnée en direction du radar par unité de surface. Cette section efficace est fonction de nombreux paramètres dont, pour les océans, l'état de surface, caractérisé par les petites vagues capillaires. Ces dernières sont de longueurs d'ondes comparables à celles de l'onde radar et interagissent donc fortement (diffraction de Bragg).

### **Le diffusiomètre**

Il permet une mesure par tous les temps.

Le signal rétrodiffusé par la surface de la mer est représentatif des interactions complexes entre le vent et l'océan : dans la mesure où les vagues décimétriques sont établies localement sous l'effet du vent instantané, le signal rétrodiffusé par la surface de la mer peut être relié à la tension du vent de surface et à la vitesse de celui-ci. Les figures 14 et 15 présentent des champs de vent mesurés par le diffusiomètre du satellite ERS1.



Figure 14 - Exemple de fauchée diffusiométrique ERS1 en Atlantique Sud  
(Acquisition, visualisation et traitement MÉTÉOMER)

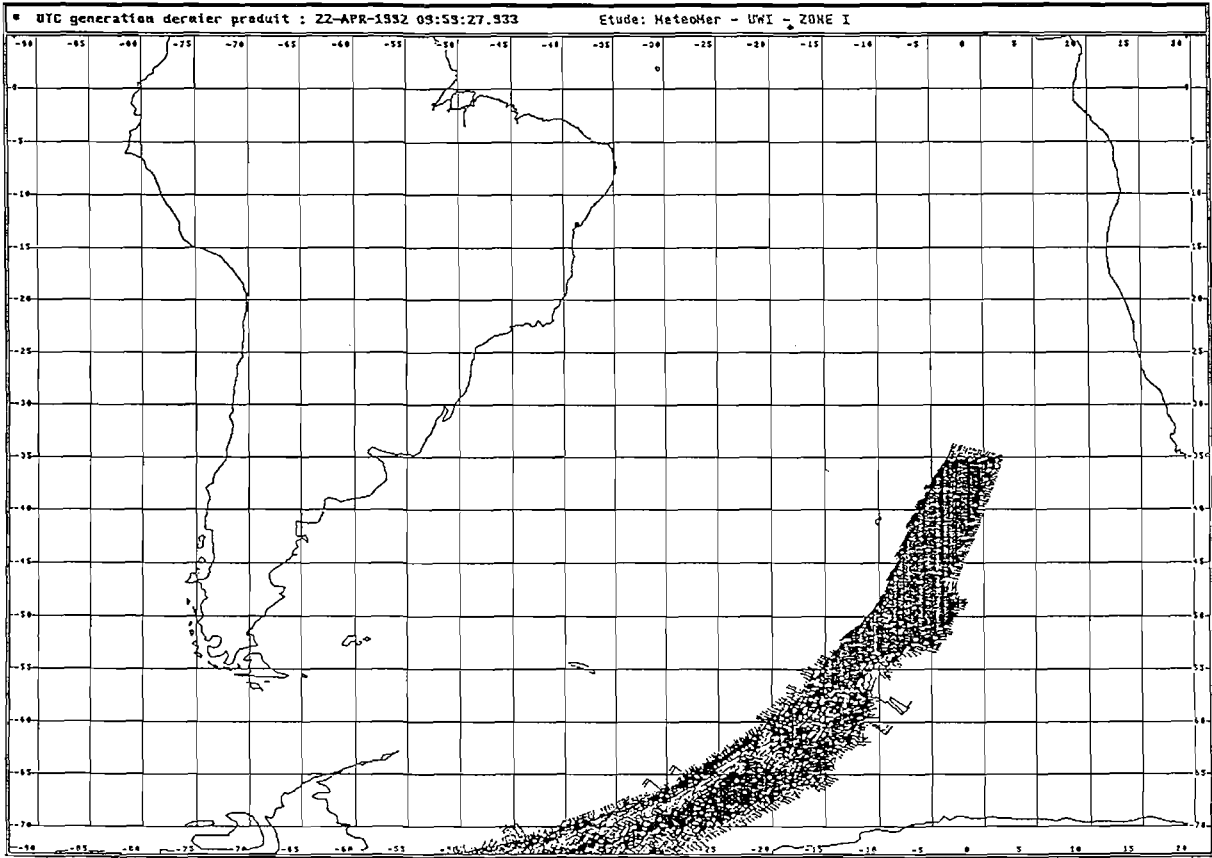
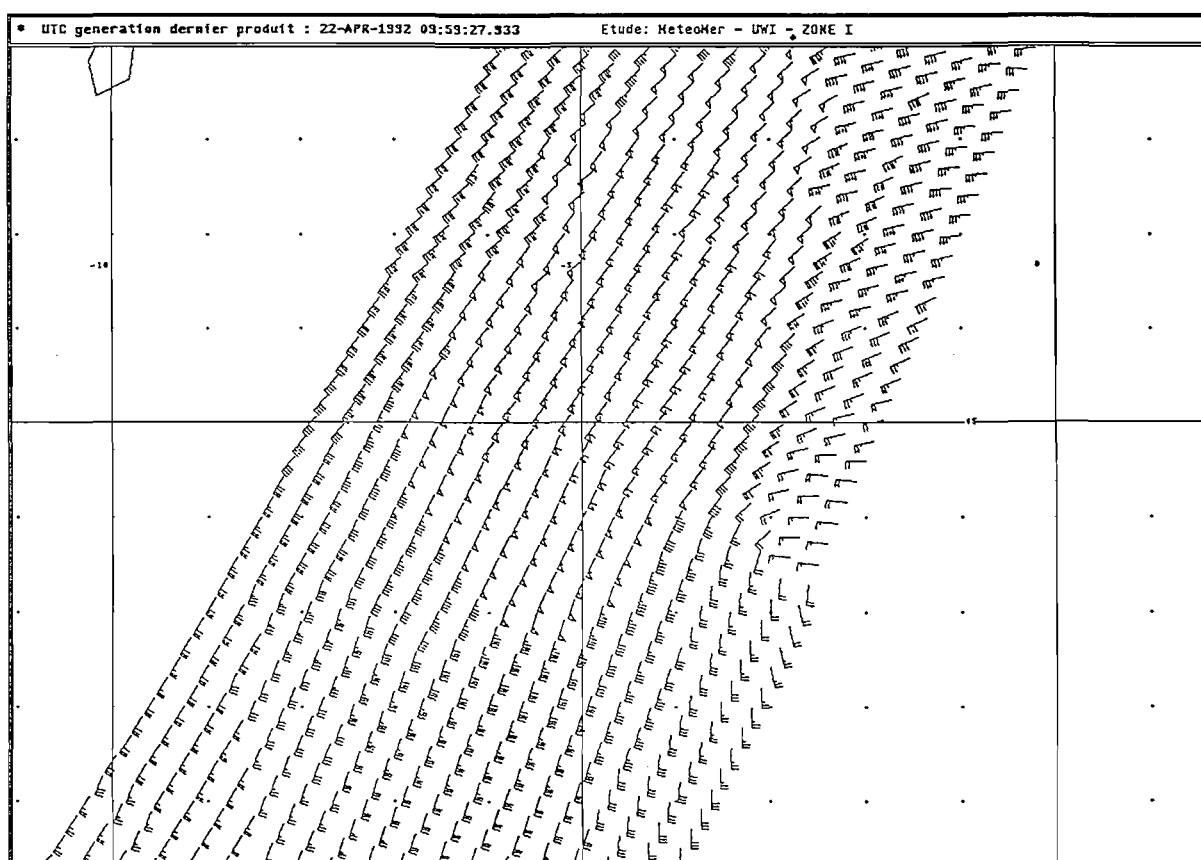


Figure 15 - Exemple de fauchée diffusiométrique ERS1 en Atlantique Sud  
(Acquisition, visualisation et traitement MÉTÉOMER)

Zoom sur la fauchée précédente de champs de vent



### *Applications*

Outre ses applications statistiques, qui profitent aux phases d'étude et de conception des travaux et ouvrages à la mer, la connaissance des vents améliore le recalage et le fonctionnement à court terme des modèles d'états de mer.

Le responsable d'une opération à la mer ou de l'exploitation d'un ouvrage utilise intensivement les prévisions d'évolution des conditions météorologiques et de l'état de mer. Actuellement, ces prévisions sont effectuées à l'aide de modèles mathématiques, mais l'expérience montre qu'il existe parfois des divergences entre les résultats. La validation et le calage des modèles de l'état de mer représentent une phase classiquement délicate en raison du manque d'observations en mer, et on saisit là tout l'intérêt des mesures satellitaires.

De plus, des travaux menés récemment en ce sens dans le cadre du LEWEX (Labrador Extreme Waves EXperiment) font apparaître clairement que la validation du champ de vent est un préalable à toute avancée significative dans le domaine de la modélisation opérationnelle des vagues. L'apport des données diffusiométriques de vents de surface apparaît fondamental en ce sens. Ces données diffusiométriques peuvent être assimilées aux champs de vent fournis classiquement par les modèles d'analyse météorologiques (données en temps réel). Ainsi, l'étude de suivi du cyclone QEI en septembre 1978 à l'aide de données diffusiométriques de GEOSAT, réalisée par Météomer, a montré l'apport de celles-ci pour affiner les champs de vent issus de modèles.

### *Limitations*

Quelques ambiguïtés peuvent persister sur la détermination de la direction du vent de surface (4 % de cas résiduels correspondant à des solutions isolées dans un champ uniforme).

Les limitations du vent à 10 m sont liées aux conditions de stabilité dans la couche limite de l'atmosphère.

Les intensités de vent fournies par le diffusiomètre ne sont pour l'instant validées que jusqu'à un seuil d'environ 25 m/s.

## **Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)**

Grâce à un filtrage adapté à des échos reçus d'un champ de récepteurs, la résolution en azimuth, parallèle à la trace au sol, passe de quelques kilomètres à la demi-longueur d'antenne, soit typiquement 5 m.

Les SAR (Synthetic Aperture Radars, ou Radars à Synthèse d'Ouverture) sont des instruments complexes par leur encombrement (antenne), leur puissance consommée, leur débit de télémesure (une centaine de Mbits/s), et leur traitement au sol. Ils permettent en contre-partie une imagerie tous temps avec une bonne résolution.

Le SAR peut fonctionner en deux modes.

- Le **mode "image"** avec une fauchée de 80 à 100 km ; l'importance du débit de télémesures ne permet pas un stockage à bord et les images ne peuvent être acquises qu'en visibilité directe d'une station au sol.
- Le **mode "vagues"** qui ne traite que des échantillons de 5 x 5 km, environ tous les 200 km dans la fauchée ; le paramètre cherché est alors le spectre directionnel de vagues.

D'une façon générale, l'écho reçu par le SAR trouve son origine dans la rétrodiffusion de Bragg, mécanisme déjà évoqué. L'amplitude des vagues de Bragg, et donc la section efficace, est modifiée par de nombreux phénomènes, qui peuvent être alors estimés.

