

UNIVERSITE DU SUD TOULON VAR

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présenté par

Michel BENOIT

Ingénieur Ecole Centrale Paris
Ingénieur-chercheur EDF R&D LNHE

sur le thème

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ETATS DE MER ET DES VAGUES, DEPUIS L'OCEAN JUSQU'AUX OUVRAGES COTIERS

Version provisoire - 21 Mars 2006

Travail effectué sous la direction scientifique de :

Pr. Philippe FRAUNIE Université du Sud Toulon Var (LSEET-LEPI)

et soutenu publiquement à Toulon le 19 Mai 2006 devant un Jury composé de :

Rapporteurs : Pr. Jurjen A. BATTJES Delft University of Technology (Delft, NL)
Pr. Michel BELORGEY Université de Caen Basse Normandie
Pr. Frédéric DIAS, Ecole Nationale Supérieure Cachan (CMLA)

Examineurs : Dr. Fabrice ARDHUIN HDR, SHOM/CMO (Brest)
Dr. Philippe BONNETON HDR, Université Bordeaux I (DGO/METHYS)
Dr. Bernard MOLIN HDR, EGIM (Marseille)

Avant-propos - Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier chaleureusement le Professeur Philippe Fraunié, qui a accepté sans hésiter et avec enthousiasme de diriger ce travail de préparation à l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) à l'Université du Sud Toulon Var (USTV). Ses conseils m'ont guidé tout au long de la rédaction du mémoire et de la préparation de la soutenance. Avec lui, je remercie l'Université du Sud, où je compte plusieurs connaissances dans le domaine de la recherche liée aux vagues et à l'hydrodynamique côtière, notamment au sein du laboratoire LSEET-LEPI et/ou à l'ISITV, en particulier Philippe Forget et Vincent Rey, avec qui j'ai toujours beaucoup de plaisir à collaborer ou à échanger sur des sujets scientifiques.

Je suis particulièrement honoré d'avoir l'occasion de présenter mes travaux devant un Jury composé de personnes hautement compétentes et pour qui j'ai beaucoup d'estime et de respect. Je remercie notamment les Professeurs Emérites Jurjen Battjes et Michel Belorgey, ainsi que le Professeur Frédéric Dias d'avoir bien voulu consacrer de leur temps pour intervenir comme rapporteurs sur ce mémoire, en dépit de leurs nombreuses activités et obligations. J'ai une pensée particulière pour chacun d'eux : pour Michel Belorgey, qui a été le premier à m'encourager à préparer cette HDR, pour Frédéric Dias dont j'apprécie beaucoup les travaux réalisés avec les scientifiques les plus prestigieux (Prof. Vladimir Zakharov notamment), et enfin pour Jurjen Battjes qui compte parmi les quelques personnalités mondiales qui ont le plus marqué les dernières décennies dans les domaines de l'hydraulique maritime et du génie côtier. Merci également à Fabrice Ardhuin du SHOM, Philippe Bonneton du DGO de l'Université de Bordeaux I et Bernard Molin enseignant-chercheur à l'EGIM d'avoir accepté d'intervenir comme examinateurs de ce travail. C'est une grande satisfaction pour moi que tous les membres de ce Jury aient accepté spontanément et avec enthousiasme l'invitation que je leur avais envoyée.

J'ai également une pensée émue pour les collègues que j'ai côtoyés quotidiennement au LNH, puis au LNHE, depuis plus de 15 ans que je travaille à EDF R&D (anciennement Direction des Etudes et Recherches d'EDF). Je ne peux ici les citer tous ; néanmoins, je souhaiterais en mentionner quelques uns. D'abord Bernard Latteux, qui m'a accueilli et encadré comme stagiaire au LNH en 1989, auprès duquel j'ai beaucoup appris et qui reste encore une référence pour moi sur bien des aspects. Bruno Manoha, alors Chef du Groupe Hydraulique Maritime du LNH, m'a embauché en 1990 et a largement contribué à mon intégration au sein de ce Groupe. J'ai eu la chance de travailler avec des chercheurs, ingénieurs et techniciens qui ont participé au développement de mes compétences et de mon expérience : Florence Dhellemmes et Philippe Péchon en matière de vagues, Jean Allilaire, Michel Barcouda, Philippe Donnars, Claude Bobin, Jean-Michel Menon en matière de modélisation expérimentale, Jean-Michel Hervouet, Jean-Marc Janin et François Lepeintre en matière d'hydraulique maritime et de modélisation numérique, etc. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec des collègues alliant compétences et bonne humeur, parmi lesquels Elisabeth Ben Slama, Catherine Villaret, Catherine Le Normant, Thierry Boulet, Daniel Fritsch, Frédéric Marcos (avec qui j'ai développé le code TOMAWAC), Eric Peltier, Didier Rougé et René Samie.

J'ai eu aussi la chance de recruter, d'encadrer ou de participer à la formation de chercheurs plus jeunes auxquels j'ai essayé de transmettre à mon tour un peu de mes connaissances, entres autres : Géraldine Bellue, Florence Lafon, Marilyne Luck, Cécile Machet, Thierry Denot, Antoine Garapon, Mustafa Guesmia, Damien Violeau. Je n'oublie pas des collègues arrivés plus récemment au LNHE, Céline Cheviet, Cyrille Abonnel, Arnaud Lénes, Clément Buvat, Réza Issa, avec qui les discussions (techniques, mais aussi sur des sujets très divers !) sont toujours intéressantes et animées. J'ajoute à cette liste, Françoise Becq-Girard dont j'ai eu plaisir à co-encadrer les travaux de thèse avec Philippe Forget, et avec qui je travaille encore régulièrement. Je remercie aussi les autres thésards et post-docs que j'ai suivis, et les nombreux stagiaires que j'ai encadrés ou co-encadrés.

Je remercie aussi les Equipes de Direction de EDF R&D et du LNHE (en particulier Pierre-Louis Viollet, Directeur des Laboratoires d'EDF R&D ; Charles Teisson, Chef du département LNHE ; Jean-Christophe Fournier, chef du Groupe Hydraulique à Surface Libre et Exploitation du LNHE) qui m'ont encouragé dans cette démarche de préparation d'HDR, ont facilité la rédaction du mémoire en me permettant d'utiliser les outils et l'environnement de travail du LNHE, et ont pris en charge une partie des frais liés à la publication du mémoire et à l'organisation de la soutenance à Toulon.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude « aux miens » : mes parents Jeanne et André à qui je dois tant (il faudrait bien plus que ces quelques lignes pour passer en revue tout ce qu'ils m'ont transmis et appris à l'école et dans la vie...), ma sœur Isabelle et mon frère Daniel qui sont des complices d'un soutien sans faille, et au travers d'eux l'ensemble de ma famille, dispersée sur les contreforts du Ventoux ou du Luberon, en Provence. Et pour conclure cette liste, un énorme merci à ceux qui partagent ma vie au quotidien et qui m'ont toujours soutenu et encouragé, bien qu'ayant forcément un peu « pâti » de cette aventure par le temps que j'y ai consacré : ma compagne Géraldine, et mes « petits » (qui le sont de moins en moins pour les deux premiers !) : Marion, Nicolas et Paul.

Organisation générale de ce mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre grandes parties :

La **partie A** (Présentation du candidat et description de ses activités) propose une description succincte des quatre grands types d'activités que j'ai menées au LNHE depuis plus de 15 ans :

- **Activités de recherche** (cf. § A.2)
- **Activités d'études et projets appliqués** (pour EDF ou des tiers) (cf. § A.3)
- **Activités de management** (cf. § A.4)
- **Activités d'enseignement et de formation** (cf. § A.5)

En complément, le paragraphe A.6 présente mes **activités d'encadrement de recherches** (thésards, stagiaires, ingénieurs et techniciens) et de participation à des jurys de thèse et le paragraphe A.7 décrit mes implications dans des **activités scientifiques internationales** (affiliations à des sociétés savantes, participation à des groupes de travail nationaux et internationaux, membre des comités de lecture)

La **partie B** (Présentation détaillée des activités scientifiques de recherche et développement) présente les résultats principaux de mes travaux de recherche. Cette partie détaille la présentation d'ensemble proposée dans la Partie A.2. Après un paragraphe d'introduction (§ B.1), les quatre paragraphes suivants sont consacrés aux grands thèmes de recherche qui structurent mon activité scientifique :

- **Analyse et caractérisation des vagues et états de mer** (cf. § B.2).
- **Modélisation spectrale des états de mer et interactions houle-marée-courants-surcotes** (cf. § B.3)
- **Cinématique et propagation des vagues en zone côtière** (cf. § B.4)
- **Action de la houle sur les ouvrages maritimes** (cf. § B.5)

En complément, le paragraphe B.6 donne un descriptif sommaire des principaux logiciels scientifiques que j'ai développés ou co-développés.

La **Partie C** (Publications, articles, rapports, présentations) liste l'ensemble des **publications** que j'ai rédigées ou co-rédigées, en distinguant :

- les **articles** de conférences et de revue (cf. § 0),
- les **présentations** lors de séminaires et réunions de projets européens (cf. § C.2),
- les **rapports d'études et de recherches** (cf. § C.3).

Enfin, la **Partie D** (Annexes) contient les textes complets de **neuf publications sélectionnées**, permettant d'exposer plus en détail certains aspects de mes travaux de recherche.

Sommaire général

A. PRESENTATION DU CANDIDAT ET DESCRIPTION DE SES ACTIVITES.....	11
A.1. PARCOURS PROFESSIONNEL - DOMAINES DE COMPETENCES	13
A.1.1. Formation – Diplômes	13
A.1.2. Domaines de compétences - Spécialités	13
A.1.3. Parcours professionnel.....	14
A.2. ACTIVITES DE RECHERCHE	15
A.2.1. Introduction	15
A.2.2. Analyse et caractérisation des vagues et états de mer.....	15
A.2.2.1. Vue d'ensemble de la thématique.....	15
A.2.2.2. Analyse statistique et spectrale.....	16
A.2.2.3. Analyse non-linéaire en zone côtière.....	16
A.2.2.4. Analyse directionnelle des états de mer – Spectres directionnels.....	17
A.2.2.5. Caractérisation directionnelle des états de mer.....	17
A.2.3. Modélisation spectrale des états de mer et interactions houle-marée-courants-surcotes	18
A.2.3.1. Vue d'ensemble de la thématique.....	18
A.2.3.2. Modélisation spectrale des états de mer – Code TOMAWAC	18
A.2.3.3. Interactions houle-marée-courants-surcotes	20
A.2.3.4. Base de données d'états de mer par simulation numérique	21
A.2.4. Cinématique et propagation des vagues en zone côtière	22
A.2.4.1. Vue d'ensemble de la thématique.....	22
A.2.4.2. Prédiction de la cinématique des vagues en zone côtière	23
A.2.4.3. Modélisation de la propagation des vagues en zone côtière	24
A.2.4.4. Etude particulière du déferlement et de ses conséquences sur l'hydrodynamique côtière.....	26
A.2.5. Action de la houle sur les ouvrages maritimes	27
A.2.5.1. Vue d'ensemble de la thématique.....	27
A.2.5.2. Structures verticales perforées.....	27
A.2.5.3. Digue à talus	28
A.2.5.4. Structures isolées en mer (de type pieux)	28
A.2.5.5. Structures posées sur le fond marin	29
A.3. ACTIVITES D'ETUDES ET PROJETS APPLIQUES.....	30
A.3.1. Etudes et projets liés aux ouvrages EDF	30
A.3.1.1. Etudes liées aux centrales électriques en bord de mer	30
A.3.1.2. Etudes liées à l'implantation d'éoliennes en mer.....	32
A.3.2. Etudes et projets pour des tiers (hors-EDF).....	33
A.3.2.1. Etudes océano-météo et conditions de projet pour les sites côtiers	33
A.3.2.2. Etudes d'aménagements portuaires (courantologie, agitation)	33
A.3.2.3. Etudes de stabilité d'ouvrages maritimes et côtiers	33
A.4. ACTIVITES DE MANAGEMENT.....	35
A.4.1. Fonctions hiérarchiques à EDF R&D	35
A.4.2. Management de partenariats et animation d'équipe de recherche	36
A.4.3. Management de projets à caractère scientifique ou technique.....	37

A.5. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE FORMATION	38
A.5.1. Enseignements réguliers en écoles d'ingénieur	38
A.5.1.1. Ecole Centrale Paris (ECP).....	38
A.5.1.2. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)	39
A.5.2. Enseignements occasionnels (Ecoles d'ingénieurs et Universités).....	39
A.5.3. Conférences et séminaires de formation	40
A.6. ENCADREMENT DE CHERCHEURS, INGENIEURS, STAGIAIRES ET TECHNICIENS – PARTICIPATION A DES JURYS DE THESE	41
A.6.1. Encadrement de stages (élèves ingénieur, DEA, Master).....	41
A.6.2. Encadrement de thèses et de chercheurs post-docs	43
A.6.3. Participation à des jurys de thèse.....	45
A.6.4. Encadrement et formation de techniciens et d'ingénieurs du LNHE.....	46
A.6.4.1. Formation de jeunes chercheurs du LNHE	46
A.6.4.2. Pilotage d'ingénieurs de recherche	46
A.6.4.3. Encadrement et formation de techniciens	47
A.7. AFFILIATIONS - ACTIVITES SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES	49
A.7.1. Participations à des sociétés savantes	49
A.7.2. Club pour les Actions de Recherche sur les Ouvrages en Mer (CLAROM)	49
A.7.3. Groupes de travail WAM et WISE sur la houle et les états de mer	49
A.7.4. Groupe de travail européen « Rock Manual »	50
A.7.5. Comités scientifiques et comités de lecture de conférences	51
A.7.6. Comités de lecture de revues et de conférences internationales	51
A.7.7. Expertises scientifiques et techniques.....	52
B. PRESENTATION DETAILLEE DES ACTIVITES SCIENTIFIQUES DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT.....	53
B.1. INTRODUCTION – VUE D'ENSEMBLE DES TRAVAUX	55
B.2. ANALYSE ET CARACTERISATION DES VAGUES ET ETATS DE MER.....	56
B.2.1. Analyse omnidirectionnelle des houles naturelles	56
B.2.1.1. Analyse statistique (omnidirectionnelle) des états de mer	56
B.2.1.2. Analyse spectrale (omnidirectionnelle) des états de mer	58
B.2.2. Approche non-linéaire par l'analyse bi-spectrale	61
B.2.2.1. Problématique de l'analyse non-linéaire des états de mer	61
B.2.2.2. Définition du bi-spectre, de la bi-phase et de la bi-cohérence	62
B.2.2.3. Interprétations physiques du bi-spectre	63
B.2.2.4. Utilisation de l'analyse bi-spectrale pour les états de mer côtiers	64
B.2.3. Analyse directionnelle des états de mer – Spectres directionnels.....	70
B.2.3.1. Introduction et définitions.....	70
B.2.3.2. Les différents systèmes de mesure de houle multidirectionnelle	71
B.2.3.3. Principe de l'analyse directionnelle des états de mer	72
B.2.3.4. Les méthodes d'analyse multidirectionnelle développées.....	73
B.2.3.5. Vue d'ensemble de nos recherches sur l'analyse directionnelle	74
B.2.3.6. Traitement de mesures de bouées directionnelles de houle	75
B.2.3.7. Conclusions générales des analyses directionnelles	79
B.2.4. Caractérisation directionnelle des états de mer.....	80
B.2.4.1. Introduction – Problématique – Objectifs des recherches.....	80
B.2.4.2. Paramètres directionnels des états de mer	80
B.2.4.3. Critères directionnels de bimodalité des états de mer.....	82
B.2.4.4. Résultats sur les paramètres et critères directionnels.....	83
B.2.4.5. Vue d'ensemble et retombées de nos travaux	86
B.3. MODELISATION SPECTRALE DES ETATS DE MER ET INTERACTIONS HOULE-MAREE-COURANTS-SURCOTES	87
B.3.1. Modélisation spectrale des états de mer – Code TOMAWAC	87

B.3.1.1.	Introduction - Utilisation du code WAM.....	87
B.3.1.2.	Genèse du développement du modèle d'états de mer TOMAWAC	88
B.3.1.3.	Principe du code TOMAWAC	89
B.3.1.4.	Amélioration de la physique de TOMAWAC	90
B.3.2.	Interactions houle-marée-courants-surcotes	92
B.3.2.1.	Interactions houle-marée-courants-surcotes – Couplage TOMAWAC - TELEMAC-2D	92
B.3.2.2.	Projet européen ECAWOM (MAST 2)	94
B.3.3.	Base de données d'états de mer par simulation numérique	95
B.4.	CINEMATIQUE ET PROPAGATION DES VAGUES EN ZONE COTIERE	100
B.4.1.	Modèles locaux de cinématique des vagues en zone côtière	100
B.4.1.1.	Théories analytiques à fond plat	101
B.4.1.2.	Méthode numérique non-linéaire exacte à fond plat.....	101
B.4.1.3.	Méthode semi-empirique pour des fonds en pente	102
B.4.1.4.	Méthodes de fonction de transfert	103
B.4.2.	Modélisation de la propagation des vagues en zone côtière	104
B.4.2.1.	Modèles déterministes de propagation des vagues en zone côtière	105
B.4.2.2.	Modèles spectraux de propagation des vagues en zone côtière	116
B.4.2.3.	Modèles probabilistes de propagation des vagues en zone côtière	118
B.4.3.	Déferlement des vagues et conséquences sur l'hydrodynamique côtière.....	119
B.5.	ACTION DE LA HOULE SUR LES OUVRAGES MARITIMES	122
B.5.1.	Structures verticales perforées faiblement réfléchissantes.....	122
B.5.1.1.	Introduction – Objectif des recherches	122
B.5.1.2.	Etude expérimentale en canal à houle.....	123
B.5.1.3.	Analyse de réflexion au second ordre.....	124
B.5.2.	Digues à talus (réponse hydraulique et structurelle).....	125
B.5.2.1.	Recherches sur les processus hydrauliques.....	125
B.5.2.2.	Recherches sur la stabilité des digues à talus.....	125
B.5.2.3.	Participation à la rédaction du Rock Manual.....	129
B.5.3.	Structures isolées en mer (de type pieux)	129
B.5.4.	Structures posées sur le fond marin (pipeline ou émissaire).....	132
B.6.	LOGICIELS DEVELOPPES, CO-DEVELOPPES OU MAINTENUS.....	134
B.6.1.	Logiciels développés intégralement.....	134
B.6.2.	Logiciels co-développés	137
B.6.3.	Logiciels existants, maintenus ou améliorés.....	138
B.7.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	139
B.7.1.	Références internes au LNHE (rapports et thèses)	139
B.7.2.	Références externes au LNHE.....	139
C.	PUBLICATIONS, ARTICLES, RAPPORTS, PRESENTATIONS	147
C.1.	ARTICLES SCIENTIFIQUES (CONFERENCES ET REVUES).....	149
C.1.1.	Chapitres de livres – Articles de synthèse de l'état de l'art (LI)	149
C.1.2.	Articles de revues et de journaux scientifiques (AJ)	149
C.1.3.	Articles de conférences avec comité de lecture (AC).....	150
C.1.4.	Participation à des articles de vulgarisation scientifique (AV).....	153
C.1.5.	Posters dans des conférences et congrès scientifiques (PO).....	153
C.2.	PRESENTATIONS LORS DE SEMINAIRES ET REUNIONS DE PROJETS EUROPEENS.....	154
C.2.1.	Séminaires des groupes de travail internationaux WAM et WISE.....	154
C.2.2.	Réunions du projet européen ECAWOM	154
C.2.3.	Séminaires du CLAROM	154
C.2.4.	Réunions du Club des Utilisateurs TELEMAC	155

C.2.5. Autres séminaires	155
C.3. RAPPORTS D'ETUDES ET DE RECHERCHES	156
C.3.1. Rapports sur activités et projets de recherche (RR).....	156
C.3.2. Rapports sur études appliquées pour EDF (RI)	160
C.3.3. Rapports sur études appliquées lors de prestations externes (RE).....	161
C.3.4. Rapports de management (RM).....	162
C.3.5. Rapports d'expertises et divers (RD).....	163
D. ANNEXES : TEXTES COMPLETS DE NEUF PUBLICATIONS SELECTIONNEES	165

A. PRESENTATION DU CANDIDAT ET DESCRIPTION DE SES ACTIVITES

A.1. PARCOURS PROFESSIONNEL - DOMAINES DE COMPETENCES

A.1.1. Formation – Diplômes

- 1984 Baccalauréat Série E (Mathématiques et Techniques). Mention Très Bien.
Lycée Jean-Henri Fabre – Carpentras (84)
- 1984-1986 Classes préparatoires Mathématiques Supérieures et Spéciales – Série T'
Lycée Technique Déodat de Séverac – Toulouse (31)
- 1989 Diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Centrale Paris (ECP) - Option Océan en 3^{ème} année

A.1.2. Domaines de compétences - Spécialités

Disciplines : Mécanique des fluides. Spécialité : hydraulique maritime et côtière.
Génie civil. Spécialité : ingénierie côtière et portuaire.
Analyse numérique et modélisation.

Principaux domaines de compétences :

- **Océano-météorologie marine.** Etude et caractérisation des ondes de surface dues au vent (vagues, houles et états de mer), aux effets météorologiques (surcotes-décotes), et aux forces gravitationnelles (marées). Etude des courants et des circulations associées. Analyse physique (mécanismes physiques de génération, propagation et évolution spatio-temporelle) et étude des effets d'interactions entre les différents processus.
- **Hydraulique maritime et côtière.** Etude des effets de profondeur finie et d'interactions avec le relief côtier sur la dynamique et les caractéristiques des vagues, états de mer, surcotes-décotes et marées. Analyse et modélisation des processus côtiers (frottement sur le fond, réflexion-shoaling des vagues, déferlement, transferts non-linéaires de quantité de mouvement et d'énergie au sein du fluide, etc.).
- **Génie côtier et environnement littoral.** Dynamique sédimentaire en zone côtière sous l'action des vagues et/ou des courants marins. Ouvrages de protection des côtes : conception et étude de leur efficacité dans le milieu naturel. Etude de la dispersion de rejets en mer (rejets thermiques ou bactériologiques) et de polluants (hydrocarbures), etc.
- **Génie portuaire.** Conception et optimisation d'ouvrages portuaires (digues, caissons, jetées, quais). Etude et réduction de l'agitation due aux vagues dans les ports et chenaux de prise d'eau des centrales électriques en bord de mer. Dimensionnement de structures côtières (épaves, digues, brise-lames détachés, etc.).
- **Modélisation numérique.** Développement de logiciels de simulation dans le domaine de la mécanique des fluides à surface libre (vagues, surcotes-décotes et marées) et des interactions avec les structures marines et côtières, ainsi que les sédiments marins. Validation et mise sous forme industrielle (interface utilisateur, documentation, etc.) de ces logiciels, dont certains sont distribués hors EDF au sein du système TELEMAC et/ou utilisés dans d'autres sociétés et organismes (CETMEF en particulier).
- **Modélisation expérimentale.** Conception et exploitation de maquettes à échelle réduite en laboratoire dans les domaines de l'hydraulique maritime, du génie portuaire et du génie côtier. Définition des caractéristiques de l'installation expérimentale et des conditions d'essais, conduite des essais et analyse de problématiques à l'aide de l'outil expérimental.

A.1.3. Parcours professionnel

Après une période d'un an comme scientifique du contingent au CEA (1989-1990), je travaille depuis 15 ans à la division R&D d'EDF (anciennement Direction des Etudes et Recherches), au sein du département Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) (anciennement Laboratoire National d'Hydraulique). De façon résumée, mon parcours professionnel est le suivant :

- 01/08/1989 **Chercheur assistant en tant que scientifique du contingent au Laboratoire de Géophysique (LDG)** du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) à Bruyères le Châtel (91). Sous la direction de Philippe Denier, j'ai travaillé sur la modélisation hydraulique des vagues et des tsunamis, appliquée aux atolls de Polynésie sur lesquels le CEA possède des installations. J'ai notamment développé et validé un code lagrangien résolvant les équations de Saint-Venant pour les ondes longues, adapté à la modélisation des effets de submersion dus aux tsunamis.
- 03/09/1990 **Ingénieur au Laboratoire National d'Hydraulique (LNH)** de la Direction Etudes et Recherches d'EDF en Septembre 1990. J'avais effectué mon stage de fin d'étude en troisième année de l'Ecole Centrale au sein de ce laboratoire (3 mois, de mars à juin 1989) au sein du Groupe Hydraulique Maritime dans le domaine de la morphodynamique côtière, sous la direction de Bernard Latteux. J'ai mis au point un logiciel 2DH de simulation du transport des sédiments par charriage sous l'action des courants en différences finies avec des techniques de filtrage de marée pour pouvoir prédire des évolutions morphodynamiques à moyen-long terme.
- 01/01/1992 **Nomination ingénieur-chercheur. Groupe Hydraulique Maritime du LNH.** Pendant 6 ans et demi, j'ai réalisé ou piloté de nombreux programmes de recherches et des études appliquées (pour EDF et pour des tiers) dans les domaines de la climatologie océano-météorologique, de l'hydraulique maritime et côtière, des structures marines et côtières, de l'ingénierie portuaire et de la dynamique des sédiments marins. Ces différentes activités sont décrites en détail dans les paragraphes A.2 (projets de recherche) et A.3 (études appliquées) de ce mémoire.
- 01/03/1997 **Nomination de chef du Groupe Hydraulique Maritime et Ouvrages d'eau.** Pendant 4 ans et demi, j'ai dirigé et animé un groupe d'étude du LNH comprenant une trentaine de personnes (environ 18 ingénieurs et chercheurs et une douzaine de techniciens) dans les domaines de l'hydraulique maritime, côtière et estuarienne, de la morphodynamique littorale, de la qualité des eaux, etc. A ce titre, j'ai exercé des fonctions de management sur les plans stratégique et organisationnel, scientifique et technique, administratif et budgétaire, humain et animation d'équipe. Cette activité est présentée succinctement au paragraphe A.4 de ce mémoire. Pendant cette période, j'ai également continué à mener des recherches dans le domaine de la modélisation des vagues et des états de mer (expérimentale et numérique).
- 01/08/2001 **Ingénieur-chercheur. Groupe Hydraulique à surface libre et exploitation.** En 2001, après avoir réalisé plus d'un contrat de Chef de Groupe (1997-2000) et pour des raisons personnelles, j'ai souhaité reprendre un poste à caractère scientifique et technique en prise directe avec les enjeux scientifiques et la R&D. Depuis cette date, je mène et j'encadre au LNHE des activités de recherche et de développement dans les domaines cités ci-dessus (présentées en détail dans le paragraphe A.2 de ce mémoire), ainsi que des études et expertises sur des projets et pour EDF ou pour des tiers (cf. paragraphe A.3 de ce mémoire). Je consacre une part significative de mon temps à la formation de jeunes ingénieurs et chercheurs, ainsi qu'à l'encadrement de chercheurs temporaires (stagiaires, thésards). En outre, je dispense des cours et séminaires dans différentes écoles d'ingénieurs et universités (cf. paragraphe A.5 de ce mémoire).

A.2. ACTIVITES DE RECHERCHE

A.2.1. Introduction

Avertissement important : Je ne propose dans ce paragraphe A.2 qu'un aperçu synthétique des principales problématiques scientifiques que j'ai traitées et des résultats les plus marquants de mes travaux de recherche. Une description détaillée de mes activités scientifiques (recherche et développement) fait l'objet de la partie B de ce mémoire. La liste de mes publications et présentations scientifiques est donnée dans la partie C de ce mémoire. Une sélection de publications scientifiques est proposée en partie D pour approfondir certains aspects particuliers.

La suite de ce paragraphe (tout comme la partie B du mémoire) est structurée en **4 thématiques** correspondant à mes domaines d'activité principaux, dont la « colonne vertébrale » est l'étude des vagues depuis l'océan jusqu'aux ouvrages côtiers :

- Analyse et caractérisation des vagues et états de mer (cf. § A.2.2),
- Modélisation spectrale des états de mer et interactions houle-marée-courants-surcotes (cf. § A.2.3),
- Cinématique et propagation des vagues en zone côtière (cf. § A.2.4),
- Action de la houle sur les ouvrages maritimes (cf. § A.2.5).

Ces thématiques sont exposées et discutées brièvement dans les paragraphes suivants (se reporter à la partie B pour une présentation plus complète et détaillée de chaque thématique).

A.2.2. Analyse et caractérisation des vagues et états de mer

A.2.2.1. Vue d'ensemble de la thématique

La finalité de cette thématique est la **connaissance des états de mer réels et vagues en mer**. Il s'agit d'observer, mesurer, analyser et caractériser les états de mer. L'objectif de cette thématique est double :

- i. amélioration de la connaissance **des caractéristiques des états de mer réels, et de leur climatologie** (distribution des hauteurs de vagues, forme spectrale, étalement directionnel, indices d'asymétrie, etc.), afin d'améliorer les modèles théoriques de représentation de ces états de mer et de proposer des paramètres synthétiques plus pertinents pour les caractériser et les représenter.
- ii. amélioration de la connaissance **des processus physiques intervenant dans la génération et la propagation des états de mer et des vagues** (interactions des vagues avec l'atmosphère, un champ de courant ambiant et le fond marin), afin d'améliorer les formulations et modèles utilisés pour simuler numériquement la formation et la propagation des vagues.

Dans cette optique, la mesure (*in situ* ou en laboratoire) et l'analyse de ces mesures jouent un rôle fondamental et irremplaçable. Sur la base de plusieurs campagnes d'essais en laboratoire et d'enregistrements *in situ* obtenus par des bouées de houle (données mises à disposition par le CETMEF), j'ai développé et mis en oeuvre des méthodes de mesure et des techniques d'analyse permettant d'accéder à la connaissance détaillée des vagues réelles et de pouvoir les caractériser.

Ces travaux portent sur les quatre points suivants, présentés brièvement dans les paragraphes ci-après : (i) analyse statistique et spectrale des états de mer, (ii) analyse non-linéaire en zone côtière, (iii) analyse directionnelle des états de mer, et (iv) caractérisation directionnelle des états de mer,

A.2.2.2. Analyse statistique et spectrale

Avec l'objet d'améliorer la pertinence des lois et modèles semi-théoriques utilisés pour décrire les états de mer, j'ai travaillé sur des méthodes d'analyse statistique et spectrale, classiquement mises en œuvre depuis plusieurs décennies pour l'analyse omnidirectionnelle des états de mer.

L'analyse statistique (ou vague-à-vague) permet d'avoir accès à la distribution de variables statistiques telles que l'élévation de surface libre, la hauteur de vague, la hauteur des crête, la période, la cambrure, etc. J'ai utilisé des techniques d'analyse traditionnelles (telle que la méthode du zero down-crossing pour séparer les vagues dans un enregistrement temporel). Mon objectif principal dans la mise en œuvre de ces analyses est l'amélioration de la connaissance de la distribution des hauteurs de vagues en faible profondeur d'eau et dans la zone de déferlement, le test et le développement de modèles théoriques permettant de représenter cette distribution à partir de quelques grandeurs caractéristiques. On montre en effet assez facilement que la loi de Rayleigh, applicable en grande et moyenne profondeurs d'eau pour des cambrures faibles à moyennes, n'est plus adaptée en faible profondeur d'eau. Sur la base d'analyses de mesures collectées *in situ* ou en laboratoire, l'analyse statistique permet d'avoir accès à un niveau détaillé d'information et de tester la validité de différents modèles semi-théoriques.

De façon similaire, l'analyse spectrale omnidirectionnelle permet d'avoir accès à la répartition de l'énergie des vagues suivant les fréquences. J'ai travaillé avec une approche traditionnelle (méthode dite du périodogramme), sur laquelle j'ai effectué de nombreux tests et des développements afin de minimiser la variance de l'estimateur spectral (découpage en segments, utilisation de fenêtre de pondération, recouvrement partiel des segments, etc.). Ces travaux ont permis d'améliorer la qualité des spectres issus des analyses, ainsi que les incertitudes associées. Comme précédemment, l'objectif est de disposer d'outils d'analyse fiables pour vérifier l'applicabilité de modèles spectraux (Pierson-Moskowitz, JONSWAP, TMA, etc.), en particulier en profondeur d'eau finie. Les interactions vague-vague en faible profondeur d'eau et les interactions des vagues avec le fond marin en zone côtière se traduisent par des déformations du spectre (transferts d'énergie avec les hautes ou basses fréquences, développements de pics harmoniques, modifications de la forme de la queue haute-fréquence du spectre, etc.). C'est sur ces effets que se focalisent mes recherches liées à la physique des états de mer en zone côtière et qui justifient le développement d'outils d'analyse spectrale performants.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.2.1 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 1 [AJ01]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI02] [LI03] [AJ01]	[AC01] [AC06] [AC07]	[PR12]	[RR06] [RR08] [RR09] [RR35] [RR56]

A.2.2.3. Analyse non-linéaire en zone côtière

Afin de mettre en évidence et de quantifier les effets d'interactions vague-vague au sein d'un état de mer, j'ai également utilisé la technique d'analyse bi-spectrale, notamment dans le cadre de la thèse de F. Becq (1998). Cette méthode d'analyse permet de mettre en évidence les couplages de modes au sein de l'état de mer (séparation des harmoniques libres et liés à une fréquence donnée) et se révèle un outil précieux pour l'analyse des interactions non-linéaires quasi-résonantes en faible profondeur entre trois composantes de vagues (interactions entre triplets de fréquences ou « triad interactions »).

A partir du bi-spectre, on peut également calculer des paramètres synthétiques de l'état de mer, indices d'asymétrie « skewness » et « kurtosis », qui mesurent le degré de non-linéarité de l'état de mer. Le logiciel **BISPAN** que j'ai développé pour réaliser ces analyses a été utilisé notamment par F. Becq sur des expériences en canal à houle en conditions de vagues régulières ou irrégulières.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.2.2 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 6 [AJ02]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[AJ02]	[AC12] [AC19]		[RR36]

A.2.2.4. Analyse directionnelle des états de mer – Spectres directionnels

L'objectif est d'accéder à la distribution angulaire de l'énergie des vagues, c'est à dire d'avoir accès à la forme de la répartition de l'énergie de l'état de mer non seulement suivant les fréquences (comme on sait le faire depuis le début des années 1980), mais également suivant les directions de provenance. Il s'agit de déterminer le spectre directionnel d'état de mer (densité spectro-angulaire de variance) $S(f,\theta)$.

Le calcul de ce spectre directionnel à partir d'un nombre limité de signaux de houle (tels que ceux délivrés par une bouée directionnelle de mesure de houle ou un réseau de capteurs de pression ou de sondes de surface libre) est un problème très compliqué, pour lequel plusieurs méthodes de traitement ont été proposées dans la littérature scientifique. Dans le cadre d'un programme de recherche pluri-annuel en collaboration avec le CETMEF, j'ai été amené à implémenter, améliorer et inter-comparer un grand nombre de méthodes d'analyses directionnelle, dont des approches très sophistiquées comme la Méthode de Maximum d'Entropie (MEM) et la Méthode Bayésienne Directionnelle (BDM).

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.2.3 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexes 1 [AJ01] 2 [LI04]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI02] [LI03] [LI04] [AJ01]	[AC01] [AC02] [AC06] [AC20] [AC38]	[PR12]	[RR03] [RR04] [RR06]

A.2.2.5. Caractérisation directionnelle des états de mer

En complément de l'analyse détaillée du spectre directionnel présentée au paragraphe précédent, j'ai également beaucoup travaillé (avec Jean-Claude Besnard) sur le choix de paramètres directionnels synthétiques permettant de caractériser la direction moyenne de provenance des vagues de l'état de mer, ainsi que sa répartition angulaire. Sur la base de nombreux tests effectués sur des simulations numériques d'états de mer (éventuellement bruités) et des mesures de bouées de houle, nous avons pu apprécier le comportement et les propriétés de nombreux paramètres directionnels, et nous avons pu proposer *in fine* des recommandations pour l'analyse opérationnelle des états de mer. Le point saillant de nos travaux concerne l'élaboration d'un nouveau critère directionnel, permettant de déterminer si l'état de mer est unimodal (une seule direction dominante) ou bimodal (deux directions de provenance des vagues).

L'ensemble de ces travaux sur l'analyse et la caractérisation directionnelle des états de mer m'ont permis d'avoir accès à une reconnaissance internationale (participation à un groupe de travail international de l'AIRH sur cette thématique, rédaction d'articles de référence souvent cités). Ils ont en outre été capitalisés dans plusieurs logiciels d'analyse, dont le logiciel **PADINES** qui est utilisé par le CETMEF pour l'analyse des mesures du réseau national de bouées CANDHIS.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.2.4 en partie B :		Article(s) en Annexe :	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI01]	[AC03] [AC38]		[RR10] [RR17] [RR37]

A.2.3. Modélisation spectrale des états de mer et interactions houle-marée-courants-surcotes

A.2.3.1. Vue d'ensemble de la thématique

La finalité de cette thématique est la **modélisation de le dynamique des états de mer (génération et propagation), des surcotes-décotes météorologiques et des marées à l'échelle des océans, des mers continentales et des zones côtières**. L'objectif de cette thématique est double :

- i. **développement de modèles numériques de simulation incorporant des modélisations physiques avancées** pour la physique des états de mer, des surcotes-décotes et des marées,
- ii. **étude des processus d'interactions** (dans les deux sens) entre les vagues, les surcotes-décotes et les marées.
- iii. simulation d'événements exceptionnels en conditions de tempêtes, a posteriori (mode « hindcast ») voire en mode prévision (mode « forecast ») sur la base de prévisions météorologiques,
- iv. amélioration de la connaissance **de la climatologie des états de mer et des conditions océano-météorologiques**, par la constitution de base de données numériques sur de longues périodes (simulations de type « hindcast »).

Pour ces différents objectifs, la modélisation numérique joue un rôle fondamental, et en particulier la modélisation (spectrale) des états de mer, qui est de mes axes de travail privilégiés, avec le développement du code de troisième génération **TOMAWAC** au sein du système **TELEMAC**.

Mes travaux sur cette thématique sont présentés suivants trois axes, objets des paragraphes suivants : (i) Modélisation spectrale des états de mer, (ii) interactions houle-marée-courants-surcotes, et (iii) base de données d'états de mer par simulation numérique.

A.2.3.2. Modélisation spectrale des états de mer – Code TOMAWAC

Les codes spectraux d'états de mer modélisent l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel de variance (ou d'action) de l'état de mer. Celui-ci est discrétisé suivant les fréquences (f) et les directions de propagation des vagues (θ). C'est donc une fonction dépendant de 5 variables dans le cas général : $F(x,y,f,\theta,t)$. Ces modèles résolvent une équation de convection avec termes sources et puits d'énergie (donnée au § B.3.1.3). Pour les modèles de troisième génération, utilisés depuis une quinzaine d'années, il n'est fait aucune hypothèse *a priori* sur la répartition directionnelle ou fréquentielle de l'énergie de l'état de mer (hormis pour la partie hautes-fréquences, au-delà de la

dernière fréquence de discrétisation). Chaque composante spectro-angulaire du spectre évolue « librement » sous l'action combinée des différents processus physiques pris en compte par le modèle.

J'ai commencé à travailler avec les modèles d'états de mer en 1990 en utilisant le code international **WAM**, développé sous la conduite de Klaus Hasselmann du Max Planck Institut für Meteorologie (Hambourg, Allemagne). J'ai implanté sur les calculateurs d'EDF et utilisé les versions cycle 3 et cycle 4 de **WAM** (WAMDIG, 1988 ; Komen et al., 1994). J'ai également eu la chance de pouvoir participer aux dernières réunions du groupe **WAM** au début des années 1990. Grâce à ce groupe de travail, j'ai pu me former à la physique des états de mer et vérifier les potentialités de tels modèles en les appliquant avec succès à la reproduction de plusieurs tempêtes réelles en Atlantiques, Manche et Mer du Nord.

A partir de 1995, j'ai proposé, puis piloté le développement d'un modèle spectral d'états de mer de troisième génération au sein du système **TELEMAC** et travaillant sur un maillage spatial non-structuré de type éléments finis. Cela a donné naissance au code **TOMAWAC**, que j'ai développé avec Frédéric Marcos en 1995-1996. L'utilisation de maillages non-structurés, alliée à un schéma de propagation basé sur la méthode des caractéristiques (i.e. non-soumis à des conditions de stabilité sur le nombre de courant) constituait une première mondiale, et ce n'est que depuis 2004 -près de 10 ans plus tard- que d'autres modèles spectraux commencent à utiliser cette technique de discrétisation spatiale. La première version de **TOMAWAC** utilisait la même physique que **WAM-cycle 4**, mais celle-ci a entièrement été recodée. En 1997, j'ai notamment écrit un programme de calcul des interactions non-linéaires entre quadruplets de fréquences par la méthode DIA (Discrete Interaction Approximation) de Hasselmann *et al.* (1985).

De 1996 à 1998, principalement dans le cadre de la thèse de Françoise Becq-Girard (Becq, 1998), nous avons étendu les fonctionnalités de **TOMAWAC** vers le domaine côtier en ajoutant des modélisations des processus physiques d'interactions non-linéaires entre triplets de fréquences (« triad interactions ») et de déferlement (cf. § A.2.4.3). Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications.

Par la suite, j'ai poursuivi mes travaux de recherche sur les termes sources et puits d'énergie, notamment la génération par le vent et le moutonnement, pour lesquels plusieurs formulations et modèles proposés dans la littérature ont été implantés et testés dans **TOMAWAC** (Snyder et al., 1981 ; Janssen, 1989, 1991 ; Tolman et Chalikov, 1996 pour la génération par le vent, et Komen et al., 1984, WAMDIG, 1988 et Tolman et Chalikov, 1996 pour la dissipation par moutonnement). Mais c'est sur le terme de transferts non-linéaires entre quadruplets de fréquences que mes travaux sont les plus avancés et au plus près de l'état de l'art. Depuis 1999, j'ai en effet implanté, testé et amélioré plusieurs méthodes de calcul de ce terme d'interaction, particulièrement difficiles à calculer. J'ai d'une part considéré des méthodes approchées :

- DIA et son extension Multiple DIA (MDIA) basée sur l'utilisation de 4 configurations d'interaction choisies *a priori* (Tolman, 1994),
- Opérateur de diffusion d'ordre 2 (Pushkarev et al., 1999),

et d'autre part des méthodes potentiellement exactes :

- Méthode de Locus de Webb-Tracy-Resio (Webb, 1978 ; Resio et Perrie, 1991),
- Méthodes basée sur l'intégration numérique à l'aide de quadratures de Gauss (Lavrenov, 2001).