- Les vagues longues et la houle, dont l'observabilité dépend de la direction de propagation par rapport à la direction de vol (visibilité maximale pour les vagues transversales). On peut ainsi visualiser les composantes dominantes avec évaluation de leur longueur d'onde - 100 à 1 000 m - et direction de propagation, mais pas de leur amplitude - informations apportées par le modèle "vague". La diffraction de la houle par les côtes est, en particulier, aisément observable (informations apportées par le mode "image"),
- Les ondes internes et les courants de surface, et, d'une façon générale, tous les phénomènes dynamiques provoquant des fluctuations de la vitesse superficielle,
- Les pellicules superficielles ("slicks") d'origine naturelle (biologique) ou artificielle (pollution),
- Tout changement de surface : navires, mais surtout les glaces de mer, qui peuvent être cartographiées avec une grande précision.

#### *Applications et limitations*

- **Mode "image"**

Il présente de nombreux intérêts immédiats pour les opérations en mer : observation de nappes de polluants, suivi de dérive d'objets dont la taille avoisine la centaine de mètres (pétroliers, plateformes), suivi de glaces polaires (exploitation pétrolière et navigation dans les zones sub-polaires), visualisation de courants de surface, ...

Le principal inconvénient réside dans l'obtention de ces images limitée à l'espace couvert par les stations de réception au sol (figure 13). Actuellement, celles-ci sont au nombre de sept : Kiruna (Suède), Fucino (Italie), Gatineau (Canada), Maspalomas (Espagne), les stations nationales européennes à Tromsø (Norvège) et West Freugh (Royaume-Uni), et la station allemande de l'Antarctique.

A ce problème s'ajoute celui de l'échantillonnage spatiotemporel inhérent à la mesure satellitaire.

Ces inconvénients rendent problématique le suivi de nappes polluantes (par exemple) par la seule voie de l'imagerie SAR. Toutefois, cette information serait primordiale si elle était intégrée à un système global de suivi de pollution, utilisant différents types de capteurs (passifs ou actifs).

- **Mode "vagues"**

Ce produit n'est pas encore opérationnel (été 1991). En effet, de nombreux problèmes subsistent à ce jour :

- . biais d'observation : suppression de la composante azimutale de la houle et méconnaissance de l'énergie totale,
- . problèmes théoriques pour relier l'information contenue dans un spectre d'images à l'état de surface de la mer du vent, d'une part, et à la houle, d'autre part.

Notons que les biais d'observation précédents pourraient être levés par l'utilisation de spectres d'ébauche calculés (estimation de la houle azimutale) et de la mesure altimétrique de la hauteur de vague ( $H_s$ ) pour estimer l'énergie totale.

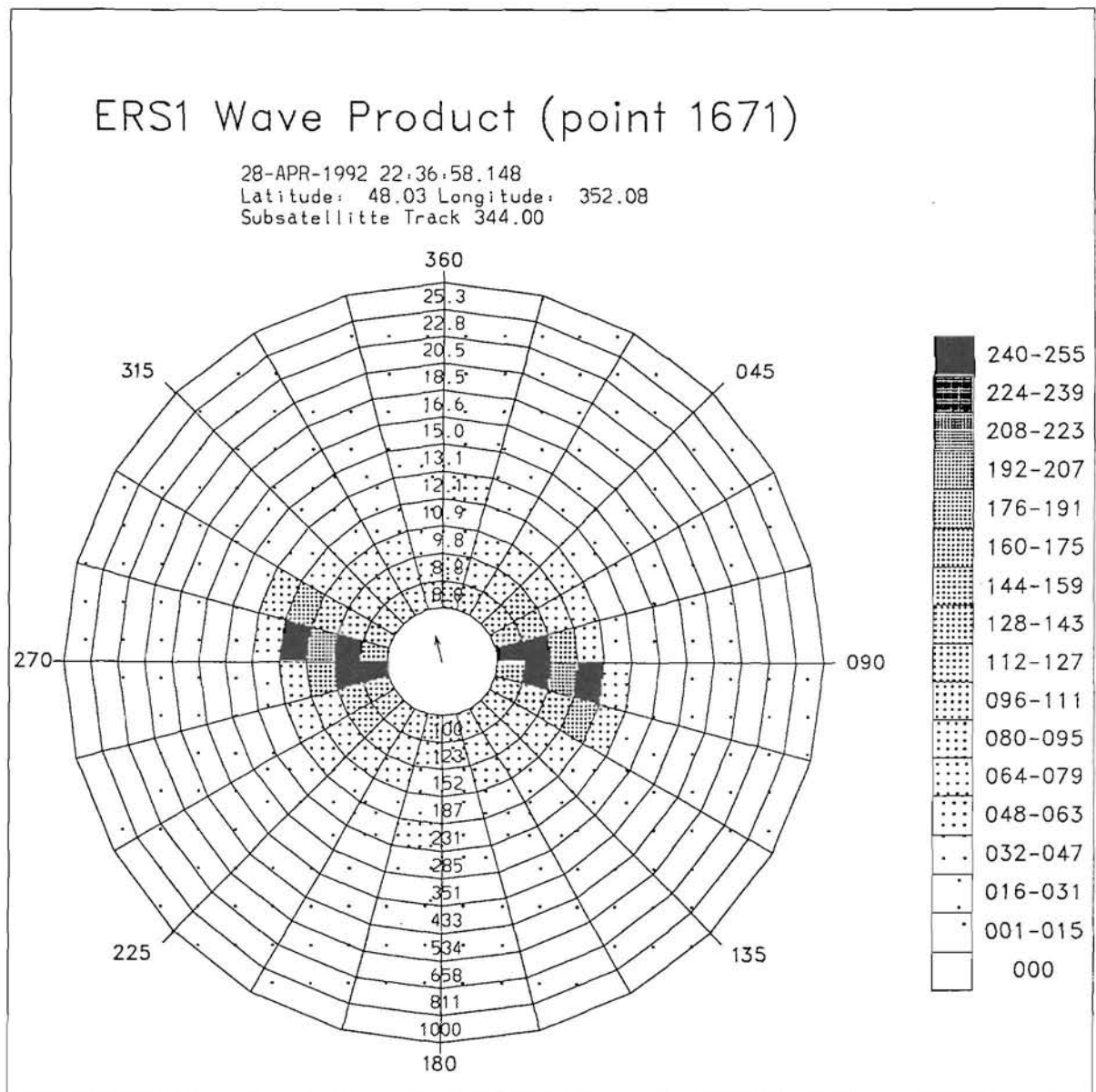
Pourtant, ces mesures devraient être très utiles pour corriger et valider les différents modèles globaux ou locaux fournissant l'information du spectre directionnel d'énergie (longueur d'ondes 100 m à 1 000 m).

Un exemple de spectre directionnel obtenu par le SAR d'ERS1 en mode vagues est donné à la figure 16.

**Figure 16 - Exemple de produit SAR en mode vague du satellite ERS1**  
(Acquisition, visualisation et traitement MÉTÉOMER)

Les énergies relatives (de 0 à 255) sont fournies :

- au pas de 15° en direction
- pour les périodes (chiffres sur la verticale supérieure) ou pour les longueurs d'onde (en mètres, chiffres sur la verticale inférieure)



Les vagues y sont représentées, en fonction de leur longueur d'onde et de leur direction, par des intensités de gris proportionnelles à leur énergie.

## L'altimètre

Les altimètres radar sont des instruments très différents des radars à visée latérale :

- ils visent à la verticale,
- ils donnent une information monodirectionnelle sous la trace du satellite, et non pas dimensionnelle du type image,
- ils sont "tous temps".

L'information principale est le temps de trajet de l'onde entre l'émission et le point à mi-puissance de l'écho. Pour l'océan, les informations suivantes sont fournies.

- Une fois connue l'altitude du satellite, on détermine l'altitude de la surface de l'océan par rapport à une surface mathématique de référence. Cette altitude est la somme des sur-(sous-)élévations dues à la circulation océanique (courants, tourbillons, marées, ...) et du géoïde,
- La hauteur significative des vagues est obtenue en mesurant la dispersion du temps de retour du signal rétro-diffusé par les creux et les crêtes des vagues (analyse de la courbe de montée du signal rétrodiffusé),
- Le niveau d'intensité du plateau atteint par la courbe de puissance reçue en fonction du temps peut être relié au module du vent de surface.

La précision obtenue sur le module du vent de surface est comparable à celle obtenue dans le cas du diffusiomètre et présente l'intérêt d'une mesure additionnelle, quoique de qualité toujours faible en vent fort. La figure 17 illustre la mesure des vagues et du vent par l'altimètre du satellite ERS1.

### *Applications et limitations*

En ce qui concerne la validation de modèles de calculs de vagues, l'altimètre est le seul instrument à fournir aux mêmes endroits des informations sur les champs de vent (vitesse) et de vagues ( $H_s$ ). Il permet ainsi une validation des interactions vents - vagues. Toutefois, le problème lié à une couverture spatiale et temporelle pour l'instant restreinte apparaît ici également.

Pour la détermination de la climatologie des états de mer sur un site, des études menées à l'Ifremer Brest ont montré la possibilité d'effectuer la caractérisation climatologique des  $H_s$  sur un site (chronologies, extrapolation) à partir des données altimétriques sur des zones concentriques autour de ce site [26].

L'intérêt est évident pour l'ingénieur, notamment en ce qui concerne la réduction immédiate et considérable des incertitudes sur les paramètres de design, particulièrement dans les régions peu fréquentées, en comparaison avec des procédés classiques comme l'utilisation d'observations compilées.

Toutefois, le vent altimétrique présente des limitations pour ce type d'études climatologiques.