Je dispose actuellement d'une palette de méthodes très riche et complète, qui m'a permis de réaliser des travaux d'inter-comparaison qui font référence sur l'évaluation des potentialités des différentes méthodes. Par ailleurs, je travaille actuellement à la mise au point et l'optimisation algorithmique et informatique d'une méthode quasi-exacte basée sur l'utilisation de quadratures de Gauss (extension de la méthode introduite par Lavrenov (2001)). Ce développement, particulièrement important de mon point de vue, permettra de lever un verrou technologique sur le calcul des interactions non-linéaires entre quadruplets de fréquences et de passer à des modèles d'états de mer de quatrième génération.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.3.1 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexes 3 [AC10] 4 [AC32]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI06] [AJ04]	[AC09] [AC10] [AC13] [AC32] [AC35] [AC36]	[PO03] [PR01] [PR02] [PR05] [PR07] [PR20] [PR21] [PR22]	[RR02] [RR07] [RR11] [RR16] [RR19] [RR21] [RR22] [RR27] [RR30] [RR31] [RR46] [RR52]

A.2.3.3. Interactions houle-marée-courants-surcotes

Dans le cadre de programmes de recherche menés en collaboration avec le CETMEF d'une part et du projet européen ECAWOM (European Coupled Atmosphere-Wave-Ocean Model) du programme MAST-2, j'ai été amené à travailler sur les interactions vagues-courant-marée-surcotes, à la fois sur les aspects physiques et numériques, en couplant le code d'états de mer **TOMAWAC** et le module de courantologie **TELEMAC-2D** (résolvant les équations de Saint-Venant en deux dimensions d'espace).

Les effets dus à la marée et aux surcotes/décotes sur les vagues (du fait de niveaux marins et courants variables en espace et en temps) peuvent être significatifs le long des côtes françaises en Atlantique, Manche et Mer du Nord. J'ai notamment considéré et étudié les aspects suivants :

1. Réfraction des vagues due à la présence d'un champ de courant : effet Doppler et modification de la cinématique de propagation des vagues du fait des gradients de propriétés du milieu dans lequel se propagent les vagues.
2. Effets liés à l'instationarité du niveau d'eau et du courant : transferts d'énergie suivant les fréquences au sein du spectre de l'état de mer.
3. Modification des termes sources et puits d'énergie, du fait de la présence du courant (par exemple la vitesse relative du vent par rapport aux vagues). De plus, de forts courants opposés aux vagues peuvent aller jusqu'à bloquer les vagues et les faire déferler (« wave blocking » en Anglais).

Réciproquement, j'ai aussi considéré **les effets des vagues sur la courantologie et la propagation des surcotes-décotes**, en étudiant les effets suivants :

1. Modification de la contrainte de surface : la présence des vagues modifie la rugosité de la surface de la mer et en conséquence la contrainte de surface due à l'action du vent (terme pouvant avoir un effet pour la génération des surcotes en faible profondeur d'eau).
2. Modification du coefficient de frottement sur le fond : la vitesse orbitale des vagues en faible profondeur d'eau modifie l'hydrodynamique de la couche limite sur le fond marin, et en conséquence la contrainte de fond et la dissipation par frottement (pour les vagues et pour le courant).
3. Transfert de quantité de mouvement par les contraintes de radiation : en faible profondeur d'eau et en particulier dans la zone déferlement, un transfert de quantité de mouvement s'effectue depuis le mouvement organisé des vagues vers le domaine fluide, se traduisant par une variation du niveau moyen de l'eau (phénomène de « set-up » ou « set-down ») et la génération de courants dus au déferlement. Ces transferts sont exprimés par des forces volumiques dans les équations de quantité de mouvement de Saint-Venant, calculées à partir des composantes du tenseur de radiation déduit du champ de vagues.

L'ensemble de ces effets d'interactions ont été étudiés par des simulations couplées (différents niveaux d'interfaçage et de couplage) entre **TOMAWAC** et **TELEMAC-2D**, sur différents épisodes de tempête en Atlantique Nord, Manche et Mer du Nord. D'une manière générale, les effets d'interactions sont

assez peu marqués en grande et moyenne profondeur, et sont plus sensibles en faible profondeur et dans les zones où le marnage et/ou les courants de marée sont importants.

En 2005-2006, avec la société ACTIMAR, le POL (Proudman Oceanographic Laboratory, UK) et le SHOM, nous travaillons à l'étude de ces effets d'interactions dans le Golfe Normand-Breton, où une campagne de mesures a été réalisée en Février-Mars 2003 par le SHOM (campagne EPEL-GNB 2003). Après une étude de validation-calibration des conditions de vent, marée et courants, le code TOMAWAC a été appliqué pour modéliser les états de mer sur la période considérée, avec et sans prise en compte des effets de marée et de courants.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.3.2 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 3 [AC10]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[AJ03]	[AC10] [AC15] [AC36]	[PO01] [PO02] [AV02][PO03] [PR04] [PR10] [PR11]	[RR33] [RR59]

A.2.3.4. Base de données d'états de mer par simulation numérique

Dans le cadre des programmes de recherche de la Convention Biparti EDF-Ministères, le LNHE et le CETMEF collaborent depuis plusieurs années à la production d'un atlas numérique d'états de mer, thématique que je pilote au LNHE. L'approche retenue consiste à réaliser des simulations continues d'états de mer sur plusieurs décennies (méthode dite de « hindcast ») à partir de champs de vent ré-analysés, à l'aide d'un modèle numérique d'états de mer. Les données issues de modèles numériques d'états de mer sont en effet un complément très utile aux mesures par satellites (altimètre et radars à synthèse d'ouverture SAR) et *in situ* par bouées. Ces mesures sont toujours très localisées en espace et/ou de durée limitée dans le temps.

Pour schématiser, le calcul par hindcast permet de disposer potentiellement d'une « bouée directionnelle » de houle en chacun des points du maillage de calcul et ce sur une période de plusieurs décennies, avec un pas de temps horaire typiquement. Bien entendu, la qualité des résultats est liée à la qualité du modèle numérique utilisé et à celle des forçages (champs de vent issues de ré-analyses météorologiques) utilisés en entrée.

Afin de produire des données au large des côtes françaises de l'Océan Atlantique, la Manche et la Mer du Nord, avec la participation de Florence Lafon et de plusieurs stagiaires, nous avons mis en œuvre le code **TOMAWAC** (cf. § A.2.3.2) sur deux maillages emboîtés de type « éléments finis », avec des résolutions spatiales différentes. Le premier modèle (dit « océanique ») couvre la partie nord de l'Océan Atlantique, avec une résolution spatiale de 1 degré au large et 20 km le long des côtes françaises. Le second modèle (dit « côtier ») s'étend vers le large jusqu'à la limite du plateau continental, avec une résolution de quelques kilomètres près des côtes françaises. Deux sources de forçages atmosphériques ont été comparées : ré-analyse ERA-40 du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme ECMWF ($\Delta x = 0.5$ degrés et $\Delta t = 6$ h) et ré-analyse américaine NOAA/NCEP ($\Delta x = 1.875$ degrés et $\Delta t = 6$ h). Les modèles ont d'abord été calibrés et validés sur deux années (1999 et 2000) par comparaison détaillée à des données de bouées du CETMEF. Un bon accord général est obtenu sur la hauteur significative, la période moyenne et la direction moyenne de provenance. Des analyses de corrélation mesures-simulations ont été réalisées et des indicateurs de qualité des résultats ont également été calculés.

Ensuite, les simulations ont été réalisées sur 25 ans avec les deux modèles et une première version de la base numérique d'états de mer a été constituée à partir des champs de vent ERA-40, conduisant à des résultats légèrement meilleurs. Avec Florence Lafon, nous avons réalisé différents traitements

statistiques afin de déterminer des cartographies du climat d'états de mer moyen (valeurs moyenne et médiane de la hauteur significative des vagues) et des valeurs plus élevées d'occurrences plus faibles, comme les hauteurs significatives dépassées en moyenne 10 % et 1% du temps par exemple. Ces cartes permettent une caractérisation synthétique du climat de houle régional ou local.

En prolongement à cette caractérisation de la climatologie moyenne (ou « court terme » des états de mer), nous travaillons actuellement sur l'estimation statistique des hauteurs de houle dont la durée de retour est supérieure à la durée simulée. Nous appliquons pour cela deux méthodes d'extrapolation statistique. La première consiste à ajuster l'échantillon des maxima annuels à une distribution Généralisée de Valeurs Extrêmes (GEV). La seconde, dite méthode du renouvellement, repose sur la sélection d'événements indépendants dépassant un seuil donné, qu'on ajuste à une Distribution de Pareto Généralisée (GPD). Ces méthodes permettent d'estimer par exemple les hauteurs significatives de houle de périodes de retour 50 ou 100 ans. Ces estimations sont comparées à celles obtenues à partir de mesures de bouées (disponibles sur une période plus réduite et avec de nombreuses lacunes en général) et sont en cours de validation. Nous envisageons de soumettre prochainement une publication dans une revue scientifique sur ces travaux.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.3.3 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 5 [AC29]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[AJ04]	[AC18] [AC29] [AC34] [AC39]	[PR06] [PR15] [PR18] [PR19] [PR27]	[RR42] [RR49] [RR57] [RR58]

A.2.4. Cinématique et propagation des vagues en zone côtière

A.2.4.1. Vue d'ensemble de la thématique

La finalité de cette thématique est la **prédiction des caractéristiques des vagues en zone côtière, et en particulier l'élévation de surface libre et la cinématique**, pour anticiper l'action des vagues sur les ouvrages maritimes et côtiers et les sédiments marins. Cette problématique est centrale pour les zones côtières et littorales car les vagues constituent, avec la marée, le principal forçage hydrodynamique dans ces zones.

A cette échelle, les processus d'interaction des vagues avec le fond marin (réfraction, shoaling, diffraction, frottement sur le fond, déferlement,...) et les interactions non-linéaires vague-vague jouent un rôle dominant. Ces **non-linéarités** se traduisent par une déformation du profil temporel de surface libre des vagues (dissymétries horizontale et verticale), des transferts d'énergie au sein du spectre (vers les hautes et basses fréquences). Lorsque la cambrure des vagues augmente au-dessus d'un certain seuil en faible profondeur d'eau, les vagues deviennent instables et se déferlent. Le **déferlement**, processus non-linéaire par excellence, est un thème d'étude à part entière, dont les conséquences et effets sont primordiaux pour l'hydrodynamique côtière.

Mes travaux de recherche ont porté sur l'analyse et la modélisation de ces effets non-linéaires et du déferlement, avec notamment l'encadrement d'une thèse sur cette thématique (Françoise Becq, 1998) et de plusieurs stages de fin d'étude. Nous avons étudié les effets côtiers sur la propagation des vagues, à la fois par le biais d'expériences en laboratoire (essais en canal et en bassin à houle) et de modélisations numériques, en considérant différentes approches.

Ces travaux portent sur les trois points suivants, présentés brièvement dans les paragraphes ci-après : (i) prédiction de la cinématique des vagues en zone côtière, (ii) modélisation de la

propagation des vagues en zone côtière, et (iii) étude particulière du déferlement et de ses conséquences sur l'hydrodynamique côtière.

A.2.4.2. Prédiction de la cinématique des vagues en zone côtière

La question que l'on cherche à traiter ici peut se formuler de la façon suivante : connaissant la profondeur d'eau et les caractéristiques locales de surface libre des vagues (i.e. soit la hauteur, soit le signal de surface libre sur une période ou une longueur d'onde, comment prédire les propriétés cinématiques (vitesses orbitales, accélérations, pression) et les propriétés intégrales (comme le flux d'énergie ou de quantité de mouvement, l'énergie cinétique et potentielle, etc.) ? Pour répondre à cette question, j'ai considéré différentes options, présentées brièvement ci-après :

- D'abord, avec Marilyne Luck, dans le cadre du projet CLAROM-HOUDIM, nous avons examiné des **théories analytiques de houle monochromatique progressive à fond plat**. Le principe de cette approche, assez ancienne, est d'effectuer des développements en série limitée de la surface libre et du potentiel de vitesse des vagues en fonction d'un « petit paramètre ». Selon l'ordre de développement retenu, on obtient des expressions analytiques composées de d'un ou plusieurs termes pour la surface libre et le potentiel des vitesses (et donc pour les vitesses, accélérations, etc.). Au préalable, il faut résoudre une équation de dispersion, dont le degré de non-linéarité dépend également de l'ordre du développement. On distingue les théories dites de Stokes, pour lesquelles le petit paramètre est la cambrure des vagues H/L (ou kH), qui sont plutôt indiquées pour les cas de grande et moyenne profondeur d'eau, et les théories cnoïdales, pour lesquelles le petit paramètre est le rapport H/d , qui sont applicables en faible profondeur d'eau. Avec Marilyne Luck, nous avons programmé et comparé les théories de Stokes d'ordre 1 (théorie linéaire d'Airy), 2, 3 et 5, ainsi que les théories cnoïdales d'ordres 1, 2 et 3 (logiciels **HOULES** et **STOKES5**). Nous avons appliqué ces théories à différentes conditions de profondeur, de période et de hauteur de vague, afin d'en étudier les capacités et les limitations.
- Dans la continuité de ces travaux, j'ai implémenté **une méthode numérique exacte pour la houle monochromatique progressive à fond plat**. Basée sur la théorie dite de fonction de courant (Dean, 1965), cette approche consiste à effectuer un développement en série de Fourier de la fonction de courant. En considérant un ordre élevé (de l'ordre de 20 à 50), on obtient numériquement une solution quasi-exacte de la cinématique des vagues non-linéaires, quelle que soit la profondeur d'eau (infinie, grande, moyenne ou faible), et ce jusqu'à la limite $H/d = 0.78$ en faible profondeur d'eau. Cette méthode a été appliquée au cas où la houle est définie par sa hauteur et sa période (ou sa longueur d'onde) (logiciel **STREAM_HT**). Cette méthode très précise de calcul de la cinématique a été comparée aux théories analytiques mentionnées précédemment, et on a pu vérifier que cette approche était plus universelle, plus précise et plus puissante dans tous les cas. Elle a été utilisée pour le calcul des efforts s'exerçant sur des ouvrages en mer, notamment des piles support d'éoliennes en mer.
- J'ai également considéré, implanté et testé une méthode semi-analytique pour le cas d'une **houle monochromatique progressive sur un fond incliné de pente constante**, d'après les travaux de Isobe et Horikawa (1982) (logiciel **ISORI82**). Cette méthode ne permet de prédire que la composante horizontale de la vitesse orbitale des vagues. Elle donne de bons résultats pour le cas d'un fond en pente, surtout si l'on intègre la modification de Grasmeijer et Van Rijn (1998), qui permet d'améliorer la qualité des prédictions de vitesse dans la zone de déferlement, comme nous avons pu le vérifier par comparaison à des mesures vélocimétriques effectuées en canal à houle.
- Enfin, avec la collaboration de Christophe Chevalier (l'Université de Caen Basse Normandie) et Marilyne Luck, nous avons travaillé sur des méthodes dites **de fonction de transfert**. Le principe de ces méthodes est de passer d'un signal de surface libre échantillonné sur une période à un signal de vitesse orbitale (horizontale ou verticale). Dans ce cas le profil temporel de vagues peut présenter une dissymétrie horizontale et/ou verticale. On peut d'abord utiliser

la théorie linéaire (LTFM) des vagues pour obtenir l'expression de la fonction de transfert, mais la comparaison avec des mesures en zone côtière montre que l'on surestime la vitesse horizontale sous la crête des vagues. La méthode de fonction de transfert modifiée (MTFM) de Koyama et Iwata (1986) permet d'améliorer significativement les prédictions, au moins pour la vitesse horizontale. Enfin, j'ai développé une version dite « irrégulière » de la méthode de fonction de courant (ISFM) pour le cas où l'on dispose en entrée du signal de surface libre sur une période (logiciel **STREAM_SL**). Cette méthode, certes plus complexe à programmer, produit des résultats plus précis en prenant mieux en compte les non-linéarités.

Nous avons pu comparer ces différentes méthodes de calcul de la cinématique à des mesures détaillées en canal à houle à l'Université de Caen Basse Normandie par Christophe Chevalier, sous la direction de Michel Belorgey, à l'aide de la Vélocimétrie Doppler Laser (VDL). Nous avons effectué d'une part des mesures près du fond, et d'autre part des mesures sur la colonne d'eau, afin d'examiner les profils verticaux de vitesses. Ces analyses, à notre connaissance sans équivalent par le nombre d'approches et de méthodes de prédiction considérées, ont fait l'objet de plusieurs publications dans des conférences internationales et dans des revues scientifiques.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.4.1 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 7 [AC24]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI05] [AJ06] [AJ07]	[AC24] [AC26] [AC28]		[RR40] [RR41] [RR47] [RR48] [RR51] [RR53]

A.2.4.3. Modélisation de la propagation des vagues en zone côtière

La modélisation de la propagation des vagues et des états de mer en zone côtière peut s'aborder suivant trois approches, que j'ai toutes trois considérées au cours de mes travaux :

- **L'approche déterministe** (ou à « résolution de phase ») consiste à travailler à une résolution spatiale et temporelle très inférieure à l'échelle d'une vague (typiquement avec des pas de temps et d'espace valant de 1/50 à 1/10 de la période et de la longueur d'onde respectivement) et permet de représenter finement l'évolution de chaque vague individuelle au sein d'un état de mer irrégulier. C'est l'approche la plus détaillée, mais elle nécessite des ressources informatiques importantes et est limitée à traiter des domaines de quelques kilomètres de côté au maximum. J'ai travaillé d'une part avec des modèles linéaires pour la propagation des vagues sur des fonds en pente douce (équation de Berkhoff ou « mild slope equation ») dans le logiciel 2DH **ARTEMIS**, existant au sein du système **TELEMAC**, mais surtout en développant un logiciel 1DH en différences finies **REEF-2000** dans lequel j'ai inclus des termes d'ordres supérieurs prenant en compte l'effet de la pente et de la courbure des fonds (termes en $(\nabla h)^2$ et $\nabla^2 h$ respectivement). Ce code a été utilisé au niveau recherche pour étudier des effets de réflexion de Bragg sur des bathymétries présentant des ondulations périodiques, et au niveau appliqué pour la propagation des vagues et clapots à l'approche des centrales électriques en bord de mer ou de fleuve. De façon à mieux prendre en compte les effets non-linéaires en faible profondeur d'eau, j'ai également travaillé avec des modèles non-linéaires basés sur les équations de Boussinesq étendues. J'ai développé un code 1DH, appelé **BSQ**, résolvant par une méthode de différences finies les équations proposées par Nwogu (1993), puis Wei *et al.* (1995), qui incorporent des termes dispersifs et non-linéaires supplémentaires par rapport aux équations de Boussinesq classiques (Peregrine, 1967). Ce logiciel a été validé sur des cas difficiles à modéliser numériquement : le cas d'une onde solitaire sur un fond en pente jusqu'à son déferlement, et le cas d'une houle périodique se propageant sur un haut-fond (cas-test de Dingemans, 1994). Ce dernier cas met en évidence l'importance des effets dispersifs, avec la

génération d'harmoniques lors de la phase de shoaling sur la barre (harmoniques « liés » au mode fondamental), qui se retrouvent libérés après le passage de la barre et se propagent alors avec leur célérité propre. Les modèles déterministes non-linéaires connaissent un intérêt et un essor important depuis une quinzaine d'années, comme en témoignent par exemple deux thèses soutenues en France fin 2005 (Cienfuegos, 2005 ; Jamois, 2005). Plus récemment, en 2006, dans le cadre de mes activités d'enseignement à l'Ecole Centrale Paris (ECP), j'ai proposé aux élèves et encadré un projet visant à tester une méthode de résolution particulière (Méthode des Solutions Fondamentales) appliquée au problème potentiel avec conditions de surface libre non-linéaires. Cette technique numérique permet une résolution assez simple de l'équation de Laplace pour le potentiel des vitesses en utilisant des Fonctions de Base Radiales dont les centres sont situés hors du domaine de calcul (Wu *et al.*, 2006). La maquette de logiciel développée a été appliquée avec succès aux expériences en canal à houle de Dingemans (1994). Des résultats (prometteurs) sont présentés au § B.4.2.1.3, bien que nous avons aussi noté une certaine sensibilité de la méthode calcul aux paramètres numériques d'entrée (analyses en cours). Que ce soit par une approche de type « Boussinesq étendue » et/ou par une approche « potentielle non-linéaire », d'abord en 2D puis en 3D, la modélisation déterministe des vagues en zone côtière est une voie d'avenir et constitue un axe structurant de mes travaux en cours et futurs.

- **L'approche spectrale** (ou à « phases moyennées ») consiste à dériver des équations d'évolution pour les moments de la surface libre. Les modèles les plus utilisés ne considèrent que le moment d'ordre 2, qui est le spectre de variance. Les modèles plus sophistiqués résolvent un système d'équations couplées sur les moments d'ordres 2 (spectre) et 3 (bi-spectre) de surface libre. Mes travaux sur ce type de modèles ont été essentiellement guidés par l'extension vers le domaine côtier de l'approche spectrale utilisée par les modèles spectraux de troisième génération, et en particulier le code **TOMAWAC**. En premier lieu, j'ai travaillé sur les aspects liés à la propagation des états de mer en faible profondeur d'eau, notamment la réfraction due aux variations de bathymétrie et la diffraction due à la présence d'îles ou de hauts-fonds, à l'aide d'une approche linéaire. D'autre part, je me suis beaucoup intéressé aux effets non linéaires, interactions vague-vague et transferts d'énergie au sein du spectre entre trois composantes (« triad interactions ») et déferlement, en encadrant avec Philippe Forget du LSEET-LEPI une thèse sur ces sujets (Becq, 1998). Cette thèse a permis de développer et comparer entre eux plusieurs modèles non-linéaires pour les interactions entre triplets de fréquences. Ces modèles ont été comparés à des expériences en canal à houle effectuées au LNHE, ainsi qu'à d'autres jeux de données issus de la littérature scientifique. Parmi les différents modèles proposés, deux ont été implantés dans la version industrielle de **TOMAWAC** : l'approche LTA (pour « Lumped Triad Approximation ») de Eldeberky (1996), qui est très paramétrique mais assez approximative, et un nouveau modèle développé par Françoise Becq, appelé SPB (pour « Spectral Paramétrique basé sur les équations de Boussinesq »), qui donne de bien meilleurs résultats, au prix cependant d'un temps de calcul plus important. Ces travaux, se situant au niveau de l'état de l'art, doivent être poursuivis afin de tirer le meilleur parti de l'approche spectrale qui permet de travailler avec des discrétisations spatiales bien plus grossières que l'approche déterministe : c'est aussi un axe directeur de mes travaux futurs.
- **L'approche probabiliste** (ou « vague-à-vague ») consiste à modéliser l'évolution de la distribution des hauteurs de vagues d'un état de mer, en considérant éventuellement une distribution conjointe des périodes et des directions. On fait abstraction de la notion de phase des vagues les unes par rapport aux autres, et de ce fait cette approche ne permet pas de représenter correctement tous les effets non-linéaires de transferts d'énergie entre les composantes de l'état de mer en faible profondeur d'eau. On modélise l'évolution de chaque classe de hauteur de vague en utilisant une équation de flux d'énergie (ou d'action) des vagues faisant appel à une ou deux théories analytiques de houle à fond plat, parmi celles que nous avons mentionnées plus haut. Bien que moins utilisée que les deux approches précédentes,

cette technique de modélisation présente l'intérêt de fournir en tout point du domaine de calcul la distribution des hauteurs de vagues, dont on peut déduire des valeurs caractéristiques souvent utiles pour l'ingénierie, telle que $H_{1/10}$ par exemple (voir Goda, 1975 ; Hamm, 1995). Sous mon encadrement, Marilyne Luck a développé dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC le logiciel **PROFILH** basé sur l'utilisation combinée d'une théorie de Stokes au large couplée à une théorie cnoidale en faible profondeur d'eau. Ce module n'a pour l'heure été validé que pour des cas de houle monochromatique, non-déferlante ou déferlante, et son extension à la houle irrégulière est envisagée à court terme.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée :: cf. § B.4.2 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 6 [AJ02]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI05] [AJ02]	[AC08] [AC12] [AC17] [AC19] [AC21] [AC25]	[PR14] [PR23] [PR24] [PR25] [PR26]	[RR05] [RR13] [RR23] [RR24] [RR25] [RR30] [RR32] [RR38] [RR43] [RR45] [RR51] [RR55]

A.2.4.4. Etude particulière du déferlement et de ses conséquences sur l'hydrodynamique côtière

Ainsi que nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, le déferlement des vagues joue un rôle fondamental en zone côtière. C'est un processus fortement non-linéaire et très difficile à modéliser. Avec l'aide de Françoise Becq et Marilyne Luck notamment, j'ai travaillé sur des modélisations numériques de ce processus pour chacune des trois approches de modélisation considérées ci-dessus : déterministe, spectrale et probabiliste. Dans chacun des cas, les formulations disponibles dans la littérature sont différentes, allant par exemple du concept de rouleau de déferlement ou de l'analogie avec un terme de diffusion pour les modèles déterministes non-linéaires à l'analogie avec un ressaut hydraulique utilisée dans les modèles spectraux ou probabilistes. Nous avons comparé entre elles plusieurs expressions pour le critère de début de déferlement et plusieurs paramétrisations de la dissipation d'énergie due au déferlement. Nous avons implanté plusieurs options pour modéliser le déferlement dans les modèles que nous avons développés : **REEF-2000** et **BSQ** pour les modèles déterministes, **BEACH** et **TOMAWAC** pour les modèles spectraux, et **PROFILH** pour les modèles probabilistes.

Nous avons également étudié les effets du déferlement, notamment la surélévation du niveau moyen (set-up) due au déferlement, ainsi que les courants moyens générés par le déferlement. Nous avons notamment couplé des modules de vagues avec des modules de courantologie par le biais du tenseur de radiation, ce qui permet de calculer les courants littoraux (« longshore ») générés par les vagues. Récemment, nous nous sommes également intéressés au profil vertical de vitesse moyenne dans la zone de déferlement, et en particulier au courant de retour (« undertow ») sous le creux de la vague. Nous avons analysé des mesures LDV effectuées en canal à houle à l'Université de Caen Basse Normandie et comparé ces mesures à des prédictions issues d'un modèle simplifié relevé dans la littérature (Rattanapitikon et Shibayama, 2000). Les résultats obtenus sont assez positifs.

Il est clair que la réalisation de simulations couplées vagues-courants est un enjeu important pour les années futures, afin de disposer de « moteurs hydrauliques » performants et précis pour le transport de sédiments et les évolutions morphologiques en zone côtière.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.4.3 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexes 3 [AC10] 7 [AC24]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[AJ06] [AJ07]	[AC10] [AC19] [AC24] [AC28] [AC30] [AC33] [AC37]	[PR03] [PR13] [PR23]	[RR29] [RR45] [RR47] [RR51] [RR56]

A.2.5. Action de la houle sur les ouvrages maritimes***A.2.5.1. Vue d'ensemble de la thématique***

La finalité de cette thématique est **l'étude des interactions vagues-structures pour optimiser le dimensionnement de ces structures et proposer des solutions d'aménagement efficaces et bien insérées dans le milieu naturel**. Il s'agit d'une question qui possède deux entrées également importantes :

- action des vagues sur les structures, pour connaître les efforts qui s'exercent sur cette structure et prédire sa réponse à ses sollicitations, afin d'en optimiser le dimensionnement,
- effets de la structure sur les vagues et l'hydrodynamique locale, pour connaître l'influence de la structure sur l'hydrodynamique (atténuation des vagues ou génération de re-circulations locales par exemple), puis ensuite sur l'équilibre géomorphologique local (affouillements éventuels ou zones d'érosion par exemple).

J'ai travaillé sur ces aspects essentiellement par le biais d'essais en laboratoire sur des maquettes à échelle réduite, au sein de projets de recherche intéressant EDF, pour certains co-financés par le CETMEF, ou de programmes de recherche européens (MAST-3 RMBFM notamment), et en collaboration avec d'autres ingénieurs et des techniciens d'essais.

Mes travaux, brièvement décrits dans les paragraphes ci-après, ont porté sur quatre types principaux de structures : (i) structures verticales perforées, (ii) digues à talus, (iii) structures isolées en mer (de type pieux), (iv) structures posées sur le fond marin.

A.2.5.2. Structures verticales perforées

J'ai étudié à plusieurs reprises des dispositifs amortisseurs de houle constitués d'une succession de tôles métalliques perforées ou en métal déployé, dans le cadre de l'association POLHYDRO, et pour la mise au point de systèmes amortisseurs de houle pour les bassins à houle du LNHE, et en particulier pour la cuve à houle multidirectionnelle et à courants. De nombreux tests ont été réalisés en jouant sur l'espacement des plaques et la combinaison des porosités afin d'obtenir un système efficace sur une large gamme de périodes et de profondeurs d'eau. Signalons également que j'ai développé à l'occasion de ces études expérimentales des méthodes d'analyse de houle incident-réfléchi au deuxième ordre, permettant de séparer les harmoniques libres et liés.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.5.1 en partie B :		Article(s) en Annexe :	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
	[AC05]		[RR15]

A.2.5.3. Digués à talus

Les digues à talus sont un type d'ouvrage très utilisé en génie côtier et portuaire, et notamment pour les chenaux de prise d'eau des centrales EDF en bord de mer. J'ai réalisé ou conduit plusieurs projets d'étude portant sur la stabilité de ces ouvrages, notamment sur le type de bloc de carapace (enrochements naturels ou blocs artificiels en béton), sur la tenue de la carapace, mais aussi de la butée de pied, du couronnement et du talus arrière. Ces essais ont permis d'apprécier et d'améliorer la validité de formules de stabilités utilisées pour la carapace (formules d'Hudson et de Van der Meer), pour la butée de pied (formule de Gerding) et de proposer de nouvelles formules notamment pour la stabilité du talus arrière. Les travaux réalisés dans le cadre de projet européens MAST ont donné lieu à des publications de portée internationales. En 2004-2005, j'ai été sollicité pour la réactualisation du guide européen CIRIA-CUR-CETMEF sur l'utilisation des enrochements pour les ouvrages côtiers ou fluviaux (« Rock Manual »). J'assure la coordination et une partie de la rédaction du chapitre 4 sur les conditions d'environnement physique (bathymétrie, courants, vagues, géotechnique, etc.) pour le dimensionnement (180 pages en version quasi-définitive à l'automne 2005).

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.5.2 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 8 [AC11]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[LI05] [AJ05]	[AC04] [AC07] [AC11] [AC31] [AC37]	[PR17]	[RR12] [RR14] [RR20] [RR26] [RR28] [RR34]

A.2.5.4. Structures isolées en mer (de type pieux)

A partir de 2001, dans le cadre du développement des actions de recherche menées par EDF sur les énergies renouvelables en milieu maritime, j'ai eu l'occasion de travailler, avec Marilyn Luck, sur des structures-support d'éoliennes en mer et d'hydroliennes. Nous avons notamment mené des recherches, essentiellement expérimentales, sur les efforts dus aux vagues sur une monopile support d'éolienne en mer. Notre objectif principal concernait l'étude des effets de faible profondeur d'eau, en considérant des vagues très cambrées et dissymétriques, allant jusqu'au déferlement. Ces essais ont permis d'une part de mieux définir le domaine de validité d'une approche basée sur la formulation de Morison pour la prédiction de l'effort horizontal et du moment de renversement, et d'autre part de quantifier l'augmentation d'effort due au terme d'impact pour les cas de vagues déferlantes. Nous avons en particulier montré l'apport de méthodes numériques avancées pour l'estimation de la cinématique des vagues, en particulier la version irrégulière de la méthode de fonction de courant (ISFM), ainsi que la méthode de fonction de transfert modifiée (MTFM) (cf. § A.2.4.2). Actuellement, nous examinons les potentialités de modèles numériques non-linéaire de propagation des vagues en zone côtière (logiciel **BSQ** basé sur les équations de Boussinesq étendues) (cf. § A.2.4.3).

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.5.2.3 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 9 [AJ06]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
[AJ06]	[AC27] [AC30]	[PR16]	[RR44] [RR48] [RR50] [RR54]

A.2.5.5. Structures posées sur le fond marin

Dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC, j'ai travaillé, avec Marilyne Luck, sur des méthodes d'estimation d'efforts sur des structures posées près du fond marin, notamment des pipelines et ouvrages de rejets en mer, en zone côtière et en zone de déferlement. Nous avons réalisé une étude bibliographique des connaissances sur cette problématique, ainsi que des méthodes et résultats disponibles. Ensuite, des essais spécifiques en canal à houle ont été réalisés à l'Université de Caen Basse Normandie, en collaboration avec Christophe Chevalier, d'abord pour réaliser des mesures précises de vitesses orbitales de houle près du fond (en l'absence de cylindre), puis pour mesurer les efforts sur un cylindre horizontal posé près du fond. La partie « cinématique des vagues » a fait l'objet de comparaisons avec les méthodes de prédiction développées précédemment et donné lieu à plusieurs publications. Les mesures d'efforts n'ont pas encore été totalement exploitées à ce jour et feront l'objet d'analyses ultérieures.

Pour aller plus loin sur ce sujet :

Présentation détaillée : cf. § B.5.4 en partie B :		Article(s) en Annexe : Annexe 7 [AC24]	
Chapitres de livres (LI) Articles de revues (AJ)	Articles de conférence (AC)	Présentations (PR) Posters (PO)	Rapports de recherche (RR)
	[AC24]	[PR13]	[RR39] [RR51] [RR53]

A.3. ACTIVITES D'ETUDES ET PROJETS APPLIQUES

A.3.1. Etudes et projets liés aux ouvrages EDF

A.3.1.1. Etudes liées aux centrales électriques en bord de mer

Etudes liées à la dynamique sédimentaire et interactions avec les ouvrages EDF :

- **Centrale de Flamanville (Manche). 1991 et 1992.** Etudes de suivi sédimentologique du chenal de prise d'eau. Détermination des zones d'accrétion et de dépôts entre différents levés bathymétriques. Analyse de la dynamique d'évolution morphodynamique du chenal. Analyse du comportement hydraulique du chenal de prise d'eau. Conseil à l'exploitant sur l'opportunité de réaliser des dragages préventifs avec indication des zones à draguer et volumes de sédiments à enlever.
Rapports d'études internes : [RI02] (1991) et [RI04] (1992).

Etudes liées à l'impact des rejets des centrales EDF :

- **Centrale de Flamanville (Manche). 1990.** Etude de la dispersion des rejets thermiques par analyse de mesures (thermographies aériennes et chaînes de thermographes en points fixes ou tractées) et de résultats de simulations numériques de courantologie. Analyse des panaches thermiques, et vérification du respect des contraintes d'échauffement de l'arrêté de rejet pour la Centrale.
Rapport d'étude interne : [RI01] (1990).
- **Faisabilité d'un suivi thermographique par satellite. 1992.** Analyse de différents capteurs de mesure embarqués sur plusieurs satellites (SPOT, LANDSAT, etc.) et détermination de leur capacité éventuelle à mesurer les panaches thermiques liés aux rejets des centrales en bord de mer. Mise en évidence des avantages et des limitations des différents satellites.
Rapport d'étude interne : [RI03] (1992).

Etudes liées au risque hydrocarbure pour les centrales EDF :

- **Centrale du Blayais (Gironde). 2003.** Participation (avec Antoine Garapon et Bruno Dupuis) à l'étude de modélisation numérique de la dérive de nappes d'hydrocarbure dans l'estuaire de la Gironde jusqu'à la Centrale du Blayais. Utilisation d'un modèle courantologique bidimensionnel (logiciel **TELEMAC-2D**) et prise en compte schématique de l'effet du vent sur la dérive de la nappe d'hydrocarbure. Etude de différents scénarios. Production pour la Centrale de résultats lui permettant d'évaluer les risques d'arrivée de nappes d'hydrocarbure en fonction du lieu de détection, de l'instant de la marée et des caractéristiques du vent.
Rapport d'étude interne : [RI10] (2003).

Etudes liées à la prise en compte de l'aléa « houle de tempête » pour les centrales EDF :

- **Centrale de Penly (Seine-Maritime). 2002.** Réactualisation des conditions extrêmes de houle de tempête au large de la Centrale. Propagation de ces conditions jusqu'à la centrale (logiciel **TOMAWAC**) en réalisant des études de sensibilité à différents paramètres (processus physiques pris en compte, niveau de mer, courant de marée, direction de provenance des vagues, caractéristiques du vent). Participation (avec Thierry Boulet) à l'étude de pénétration des houles dans le chenal (logiciel d'agitation **ARTEMIS**) et études de sensibilité. Etude par

expertise de la tenue des digues de protection, des franchissements et des risques d'inondation dus aux vagues.

Rapport d'étude interne : [RI06] (2002).

- **Centrale de Paluel (Seine-Maritime). 2002.** Mêmes types d'études que celles présentées ci-dessus pour la centrale de Penly.

Rapport d'étude interne : [RI07] (2002).

- **Centrale de Flamanville (Manche). 2002.** Mêmes types d'études que celles présentées ci-dessus pour la centrale de Penly, avec une attention plus particulière sur l'analyse de la stabilité des digues de protection du chenal de prise d'eau.

Rapport d'étude interne : [RI08] (2002).

- **Centrale de Flamanville (Manche). 2003.** Participation (avec Cécile Machet) à une étude hydraulique destinée à vérifier la continuité de l'alimentation en eau de la centrale, même en cas de dommages éventuels importants aux ouvrages de protection (en cas de tempête extrême). Utilisation d'un modèle courantologique bidimensionnel (logiciel **TELEMAC-2D**) et calculs d'expertises à partir de formules et d'abaques scientifiques.

Rapport d'étude interne : [RI11] (2003).

Etudes liées à la prévision des risques hydro-météorologiques et la mise au point de systèmes d'alerte pour les centrales EDF :

- **Centrale du Blayais (Gironde). 2002 et 2005.** En 2002-2003, réalisation avec Thierry Boulet, et en partenariat avec Météo-France DPrévi/Mar à Toulouse, d'une étude de faisabilité d'un système de prévision des niveaux et des conditions de clapot dans l'estuaire de la Gironde, et au droit de la centrale du Blayais en particulier. Utilisation d'un modèle courantologique bidimensionnel (logiciel **TELEMAC-2D**) et d'un modèle d'états de mer (logiciel **TOMAWAC**) de l'estuaire, forcés aux limites et sur le domaine de calcul par des prévisions météorologiques issues des modèles opérationnels de Météo-France. Construction et calage des modèles numériques. Automatisation des procédures de pré-traitement, de lancement des simulations et de post-traitement des résultats. Utilisation en conditions semi-opérationnelles (simulations quotidiennes lancées à 5 h du matin) pendant 6 mois (prévisions 48 h à l'avance). Comparaisons avec des mesures de niveau dans l'estuaire.

En 2005, le modèle courantologique basé sur **TELEMAC-2D** a été mis à disposition d'une structure de projet réunissant Météo-France, le Service de Prévision des Crues Littoral Atlantique, le CETMEF et le SCHAPI dont le but est de bâtir un modèle opérationnel de prévision des niveaux d'eau en Gironde. Cette action de partenariat est destinée à se poursuivre en 2006-2007 par un soutien aux partenaires ci-dessus, ainsi que par la réalisation de développements et d'améliorations du modèle courantologique.

Rapports d'études internes : [RI09] (2002) et [RI19] (2005).

- **Centrale de Flamanville (Manche). 2004.** Participation (avec Météo-France et la centrale de Flamanville) à la définition d'un système d'alerte et de prévision des tempêtes extrêmes, basé sur les modèles de prévision d'états de mer de Météo-France, complétés par des mesures (bouées et satellites). Elaboration des différents niveaux de ce systèmes, définition de seuils, etc. en relation avec les partenaires.

Rapport d'étude interne : [RI16] (2004).

- **Centrales de Flamanville (Manche), Penly et Paluel (Seine-Maritime). 2006.** Etudes sur l'aléa « houles de tempête » réalisées avec Florence Lafon, Damien Violeau, Thierry Boulet et Céline Cheviet en réponse à des questions de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). Apport de précisions complémentaires, réalisation d'études de sensibilité, études de confortement et de vérification de résultats précédemment obtenus.

Rapport d'étude interne : [RI20] (2006).

Etudes de stabilité des ouvrages de protection des centrales EDF :

- **Centrale de Flamanville (Manche). 1994.** Chef de projet des études de stabilité pour le reprofilage de la protection du terre-plein dit de Guerfa sur le site de Flamanville. Coordination d'une étude de stabilité en canal à houle aléatoire (réalisée par Jean Allilaire) destinée à mettre au point le profil et d'une étude en cuve à houle régulière (réalisée par Jean-Robert Courivaud et Paul Thellier) couvrant les aspects tridimensionnels. Tests de différentes solutions et optimisation de la protection.
Rapports d'études internes, validés en tant que chef de projet :
Allilaire J. (1994) Centrale de Flamanville. Reprofilage du terre-plein de Guerfa - Rapport d'étude en canal à houle aléatoire. Rapport EDF-LNH HE-42/94.27.
Courivaud J-R., Thellier P. (1994) Centrale de Flamanville. Centrale de Flamanville. Reprofilage du terre-plein de Guerfa - Rapport d'étude en cuve à houle. Rapport EDF-LNH HE-42/94.40.
- **Centrale du Blayais (Gironde). 2000.** Etude de confortement des digues de protection en front de Gironde de la centrale suite à la tempête du 27/12/1999. Réalisation de calculs d'expertise sur les franchissements et les efforts dus aux vagues sur le mur pare-houle. Participation (avec Denis Aelbrecht, Jean Allilaire, Fabrice Vinet et Jean-Michel Menon) à l'étude de stabilité en canal à houle aléatoire. Mesure des efforts dus aux vagues sur le mur pare-houle et des franchissements par dessus la structure. Tests de différents profils et optimisation de la solution finale, mise en place sur le site en 2000-2001.
Rapport d'étude interne : [RI05] (2000) et l'article de revue [AJ05] (2004).
- **Centrale du Blayais (Gironde). 2005.** Estimation par expertise des efforts horizontaux (hydrostatiques et dynamiques) dus aux vagues sur le mur pare-houle de la digue de protection en front de Gironde. Etudes de sensibilité au tassement et à la présence d'encrochements sur la berme de couronnement.
Rapport d'étude interne : [RI17] (2005).

A.3.1.2. Etudes liées à l'implantation d'éoliennes en mer

- **Appel d'offres national « éolien offshore ». Pré-sélection de sites. 2003.** Participation (avec Florence Lafon et Marilyn Luck) à la sélection de sites pour l'installation éventuelle de parcs éoliens en mer. Recueil de données bathymétriques, hydrauliques et morpho-sédimentaires sur 5 sites. Caractérisation des conditions marines des sites. Présentation synthétique des conditions hydro-météorologiques et des particularités des sites.
Rapport d'étude interne : [RI13] (2003).
- **Appel d'offres national « éolien offshore ». Etudes détaillées de sites. 2004.** Participation (avec Florence Lafon) aux études hydrauliques détaillées des sites pré-retenus par le Groupe EDF. Réalisation de simulations courantologiques (logiciel **TELEMAC-2D**) et d'états de mer (logiciel **TOMAWAC**) sur des maillages à différentes échelles pour modéliser précisément les conditions locales sur les sites envisagés pour l'installation des éoliennes. Détermination des conditions de projet locales pour le design. Etude particulière de l'effet du déferlement éventuel des vagues et conséquences pour les fondations d'éoliennes. Participation aux études portant sur l'accessibilité et la maintenance du parc (du point de vue des conditions hydro-météorologiques) et les impacts éventuels des éoliennes sur le régime hydro-sédimentaire. Pilotage de parties d'études réalisées par des prestataires externes.
Rapports d'études internes : [RI14] et [RI15] (2004).