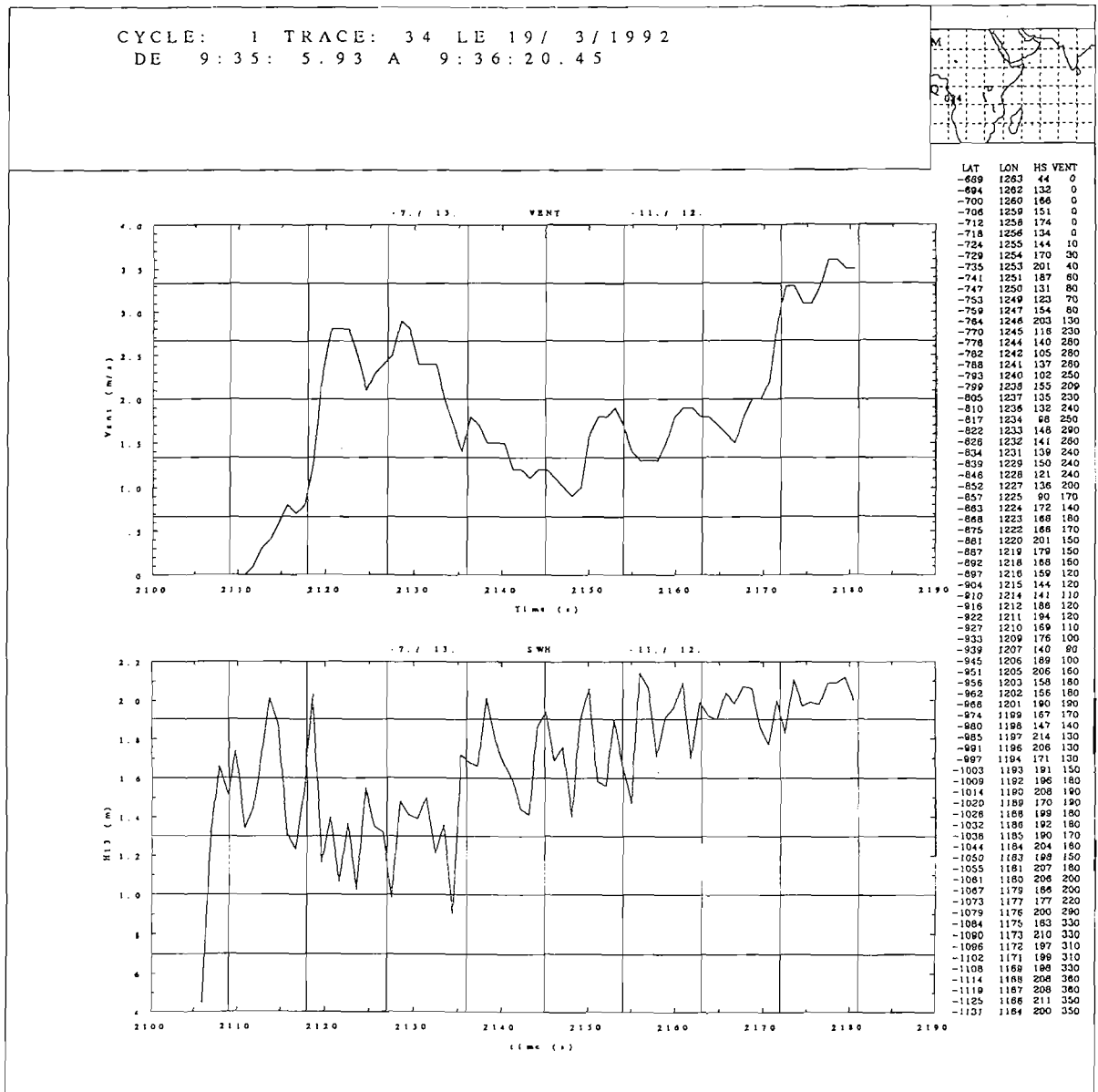
Nous évoquerons par la suite (chapitre 2.) quels paramètres météo-océaniques déterminants, utilisés par l'ingénieur de structures, peuvent être apportés opérationnellement par la télémesure.

**Figure 17 - Mesures altimétriques ERS1**  
(Acquisition, visualisation et traitement MÉTÉOMER)

Mesures altimétriques ERS1 le long d'une trace dans le *golfe de Guinée* de :

- vent (courbe supérieure)
- $H_s$  d'états de mer (courbe inférieure)

Les mesures sont faites au pas de 1s soit environ 7 km.



Nous n'avons pas épuisé le sujet "sources de données". En effet, mis à part des produits thématiques réalisés par les centres d'archivage et de traitement, la plupart des données, issues, en temps réel ou différé, des différentes sources évoquées, nécessitent un passage par des circuits complexes, schémas d'analyses ou modèles dont elles contribuent à l'amélioration et où elles se mélangent à des informations plus classiques.

L'utilisation technique de ces télémesures est souvent transparente pour l'utilisateur final mais passe nécessairement par des organismes spécialisés.

Il en ressort l'importance d'une communication et d'échanges entre ingénieries et services météo-océaniques spécialisés, les sociétés chargées de la commercialisation de certains produits élaborés (SPOT image, COSAT, ...) ou les centres "Temps Différé" pour les produits thématiques ERS1.



## CONCLUSION

### Qualité des données

La mesure en continu des paramètres océano-météorologiques est le moyen qui permet d'assurer la meilleure qualité possible des données. Elle ouvre l'accès à l'estimation des échelles de temps et des durées de stationnarité, dont la connaissance devrait être un préalable à toute réduction de la cadence de mesure.

La qualité "statistique" des données exige qu'elles incluent des valeurs extrêmes, donc rares. Il en résulte les besoins suivants :

- une durée minimale d'acquisition : les durées inférieures à un an ou n'incluant pas les saisons les plus défavorables étant à proscrire, car elles ne s'affranchissent pas des problèmes de saisonnalité,
- une analyse climatologique préalable du site pour optimiser le choix des segments de mesure et de l'éventuelle instrumentation,
- une validation poussée des données : réalité physique des grandes valeurs, calibration des chaînes de traitement, identification des pannes.

Une grande attention doit être attachée à cet aspect, d'autant plus qu'il conditionne totalement le résultat, quoique d'une manière cachée, et que son coût élevé peut faire oublier qu'un résultat non validé ou incertain ne peut être utilisé efficacement et coûte généralement beaucoup plus cher en fin de compte.

### Comparaison des sources

La mesure *in situ* reste à l'heure actuelle la source des meilleures données, car elle peut être adaptée pleinement au besoin. Il convient cependant de la compléter par les apports des autres sources, surtout dans la phase de définition de l'instrumentation. Les principales limitations des autres sources sont les suivantes :

- modèles numériques :
  - . largeur de la maille de calcul,
  - . nivellement des conditions s'écartant de la moyenne,
  - . temps et coût d'obtention,
  - . difficultés de calage;
- observations humaines : imprécision;
- mesures satellitaires :
  - . détermination de certains paramètres seulement ( $H_s$  et pas  $T_z$ ),
  - . techniques encore immatures.

## CHAPITRE 2

# MÉTHODES D'UTILISATION

## Quelques exemples

Après avoir présenté les différentes sources de données météo-océaniques : observation, mesures *in situ*, modèles numériques et télémessure spatiale, nous abordons ici quelques cas d'utilisation effective dans les calculs d'ingénierie marine.

Dans un premier temps, nous rappelons brièvement les caractérisations des phénomènes qui sont couramment utilisées, et les exigences qu'on peut avoir envers elles. Le lecteur pourra se référer au chapitre "Définition des paramètres d'environnement" du guide pratique [2] afin d'avoir des informations complètes sur ces sujets.

Dans un second temps, le rapprochement des conclusions du premier chapitre et des concepts utilisés dans les applications nous permettra de mieux cerner l'utilisation de ces sources de données par l'ingénieur selon les besoins spécifiques à plusieurs types de calcul, sous les aspects :

- paramètres météo-océaniques en entrée,
- quantité et qualité des bases de données.
- apports respectifs des différentes sources.

### Exemples d'applications en ingénierie marine

Le calcul de structure peut s'articuler selon trois axes.

- **Calcul de type statique.** On doit estimer la réponse de la structure sous le chargement extrême prévisible sur une période de temps recommandée.
- **Calcul avec effets dynamiques.** On doit estimer la réponse extrême de la structure, alors qu'elle n'est pas nécessairement créée par la sollicitation extrême. On veut donc caractériser les grands déplacements (résultant de résonances) en identifiant les états de mer susceptibles de les créer.
- **Calcul en fatigue.** On s'intéresse à l'endommagement, ou à l'érosion progressive de la résistance d'une structure à mémoire. Il convient donc ici de caractériser sous forme condensée l'ensemble de l'historique de cette mémoire.

La programmation d'une opération marine consiste à optimiser la date, le choix des moyens à mettre en oeuvre et le mode de conduite de l'opération en fonction de certaines contraintes et d'un niveau de risque à ne pas dépasser.

### Représentation des phénomènes

Globalement, il faut noter que l'analyse des données météo-océaniques servant de base à tous ces types d'études nécessite :

- une représentation stochastique;
- une caractérisation des phénomènes par leurs
  - . amplitudes et directions,
  - . périodicités et échelles de temps associées,
  - . structures de dépendance.

Suivant le type d'utilisation envisagée, on cherchera à obtenir les paramètres océano-météorologiques sous l'une ou l'autre de deux formes.

- Celle d'une distribution elle-même plus ou moins paramétrisée. C'est le cas par exemple d'un spectre d'énergie, utilisé dans un calcul dynamique, ou d'une répartition conjointe hauteurs-périodes destinée à un calcul de fatigue,
- Celle de valeurs pseudo-déterministes, comme la vague centennale.

Dans tous les cas, la qualité des paramètres dépend d'autres variables sous-jacentes, parfois moins aisées à estimer comme la stationnarité et les échelles de temps, ou les structures d'interdépendance.

Les paramètres recherchés seront, généralement

- pour la houle,  $H_{1/3}, H_{\max}, T_z, A_{c\max}$  (amplitude crête) dans les analyses temporelles,  $H_s, T_{02}, \theta$  et éventuellement forme du spectre, par exemple le  $\gamma$  de la formulation JONSWAP, pour les études spectrales,
- pour le vent,  $V$  (1 h, 10 m) et  $\theta_v$ ,
- pour le courant,  $C$  (20 mn) et  $\theta_c$ .

## CALCUL STATIQUE

Le calcul en statique va être essentiellement conditionné par les valeurs extrêmes des paramètres d'environnement qu'il faudra donc déterminer préalablement.

### PARAMÈTRES MÉTÉO-OCÉANIQUES UTILISÉS

#### Houle

Dans le cas d'analyses de mesures *in situ*, les paramètres suivants sont généralement nécessaires\*.

- Analyse temporelle Down Zero-Crossing :

$$H_{1/3}, H_{\max}, T_z \text{ ou } \bar{T}, A_{c\max}$$

- Analyse spectrale :

$$H_s, T_{02} \text{ ou } T_p, \theta \text{ (direction de propagation des vagues)}$$

Leur obtention appelle quelques remarques.

L'enregistrement continu des paramètres  $H_{1/3}$  (ou  $H_s$ ),  $H_{\max}$ ,  $A_{c\max}$ , permet d'établir la loi de distribution de ces grandeurs sur les périodes de retour considérées ;

Les méthodes classiques de détermination de  $A_{c\max}$  à partir de  $H_{\max}$  à l'aide de théories de houles périodiques s'avèrent très approximatives [22] ;

La détermination de la durée de stationnarité est une phase préalable incontournable pour les extrapolations [10].

#### Vent

Rappelons ici simplement que, pour ce type de calcul, le vent est caractérisé par des rafales et des moyennes de vitesse sur différentes durées, en général 1 h. A ces grandeurs scalaires est associée l'information direction.

Ces données nécessitent souvent un remaniement pour pouvoir être utilisées dans le calcul de structures : passage à l'altitude vraie de l'élément de structure considéré, évaluation de la valeur moyennée sur une période plus courte que lors de la mesure.

#### Courant

Les paramètres utilisés sont la vitesse, en général moyennée sur une certaine durée (10 mn, par exemple), et la direction à différentes profondeurs (profil).

D'autres paramètres météo-océaniques peuvent intervenir dans ce calcul (glaces, fouling,...). On trouvera plus de renseignements à leur sujet dans le guide pratique [2]. Un point-clé est constitué par l'évaluation du niveau moyen de la mer et de ses surélévations éventuelles : marée, tempête,...