A.3.2. Etudes et projets pour des tiers (hors-EDF)

A.3.2.1. Etudes océano-météo et conditions de projet pour les sites côtiers

- **Site de Dunkerque (Nord). 1996.** Analyse de la climatologie des houles pour l'atterrage du pipeline NORFRA. Réalisation de simulations de propagation des houles du large vers le port (logiciel **TOMAWAC**) pour différents secteurs de provenance. Implantation et tests de différents modèles de prise en compte du déferlement (utilisation des résultats de la thèse de F. Becq-Girard, en cours à cette époque). Calibration du modèle par rapport à des mesures de bouées. Détermination des conditions de houle le long du pipeline.
Rapport d'étude externe : [RE05] (1996).
- **Site de Roscoff (Finistère). 1997.** Réactualisation des conditions de projet au large (houle, vents, niveaux marin). Etude statistique pour la détermination des niveaux (marée + surcotes) de différentes périodes de retour (sur la base de la méthode de convolution utilisée par le SHOM). Etude statistique des houles du large, par secteur directionnel. Réalisation de simulations de propagation des houles du large vers le port (logiciel **COWADIS**) et détermination des conditions de projet au niveau du port.
Rapport d'étude externe : [RE06] (1997).
- **Site de Port-Louis (Guadeloupe). 2002.** Analyse de la climatologie des cyclones. Réalisation de simulations de propagation des houles du large vers le port (logiciel **TOMAWAC**) pour différents secteurs de provenance. Détermination des conditions de projet au niveau du port. Estimation de différentes hauteurs caractéristiques de vagues ($H_{1/3}$, $H_{1/10}$) à partir de la hauteur spectrale H_{m0} par utilisation de modèles de distributions de hauteurs de houle en faible profondeur d'eau de type Beta-Rayleigh.
Rapport d'étude externe : [RE07] (2002).

A.3.2.2. Etudes d'aménagements portuaires (courantologie, agitation)

- **Port de Roscoff-Bloscon (Finistère). 1991, 1992, 1994.** Réalisation d'études courantologiques par modélisation numérique (logiciel **TELEMAC-2D**) de projets d'extensions du port. Interfaçage avec des résultats d'un modèle IFREMER pour les conditions aux limites. Calage et validation du modèle. Test de différentes configurations portuaires.
Rapports d'études externes : [RE01] (1991), [RE03] (1992) et [RE04] (1994).
- **Port du Conquet (Finistère). 1992.** Réalisation d'une étude courantologique par modélisation numérique (logiciel **TELEMAC-2D**) d'un projet d'aménagement du port. Interfaçage avec des résultats du modèle de marée du LNHE pour les conditions aux limites. Calage et validation du modèle. Test de différentes configurations portuaires.
Rapport d'étude externe : [RE02] (1992).

A.3.2.3. Etudes de stabilité d'ouvrages maritimes et côtiers

- **Port de Roscoff-Bloscon (Finistère). 1997-1998.** Pilotage d'une étude expérimentale (conduite par Jean Allilaire) de l'agitation et des franchissements pour l'aménagement de quais "pêche" dans le port de Roscoff. Optimisation du projet via des essais en cuve à houle multidirectionnelle pour différentes conditions d'états de mer.
Rapports d'études externes : HE-42/97.31 (1997) et HE-42/98.47 (1998) de Jean Allilaire, que j'ai validés en tant que chef de projet.

- **Darse du Canier à Toulon (Var). 2002-2003.** Etude en cuve à houle aléatoire de la stabilité des protection du chenal d'accès à une darse sur la presqu'île de Saint-Mandrier près de Toulon. Test de différentes solutions et optimisation des protections en enrochements naturels. Mesure de l'agitation dans la darse, en présence ou non d'une plate-forme amarrée dans la darse.

Rapport d'étude externe : [RE08] (2002).

A.4. ACTIVITES DE MANAGEMENT

A.4.1. Fonctions hiérarchiques à EDF R&D

De 01/03/1997 au 31/07/2001 (soit durant quatre années et demie), j'ai occupé un poste de chef du Groupe d'études au LNH dans mon domaine de compétences (hydraulique maritime et ouvrages côtiers). Je donne ci-après seulement quelques grands traits de mes activités durant cette période et quelques faits saillants.

- J'ai pris en 1997 la responsabilité du Groupe Hydraulique Maritime, qui traitait des études et recherches dans le domaine de l'hydrodynamique marine et côtière (marées, vagues, courants), du génie côtier et portuaire, de la dynamique sédimentaire et du génie côtier, de la qualité des eaux marines et en estuaire, etc.
- En 1998, j'ai contribué à faire évoluer ce groupe d'études en « Groupe Hydraulique Maritime et Ouvrages d'eau », en rassemblant au sein de ce périmètre l'ensemble des études à caractère expérimental (dans les domaines fluvial et maritime). Le champ d'activité s'est donc élargi à des problématiques fluviales (ouvrages en rivières, vannes, seuils, évacuateurs de crues, etc.) étudiées à l'aide de maquettes à échelle réduite. Une équipe appelée « Pôle Modèles Physiques » a été constituée au sein de ce Groupe, rassemblant les compétences en modélisation expérimentale (chercheurs, ingénieurs et techniciens).
- En 2000, dans le cadre de la réorganisation du LNH en LNHE, le Groupe a évolué en « groupe Ouvrages d'eau et Environnement » et a reçu le renfort d'experts en qualité des eaux marines.

Au cours de ces années, les effectifs du Groupe ont donc varié, avec une valeur moyenne se situant autour d'une trentaine d'agents (environ 18 ingénieurs et chercheurs et 12 techniciens). J'ai donc eu à gérer une équipe assez importante dans un contexte évolutif, à la fois pour ce qui concerne les missions du Groupe d'étude et le contexte général de la Division R&D d'EDF (réorganisation du LNHE en 2000, suppression des Services, mise en place des Accords locaux de Réduction du Temps de Travail, etc.).

J'ai piloté le groupe pendant plus de la durée d'un contrat (1997-2000), définissant le contenu de ce contrat de Groupe pour la période considérée (contrat initial 1997-1999 [RM01] et avenant 2000 [RM04]) et réalisant ensuite le bilan de l'activité sur cette période [RM02] [RM03].

Au cours de ces quatre années, j'ai donc géré et développé l'activité du Groupe sur les aspects suivants, ce qui a été une expérience très formatrice et enrichissante, complétant ma formation scientifique :

- **Stratégique et organisationnel** : participation à l'élaboration du plan stratégique du LNH et déclinaison pour le Groupe, définitions d'objectifs et de cibles à atteindre dans le cadre du Contrat de Groupe, choix d'organisation interne au Groupe pour réaliser les activités prévues,
- **Animation scientifique et technique**, en m'appuyant sur les ingénieurs-séniors et les chefs de projet : définition des enjeux de recherche et des moyens et collaborations à mettre en place, politique de partenariats externes, choix de la stratégie de communication scientifique (congrès et conférences, revues scientifiques,...) et des sujets de thèses,
- **Administratif et budgétaire** : établissement et négociation d'une programme d'activité annuel avec les différents « clients » du Groupe, suivi de l'activité, reporting budgétaire et technique régulier en cours d'année, comptes rendus annuels d'activité, etc.,
- **Ressources humaines** : gestion des agents composant le Groupe, entretiens d'évaluation annuels, gestion des mutations et des embauches, réunions d'animations et de communication au sein de l'équipe, etc.

Je me suis beaucoup investi dans cette mission de pilotage et d'animation du Groupe (tout en poursuivant en parallèle quelques activités scientifiques, comme le projet CLAROM-ECOMAC et le développement de modèles numériques de houle **REEF-2000**, **BEACH**, **BSQ**). Au vu du volume de recherches, de projets européens et d'études réalisées pour EDF et pour des tiers durant cette période, je crois pouvoir dire que j'ai rempli avec un certain succès cette mission de management, surtout en tenant compte d'un contexte peu favorable, marqué par de nombreux départs en retraites et mutations d'ingénieurs experts et de chercheurs confirmés. Au plan personnel, j'en ai retiré beaucoup d'enseignements et de satisfaction, en dépit du caractère exigeant et exposé du poste. J'ai notamment beaucoup appris sur le management quotidien des hommes et des femmes, chercheurs et techniciens, au sein d'un groupe de recherche de taille significative.

A.4.2. Management de partenariats et animation d'équipe de recherche

En dehors des fonctions hiérarchiques décrites au paragraphe précédent, j'ai été amené à manager des partenariats de collaborations, notamment dans le cadre des relations « historiques » que EDF R&D entretient avec le Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF) depuis 1946, au travers de la Convention de collaboration dite **Convention Biparti EDF-Ministères**.

Dans ce cadre, j'ai notamment assuré :

- Le suivi et le pilotage pour EDF R&D de la **Convention Biparti** (1997-2006).

Il s'agit du suivi relations régulières avec le CETMEF, de l'organisation et de la préparation du Comité Biparti annuel, de la coordination de la rédaction du document de recueil des fiches-programmes de R&D (voir, depuis 2001 : [RM05] [RM06] [RM07] [RM10] [RM11]), de la rédaction et diffusion du compte-rendu du Comité Biparti, de l'animation du suivi des recherches au sein du LNHE.

En 2003-2004, j'ai assuré avec Charles Teisson et le CETMEF (G. Caude, Ph. Sergent) la coordination de la rédaction d'un document de synthèse des travaux effectués dans le cadre de cette Convention Biparti depuis 1990 [RM09]. Ce document, assez conséquent, recense et met en perspective les recherches effectuées depuis une quinzaine d'années et met en lumière quelques résultats significatifs obtenus, les publications rédigées, etc.

- Le **montage d'une Equipe Commune de Recherche (ECR)** avec le CETMEF (2004-2005)

Dans la perspective du renouvellement de la Convention Biparti EDF-Ministères, cette équipe a pour but de mutualiser certaines compétences et actions de R&D du CETMEF et de EDF R&D dans les domaines de l'Hydraulique Fluviale et Maritime. Des discussions sont également en cours avec l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) afin d'examiner la possibilité de créer un Laboratoire de Recherche Commun à partir de 2007. Sur ces aspects, en soutien de Pierre-Louis Viollet (Directeur des Laboratoires de EDF R&D) et de Charles Teisson (Chef du LNHE), je participe à l'animation de la réflexion et des échanges (rédaction de documents de propositions, organisation de réunions) et de synthèse des discussions. J'ai notamment assuré la rédaction de la Convention de création de l'ECR entre EDF R&D et le CETMEF, finalisée en Mars 2006.

- La **direction de l'Equipe Commune de Recherche (ECR)** (2006)

EDF R&D et le CETMEF ont choisi de me confier la direction de l'ECR créée début 2006. Cette équipe comprend 8 personnes côté EDF R&D travaillant partiellement sur des activités labellisées ECR (représentant 3.8 chercheurs en Equivalent Temps Plein) et 3 personnes côté CETMEF (deux chercheurs basés à Chatou, Jacques Sainte-Marie et Damien Pham Van Bang, ainsi qu'une ingénieure actuellement en thèse, basée à Compiègne, Vanessya Laborie). A cela s'ajoute des personnels temporaires (stagiaires de fin d'étude, étudiants en thèse).

J'assure l'animation scientifique de l'Equipe (proposition de sujets de recherche, suivi des travaux, publications, séminaires, etc.), ainsi que les relations avec la filière hiérarchique EDF R&D (négociation du programme de recherche labellisé ECR, reporting scientifique et

budgétaire, etc.). L'ECR sous cette forme embryonnaire a un caractère transitoire et devrait évoluer à partir de 2007 vers un Laboratoire de Recherche Commun, plus ambitieux au plan scientifique et plus conséquent en termes de moyens, et qui devrait également compter l'ENPC parmi ses partenaires. Les réflexions sur cette évolution sont actuellement en cours, dans le cadre du Renouveau de la Convention Biparti (expirant fin 2006).

A.4.3. Management de projets à caractère scientifique ou technique

J'ai aussi été amené à manager des projets (ou parties de projets) de recherche multi-partenaires (en interne EDF ou en externe, au niveau national ou européen), parmi lesquels on peut citer :

- Pilotage de la mise en service et de l'exploitation de la **cuve à houle directionnelle (C3D)** du LNHE (1992-1997). J'ai coordonné l'installation et la mise en service de cette installation, suite au départ de Daniel Fritsch en 1992, avec l'aide de René Samie et Jean-Michel Menon, techniciens du LNHE. Nous avons notamment dirigé la réception et l'équipement informatique de cette installation (aspects matériels et logiciels) [RD01] [RD03].
- Le **développement du code TOMAWAC** (1995-1998) modèle d'états de mer intégré au sein du système **TELEMAC** en éléments finis. Ce projet de développement m'a amené à animer une équipe composée de Frédéric Marcos, Damien Violeau, Françoise Becq et Paul Thellier, ainsi que plusieurs ingénieurs-stagiaires de fin d'études, en lien avec Jean-Michel Hervouet, chef du projet **TELEMAC**. Notre implication technique sur ce projet est décrite en détail au § B.3.1 de ce mémoire. Voir aussi [RR16] [RR19] [RR21] [RR22] [RR27] [RR31] [RR46], ainsi que les Annexes 3 et 4 de ce mémoire.
- Le projet **ECOMAC** (1999-2002) élaboré dans le cadre du **CLAROM**, qui regroupait outre EDF-LNHE, les sociétés suivantes : BUREAU VERITAS, IFREMER, OPTIMER, PRINCIPIA, METEOMER, CETMEF, SOGREAH et dont l'objectif était de qualifier les méthodes et outils d'étude de terminaux et d'atterrages en zone côtière, en considérant l'ensemble de la chaîne, depuis l'analyse climatologique météo-océano et la qualification des outils d'étude des sollicitations marines jusqu'au design des ouvrages, et l'appliquant à deux cas réels :
 - atterrissage d'un pipeline en zone côtière
 - étude d'un terminal en eau peu profondeCe projet d'un montant global de 3 MF (457.3 kEuros) s'est déroulé sur la période 1999-2001 et a bénéficié d'une subvention du Fond de Soutien aux Hydrocarbures (FSH) du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Il a permis des avancées réelles dans le domaine de la connaissance des conditions océano-météo et hydrauliques en faible profondeur d'eau et de l'amélioration des méthodes de design en zone côtière. Voir le rapport final de l'ensemble du projet que j'ai rédigé avec les contributions des partenaires [RR51], en plus des différents rapports décrivant nos contributions [RR38] [RR39] [RR40] [RR43].
- Coordination de la rédaction du **chapitre 4 du Rock Manual** (2003-2005) dans le cadre du Groupe de travail européen CIRIA-CUR-CETMEF (voir § A.7.4 et § B.5.2.3 et pour une description plus détaillée). J'anime une équipe d'une dizaine d'auteurs et de contributeurs pour les différentes sections et sous-sections qui composent le chapitre, tout en assurant moi-même la rédaction de la Section 4.2 relative aux conditions marines et côtières, avec des contributions de Peter Hawkes (HR Wallingford, UK) et Jentsje Van der Meer (INFRAM, NL) [LI05] [AC31].

A.5. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE FORMATION

Cette partie présente de façon synthétique mes différentes activités d'enseignement et de formation, dispensées à l'occasion de cours réguliers ou modules de projet appliqué en écoles d'ingénieur, dans des universités et à l'occasion de séminaire de formation.

En volume, il s'agit d'une part non-négligeable de mon activité, puisqu'elle représente suivant les années entre 50 et 60 heures de cours ou de projet (auxquelles il faut ajouter une dizaine d'heures pour la correction des rapports de projets et contrôles de connaissances).

C'est une activité que je pratique depuis plus de 10 ans et à laquelle je reste très attaché pour les différents avantages que j'y trouve. En premier lieu, transmettre des connaissances nécessite d'abord de les maîtriser et de les présenter sous une forme accessible et claire : il s'agit d'un exercice certes exigeant, mais particulièrement formateur et enrichissant dont j'apprécie toutes les vertus. Les contacts avec les étudiants, les ingénieurs ou techniciens (suivant mes cours) sont par ailleurs toujours bénéfiques, par les échanges auxquels ils donnent lieu, les pistes d'amélioration qu'ils soulèvent souvent et les relations qu'ils permettent de nouer (que ce soit pour des collaborations ultérieures, des stages, des thèses, etc.).

Cette partie est divisée en trois sections : la première présente les cours et projets dispensés chaque année dans des grandes écoles d'ingénieurs de façon régulière depuis plusieurs années. La seconde partie présente des interventions ponctuelles faites à l'Université dans des cours de DEA ou de Master. Enfin la troisième partie détaille les interventions sous forme de conférences ou de séminaires de formation dispensés en interne LNHE à l'attention des techniciens et ingénieurs, ou pour des organismes tels que le CETMEF ou l'IPER du Havre dans le cadre de la formation continue.

A.5.1. Enseignements réguliers en écoles d'ingénieur

A.5.1.1. Ecole Centrale Paris (ECP)

Depuis 1994, soit plus de 10 ans, j'interviens dans le cadre d'un module de formation proposé aux élèves de troisième année de l'Ecole Centrale Paris (ECP), options Mécanique-Aéronautique-Energétique (MAE) et Aménagement-Construction (AC). Depuis 1997, j'assume la responsabilité de ce module, avec la participation d'autres ingénieurs du LNHE (au cours de ces dernières années : Eric Peltier, Frédéric Marcos, Cécile Machet et Marilyn Luck) et d'intervenants extérieurs ponctuels.

Ce module de 26 demi-journées comprend une partie de cours magistraux portant sur les vagues, l'hydrodynamique côtière, le génie côtier et portuaire, ainsi qu'une partie de projet appliqué au cours de laquelle les élèves travaillent sur un projet d'extension de port sur l'Ile de la Réunion. La partie projet vise à offrir aux élèves une sensibilisation au travail d'ingénierie côtière et portuaire. Elle comprend les aspects suivants : étude de la climatologie des houles à large, détermination de la statistique des houles extrêmes, transfert des conditions de projet du large vers la côte à l'aide du logiciel **TOMAWAC**, établissement d'un plan-masse du port projeté, étude sommaire d'agitation portuaire à l'aide du logiciel **DIFRA2**, dimensionnement des ouvrages extérieurs de type « digue à talus » et estimation financière du coût du projet.

Pour mon intervention, cet enseignement représente en moyenne : *18 h de cours et 12 h de TP par an*. L'évaluation du module est basée pour partie sur une soutenance orale et sur la correction d'un rapport de projet préparé par les élèves.

A.5.1.2. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Depuis 2002 (soit 3 ans), je participe à l'équipe enseignante du module « Travaux maritimes » proposé aux élèves de deuxième année de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), options Génie Civil (GC). Depuis 2005, je suis co-responsable de ce module, avec Piero Silva (SOGREAH) et Geoffroy Caude (CETMEF). Les autres intervenants sont issus du CETMEF (J-J. Trichet, O. Soulat), de SOGREAH (L. Hamm, J. Viguier) et de l'Université de Caen (F. Levoy).

Ce module de 28 demi-journées comprend une partie de cours magistraux portant sur la marée, les courants et le niveau de la mer, les vagues, l'hydrodynamique côtière, le génie côtier, le génie portuaire et le design des ouvrages maritimes, ainsi qu'une partie de projet appliqué au cours de laquelle les élèves travaillent sur un projet d'extension du port de Nice. Comme pour le projet encadré à l'ECP, le projet couvre les aspects suivants : étude de la climatologie des houles à large, détermination de la statistique des houles extrêmes, transfert des conditions de projet du large vers la côte à l'aide du logiciel **TOMAWAC**, analyse des perspectives d'évolution du trafic portuaire et des contraintes d'aménagement du port, établissement d'un plan-masse du port projeté, étude sommaire d'agitation portuaire à l'aide du logiciel **DIFRA2**, dimensionnement des ouvrages extérieurs en considérant différentes solutions (digue à talus, digue verticale, digue flottante).

Pour mon intervention, cet enseignement représente en moyenne : *12 h de cours et 9 h de TP par an*. L'évaluation du module est basée pour partie sur un contrôle de connaissances et sur la correction d'un rapport de projet préparé par les élèves, présenté lors d'une soutenance orale.

A.5.2. Enseignements occasionnels (Ecoles d'ingénieurs et Universités)

A la demande de collègues chercheurs ou professeurs, j'interviens dans des modules de formation en école d'ingénieur ou à l'Université (DEA ou Master) dans mes domaines de compétences (hydraulique maritime et côtière, génie côtier). Ces interventions se font sous la forme de cours ou de conférences de 3 à 4 heures.

18/12/1996 **DEA Sciences de l'Environnement Marin de la Faculté de Luminy (Marseille)**, sur sollicitation de Philippe Forget (LSEET-LEPI) – Cours « Modélisation des vagues en zone côtière et portuaire par l'équation de Berkhoff ». *3 h de cours*.

Contenu : Dérivation de l'équation dite de Berkhoff pour la propagation des vagues en zone côtière et portuaire. Hypothèses, formulation, conditions aux limites (représentation des ouvrages côtiers et portuaires), méthodes de résolution numérique, exemples d'application issues d'études d'ingénierie et de projets de recherche.

07/01/2004 **Ecole d'ingénieurs MATMECA de Bordeaux**, sur sollicitation de Philippe Bonneton, 12/12/2005 puis Nathalie Bonneton (DGO). Cours « Physique et modélisation des états de mer et des vagues pour l'ingénierie côtière » - *3 h de cours*.

Contenu : Modes de représentation et de caractérisation des états de mer, différentes approches de modélisation depuis l'océan jusqu'au franchissement des ouvrages côtiers, processus physiques à prendre en compte, techniques numériques employées, limitations des différentes approches de modélisation, exemples d'applications et de résultats issus d'études d'ingénierie, présentation des axes de R&D sur la modélisation numérique des vagues, depuis l'océan jusqu'à la plage et aux ouvrages côtiers.

16/12/2004 **Master « Recherche Océanographie Physique et Météorologie Côtière »**
15/12/2005 **des Universités du Sud Toulon Var et de la Méditerranée (Aix-Marseille II)**, sur sollicitations de Philippe Fraunié, Philippe Forget, Vincent Rey (LSEET-LEPI et ISITV) Cours « Vagues en zone côtière et hydrodynamique littorale » - *4 h de cours*.

Contenu : Cours identique à celui dispensé à MATMECA pour la partie relative à la modélisation des vagues, avec en plus la problématique du déferlement en zone côtière et

ses effets sur l'hydrodynamique littorale (variations du niveau moyen, courant de retour dans le profil, courants de dérive littoraux) et ouverture vers la dynamique sédimentaire littorale.

A.5.3. Conférences et séminaires de formation

- 25/03/1993 **EDF R&D LNHE** – Cours « Description physique de la houle et sa modélisation ». Formation interne au LNHE des jeunes ingénieurs et techniciens. *6 h de cours en deux demi-journées.*
Supports de cours publiés sous forme de rapport LNHE [RR09].
- 29/06/1995 **CETMEF** – Module « Ouvrages extérieurs des ports maritimes. Digués à talus »
03/04/1997 *4 h de cours + démonstrations en laboratoire.*
Contenu : revue des différents types d'ouvrages extérieurs des ports. Traitement détaillé du cas des digués à talus : composition, méthodes et outils de dimensionnement, modes de rupture, performances hydrauliques (run-up, franchissements, réflexion), modélisation expérimentale (avec visite des installations d'essais du LNHE)
- 11/09/1996 **University Heriot Watt (Edimbourg, UK)** – Conférence invitée « On some advanced physical and numerical models for studying sea waves and their effects » dans le cadre du colloque "Waves and modelling the marine environment". *2 h de conférence.*
Texte de la communication publiée sous forme de rapport LNHE [RR30].
- 23/03/1999 **Institut Portuaire du Havre (IPER)** – Module « Digués en enrochements et digués à talus : conception, calculs, essais en laboratoire ». *4 h de cours + essais de démonstration en laboratoire dans un canal à vagues.*
22/03/2001 Contenu : revue des différents types d'ouvrages extérieurs des ports. Traitement détaillé du cas des digués à talus : composition, méthodes et outils de dimensionnement, modes de rupture, performances hydrauliques (run-up, franchissements, réflexion), modélisation expérimentale (avec visite des installations d'essais du LNHE)

A.6. ENCADREMENT DE CHERCHEURS, INGENIEURS, STAGIAIRES ET TECHNICIENS – PARTICIPTION A DES JURYS DE THESE

A.6.1. Encadrement de stages (élèves ingénieur, DEA, Master)

Chaque année, le LNHE accueille environ une vingtaine de stagiaires ingénieurs ou chercheurs, issus des Grandes Ecoles d'Ingénieurs ou de l'Université. Au cours de 15 années passées au LNHE (avec toutefois une « baisse de régime » sur cet aspect durant la période 1997-2001 où j'exerçais des fonctions hiérarchiques), j'ai eu le plaisir d'accueillir et d'encadrer (ou de co-encadrer) une quinzaine de stagiaires, pour des périodes de 3 à 6 mois. La plupart de ces stages ont été effectués sur des sujets de R&D, et quelques uns sur des études plus appliquées. Je reproduis ci-dessous la liste chronologique des stages que j'ai encadrés ou co-encadrés, en précisant le nom et la formation du stagiaire, le sujet et la durée du stage.

Ces stagiaires m'ont été d'une aide précieuse pour étudier une question particulière sur un des axes de mes recherches, explorer des pistes nouvelles, effectuer des développements méthodologiques et logiciels, participer à la réalisation d'expériences en laboratoire, etc. Les échanges et discussions que j'ai pu avoir avec ces stagiaires ont été très enrichissants pour mes travaux. Chaque stage a fait l'objet d'un mémoire technique dont je me suis en général servi au cours de mes travaux ultérieurs. Beaucoup des logiciels ou des sous-programmes développés par ces stagiaires ont été repris, mis en forme et améliorés pour être conservés sous une forme utilisable ou bien intégrés dans des versions industrielles des logiciels du LNHE. J'ai essayé en retour de leur proposer des sujets attractifs et intéressants, d'être disponible pour orienter leurs recherches et de les guider dans cette première expérience d'ingénieur-chercheur en hydraulique maritime et côtière. Je les remercie ici à la fois pour leur contribution scientifique et technique et pour la qualité des échanges que j'ai pu avoir avec eux.

- 1991 **André Bougard** (ENPC et Imperial College London) – Encadrant principal.
Sujet « Méthodes d'analyse de houle multidirectionnelle » **(2 mois)**.
Résultats utilisés dans le rapport de recherches [RR03] et l'article de congrès [AC01] (ICCE'1992).
- 1992 **Frédérique Touron** (ESIM et DEA Océanographie Physique) – Encadrant principal.
Sujet « Développement et validation de méthodes de mesure de houle multidirectionnelle » **(6 mois)**.
Résultats valorisés et présentés dans le rapport de recherches [RR06] et l'article de congrès [AC02] (WAVES'1993).
- 1993 **François Maurel** (ECP 3^{ième} année) - Encadrant principal.
Sujet « Validation de méthodes de génération de houle multidirectionnelle » **(3 mois)**.
Ingénieur embauché au LNHE suite à ce stage (Groupe Hydraulique Fluviale).
Résultats valorisés et présentés dans le rapport de recherches [RR13] et l'article de congrès [AC08] (5èmes Journées de l'Hydrodynamique, 1995).
- 1994 **Raphaëlle Chevalier** (ENSTA 3^{ième} année) - Encadrant principal.
Sujet « Mesure de réflexion en houle multidirectionnelle » **(4 mois)**.
Résultats utilisés dans le rapport de recherches [RR14].
- 1995 **Cédric Ménard** (DESS Ingénierie Marine Toulon) - Encadrant principal.
Sujet « Développement d'un module opérationnel d'analyse de houle multidirectionnelle » **(5 mois)**.

- 1995 **Françoise Becq-Girard** (DEA Paris VI) – Encadrant principal.
Sujet « Etude et modélisation numérique de l'interaction houle-courant dans les modèles spectraux d'états de mer » (**5 mois**). Stage de DEA suivi d'une thèse au LNHE avec l'Université de Toulon et du Var.
- 1997 **Cécile Machet** (ECP 3^{ième} année) – Encadrant principal.
Sujet « Dimensionnement probabiliste des digues à talus » (**3 mois**). Ingénieur embauchée au LNHE en 1998 suite à ce stage (Groupe Hydraulique Maritime).
Résultats valorisés et présentés dans le rapport de recherches [RR34].
- 2000 **Marilyne Luck** (ECP 3^{ième} année) – Encadrant principal.
Sujet « Modélisation de la propagation des vagues en zone côtière à l'aide de théories non-linéaires ». (**5 mois**). Ingénieur embauchée au LNHE en 2001 suite à ce stage (Groupe Ouvrages d'eau et Environnement).
Résultats valorisés et présentés dans les rapports de recherches [RR39] et [RR41].
- 2001 **François Gachon** (ECP 3^{ième} année) – Co-encadrant avec Géraldine Bellue.
Sujet « Modélisation de l'évolution d'un profil de plage sous l'influence de tempêtes. Utilisation du logiciel SBEACH » (**4 mois**). Ingénieur embauché à EDF R&D en 2001 suite à ce stage.
- 2001 **Camille Curioni** (ESIM 3^{ième} année) – Co-encadrant avec Cécile Machet et Cyrille Abonnell.
Sujet « Traitement des charges hydrodynamiques en vue du pré-dimensionnement de la structure-support d'une éolienne offshore. » (**5 mois**).
- 2001 **Constantinos Zegos** (UMIST Manchester, UK) - Encadrant principal
Sujet « Construction et calibration de modèles d'états de mer pour la constitution d'un atlas numérique de houle sur 20 ans » (**12 mois**).
Résultats valorisés et présentés dans les rapports de recherches [RR42] et [RR57].
- 2002 **Nicolas Cosqueric** (ENSEEIH Toulouse 3^{ième} année) – Encadrant principal.
Sujet « Faisabilité de la prise en compte du processus de diffraction dans un code de propagation de houle à phases moyennées » (**5 mois**).
Résultats valorisés et présentés dans le rapport de recherches [RR52].
- 2002 **Eric Jamois** (ESIM Marseille 3^{ième} année) – Co-encadrant avec Catherine Villaret.
Sujet « Modélisation du transport littoral sous l'action de la houle et des courants » (**5 mois**)
Résultats valorisés et présentés dans le rapport de recherches [RR45].
- 2003 **Tristan Salles** (ESIM Marseille 3^{ième} année et DEA) - Co-encadrant avec Marilyne Luck.
Sujet « Etude des charges hydrodynamiques dues à la houle sur des structures cylindriques verticales en faible profondeur d'eau et dans la zone de déferlement » (**5 mois**).
- 2004 **Julia Krohn** (ENPC 3^{ième} année et Master de l'Imperial College London) – Encadrant principal, avec l'assistance de Florence Lafon.
Sujet « Amélioration de la physique du modèle d'état de mer **TOMAWAC** et application à la simulation d'états de mer réels » (**5 mois**).
- 2005 **Frédéric Bazou** (Ecole Centrale Lyon 3^{ième} année) – Encadrant principal.
Sujet « Modélisation des interactions houle-courant dans les sites à forte marée. Application au Golfe Normand-Breton (Campagne EPEL-GNB du SHOM) » (**5 mois**).
Résultats valorisés et présentés dans le rapport de recherches [RR59], le poster [AV02][PO03] (EuroGOOS'2005), et l'article [AC36] (ICCE'2006)

- 2006 **Elodie Gagnaire-Renou** (ENSTA 3^{ième} année, et Master « Océan, Atmosphère, Climat et Télédétection » de PARIS VI) – Co-encadrant, avec Clément Buvat.
Sujet « Analyse et caractérisation de mesures de profils verticaux de courant en présence de vagues en deux sites proche-côtiers français » (**5 mois**).

A.6.2. Encadrement de thèses et de chercheurs post-docs

- 1995-1998 **Françoise Becq-Girard** (thèse soutenue à l'Université de Toulon et du Var le 26/11/1998) - Encadrant principal, avec Philippe Forget (LSEET-LEPI).
Sujet « Extension de la modélisation spectrale des états de mer vers le domaine côtier ». Cette thèse a été réalisée pour l'essentiel au LNHE, sur financement EDF, avec mon encadrement de proximité, complété par celui de Philippe Forget (LSEET-LEPI, Toulon). Comme le sujet l'indique, l'objectif de la thèse était l'amélioration des modèles spectraux d'états de mer (de type **WAM** ou **TOMAWAC**, initialement développés pour le domaine océanique) de façon à permettre leur application aux zones côtières. Cela nécessitait au moins deux développements majeurs :
- la prise en compte du déferlement en faible profondeur d'eau et de ses effets sur le spectre de vagues (dissipation d'énergie, modification éventuelle de la forme du spectre d'énergie des vagues).
 - la modélisation des effets non-linéaires de faible profondeur d'eau, qui se traduisent par des développements d'harmoniques liés sur un profil temporel de surface libre et par l'apparition de pics secondaires sur le spectre de variance de l'état de mer. Ces interactions non-linéaires se produisent entre triplets de fréquences (triad interactions) et sont non-résonnantes.
- Françoise Becq-Girard a traité les deux aspects, avec un fort investissement sur la question des interactions non-linéaires, problème plus compliqué pour lequel peu d'éléments théoriques étaient disponibles à l'époque. Que ce soit pour le déferlement ou les interactions non-linéaires, les travaux de thèse ont consisté à développer des modèles conceptuels, puis à les étudier et les tester au travers de modélisations numériques sur des maquettes de logiciels dans un premier temps (Voir résultats intermédiaires de la thèse présentés dans les rapports de recherches [RR29] pour la modélisation du déferlement et [RR32] pour la modélisation des interactions non-linéaires entre triplets de fréquences). Des expériences spécifiques en canal à houle ont par ailleurs été réalisées au LNHE pour cette thèse : propagation d'états de mer sur un profil présentant un haut-fond, en conditions non-déferlantes et déferlantes. L'analyse bi-spectrale a également été utilisée pour analyser ces mesures et caractériser les effets non-linéaires. Finalement, après validation, les modèles développés ont été intégrés au sein du logiciel **TOMAWAC** sous forme industrielle et sont aujourd'hui utilisés pour les études appliquées (voir rapport [RE05] par exemple). En termes de recherches, la contribution majeure de ces travaux reste le traitement des interactions entre triplets de fréquences (sujet toujours d'actualité aujourd'hui) avec le développement d'un nouveau modèle, qui a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques dans des conférences et congrès ([AC12] Coastal Dynamics'1997 ; [AC17] ICCE'1998 ; [AC19] V^{èmes} Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier, 1998), et d'un article dans la revue « Coastal Engineering » en 1999 [AJ02].
- 2000-2003 **Victor Rosales** (thèse soutenue à l'Université de Caen Basse Normandie fin 2003) Co-encadrant, avec Daniel Levacher (Université de Caen), Martin Sanchez (Université de Nantes), Antoine Garapon et Jean-Michel Hervouet (LNHE).
Sujet « Caractérisation physique et modélisation numérique des écoulements stratifiés en milieu fluvial et estuarien. Application à l'estuaire de la Loire »

Cette thèse a porté sur la compréhension des processus de stratification ou de mélange de masses d'eau de propriétés différentes (différences de densités dues à la salinité et/ou à la température notamment), avec l'objectif particulier de traiter ces processus dans les estuaires. Elle a été financé par une bourse du programme d'échange France-Mexique. Victor Rosales a mené des recherches bibliographiques sur le sujet, analysé des résultats d'expériences et laboratoire et des modèles numériques conceptuels. Il a ensuite développé une modélisation spécifique pour les écoulements stratifiés au sein du logiciel TELEMAC-3D (résolution des équations de Navier-Stokes avec surface libre), en abordant plus spécifiquement les questions liées à la modélisation de la turbulence. Les développements ont été appliqués au cas de l'Estuaire de la Loire.

2005-2006 **Ekaterini Kriezi** (Bourse de recherche Marie-Curie démarrée le 09/05/2005 pour une durée de 12 mois) - Co-encadrant, avec Nigel Tozer (HR Wallingford, UK).

Sujet « Prise en compte de la diffraction dans le modèle d'états de mer **TOMAWAC** et amélioration de la prise en compte des effets liés aux courants et à la marée. »

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une bourse de recherche Marie-Curie, financée par la Communauté Européenne (12 mois) et fait l'objet d'une collaboration avec HR Wallingford (UK), qui utilise le modèle d'états de mer **TOMAWAC**. La candidate, Ekaterini Kriezi, est titulaire d'un doctorat en génie côtier de l'Université de Thessalonique (Grèce) obtenu en 1999. Elle a depuis accumulé une forte expérience dans ce domaine au travers de différents contrats et postes de recherches en Espagne, aux Pays-Bas et en Australie. Dans un premier temps, elle va être amenée à travailler sur la prise en compte de la diffraction dans le modèle d'états de mer **TOMAWAC**, suite aux travaux de Nicolas Cosqueric, stagiaire que j'ai encadré sur ce sujet en 2002 (cf. paragraphe précédent et [RR52]). Il s'agit d'une question difficile, car dans un modèle spectral comme **TOMAWAC**, on travaille avec le spectre d'énergie des vagues et la phase des vagues n'est pas modélisée. Le but est donc de trouver des modèles conceptuels approchés permettant de prendre en compte les effets principaux de la diffraction et de réussir leur implantation numérique opérationnelle (ce qui n'est pas non plus une question triviale). E. Kriezi travaille aussi sur la prise en compte des interactions houle-courant dans **TOMAWAC**, en particulier pour les sites à forte marée. HR Wallingford et LNHE ont en effet besoin de disposer d'outils logiciels applicables dans des zones à forts courants de marée ou d'estuaire. Ce travail est co-encadré avec Nigel Tozer (HR Wallingford).

2005-2008 **Vanessya Laborie** (Ingénieure-doctorante au CETMEF, dépt. DRIM) - Co-encadrant, avec Philippe Sergent (CETMEF) et Abdellatif Ouahsine (UTC Compiègne).

Sujet « Modélisation de la dynamique des ouvrages fluviaux et côtiers soumis à des submersions de crues ou de tempêtes. »

L'objectif de cette thèse est de développer un système de modèles numériques hydrauliques couplés, pouvant être utilisé (à terme) en conditions quasi-opérationnelles pour modéliser et anticiper les crues et inondations en zone d'estuaire ou côtières et, en particulier, de développer un module d'érosion des digues en conditions de submersion. Les mécanismes intervenant dans le processus de rupture d'une digue ou d'un cordon dunaire (remontée de nappe, les phénomènes de marée et de « run up », ruissellement, érosions) doivent être étudiés, caractérisés et modélisés au sein du module d'érosion des digues en conditions de submersion. Il s'agit donc de tenter de répondre à la question : quels sont les mécanismes de déstabilisation des structures (digues, dunes) subissant l'influence de l'érosion par des phénomènes de franchissement ?

Les deux objectifs principaux de ce travail sont :

- améliorer les lois de singularités et franchissements des seuils ;
- déterminer les critères de formation de brèche conduisant à la rupture des digues en fonction des différents paramètres structurels, hydrodynamiques et morphodynamiques liés ou subis par une dune ou une digue (crues, surcote, hauteur d'eau et houle).

L'aspect « novateur » sera d'étudier le phénomène aggravant de formation des brèches par effet des vagues qui conduisent à la rupture. Dans le travail de recherche, une modélisation fine des processus hydrauliques sur l'ouvrage est fondamentale (vagues et courants moyens), afin de déterminer au mieux les sollicitations et contraintes hydrauliques. L'autre point délicat concerne la modélisation de la « réponse » de l'ouvrage et de ses évolutions sous l'action de ces sollicitations.

Ce travail de thèse a débuté en Octobre 2005 par une étude bibliographique sur les processus et mécanismes mentionnés ci-dessus, ainsi que par des simulations numériques d'écoulements par surverse sur des seuils ou des dunes (pour l'instant supposés non-érodables et sans action des vagues). Vanessya est basée au CETMEF à Compiègne, mais je suis régulièrement ses travaux par le biais de réunions d'avancement, et d'échanges directs par téléphone ou courrier électronique.

A.6.3. Participation à des jurys de thèse

J'ai été (ou serai prochainement) membre des jurys de thèses de doctorat suivants, en tant qu'examineur ou rapporteur :

- 14/06/2000 **Maria Cristina Garcia-Govea** (2000) « Etude expérimentale de l'action de la houle sur les digues semi-submersibles » (*Examineur*). Thèse soutenue à l'Université de Caen Basse Normandie à Caen (Directeur de thèse : Daniel Levacher)
- 18/03/2005 **Christophe Brière** (2005) « Etude de l'hydrodynamique d'une zone anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet » (*Examineur*). Thèse soutenue à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour à Anglet (Directeurs de thèse : Stéphane Abadie et Patrick André).
- 13/12/2005 **Fabien Marche** (2005) « Theoretical and numerical study of shallow water models. Application to nearshore hydrodynamics » (*Examineur*). Modélisation des vagues en zone de surf interne à l'aide des équations de Saint-Venant. Propagation de fronts d'onde 2D sur des bathymétries complexes à fortes variations de pente. Application à différents types d'écoulement en zone de surf, dont des situations avec rip current). Thèse soutenue à l'Université de Bordeaux I (Directeurs de thèse : Pierre Fabrie du Laboratoire de Mathématiques Appliquées (MAB) de Bordeaux, et Philippe Bonneton du DGO Bordeaux).
- Juin 2006 **Amandine Nicolle** (2006) « Modélisation des marées et des surcotes dans les Pertuis Charentais » (*Rapporteur*). Etude et modélisation numérique de la marée des surcotes-décotes météorologiques et de la propagation des états de mer dans la zone proche côtière de La Rochelle et des Pertuis Charentais. Etude des effets d'interactions vagues-marée-surcotes pour un couplage de modèles numériques (logiciels TELEMAC-2D et TOMAWAC). Application à des conditions de tempête, dont en particulier la tempête de fin Décembre 1999. Thèse à soutenir à l'Université de La Rochelle (Directeur de thèse : Mikhail Karpytchev).