---

\* On trouve la définition exacte dans le document [9].

## BESOINS EN QUANTITÉ ET QUALITÉ DES DONNÉES

Les concepts de base de l'analyse des données météo-océaniques pour le calcul en statique – durée de stationnarité, dynamique des grandes valeurs, ... – appellent les remarques suivantes.

- Une analyse des mesures en continu de l'état de mer est le meilleur moyen d'estimer les durées moyennes et d'obtenir la durée de stationnarité caractéristique du site.
- Les données doivent impérativement inclure des valeurs extrêmes des phénomènes météo-océaniques que l'on veut extrapoler. L'enregistrement de ces événements forts, caractérisés par leur rareté, implique :
  - . une durée minimale d'acquisition,
  - . une connaissance climatologique du site afin d'orienter les segments de mesure.
- Une mesure d'au moins un an, incluant la saison la plus défavorable, semble nécessaire.
- Il est essentiel de mesurer  $H_{1/3}$  (ou  $H_s$ ) car il caractérise l'énergie d'un état de mer, et son enregistrement continu permet d'obtenir la durée de stationnarité.

De plus,  $H_{\max}$  lui est relié :  $H_{\max}(T_{stat}) = f(H_s, T_{stat}, T_z)$ .

- La validation des données (réalité physique des grandes valeurs, nombre effectif de valeurs valides) est une phase essentielle, préalable à l'extrapolation.

## APPORT DES DIFFÉRENTES SOURCES DE DONNÉES

### Mesures *in situ*

L'ensemble des remarques précédentes souligne tout l'intérêt des mesures *in situ*, réalisées de façon fiable au cours de périodes incluant des tempêtes, pour réaliser une extrapolation de qualité.

Nous avons vu au chapitre 1 que l'analyse temporelle et/ou spectrale de l'enregistrement permet d'obtenir les paramètres météo-océaniques cités précédemment. On peut, à partir de ce point, définir l'utilisation optimale de ces mesures : durées, conditions et fréquence d'acquisition, contrôle pendant et après la campagne.

Nous rappelons ici, pour répondre aux besoins déjà cités, la nécessité de la réunion des conditions suivantes.

- *Connaissance préalable de la climatologie locale*, permettant d'orienter la campagne de mesures en termes de durée et de choix de périodes de tempêtes.
- *Compréhension de cette même climatologie*, permettant d'interpréter les mesures réalisées : tri, cohérence des valeurs, retour aux paramètres bruts pour certaines grandeurs réduites douteuses, reconstitution,....
- *Nécessité d'outils de qualité*, donnant notamment les lois des paramètres extrêmes, afin d'optimiser les calculs d'ouvrages.

Pour la mesure du courant, et en particulier pour le calcul de structures en eaux profondes, rappelons l'apport des courantomètres profileurs acoustiques à effet Doppler.

## Utilisation de modèles numériques

Afin d'obtenir les paramètres de houle nécessaires au calcul de conditions extrêmes, l'ingénieur peut avoir recours à plusieurs sources.

- Le désarchivage des résultats de modèles de calculs spectraux d'états de mer.  
Les inconvénients de ce moyen résident dans
  - . la largeur de la maille de calcul, souvent trop grande pour saisir la climatologie "fine" d'un site,
  - . les difficultés de ces modèles à restituer des conditions s'écartant de la moyenne (tempêtes, effets locaux),
  - . le temps et le coût (rapport qualité/prix) d'obtention des résultats de ces modèles.
- La reconstitution climatologique.  
A partir de différentes informations de vent disponibles sur le site (cartes de prévision, résultats de modèles numériques, observations de navires,...), des champs de vent sont élaborés par un organisme spécialisé. L'application d'un modèle permet de reconstituer des séries chronologiques de  $H_s$  et autres paramètres. Quelques dizaines de tempêtes peuvent être ainsi étudiées.

On notera que :

- l'utilisation d'un modèle ponctuel permet effectivement la caractérisation locale et spécifique d'un site ;
- l'idéal est de posséder un moyen de calage et de validation de ce modèle sur la zone étudiée ; celui-ci peut être apporté par des mesures *in situ* épisodiques, et des mesures de télédétection ;
- la combinaison { modèles numériques, télémesures } devrait permettre dans un futur proche de limiter, voire éviter, les mesures *in situ* jusqu'ici nécessaires au calcul en statique.

## La télémesure spatiale

Outre leur rôle essentiel dans la validation et le calage de modèles, des travaux récents menés par l'Ifremer à Brest ont montré la potentialité des mesures altimétriques de  $H_s$  pour caractériser en elles-mêmes la climatologie d'un site. De plus, par équivalence entre longueur de persistance sur une trace et durée de stationnarité en un point, on peut avoir accès à l'information "durée moyenne" d'un état de mer et effectuer ainsi les calculs de valeurs extrêmes. Le projet Cepm/Clarom "*Apports des données satellitaires à la connaissance appliquée de l'environnement marin*" en assurera la mise en routine opérationnelle et fournira, à partir de sites tests, une estimation :

- de la réduction d'incertitudes, par rapport aux méthodes classiques (utilisation d'atlas, reconstitution,) en l'absence de mesures *in situ* suffisantes (cas de beaucoup de zones d'intérêt),
- des délais et coûts d'obtention des paramètres de design, largement inférieurs à ceux de campagnes de mesures, sans tenir compte des problèmes de maintenance.

## **Les observations**

L'utilisation d'observations compilées dans les différents atlas peut servir d'approche pour caractériser les tendances climatologiques d'une région englobant le site à étudier. Cependant, les différentes restrictions associées à ces données en font des paramètres inutilisables par une méthodologie d'extrapolation de pointe répondant au besoin de fiabilité des calculs d'ingénierie.

## CALCUL EN FATIGUE

Le calcul en fatigue repose sur une connaissance et une paramétrisation de la distribution des états de mer et sur la caractérisation du vent, du courant et des marées.

### PARAMÈTRES MÉTÉO-OCÉANIQUES UTILISÉS

Rappelons-en ici simplement quelques traits.

- Les états de mer sont caractérisés par les couples  $H_s - T_z$ , par la durée pendant laquelle ils exercent leurs effets, ainsi que la direction d'incidence de la houle. La répartition de ces états de mer pendant la durée de vie de l'ouvrage est alors représentée par la distribution de ces paramètres.
- La caractérisation des états de mer peut être complétée par le type de spectre de vagues, par une fonction directionnelle de l'énergie des vagues, ainsi que par les valeurs de courant et de vent associées.
- Au lieu des couples  $H_s - T_z$ , les états de mer peuvent être caractérisés par les couples  $H_s - T_p$ .
- Le courant, lorsqu'il est pris en compte, est souvent représenté, de manière fortement simplifiée, par une vitesse moyenne, agissant dans la direction des vagues et se superposant à celles-ci.
- Lorsqu'il intervient dans ce calcul, le vent est caractérisé par la distribution à long terme de son intensité moyenne, par secteurs de direction, à laquelle est associée un modèle de fluctuation sous forme spectrale.

### BESOINS EN QUANTITÉ ET QUALITÉ DES DONNÉES

Les mêmes remarques que celles effectuées pour le calcul précédent peuvent être faites ici : détermination des durées moyennes, représentation fiable des états de mer, nécessité d'une analyse de cohérence des données, durée d'acquisition assez longue (6 mois à 1 an au minimum) afin de prendre en compte les aspects saisonniers.

Toutefois, les besoins en précision ne sont pas aussi stricts que pour un calcul en condition extrême, d'une part, parce que la fatigue va être créée par un grand nombre des états de mer subis par la structure (20 à 40 %), d'autre part, parce que les incertitudes sur la modélisation théorique du phénomène fatigue restent grandes.

### APPORT DES DIFFÉRENTES SOURCES DE DONNÉES

Afin d'obtenir une représentation correcte de la succession des états de mer sur une durée déterminée, les mesures *in situ* s'avèrent ici encore les plus fiables. En leur absence, on pourra faire appel aux autres sources.

Les tables fournies par les atlas de conditions de mer permettent d'obtenir des indications sur les distributions conjointes  $H_s - T_z$ , sous toutes les restrictions déjà mentionnées. Notamment, les problèmes évoqués de représentativité statistique des grandes



valeurs, d'échantillonnages larges des hauteurs et des périodes, d'incertitudes minimales de l'ordre de 30 %, sont de sérieuses limitations pour le calcul en fatigue.

Les *modèles numériques* peuvent être également utilisés pour obtenir des séries chronologiques des paramètres  $H_s, T_{02}, T_z, T_p$  ou des spectres  $S(f, \theta)$ .

Cette reconstitution doit concerner une période de durée considérable afin d'obtenir des statistiques représentatives. Dans le cas de la seule utilisation de ces modèles numériques comme base de données pour le calcul en fatigue, le coût peut en être élevé, notamment au niveau de l'acquisition des champs de vent issus de modèles météorologiques. A titre d'information, le désarchivage et l'envoi de champs de vent issus du Centre Européen de Prévision (CEP) sur l'Atlantique Sud coûte environ 15 KF/mois (été 1991).

De plus, la même remarque que précédemment peut être faite en ce qui concerne la nécessité de données supplémentaires pour "caler" le modèle, tant pour les paramètres de vent que pour ceux des vagues. Encore une fois, les mesures satellitaires s'avèrent d'une grande utilité à cette fin. Il est à noter que le coût de ces reconstitutions pourrait décroître considérablement grâce à l'utilisation intensive de champs de vent diffusiométriques archivés par un organisme spécialisé.

Les *mesures satellitaires* permettent d'obtenir la climatologie des  $H_s$ , le problème restant la détermination des périodes associées. Plusieurs moyens peuvent être envisagés :

- utilisation de formules  $T_z = f(H_s)$ ,
- reconstitution suffisante pour obtenir cette loi,
- utilisation des spectres directionnels fournis par le SAR, lorsque ce produit sera opérationnel. Notons que les principaux problèmes concernent la détermination de l'énergie totale et la levée de l'ambiguïté azimutale.

## CALCUL EN DYNAMIQUE

### PARAMÈTRES MÉTÉO-OCÉANIQUES UTILISÉS

L'échelle de temps du calcul en dynamique est celle de l'état de mer. A partir d'un enregistrement de durée limitée (20 mn environ par exemple pour une bouée), physiquement représentatif d'une durée d'état de mer sur le site, il s'agit de caractériser cet état de mer :

- *dans le domaine temporel*, à partir de l'enregistrement ou de la restitution de l'historique en continu à partir de l'analyse spectrale,
- *dans le domaine spectral* : l'état de mer est alors caractérisé par les paramètres spectraux ( $T_z$ ,  $T_{02}$ ,  $T_p$ , ...) et, éventuellement, par la connaissance du  $H_{\max}$  temporel.

Il faudra aussi être à même de choisir judicieusement un ou plusieurs états de mer, supposés générer la réponse la plus pénalisante de l'ouvrage, alors qu'ils ne sont pas nécessairement eux-mêmes extrêmes.