A.6.4. Encadrement et formation de techniciens et d'ingénieurs du LNHE

A.6.4.1. Formation de jeunes chercheurs du LNHE

A l'occasion des études et projets de recherches que j'ai menés, j'ai eu l'occasion d'encadrer et de participer à la formation de plusieurs jeunes ingénieurs-chercheurs du LNHE, auxquels j'ai essayé de transmettre une partie de mes connaissances d'ordre théorique ou pratique (utilisation de logiciels). De façon non-exhaustive, j'ai participé à l'encadrement des jeunes ingénieurs suivants :

Frédéric Marcos	Modélisation spectrale des états de mer. Ensemble nous avons créé le logiciel TOMAWAC , modèle d'états de mer de troisième génération. Ensuite, il a piloté le développement de la version stationnaire paramétrisée COWADIS .
Damien Violeau	Modélisation des surcotes et des états de mer. Utilisation de TOMAWAC . Damien a assuré la maintenance et les développements de TOMAWAC sur la période 1998-2001. Il a notamment intégré la prise en compte des courants et de niveau marin, variables en espace et en temps.
Géraldine Bellue	Techniques et outils de modélisations des vagues. Méthodes statistiques pour l'estimation des houles extrêmes (logiciel EVENAL). Etude expérimentale en canal à houle et modélisation du set-up et de l'ensachage sur des récifs coralliens. Etude sur modèle réduit en canal à houle d'ouvrages portuaires de type « caissons perforés ».
Cécile Machet	Stabilité des digues à talus. Méthodes de design « traditionnelle ». Cécile a ensuite étendu ses connaissances dans ce domaine en se concentrant sur l'approche probabiliste pour le design des digues à talus.
Marilyne Luck	Modélisation déterministe de la houle. Approches linéaire (équation de Berkhoff, logiciel ARTEMIS) et non-linéaires (théorie de Stokes et cnoïdales, méthode de fonction de courant, logiciel STREAM , équations de Boussinesq). Définition de maquettes à échelle réduites pour des projets de recherche (efforts sur pieux, interactions houle-courant, ouvrages poreux)
Florence Lafon	Physique et modélisation spectrale des états de mer. Utilisation de TOMAWAC . Méthodes statistiques pour l'estimation des houles extrêmes (logiciel EVENAL).

A.6.4.2. Pilotage d'ingénieurs de recherche

Au cours de mes travaux, j'ai également été amené à travailler en équipe avec des ingénieurs et chercheurs du LNHE nettement plus expérimentés que moi (notamment dans le domaine de la modélisation expérimentale), et auxquels j'ai apporté un encadrement scientifique, pour compléter leurs connaissances théoriques sur des sujets particuliers. Ces collaborations ont bien fonctionné et m'ont permis d'apprendre beaucoup sur la conception et l'exploitation des maquettes à échelles réduites. En retour, j'ai essayé de transmettre des connaissances scientifiques sur des aspects théoriques ou fondamentaux qui n'étaient pas complètement maîtrisés par ces ingénieurs. Accessoirement, alors que ce n'était pourtant pas évident au départ, ces travaux se sont traduits par des publications dans des conférences scientifiques françaises ou internationales.

De façon non-exhaustive et pour illustrer ces activités, je mentionne les exemples suivants :

- Avec **Jean-Claude Besnard**, nous avons travaillé ensemble entre 1993 et 1997 sur différents sujets sur lesquels j'ai assuré l'encadrement et le pilotage scientifique :
 - Modélisation de la réfraction de la houle par une approche directionnelle et implantation dans le code **REFRAC**, basé sur la méthode des rayons. [RR05]

- Développement et comparaisons de méthodes numériques pour résoudre l'équation de dispersion de la houle, éventuellement en présence de courant. [RR08].
- Caractérisation directionnelle des états de mer (paramètres directionnels caractéristiques, détection des spectres multi-pics). Participation à la programmation dans le programme **PARDIR**, puis dans **PADINES**. Réalisation de cas-tests et évaluation de performances des paramètres et critères directionnels. [RR10], [RR17] et [RR37], *article de conférence [AC03] (WAVES'1994)*.
- Avec **Jean Allilaire**, nous avons travaillé sur des recherches à caractère expérimental entre 1992 et 2000, avec à nouveau un encadrement scientifique de ma part :
 - Recherches sur les ouvrages côtiers de type « verticaux perforés » avec application à l'optimisation d'amortisseur de houle pour les bassins de laboratoire. Tests et optimisation d'absorbeurs multi-plaques perforées. *Résultats présentés dans le rapport de recherches [RR15]. Article de conférence [AC05] (IIIèmes Journées Génie Civil Génie Côtier, 1994)*.
 - Recherches sur la stabilité des digues à talus et notamment sur la stabilité du talus arrière, dans le cadre d'un programme de recherche de la Convention Biparti EDF-Ministères [RR20].
 - Revue et comparaisons de systèmes de mesure des vagues en laboratoire, dans le cadre d'un projet de R&D du CLAROM « Houle en bassin et dans les modèles numériques – Phase 1 » [RR35].
 - Implantation et tests d'un système d'absorption active de houle en canal pour le pilotage du générateur de houle, dans le cadre d'un projet de R&D du CLAROM « Houle en bassin et dans les modèles numériques – Phase 2 » [RR18].
- Avec **Philippe Donnars**, nous avons travaillé ensemble sur la période 1995-1997 dans le cadre du programme de recherche européen MAST3-RMBFM (Rubble-Mound Breakwater Failure Modes) sur la stabilité des digues à talus et en particulier les interactions entre la carapace et la butée de pied pour les digues en enrochements (partie courante et musoir). Ce projet de recherches basé sur des essais en cuve à houle multidirectionnelle a permis de tester et d'améliorer différentes formules de stabilité de la carapace et de la butée de pied, en section courante et au musoir d'une digue à talus en enrochements [RR26], *article de conférence [AC11] (ICCE'1996)*.

A.6.4.3. Encadrement et formation de techniciens

Enfin, durant ces années, j'ai été en contact avec de nombreux agents techniques du LNHE que j'ai encadrés sur des études appliquées et des projets de recherche, en participant parfois à leur formation. Sans chercher à être exhaustif sur cet aspect, je peux signaler les collaborations suivantes. Les rapports, présentations et articles auxquels il est fait référence comptent explicitement parmi leurs auteurs les techniciens mentionnés ; d'autres rapports et articles ont souvent été rédigés à partir de ces travaux, mais en utilisant une partie des résultats, présentés de façon plus synthétique dans un contexte plus large, et dans ces cas les techniciens ne sont pas mentionnés parmi les auteurs. Il n'en reste pas moins que je leur sais gré de l'ensemble de leurs contributions et apports.

- Avec **Claude Bobin et Patrice Courcier** : Etude expérimentale en cuve à houle de la réflexion des vagues en incidence oblique sur une digue à talus. Mise au point de méthodes de mesure et d'analyse spécifique, réalisation d'essais en considérant différentes conditions (1996) (*cf. rapport de recherche [RR28]*).
- Avec **Didier Marchal** : Etude de la courantologie d'un projet d'extension du port de Roscoff-Bloscon (1994). Reprise et modification d'un modèle numérique bidimensionnel avec

TELEMAC-2D, exploitation sur le projet de modification de la configuration portuaire. (*cf. rapport d'étude [RE04]*).

- Avec **René Samie** :
 - Etude des conditions courantologiques sur le port de Roscoff-Bloscon (1991). Construction d'un modèle numérique bidimensionnel avec **TELEMAC-2D**, calibration et exploitation sur le projet d'extension portuaire. (*cf. rapport d'étude [RE01]*)
 - Mise en service et maintenance de la cuve à houle multidirectionnelle et à courants du LNHE, installée en 1992-1993. Nous avons travaillé en étroite collaboration pour participer à l'installation d'un nouveau générateur de houle (de type batteur-serpent), à sa mise en service et à sa réception, puis à la rédaction des documents et consignes d'utilisation permettant son utilisation opérationnelle par les autres agents techniques du LNHE. (*cf. en particulier les consignes d'exploitation de ce bassin [RD03]*).
- Avec **Jean-Michel Menon** (ainsi que Marilyne LUCK, ingénieur-chercheur) : Etude expérimentale en canal à houle des efforts sur une structure-support d'éolienne en mer de type monopile. Examen des effets de faible profondeur d'eau (2002-2004) (*cf. rapport de recherche [RR54]*, ainsi que les articles de conférence [AC27] et de revue [AJ06]).
- Avec **Jean-Michel Menon et Carol Guene** : Etude expérimentale en cuve à houle de la stabilité des protection du chenal d'accès à une darse sur le site de Saint-Mandrier (Toulon, Var), ainsi que de l'agitation dans la darse (2001-2002) (*cf. rapport d'étude [RE08]*).
- Avec **Paul Thellier** :
 - Application du code d'états de mer **WAM** cycle 4 à la simulation des tempêtes de Janvier et Février 1990 en Manche (1993) (*cf. rapport de recherches [RR11]*), puis mise en œuvre du code **TOMAWAC** sur ces mêmes épisodes en 1995 (*cf. rapport de recherches [RR21]*). Définition et construction des maillages de calcul, développement des procédures pour mettre au format les données de vent en entrée, réalisation des simulations et comparaison à des mesures de bouées.
 - Etude des conditions courantologiques sur le port du Conquet (1992). Construction d'un modèle numérique bidimensionnel avec **TELEMAC-2D**, calibration et exploitation sur le projet de modification de la configuration portuaire. (*cf. rapport d'étude [RE02]*)
 - Constitution du dossier de validation de la version 1.0 du code d'états de mer **TOMAWAC** (1996). Définition et construction de plusieurs cas-tests, application du logiciel et comparaison avec des données de référence (*cf. rapport de recherche [RR27]*).
 - Analyse des conditions naturelles et détermination des conditions de projet au niveau du port de Roscoff-Bloscon (1997). Recueil et analyse de données hydro-météorologiques au large du port et propagation des conditions de houle à l'aide d'un modèle numérique construit avec le logiciel **COWADIS** (*cf. rapport d'étude [RE06]*).
 - Réalisation de simulations de courantologie (marée et surcotes-décotes) avec **TELEMAC-2D** et d'états de mer avec **TOMAWAC** en Manche et Mer du Nord, avec application à plusieurs épisodes de tempêtes, dans le cadre du projet européen MAST-ECAWOM (1995-1997). Etude, codage et tests des effets d'interactions entre la marée, les courants, les surcotes-décotes et les vagues sur ces épisodes (*cf. rapport de recherche [RR33]* et les présentations du projet européen [PR10] et [PR11])
- Avec **Fabrice Vinet et Jean-Michel Menon** (ainsi que Denis Aelbrecht et Jean Allilaire, ingénieurs-chercheurs) : étude expérimentale en canal à houle du confortement de la digue de protection de la Centrale du Blayais (2000) (*cf. rapport d'étude [RI05]*).

A.7. Affiliations - activités scientifiques internationales

A.7.1. Participations à des sociétés savantes

Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH)

Je suis membre de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH) depuis 1993. Au sein de cette association, j'ai rempli la fonction de secrétaire de la Section « Hydraulique Maritime » de l'AIRH de 1999 à 2004. Mes activités ont été : animation de la Section, montage de groupes de travail internationaux, participation à la définition des programmes et thèmes des congrès, etc.

Par ailleurs, j'ai été membre du groupe de travail international de l'AIRH sur l'analyse multidirectionnelle de la houle (1994-1997). Ce groupe de travail a mené des travaux d'intercomparaisons de méthodes d'analyse de houle multidirectionnelle, de standardisation des conventions et définitions. Il a produit plusieurs papiers de synthèse qui ont été présentés au cours d'un séminaire spécifique (avec actes et processus de relecture) organisé lors du congrès de l'AIRH de 1997 à San-Francisco (Californie, USA).

Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation (AIPCN)

J'ai été membre de l'Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation (AIPCN-PIANC) de 1997 à 2002.

Société Hydrotechnique de France (SHF)

Je suis membre de la Société Hydrotechnique de France (SHF) depuis 1997.

A.7.2. Club pour les Actions de Recherche sur les Ouvrages en Mer (CLAROM)

Je suis membre du CLAROM depuis 1994, représentant le département LNHE de EDF R&D. Au sein du CLAROM, j'ai notamment exercé les activités suivantes :

- Co-animateur avec Bernard Molin (EGIM) du groupe de compétences « Océano-météo et Hydrodynamique » du CLAROM. Organisation d'un séminaire annuel d'une journée (participation entre 70 et 100 personnes à chaque édition) et séminaires ponctuels (cf. § C.2.3).
- Coordinateur du projet de R&D CLAROM-ECOMAC (1999-2003) portant sur les conditions océano-météorologiques et les aménagements en zone côtière.

A.7.3. Groupes de travail WAM et WISE sur la houle et les états de mer

J'ai été membre du groupe de travail international **WAM** (Wave Modelling) de 1990 à 1992. Ce groupe de travail réunissait les meilleurs spécialistes de l'étude et de la modélisation des états de mer (S. et K. Hasselmann, G. Komen, P. Janssen, M. Donelan, I. Young, L. Cavaleri, H. Günther, H. Tolman, etc.) et a développé le premier modèle d'états de mer de troisième génération en 1988 : code **WAM**, qui a fait et fait encore référence.

Je suis ensuite devenu membre du groupe de travail international **WISE** (Waves In Shallow Environments), depuis 1993 sur la modélisation spectrale des états de mer et des vagues en faible profondeur d'eau. Je participe aux travaux du groupe et effectue une ou plusieurs présentations scientifiques à chaque édition de ces séminaires. En 2005, j'ai co-rédigé avec G. Van Vledder, M. Onorato, H. Tolman, I. Lavrenov, V. Polnikov et D. Resio, un chapitre de synthèse de l'état de l'art

pour le « WISE White Paper » sur les interactions non-linéaires vague-vague en grande profondeur d'eau [LI06].

A.7.4. Groupe de travail européen « Rock Manual »

De 2003 à 2006, participation à un groupe de travail européen (principalement Royaume-Uni, Pays-Bas, France, avec des contributions d'autres pays comme l'Espagne, l'Italie et l'Islande) chargé de produire une nouvelle édition du guide « Rock Manual » sur le dimensionnement des ouvrages en enrochements (naturels et artificiels). Les versions antérieures de ce guide de référence ont été éditées en 1991 (collaboration entre le CIRIA anglais et le CUR néerlandais), puis en 1995 (CUR seulement). La nouvelle version a été mise en chantier mi-2003 et paraîtra en 2006 en Anglais [LI05], puis en Français et en Espagnol, vraisemblablement en 2007. Cette nouvelle édition a été significativement augmentée et complétée et le guide fera probablement plus de 1200 pages au final. Au sein de ce projet, la participation française est coordonnée par Sébastien Dupray du CETE de Lyon et Jean-Jacques Trichet du CETMEF.

Dans ce projet, j'assume la responsabilité de l'ensemble du chapitre 4 de ce manuel, ainsi qu'une participation à la réactualisation du chapitre 5. Le chapitre 4 est intitulé « Physical and Environmental boundary and site conditions » et couvre la synthèse des conditions « naturelles » au sens large [LI05]. Il comprend cinq grandes sections :

- 4.1. Bathymétrie et topographie
- 4.2 Conditions hydrauliques dans le domaine maritime et estuarien
- 4.3 Conditions hydrauliques dans le domaine fluvial
- 4.4 Conditions géotechniques
- 4.5 Conditions liées aux glaces

En version quasi-finalisée (septembre 2005) ce chapitre compte environ 180 pages. La coordination de la rédaction du chapitre 4 consiste à animer une équipe d'environ une douzaine d'auteurs et de contributeurs, intervenant sur les différentes sections du chapitre, de diffuser les versions de travail successives auprès d'une douzaine de relecteurs internationaux.

Par ailleurs, j'assume en particulier la rédaction et la vérification de la section 4.2, avec des contributions de Peter Hawkes (HR Wallingford, UK) et Jentsje Van der Meer (INFRAM, NL). Le sommaire de cette section 4.2 est rappelé ci-après (la version quasi-finalisée de cette Section comporte 80 pages).

4.2 Hydraulic boundary conditions and data collection - Marine and coastal waters

- 4.2.1 *Wind and pressure conditions*
 - 4.2.1.1 *Use of wind data*
 - 4.2.1.2 *Use of pressure data*
- 4.2.2 *Marine water levels*
 - 4.2.2.1 *Mean sea level*
 - 4.2.2.2 *Tide*
 - 4.2.2.3 *Storm surges*
 - 4.2.2.4 *Wind set-up*
 - 4.2.2.5 *Wave set-up*
 - 4.2.2.6 *Seiches*
 - 4.2.2.7 *Long-period waves*
 - 4.2.2.8 *Tsunami*
 - 4.2.2.9 *Flood waves*
 - 4.2.2.10 *Sea level rise due to climate change*
 - 4.2.2.11 *Design extreme water levels*

- 4.2.3 *Marine and estuarine currents*
 - 4.2.3.1 *Components of marine currents*
 - 4.2.3.2 *Charts and tables for marine currents*
 - 4.2.3.3 *Vertical structure of marine currents and turbulence*
 - 4.2.3.4 *Estuarine flow conditions, including basin model*
 - 4.2.3.5 *Numerical modelling of marine and estuarine currents*
- 4.2.4 *Wind waves and swell*
 - 4.2.4.1 *General definitions related to waves, sea-states and wave climate*
 - 4.2.4.2 *Representation of regular/random and long-crested/short crested waves*
 - 4.2.4.3 *Characterization of wave conditions and wave kinematics*
 - 4.2.4.4 *Statistical properties and distribution of waves in a sea-state*
 - 4.2.4.5 *Spectral description of waves and wave spectra*
 - 4.2.4.6 *Generation of waves in the ocean and in the coastal zone*
 - 4.2.4.7 *Transformations of waves in the nearshore and coastal zones*
 - 4.2.4.8 *Short-term or daily wave climate*
 - 4.2.4.9 *Long-term wave climate - Analysis of extreme waves*
 - 4.2.4.10 *Numerical and physical modelling of wave conditions*
- 4.2.5 *Joint probability of waves and water levels*
 - 4.2.5.1 *Introduction*
 - 4.2.5.2 *The independent and dependent cases*
 - 4.2.5.3 *Desk study methods of analysis*
 - 4.2.5.4 *Other methods of analysis*
 - 4.2.5.5 *Design with joint waves and water levels*

A.7.5. Comités scientifiques et comités de lecture de conférences

J'ai été **membre du Comité Scientifique** ou de **Lecture** pour les conférences suivantes :

- **Journées Nationales Génie Civil et Génie Côtier**, en 2000 (Caen), 2002 (Anglet), 2004 (Compiègne) et 2006 (Brest).
- **WAVES'2005** (Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis) (3-7 Juillet 2005), à Madrid (Espagne). Relecture et examen de 28 résumés scientifiques soumis à cette conférence.
- **Coastal Structures'2007** (2-4 Juillet 2007), à Venise (Italie).

J'ai été **animateur-modérateur de session** (« **chairman** ») lors des conférences suivantes :

- **Symposium Saint-Venant** en 1997 (Marne la vallée, France),
- conférences **ICCE** (International Conference on Coastal Engineering) en 2002 (Cardiff, UK) et en 2004 (Lisbonne, Portugal),
- **Journées Nationales Génie Civil et Génie Côtier** en 2004 (Compiègne, France),
- conférence **WAVES'2005** (Madrid, Espagne) en 2005.

A.7.6. Comités de lecture de revues et de conférences internationales

J'ai été relecteur-correcteur d'articles soumis aux revues scientifiques suivantes :

- **Comptes-rendus de l'Académie des Sciences** (1 article évalué, 2001)
- **Revue Européenne des Eléments Finis (REEF)** (1 article évalué, 2003)
- **Journal of Hydraulic Research** (1 article évalué, 2004)
- **European Journal of Mechanics. B/Fluids** (1 article évalué, 2006)
- **Coastal Engineering** (1 article évalué, 2006)

J'ai été relecteur-correcteur d'articles soumis aux conférences et congrès suivants :

- conférences **ISOPE** (International Offshore and Polar Engineering. Conference). Thèmes « océano-météorologie » et « génie côtier » (1 ou 2 articles évalués chaque année).
- **Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier** (5 articles évalués lors de l'édition 2004).
- **Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS)** (1 article évalué lors de l'édition 2002).
- Congrès de l'**Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH)** (2 à 3 articles évalués à chaque édition).
- Conférence **WAVES'2005** : relecture et examen de 28 résumés scientifiques.

A.7.7. Expertises scientifiques et techniques

- 1993 Pour l'**ANVAR Pays de Loire** : expertise technico-économique d'une demande d'aide financière pour le développement d'un système expérimental de mesure locale de position d'une interface air/eau basé sur l'utilisation d'une caméra vidéo. La technique est utilisable dans les bassins et canaux à houle et permet une mesure précise de la position de la surface libre sur une paroi (parois de l'installation d'essai, digue verticale ou carène de navire par exemple). Cette expertise a fait l'objet d'un rapport détaillé remis à l'ANVAR [RD02].
- 2002 Pour **IFREMER** : Expertise d'un projet de R&D soumis à la labellisation RITEAU. Le projet concernait la détection et la quantification précise des ressources en eau potentiellement exploitables à partir des sources sous-marines d'aquifères karstiques. Il visait à développer des moyens technologiques et scientifiques permettant d'une part de diminuer le temps consacré aux campagnes de mesures in situ sur les panaches d'eau douce en mer (gain d'ordre économique) et d'autre part d'augmenter la quantité et la qualité des informations recueillies par un échantillonnage plus fin et une couverture de mesure plus étendue (gain d'ordre technique sur les résultats en sortie) [RD03].
- 2002 Pour le **CNRS** (Centre National de la Recherche Scientifique) : participation au comité d'évaluation du laboratoire LSEET (Laboratoire de Sondages Electromagnétiques et de l'Environnement Terrestre) du CNRS et de l'Université de Toulon et du Var. Au cours de 2 journées (16 et 17 septembre 2002) nous avons évalué l'activité du laboratoire pour la période 1999-2002, ainsi que sa prospective. Le Comité d'Evaluation était présidé par Philippe Waldteufel (Service d'Aéronomie, Verrières le Buisson, 91) et comprenait 7 membres au total. A l'issue des journées d'entretiens et d'évaluation, j'ai participé à la rédaction du rapport d'évaluation produit par le Comité et diffusé le 11/10/2002 [RD05].
- 2002 Pour le **réseau NOVELECT d'EDF** (Fonds de financement d'innovations technologiques auquel participe EDF) : expertise d'un projet « Développement d'un système de mesure de déplacement de corps immergé ». Il s'agissait d'un système permettant de mesurer en laboratoire les mouvements de corps immergés en 3D, en utilisant un système de 3 caméras vidéo. Le corps dont on veut suivre les mouvements est équipé de « cibles » dont les caméras détectent et enregistrent les positions à une cadence donnée. Le traitement combiné des images des trois caméras permet de reconstituer la trajectoire du corps en 3D [RD06].

**B. PRESENTATION DETAILLEE DES ACTIVITES
SCIENTIFIQUES DE RECHERCHE ET
DEVELOPPEMENT**

B.1. Introduction – Vue d'ensemble des travaux

Cette partie vise à donner un aperçu de mes activités de recherche et de développement au LNHE depuis 1990. Elle est articulée en **quatre chapitres thématiques** (§ B.2 à B.5), correspondant à mes domaines d'activité principaux, dont la « colonne vertébrale » est l'étude des vagues depuis l'océan jusqu'aux ouvrages côtiers. Une description succincte des activités de développement de logiciels est donnée au chapitre B.6. Le tableau ci-dessous donne une vue synthétique des thématiques traitées.

<p>B.2 Analyse et caractérisation des vagues et états de mer</p> <p>Objectif : <i>Observer, mesurer et analyser les états de mer pour comprendre les mécanismes physiques et connaître leur climatologie</i></p>	<p>Dans cette partie, la <u>mesure</u> (<i>in situ</i> ou en laboratoire) et l'<u>analyse de ces mesures</u> jouent un rôle fondamental. Il s'agit de développer des méthodes de mesures et des techniques d'analyse permettant d'accéder à la connaissance des vagues et de pouvoir les caractériser, suivant trois axes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - analyse statistique et spectrale - analyse non-linéaire en zone côtière - analyse directionnelle
<p>B.3 Modélisation spectrale des états de mer et interactions houle-marée-courants-surcotes</p> <p>Objectif : <i>Modéliser la dynamique des vagues, surcotes-décotes et marées à l'échelle des océans et des mers continentales pour prévoir, et constituer des bases de données sur la climatologie</i></p>	<p>Dans cette partie, la <u>modélisation numérique</u> et utilisée pour prévoir ou simuler <i>a posteriori</i> les états de mer, les marées et les surcotes-décotes en domaine océanique et mer continentales, de façon à constituer des bases de données à utiliser en limites des applications côtières :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modélisation spectrale des états de mer - Interactions houle-marée-surcotes - Atlas numérique d'états de mer sur 25 ans
<p>B.4 Cinématique et propagation des vagues en zone côtière</p> <p>Objectif : <i>Prédire les conditions de vagues et de courants en zone côtière, ainsi que leur cinématique pour anticiper leur action sur les ouvrages et les sédiments</i></p>	<p>Dans cette partie, on s'intéresse aux effets côtiers sur la propagation des vagues, à la fois par le biais <u>d'expériences en laboratoire et de modélisations numériques</u>. On cherche également à prédire la cinématique (vitesses, pression, etc.) sous les vagues et on considère en particulier la question particulière du déferlement.</p>
<p>B.5 Action de la houle sur les ouvrages maritimes</p> <p>Objectif : <i>Etudier les interactions vagues-structures pour optimiser le dimensionnement de ces structures et proposer des solutions d'aménagement efficaces et bien insérées dans le milieu naturel.</i></p>	<p>Lorsque les vagues rencontrent des structures en zone côtière, il s'agit d'étudier les efforts hydrodynamiques sur ces structures, ainsi que leur réponse, essentiellement par le biais <u>d'essais en laboratoire</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Structures verticales perforées - Digue à talus - Structures isolées en mer (de type pieu) - Structures posées sur le fond marin

B.2. Analyse et caractérisation des vagues et états de mer

B.2.1. Analyse omnidirectionnelle des houles naturelles

Dans le but de caractériser les états de mer naturels, nous avons dans un premier temps travaillé sur l'analyse omnidirectionnelle des houles naturelles, c'est-à-dire sans chercher à analyser la direction de provenance des vagues ou la répartition de l'énergie de l'état de mer suivant les directions de provenance. Nous raisonnons dans ce paragraphe B.2.1 et le suivant « toutes directions confondues ». L'analyse directionnelle des états de mer est abordée au § B.2.3.

La donnée d'entrée d'une analyse omnidirectionnelle est typiquement une série temporelle de mesure de l'élévation de la surface libre sur une durée de 20 minutes à 1 heure, avec un pas de temps de l'ordre de 0.5 s, pour les mesures effectuées *in situ* par une bouée ou un capteur de pression immergé. Nous avons travaillé avec des données de bouées du réseau national CANDHIS, mises à notre disposition par le CETMEF, mais aussi à partir de mesures réalisées dans les installations d'essais du LNHE, à l'aide de sondes résistives de mesure d'élévation de surface libre.

Classiquement, l'analyse omnidirectionnelle des houles naturelles se fait suivant deux approches principales : l'analyse statistique (cf. § B.2.1.1) et l'analyse spectrale (cf. § B.2.1.2), sur laquelle nous avons effectué quelques développements. Nous présentons au § B.2.2 les travaux que nous avons menés sur l'analyse bi-spectrale (non-linéaire) des vagues en faible profondeur d'eau.

B.2.1.1. Analyse statistique (omnidirectionnelle) des états de mer

• Principe de l'analyse statistique des états de mer et mise en œuvre pratique

L'approche d'analyse « **statistique** » ou « **vague à vague** » consiste à décomposer un signal temporel d'élévation de surface libre mesuré en un point et de durée D en une série de N vagues successives. En général, une étape préliminaire consiste à déterminer le niveau moyen de surface libre $\bar{\eta}$ et à le soustraire de l'enregistrement (de façon à se ramener à un signal de moyenne nulle). Le signal est ensuite décomposé en une série de vagues, chacune définie par un couple $(H_i, T_i) = (\text{hauteur}, \text{période})$. Le point important de cette analyse concerne le critère à utiliser pour définir le début (et la fin) d'une vague. Un consensus est aujourd'hui établi autour de critères basés sur le passage du signal de surface libre par le niveau moyen (méthode de « zero crossing » en Anglais) (AIRH/AIPCN, 1986). En particulier, la méthode de « zero down-crossing » (passage du signal par la valeur de niveau moyen en décroissant) est recommandée car elle donne un sens plus physique aux vagues ainsi séparées, notamment en faible profondeur d'eau. Les vagues ainsi individualisées sont en effet composées d'abord du creux, puis de la crête, de sorte que le front de la vague est bien représenté et continu.

A partir de la série de N vagues de la durée de l'enregistrement, correspondant à N couples $(H_i, T_i) = (\text{hauteur}, \text{période})$, il est possible de procéder à différents traitements statistiques (AIRH/AIPCN, 1986) et d'établir notamment :

- la distribution des hauteurs de houle H_i (histogramme des hauteurs) et, éventuellement, ajuster ensuite des lois mathématiques de distributions de hauteurs de houle, comme la loi de Rayleigh par exemple, bien adaptée en grande et moyenne profondeur d'eau,
- la distribution des périodes de houle T_i (histogramme des périodes),
- la distribution des cambrures H_i/L_i , où L_i est la longueur d'onde associée à la période T_i pour la profondeur d'eau locale,
- la distribution conjointe des hauteurs et périodes de houle, au travers d'un diagramme de corrélation (H, T) .

On peut également calculer des hauteurs représentatives de l'état de mer, dont entre autres : la hauteur moyenne des vagues (\bar{H} ou H_m), la hauteur quadratique moyenne (H_{rms}), la hauteur significative ($H_{1/3}$)

ou H_s), la hauteur moyenne du 1/10 des plus fortes vagues ($H_{1/10}$), la hauteur maximale du train de vagues (H_{\max}), etc. De la même façon, on peut calculer les périodes caractéristiques suivantes : la période moyenne (\bar{T} ou T_m), la période significative (moyenne des périodes du tiers des plus fortes vagues, en termes de hauteur) ($T_{H1/3}$ ou T_s), la période associée à la vague de hauteur maximale ($T_{H_{\max}}$), la période maximale, (T_{\max}), etc.

Des modules d'analyse statistique de houle existaient au LNHE depuis de nombreuses années avant nos travaux. Certains d'entre eux avaient été développés en collaboration avec le CETMEF et/ou dans le cadre de projet de recherche du CLAROM. Ces programmes étaient aussi utilisés sur les cuves et canaux à houle lors des essais sur modèle réduit. Nous avons été amené à assurer la maintenance et des améliorations du logiciel **ANHOUL**, développé antérieurement (dans les années 1980) en collaboration avec le CETMEF : mises au niveau du logiciel par ajouts de fonctionnalités supplémentaires, correction de bugs, assistance aux utilisateurs,...

Nos travaux de recherche sont cependant plus orientés sur la distribution des hauteurs des hauteurs de houle en zone côtière, avec prise en compte des effets de faible profondeur d'eau et du déferlement, et sont présentés plus en détail dans le paragraphe suivant.

- **Distribution des hauteurs de houle en faible profondeur d'eau**

Il peut être montré théoriquement pour des états de mer en grande et moyenne profondeur d'eau, en faisant l'hypothèse de périodes concentrées autour d'une période donnée (hypothèse de spectre « étroit »), que la distribution des hauteurs de vagues au sein d'un état de mer suit une loi de Rayleigh, dont la densité de probabilité $p(H)$ s'écrit :

$$p(H) = \frac{H}{4m_o} \exp\left(-\frac{H^2}{8m_o}\right) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H_m^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left(-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right)$$

Cette loi de Rayleigh ne dépend que d'une seule hauteur caractéristique qui peut être, comme l'indiquent les expressions ci-dessus, la variance de l'état de mer m_o , la hauteur moyenne H_m ou la hauteur quadratique moyenne H_{rms} , etc.

De par son expression analytique relativement simple à manipuler, la loi de Rayleigh permet de calculer les ratios entre deux hauteurs caractéristiques quelconques de l'état de mer (par exemple $H_{1/10} = 1.27 H_{1/3}$). Il s'agit de résultats connus et bien documentés, non repris ici (voir Massel (1996) ou Goda (2000) par exemple pour plus de détails). Il est également aisé et rapide de superposer à un histogramme des hauteurs de vague issu de l'analyse vague-à-vague présentée au paragraphe précédent la loi de Rayleigh correspondante : il suffit d'une seule des hauteurs caractéristiques mentionnées ci-avant pour utiliser l'une des expressions ci-dessus et tracer la loi de distribution de Rayleigh correspondante.

Cependant, en faible profondeur d'eau, lorsque les vagues se déforment sous l'action des effets non-linéaires liés à la remontée des fonds et s'approchent de leur limite de stabilité, les analyses statistiques des mesures *in situ* montrent que l'histogramme des hauteurs s'écarte d'une distribution de Rayleigh. Par ailleurs, en zone de déferlement, le déferlement a pour effet d'écarter les plus grandes vagues de l'état de mer et de tronquer la distribution (Hughes et Borgman, 1987 ; Battjes et Groenendijk, 2000 ; Hamm, 2001). Différents auteurs ont mené des recherches pour proposer des modèles de distribution des hauteurs adaptés aux faibles profondeurs d'eau.

A l'occasion de diverses études et projets de R&D dans le domaine côtier, et notamment en zone de déferlement (dont en particulier le projet CLAROM-ECOMAC), nous avons été récemment amené à travailler avec des modèles de distribution de hauteurs de vagues de ce type. Pour ces conditions, le modèle de distribution de Rayleigh n'est plus indiqué. Nous avons considéré et analysé différents modèles de distributions de hauteurs proposés dans la littérature pour la zone côtière et de déferlement, et notamment :

- a. la distribution de Beta-Rayleigh (Hughes et Borgman, 1987),

- b. la distribution de Weibull (Klopman, 1996),
- c. une combinaison de deux distributions de Weibull (Battjes et Groenendijk, 2000),
- d. la distribution de Mendez *et al.* (2004).

Ces différentes distributions ont en commun de prendre en compte la profondeur d'eau locale (d) et de faire intervenir un paramètre de non-linéarité de type (H/d) qui modifie la forme de la distribution des hauteurs. Ces quatre modèles de distribution ont été programmés par nos soins (logiciel **SWADIS**). Ils ont été utilisés dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC [RR51] et également à l'occasion d'une étude appliquée d'aménagement portuaire, sur le site de Port-Louis en Guadeloupe [RE07].

La comparaison entre eux de ces différents modèles de distribution fait apparaître des différences importantes et soulève des questions quant à leur pertinence et leur applicabilité. Nous menons actuellement des travaux de comparaison de ces différents modèles avec des mesures en laboratoire réalisées à l'occasion de la thèse de Françoise Becq-Girard (Becq, 1998) (cf. § B.2.2.4). Nous avons alors réalisé des essais relativement longs, ce qui permet de réduire la variabilité statistique des distributions empiriques de hauteurs de houle. Ce jeu de données expérimentales devrait permettre de mettre en évidence les limitations de certaines des distributions mentionnées ci-dessus et d'identifier celles qui sont les plus pertinentes. Il s'agit d'une question importante pour l'ingénierie côtière, qui a besoin de disposer de modèles validés et dont les limites de validité sont bien maîtrisées. Nous envisageons une publication sur ce sujet prochainement (vraisemblablement en 2006).

B.2.1.2. Analyse spectrale (omnidirectionnelle) des états de mer

Principe de l'analyse spectrale et mise en œuvre pratique

L'analyse « spectrale » d'un signal temporel de surface libre de durée D supposé issu d'un processus stationnaire (i.e. les caractéristiques moyennes du processus sont constantes sur la durée D) consiste à déterminer le spectre de variance ou d'énergie de l'état de mer (i.e. la densité spectrale de variance ou d'énergie). Ce spectre de variance, noté $E(f)$ ici, est défini comme étant la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation du signal de surface libre $\eta(t)$.

Dans la pratique, la méthode numérique utilisée pour estimer $E(f)$ est basée sur l'approche dite du « périodogramme », dont le principe consiste à estimer le spectre de variance par le carré du module de la transformée de Fourier de l'élévation de surface libre (voir Jenkins et Watts (1968) ou Kay (1988) par exemple).

En ce qui concerne l'analyse spectrale des vagues, nos travaux ont principalement concerné le développement d'un module d'analyse spectrale **SPECAN**, basé sur la méthode du périodogramme (Welch, 1967). Par cette méthode, le spectre de variance $E(f)$ est estimé par la valeur moyenne du carré du module de la transformée de Fourier du signal de surface libre. Nous avons apporté à cette méthode de base un certain nombre de fonctionnalités complémentaires permettant d'une part d'optimiser les calculs (optimisation de l'algorithme de transformation de Fourier, basé sur une transformée de Fourier rapide) et d'autre part de diminuer la variance de l'estimateur spectral. Les principales spécificités du module **SPECAN** sont :

- a. Possibilité de découper le signal temporel en P segments de N points, où N est une puissance de 2 (par exemple: 128, 256, 512, 1024,...) afin d'appliquer une Transformée de Fourier Rapide (FFT) sur chaque segment. Le fait de découper le signal de départ en segments permet de minimiser la variance de l'estimateur spectral final.
- b. Les P segments peuvent par ailleurs se recouvrir partiellement (d'un facteur de recouvrement compris entre 0 et 0.5 spécifié par l'utilisateur).
- c. Multiplication de chaque segment de signal par une fenêtre temporelle de façon à minimiser les oscillations parasites liées au fait que le signal est de durée limitée et n'est pas périodique sur la durée du segment. Plusieurs types de fenêtre peuvent être utilisés dans **SPECAN** (voir

par exemple Kunt (1984) ou Kay (1988)) : fenêtre triangulaire, parabolique, en cosinus, de Hanning, etc.

- d. Possibilité de réaliser en plus une moyenne glissante des valeurs de $E(f)$ sur une bande de plusieurs fréquences (typiquement 3, 5 ou 7), avec une ou plusieurs fréquences communes à deux bandes consécutives. Cela permet également de lisser les spectres et de diminuer la variabilité des estimateurs spectraux. Nous avons utilisé cette technique pour traiter directionnellement des mesures de bouées.
- e. Enfin, nous avons introduit en 2001 la possibilité de projeter les estimateurs spectraux obtenus sur une grille de fréquences en progression géométrique, de 0.025 Hz ($T = 40$ s) à 0.5 Hz ($T = 2$ s) pour les mesures de bouées *in situ*. Par rapport à une distribution régulière des fréquences, la distribution géométrique permet une représentation plus détaillée de la partie « basses fréquences » et elle conserve moins de points pour la partie « hautes fréquences » dans une zone où il n'est pas utile d'avoir une densité aussi importante de fréquences. L'utilisation de cette grille standard, qui comprend 40 fréquences, permet d'une part à nouveau de réduire la variabilité de l'estimateur spectral pour la partie hautes fréquences et d'autre part de réduire le volume des calculs (et donc le temps CPU) lors de l'analyse directionnelle effectuée à chaque fréquence de sortie du spectre de variance.

Le développement de toutes ces fonctionnalités d'analyse a été en fait essentiellement motivé par l'analyse directionnelle (cf. § B.2.3) et l'analyse bi-spectrale (cf. § B.2.2). Elles ont permis de réduire les incertitudes et la variabilité des spectres estimés. Ces options d'analyse sont pilotées par l'utilisateur du programme **SPECAN**, par le biais de plusieurs paramètres choisis en entrée.

- **Application de l'analyse spectrale à des signaux de houle réels (programme SPECAN)**

Depuis le développement de la version initiale de **SPECAN** en 1991-1992, ce programme a été très largement utilisé pour traiter soit des mesures de vagues en laboratoire au LNHE, soit des mesures de bouées en mer. A titre d'illustration de nos travaux sur l'analyse spectrale, nous avons représenté sur la Figure 1 les spectres omnidirectionnels de variance analysés par **SPECAN** toutes les 3 heures entre le 15/01/2000 à 12:00 TU et le 16/01/2000 à 18:00 TU sur le site de l'Ile d'Yeu (position : 46°41,45'N en latitude et 02°25,65'W en longitude) par des fonds de 32 m CM. Les données brutes sont issues d'une bouée directionnelle DATAWELL WAVERIDER du CETMEF.

Les signaux temporels sont acquis sur une durée de 26 min 40 s (soit 1600 s) à une fréquence de 1.28 Hz (soit un pas de temps d'acquisition de 0.78125 s) : ils comportent donc 2048 points. L'analyse spectrale avec **SPECAN** est effectuée en utilisant des segments de 512 points, avec un recouvrement partiel de 25% (soit 5 segments au total). Une moyenne glissante est ensuite effectuée par bande de 7 fréquences, avec 3 fréquences communes à deux bandes consécutives, ce qui permet d'obtenir des spectres et densités spectrales croisées assez lissés, avec peu de variabilité. Enfin, les fréquences de sortie des spectres sont en progression géométrique sur 40 fréquences entre les bornes 0.025 Hz ($T = 40$ s) et 0.5 Hz ($T = 2$ s).

Cette figure permet de visualiser l'évolution du spectre au cours du temps sur une durée de 30 heures toutes les 3 heures. On observe que le spectre évolue sensiblement, avec au départ un état de mer composé d'une houle océanique de fréquence de pic $f_p = 0.09$ Hz environ (période de pic de 11.1 s), qui s'amortit au cours du temps, et d'une mer du vent (en phase de génération sous l'action du vent local), dont la fréquence de pic est comprise entre 0.2 et 0.25 Hz (période de pic comprise entre 4 et 5 s). On visualise clairement la croissance de la composante « mer du vent » au cours du temps : augmentation de la valeur du pic avec une diminution de la fréquence de pic, selon en schéma caractéristique des états de mer en phase de croissance sous l'action du vent.

Ce type de spectre multi-pics n'est pas évident à représenter à l'aide de formes spectrales types (Pierson-Moskowitz ou JONSWAP par exemple), qui sont des spectres mono-pics. Des techniques existent cependant pour ajuster des modèles de spectres à deux pics sur des spectres analysés (voir par exemple Ochi et Hubble, 1976 ou Guedes-Soares, 1984), mais nous n'avons pas approfondi cette question au cours de nos travaux de recherche.

D'autres exemples de spectres omnidirectionnels de variance analysés lors de nos différents travaux sont présentés dans ce mémoire (cf. Figure 4, Figure 8, Figure 9 et Figure 13).