### BESOINS EN QUANTITÉ ET QUALITÉ DES DONNÉES

La fourniture des paramètres météo-océaniques nécessaires à ce calcul nécessite une détermination fine des états de mer caractéristiques du site, notamment lors de tempêtes. Cela présuppose une connaissance climatologique préalable du site, pour choisir les segments de mesures de tempêtes.

### APPORT SPÉCIFIQUE DES SOURCES DE DONNÉES

En l'absence des mesures *in situ* apportant seules cette précision des paramètres, l'information spectrale concernant l'état de mer peut être obtenue de diverses manières.

- *L'utilisation de modèles numériques* : le calage et la validation de ces modèles s'avèrent malgré tout nécessaires pour obtenir des spectres précis d'états de mer, notamment lors de tempêtes.
- *L'utilisation de spectres classiques* (P.M., Jonswap, ISSC, ...), définis à partir d'un ensemble de paramètres statistiques obtenus, en l'absence de mesures *in situ*, par des modèles numériques simples ou/et par les mesures satellitaires, notamment pour la hauteur significative. Les problèmes résident alors dans l'utilisation de formes spectrales et de paramètres statistiques pas toujours représentatifs du site,
- *L'utilisation de données satellitaires* pour valider des modèles, fournir le paramètre  $H_s$  à introduire dans une forme spectrale, obtenir une estimation de spectres directionnels type sur le site.

## PROGRAMMATION D'OPÉRATIONS À LA MER

Une opération à la mer est difficile à planifier car, la plupart du temps, il existe une forte interaction entre les conditions d'environnement effectivement rencontrées et le déroulement, donc les caractéristiques, de l'opération. Pour s'affranchir de cette interaction, on effectue généralement une étude par simulation aléatoire (méthode de Monte-Carlo). Cela revient à simuler sur ordinateur un grand nombre de réalisations possibles de l'opération pour plusieurs choix des paramètres modifiables, à effectuer des statistiques sur leurs résultats et sur leurs coûts et à en déduire la configuration des paramètres modifiables fournissant le meilleur compromis risque - résultat - coût.

On va donc avoir besoin de distributions pour chacun des paramètres intervenant dans la conduite de l'opération.

### PARAMETRES MÉTÉO-OCÉANIQUES UTILISÉS

Du fait que les opérations sont conduites dans des conditions dont on cherche à ce qu'elles ne soient pas trop rares, les paramètres utilisés sont ceux des conditions moyennes, soit ceux du calcul en fatigue auxquels il faut ajouter :

- les durées de persistance, probabilités pour qu'un seuil donné ne soit pas dépassé pendant une période continue de longueur donnée ;
- certains paramètres supplémentaires, comme la cambrure ou les groupements de vagues, susceptibles de créer des situations délicates ;
- éventuellement, des probabilités d'événements ponctuels, comme le passage d'une onde interne.

### BESOINS EN QUANTITÉ ET QUALITÉ DES DONNÉES

On peut généralement se satisfaire pour la préparation des opérations de représentations des données beaucoup plus frustes que pour le calcul des structures. En effet, il suffira d'une faible différence dans le dimensionnement d'une structure pour que la différence de prix décide de l'attribution d'un contrat, ou pour distinguer entre la résistance aux conditions extrêmes et la ruine. Par contre, s'il est certain qu'un ouvrage rencontrera au cours de sa durée de vie des conditions extrêmes, il est heureusement exceptionnel que les opérations à la mer soient conduites à la limite entre le possible et l'impossible. De plus, des solutions de rechange sont généralement disponibles, et des décisions peuvent être prises en temps réel.

Il n'en demeure pas moins nécessaire de conserver une certaine prudence et de ne pas abandonner tout esprit critique sous prétexte d'exigences moindres.

### APPORT SPÉCIFIQUE DES SOURCES DE DONNÉES

Compte tenu des besoins plus limités en qualité des données, toutes les sources peuvent être utilisées sans restriction. On se tourne donc principalement vers les atlas, qui sont les plus économiques.

Pour des sites présentant des particularités très locales, on fait appel au météorologue, qui étudie ces spécificités.

Les données *in situ*, s'il en est de disponibles, compléteront utilement ces statistiques globales, mais il ne paraît pas justifié d'entreprendre spécialement de campagne de mesures.

## CONCLUSION

Pour l'ensemble des besoins considérés, les mesures *in situ* constituent la source d'informations la plus fiable et la plus riche pour la détermination de paramètres météorologiques et de leurs statistiques pour l'ingénieur chargé du calcul d'ouvrages en mer.

Toutefois, l'avenir semble être, au moins pour certains axes de calcul (les valeurs extrêmes, le calcul en fatigue), dans l'utilisation combinée des mesures satellitaires (altimétriques et diffusiométriques de façon opérationnelle, SAR en mode vague au stade expérimental), de modèles numériques et d'un volume beaucoup plus réduit de mesures *in situ* (segments de tempêtes par exemple ou validation ponctuelle).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Andrews, K.S., Dawnka, N.M.C. and Hogben, N.  
*Wave Climate Synthesis*  
NMI Report No R 149, London, January 1893.
- [2] CLAROM  
*Design Guides for Offshore Structures : Environmental Forces on Offshore Structures*  
Technip, en cours d'édition, 1992.
- [3] Dawnka, N.M.C. and Hogben N.  
*The development of a new global Atlas of Wave Statistics*  
Journal of Navigation, London, January 1985.
- [4] Gorshkov, S.G.  
*World Ocean Atlas*  
Volumes disponibles en 1986 (Pergamon Press) :  
Vol. 1 : Pacific Ocean  
Vol. 2 : Atlantic Ocean  
Vol. 3 : Arctic Ocean
- [5] Hogben, N. and Lumb, F.E.  
*Ocean Wave Statistics*  
HMSO London, 1967 (out of print).
- [6] Hogben, N., Dawnka N.M.C. and Olliver G.F.  
*Global Wave Statistics*  
British Marine Technology Limited, Feltham, Middlesex, TW 14 OLQ.
- [7] Hogben, N., Dawnka, N.M.C. and Andrews, K.S.  
*Wave Climate Synthesis Worldwide*  
Proceeding of International Symposium on Wave and Wind Climate Worldwide, RNA  
London, April 1984.
- [8] Hogben, N. and Dawnka, N.M.C.  
*Wave Climate Synthesis : some Recent Advances*  
Proceedings of the Offshore Technology Conference, Paper No OTC 4938, OTC,  
Houston, May 1985.
- [9] IAHR  
*List of Sea State Parameters*  
J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 115 , n° 6, pp. 793-808.
- [10] Labeyrie, J.  
*Time Scales and Statistical Uncertainties in the Prediction of Extreme Environmental Conditions*  
Reliability Engineering and Systems Safety, 32, 1991, pp. 243-266.

- [11] MIAS (Marine Information and Advisory Service)  
*Catalogue of Wave Data*  
Institute of Oceanographic Sciences, Wormley, 1982.
- [12] MIAS  
*Catalogue of wave prediction models*  
Marine Information and Advisory Service, Institute of Oceanographic Sciences, MIAS  
Reference Publication 5, 1983, United Kingdom.
- [13] *Meteorological Office Marine Observer's Handbook*  
London, HMSO, 1977
- [14] *Oceanographic Atlas of the North Atlantic Ocean*  
Publication No 700 of the U.S. Naval Oceanographic Office, US Government Printing  
Office, Washington, 1963.
- [15] O.M.M.  
*Guide de l'analyse et de la prévision des vagues*  
Publication OMM, n° 702, 1990.
- [16] O.M.M.  
*WMO Wave Program - National reports for 1984 on wave measuring techniques,  
numerical wave models and intercomparaison*  
WMO Marine Meteorology and Related Oceanography Activities, 1985, Report n° 12.
- [17] O.M.M.  
*Manuel de l'assistance météorologique aux activités maritimes*  
Publication OMM n° 588.
- [18] O.M.M.  
*Manuel des Codes*  
Publication OMM n° 306.
- [19] O.M.M.  
*Compendium of Lecture Notes in Marine Meteorology for Class III and Class IV  
Personnel*  
(prepared by Dr. H.O. Mertins) WMO, Geneva.
- [20] O.M.M.  
*Handbook on Marine Meteorological Services*  
WMO/TD - No 348, 1990 edition.
- [21] Pashawsky, D., Quayle, R.G., Baldwin, R.G., Karl, J.R. and Zimmerman, K.G.  
*Wind and Wave summaries for selected US Coastguard Operating Areas*  
Report No C6-D-11-83 NOAA/US Department of Transportation, April 1983.
- [22] Robin, A. and 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.

- [23] Shearman, R.J.  
*The Meteorological Office Main Marine Data Bank*  
 The Meteorological Magazine No 1326, vol. 112, January 1983.
- [24] The SWAMP Group  
*Ocean Wave Modelling*  
 Plenum Press, 1985, 256 pp.
- [25] Takashi, Y., Matsumoto, T. and Ohmatsu, S.  
*Winds and Waves of the North Pacific Ocean 1964-1973*  
 Report of Ship Research Institute, Tokyo, March 1980.
- [26] Tournadre, J. and Ezraty, R.  
*Local Climatology of Wind and Sea State by Means of Satellite Radar Altimeter Measurements*  
 J. of Geophysical Research, 95, 1990, pp. 18255-18268.
- [27] U.S. Navy Marine Climatic Atlas of the World.  
 Vol. I : North Atlantic Ocean (1974)  
 Vol. II : North Pacific Ocean (1977)  
 Vol. III : Indian Ocean (1976)  
 Vol. IV : South Atlantic Ocean (1978)  
 Vol. V : South Pacific Ocean (1979)  
 Vol. VIII : The World (1969)  
 Vol. IX : Worldwide Means and Standard Deviations (1981)  
 U.S. Government Printing Office Washington
- [28] Yamanouchi, Y. and Ogawa, A.  
*Statistical Diagrams of the Winds and Waves on the North Pacific Ocean*  
 Publié par le Japanese Ship Research Institute, Tokyo 1970.

# **ANNEXES**

**NOMENCLATURE  
ADRESSES  
MODÈLES NUMÉRIQUES de VAGUES**





## NOMENCLATURE

$A_{cmax}$	Hauteur, au dessus du niveau moyen, de la plus grande crête d'un état de mer.
C (20 mn)	Vitesse du courant, moyennée sur 20 minutes.
$H_{1/3}$	Hauteur moyenne du tiers supérieur de la distribution des vagues, quantité dont la hauteur significative est généralement un bon estimateur.
$H_{m0}$	Hauteur significative des vagues, estimée à partir de l'aire sous le spectre.
$H_{max}$	Hauteur de la plus grande vague d'un état de mer.
$H_{\sigma}$	Hauteur significative des vagues, estimée à partir de la variance de l'élévation de la surface libre.
$H_s$	Hauteur significative des vagues.
$H_v$	Hauteur des vagues estimée par observation visuelle.
$\theta$	Direction d'où viennent les vagues.
$\theta_v$	Direction d'où provient le vent.
$\theta_c$	Direction vers laquelle se dirige le courant.
$T_{02}$	Période des vagues donnée par la racine du rapport des moments spectraux d'ordre 0 et 2.
$T_p$	Période des vagues donnée par le pic le plus élevé du spectre.
$T_{stat}$	Durée pendant laquelle un état de mer est stationnaire.
$T_v$	Période des vagues estimée par observation visuelle.
$T_z$	Période moyenne des vagues, entre passages successifs (décroissants) au niveau moyen.
V (1 h, 10 m)	Vitesse du vent moyennée sur 1 heure et rapportée à la hauteur standard de 10 mètres.