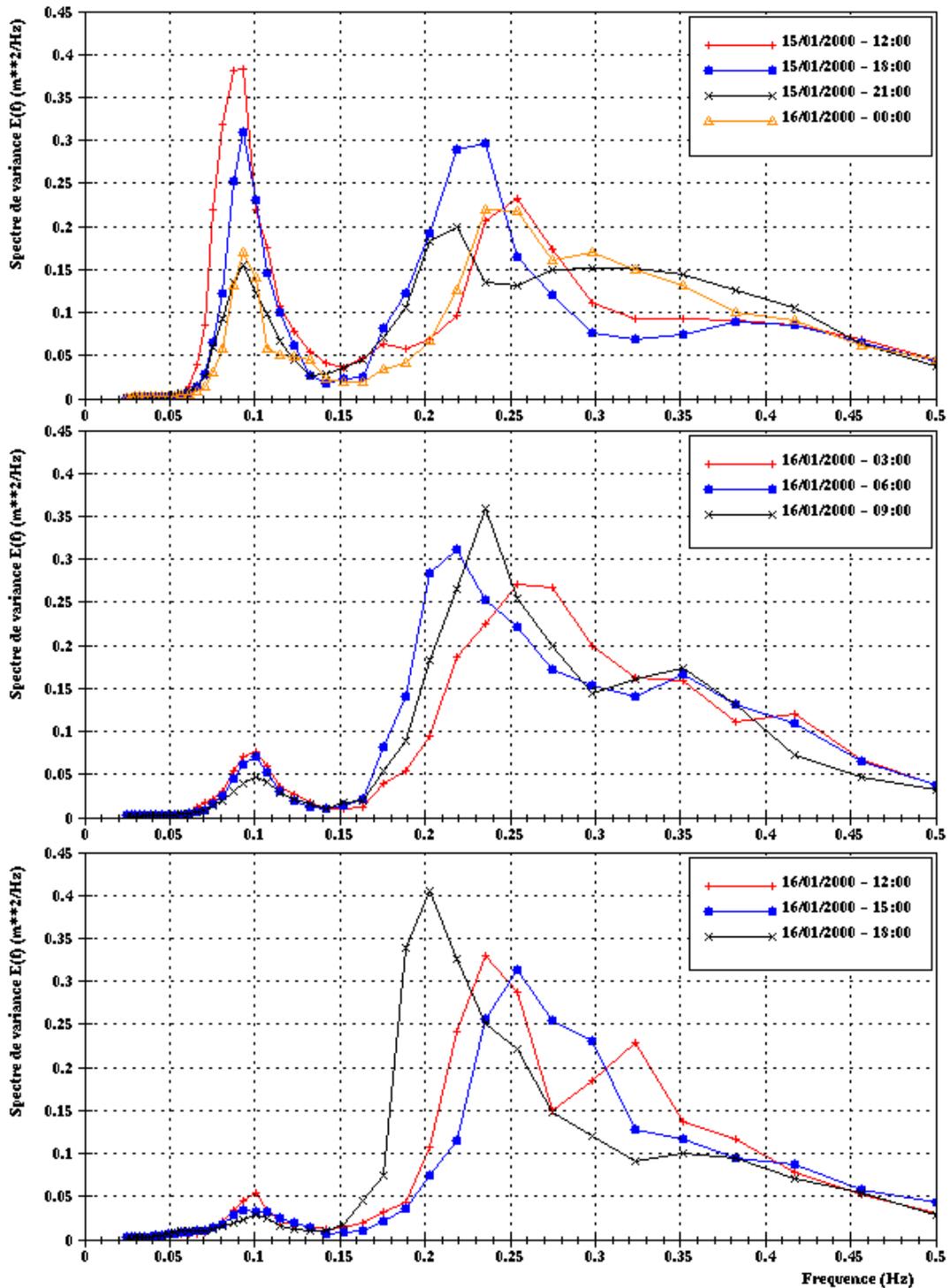


Figure 1 : Spectres omnidirectionnels de variance analysés par SPECAN pour les mesures de la bouée Datawell de l'île d'Yeu du 15/01/2000 12:00 TU au 16/01/2000 à 18:00 TU.

B.2.2. Approche non-linéaire par l'analyse bi-spectrale

B.2.2.1. Problématique de l'analyse non-linéaire des états de mer

La détection et la quantification du caractère non-linéaire des vagues dans les états de mer mesurés *in situ* est à la fois une question importante pour le design des ouvrages maritimes, l'action des vagues sur les sédiments marins, etc. et un problème difficile à traiter dans la pratique. C'est un aspect qui fait encore l'objet de nombreuses recherches et un sujet encore loin d'être épuisé. Il est particulièrement important pour les mesures effectuées par faibles profondeurs d'eau, car les effets non-linéaires dus à la présence du fond marin deviennent significatifs.

Comme nous l'avons vu au § B.2.1.2, l'analyse spectrale d'un signal temporel permet d'accéder à la répartition de l'énergie (ou de la variance) de ce signal suivant les fréquences. De ce spectre, il est ensuite possible de déduire des paramètres numériques caractéristiques de l'état de mer et l'examen de la forme du spectre permet d'accéder à des informations plus complètes sur la répartition de l'énergie, la présence d'ondes longues, de plusieurs pics,... Toutefois, l'analyse spectrale traditionnelle ne prend pas en compte la répartition effective des phases des différentes composantes de l'état de mer et suppose que celles-ci sont réparties aléatoirement dans l'intervalle $[0 ; 2\pi]$ avec une densité de probabilité uniforme : il s'agit de l'hypothèse d'état de mer gaussien.

De ce fait l'analyse spectrale n'apporte pas d'informations sur les aspects non-linéaires du signal, c'est-à-dire sur les éventuelles relations et couplages qui peuvent exister entre les différentes composantes du spectre analysé. Il est en particulier impossible, sur la base du spectre de variance seul, de savoir si toutes les composantes de houle peuvent être considérées comme indépendantes et superposées linéairement, c'est à dire « libres » (cas d'un état de mer gaussien), ou bien si, au contraire, certaines sont liées à d'autres comme c'est le cas pour des vagues non-linéaires, situation rencontrée fréquemment en faible et très faible profondeur d'eau.

La question à traiter peut se formuler ainsi : pour un état de mer donné par un enregistrement temporel d'élévation de surface libre, comment séparer au sein du spectre de variance la partie linéaire (correspondant aux ondes libres de l'état de mer) de la partie non-linéaire (correspondant aux harmoniques liés) ? Ou bien, comment lever l'hypothèse d'état de mer gaussien dans le cadre de l'analyse de l'état de mer ?

La complexité de l'analyse est liée au fait qu'on ne dispose bien souvent que de mesures temporelles en un seul point d'espace et la question peut même paraître insolvable au premier abord. Il existe cependant quelques approches qui permettent d'effectuer une analyse non-linéaire à partir d'une seule série temporelle. On peut par exemple utiliser un modèle d'analyse dit du deuxième ordre, basé sur l'hypothèse (relativement forte) que l'état de mer peut être correctement représenté par la théorie de Stokes au deuxième ordre sur un fond localement plat (voir par exemple Prislin *et al.*, 1996 et 1997). Cette approche présente certains avantages et elle est assez couramment utilisée dans la pratique : elle délivre un spectre « linéaire » et sa composante non-linéaire du deuxième ordre. Elle est toutefois plutôt réservée aux états de mer faiblement non-linéaires par grande ou moyenne profondeur d'eau.

Dans le cadre de nos travaux sur le comportement non linéaire des vagues en faible profondeur d'eau, nous avons privilégié la méthode d'analyse dite « **analyse bi-spectrale** ». L'analyse bi-spectrale est une approche permettant de répondre, au moins partiellement, au problème de l'analyse non-linéaire des signaux de houle et de déterminer les éventuels couplages et relations qui existent entre les différentes composantes du spectre, et cela à partir d'un seul signal temporel de houle. L'analyse bi-spectrale a été appliquée aux vagues par Hasselmann *et al.* (1963), puis reprise et développée par plusieurs auteurs (par exemple Hinich et Clay, 1968 ; Liu et Green, 1978 ; Elgar et Guza, 1985 ; Doering et Bowen, 1986). Elle a également été appliquée à d'autres domaines de la physique, toujours pour étudier les aspects non-linéaires de signaux à caractère aléatoire (par exemple Haubrich, 1965 ; Kim *et al.*, 1980, etc. et les références citées dans ces articles).

En 1996, nous avons étudié en détail cette technique d'analyse et développé un programme d'analyse bi-spectrale **BISPAN**, qui a été largement utilisé par Françoise Becq-Girard pour analyser les mesures en laboratoire réalisées dans le cadre de sa thèse (Becq, 1998) (voir l'article [AJ02] en Annexe 6).

B.2.2.2. Définition du bi-spectre, de la bi-phase et de la bi-cohérence

a. Le bi-spectre (densité bi-spectrale d'auto-corrélation)

On considère un signal temporel $x(t)$ supposé réel, stationnaire, ergodique et à moyenne nulle. La **densité bi-spectrale d'auto-corrélation** de ce signal (encore appelée simplement « **bi-spectre** ») $B(f_1, f_2)$, est définie, d'un point de vue mathématique, comme la transformée de Fourier (en deux dimensions) de la fonction $R(\tau_1, \tau_2)$ d'auto-corrélation d'ordre 3 du signal (Hasselmann *et al.*, 1963) :

$$B(f_1, f_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau_1, \tau_2) \exp[-i2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

avec : $R(\tau_1, \tau_2) = E[x(t) x(t+\tau_1) x(t+\tau_2)]$

Les variables f_1 et f_2 désignent toutes deux la fréquence (en Hertz). E désigne l'opérateur « espérance mathématique ». L'hypothèse d'ergodicité du signal permet de remplacer la moyenne d'ensemble de l'espérance mathématique par une moyenne temporelle, et donc de calculer la fonction d'auto-corrélation du signal à partir d'un seul signal temporel $x(t)$ de durée D :

$$R(\tau_1, \tau_2) = \overline{x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)} = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{D} \int_{-D/2}^{D/2} x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2) dt$$

Kim et Powers (1979) ont proposé une définition équivalente du bi-spectre, plus largement utilisée dans la pratique pour son calcul numérique. On considère pour cela que le signal $x(t)$ de durée D peut être écrit suivant une décomposition de Fourier de la forme :

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} X_j \exp(i2\pi f_j t)$$

Le bi-spectre peut alors s'écrire, en fonction des coefficients de Fourier de la décomposition du signal $x(t)$ (Kim et Powers, 1979) :

$$B(f_k, f_l) = E[X_k X_l X_{k+l}^*] = E[A_k A_l A_{k+l} \exp(i(\theta_k + \theta_l - \theta_{k+l}))]$$

Pour des commodités de notation, le bi-spectre est noté parfois : $B(f_k, f_l) = B(k, l) = B_{kl}$.

b. La bi-phase (phase du bi-spectre)

Le bi-spectre $B(f_k, f_l)$ est, dans le cas général, une fonction à valeurs complexes et peut être écrite :

$$B(f_k, f_l) = |B(f_k, f_l)| \exp(i \beta(f_k, f_l))$$

La phase du bi-spectre est également appelée « **bi-phase** » : $\beta(f_k, f_l) = \text{Arc tan} \left(\frac{\text{Im}[B(f_k, f_l)]}{\text{Re}[B(f_k, f_l)]} \right)$

c. La bi-cohérence : La **bi-cohérence** $b^2(f_k, f_l) = b^2(k, l)$, introduite par Haubrich (1965), puis Kim et Powers (1979), est une façon de normaliser le module du bi-spectre :

$$b^2(k, l) = \frac{|E[X_k X_l X_{k+l}^*]|^2}{E[|X_k X_l|^2] E[|X_{k+l}^*|^2]} = \frac{|B(k, l)|^2}{E[|X_k X_l|^2] E[|X_{k+l}^*|^2]}$$

Comme le bi-spectre, la bi-cohérence est représentée dans un plan (f_1, f_2) , mais à la différence du bi-spectre c'est une fonction à valeurs réelles (dont on voit sur la définition ci-dessus qu'elles sont supérieures ou égales à 0). En utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwarz, il est aisé de montrer que :

$$0 \leq b^2 \leq 1$$

Cependant, il convient de noter que cette propriété n'est pas nécessairement vérifiée si une définition différente de celle donnée ci-dessus est utilisée pour la bi-cohérence.

B.2.2.3. Interprétations physiques du bi-spectre

a. Bi-spectre et interactions non-linéaires : La définition du bi-spectre indique clairement que cette quantité offre une mesure de l'interdépendance (au sens statistique) ou au contraire de l'indépendance de trois ondes. En effet, si les composantes de fréquences f_k , f_l et f_{k+l} se propagent toutes trois librement et de façon indépendante (hypothèse d'état de mer gaussien), chacune d'elle peut être caractérisée par une phase aléatoire et statistiquement indépendante des deux autres. La somme de ces trois phases sera donc également distribuée de façon aléatoire sur $[0 ; 2\pi]$. Lorsqu'on effectue ensuite une moyenne statistique par l'opérateur « Espérance », le bi-spectre va tendre à s'annuler du fait de cette distribution aléatoire de la somme des phases. Au contraire, si les trois ondes sont couplées par un processus non-linéaire (cas des ondes « liées », par exemple), la somme des phases des trois composantes ne sera plus aléatoirement distribuée. En conséquence dans ce cas, le bi-spectre aura une valeur différente de zéro et permettra donc de mettre en évidence les interactions non-linéaires entre ces trois composantes.

b. Partie réelle du bi-spectre : en intégrant la partie réelle du bi-spectre, il est possible de montrer que l'on obtient un estimateur du moment d'ordre 3 du signal $x(t)$, lequel est proportionnel à la valeur du coefficient de dissymétrie horizontale (« skewness » en Anglais) du signal.

c. Partie imaginaire du bi-spectre : Masudo et Kuo (1981) ont montré que la partie imaginaire du bi-spectre est liée à l'asymétrie verticale du signal. Elgar et Guza (1985) ont par ailleurs établi que l'intégrale de la partie imaginaire du bi-spectre permettait d'estimer l'asymétrie de la dérivée temporelle du signal $x(t)$.

d. Bi-cohérence : La bi-cohérence, comme le bi-spectre, offre une mesure du degré de cohérence ou d'indépendance entre trois composantes d'un train d'ondes. En particulier :

- ⇒ la bi-cohérence est nulle lorsque les trois ondes sont statistiquement indépendantes,
- ⇒ si la composante de fréquence f_{k+l} est excitée par une interaction entre les composantes de fréquences f_k et f_l , la bi-cohérence sera proche de 1.

La bi-cohérence permet donc de mettre en évidence de tels processus d'interactions non-linéaires entre triplets de fréquences. Elle apparaît de ce fait adaptée pour l'étude et la quantification des interactions non-linéaires de houle en faible profondeur. Kim et Powers (1979) montrent que la bi-cohérence correspond en fait à la proportion de l'énergie $P(f_{k+l})$ portée par la fréquence $k+l$ qui est due à l'interaction non-linéaire entre les fréquences f_k et f_l .

e. Propriétés et interprétation de la bi-phase : La bi-phase, introduite ci-avant, est la phase du bi-spectre et vaut :

$$\beta(k,l) = \text{Arc tan} \left(\frac{\text{Im}[B(k,l)]}{\text{Re}[B(k,l)]} \right) = \theta_k + \theta_l - \theta_{k+l}$$

Elle correspond à la différence de phases entre les trois composantes k , l et $k+l$ en interaction. Pour le cas d'un état de mer gaussien, caractérisé par le fait que les phases des composantes sont indépendantes et totalement décorréelées, la différence de phase $(\theta_k + \theta_l - \theta_{k+l})$ est aléatoirement répartie dans l'intervalle $[0 ; 2\pi]$ avec une densité de probabilité uniforme. *A contrario*, si les trois

composantes sont couplées, la bi-phase tend vers une valeur finie. Elgar et Guza (1985) ont montré que la valeur de la bi-phase tend vers 0 pour un signal de houle non-linéaire qui peut être représenté par une théorie de Stokes, avec des harmoniques en phase avec le mode fondamental (donc plutôt en grande profondeur) et vers $-\pi/2$ pour un profil de vague de type « dent de scie » caractéristique de la zone de déferlement. Ces propriétés ont été utilisées par Doering et Bowen (1995) et Eldeberky (1996), pour paramétrer la bi-phase correspondant aux auto-interactions du pic avec lui-même (transfert de (f_p, f_p) vers $2f_p$). Eldeberky (1996) propose ainsi la relation :

$$\beta(f_p, f_p) = -\frac{\pi}{2} \left(1 - \tanh\left(\frac{0.2}{U_s}\right) \right)$$

où U_s est le nombre d'Ursell défini par :

$$U_s = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_{mo} T_{01}^2}{d^2}$$

Les mesures expérimentales montrent toutefois une dispersion importante autour de cette paramétrisation. Cette paramétrisation est utilisée dans le modèle LTA (pour « Lumped Triad Approximation ») de Eldeberky (1996) pour modéliser de façon simplifiée les interactions non-linéaires entre triplets de fréquences (voir § B.4.2.2.2 de ce mémoire).

B.2.2.3.1. Mise en œuvre pratique de l'analyse bi-spectrale

D'un point de vue pratique, la méthode que nous avons utilisée pour calculer le bi-spectre s'inspire de la méthode du périodogramme présentée au § B.2.1.2 pour l'analyse spectrale classique (voir aussi Liu et Green, 1978; Kim et Powers, 1979). Nous avons développé un logiciel spécifique pour ces traitements, appelé **BISPAN**, comportant de nombreuses fonctionnalités pour la partition du signal de départ en segments, l'utilisation de fenêtres temporelles de pondération, etc. comme pour le module d'analyse spectrale **SPECAN**.

Pour le calcul du bi-spectre, la partition du signal de départ en segments et l'opérateur de moyenne effectué sur ces différents segments sont fondamentaux pour traduire au mieux l'opérateur « espérance mathématique » intervenant dans la définition du bi-spectre. Encore plus que pour l'analyse spectrale, il est important de disposer d'un nombre élevé de segments (considérés comme autant de différentes réalisations du processus) avec chacun une durée suffisamment longue pour avoir une bonne résolution fréquentielle et détecter les différents couplages potentiels au sein du spectre. En conséquence, une analyse bi-spectrale de qualité ne peut s'envisager que sur des signaux temporels acquis sur de longues durée, de l'ordre d'un millier de vagues pour fixer les idées, soit des mesures sur plusieurs heures en nature.

Nous avons également porté une grande attention à la « qualité » des estimateurs bi-spectraux basés sur cette méthode. Nous nous sommes intéressés pour cela aux propriétés statistiques des estimateurs (espérance mathématique, variance,...) et aux lois de probabilités de ces estimateurs, à la fois pour le bi-spectre, la bi-cohérence et la bi-phase. Ces travaux ne sont pas repris ici, mais nous insistons sur le fait que connaître les incertitudes sur les estimateurs utilisés est presque aussi important que déterminer ces estimateurs, surtout pour les estimateurs bi-spectraux dont les variabilités statistiques dépendent de plusieurs paramètres et peuvent être importantes suivant les cas considérés. Cette analyse est un préalable nécessaire à toute définition et/ou interprétation de résultats d'analyse bi-spectrale.

B.2.2.4. Utilisation de l'analyse bi-spectrale pour les états de mer côtiers

Notre module d'analyse bi-spectrale **BISPAN** a été largement utilisé en 1996 et 1997 par Françoise Becq-Girard pour analyser les mesures en laboratoire réalisées dans le cadre de sa thèse et quantifier les effets d'interactions non-linéaires entre triplets de fréquences en zone de shoaling et de déferlement

(Becq, 1998 ; cf. article [AJ02] en Annexe 6). Nous reprenons ci-après quelques résultats issus de ces travaux.

Une série d'essais en canal à houle aléatoire ont été réalisés au LNHE pour un profil bathymétrique représenté sur la Figure 2 et destiné à mettre en évidence les effets non-linéaires en faible profondeur d'eau. Le canal considéré est le canal n°12 du LNHE, d'une longueur de 45 m pour une largeur de 0.60 m. Il est équipé d'un batteur plan, animé d'un mouvement de type « piston » et piloté par ordinateur, pouvant générer des vagues monochromatiques ou irrégulières (i.e. respectant un spectre de variance donné en consigne).

Le profil bathymétrique étudié se compose d'une succession de pentes dont l'inclinaison diminue jusqu'à l'arrivée sur un replat ; puis la profondeur augmente à nouveau légèrement, avant de diminuer régulièrement sous la forme d'une pente douce de plage constante (environ 5%). Ce profil était constitué de plaques métalliques lisses. Les séries temporelles d'élévation de surface libre étaient mesurées en 16 points répartis le long du profil comme indiqué sur la Figure 2, à l'aide de sondes résistives (capteurs de houle TDH). L'origine des abscisses le long du canal est prise au début de la pente et coïncide avec la position de la sonde 2.

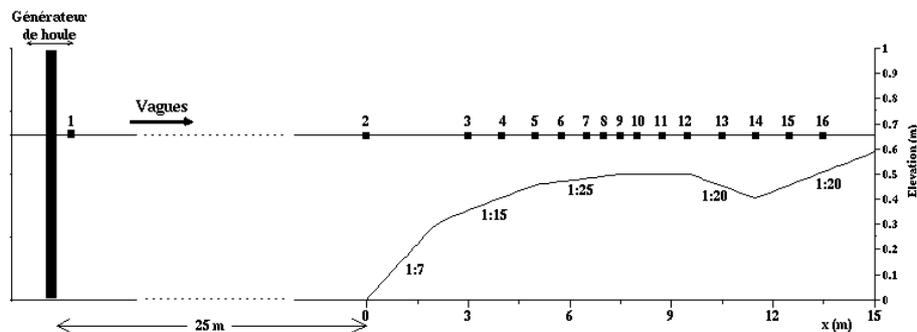


Figure 2 : Profil bathymétrique utilisé lors des essais en canal à houle au LNHE réalisés lors de la thèse de F. Becq-Girard.

Nous considérons ici l'essai 26 analysé par Françoise Becq-Girard (Becq, 1998) qui correspond à un essai en houle irrégulière et sans déferlement. La profondeur d'eau au large du profil bathymétrique et au niveau du batteur à houle est de $d = 0.65$ m. La hauteur significative des vagues générées est de $H_{m0} = 3.4$ cm pour une fréquence de pic de $f_p = 0.435$ Hz (période de pic $T_p = 2.3$ s). Le spectre de houle au batteur est de type JONSWAP avec un facteur d'élancement du pic de 3.3.

Les mesures ont été acquises sur une durée de 40 minutes, avec un pas de temps d'échantillonnage de 0.070 s. Pour l'analyse spectrale par **SPECAN**, nous avons découpé le signal en 37 segments de 1024 points chacun, en utilisant un recouvrement partiel de 10 % entre deux segments consécutifs, ce qui permet d'avoir une représentation des spectres sur 512 fréquences avec une résolution fréquentielle de 0.01395 Hz. Pour l'analyse bi-spectrale avec **BISPAN**, nous avons augmenté le nombre de segments afin de diminuer la variance des estimateurs et avons retenu 64 segments de 512 points. La résolution fréquentielle du bi-spectre est donc le double de celle des spectres et vaut 0.028 Hz. En outre, la bi-cohérence n'est calculée que pour les couples de fréquences en lesquels le module du bi-spectre dépasse 5% de la valeur de pic.

Les évolutions des paramètres synthétiques de l'état de mer issus des spectres et des bi-spectres analysés sont présentées sur la Figure 3, à partir de l'abscisse $x = 0$ m correspondant à la position de la sonde 2 et au début de la pente. Nous avons retenu la hauteur significative spectrale H_{m0} et la période moyenne T_{01} toutes deux calculées à partir du spectre de variance analysé par **SPECAN** ainsi que les paramètres non-linéaires de dissymétrie verticale A et horizontale S (pour skewness), tous deux calculés à partir du bi-spectre analysé par **BISPAN**.

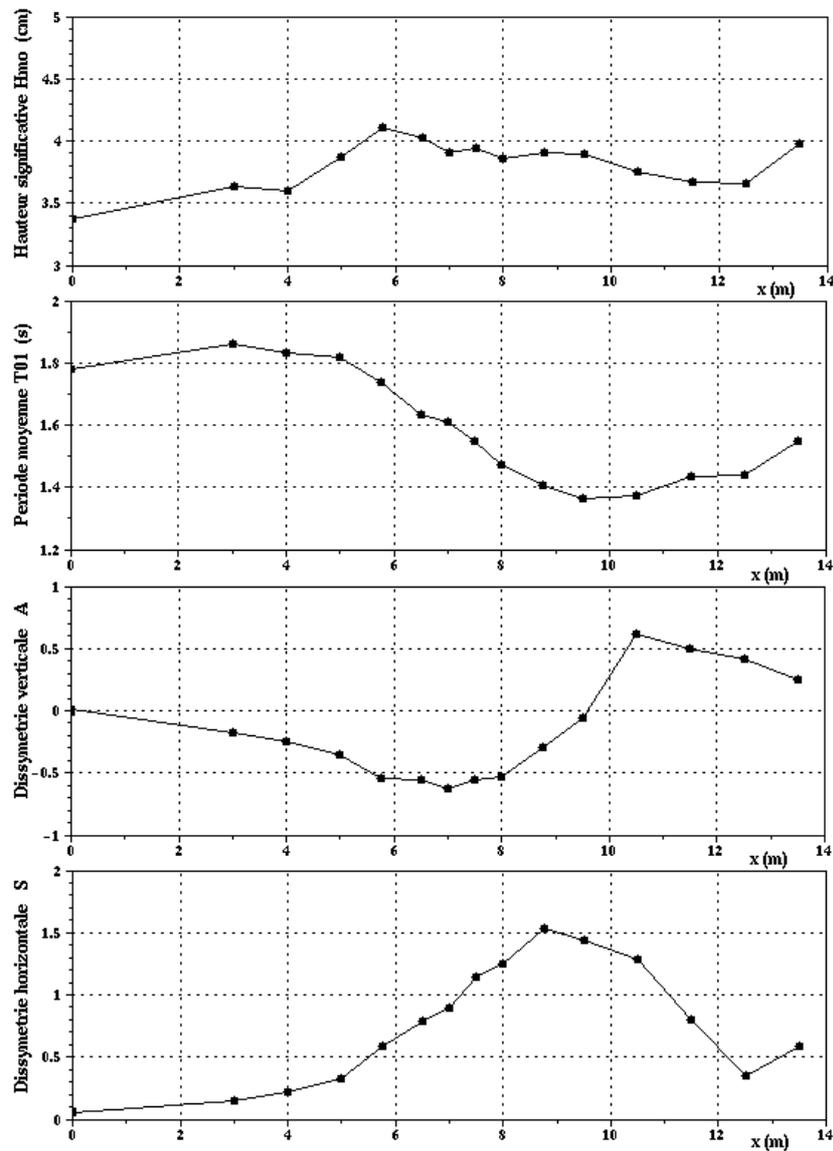


Figure 3 : Paramètres synthétiques de l'état de mer analysés sur l'essai 26 en canal à houle.
(Essai réalisé au LNHE lors de la thèse de F. Becq-Girard)

On observe que la hauteur significative spectrale H_{m0} augmente sous l'effet du shoaling lorsque la profondeur d'eau diminue, puis reste stable sur la partie plane. Elle diminue ensuite légèrement dans la fosse située après le replat avant d'augmenter à nouveau sur la plage pour la sonde 16. Ce comportement est tout à fait en accord avec les tendances que l'on pouvait prévoir en se basant sur les variations du coefficient de shoaling, même en ne considérant qu'une théorie linéaire des vagues.

Les variations de la période moyenne T_{01} sont par contre bien différentes de ce que prédit la théorie linéaire. En effet, on observe une diminution sensible de la période moyenne lors de la propagation des vagues sur le relief bathymétrique et ensuite sur la partie plane. Elle passe de 1.8 s au large à moins de 1.4 s à la fin du replat et lorsque la profondeur augmente à nouveau (sondes 12 et 13). Cette diminution est en fait liée aux transferts d'énergie du pic principal du spectre vers les harmoniques supérieurs, comme nous le verrons au paragraphe suivant.

En ce qui concerne les indices de dissymétrie, on observe qu'ils sont tous deux quasiment nuls en début de pente, ce qui indique un état de mer incident très linéaire (gaussien). Par contre, lorsque les vagues se propagent sur la pente, puis en faible profondeur d'eau, ces deux indices s'écartent significativement de zéro, traduisant un développement des non-linéarités dans le profil de surface

libre. La dissymétrie verticale A décroît de 0 vers les valeurs négatives dans la zone de shoaling, jusqu'à une valeur minimum de - 0.65 environ à l'abord du replat. Puis elle devient croissante sur la partie à fond plat, redevient positive et augmente jusqu'à 0.65 environ au niveau de la sonde 13 (après la fin du replat). En suite, elle décroît à nouveau sur les 3 dernières sondes. La dissymétrie horizontale S augmente depuis 0 en pied de pente jusqu'à la fin du replat pour atteindre la valeur de 1.5, et décroît ensuite vers 0 après le replat, avant d'augmenter à nouveau légèrement au niveau de la sonde 16 sur la dernière pente. Ces deux paramètres mettent bien évidence l'intensité des effets non-linéaires qui s'accroissent lors du shoaling, puis tendent à diminuer après le passage du haut-fond. On observe toutefois que les valeurs maximales des deux indices sont décalées en espace.

L'évolution des spectres de variance analysés par **SPECAN** en 11 des 16 sondes est illustrée sur la Figure 4 en échelle logarithmique. L'axe des fréquences a été normalisé par la valeur de la fréquence de pic, de façon à mieux visualiser les pics aux fréquences harmoniques du mode fondamental.

Entre les sondes 2 et 8, on observe clairement une amplification de la hauteur du pic principal due au phénomène de shoaling accompagnant la diminution de la profondeur. Toutefois, on note aussi l'apparition d'un pic harmonique à la fréquence double de la fréquence de pic, que l'on distingue nettement dès la sonde 6. Entre les sondes 8 et 12, on observe de façon simultanée la diminution du pic principal et l'augmentation du pic harmonique à la fréquence $2f_p$, ainsi que la formation très nette d'un pic à la fréquence harmonique $3f_p$. Ce dernier est visible dès la sonde 8 (surtout sur la représentation en échelle logarithmique). Sur les sondes 8 à 13, un troisième pic harmonique à la fréquence $4f_p$ est également visible sur la Figure 4.

La formation de ces pics harmoniques correspond à un transfert d'énergie vers les hautes fréquences, du fait des interactions non-linéaires entre triplet de fréquences, et traduit la déformation du profil temporel de surface libre qui s'écarte d'une courbe sinusoïdale et comprend différentes harmoniques d'ordres supérieurs, qui sont pour l'essentiel liés au mode principal. Rappelons que sur ce cas, il n'y a pas de déferlement et donc la diminution de l'énergie du pic principal correspond entièrement à des transferts vers des fréquences supérieures ou inférieures. Au niveau des sondes 13 et 14, situées dans la fosse après le replat, le pic principal et son premier harmonique ont quasiment la même hauteur. Ensuite, pour la sonde 16, le pic principal augmente à nouveau sous l'effet du shoaling.

On observe également une légère croissance de l'énergie basses fréquences, visible sur la Figure 4, mais le pic correspondant reste relativement peu marqué sur cette expérience. Cela est dû essentiellement au fait que le spectre de vagues simulé est relativement étroit, ce qui a pour conséquence de limiter les effets des interactions non-linéaires « différences » (triplets du type (f_k, f_i, f_{k-i})) qui sont responsables de la formation des sub-harmoniques.

Ces spectres multi-pics portent la signature des effets de faible profondeur d'eau et sont caractéristiques de ce que l'on rencontre en zone côtière. Il est clair que dans ce cas, l'hypothèse de représentation d'un état de mer réel par une somme linéaire de composantes sinusoïdales élémentaires n'est plus applicable. Une partie de l'énergie se propage sous forme d'harmoniques liés à un mode fondamental. Les spectres de variance présentés ne permettent pas de séparer la partie liée de la partie libre pour l'énergie associée à chaque fréquence.

Une autre conséquence de ces effets, déjà notée au paragraphe précédent, est la diminution de la période moyenne de l'état de mer. En effet, le développement des pics harmoniques supérieurs a pour conséquence d'augmenter la fréquence moyenne du spectre et donc de diminuer la période moyenne T_{01} . Ceci est couramment observé en faible profondeur d'eau, en particulier après un haut-fond ou une barre. C'est notamment le cas à l'entrée de l'estuaire de la Gironde par exemple, on l'observe régulièrement des vagues dont la période de pic est quasiment la moitié de celle de la houle incidente en provenance de l'Océan Atlantique. Dans ces cas, c'est en fait le premier harmonique (à la fréquence $2f_p$) qui devient le pic dominant du spectre et qui « impose » sa période comme période de pic. Cet effet se retrouve également sur les autres périodes (périodes moyennes), mais en général de façon moins marquée qu'une division par 2 par rapport à la valeur du large.

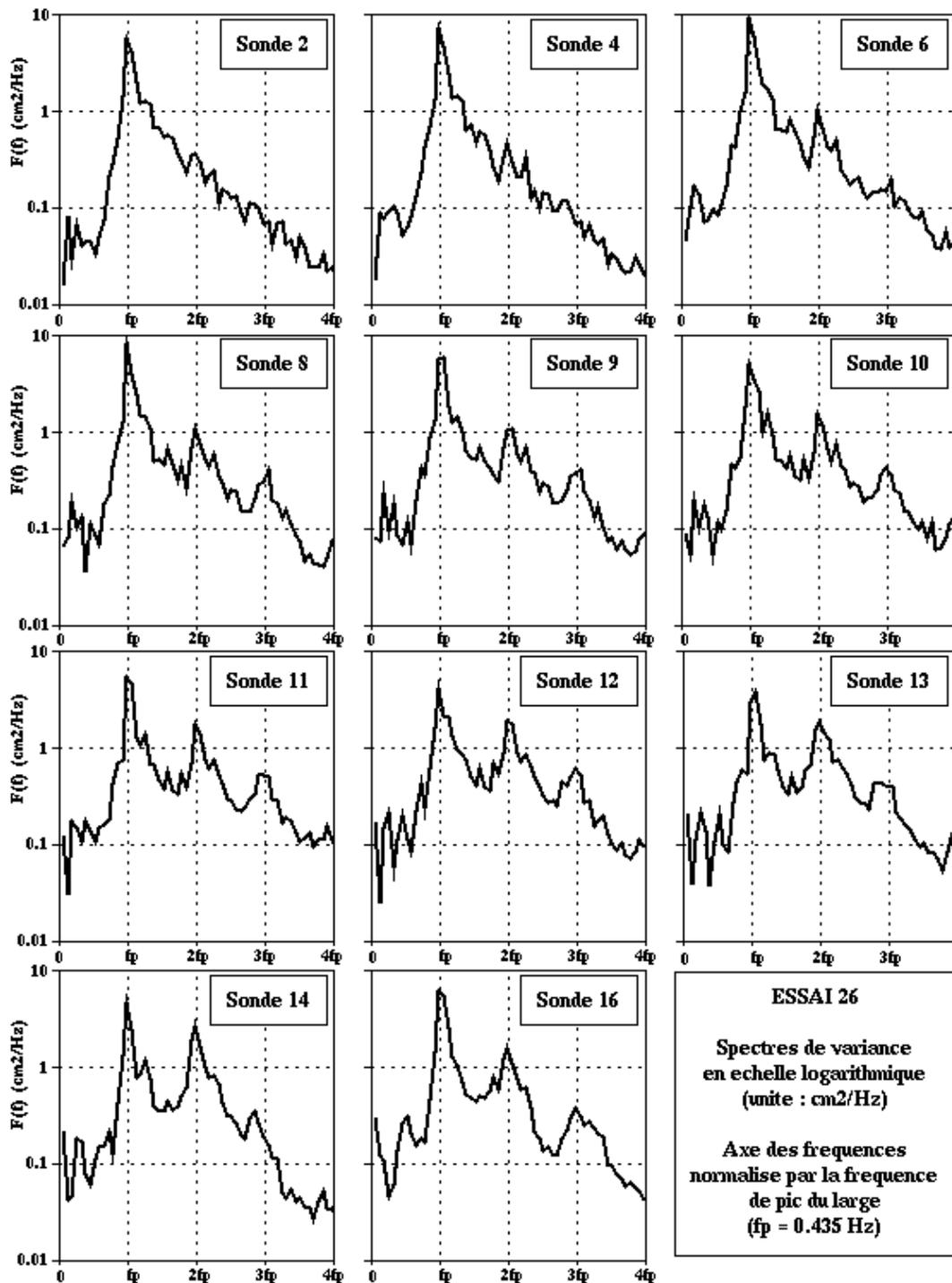


Figure 4 : Spectres de variance de l'état de mer analysés sur l'essai 26 en canal à houle.
Echelle logarithmique des spectres (Essai réalisé au LNHE lors de la thèse de F. Becq-Girard)

Les évolutions de la bi-cohérence analysées par **BISPAN** sont tracées sur la Figure 5 pour les 11 mêmes sondes que celles retenues pour les spectres de variance. Les axes de fréquences sont à nouveau normalisés par la fréquence de pic f_p . Du fait de la symétrie jouée par les fréquences f_1 et f_2 (symétrie par rapport à la droite $f_1 = f_2$), seule la moitié inférieure du quadrant est représentée.

En pied de pente, la bi-cohérence (cf. Figure 5) est quasiment nulle partout indiquant un faible niveau de couplages non-linéaires au sein du spectre incident. En zone de shoaling (sonde 4, puis sonde 6), on note une interaction du mode fondamental f_p avec lui-même, ce qui a pour effet de développer le pic

harmonique supérieur à la fréquence somme $f_p + f_p = 2f_p$. A la sonde 6, on observe que le mode fondamental interagit également avec le premier harmonique, transférant de l'énergie vers l'harmonique à la fréquence $3f_p$, et ainsi de suite à mesure que la profondeur d'eau diminue.

C'est sur le replat que les couplages non-linéaires sont les plus marquées (entre les sondes 9 et 12). Lorsque la profondeur augmente à nouveau après le replat, la bi-cohérence est plus faible, indiquant un couplage moins intense. Ce qui a pour conséquence, qu'une partie de l'énergie qui était contenue dans les modes liés lors de la phase de shoaling, se trouve libérée après le replat et va se propager sous la forme d'ondes libres.

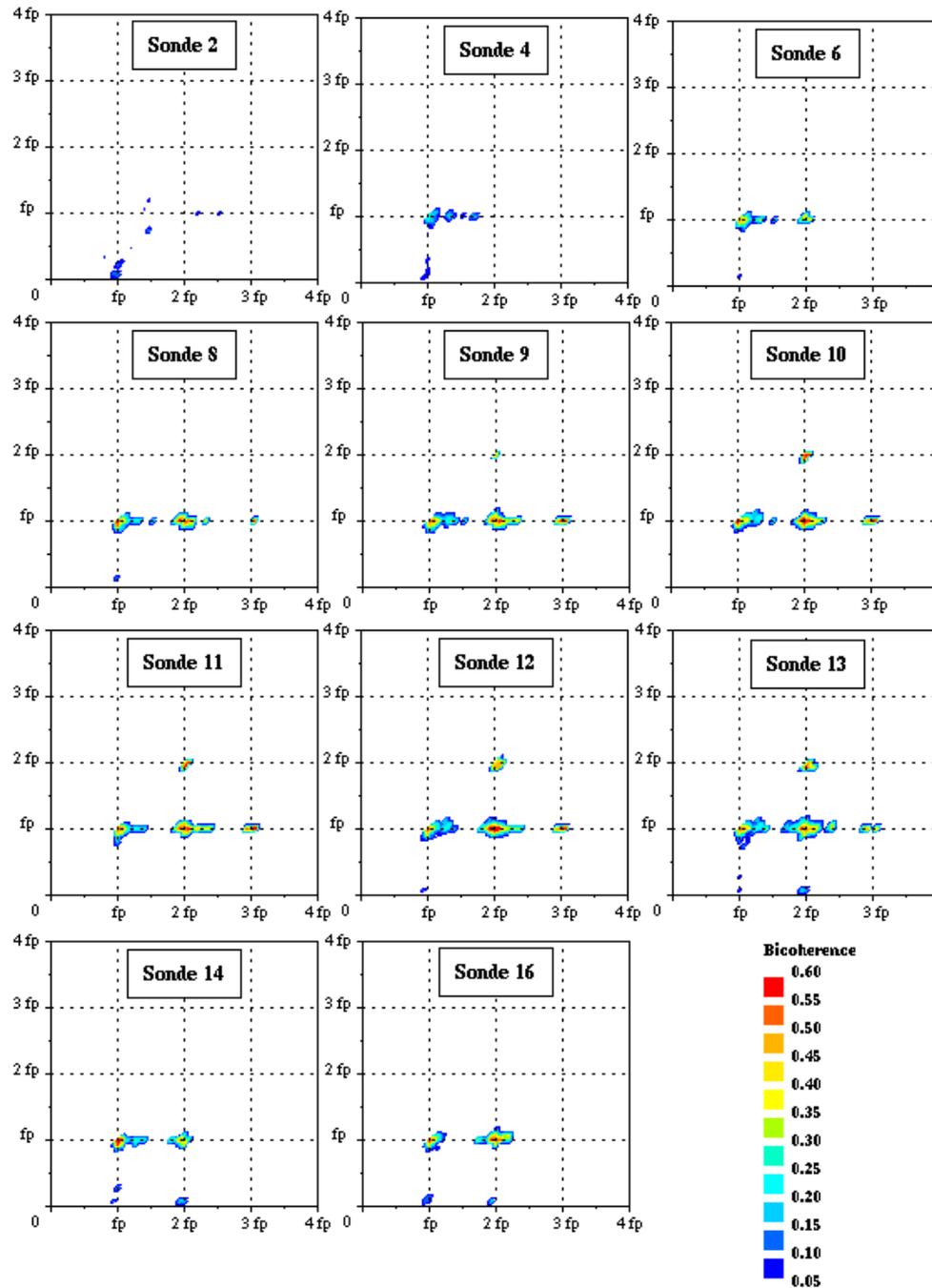


Figure 5 : Bi-cohérence de l'état de mer analysés sur l'essai 26 en canal à houle.
(Essai réalisé au LNHE lors de la thèse de F. Becq-Girard)

B.2.3. Analyse directionnelle des états de mer – Spectres directionnels

B.2.3.1. Introduction et définitions

On s'intéresse dans le paragraphe B.2.3 à la détermination du spectre directionnel de variance de l'état de mer, noté $F(f, \theta)$. Il s'agit en fait de la **densité spectro-angulaire de variance** de l'état de mer, exprimée habituellement en $m^2 \cdot Hz^{-1} \cdot rad^{-1}$. C'est une fonction qui décrit la répartition de l'énergie de l'état de mer non seulement suivant les fréquences f , mais aussi suivant les directions de provenance θ .

Un exemple de spectre directionnel de variance est donné sur la Figure 6.