## ADRESSES

- BUREAU VERITAS  
La Défense 2 - Cedex 44  
92077 PARIS LA DÉFENSE  
France  
Téléphone : (33) 1 42 91 52 91 - fax : 1 42 91 53 45  
Télex : 614 149
- CERSAT  
Ifremer - B.P. 70  
29280 PLOUZANÉ  
France  
Téléphone : (33) 98 22 40 40 - fax : 98 22 45 33  
Télex : 940 627
- CLAROM  
c/o Ifp - B.P. 311  
92506 RUEIL-MALMAISON  
France  
Téléphone : (33) 1 47 49 02 14 - fax : 1 47 49 04 11  
Télex : 203 050
- CLS ARGOS  
18, avenue Édouard-Belin  
31055 TOULOUSE Cedex  
France  
Téléphone : (33) 61 39 47 84 - fax : 61 75 10 14  
Télex : 531 752 F
- ECMWF  
Shinfield Park  
READING RG2 9AX  
Royaume-Uni  
Téléphone : (44) 734 499 000 - fax : 734 869 450  
Télex : 847 908
- EOSAT  
4300 Forbes Bld.  
LANHAM, Maryland 20706  
U.S.A.  
Téléphone : (1) 301 552 0500
- ESA  
8-10 rue Mario Nikis  
75738 PARIS Cedex 15  
France  
Téléphone : (33) 1 42 73 72 84 - fax : 1 42 73 75 60

- IFREMER  
Centre de Brest - B.P. 70  
29280 PLOUZANÉ  
France  
Téléphone : (33) 98 22 40 40 - fax : 98 22 45 45  
Télex : 940 627
  
- MÉTÉO-FRANCE  
Service Prévisions Marines  
42, avenue Coriolis  
31057 TOULOUSE Cedex  
France  
Téléphone : (33) 61 07 80 80 - fax : 61 07 80 09
  
- MÉTÉOMER  
Quartier Les Barestes - R.N. 7  
83480 PUGET-sur-ARGENS  
France  
Téléphone : (33) 94 45 66 11 - fax : 94 45 68 23  
Télex : 470 446
  
- METEOROLOGICAL OFFICE  
London road  
BRACKNELL  
Berkshire, RG12 2SZ  
Royaume-Uni  
Téléphone : (44) 344 420 242
  
- NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER  
NOAA, NCDC  
Federal Building  
ASHEVILLE, NC 28801  
U.S.A.  
Téléphone : (1) 704 259 0682 - fax : 704 259 0876
  
- OMM  
41 Giuseppe Motta - B.P. 5  
CH - 1211 GENÈVE 20  
Suisse  
Téléphone : (41) 22 34 64 00 - fax : 22 34 23 26
  
- ORSTOM  
213, rue Lafayette  
75010 PARIS  
France  
Téléphone : (33) 1 48 03 77 77 - fax : 1 48 03 08 29
  
- RNODC (Waves)  
Institute of Oceanographic Sciences  
Brook Road

Wormley  
GODALMING  
Surrey GU8 5UB  
United Kingdom  
Télex : 858 833 OCEANS 6

- SHOM  
B.P. 426  
29275 BREST Cedex  
France  
Téléphone : (33) 98 03 09 17 - fax : 98 80 75 11
- SISMER / IFREMER  
Centre de Brest - B.P. 70  
29280 PLOUZANÉ  
France  
Téléphone : (33) 98 22 40 40 - fax : 98 22 45 45  
Télex : 940 627
- UMR39/GRGS  
18, avenue Édouard-Belin  
31055 TOULOUSE Cedex  
France  
Téléphone : (33) 61 33 29 01 - fax : 61 25 32 05
- consulter également le catalogue *Services météorologiques du monde* édité par l'O.M.M.

**Numerical wave models used by the National Meteorological Services**  
Use of Numerical Models for the Prediction and Retrospective Simulation of Waves

COUNTRY	NAME OF MODEL	AREA	GRID	TYPE OF MODEL	PRODUCTS	ORIGIN OF WIND DATA
Germany	German Weather Service	Atlantic, north of 15°N	Rectangular stereographic	Coupled hybrid deep water	Forecasts at 6 hrs, then twice per day at 12 hr intervals up to 96 hrs, verifications only	BKF, model wind at 950 hPa level interpolated diagnostically for approx 20 m above sea level
Saudi Arabia	Advective singular	5°N-45°E, 20°N-70°E, 30°N-30°E, 43°N-55°E Red Sea & The Gulf	28.1 km	Advective singular shallow water	Charts of significant wave heights & periods at 6 hr intervals	Numerical analysis model: near coasts numerical simulation of onshore breeze & calculation of gradient wind considering friction
USA	NOW Global model (NOAA Ocean wave model) (CMN/NOAA)	Whole world	2.5° x 2.5°	Spectral deep water	Forecasts at 72 hours	Atmospheric model for medium term prediction of the CMN
	SOWM - Fleet Numerical Oceanography Centre	North Pacific, North Atlantic, Indian Ocean & Mediterranean	Icosahedral gnomonic	Deep water propagation de-coupled	Forecasts at 72 hrs in steps of 6 hrs, significant height, primary & secondary periods, wave directions, probability of white horses on polar stereographic grid	NWP FNOC world model
France	DSA 5 *	Grid 50 x 30 in oblique stereographic projection, centred 45°N 40°E Atlantic, 40°N 15°E Mediterranean	Atlantic 85 Nm Mediterranean 45 Mm	Deep water propagation de-coupled	1) Equal height charts 2) Directional spectra 3) Atlantic: complete sea state analysis at 6 hr intervals	Geostrophic wind modified by friction at 1000 mb level supplied by AMA French model
India	Sverdrup Munk Bretschneider	Seas surrounding India	—	Deep water single SMB	Wave predictions	—

\* Validation studies for the DSA 5 model using SEASAT satellite measurements have resulted in its replacement by the VA6 model.

**Modèles numériques de vagues exploités par des Services météorologiques nationaux**

PAYS	NOM DU MODÈLE	DOMAINE	GRILLE	TYPE DU MODÈLE	PRODUITS	ORIGINE DES DONNÉES DE VENT
Allemagne	Deutscher Wetterdienst	Atlantique, au nord du 15°N	stéréographique rectangulaire	Hybride couplé eau profonde	Pronostics à 6 heures, puis 2 fois par jour à intervalles de 12 h jusqu'à 96 heures, vérifications seulement	Modèle BFK, vent au niveau de 950 hPa interpolé diagnostiquement pour environ 20m au-dessus de la mer
Arabie Saoudite	Singulier advection	5°N 45°E, 20°N-70°E, 30°N-30°E 43°N-55°E mer Rouge	28,1 km	Singulier advection eau peu profonde	Cartes hauteurs et périodes significatives vagues à intervalles de 6 heures	Modèle d'analyse numérique ; près des côtes, simulation numérique brise de mer et calcul d'un vent du gradient tenant compte du frottement
États-Unis d'Amérique	NOW Global model (NOAA Ocean wave	Monde entier	2,5° x 2,5°	Spectral eau profonde	Prévisions à 72 heures	Modèle atmosphérique de prévision à moyenne échéance du CMN
	SOWM - Fleet Numerical Oceanography	Pacifique Nord Atlantique Nord océan Indien et Méditerranée	Gnomonique icosahédrale	Découplé propagation eau profonde	Prévisions à 72 heures par pas de 6 heures hauteur significative, périodes primaire et secondaire et direction des vagues, probabilité de moutons sur grille stéréographique polaire	Modèle mondial NWP FNOG
France	DSA 5*	Grille 50 x 30 en projection stéréographique oblique centrée 45°N et 40°E	Atlantique 85 nm Méditerranée 45m.m.	Découplé propagation eau profonde	1) Cartes des isohauteurs 2) Spectres directionnels 3) Atlantique : analyses complètes état de la mer à intervalles de 6 heures	Vent géostrophique modifié par le frottement au niveau de 1000 mb fourni par modèle français AMA
Hong-Kong	—	5°-35°N 105°-135°E	Mercator 2,5° x 2,5°	Découplé propagation eau profonde	Rétrospectives et prévisions à 72 h de vagues et houle aux points de grille toutes les 12 heures - cartes	Rétrospectives : vents 2,5° obtenus par analyse objective observations du vent à intervalles 6 heures. Prévisions : vents du gradient obtenus par pronostics NWP de pression en surface
Inde	Sverdrup-Munk Bretschneider	Mers entourant l'Inde	—	BSMB simple eau profonde	Prévisions de vagues	—

\* Des études de validation du modèle DSA5 à l'aide de mesures satellitaires SEASAT ont abouti à son remplacement par le modèle VA6.



COUNTRY	NAME OF MODEL	AREA	GRID	TYPE OF MODEL	PRODUCTS	ORIGIN OF WIND DATA
Hong Kong	—	5°-35°N, 105°-135°E	Mercator 2.5° x 2.5°	Deep water propagation de-coupled	Retrospective reports & forecasts at 72 hrs of waves & swell at grid points every 12 hrs - charts	Hindcasts: 2.5° winds from objective wind observations analysis every 6 hrs. Predictions: gradient winds obtained by NWP forecasts of surface pressure
Japan	—	West Pacific North	381 km in open sea, 127 km close to Japan	Deep water propagation de-coupled	Facsimile chart for 24 hr prediction, daily	Surface winds calculated from air pressure & temperature at surface assessed with NWP model
Malaysia	Modified GONO	South China Sea & Strait of Malacca - equator 18°N, 100°-118°E	2° x 2°	Deep water & shallow water coupled hybrid	Daily predictions for immediate future & predictions of waves, wind speed & direction, swell by points	Surface winds at grid points
Norway	WINCH (version of SAIL)	North Atlantic, Norwegian, Barents & North Seas	75 km square, transverse Mercator	Deep water coupled discrete	Production possible every 2 hrs, wave fields & spectra at selected points	Wind fields forecasts drawn up by Norwegian Meteorological Institute
New Zealand	—	SW Pacific including Tasman Sea & Southern Ocean	20 x 15 Cartesian, 381 km at 60°S	Deep water propagation de-coupled	Waves: daily combined equal height charts with primary & secondary direction arrows, analyses & forecasts at 24 & 48 hrs. Swell: 24 hrs	Quasi-geostrophic regional NWP model at 5 levels, coupled with surface winds in a two-layer model of the planetary boundary layer
Netherlands	GONO	North Sea & Norwegian Sea	75 km, deep Cartesian stereographic	Deep water & shallow water coupled hybrid	Production of analysis charts every 6 hrs & prediction of wind sea at 6-36 hrs	Baroclinic numerical model at 4 atmospheric levels initialised with analysis of atmospheric pressure
United Kingdom	Fine mesh	Continental shelf, including North Sea & British coastal waters	Polar stereographic, 25 km at 60°N	Coupled discrete, up to a depth of 200 m with a resolution of 2 m	North Sea: analysis & prediction of swell height, period & direction, significant wave heights on charts & at selected grid points. Coastal areas: prediction in tables, wind, waves, wind sea & swell	Hourly wind predictions at the lowest level of the model by NWP operating model
	Broad mesh	North Atlantic & North Pacific	Polar stereographic, 150 km at 60°N	Deep water coupled discrete	N Atlantic, N Pacific: analysis & prediction charts of significant wave height & direction. Height, period & direction of swell, also wind sea waves height & direction for N Atlantic	Wind predictions at intervals of 1.5 hr at the lowest level of the model by NWP operating model
	Mediterranean	Mediterranean	Polar stereographic, 50 km at 60°N	Deep water coupled discrete	Analysis & prediction charts for significant wave heights & directions. Height, period & direction of swell	Hourly wind predictions at the lowest level of the model by NWP operating model
Sweden	NORSWAM	North Sea	100 km	Deep water coupled hybrid	Wave predictions	—

PAYS	NOM DU MODÈLE	DOMAINE	GRILLE	TYPE DU MODÈLE	PRODUITS	ORIGINE DES DONNÉES DE VENT
Japon	—	Ouest Pacifique Nord	381 km au large, 127 km près du Japon	Découplé propagation eau profonde	Carte facsimilé de prévision à 24 heures, quotidiennement	Vents en surface calculés à partir des pression et température de l'air en surface évaluées avec un modèle NWP
Malaisie	GONO modifié	Sud mer de Chine et détroit de Malacca -équateur 18°N, 100-118° E	2° x 2°	Hybride couplé eau profonde et peu profonde	Quotidiennement prévisions pour immédiat et prévisions des vagues, vitesse et direction du vent, houle par points	Vents en surface aux points de grille
Norvège	WINCH (version du SAIL)	Atlantique Nord mers Norvège Barents et Nord	75 km carrés, Mercator transversale	Discret couplé eau profonde	Production possible toutes les 2 heures champs et spectres de vagues à endroits sélectionnés	Pronostics champs de vent établis par Institut météorologique norvégien
Nouvelle-Zélande	—	Pacifique Sud-Ouest (y compris mer de Tasmanie et océan austral)	Cartésienne 20 x 15, 381 x 60°S	Découplé propagation eau profonde	Vagues : quotidiennement cartes iso-hauteurs combinées, avec flèches de direction primaires et secondaires, analyses et pronostics à 24 et 48 heures Houle : à 24 heures	Modèle NWP régional quasi-géostrophique à 5 niveaux, couplé avec vents en surface d'un modèle bi-couche de la couche limite planétaire
Pays-Bas	GONO	Mers du Nord et de Norvège	75 km, stéréographique cartésienne	Hybride couplé eaux profondes et peu profondes	Production toutes les 6 heures de cartes d'analyse et prévision à 6-36 heures de la mer du vent	Modèle numérique barocline à 4 niveaux de l'atmosphère initialisé avec une analyse de la pression atmosphérique
Royaume-Uni	Maille fine	Plateau continental y compris mer du Nord et eaux côtières britanniques	Stéréographique polaire, 25 km au 60°N	Discret couplé, allant jusqu'à 200 m de profondeur avec une résolution de 2m	Mer du Nord : analyses et prévisions hauteur, période et direction houle, hauteur significative vagues sur cartes et à points grille sélectionnés. Zones côtières : prévision en tableaux; vent, vagues, mer du vent et houle.	Prévisions horaires de vent au plus bas niveau du modèle par modèle d'exploitation NWP
	Maille large	Atlantique Nord et Pacifique Nord	Stéréographique polaire 150 km au 60°N	Discret couplé eau profonde	Atlantique N et Pacifique N : cartes d'analyse et prévision hauteur significative et direction vagues, hauteur, période et direction vagues mer du vent pour Atlantique Nord	Prévisions de vent à intervalles d'une heure et demie au plus bas niveau du modèle d'exploitation NWP
	Mediterranean	Méditerranée	Stéréographique polaire, 50km au 60°N	Discret couplé eau profonde	Cartes d'analyse et prévision hauteur significative et direction vagues, hauteur, période et direction houle	Prévisions horaires de vent au plus bas niveau du modèle par modèle d'exploitation NWP
Suède	NORSWAM	Mer du Nord	100 km	Hybride couplé eau profonde	Prévisions de vagues	—

**Numerical wave models used by bodies other than NMSs (available on request \*)**  
 Use of Numerical Models for the Prediction and Retrospective Simulation of Waves

COUNTRY	NAME OF MODEL	AREA	GRID	TYPE OF MODEL	PRODUCTS	ORIGIN OF WIND DATA
Denmark	DHI (Danish Hydraulic Institute)	North Sea 50°N-65°N or according to user specifications	11-55 km Cartesian	Coupled discrete deep water & shallow water	Two-dimensional spectra at grid points specified by user	Danish Meteorological Institute or according to user specifications
USA	Storm model of the Marine Environments Corporation	Any ocean taken separately	10-120 Nm Option	De-coupled propagation deep water & shallow water as an option	Directional spectra for each time step used in calculations	Extra-tropical storms: meteorological charts & shipboard observations. Tropical storms: wind fields modelled with variable parameters
	Single ocean model of the Marine Environments Corporation	Any ocean taken separately, very much used in the South China Sea	40-120 Nm Lambert conform or modified spherical	De-coupled propagation deep water with shallow water outputs	Directional spectra normally supplied at 6 hr intervals for selected points	Meteorological charts & shipboard observations at 6 hr intervals, with vector interpolations for time step internal to the model
	Global model of the Marine Environments Corporation	Entire world	120 Nm Lambert conform in each hemisphere	De-coupled propagation deep water with shallow water outputs	Directional spectra, generally supplied at 6 hr intervals for selected points	Meteorological charts & shipboard observations at 6 hr intervals, with vector interpolations for time step internal to the model
	Discrete deep water wave - Hindcast Mode of Coastal Engineering Research Center	According to user specifications	120 Nm orthogonal spherical for smaller areas	Coupled discrete deep water	Wave spectra & wave field parameters. Climatology available for wave data obtained by retrospective simulation	Either direct input of wind speed & direction, or input supplied by wind model using surface observations of atmospheric pressure, sea temperature & wind
	SAIL Oceanweather	Various - Gulf of Mexico, Oceans and Mediterranean	75 km square in transverse or direct Mercator	Coupled discrete deep water	Wave predictions	Tropical cyclones: numerical modelling; other systems: man/machine combination

\* These are models which have been indicated as being available for special projects either through the national meteorological services, or otherwise.

**Modèles numériques de vagues exploités par des organismes autres que des SMN (disponibles à la demande\*)**

PAYS	NOM DU MODÈLE	DOMAINE	GRILLE	TYPE DU MODÈLE	PRODUITS	ORIGINE DES DONNÉES DE VENT
Danemark	DHI (Danish Hydraulic Institute)	Mer du Nord 50°N-65°N ou selon spécifications usager	Cartésienne 11-55 km	Discret couplé eaux profonde et peu profonde	Spectres bidimensionnels aux points de grille spécifiés par usager	Institut météorologique danois ou selon spécifications usager
États-Unis d'Amérique	Storm model de la Marine Environments Corporation	N'importe quel océan pris séparément	10-120 n.m.  Option	Découplé propagation eau profonde et eau peu profonde en option	Spectres directionnels pour chaque pas de temps utilisé dans calculs	Tempêtes extra-tropicales : cartes météo et observations navires, Tempêtes tropicales : champs de vent modélisés avec paramètres variables
	Single ocean model de la Marine Environments Corporation	N'importe quel océan pris séparément, très utilisé en mer de Chine méridionale	40-120 n.m. conforme de Lambert ou sphérique modifiée	Découplé propagation eau profonde avec sorties eau peu profonde	Spectres directionnels ordinairement fournis à intervalles 6 heures pour endroits sélectionnés	Cartes météo et observations navires à intervalles 6 heures, avec interpo- lations vecteurs pour pas de temps interne modèle
	Global model de la Marine Environments Corporation	Monde entier	120 n.m. conforme de Lambert dans chaque hémis- sphère	Découple propagation eau profonde avec sorties eau peu profonde	Spectres directionnels, généralement fournis à intervalles 6 heures pour endroits sélectionnés	Cartes météo et observations navires à intervalles 6 heures, avec interpo- lations vectorielles pour pas de temps interne modèle
	Discrete deep water wave-Hind- cast Mode du Coastal Engineering Research Center	Selon spécifications usager	120 n.m. sphériques orthogonales pour zones plus petites	Discret couplé eau profonde	Spectres vagues et paramètres champ vagues. Climatologie disponible de données vagues obtenues par simulation rétrospective	Soit entrée directe vitesse et direction vent, soit entrée fournie par modèle vent utilisant observations en surface de pression atmosphérique, tempéra- ture mer et vent
	Shallow water wave transformation model du Coastal Engineering Research Center	Zones côtières ouvertes	—	Transfert radiatif tenu fixe à toute profondeur finie (de fait, discret couplé)	Paramètres champ vagues. Climatologie disponible de données vagues et houle obtenues par simulation rétrospective	Entrée directe vitesse et direction vent

\* Il s'agit des modèles dont on a signalé qu'ils étaient disponibles pour des projets spéciaux soit par l'intermédiaire des services météorologiques nationaux, soit autrement.