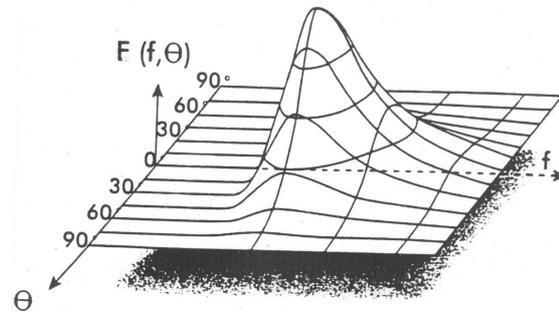


Figure 6 : Exemple de spectre directionnel

Le spectre directionnel de variance est généralement décomposé de la façon suivante :

$$F(f, \theta) = E(f) \cdot D(f, \theta)$$

- $E(f)$ est le **spectre omnidirectionnel de variance**, classiquement établi lorsque n'est pas pris en compte l'aspect directionnel de la houle (cf. § B.2.1.2). Il s'obtient à partir du spectre directionnel de variance en intégrant sur les directions de houle :

$$E(f) = \int_0^{2\pi} F(f, \theta) d\theta$$

- $D(f, \theta)$ est la **Fonction de Répartition Angulaire (FRA)** de l'énergie (ou de la variance). Elle traduit la façon dont est répartie angulairement l'énergie $E(f)$ associée à la fréquence f . C'est une fonction positive sur $[0 ; 2\pi]$, vérifiant $D(f, 0) = D(f, 2\pi)$ et dont une propriété fondamentale est un corollaire de la relation précédente :

$$\int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1$$

La correspondance entre le spectre directionnel de variance $F(f, \theta)$ et le champ d'élévation de surface libre de la mer $\eta(x, y, t)$ est habituellement obtenue en faisant une hypothèse de linéarité de l'état de mer. Celle-ci peut s'exprimer en disant que l'état de mer résulte de la superposition d'un grand nombre de composantes sinusoïdales élémentaires (i.e. monochromatiques et monodirectionnelles) indépendantes les unes des autres, et s'écrit sous une forme discrète :

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos [k_m (x \cdot \sin \theta_m + y \cdot \cos \theta_m) - \omega_m t + \varphi_m]$$

Nous insistons sur le fait que, sous l'hypothèse de superposition linéaire mentionnée ci-dessus, les phases φ_m sont distribuées aléatoirement sur l'intervalle $[0 ; 2\pi]$ avec une densité de probabilité uniforme. De ce fait, ce mode de représentation de l'état de mer est parfois appelé « stochastique ». L'amplitude de chaque composante élémentaire a_m est liée au spectre directionnel de variance par :

$$a_m = \sqrt{2F(f, \theta) df d\theta}$$

Quant au nombre d'onde k_m et la pulsation angulaire ω_m de chaque composante, ils sont liés par la relation de dispersion linéaire, en fonction de la profondeur d'eau d :

$$\omega_m^2 = gk_m \operatorname{th}(k_m \cdot d)$$

Une généralisation continue de la formulation discrète ci-dessus pour la représentation de l'état de la mer s'écrit sous la forme pseudo-intégrale suivante :

$$\eta(x, y, t) = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} \sqrt{2F(f, \theta)} df d\theta \cos[k(x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta) - \omega t + \varphi]$$

où la phase φ est encore une variable aléatoire répartie sur l'intervalle $[0 ; 2\pi]$ avec une densité de probabilité uniforme.

Au niveau énergétique (densité d'énergie par unité de surface), la correspondance entre le cas discret et le cas continu s'écrit :

$$\sum_f^{f+df} \sum_{\theta}^{\theta+d\theta} \frac{1}{2} a_m^2 = F(f, \theta) df d\theta$$

La problématique générale de l'analyse directionnelle des états de mer consiste à déterminer le spectre directionnel de variance $F(f, \theta)$, ou bien de façon équivalente le spectre omnidirectionnel $E(f)$ (ce qui est un problème classique et bien maîtrisé, cf. § B.2.1.2) et la fonction de répartition angulaire (FRA) à chaque fréquence de discrétisation du spectre $E(f)$, ce qui est une question bien plus complexe à traiter et fait l'objet de nos travaux, présentés dans la suite de cette partie.

B.2.3.2. Les différents systèmes de mesure de houle multidirectionnelle

Pour accéder à la répartition directionnelle de l'énergie de la houle, il est nécessaire de disposer de plus de sources de données que pour une mesure omnidirectionnelle classique, où un seul capteur de niveau, d'accélération ou de pression suffit à déterminer l'élévation de surface libre. Il faut maintenant mesurer soit plusieurs grandeurs de houle en une même position (élévation de surface libre, vitesses, pentes de surface libre,...), soit une même grandeur de houle (en général l'élévation de surface libre) en plusieurs positions, soit encore, en combinant les deux approches, différentes grandeurs de houle en plusieurs positions.

Parmi les systèmes de mesure utilisés en nature et/ou en laboratoire pour effectuer une mesure directionnelle de la houle, il est possible d'établir la classification synthétique suivante (un descriptif plus complet et plus documenté peut être trouvé dans le rapport final de l'action européenne COST-714 « Measurement and use of directional spectra of ocean waves » publié en 2001) :

A. Systèmes basés sur une analyse de corrélations temporelles : Ces systèmes de mesure délivrent des séries temporelles pour différents signaux échantillonnés simultanément en une ou plusieurs positions d'espace.

i. **Capteurs ponctuels** (plusieurs grandeurs mesurées en un même point d'espace) :

- **bouée pilonnement / roulis / tangage**, mesurant l'élévation de surface libre et ses deux pentes suivant deux axes orthogonaux (voir par exemple : Longuet-Higgins *et al.*, 1963 ; Lygre et Krogstad, 1986 ; Brissette et Tsanis, 1994)
- **bouée à trois composantes de déplacement**, mesurant les déplacements de surface libre suivant les trois axes (bouée Datawell Waverider par exemple) [AC20] (voir Krogstad *et al.* (1999) pour une synthèse récente sur les bouées).
- **vélocimètre 2D associé à un capteur de surface libre**, mesurant l'élévation de surface libre et les deux composantes de la vitesse horizontale à une certaine cote sous la surface libre (voir par exemple : Krogstad *et al.*, 1988 ; [AC06]
- **vélocimètre 3D**, mesurant les vitesses suivant les trois axes en surface libre ou à une certaine cote sous la surface libre

ii. **Réseaux de capteurs** (une ou plusieurs grandeurs mesurées en différents points) :

- **réseaux de capteurs de surface libre (ou de pression)** : plusieurs capteurs (de trois à une dizaine) disposés suivant un réseau géométrique mesurent simultanément l'élévation de surface libre (voir par exemple Nwogu, 1989 ; [AC02] [AC06]).
- **réseaux mixtes incluant des capteurs de surface libre (ou de pression) et des courantomètres** : diverses configurations peuvent être imaginées, mais rapidement se posent des problèmes de maintenance et de traitement des données (voir par exemple : Hashimoto *et al.*, 1987 ; Hashimoto, 1997).

B. Systèmes basés sur une analyse de corrélations spatiales : Une "photographie" de l'état de la surface de la mer est réalisée à un instant donné sur une certaine emprise. Cette technique appelle des traitements différents de ceux appliqués aux systèmes précédents et nécessite notamment le recours à une analyse spatiale et non plus temporelle. Les moyens utilisés pour réaliser une image de la surface de la mer sont :

- **observation aérienne par radar micro-onde** (embarqué dans un avion ou un hélicoptère) : voir par exemple Jackson *et al.* (1985) ou le radar RESSAC en bande C de Hauser *et al.* (1992).
- **observation satellitaire** : plusieurs techniques sont déjà employées de façon opérationnelle ou sont encore en cours de développement pour mesurer les vagues : altimètre et radar à synthèse d'ouverture (SAR) notamment (Krogstad et Barstow, 1999). Le radar SAR permet d'avoir accès en particulier à un spectre d'image de l'état de mer, puis par un traitement adapté à un spectre d'énergie. De tels radars sont embarqués depuis plusieurs années sur des satellites (ERS-1 et ERS-2, ENVISAT). Voir aussi les travaux de Danièle Hauser en France sur le radar SWIMSAT (Hauser *et al.*, 2001)
- **observation par radar au sol à hautes fréquences (HF)**. Voir par exemple les travaux de Wyatt *et al.* (1999) entre autres.

Au cours de nos travaux, pour l'essentiel menés en collaboration avec le CETMEF dans le cadre de la Convention Biparti, nous nous sommes intéressés principalement aux systèmes de mesure basés sur une analyse de corrélations temporelles (cf. point A de la classification ci-dessus), c'est à dire des systèmes mesurant au moins 3 séries temporelles d'une même grandeur de l'état de mer (l'élévation de la surface libre dans notre cas) ou de plusieurs grandeurs (élévation de surface libre, vitesses orbitales horizontales, pentes de surface libre) en un ou plusieurs points d'espace.

B.2.3.3. Principe de l'analyse directionnelle des états de mer

Les méthodes d'analyse de houle directionnelle à partir de séries temporelles mesurées en un ou plusieurs points de l'espace utilisent la décomposition du spectre directionnel de variance introduite au § B.2.3.1 et procèdent de la façon suivante :

- A Détermination « classique » du spectre omnidirectionnel $E(f)$ à l'aide d'un enregistrement d'élévation de surface libre, d'accélération verticale ou de pression.
- B Pour chaque fréquence à laquelle est estimé $E(f)$, détermination de la FRA $D(f, \theta)$ en utilisant les « corrélations » entre plusieurs signaux de houle, enregistrés simultanément. C'est sur ce problème que portent plus précisément les méthodes d'analyse directionnelle.

D'un point de vue mathématique, le problème se formule de la façon exposée brièvement ci-après, dans le cadre de la théorie linéaire de la houle. Pour plus de détails, se reporter à nos publications [AJ01] (reproduite en Annexe 1) [AC01] [AC02] [AC06] [LI04] (reproduite en Annexe 2) et aux rapports de recherches [RR03] [RR06].

Nous considérons un réseau de mesures composé de N capteurs ($N \geq 3$), relevant de la catégorie A du § B.2.3.2. Ces capteurs ne mesurent pas nécessairement les mêmes grandeurs de houle et certains d'entre eux peuvent être positionnés au même point en espace (dans le cas où ils mesurent des grandeurs différentes). Chaque capteur enregistre une série temporelle d'une grandeur de houle, notée $P_n(t)$ ($n=1$ à N), qui peut être l'élévation de surface libre, ses pentes (roulis ou tangage), la pression ou une vitesse orbitale de houle à une certaine cote dans la colonne d'eau, etc. Les signaux sont échantillonnés simultanément sur une durée notée D , avec un pas de temps Δt . Les positions spatiales des capteurs sont notées \vec{x}_n ($n=1$ à N) par rapport à une origine arbitraire.

On effectue d'abord une analyse de la corrélation entre les divers signaux en passant dans le domaine fréquentiel par analyse spectrale. De façon similaire au calcul du spectre de variance omnidirectionnel présenté au § B.2.1.2, les grandeurs calculées sont **les densités spectrales de corrélation** ou **densités spectrales croisées** entre ces signaux pris deux à deux (m et n variant de 1 à N), définies par :

$$G_{mn}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{mn}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad \text{avec} \quad R_{mn}(\tau) = \lim_{D \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{D} \int_0^D P_m(t) P_n(t + \tau) dt \right]$$

On montre que les densités spectrales de corrélation $G_{mn}(f)$ peuvent être reliées au spectre directionnel de variance $F(f, \theta)$ par une relation qui s'écrit sous la forme générale suivante :

$$G_{mn}(f) = \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) \exp(-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)) F(f, \theta) d\theta$$

ou bien de façon équivalente en utilisant la Fonction de Répartition Angulaire (FRA) :

$$G_{mn}(f) = E(f) \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) \exp(-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)) D(f, \theta) d\theta$$

$H_m(f, \theta)$ désigne la fonction de transfert permettant de passer de l'élévation de surface libre au type de grandeur de houle $P_m(t)$ (pression, vitesse orbitale, accélération,...). Cette fonction est connue et donnée par la théorie linéaire de houle. Le symbole $*$ dans l'expression ci-dessus est utilisé pour représenter le nombre complexe conjugué.

Toute la problématique de l'estimation du spectre directionnel consiste à calculer, à chaque fréquence du spectre omnidirectionnel $E(f)$, la fonction de répartition angulaire $D(f, \theta)$, qui est une fonction continue des directions, périodique sur l'intervalle $[0 ; 2\pi]$, d'intégrale égale à 1 sur cet intervalle et solution du système d'équations intégrales donné par les densités spectrales croisées réduites $G_{mn}(f)$.

Pour un capteur ponctuel mesurant trois signaux (bouée directionnelle par exemple), on montre par exemple qu'il ne reste au final que quatre informations véritablement indépendantes pour estimer la FRA pour chaque fréquence d'analyse (en plus des conditions de positivité, de périodicité et d'intégrale égale à 1 sur $[0 ; 2\pi]$), ce qui est très peu, ... et en théorie impossible ! En effet, déterminer une fonction continue à partir de seulement cinq équations intégrales de cette fonction est un problème particulièrement ardu, car "mathématiquement mal posé" (cinq équations pour une infinité d'inconnues). Tout l'art de l'analyse directionnelle consiste donc à chercher malgré tout une solution à ce problème. Pour cela, de nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature, basées sur des hypothèses plus ou moins fortes. La plupart d'entre elles ont été implantées de façon opérationnelle au cours de mes travaux au LNHE et sont listées dans le paragraphe suivant.

B.2.3.4. Les méthodes d'analyse multidirectionnelle développées

Il n'est possible dans ce mémoire de donner des détails, ni même le principe des différentes méthodes d'analyse directionnelles que nous avons développées pour résoudre le problème formulé dans le paragraphe précédent. Nous nous limitons à en donner la liste et renvoyons à nos publications pour

tous les détails (en particulier [AJ01] reproduite en Annexe 1 [AC01] [AC02] [AC06] [LI04] reproduite en Annexe 2 [RR03] [RR06]).

1. Méthodes de décomposition en série de Fourier
 - 1.1 Décomposition en série de Fourier tronquée (TFS)
 - 1.2 Décomposition en série de Fourier positivée (PFS)
 - 1.3 Décomposition en série de Fourier pondérée (WFS)
2. Ajustement de la FRA à un modèle paramétrique unimodal
 - 2.1 Modèle paramétrique unimodal de type "Mitsuyasu" (1MFM)
 - 2.2 Modèle paramétrique unimodal de type "Gaussien" (1MFG)
3. Ajustement de la FRA à un modèle paramétrique bimodal (2MF)
4. Méthodes de Maximum de Vraisemblance
 - 4.1 Méthode de Maximum de Vraisemblance (MLM)
 - 4.2 Méthode de Maximum de Vraisemblance Itérative – version 1 (IMLM1)
 - 4.3 Méthode de Maximum de Vraisemblance Itérative – version 2 (IMLM2)
5. Méthodes de type Maximum d'Entropie
 - 5.1 Méthode de Maximum d'Entropie - Version 1 (MEM1)
 - 5.2 Méthode de Maximum d'Entropie - Version 2 (MEM2)
6. Méthode bayésienne (BDM)
7. Méthodes de type Vecteurs Propres
 - 7.1 Méthode de Vecteurs Propres (IEVM)
 - 7.2 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 1 (IEVM1)
 - 7.3 Méthode de Vecteurs Propres Itérative – version 2 (IEVM2)
6. Méthode de Long-Hasselmann (LHM)

Toutes ces méthodes et variantes pour l'analyse directionnelle (16 au total) sont disponibles dans le logiciel **PADINES**. Par la richesse qu'il offre, il constitue un outil à notre connaissance sans équivalence dans le monde. En particulier, il existe très peu de laboratoires ou d'instituts utilisant des méthodes sophistiquées telles que la méthode bayésienne BDM.

B.2.3.5. Vue d'ensemble de nos recherches sur l'analyse directionnelle

Nous avons travaillé sur l'analyse directionnelle des états de mer principalement entre 1991 et 1997, en collaboration avec le CETMEF dans le cadre de programmes de recherche successifs de la Convention Biparti EDF-Ministères. Toutes les méthodes d'analyse directionnelle présentées au paragraphe précédent ont été implantées dans des logiciels que nous avons développés entièrement, avec l'aide d'élèves-ingénieurs en stage de fin d'études pour certaines parties (André Bougard en 1991, Frédérique Touron en 1992 et Cédric Ménard en 1995). Il s'agit des logiciels de recherche **PRDWAS** pour le cas de capteurs de mesure ponctuels à 3 composantes et **GADWAS** pour le cas des réseaux de capteurs de surface libre. L'étape préalable d'analyse spectrale était initialement réalisée par le module séparé **SPECAN**. Des modules de calcul analytique de densités spectrales croisées (**COQUAD**) et de séries temporelles d'états de mer (**DIRSEA**) ont également été développés au cours de ces projets de recherche, de façon à tester et valider les logiciels d'analyse directionnelle sur des données numériques (donc bien maîtrisées en entrée), avant de les appliquer à des mesures de laboratoire ou de bouées.

En 1997, une version intégrée et industrialisée a été produite pour le cas des capteurs de mesure ponctuels à 3 composantes (fusion de **SPECAN** et **PRDWAS**, ainsi que du module de calcul de paramètres directionnels **PARDIR**, présenté au § B.2.4). Il s'agit du logiciel **PADINES**, fruit de cette collaboration avec le CETMEF sur plusieurs années dans le cadre de la Convention Biparti. Ce logiciel est installé à la fois au CETMEF (qui l'utilise pour les mesures de bouées en mer) et au LNHE (qui l'a utilisé pour traiter les mesures effectuées en cuve à houle directionnelle).

Mes travaux sur ce sujet ont par ailleurs fait l'objet de publications régulières dans des conférences internationales de premier plan :

- International Conference on Coastal Engineering (ICCE'1992) [AC01]
- International Symposium on Wave Measurement and Analysis (WAVES'1993) [AC02]
- International Conference on Coastal Engineering (ICCE'1994) [AC06]
- International Offshore and Polar Engineering. Conference (ISOPE'1999) [AC20]

et d'une publication dans la revue « Phares et Balises » du CETMEF (1996) [AJ01]

Par ailleurs, j'ai participé au Groupe de Travail international initié par l'AIRH sur cette thématique entre 1994 et 1997. J'ai joué un rôle actif au sein de ce groupe de travail international en participant à tous les exercices d'inter-comparaison des méthodes d'analyse de houle multidirectionnelle, aux réflexions d'ordres théoriques et pratiques pour classifier et améliorer les différentes approches d'analyse et à l'écriture de plusieurs articles de synthèse, qui ont été présentés à l'occasion d'un séminaire spécifique sur les vagues multidirectionnelles organisé à l'occasion du congrès de l'AIRH 1997. J'ai en particulier coordonné comme auteur principal (avec Hemming Schäffer (DHI, DK) et Peter Frigaard (Université d'Aalborg, DK)) la rédaction d'un article de synthèse sur la classification des différentes approches et méthodes d'analyse directionnelle [LI04] (reproduit en Annexe 2). Cet article fait référence sur ce sujet et est souvent cité depuis dans des publications scientifiques se référant à l'état de l'art sur les méthodes d'analyse directionnelle. Outre cet article, je suis également co-auteur de 3 autres articles collectifs issus de ce Groupe de Travail, présentés à l'occasion de ce séminaire et publiés dans les actes comme papiers de revue de l'état de l'art et de synthèse [LI01] [LI02] [LI03].

PADINES a été mis en œuvre dans le cadre du projet CLAROM-HOUDIM pour analyser des mesures de la bouée BEATRICE. Il a été et est utilisé également dans plusieurs projets de recherche lors de campagnes de mesures en mer : collaborations entre le CETMEF et Danièle Hauser (CETP, Vélizy) et Hélène Dupuis (DGO, Bordeaux) pour l'analyse de données de bouées DATAWELL et TRIAXYS. Une publication est d'ailleurs en cours de préparation pour cette dernière application.

B.2.3.6. Traitement de mesures de bouées directionnelles de houle

A titre d'illustration de nos travaux, nous reprenons des traitements de mesure de bouée présentés dans [AC20]. Les mesures analysées ont été collectées par le CETMEF sur deux des bouées directionnelles de son réseau de surveillance. Il s'agit dans les deux cas de bouées Datawell Waverider (cf. Figure 7). Ces bouées étaient mouillées sur deux sites aux caractéristiques assez distinctes :

- **Les Minquiers** : il s'agit d'un plateau situé en Manche dans la partie sud du Golfe Normand-Breton, en partie exposé aux houles de l'Atlantique, mais également à des mers de vent locales levées en Manche. Profondeur 38 m CM.
- **L'Ile d'Yeu** : site de mesure situé sur la façade Atlantique (en Vendée) exposé aux houles océaniques dans le secteur Sud-Ouest à Nord-Ouest. Profondeur 32 m CM.



Figure 7 : Bouée directionnelle DATAWELL WAVERIDER

Cette bouée directionnelle mesure trois déplacements : le pilonnement de la bouée, le déplacement horizontal dans le sens Ouest-Est et le déplacement horizontal dans le sens Sud-Nord.

Dans les situations considérées, les conditions d'états de mer sont assez fortes puisque l'on a entre 3.5 et 4.0 m de hauteur significative spectrale. Une telle valeur de hauteur est assez rare pour le Plateau des Minquiers et caractéristique de conditions de tempête.

Pour le Plateau des Minquiers, nous considérons des mesures réalisées le 12 novembre 1998 à deux instants différents (12:13 et 16:15 TU). Les spectres omnidirectionnels de variance pour ces deux dates sont représentés sur le graphe du haut de la Figure 8. Dans les deux cas, l'étalement spectral de l'énergie est important, avec des périodes de pic comprises entre 8 et 10 s. A 12:13 TU, la hauteur significative spectrale est $H_{m0} = 3.47$ m pour une période moyenne $T_{02} = 7.5$ s. On distingue nettement deux pics fréquentiels : une houle océanique à la fréquence 0.07 Hz environ (période 14.3 s) et une mer du vent à 0.125 Hz (période 8 s). Quatre heures plus tard, à 16:15 TU, la composante « houle océanique » a perdu une grande partie de son intensité, alors que dans le même temps la mer du vent s'est développée et sa fréquence de pic a diminué. Nous avons donc ici une situation océano-météorologique de transition entre deux états assez distincts.

Pour l'île d'Yeu, les mesures ont été effectuées le 29 Novembre 1998 à 20:44 et 21:44 TU. Les spectres omnidirectionnels de variance de la Figure 9 indiquent, pour ces deux instants, une situation nettement dominée par une houle océanique. Les pics des spectres sont étroits et élevés (NB : l'échelle verticale est différente de celle des spectres du Plateau des Minquiers). La période de pic est longue $T_p = 17.9$ s (fréquence de 0.056 Hz). La hauteur significative spectrale atteint 3.86 m à 20:44 TU. Une heure plus tard, à 21:44 TU, le pic de houle océanique est plus faible, mais toujours dominant, tandis que l'on distingue un second pic qui commence à se développer à une fréquence de l'ordre de 0.1 Hz (période 10 s). En conséquence, la période moyenne T_{02} diminue de 11.3 s à 9.7 s entre les deux instants, alors que la période de pic (dominée par la houle océanique) reste constante dans le même temps.

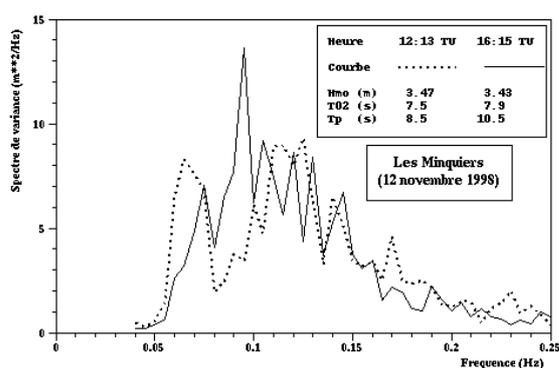


Figure 8 : Spectres omnidirectionnels de variance analysés par PADINES le 12 novembre 1998 à 12:13 TU et 16:15 TU sur le site des Minquiers (bouée directionnelle DATAWELL)

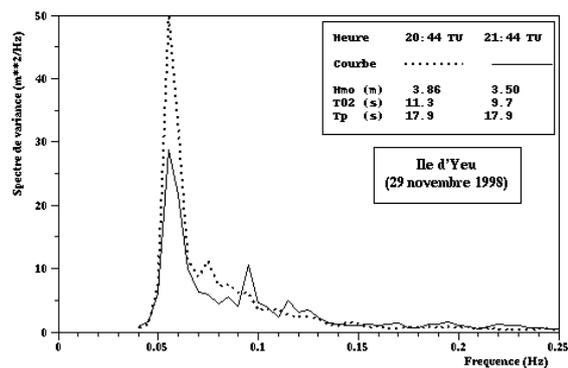


Figure 9 : Spectres omnidirectionnels de variance analysés par PADINES le 29 novembre 1998 à 20:44 TU et 21:44 TU sur le site de l'île d'Yeu (bouée directionnelle DATAWELL)

Pour la bouée des Minquiers, Les spectres directionnels de variance analysés par six méthodes (WFS, MLM, IMLM2, MEM1, MEM2 et BDM) sont tracés sur la Figure 10. A 12:13 TU (colonne de gauche de la Figure 10), la nature bimodale (en fréquences) du spectre de houle apparaît clairement, mais les composantes « houle » et « mer du vent » ont approximativement la même direction de provenance de 295°N (WNW). Les deux pics directionnels ont approximativement la même hauteur et la même largeur angulaire. A 16:15 TU (colonne de droite de la Figure 10), le spectre est plus irrégulier, mais les vagues proviennent toutes du secteur angulaire 300°N à 310°N. Par rapport au cas précédent, mesuré 4 heures plus tôt, la composante de houle possède la même direction, mais un pic de plus faible hauteur. La composante « mer du vent », en phase de croissance, apparaît plus nettement à une fréquence de 0.10 Hz et avec une direction de provenance plus proche de Nord-Ouest. Pour les deux instants, on observe à nouveau que les méthodes IMLM2, MEM2 et BDM donnent des résultats très proches entre eux. La méthode WFS donne toujours des spectres trop étalés en directions, tandis qu'au contraire la méthode MEM1 produit des spectres avec des pics trop pointus et trop étroits. Les résultats de la méthode MLM sont de qualité intermédiaires.

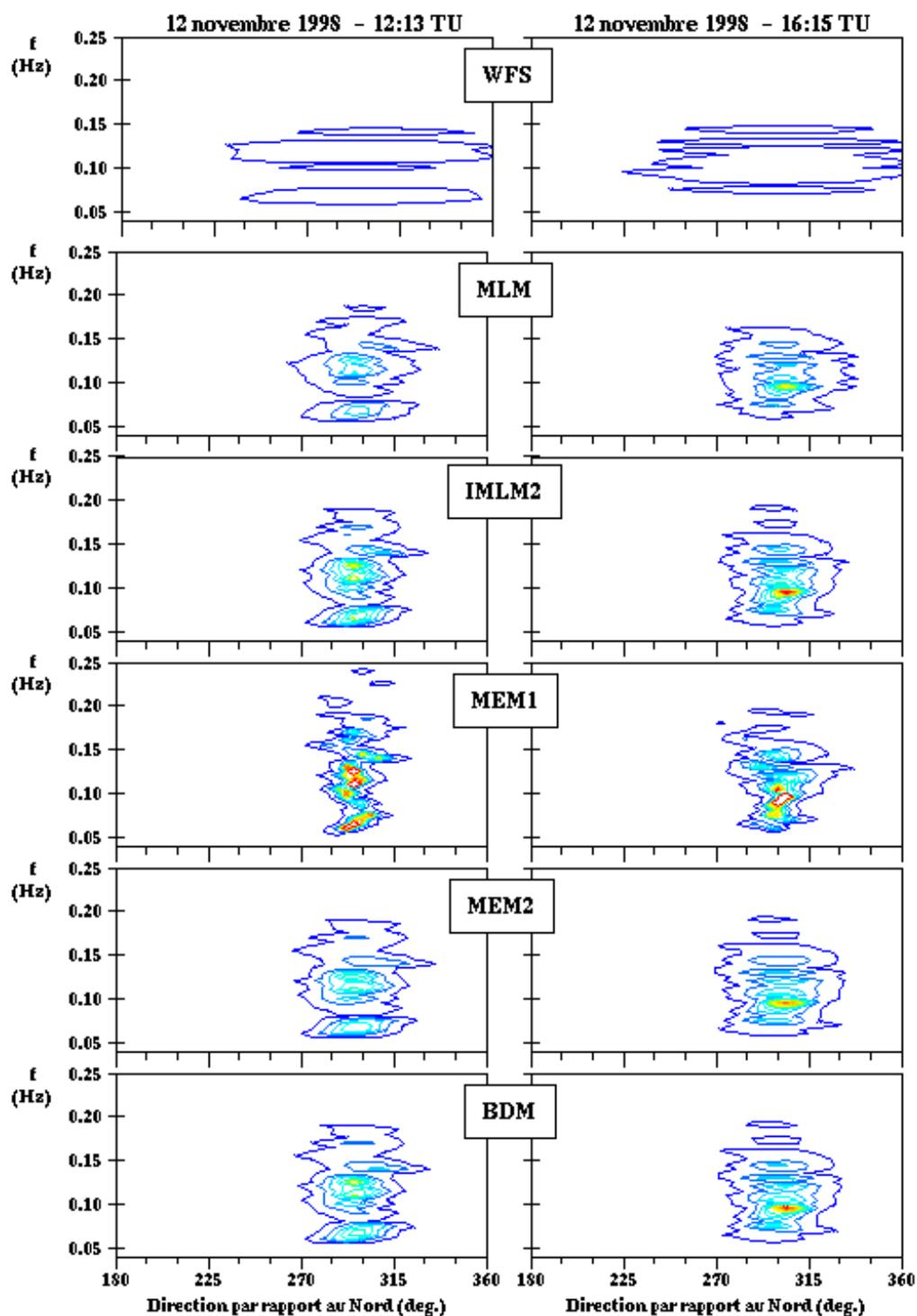


Figure 10 : Spectres directionnels de variance analysés par PADINES (6 méthodes) le 12 novembre 1998 à 12:13 TU et 16:15 TU sur le site des Minquiers (bouée DATAWELL) (lignes isovaleurs de 2 à 42 $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$ avec un pas de 4 $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$)

Pour l'île d'Yeu, les spectres directionnels de variance analysés par les mêmes méthodes sont tracés sur la Figure 11. A 20:44 TU (colonne de gauche de la Figure 11), le spectre est essentiellement composé d'un pic de houle longue, très étroit et à une fréquence très basse de 0.056 Hz. L'énergie de la houle est concentrée autour de la direction de provenance 268°N (vagues venant de l'Ouest) avec un faible étalement angulaire. Cette situation est caractéristique des houles provenant de l'Océan Atlantique. A 21:44 TU (colonne de droite de la Figure 11), la composante de houle océanique domine

toujours le spectre. Elle a cependant légèrement tourné (de 10° environ) vers de Sud-Sud-Ouest. Un pic à la fréquence 0.10 Hz avec une provenance Ouest est en train de se développer et de croître sous l'action d'un vent d'Ouest. En comparant entre eux les estimateurs des différentes méthodes, on parvient aux mêmes conclusions que pour la bouée des Minquiers : à nouveau, ce sont les méthodes IMLM2, MEM2 et BDM qui donnent les estimations les plus convergentes.

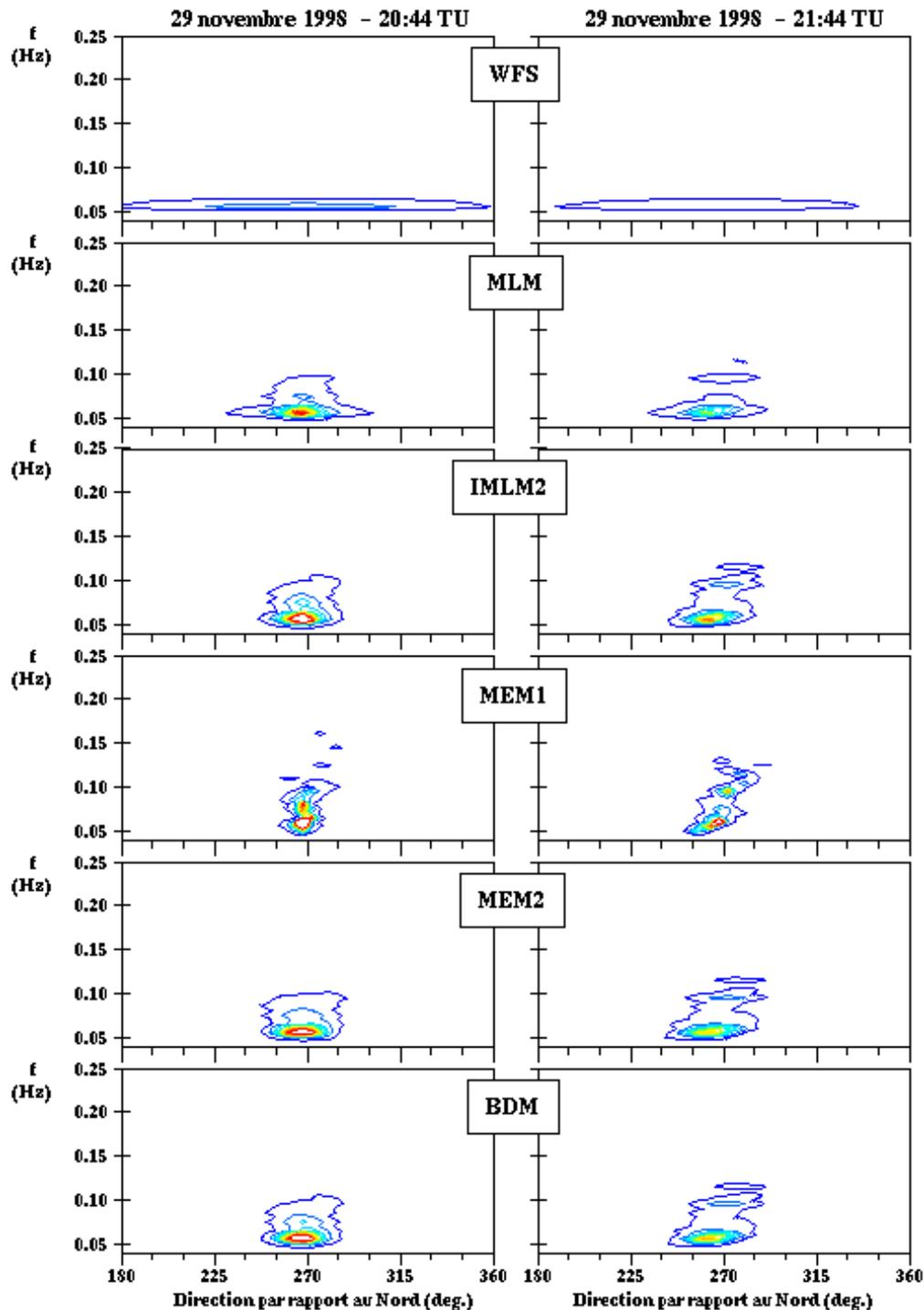


Figure 11 : Spectres directionnels de variance analysés par PADINES (6 méthodes) le 29 novembre 1998 à 20:44 TU et 21:44 TU sur le site de l'île d'Yeu (bouée DATAWELL) (lignes isovaleurs de 5 à 105 $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$ avec un pas de 10 $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$)

B.2.3.7. Conclusions générales des analyses directionnelles

Comme indiqué dans l'exemple précédente et observé au cours de nos différents travaux, les trois méthodes d'analyse directionnelle IMLM2, MEM2 et BDM donnent chaque fois des résultats très concordants et similaires entre eux. Ces trois méthodes constituent une sorte de « référentiel » dont les résultats (communs) peuvent être considérés comme ayant un bon niveau de qualité et de précision.

Ces méthodes ne sont cependant pas équivalentes en termes de temps de calcul. Sur ces analyses, nous avons en effet mesuré les ratios suivants pour les temps de calcul :

$$\frac{T_{\text{CPU}}(\text{MEM2})}{T_{\text{CPU}}(\text{IMLM2})} = 10 \quad \text{et} \quad \frac{T_{\text{CPU}}(\text{BDM})}{T_{\text{CPU}}(\text{IMLM2})} = 400$$

La méthode MEM2 est environ 10 fois plus lente que la méthode IMLM2. Quant à la méthode bayésienne BDM, plus lente que MEM2 d'un facteur 40 environ et que IMLM2 d'un facteur 400 environ, elle n'est *a priori* pas une solution intéressante pour les systèmes ponctuels à 3 composantes.

La méthode de Fourier pondérée (WFS) produit toujours des spectres avec des étalements directionnels très importants, même pour les cas de houle océanique à l'île d'Yeu. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cette méthode.

Au contraire, la méthode MEM1 produit des pics qui sont à l'évidence trop étroits et trop hauts, ce qui rend son interprétation très délicate. Nous déconseillons également cette méthode pour les applications pratiques.

La méthode MLM produit des estimateurs qui présentent les mêmes caractéristiques générales que les estimateurs de référence IMLM2, MEM2 ou BDM, avec cependant des pics plus aplatis et plus étalés en directions. Cette méthode est cependant assez rapide (10 fois plus rapide que la méthode IMLM2, et donc 100 fois plus rapide que MEM2), ce qui lui confère en définitive un certain intérêt dans la pratique. Si elle est utilisée, il convient cependant de garder en mémoire sa tendance « naturelle » à lisser les pics en directions.

En définitive, et de façon concordante avec les conclusions de l'analyse des signaux mesurés en laboratoire, ce sont bien les méthodes IMLM2 et MEM2 qui sont les plus intéressantes et adaptées pour les capteurs ponctuels à trois composantes. En ce qui nous concerne, nous avons tendance à privilégier pour les capteurs ponctuels la méthode de maximum d'entropie version 2 (MEM2), qui donne des résultats légèrement meilleurs sur les cas où on dispose de la solution de référence [RR03] [AC01] [AC02] et qui évite de mettre en œuvre un algorithme itératif (cas de IML2), dont le critère d'arrêt peut parfois s'avérer une limitation. La méthode MEM2 est d'ailleurs la solution privilégiée depuis une dizaine d'années par la plupart des instituts et laboratoires effectuant des analyses directionnelles de façon industrielle (voir par exemple Nwogu *et al.*, 1987 ; Kim *et al.*, 1993). Cela est également ressorti des exercices d'intercomparaisons sur des simulations numériques d'états de mer et des mesures en laboratoire menés dans le cadre du Groupe de travail de l'AIRH sur ce sujet [LI02] [LI03].

Par contre, pour le cas des réseaux de capteurs de surface libre, comportant au moins 5 ou 6 capteurs, nous préconisons plutôt la méthode bayésienne BDM, dont le pouvoir de résolution supérieur est mieux exploité et valorisé lorsqu'on dispose de plus d'information en entrée, ou à défaut la méthode de maximum d'entropie MEM2 [AC02] [AC06].

B.2.4. Caractérisation directionnelle des états de mer

B.2.4.1. Introduction – Problématique – Objectifs des recherches

Dans le paragraphe B.2.3, nous avons traité la question de l'estimation du spectre directionnel de houle $F(f, \theta)$, et présenté les travaux que nous avons menés pour accéder à la répartition directionnelle de l'énergie des vagues suivant les directions de provenance. En complément à cette analyse « détaillée », il est important pour les études appliquées, les projets d'ingénierie et la constitution de bases de données océano-météorologiques de disposer de paramètres synthétiques permettant de caractériser la directionnalité des états de mer. Parmi les questions que l'on souhaite traiter dans ce domaine, on peut mentionner de façon non-exhaustive les points suivants:

- détermination de la direction moyenne de provenance de l'état de mer,
- calcul de l'étalement directionnel de l'énergie des vagues autour de cette direction moyenne,
- détection des états de mer bimodaux, c'est à dire présentant deux directions principales de provenance simultanément (correspondant à des mer croisées).

Le but de tels paramètres est de pouvoir synthétiser et caractériser un état de mer mesuré à l'aide de quelques valeurs représentatives. Ces paramètres directionnels sont destinés à être pris en compte par les utilisateurs de bases de mesures de houle au même titre que le sont traditionnellement par exemple la hauteur significative de houle, la période moyenne ou de pic, etc. Ils doivent également permettre de faciliter l'exploitation et l'interprétation des mesures directionnelles, ainsi que leur stockage et leur archivage informatique. En effet, d'une part il est impossible d'archiver tous les spectres directionnels dans les bases de données pour des questions de volume de données, et d'autre part ces spectres directionnels doivent être complétés par des grandeurs synthétiques plus « parlantes » pour une première évaluation des conditions d'états de mer.

Nos travaux sur ce sujet s'inscrivent dans le cadre d'un programme de recherche pluriannuel mené en collaboration avec le CETMEF au sein de la Convention Biparti, et ont été réalisés pour partie dans le cadre du projet de recherche du CLAROM-HOUDIM. Ils ont été réalisés en collaboration avec Jean-Claude Besnard, ingénieur-chercheur du LNHE, que j'ai encadré sur ce sujet.

Ces paramètres directionnels ont vocation à compléter la base de données de houle CANDHIS, que développe et maintient le CETMEF (L'Her *et al.*, 1999), alimentée par le réseau des bouées houlographes disposées le long des côtes de France (métropole et outre-mer).

B.2.4.2. Paramètres directionnels des états de mer

Au cours de nos travaux sur ce sujet, nous avons recensé 10 paramètres directionnels spectraux (c'est à dire définis à chaque fréquence d'analyse) et calculables à partir des premiers coefficients de Fourier de la Fonction de Répartition Angulaire (FRA). Nous n'en donnons pas les définitions ici (voir [RR17] [RR37] [AC03] pour les détails) :

1. Direction moyenne (« mean direction »)..... θ_m
2. Direction principale (« principal direction »)..... θ_p
3. Paramètre d'unidirectionnalité (« long-crestedness parameter »)..... Γ
4. Angle d'étalement moyen (« mean spreading angle »)..... θ_κ
5. Largeur directionnelle (« directional width »)..... σ
6. Coefficient d'asymétrie (« skewness »)..... γ
7. Coefficient d'aplatissement (« kurtosis »)..... δ
8. Ecart angulaire entre θ_p et θ_m :..... $\Delta\theta = |\theta_m - \theta_p|$
9. Ratio des amplitudes des premiers harmoniques de la FRA :..... r
10. Paramètre de directionnalité..... β

D'une façon globale, les paramètres θ_m et θ_p peuvent être utilisés pour déterminer les directions privilégiées de provenance (ou de propagation) de l'état de mer. Les paramètres θ_K , Γ et σ fournissent des informations sur la répartition angulaire de l'énergie autour des directions privilégiées. Les paramètres γ , δ , r , $\Delta\theta$ et β sont des paramètres de forme de la FRA, qui servent à déterminer si l'état de mer est unimodal ou bimodal (cf. § B.2.4.3).

Dans le but de caractériser de façon plus globale l'état de mer, il est souhaitable de disposer d'informations directionnelles « intégrées » sur les fréquences, et non plus seulement données en fonction de la fréquence comme indiqué au paragraphe précédent. Chacun de ces paramètres directionnels peut en effet être calculé de façon synthétique sur l'ensemble du spectre. Pour cela, deux approches ont été étudiées, programmées et testées au cours de nos travaux

Méthode 1 : calculer les paramètres et critères directionnels à chaque fréquence, puis en effectuer une moyenne fréquentielle, pondérée par le spectre omnidirectionnel de variance $E(f)$ à la puissance n .

Méthode 2 : effectuer une moyenne fréquentielle (pondérée par le spectre omnidirectionnel de variance $E(f)$ à la puissance n) des coefficients de Fourier de la FRA, puis calculer les paramètres directionnels à partir de ces valeurs moyennes en utilisant les définitions des paramètres spectraux.

Les deux méthodes de calcul ont été programmées dans **PADINES**. Elles ont fait l'objet de nombreux tests, à la fois sur des simulations numériques d'états de mer [RR17] [RR37] [AC03] et des mesures de bouées [AC20].

Le calcul des paramètres directionnels listés ci-avant a fait l'objet du développement du logiciel de recherche **PARDIR**, qui a ensuite été intégré au logiciel **PADINES**. Nous avons réalisé de nombreux tests d'évaluation basés sur des simulations numériques de densités spectrale croisées et de coefficients de Fourier de la FRA, à l'aide du module **COQUAD** [RR10], puis sur des simulations numériques de séries temporelles d'états de mer, comportant éventuellement un niveau de bruit variable (ajouté aux simulations numériques), à l'aide du module **DIRSEA** [RR17]. De nombreuses formes de FRA ont été considérées, unimodales ou bimodales, symétriques ou non, etc. de façon à évaluer très précisément les performances des paramètres directionnels. Il n'est pas possible de rendre compte ici de toutes les simulations et tests réalisés. Le lecteur est invité à consulter les rapports de recherche [RR10] et [RR17] pour plus de détails sur les travaux menés.