COUNTRY	NAME OF MODEL	AREA	GRID	TYPE OF MODEL	PRODUCTS	ORIGIN OF WIND DATA
USA (continued)	Shallow water wave transformation model of Coastal Engineering Research Center	Open coastal areas	—	Radiated transfer held fixed at any finite depth (in fact, coupled discrete)	Wave field parameters. Climatology available for wave & swell data obtained by retrospective simulation	Direct input of wind speed & direction
	ODGP Oceanweather	Various - Gulf of Mexico & Oceans	Square of 60 Mm in transverse Mercator or direct - 10 Mm fine mesh, often used	De-coupled propagation deep water & shallow water in Gulf of Mexico	Wave predictions	Tropical cyclones: numerical modelling; other systems: man/machine combination
	Hindcast model of Offshore & Coastal Technologies Inc.	Various	120 Mm to less than 1 Mm, projections vary	Discrete coupled hybrid coupled, any depth	Normally 1 or 2 dimensional spectra height fields, period & wave direction	Meteorological or pressure field models - boundary layer with additional kinematics analysis diagram
Netherlands	GONO-WL	According to user specifications	Cartesian 50-150 km	Hybrid coupled, deep & shallow water min 15 m	Two-dimensional spectra at grid points specified by user	According to user specifications. Auxiliary software available
	STROBO-field	Shallow coastal waters, according to user specifications	Between 200 x 200 m <sup>2</sup> & 500 x 500 m <sup>2</sup>	Coastal propagation de-coupled	Display of differences in wind, energy density & wave direction	User specifications
	CREDIZ	Shallow coastal waters, according to user specifications	Between 20 x 20 m <sup>2</sup> & 50 x 50 m <sup>2</sup>	Coastal areas propagation de-coupled	Display of differences in wind, energy density and isophase lines	User specifications
	GOLDHA	Ports, shallow & coastal waters according to user specifications	Between 5 x 5 m <sup>2</sup> & 20 x 20 m <sup>2</sup>	Monochromatic diffraction shallow water	Display of differences in wave height	User specifications
	DIFHA	Entry of waves into ports, according to user specifications	Port configuration replaces grid	Monochromatic, constant depth	Wave height and monochromatic wave phase at specified points in a port basin. Printed outputs.	No wind data

PAYS	NOM DU MODÈLE	DOMAINE	GRILLE	TYPE DU MODÈLE	PRODUITS	ORIGINE DES DONNÉES DE VENT
États-Unis d'Amérique (suite)	Oceanweather ODGP	Divers - Golfe du Mexique et océans	Carré de 60 m.m. en Mercator transversale ou directe - maille fine 10 m.m, souvent utilisée	Découplé propagation eau profonde et eau peu profonde dans Golfe du Mexique	Prévisions vagues	Cyclones tropicaux : modélisation numérique ; autres systèmes : combinaison homme/machine
	Oceanweather SAIL	Divers - Golfe du Mexique, océans et Méditerranée	Carré 75 km en Mercator t transversale ou directe	Couplé discret eau profonde	Prévisions vagues	Cyclones tropicaux : modélisation numérique ; autres systèmes : combinaison homme/machine
	Hindcast model de Offshore and Coastal Technologies Inc.	Divers	De 120 m.m. à moins d'1 m.m. Projections varient	Discret couplé hybride couplé, toute profondeur	Normalement 1 ou 2 spectres dimensionnels champs hauteurs, période et direction vagues	Modèles météo ou champ pression - couche limite avec schéma analyse cinématique supplémentaire
Pays-Bas	GONO-WL	Selon spécifications usager	Cartésienne 50-150 km	Hybride couplé, eaux profondes et peu profonde minimum 15 m.	Spectres bidimensionnels aux points de grille spécifiés par usager	Selon spécifications usager. Logiciel auxiliaire disponible
	GONO-field	Eaux côtières peu profondes, selon spécifications usager	Entre 200 x 200 m <sup>2</sup> et 500 x 500 m <sup>2</sup>	Découplé propagation côtières	Visualisation des écarts de vent, de densité d'énergie et de direction des vagues	Spécifications usager
	CREDIZ	Eaux côtières peu profondes, selon spécifications usager	Entre 20 x 20 m <sup>2</sup> et 50 x 50 m <sup>2</sup>	Découplé propagation zones côtières	Visualisation des écarts de vent, de densité d'énergie et des lignes d'isophase	Spécifications usager
	GOLDHA	Ports, eau peu profonde et côtières selon spécifications usager	Entre 5 x 5 m <sup>2</sup> et 20 x 20 m <sup>2</sup>	Diffraction monochromatique eau peu profonde	Visualisation des écarts de la hauteur vagues	Spécifications usager
	DIFHA	Entrée des vagues dans les ports, selon spécifications usager	Configuration port remplace grille	Monochromatique, profondeur constante	Hauteur vagues et phase ondes monochromatiques aux endroits spécifiés d'un bassin portuaire. Sorties imprimées.	Pas de données de vent

**Numerical wave models - experimental**  
Use of Numerical Models for the Prediction and Retrospective Simulation of Waves

COUNTRY	NAME OF MODEL	AREA	GRID	TYPE OF MODEL	PRODUCTS	ORIGIN OF WIND DATA
Canada	————	East Coast Canada	————	Spectral discrete deep water	Wave predictions	————
USA	GSOWM of Fleet Numerical Oceanography Center (was to replace SOWM at end of 1985)	Entire world	2.5° spherical	De-coupled propagation deep water	48 hr predictions (optionally 120) by 12 hr steps significant & maximum heights, primary & secondary periods & wave direction, probability of white horses, on 2.5° spherical world grid	NWP FNOG numerical weather prediction world model
	Great Lakes Environmental Research Laboratory of US ERL	Great Lakes	15 x 15 km squares for Lakes Superior, Michigan & Huron, 10 x 10 km for Erie & Ontario	Hybrid coupled deep water	Charts at any specified time, or time series, for height, period of spectral peak & wave direction for entire lake	Local forecasters
	Directional spectral of Coastal Engineering Research Center	As far as shore to same scale as Continental shelf	Squares of variable dimensions	Discrete coupled from deep water to shore	Wave spectra & wave field parameters such as significant height, peak frequency & mean direction	Specifications of wind speed & direction in space function supplied by an external source
WAM International Group	————	Entire world	————	3rd generation	10 day wave world predictions	————
India	DOLPHIN	Cyclone storms seas surrounding India	Cartesian, according to user specifications	————	Wave predictions & hindcasts	Indian Meteorological Department
Norway	NOWAMO	Norwegian Sea, Barents Sea, North Sea, NE Atlantic	Polar stereographic 75 km	Hybrid coupled deep water	Spectra & heights of waves for wind sea/swell	Retrospective wind fields supplied by Norwegian Meteorological Institute

**Modèles numériques de vagues – expérimentaux**

PAYS	NOM DU MODÈLE	DOMAINE	GRILLE	TYPE DU MODÈLE	PRODUITS	ORIGINE DES DONNÉES DE VENT
Canada	—	Côte est Canada	—	Spectral discret eau profonde	Prévisions vagues	—
États-Unis d'Amérique	GSOWM du Fleet Numerical Oceanography Center (devait remplacer SOWM fin 1985)	Monde entier	Sphérique 2,5°	Découplé propagation eau profonde	Prévisions à 48 heures (éventuellement 120) par pas de 12 heures hauteurs significatives et maximales, périodes primaire et secondaire et direction vagues, probabilité moutons, sur grille mondiale sphérique 2,5°	Modèle mondial NWP FNOC de prévi- sion numérique du temps
	Great Lakes Environmental Research Labora- tory of US ERL	Grands lacs	Carrés 15 x 15 km pour les lacs supérieur, Michigan, Huron, 10 x 10 pour Érié et Ontario	Hybride couplé eau profonde	Cartes à tout instant spécifié, ou séries temporelles, de hauteur, période de pic spectral et direction vagues pour ensem- ble du lac	Prévisionnistes locaux
	Directional spectral du Coastal Engineering Research Center	Jusqu'au rivage à échelle plateau continental	Carrés de dimen- sion variable	Discret couplé de l'eau profonde au rivage	Spectres vagues et paramètres champ vagues tels que hauteur significative, fréquence de pic et direction moyenne	Spécifications vitesse et direction vent en fonction espace fournies par une source extérieure
Groupe International WAM	—	Monde entier	—	3 <sup>ème</sup> génération	Prévisions mondiales vagues à 10 jours	—
Inde	DOLPHIN	Tempêtes cycloniques mers entourant l'Inde	Cartésienne, selon spécifications usager	—	Prévisions et rétrospectives vagues	Département météorologique indien
Norvège	NOWAMO	Mers Norvège, Barents, Nord, NE Atlantique	Stéréographique polaire 75 km	Hybride couplé eau profonde	Spectres et hauteurs vagues mer du vent/houle	Champs rétrospectifs vent fournis par Institut météorologique norvégien



COUNTRY	NAME OF MODEL	AREA	GRID	TYPE OF MODEL	PRODUCTS	ORIGIN OF WIND DATA
Netherlands	GOAT	North Atlantic	3000 km Cartesian stereographic projection	Hybrid coupled deep water	Charts at 12 hr intervals total significant equal heights for waves & mean directions waves & swell; analyses & forecasts up to 144 hrs	Wind fields at 1000 mb level supplied by CEPMMT atmospheric model. Wind speed adjusted to 10 m level
	DOLPHIN	According to user specifications	Cartesian, according to user specifications	Hybrid coupled in frequencies, directions, de-coupled in deep or shallow water	Significant heights & periods for waves, dominant direction, 1 dimensional (f) & 2 dimensional (f, 0) spectra at variable points for specified periods	User specifications (auxiliary software)
	HISWA	Restricted coastal areas & estuaries according to user specifications	Cartesian according to user specifications	Hybrid coupled in frequencies, de-coupled in directions, shallow water	Significant height, mean period, mean direction & angular scatter for waves, printed outputs percentage of breakers & information about energy transfer, paths of vectors or isohypses obtained by retrospective simulation	Wind assumed constant in time & space
	REFDIF	Ports, shallow coastal waters, according to user specifications	Rectangular, 5 x 5 m <sup>2</sup> to 20 x 20 m <sup>2</sup>	Shallow water refraction, diffraction method, monochromatic approach	—	User specifications
Sweden	NORSWAM	Baltic Sea	—	Hybrid coupled deep water	Wave predictions	—

PAYS	NOM DU MODÈLE	DOMAINE	GRILLE	TYPE DU MODÈLE	PRODUITS	ORIGINE DES DONNÉES DE VENT
Pays-Bas	GOAT	Atlantique Nord	Cartésienne 3000 km projection stéréographique	Hybride couplé eau profonde	Cartes à intervalles de 12 heures iso-hauteurs significatives totales vagues et directions moyennes vagues et houles ; analyses et prévisions jusqu'à 144 heures	Champs de vent au niveau 1 000 mb fournis par modèle atmosphérique CEPMMT. Vitesse vent ajustée au niveau de 10 m
	DOLPHIN	Selon spécifications usager	Cartésienne, selon spécification usager	Hybride couplé en fréquences, découplé en directions, eau profonde ou peu profonde	Hauteurs et périodes significatives vagues, direction dominante, spectres unidimensionnel f et bidimensionnel (f,o) à endroits variables pour échéances spécifiées	Spécifications usager(logiciel auxiliaire
	HISWA	Zones côtières restreintes et estuaires selon spécifications usager	Cartésienne selon spécifications usager	Hybride couplé en fréquences, découplé en directions, eau peu profonde	Hauteur significative, période moyenne, direction et dispersion angulaire moyennes vagues, sorties imprimées pourcentage de déferlantes et infos sur transfert d'énergie, tracés de vecteurs ou d'isophyses obtenus par simulation rétrospective	Vent supposé constant dans temps et espace
	REFDIF	Ports, eaux côtières et peu profondes, selon spécifications usager	Rectangulaire de 5 x 5 m <sup>2</sup> de 20 x 20 m <sup>2</sup>	Réfraction eau peu profonde, méthode diffraction, approche monochromatique	—	Spécifications usager
Suède	NORSWAM	Mer Baltique	—	Hybride couplé eau profonde	Prévisions vagues	—

Imprimé par INSTAPRINT S.A.  
1-2-3, levée de la Loire – LA RICHE – B.P. 5927 – 37059 TOURS Cedex  
Tél. 47.38.16.04

Dépôt légal 4<sup>ème</sup> trimestre 1992