Les principales conclusions que nous en avons tirées peuvent être résumées comme suit :

- **Direction de l'état de mer :** la direction moyenne (« mean direction ») θ_m est à privilégier, car elle correspond à la direction autour de laquelle est centrée la plus grande partie de l'énergie. Elle apparaît assez stable en fonction du niveau de bruit. Ses oscillations par rapport à sa valeur moyenne augmentent en amplitude avec le niveau de bruit, mais cette valeur moyenne reste consistante avec la valeur théorique simulée. La direction principale θ_p , définie entre 0 et 180°, est assez difficile à interpréter si on la considère séparément et présente peu d'intérêt en elle-même.
- **Étalement directionnel de l'état de mer :** l'angle d'étalement moyen θ_K (« mean spreading angle ») et la largeur directionnelle σ (« directional width ») affichent en général des comportements et variations similaires. Les estimations de ces deux paramètres s'éloignent assez nettement de la valeur théorique pour les niveaux de bruit importants. Le paramètre d'unidirectionnalité Γ (« long-crestedness parameter ») est plus stable en fonction du niveau de bruit, mais il est plus délicat à interpréter et nous semble moins pertinent pour caractériser l'étalement directionnel de l'énergie.

B.2.4.3. Critères directionnels de bimodalité des états de mer

Une question importante, sur laquelle nous avons beaucoup travaillé, concerne la détection du caractère bimodal en direction des états de mer, c'est à dire le cas de spectres multi-pics (cas de mers croisées) avec deux directions dominantes de provenance. En effet, dans ce cas, les paramètres de direction moyenne ou principale, ainsi que les paramètres d'étalement directionnel perdent beaucoup de leur signification, bien qu'ils soient toujours aisément calculables. Cela pose la question du crédit qu'on peut leur accorder : quelle pertinence possède la direction moyenne estimée pour un état de mer composé de deux systèmes de vagues de directions différentes ? Et la même question se pose pour l'étalement directionnel.

D'où la nécessité de pouvoir détecter les cas bimodaux (2 pics directionnels) *a minima* pour être prévenu qu'il faudra considérer les paramètres directionnels ci-dessus avec beaucoup de prudence sur ces cas et sans doute procéder à une analyse détaillée du spectre directionnel (à l'aide d'une des méthodes présentées au § B.2.3). Pour pouvoir procéder à cette détection des cas bimodaux, il est nécessaire de disposer de critères directionnels.

Les trois critères directionnels existants, identifiés lors de nos premières investigations [RR10] et appelés ci-après critères n°1, n°2 et n°4, sont en général basés sur l'utilisation combinée de deux paramètres directionnels choisis parmi ceux listés au § B.2.4.2, sauf le critère n°4, qui ne fait appel qu'à un seul paramètre. Au cours de nos recherches, nous avons proposé et développé un nouveau critère original, appelé critère n°3 ci-après [RR10] [AC03].

Pour les critères n°1, 2 et 3, on établit une partition en domaines caractéristiques du plan défini par le couple de paramètres considéré. La position d'un point représentatif d'un état de mer dans ce plan permet de connaître le caractère unimodal ou bimodal de cet état de mer.

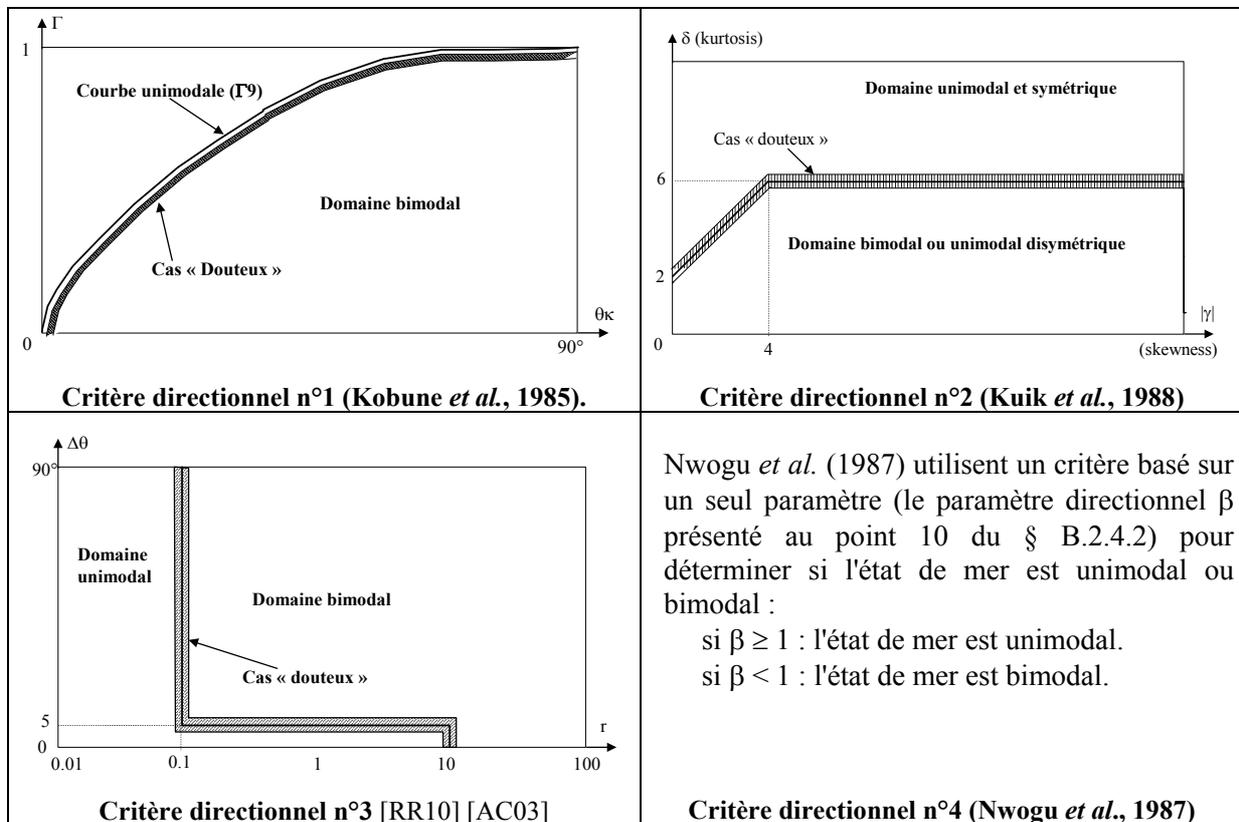


Figure 12 : Schéma de définitions des quatre critères directionnels considérés

Cette interprétation ne pose pas de problèmes lorsque le point est franchement à l'intérieur du domaine considéré, mais il arrive souvent que les points soient situés près des limites de ces domaines, auxquels cas il convient d'être prudent dans l'interprétation. Dans le but d'automatiser la procédure d'analyse, nous avons défini trois cas de figure [RR17] :

- cas franchement unimodal (une seule direction privilégiée de propagation),
- cas franchement bimodal (deux directions privilégiées de propagation),
- cas douteux (si on ne parvient pas à trancher entre les deux précédents).

Les critères directionnels et les limites numériques correspondant à ce découpage sont présentés schématiquement sur la Figure 12.

Le calcul des paramètres directionnels listés ci-avant a également été implanté dans le logiciel de recherche **PARDIR**, qui a ensuite été intégré au logiciel **PADINES**. Nous avons testé ces critères sur les mêmes cas-tests que ceux utilisés pour les paramètres directionnels, en examinant de très nombreux cas de figure (se reporter aux rapports de recherche [RR10] et [RR17] pour plus de détails).

Les principales conclusions que nous en avons tirées peuvent être résumées comme suit :

- Parmi les quatre critères testés, le critère n°4 peut être éliminé *a priori* car il ne permet pas de séparer les cas unimodaux des cas bimodaux dans le cas général. Les trois autres critères apparaissent plus ou moins intéressants selon le type d'état de mer.
- Le critère 1, basé sur l'utilisation combinée de l'angle d'étalement moyen θ_K (« mean spreading angle ») et du paramètre d'unidirectionalité Γ (« long-crestedness parameter »), est un critère globalement correct, mais le lieu des états de mer unimodaux est réduit à une courbe, ce qui rend son interprétation automatique plus délicate.
- Le critère 2, basé sur l'utilisation combinée du coefficient d'asymétrie γ (« skewness ») et du coefficient d'aplatissement δ (« kurtosis »), fournit de bons résultats sur les cas testés, mais il convient de rappeler que ce critère ne permet pas de séparer les états de mer unimodaux dissymétriques des états de mer bimodaux.
- Le critère 3, que nous avons introduit, est basé sur l'utilisation combinée du rapport r entre les amplitudes de deux premiers harmoniques de la fonction de répartition angulaire et sur une mesure $\Delta\theta$ de l'écart angulaire entre les directions de ces deux harmoniques. Il se révèle tout à fait intéressant sur les cas testés et apparaît assez stable en fonction du niveau de bruit. C'est en définitive celui qui apparaît comme le plus général, explicite et robuste parmi les 4 critères considérés et étudiés.

B.2.4.4. Résultats sur les paramètres et critères directionnels

Nous présentons dans ce paragraphe un exemple de traitement de données issues de la bouée BEATRICE située au large de Ouessant, extrait de nos travaux sur ce sujet réalisés dans le cadre du projet de recherche CLAROM-HOUDIM (1997-2000).

La bouée BEATRICE est située au large de l'île d'Ouessant (position : 48°53,55'N en latitude et 02°26,58'W en longitude) par des fonds de 110 m CM. Elle est équipée de plusieurs capteurs océano-météorologiques, dont un mesurant le pilonnement, ainsi que le roulis et le tangage de la bouée (c'est à dire l'élévation de la surface libre et les deux pentes de la surface libre suivant deux axes orthogonaux dans le plan horizontal). Nous considérons ici un enregistrement effectué le 01/12/1988 à 02:00 TU, mis à notre disposition par IFREMER dans le cadre du projet CLAROM-HOUDIM afin de comparer différentes sources de données océano-météorologiques.

Pour cet état de mer, la hauteur significative spectrale analysée par **PADINES** vaut $H_{mo} = 3.9$ m. La période de pic est de $T_p = 13.3$ s et la période moyenne vaut $T_{02} = 10$ s : nous sommes donc en présence d'une houle océanique relativement intense.

Les résultats obtenus avec **PADINES** pour le spectre de variance et quelques paramètres directionnels spectraux sont comparés sur la Figure 13 aux résultats de traitements effectués en parallèle par

IFREMER sur ces données avec ses propres programmes. On constate en premier lieu sur le graphe du haut que le spectre de variance possède une forme classique avec un seul pic principal à la fréquence $f_p = 0.075$ Hz. Ce spectre se compare très bien avec celui analysé par IFREMER, le nôtre étant légèrement plus régulier du fait des options retenues lors de l'analyse spectrale avec **PADINES**.

Sur le graphe du milieu, on constate que la direction moyenne de provenance θ_m analysée par **PADINES** est relativement constante sur l'intervalle de fréquences considéré, entre 250°N et 260°N (c'est à dire entre Ouest-Sud-Ouest et Ouest). Cette direction est très voisine de celle analysée par IFREMER, mais elle est à nouveau plus régulière. Nous avons également représenté sur le même graphe la direction principale θ_p , en retenant ici la valeur qui est la plus proche de θ_m .

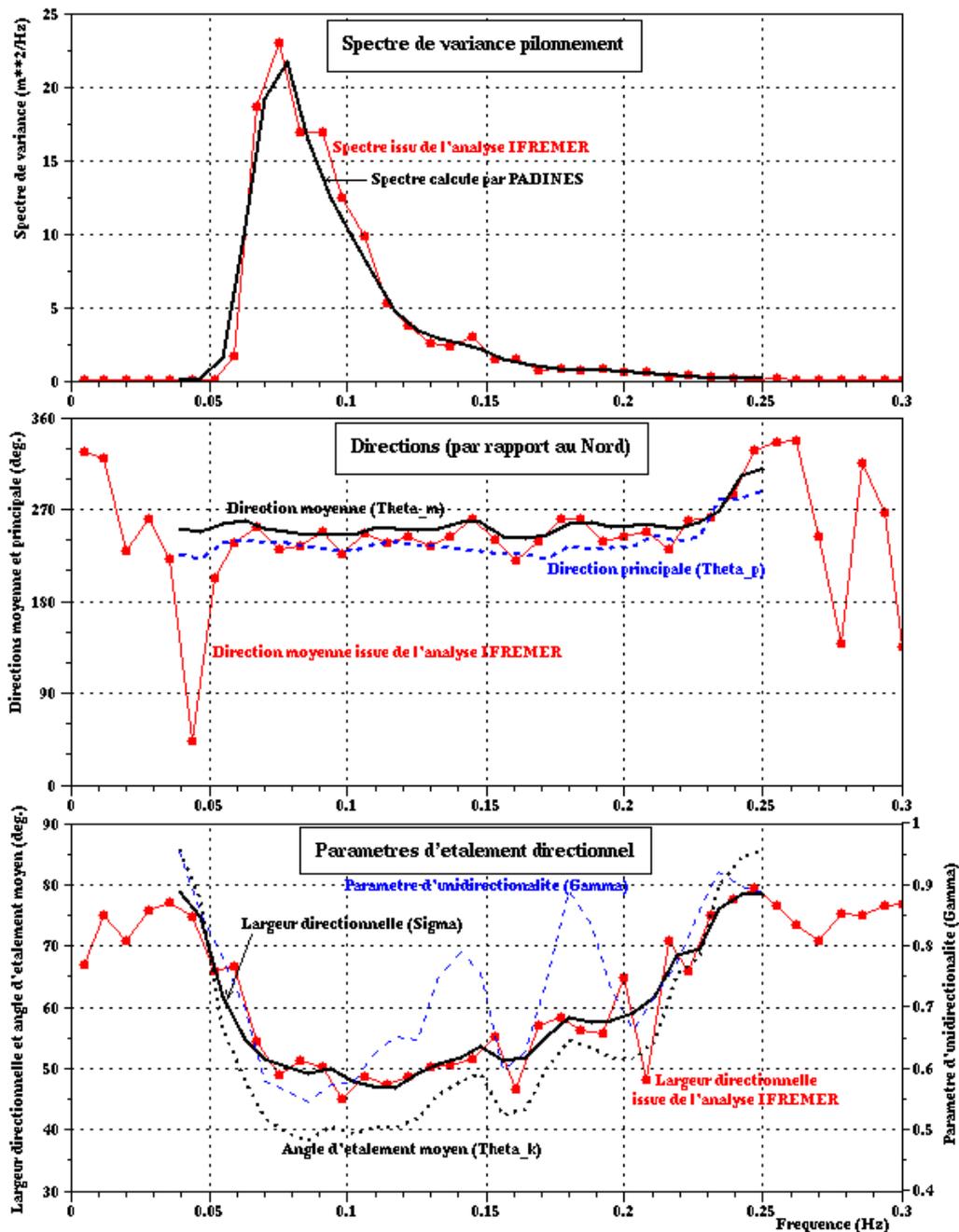


Figure 13 : Spectre de variance et paramètres directionnels spectraux pour les mesures de la bouée BEATRICE (pilonnement-roulis-tangage) à Ouessant le 01/12/1988 à 02:00 TU. Les résultats obtenus par IFREMER sont tracés en rouge pour comparaison.

Pour ce qui concerne les paramètres d'étalement directionnel (graphe du bas), on observe une grande similitude de comportement entre la largeur directionnelle σ et l'angle d'étalement moyen θ_k . De plus, les variations de la largeur directionnelle issue de **PADINES** sont en très bon accord avec les résultats obtenus par IFREMER, avec moins de variabilité. On remarque en particulier (ce qui est un résultat connu) que l'étalement directionnel est plus faible dans la région du pic du spectre, et qu'il augmente vers les hautes fréquences et les basses fréquences). Le comportement du paramètre d'unidirectionalité Γ est assez voisin de celui de σ et θ_k , mais avec des irrégularités nettement plus marquées pour les fréquences supérieures à la fréquence de pic, ce qui rend son interprétation plus délicate dans la pratique.

Appliqués à l'ensemble du spectre, les trois premiers critères directionnels indiquent un état de mer bimodal ; seul le quatrième critère donne un état de mer unimodal ($\beta > 1$). A titre de vérification, les spectres directionnels de variance analysés par **PADINES** sur cet enregistrement sont tracés sur la Figure 14 pour les 5 méthodes d'analyse directionnelle WFS, MLM, IMLM2, MEM1 et MEM2. Sur ces spectres, le caractère bimodal n'est pas très nettement marqué : le pic dominant est clairement celui de provenance Ouest-Nord-Ouest, mais on distingue nettement une seconde composante de provenance Nord pour les méthodes MLM, MEM1 et IMLM2, et Nord-Nord-Est pour la méthode MEM2. C'est ce qui explique en particulier les valeurs relativement élevées des paramètres d'étalement directionnel mentionnés plus haut, et justifie aussi pourquoi les critères directionnels moyennés sur le spectre donnent un état de mer bimodal sur ce cas.

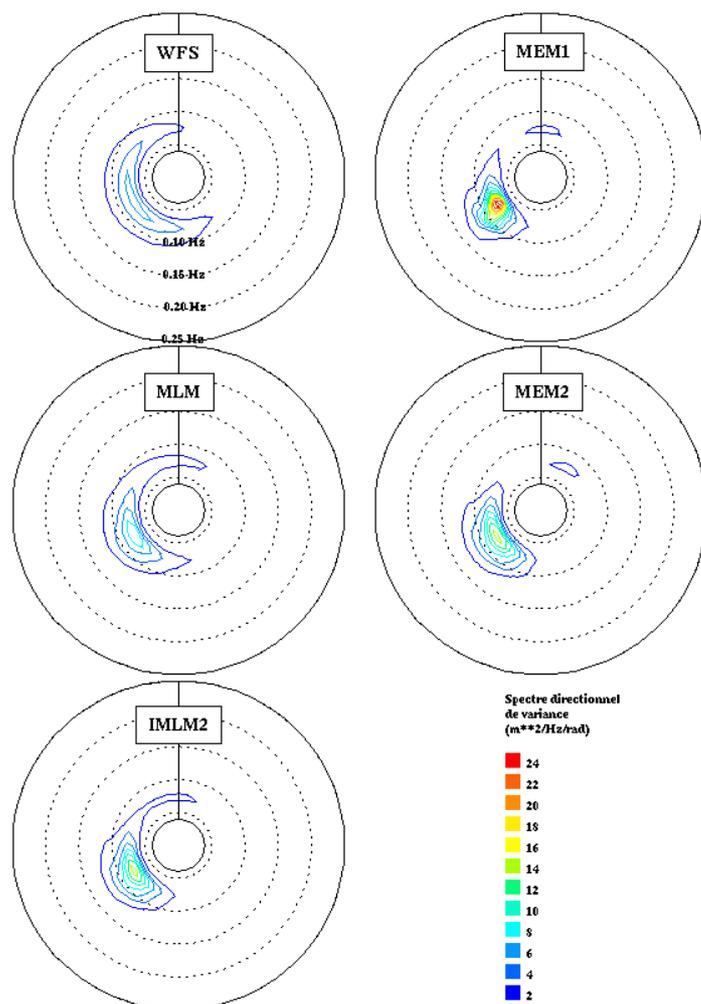


Figure 14 : Spectres directionnels de variance analysés par **PADINES** pour les mesures de la bouée BEATRICE (pilonnement-roulis-tangage) à Ouessant le 01/12/1988 à 02:00 TU.

B.2.4.5. Vue d'ensemble et retombées de nos travaux

Nous avons travaillé sur la caractérisation directionnelle des états de mer principalement entre 1994 et 1999, avec l'aide de Jean-Claude Besnard, ingénieur-chercheur du LNHE (que j'encadrais sur cette thématique), dans le cadre de programmes d'études successifs de la Convention Biparti avec le CETMEF (voir les rapports de recherches [RR10] (1994), [RR17] (1995) et [RR37] (1999)), et du projet de recherche CLAROM-HOUDIM.

Nos travaux sur ce sujet ont fait l'objet de publications dans des conférences internationales de premier plan :

- Int. Symposium « Waves : physical and numerical modelling » (WAVES'1994) [AC03]
- International Offshore and Polar Engineering. Conference (ISOPE'1999) [AC20]

Le calcul de tous les paramètres et critères directionnels présentés dans cette partie a été implémenté dans des logiciels que nous avons développés entièrement, avec l'aide de Jean-Claude Besnard. Il s'agit du logiciel de recherche **PARDIR**, qui a ensuite été intégré dans la version industrielle du logiciel **PADINES**, utilisé au CETMEF pour alimenter la base d'états de mer CANDHIS (L'Her *et al.*, 1999). Comme pour l'analyse des spectres directionnels (cf. § B.2.3), les recherches et développements réalisés ont donc été capitalisés dans un produit industriel, et sont utilisés opérationnellement par d'autres instituts que le LNHE.

Au plan scientifique, il convient de souligner les deux points suivants :

1. nous avons réalisé une synthèse de l'état de l'art ayant permis de faire avec le CETMEF des choix argumentés pour la sélection de paramètres directionnels à archiver dans les bases de données opérationnelles (base CANDHIS notamment),
2. nous avons introduit un nouveau critère directionnel pour détecter les cas de spectres bimodaux (mers croisées), publié en 1994 [AC03] qui a fait école depuis et qui fait toujours référence. On peut citer à titre d'illustration la publication récente de Piscopia *et al.* (2004) qui proposent une autre méthode d'identification d'états de mer croisés, tout en indiquant, à la lumière des tests qu'ils ont réalisés :
 - a. pour les tests sur des spectres unimodaux (page 948) : « *The best performing one [method] is BBM [=« Besnard and Benoit Method » [AC03]] which is able to correctly identify unimodal spectra 89 times out of 100, irrespective to the noise level.* »
 - b. pour les tests sur des spectres bimodaux (page 949) : « *The best results are achieved by BBM but all the methods exhibit a similar proficiency.* »
 - c. et en conclusion (page 960) : « *Actually, BBM is the best one [method] having an identification percentage equal to 91% whilst CSIM [la méthode proposée par les auteurs du papier] has the identification percentage equal to 87%.* ».

Cette reconnaissance externe permet d'apporter du crédit à nos recherches et notamment au nouveau critère directionnel (critère n°3) que nous avons introduit et optimisé.

B.3. Modélisation spectrale des états de mer et interactions houle-marée-courants-surcotes

Nous présentons dans cette partie les travaux que nous avons menés sur la modélisations des conditions océano-météorologiques, et notamment des états de mer, des surcotes-décotes et des marées. En particulier, la modélisation des états de mer à l'aide d'une approche spectrale constitue le sujet sur lequel nous avons le plus travaillé et publié. Cet axe est développé dans le § B.3.1. Au § B.3.1.4 nous abordons la modélisation des interactions entre les états de mer, les marées et les surcotes-décotes, notamment via les travaux du projet européen ECAWOM. Enfin, le § B.3.3 présente un projet majeur en cours visant le développement d'un atlas numérique d'états de mer par simulation sur une période 25 ans.

B.3.1. Modélisation spectrale des états de mer – Code TOMAWAC

B.3.1.1. Introduction - Utilisation du code WAM

Les modèles spectraux d'états de mer ont initialement été développés pour le domaine océanique, puis étendus au domaine des mers continentales dans les années 1980 (SWAMP Group, 1985), avec comme étape marquante le développement du modèle **WAM** par un groupe de travail international (WAMDIG, 1988 ; Komen *et al.*, 1994). Les modélisations les plus récentes prennent en compte les effets de faible profondeur d'eau (déferlement et interactions non-linéaires entre triplets de fréquences). Ces aspects côtiers sont traités en détail dans le chapitre 0 de ce mémoire.

On utilise pour la modélisation spectrale des états de mer la **densité spectro-angulaire de variance** ou **spectre directionnel de variance**, introduite au § B.2.3.1. Cette fonction, notée $F(f, \theta)$, est exprimée habituellement en $m^2 \cdot Hz^1 \cdot rad^{-1}$. La relation qui lie le spectre directionnel de variance et l'élévation de surface libre s'écrit alors sous la forme pseudo-intégrale suivante :

$$\eta(x, y, t) = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} \sqrt{2F(f, \theta)} df d\theta \cos[k(x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta) - \omega t + \varphi]$$

Rappelons que dans cette écriture, les phases sont distribuées aléatoirement sur l'intervalle $[0 ; 2\pi]$ avec une densité de probabilité uniforme. L'amplitude de chaque composante élémentaire est quant à elle liée au spectre directionnel de variance par :

$$dA = \sqrt{2F(f, \theta)} df d\theta$$

Le spectre directionnel d'énergie $E(f, \theta)$ se déduit simplement du spectre directionnel de variance $F(f, \theta)$ par la relation :

$$E(f, \theta) = \rho g F(f, \theta)$$

Dans le cas général d'une houle se propageant dans un milieu non-permanent (courants et/ou niveaux marins variables en temps et en espace), la densité spectro-angulaire d'énergie (ou de variance) de la houle n'est pas conservée et il faut introduire une nouvelle quantité : la densité spectro-angulaire d'action d'onde de la houle, encore appelée spectre directionnel d'action d'onde des vagues. Cette quantité, notée N , est conservée (aux termes sources et puits près) même dans le cas où le milieu de propagation n'est ni homogène, ni permanent (Bretherton et Garret, 1969). Ce spectre d'action d'onde de la houle est relié au spectre directionnel de variance de la houle par la relation :

$$N = F/\sigma$$

où σ est la pulsation relative ou intrinsèque des vagues, c'est-à-dire la pulsation observée dans un repère se déplaçant à la vitesse du courant.

En 1991, nous avons abordé la modélisation spectrale des états de mer en intégrant le groupe de travail international WAM, piloté par Klaus Hasselmann. Cette immersion dans une communauté scientifique vivante et motivée nous a permis de nous former rapidement et de prendre en main le code **WAM**, qui résout l'équation d'évolution spatio-temporelle de la densité d'action des vagues. Nous avons installé le code **WAM** au LNHE en 1992 (deux versions successives, appelées cycle 3 et cycle 4) et l'avons porté sur notre supercalculateur CRAY de l'époque [RR02] [RR07]. Les premières simulations de tempête réelles ont été réalisées en 1993 pour les mois de janvier et février 1990 [RR11]. Ces résultats ont été présentés au congrès de l'AIRH en 1995 [AC09].

B.3.1.2. Genèse du développement du modèle d'états de mer TOMAWAC

En 1994, suite à des réflexions antérieures (Chaloin, 1989), nous avons proposé de développer un modèle d'états de mer au sein du système éléments finis **TELEMAC**. A l'époque il n'existait aucun modèle de ce type basé sur des maillages non-structurés, dont nous pressentions l'intérêt pour les applications côtières. Fin 1994, nous avons produit un dossier de spécifications pour un modèle qui exploiterait les possibilités de maillage et de résolution numérique offertes par le système TELEMAC et qui utiliserait la connaissance de la physique capitalisée dans le code **WAM** [RR16]. Le principe de ce développement a été validé et nous avons procédé au développement, en collaboration avec Frédéric Marcos, ingénieur-chercheur du LNHE, avec qui j'ai travaillé sur ce sujet de 1995 à 1998.

La version initiale du modèle de **TOMAWAC**, que nous avons développée en 1995, couvrait les domaines océaniques et mers continentales. En 1997-1998, dans le cadre des travaux de thèse de Françoise Becq-Girard, le domaine de validité du code a ensuite été étendu au domaine côtier (voir § B.4.2.2.2, B.4.3 et 0). Schématiquement, le domaine d'application des modèles de vagues peut être décomposé de la façon suivante, en fonction des processus physiques dominants :

1. **le domaine océanique**, caractérisé par une grande profondeur, c'est-à-dire par une profondeur relative d/L supérieure à 0.5. Les processus physiques dominants sont : la génération par le vent, la dissipation par moutonnement et les interactions non-linéaires entre quadruplets de fréquences. Ces termes physiques étaient présents dans la version 1 de **TOMAWAC**.
2. **les mers continentales et les profondeurs intermédiaires**, caractérisées par une profondeur relative d/L variant entre 0.05 et 0.5. En plus des phénomènes précédents, il est nécessaire de prendre en compte le frottement sur le fond, le shoaling (gonflement de la houle avec la remontée des fonds) et les effets de la réfraction par la bathymétrie et/ou les courants marins. Ces termes étaient également présents dans la version 1 de **TOMAWAC**.
3. **le domaine côtier**, qui comprend les zones de faibles profondeurs ou proches de la côte (profondeur relative d/L inférieure à 0.05). Pour ces zones de faibles profondeurs, il est nécessaire d'inclure les processus physiques de frottement sur le fond, déferlement bathymétrique, interactions non-linéaires entre triplets de fréquences, ... Par ailleurs, il peut s'avérer utile de prendre en compte les effets liés aux instationnarités du niveau marin et des courants (dues à la marée et/ou aux surcotes-décotes météorologiques). Ces termes ont été introduits à partir de la version 5.0 de **TOMAWAC**.
4. **le domaine portuaire**, également caractérisé par des faibles profondeurs relatives (d/L inférieure à 0.1), mais également par la présence de structures et d'ouvrages portuaires et côtiers. Les processus dominants sont alors : la réflexion sur les ouvrages, et la diffraction. A priori, les modèles spectraux (travaillant avec des phases moyennées) ne sont pas adaptés pour modéliser ces processus. Toutefois, des recherches et tests pour prendre en compte la diffraction (au moins ses effets principaux) ont été engagés récemment (cf. B.4.2.2.1).
5. **Les interactions houle-structures et le haut de plage**. Pour ces cas de très faibles profondeurs relatives ($d/L < 0.01$), ce sont les processus de run-up, de swash et de franchissements qui sont dominants, en plus du déferlement. Ces processus ne peuvent pas être modélisés par une approche

spectrale. En fait, la solution privilégiée, pour les domaines 4 et 5, consiste à utiliser des modèles déterministes ou « à résolution de phase », basés sur l'équation de Berkhoff (1972) ou sur les équations de Boussinesq ou de Serre par exemple (voir § B.4.2.1 pour un aperçu de nos travaux sur ce type de modèles).

Une des spécificités de nos recherches dans la domaine de la modélisation des états de mer avec le développement du code **TOMAWAC** a été l'introduction de maillages de types « éléments finis » pour mailler le domaine maritime et côtier. Lorsque nous avons développé les premières versions du code, cela n'avait jamais été réalisé à notre connaissance. En effet, pour les applications à grande échelle sur le domaine océanique et les mers continentales, on peut se satisfaire de maillage structurés, de type différences finies. Par contre, grâce à l'utilisation de grilles de type « éléments finis », un même maillage de calcul peut contenir des mailles dont le rapport entre les tailles des plus grandes et celles des plus petites peut atteindre voire dépasser 100. Ceci permet d'appliquer **TOMAWAC** à un domaine maritime caractérisé par des profondeurs relatives fortement variables et en particulier de représenter finement les zones côtières. Cette fonctionnalité était nécessaire dans la perspective que nous avions dès le début d'étendre le domaine d'application de **TOMAWAC** vers le domaine côtier, et éventuellement portuaire. Ce n'est que très récemment, presque 10 ans plus tard, que d'autres chercheurs sont venus à l'utilisation de maillages non-structurés pour les modèles spectraux d'états de mer (Sorensen *et al.*, 2004 ; Hsu *et al.*, 2005).

Le développement de **TOMAWAC** s'est effectué principalement en 1995 et 1996 avec Frédéric Marcos. Ensemble, nous avons écrit le code et produit un jeu complet de documentation comprenant une plan qualité logiciel [RR22], une notice théorique [RR19] et une notice d'utilisation (Marcos, 1995). Avec l'aide de Françoise Becq-Girard et Paul Thellier, nous avons réalisé en 1996 un dossier de validation très complet comprenant 10 cas-tests, qui fait encore référence aujourd'hui [RR27]. La notice théorique du code a été mise à jour en 2002 de façon à intégrer les développements récents [RR46].

Nous avons réalisé une publication de présentation du code lors de la conférence ICCE'1996 [AC10] (reproduite en Annexe 3), suivie de plusieurs applications à la modélisation de tempêtes réelles que nous avons coordonnées ou auxquelles nous avons participé [RR21] [AC13] [AC18]. Des applications du code à caractère de recherche sont présentées dans les paragraphes B.3.2 et B.3.3 de cette partie.

Il est important de mentionner que le code **TOMAWAC** est commercialisé avec l'ensemble du système **TELEMAR** depuis 2001 et diffusé hors du LNHE. La communauté des utilisateurs de **TOMAWAC** comporte des organismes et bureaux d'étude en France (CETMEF, ACTIMAR, BCEOM, universités d'Anglet, de Grenoble et de La Rochelle), mais aussi à l'étranger HR Wallingford et UMIST (UK), Université de Leuven (Belgique), ainsi qu'une université russe.

B.3.1.3. Principe du code TOMAWAC

Sans entrer dans les détails (cf. [RR46] pour aller plus loin), on rappelle ci-dessous l'équation principale sur laquelle nous avons travaillé pour le développement de **TOMAWAC**. L'équation de départ est une équation d'évolution de l'action des vagues (voir Bretherton et Garret, 1969 ; Willebrand, 1975 ; Phillips, 1977) :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{k}_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\bar{k}_y N)}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t)$$

écrite pour la densité spectro-angulaire d'action d'onde de l'état de mer :

$$N(\vec{x}, \vec{k}, t) = N(x, y, k_x, k_y, t)$$

en utilisant ici comme variables de discrétisation :

- le vecteur position $\vec{x} = (x, y)$ pour le repérage spatial dans un repère cartésien,

- le vecteur nombre d'onde $\vec{k} = (k_x, k_y) = (k \cdot \sin \theta, k \cdot \cos \theta)$ pour la discrétisation spectro-angulaire, θ désignant la direction de propagation de la houle,
- le temps t .

En effectuant le changement de variable de (x, y, k_x, k_y) vers (x, y, f_r, θ) , on peut montrer que l'on a la relation suivante pour la densité d'action d'onde exprimée dans les deux systèmes de coordonnées :

$$N(x, y, k_x, k_y, t) = \frac{CCg}{2\pi\sigma} \tilde{N}(x, y, f_r, \theta, t) = \tilde{B} \cdot \tilde{F}(x, y, f_r, \theta, t) \quad \text{en posant : } \tilde{B} = \frac{C Cg}{2\pi\sigma^2} = \frac{Cg}{(2\pi)^2 k f_r}$$

L'équation d'évolution du spectre directionnel de variance telle que résolue par **TOMAWAC** s'écrit :

$$\boxed{\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial y} + \dot{\theta} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial \theta} + \dot{f}_r \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial f_r} = \tilde{B} \cdot \tilde{Q}(x, y, \theta, f_r, t)} \quad (1)$$

avec les vitesses de transfert suivantes, calculées à partir de la théorie linéaire de la houle :

$$\dot{x} = Cg \cdot \sin \theta + U_x$$

$$\dot{y} = Cg \cdot \cos \theta + U_y$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \tilde{G}_n(d) - \frac{\vec{k}}{k} \cdot \tilde{G}_n(\vec{U})$$

$$\dot{f}_r = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} d \right) - Cg \cdot \vec{k} \cdot \tilde{G}_t(\vec{U}) \right]$$

Les opérateurs \tilde{G}_n et \tilde{G}_t font référence au calcul du gradient d'une fonction dans les directions respectivement normale et tangente à la courbe caractéristique de direction θ .

Dans **TOMAWAC**, l'équation (1) est résolue par la méthode des pas fractionnaires : l'étape de convection est traitée par la méthode des caractéristiques (en dimension 4 ou 3 selon qu'il y a ou non des effets de marée) et la prise en compte des termes sources et puits au membre de droite est réalisée à l'aide d'un schéma semi-implicite (voir [RR46] pour les détails). Dans le cadre du développement et de la programmation, Frédéric Marcos s'est plutôt chargé de la partie « convection » tandis que j'assurais le pilotage d'ensemble du développement et ma partie « termes sources et puits » (cf § B.3.1.4).

B.3.1.4. Amélioration de la physique de TOMAWAC

Dans le code **TOMAWAC**, un grand nombre de processus physiques sont considérés. Il y a ceux qui sont associés à la propagation des vagues et représentés par les vitesses de transfert au membre de gauche de l'équation (1) et ceux qui sont pris en compte via le terme Q au membre de droite de l'équation (1). Une synthèse de l'état de l'art de la modélisation de la physique des états de mer est donnée par Komen *et al.* (1994).

En ce qui concerne les premiers (processus liés à la propagation de la houle), nous avons considéré :

- propagation de la houle, due à sa vitesse de groupe et éventuellement à la vitesse d'ensemble du milieu dans lequel elle se propage (courants marins).
- réfraction due à la bathymétrie, qui en faible profondeur modifie la direction des orthogonales de houle et provoque donc un transfert d'énergie sur les directions de propagation.

- « shoaling » : phénomène de gonflement de la houle lorsque la profondeur décroît, du fait de la diminution de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation de l'énergie.
- réfraction due au courant, qui provoque également une déviation des orthogonales de houle et un transfert d'énergie sur les directions de propagation.
- interactions avec des courants instationnaires, générant des transferts fréquentiels (cas des mers à marée par exemple).

En ce qui concerne les processus physiques au membre de droite de (1), nous avons considéré :

- **Processus source d'énergie :**

- génération par le vent - interactions avec l'atmosphère. Cette étape nécessite de modéliser les apports d'énergie à la houle par le vent. Elle constitue le terme source prépondérant pour le spectre directionnel d'énergie de la houle. La façon dont évolue ce spectre est principalement conditionnée par la vitesse du vent, sa direction, sa durée d'action et le fetch (distance sur laquelle il agit). Il convient de noter que la dissipation d'énergie lorsque le vent est opposé à la houle n'est prise en compte que pour certains des modèles d'interaction vagues-atmosphère de **TOMAWAC**. Nous avons implanté trois modèles de génération par le vent : celui de Snyder *et al.* (1981) et celui de Janssen (1989, 1991), et plus récemment celui de Tolman et Chalikov (1996), avec l'aide de Julia Krohn en 2004.

- **Processus puits d'énergie :**

- dissipation par moutonnement (« whitecapping » en Anglais) ou déferlement par écrêtement, dû à l'existence d'une cambrure limite au cours de la génération et de la propagation de la houle. Deux modèles ont été implantés dans **TOMAWAC** : d'une part celui Komen *et al.* (1984) et de Janssen (1991), et d'autre part celui de Tolman et Chalikov (1996).
- dissipation par frottement sur le fond, intervenant principalement en faible profondeur (granulométrie du fond, rides, percolation,...). Un seul modèle est disponible dans la version standard de **TOMAWAC** : il s'agit du modèle issu de la campagne JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973) et repris par Bouws et Komen (1983), mais à l'occasion du projet de recherche ECAWOM un modèle plus complet prenant en compte l'influence du courant sur le frottement a été développé et testé (voir § B.3.2).
- dissipation par déferlement dû à la bathymétrie. A l'approche de la côte, la houle gonfle avec la remontée des fonds jusqu'à déferler quand la cambrure devient trop importante. Ce terme a été développé dans le cadre de la thèse de Françoise Becq-Girard et nos travaux sur ce point sont décrits plus en détail au § B.4.3.
- dissipation par déferlement par courant contraire (« wave blocking »), intervenant en présence de forts courants opposés à la houle. Ce terme n'est pour l'instant pas implanté dans la version instationnaire de **TOMAWAC**, mais une version existe dans la version stationnaire-paramétrisée (anciennement COWADIS).

- **Processus conservatifs de transferts non-linéaires d'énergie :**

- transferts non-linéaires entre quadruplets de fréquences. Ce terme modélise les échanges d'énergie au sein d'un spectre sous l'effet d'interactions non-linéaires. En grande et moyenne profondeur d'eau, les interactions dominantes sont du troisième ordre et s'effectuent entre quadruplets de fréquences (Hasselmann, 1962). Ce sont des interactions résonnantes (c'est à dire que les quatre composantes en interaction satisfont toutes la relation de dispersion). Il s'agit d'un terme dont l'expression théorique, établie par Hasselmann (1962), est très compliquée et prend la forme d'une intégrale de Boltzmann. Le calcul exact de cette intégrale est trop complexe et trop onéreux pour un modèle d'états

de mer à caractère opérationnel. Tous les modèles d'états de mer opérationnels utilisent encore aujourd'hui des versions simplifiées de cette formulation. Le traitement de ces interactions non-linéaires est un sujet sur lequel nous avons travaillé et travaillons actuellement, dans les deux directions complémentaires suivantes :

- (a) Développement et implantation de méthodes approchées ou simplifiées, optimisées d'un point de vue numérique et algorithmique, afin d'être intégrées dans le logiciel **TOMAWAC**.
- (b) Travail sur le calcul exact de ce terme de transfert non-linéaire, de façon à préparer les versions futures et disposer de solutions de référence pour calibrer et apprécier les modélisations simplifiées mentionnées ci-dessus.

Il s'agit d'une question scientifique de premier plan, cruciale pour l'amélioration des modèles de troisième génération, sur laquelle notre contribution peut être considérée comme étant au niveau de l'état de l'art de la recherche scientifique sur le sujet. En version opérationnelle, nous avons implanté en 1996-1997 dans **TOMAWAC** la méthode DIA (Discrete Interaction Approximation) de Hasselmann *et al.* (1985) [RR31]. Une présentation récente résume nos travaux en cours sur les points (a) et (b) ci-dessus [AC32] (reproduite en Annexe 4). Je travaille actuellement sur l'optimisation mathématique, physique et informatique d'un algorithme de calcul proposé par Lavrenov (2001), basé sur l'utilisation de quadratures de Gauss pour les différentes intégrations et qui paraît prometteur d'après les premiers résultats obtenus. Une publication sur ces travaux est envisagée pour 2006. Ces différents travaux m'ont permis d'être un des contributeurs majeurs à la rédaction d'un chapitre de synthèse sur les interactions entre quadruplets pour le « WISE White Paper » en cours de préparation [LI06].

- transferts non-linéaires entre triplets de fréquences (« triad interactions » en Anglais), qui deviennent dominants en faible profondeur. Ce terme est traité plus spécifiquement au § B.4.2.2.2. Deux modélisations ont été développées et implantées dans **TOMAWAC** dans le cadre de la thèse de Françoise Becq-Girard (Becq, 1998) (voir aussi l'article [AJ02] en Annexe 6).

Le maintien au niveau de l'état de l'art du code **TOMAWAC** sur tous ces processus est une activité exigeante. Elle s'appuie sur notre participation régulière aux séminaires du groupe de travail international WISE (Waves In Shallow-water Environments), qui a pris le relais du groupe WAM en 1993. J'essaie de participer régulièrement à ces séminaires et d'y présenter nos travaux en cours en termes de recherches et d'applications (voir les présentations [PR01] en 1993, [PR02] en 1995, [PR03] en 1997, [PR04] en 1997, [PR05] et [PR06] en 2002, [PR07] en 2004, [PR09] en 2006).

B.3.2. Interactions houle-marée-courants-surcotes

B.3.2.1. Interactions houle-marée-courants-surcotes – Couplage TOMAWAC - TELEMAC-2D

Lorsque les vagues se propagent dans un milieu animé d'un courant ambiant (dû à la marée, au débouché d'un fleuve ou à une circulation océanique d'ensemble) et/ou lorsque le niveau moyen de la mer varie au cours du temps (sous l'effet de la marée astronomique et/ou de surcotes-décotes météorologiques), des interactions ont lieu entre les vagues et les courants. Au cours de nos travaux, nous avons été amenés à considérer certains aspects de ces interactions, notamment les interactions entre la marée astronomique et les vagues, étant donné que la marée est un phénomène important du régime hydrodynamique des côtes françaises en Atlantique, Manche et Mer du Nord.

La modélisation des courants de marée et des surcotes-décotes météorologiques s'effectue traditionnellement à l'aide des équations bidimensionnelles de Saint-Venant, qui sont résolues par le module **TELEMAC-2D** du système **TELEMAC**, développé au LNHE (Hervouet, 2003). L'étude

numérique des interactions entre la marée et les surcotes-décotes d'une part et les vagues d'autre part s'effectue donc en couplant les modules de courantologie **TELEMAC-2D** et d'états de mer **TOMAWAC**. Dans les paragraphes suivants, nous proposons une description des principaux effets d'interaction, en décrivant les travaux que nous avons menés sur ces aspects.

B.3.2.1.1. Effets des courants de marée et/ou des surcotes-décotes météorologiques sur les vagues

- **Réfraction due à la présence d'un champ de courant**

Ce premier effet d'ordre cinématique est lié aux gradients spatiaux des caractéristiques du milieu dans lequel se propagent les vagues qui vont modifier la longueur d'onde, la direction de propagation et la hauteur des vagues par un effet de réfraction. En présence de courant, la période absolue des vagues (telle que mesurée dans un repère fixe) est différente de la période relative (telle que mesurée dans un repère se déplaçant à la vitesse du courant), et les deux sont reliées par la relation d'effet Doppler. La relation de dispersion des vagues est modifiée par la présence du courant.

- **Effets liés à l'instationarité du niveau d'eau et du courant**

En conditions instationnaires pour le courant et/ou le niveau marin, il se produit des transferts d'énergie inter-fréquences au sein du spectre de variance. Ces transferts restent en général négligeables sauf dans les zones à forte marée (comme la Manche), où ils peuvent devenir significatifs.

- **Modification des termes sources et puits d'énergie**

Enfin, en présence de courant les termes sources et puits d'énergie sont modifiés. C'est en particulier sensible pour les processus de génération par le vent (la vitesse relative des vagues par rapport au vent change en présence de courant) et de frottement sur le fond (en général augmenté par la présence d'un courant). De plus, en conditions de forts courants, ceux-ci peuvent aller jusqu'à bloquer les vagues et les faire déferler : il faut alors considérer ce processus supplémentaire dans l'équation résolue par **TOMAWAC** (« wave blocking » en Anglais).

B.3.2.1.2. Effets des vagues sur les courants de marée (et/ou les surcotes-décotes météorologiques)

- **Modification de la contrainte de surface**

Un premier effet de la présence des vagues est de modifier la rugosité de la surface de la mer, ce qui joue sur la contrainte de surface et la vitesse de frottement du vent u_* (ou de façon équivalente sur le coefficient de traînée de surface C_D). Cette modification de la contrainte de frottement du vent à la surface de la mer a un effet sur le mécanisme de génération des surcotes-décotes, pour la partie due à l'action du vent à la surface de la mer (amplification du coefficient de traînée). La surcote météorologique peut ainsi être légèrement amplifiée par un état de mer plus développé.

Pour prendre en compte cet effet, il suffit d'extraire du modèle d'état de mer **TOMAWAC** la vitesse de frottement du vent u_* en surface, le coefficient de traînée C_D en surface ou la longueur de rugosité z_0 en surface, en ayant utilisé de préférence un modèle de génération d'états de mer par le vent qui prend en compte l'état de la mer. C'est en particulier le cas des modèles de Janssen (1989, 1991) et de Tolman et Chalikov (1996) pour lesquels les variables u_* , C_D et z_0 sont directement disponibles en sortie de **TOMAWAC**.

- **Modification du coefficient de frottement sur le fond**

En faible profondeur d'eau, la présence des vagues modifie l'hydrodynamique de la couche limite de fond. Les vitesses orbitales induites par la houle contribuent en effet à augmenter l'épaisseur de la couche limite près du fond et modifient les mécanismes de dissipation d'énergie par frottement, et

donc le frottement sur le fond pour le courant. Il existe différentes approches permettant de calculer les contraintes de fond et coefficients de frottement dans le cas d'une houle et d'un courant superposés (par exemple Grant et Madsen, 1979 ; Christoffersen et Jonsson, 1985).

Nous avons utilisé et implanté dans **TELEMAC-2D** le modèle de frottement en régime « houle+courant » proposé par Christoffersen et Jonsson (1985), basé sur l'utilisation de modèles de viscosité turbulente pour l'expression de la contrainte de fond. Cette contrainte τ_b résulte de la combinaison d'une contrainte due au courant τ_{cb} et d'une contrainte due à la houle τ_{wb} :

$$\vec{\tau}_b = \vec{\tau}_{cb} + \vec{\tau}_{wb}$$

Le développement des équations liées aux caractéristiques des modèles de turbulence (épaisseur de la couche limite, profil vertical de viscosité turbulente,...) n'est pas reproduit ici. Pour des raisons d'ordre pratique, on introduit des coefficients de frottement pour la houle f_w et le courant f_c :

$$\tau_{cb} = \frac{1}{2} \rho f_c u^2$$

$$\tau_{wb} = \frac{1}{2} \rho f_w u_{wbm}^2$$

où u est la vitesse du courant et u_{wbm} est la vitesse orbitale maximale de la houle près du fond. Le modèle de Christoffersen et Jonsson (1985) permet de calculer ces coefficients de frottement à partir de la donnée des caractéristiques du courant et de la houle (hauteur significative spectrale, période de pic, direction moyenne et vitesse orbitale moyenne au fond) issues d'un calcul **TOMAWAC**. La contrainte résultante τ_b est ensuite utilisée dans **TELEMAC-2D** pour modéliser les pertes d'énergie par frottement sur le fond.

- **Transfert de quantité de mouvement par les contraintes de radiation**

Enfin, en faible profondeur d'eau et en particulier dans la zone déferlement, un transfert de quantité de mouvement s'effectue depuis le mouvement organisé des vagues vers le domaine fluide, se traduisant par une variation du niveau moyen de l'eau (phénomène de « set-up » ou « set-down ») et la génération de courants dus au déferlement.

Ces contributions peuvent être représentées sous la formes de termes de forçages supplémentaires dans les deux directions (F_x et F_y) dans les équations de quantité de mouvement de Saint-Venant :

$$F_x = -\frac{1}{d} \left\{ \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right\} \quad F_y = -\frac{1}{d} \left\{ \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right\}$$

et font intervenir les contraintes de radiations du champ de vagues S_{xx} , S_{xy} et S_{yy} , calculées sur la base d'expressions établies pour la théorie linéaire de la houle. Les quantités S_{xx} , S_{xy} et S_{yy} , ainsi que F_x et F_y , peuvent être calculées automatiquement et imprimées par **TOMAWAC** si l'utilisateur les sélectionne en début de calcul. Lorsqu'elles sont relues et prises en compte par **TELEMAC-2D**, cela permet de calculer les courants littoraux dus au déferlement des vagues par exemple, courants importants pour la dynamique sédimentaire côtière et le transit littoral des sédiments [AC25].

B.3.2.2. Projet européen ECAWOM (MAST 2)

En 1995 un projet européen intitulé ECAWOM (European Coupled Atmosphere-Wave-Ocean Model) a été monté dans le cadre du programme MAST-2 et j'ai représenté le LNHE au sein de ce projet. Ce projet rassemblait les laboratoires et instituts leaders dans ce domaine au niveau européen : Max-Planck Institut (Allemagne), KNMI (Pays-Bas), Proudman Oceanographic Lab. (UK), DHI (Danemark), ECMWF (UK), etc. Son objectif était d'étudier le couplage entre plusieurs modèles et en particulier le couplage entre les modèles atmosphériques, d'états de mer, de marée et de surcotes. Les cas des tempêtes de Janvier 1990 en Manche et de Février 1993 en Mer du Nord ont été retenus pour

les simulations. Ce programme a permis d'étudier les interactions mentionnées dans les paragraphes précédents, à l'aide des outils **TELEMAC-2D** (marée et surcotes) et **TOMAWAC** (états de mer) :

- les effets des interactions marée-surcotes. Un exemple de résultats sur la Mer du Nord pour une tempête de Février 1993 est donné sur la Figure 15, où l'on voit que l'effet d'amplification des surcotes du fait de la marée (effets non-linéaires) est significatif.
- les effets des états de mer sur les surcotes et la courantologie (modification de la contrainte de surface et de la contrainte de frottement sur le fond).

D'une manière générale, les effets liés à la houle sont assez peu marqués en grande et moyenne profondeur, où ils se font surtout sentir en début de tempête. Ils sont un peu plus sensibles en faible profondeur, la prise en compte des effets de la houle augmente les surcotes calculées. Le projet européen ECAWOM s'est terminé début 1997. Les résultats de ce projet sont présentés dans le rapport de recherche [RR33], l'article de conférence [AC15] (Symposium Saint-Venant 1997) et l'article de revue [AJ03] (La Houille Blanche), en plus des présentations réalisées à l'occasion des réunions du projet européen [PR10] [PR11].

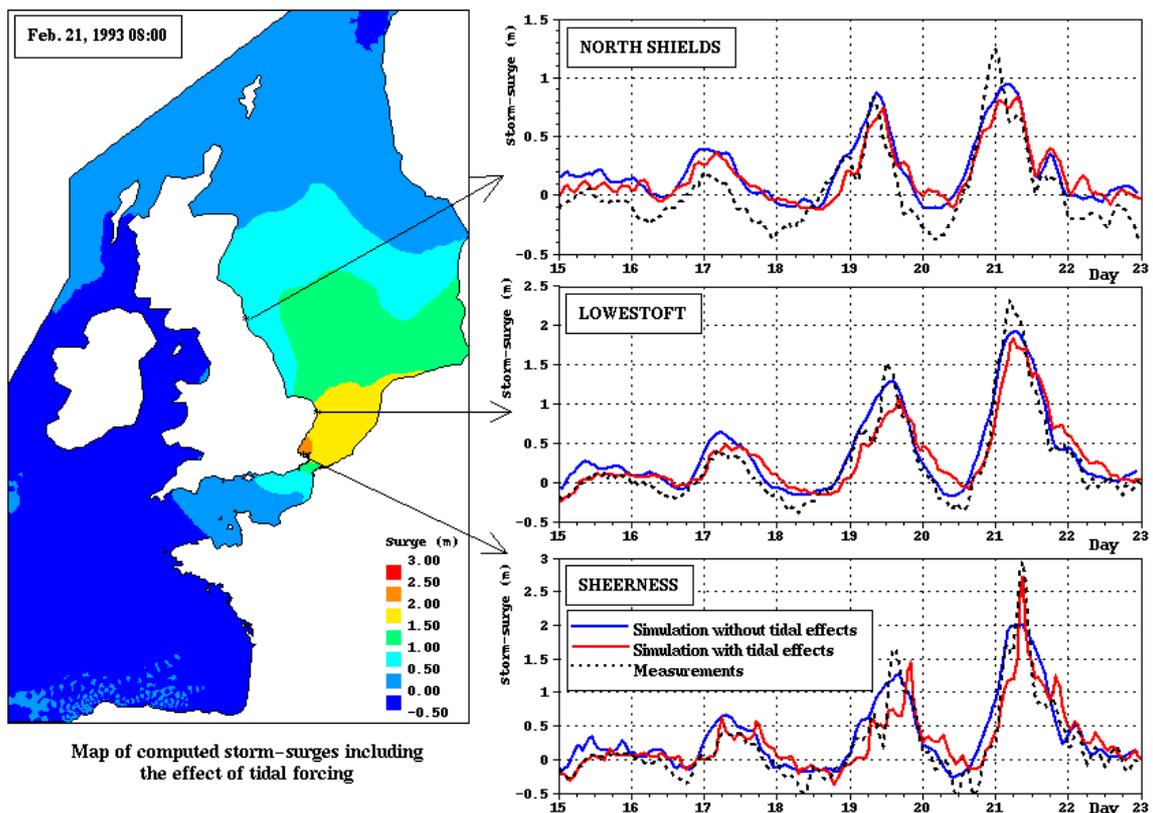


Figure 15 : Modélisation des surcotes-décotes et des interactions avec la marée (projet européen ECAWOM). Simulation d'une tempête en Mer du Nord en Février 1993 avec TELEMAC-2D

B.3.3. Base de données d'états de mer par simulation numérique

Sur la base des résultats encourageants obtenus avec **TOMAWAC** dans les années 1995 à 2001, nous avons proposé en 2002 un programme de R&D pluri-annuel visant à construire un Atlas numérique d'états de mer. Ce projet est mené en collaboration avec le CETMEF (il s'inscrit dans le cadre de la Convention Biparti EDF-Ministères) et avec Météo-France. En effet, les résultats des programmes de R&D précédents et les améliorations réalisées sur la méthodologie de modélisation des tempêtes à l'aide du modèle **TOMAWAC** ont permis d'envisager des simulations continues d'états de mer sur plusieurs décennies (méthode de « hindcast ») à partir de champs de vent ré-analysés. Les avantages

de cette approche sont décisifs sur l'amélioration de la connaissance du climat de houle le long du littoral : pour schématiser, cela revient à imaginer que l'on dispose potentiellement d'une bouée directionnelle de houle en chacun des points du maillage de calcul pendant N années. Météo-France est associée à ce travail et fournit les champs de vent issus du modèle météorologique européen. Le CETMEF met à disposition les mesures de bouées de la base CANDHIS pour valider et calibrer les simulations. Je pilote ce projet, avec les contributions de Florence Lafon, ingénieur-chercheur du LNHE, que j'ai formée sur cette thématique, et avec l'aide de stagiaires de fin d'études, dont Constantinos Zegos de l'UMIST Manchester (2001-2002) et Julia Krohn de l'ENPC (2004).

En 2002, deux modèles numériques emboîtés ont été construits avec des résolutions spatiales différentes [RR42]. Le premier modèle (dit « océanique ») couvre la partie nord de l'Océan Atlantique, avec une résolution spatiale de 1 degré au large et 20 km le long des côtes françaises (cf. **Figure 16**). Le second modèle (dit « côtier ») s'étend vers le large jusqu'à la limite du plateau continental et possède une résolution de quelques kilomètres à l'approche des côtes françaises (cf. **Figure 17**). Sur ces deux modèles, des tempêtes schématisées ont été simulées et comparées aux résultats obtenus lors du programme 1998. Les résultats sont présentés dans les rapports de recherche [RR42] et [RR49].

Ensuite, des simulations sur deux années complètes (1999 et 2000) ont été réalisées, à partir des données de vent issues du modèle européen (résolution spatiale de 0.5 degré et pas de temps de 6 h) et des ré-analyses américaines NOAA/NCEP (résolution de 1.875 degrés et pas de temps de 6 h). Un bon accord général est obtenu avec les mesures du CETMEF aux points où des mesures de bouées sont disponibles (cf. Figure 18). De plus, ces simulations sur deux années ont permis de quantifier précisément les temps calcul nécessaires et les volumes de données en sortie pour le stockage des résultats. Les résultats sont présentés dans le rapport de recherche [RR57]. Voir aussi les présentations effectuées à l'occasion des clubs utilisateurs TELEMAC [PR19] et au CLAROM [PR15]. Une communication scientifique sur ces travaux a été rédigée dans un livre paru suite à la conférence internationale EuroGOOS'2002 [AJ04].

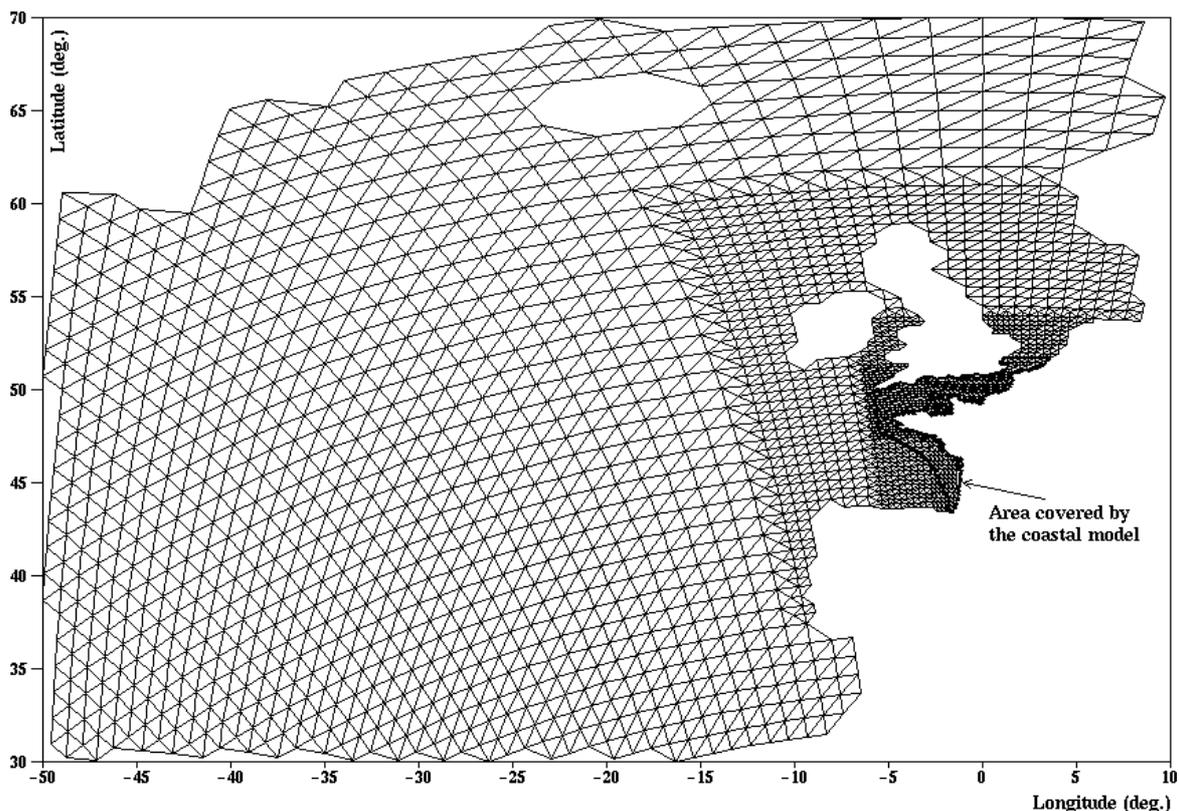


Figure 16 : Emprise et maillage du modèle d'états de mer océanique

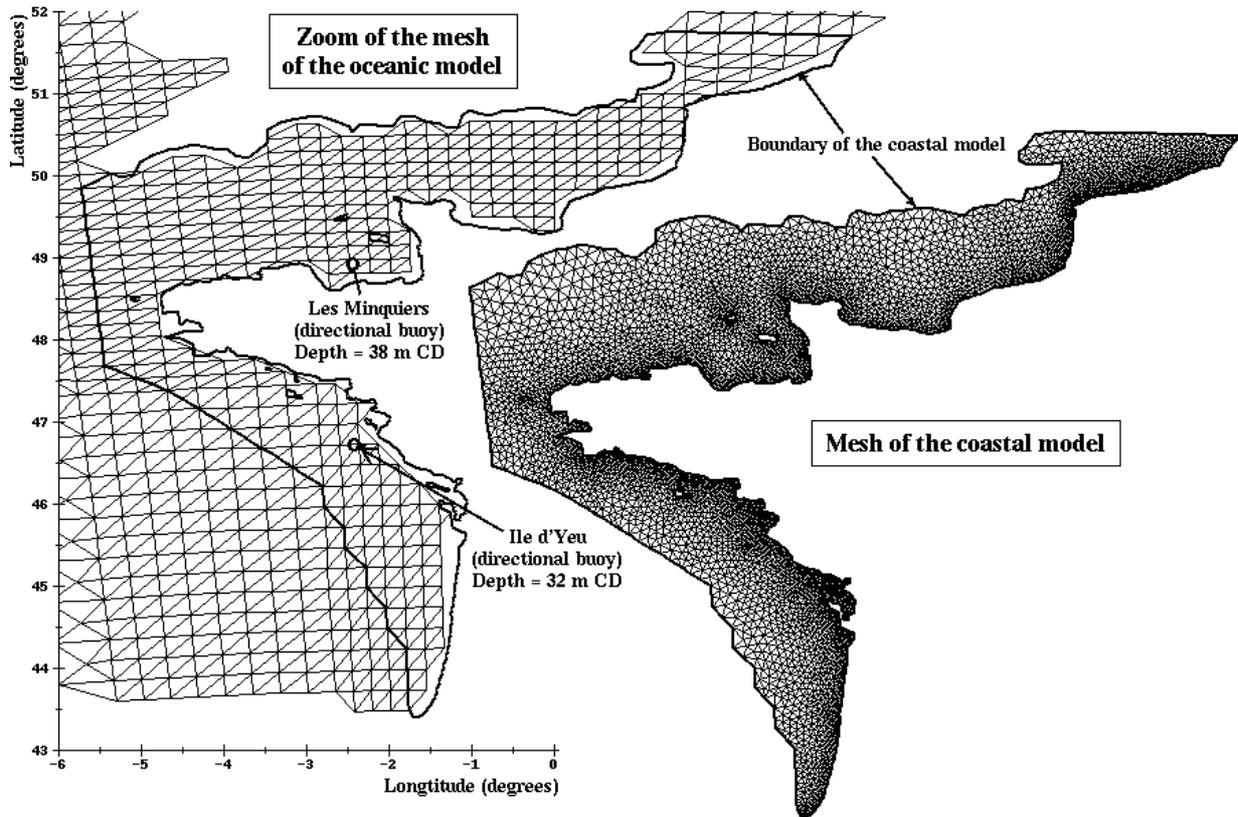


Figure 17 : Emprise et maillage du modèle d'états de mer côtier

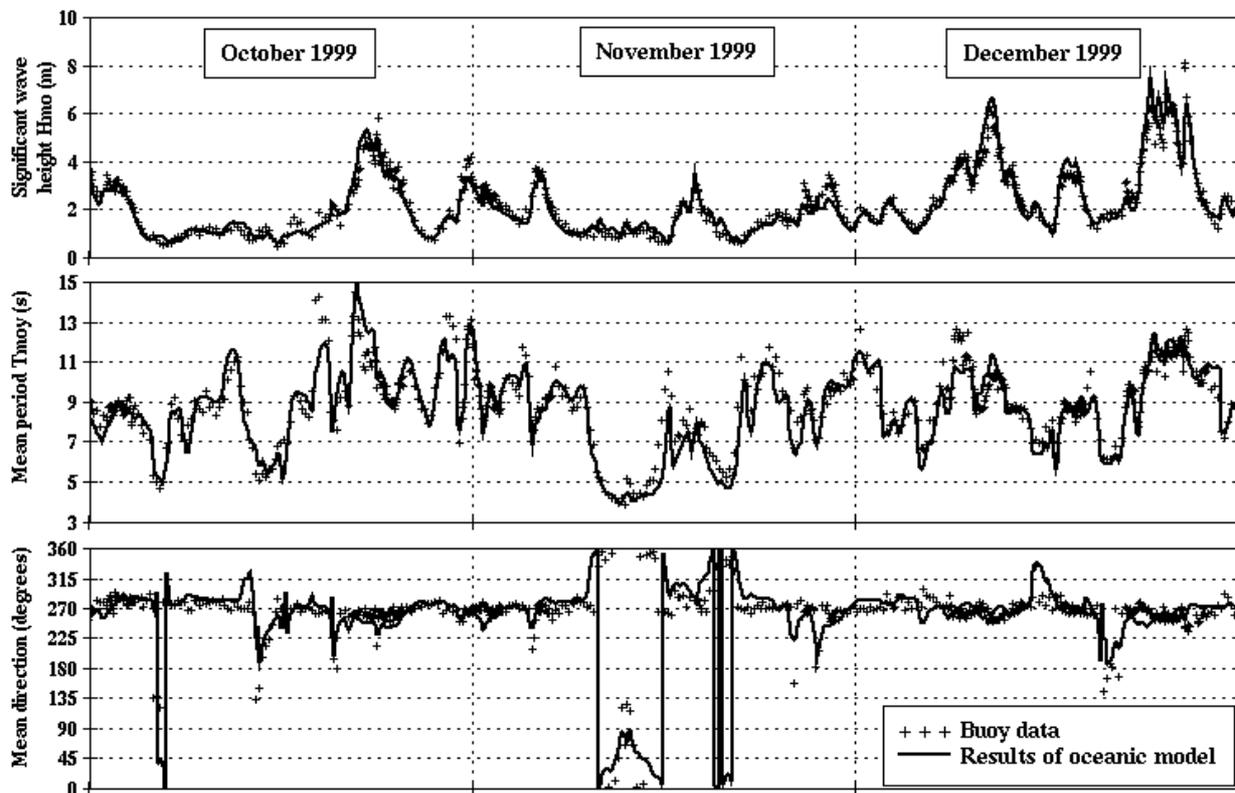


Figure 18 : Comparaison des résultats issus du modèle océanique avec des mesures de bouée
Site de l'Ile d'Yeu (bouée CETMEF) – 3ième trimestre 1999

Récemment, après la calibration des modèles numériques, les simulations ont été réalisées sur 25 ans avec le modèle océanique et une première version de la base numérique d'états de mer a été constituée à partir des champs de vent NCEP/NOAA. Différents traitements statistiques ont été réalisés afin de déterminer des cartographies du climat de houle moyen (valeurs moyenne et médiane de la hauteur significative des vagues) et des valeurs plus élevées d'occurrences plus faibles, comme les hauteurs significatives dépassées en moyenne 10 % et 1% du temps par exemple (cf. Figure 19).

Actuellement, nous travaillons sur l'estimation statistique des hauteurs de houle dont la durée de retour est supérieure à la durée de l'échantillon simulée. Dans un premier temps, nous avons utilisé pour cela la méthode dite du renouvellement, développée au LNHE depuis de nombreuses années, et qui permet d'estimer par exemple les houles d'occurrence cinquantennale ou centennale. Cette méthode dite « à seuil » (POT en Anglais pour « Peaks Over Threshold ») repose sur la sélection d'événements indépendants les uns des autres et dépassant un seuil donné. Sur cet échantillon d'événements extrêmes, on ajuste ensuite une loi de distribution de type exponentielle, Weibull, loi en carré, ou autre... Des indicateurs statistiques, combinés à une analyse visuelle du graphe de distribution, permettent d'apprécier la qualité de l'ajustement des lois analytiques à la distribution empirique, et de sélectionner celle qui représente le mieux l'échantillon considéré. Les résultats préliminaires de ces traitements statistiques font l'objet du rapport de recherche [RR58] et ont été présentés lors de la conférence ICCE'2004 [AC29] (article reproduit en Annexe 5).

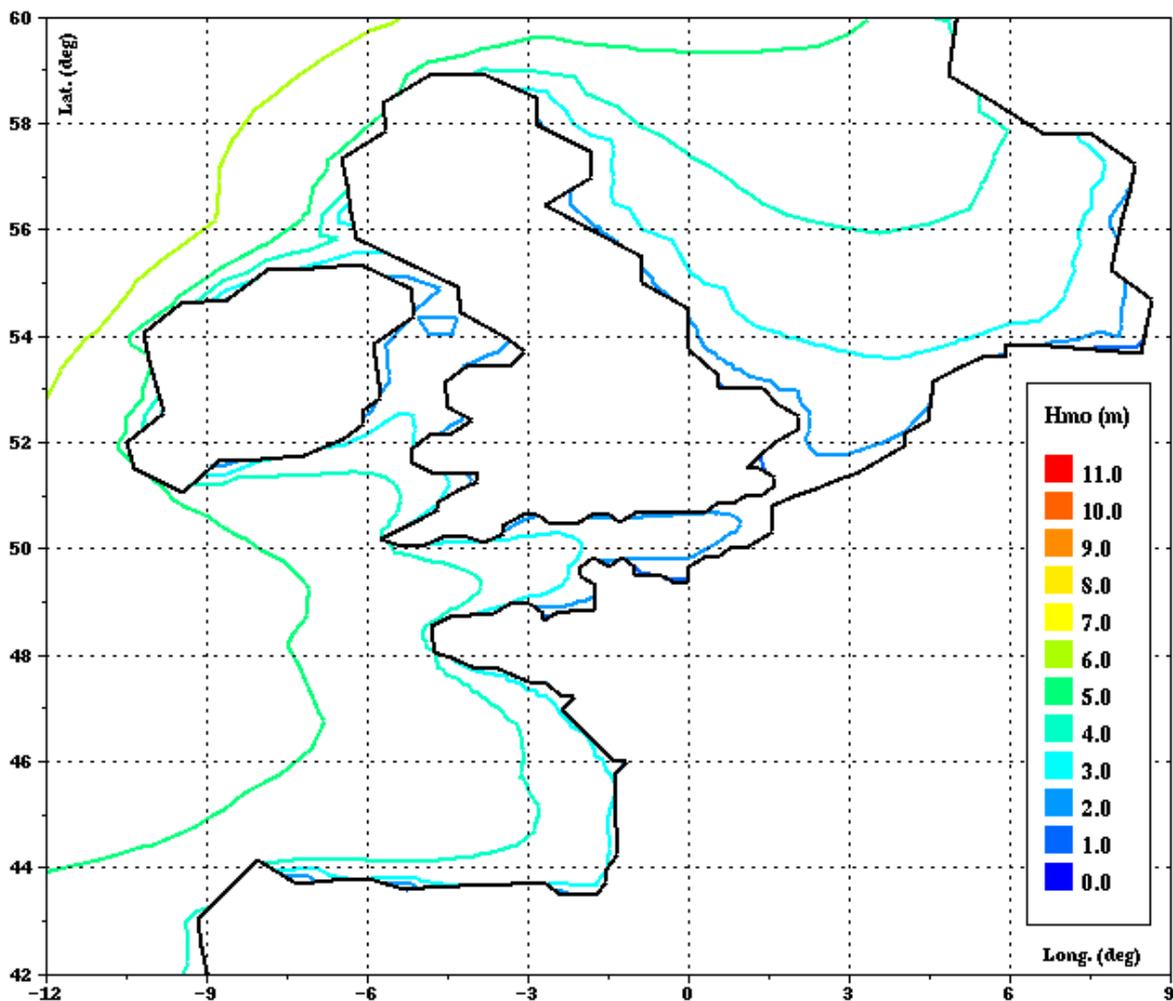


Figure 19 : Cartographie des hauteurs significatives de houle dépassées en moyenne 10% du temps. Résultats du modèle océanique de l'atlas numérique d'états de mer forcé par les champs de vent NCEP/NOAA (Reanalysis-2) sur 25 ans (1979-2003)

Plus récemment, Florence Lafon a amélioré la partie relative à l'extrapolation à des conditions de houle de grandes périodes de retour, en considérant deux méthodes différentes :

- la première méthode consiste à travailler sur l'échantillon des maxima annuels (on retient pour chaque année la valeur maximale de la série annuelle de hauteur significative), très utilisé en hydrologie pour l'estimation des débits de crue extrêmes. Sur cet échantillon de maxima annuels, on ajuste ensuite une distribution Généralisée de Valeurs Extrêmes (GEV).
- La seconde méthode est une extension de la méthode à seuil du renouvellement (utilisée en 2004 et mentionnée ci-avant), dans laquelle on considère maintenant une Distribution de Pareto Généralisée (GPD) pour la loi de distribution des hauteurs de pic de tempêtes. L'utilisation de l'approche GPD confère un caractère nettement plus universel au modèle de loi de distribution considéré. On dispose notamment d'une distribution qui peut être bornée (ce qui n'est pas le cas des lois de Weibull ou exponentielle considérées précédemment). Cette caractéristique est primordiale pour estimer des hauteurs extrêmes en profondeur d'eau finie, et ce d'autant plus que la profondeur d'eau est faible. Dans ce cas, le déferlement écrête les plus fortes hauteurs de vagues et la distribution réelle des hauteurs de vagues est forcément bornée.

Ces estimations sont comparées à celles obtenues à partir de mesures de bouées (disponibles sur une période plus réduite et avec de nombreuses lacunes en général) et sont en cours de validation. Nous envisageons de soumettre prochainement une publication dans une revue scientifique sur ces travaux.

Cette action de recherche représente une avancée majeure dans la connaissance de la climatologie des états de mer le long des côtes françaises. Plusieurs projets de recherche utilisent déjà des résultats de cet atlas d'états de mer, à EDF R&D bien sûr (étude d'évolution du climat des houles et identification des effets éventuels du changement climatique, estimation de la ressource énergétique des vagues pour la production d'énergie, etc.), mais aussi hors EDF et notamment au CETMEF et à IFREMER, ainsi qu'à l'Université de Bretagne Occidentale et à l'Ecole Centrale de Nantes.

Cette base de données représentera une amélioration importante de la connaissance des climats de houle, en complément des mesures de bouées (base CANDHIS du CETMEF) et des mesures satellitaires. Ses perspectives d'utilisation et de valorisation, que ce soit par les partenaires de cette collaboration ou à l'externe, sont nombreuses : études de climatologie de houle sur des sites, dimensionnement d'ouvrages maritimes et côtiers, meilleure compréhension de la dynamique sédimentaire littorale, estimation de la ressource énergétique des vagues, etc. Les manifestations d'intérêt déjà reçues et les premières applications réalisées à ce jour indiquent que le produit final aura, selon toute vraisemblance, vocation à être largement utilisé, au niveau national, et sans doute européen.

B.4. Cinématique et propagation des vagues en zone côtière

Dans cette partie sont présentés quelques uns de mes travaux portant sur la **modélisation déterministe** des vagues et le calcul de la **cinématique** (vitesses orbitales, accélérations, pression,...) sous les vagues. Ici, nous considérons une discrétisation spatio-temporelle beaucoup plus fine que lors de la partie précédente : on s'intéresse aux méthodes et modèles adaptés à représenter les variations à des échelles de $1/50$ à $1/10$ de la période (ou de la longueur d'onde) typiquement.

Ce type d'approche est nécessaire en zone côtière et portuaire, lorsque les caractéristiques des vagues varient rapidement (i.e. sur des distances de l'ordre ou inférieures à la longueur d'onde). C'est notamment le cas lorsque les processus dominants sont les effets non-linéaires de faible profondeur d'eau, le déferlement, la diffraction et la réflexion. Il est alors indispensable de disposer d'une description « intra-vague » ou de modèles à « résolution de phase ».

Le paragraphe B.4.1 présente mes travaux relatifs aux méthodes de calcul de la cinématique locale des vagues, tandis que le paragraphe B.4.2 est consacré à mes travaux sur les modèles déterministes (ou « à résolution de phase ») de propagation des vagues en zone côtière. Enfin le paragraphe B.4.3 présente une partie de mes travaux sur le processus particulier de déferlement en faible profondeur d'eau, et ses conséquences sur l'hydrodynamique côtière.

B.4.1. Modèles locaux de cinématique des vagues en zone côtière

La problématique abordée dans ce paragraphe peut être formulée de la façon suivante : connaissant les caractéristiques locales des vagues (typiquement hauteur de vague locale H et période T , ou bien profil de surface libre $\eta(t)$ échantillonné sur une période T), comment calculer d'une part les propriétés cinématiques des vagues telles que vitesses orbitales, accélérations et pression, et d'autre part des propriétés intégrées (i.e. obtenues par moyenne sur une vague) telles que flux d'énergie, énergie cinétique et potentielle, flux de masse, etc. ?

Pour ces cas, la bathymétrie est décrite par la profondeur d'eau locale d , et éventuellement par la pente locale $m = \tan(\alpha)$ pour le cas des fonds variables. On s'intéresse à des vagues régulières monodirectionnelles, bien que certaines des méthodes considérées puissent être étendues et appliquées au cas des houles irrégulières (notamment les méthodes de fonctions de transfert présentées au § B.4.1.4).

De telles méthodes sont importantes dans le domaine de l'ingénierie océanique et offshore. Elles sont notamment utilisées pour estimer les efforts dus aux vagues sur des structures marines ou côtières, émergées (de type pieu) (cf. § B.5.2.3) ou posées sur le fond (pipeline, émissaire sous-marin,...) (cf. § B.5.4), ainsi que pour le calcul des flux de sédiments sous l'action de la houle. Ce sont ces deux aspects, et notamment le premier cité, qui ont motivé les travaux réalisés et encadrés sur ce thème.

Il s'agit d'une thématique « traditionnelle » de l'étude des vagues (notamment pour ce qui concerne les théories analytiques présentées au § B.4.1.1), sur laquelle mes recherches sont motivées par les deux aspects suivants :

- prise en compte du caractère non-linéaire des vagues (si possible jusqu'au déferlement),
- application ou extension de ces méthodes pour le cas de fonds variables en zone côtière.

L'organisation de ce paragraphe est la suivante : le § B.4.1.1 est consacrée aux théories analytiques de houle à fond plat (linéaire et non-linéaires). Le § B.4.1.2 traite d'une méthode numérique potentiellement exacte pour le cas d'un fond plat et basée sur une décomposition en série de Fourier de la fonction de courant. Des travaux sur le cas des fonds inclinés sont présentés au § B.4.1.3, tandis que le § B.4.1.4 est consacré aux méthodes de fonctions de transfert.

B.4.1.1. Théories analytiques à fond plat

On considère ici le cas d'un fond supposé plat (profondeur notée d) et les vagues sont données par le couple (Hauteur H ; Période T) ou (Hauteur H ; Longueur d'onde L). C'est, de loin, le cas le plus traité dans la littérature scientifique. Plusieurs théories analytiques ont été proposées, selon la profondeur relative considérée (d/L ou d/L_0 ou $L_0 = gT^2/(2\pi)$), ou bien suivant la valeur du nombre (adimensionnel) d'Ursell. On distingue en pratique la théorie linéaire et des théories non-linéaires.

- **Théorie linéaire** : la théorie linéaire de Stokes à l'ordre 1 (ou théorie d'Airy) est largement utilisée dans la pratique, bien qu'en principe elle perde de sa validité pour les vagues cambrées. J'ai souvent utilisé cette théorie, dont les résultats peuvent être consultés dans la plupart des ouvrages de référence et qui ne présente pas de difficultés particulières. Signalons simplement nos travaux sur la comparaison de différentes méthodes numériques de résolution de la relation de dispersion des vagues, en présence ou non de courant ambiant, réalisée en 1993 avec Jean-Claude Besnard (cf. rapport de recherche [RR08]).
- **Théories non-linéaires à fond plat** : Le recours à des théories non-linéaires est nécessaire pour décrire les vagues de forte cambrure et/ou pour mieux représenter la houle en faible profondeur d'eau. J'ai travaillé sur plusieurs théories analytiques non-linéaires, avec la contribution de Marilyne Luck (élève-ingénieur ECP en stage de fin d'études en 2000) :
 - *les théories non-linéaires de Stokes* (aux ordres 2, 3 et 5), obtenues par développement à l'aide d'un petit paramètre (méthode de perturbation). Le paramètre de développement est H/L ou kH . Elles sont adaptées pour les grandes profondeurs d'eau (faibles nombres d'Ursell : $U_s < 25$).
 - *les théories cnoïdales* (aux ordres 1, 2, 3 et 5), utilisables en faible profondeur d'eau (grands nombres d'Ursell : $U_s > 25$). Elles sont également obtenues par une méthode de perturbation, mais le paramètre de développement est ici H/d .

Ces théories analytiques ont été très utilisées dans les années 1960 à 1990, mais on leur préfère aujourd'hui les méthodes de type « fonction de courant » (cf. § B.4.1.2 ci-après). Cependant, elles restent intéressantes pour fournir une première estimation des propriétés cinématiques et sont toujours employées dans certains codes d'ingénierie.

Lors de son stage de fin d'études, Marilyne Luck a développé et validé le logiciel **HOULES** comprenant les théories de Stokes aux ordres 2, 3 et 5, ainsi que les théories cnoïdales d'ordre 1, 2 et 3. En supplément, un logiciel spécifique basé sur la théorie de Stokes à l'ordre 5, telle que formulée par Fenton (1990) a été développé par mes soins (logiciel **STOKES5**), dans la cas général où un courant ambiant est présent en plus de la houle. Le logiciel **HOULES** a été utilisé dans le cadre des projets CLAROM-HOUDIM [RR41] et CLAROM-ECOMAC pour estimer les vitesses dues à la houle près du fond et les efforts qui en résultent sur un pipeline posé sur le fond [PR13] [AC24] (article reproduit en Annexe 7).

B.4.1.2. Méthode numérique non-linéaire exacte à fond plat

J'ai beaucoup travaillé sur la méthode dite de « fonction de courant », ou plus exactement de « décomposition en série de Fourier de la fonction de courant », qui est plus générale et plus précise que les théories analytiques de Stokes ou cnoïdales mentionnées au paragraphe précédent.

Cette méthode est valable pour une profondeur d'eau quelconque et quelle que soit la hauteur ou la cambrure des vagues jusqu'à la limite de stabilité avant déferlement, à condition de choisir un ordre de précision suffisamment élevé. Cette approche est recommandée notamment dans le cas où la hauteur de vague est supérieure à 50% de la hauteur de déferlement. Notons cependant que, à la différence des théories analytiques mentionnées ci-avant, il s'agit d'une méthode numérique, nécessitant le recours à un programme informatique pour résoudre un système d'équations non-linéaires. La mise en œuvre

pratique de cette méthode est nettement plus compliquée que les théories analytiques précédentes et nécessite une résolution itérative d'un système non-linéaire assez lourd.

En 2000, j'ai développé un programme informatique (code **STREAM_HT**) basé sur cette méthode (Fenton, 1988, 1999), dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC [RR40]. Il permet notamment de calculer les grandeurs cinématiques des vagues. Ce code a été validé par rapport à des résultats présentés par d'autres auteurs. Les calculs ont pu être poussés pour un certain jeu de paramètres jusqu'à une hauteur de houle égale à 77% de la profondeur d'eau, ce qui, pour une limite théorique de 78%, amène à près de 99% de la hauteur de déferlement.

Les résultats de ce programme ont été largement utilisés dans plusieurs de nos travaux portant sur la cinématique des vagues [RR41] [RR53] et le calcul des efforts sur un cylindre vertical dans le cadre de l'étude d'implantation d'éoliennes en mer. Ces travaux sont présentés plus en détail au § B.5.2.3 et utilisent la formule de Morison *et al.* (1950) avec la cinématique de houle donnée par le module **STREAM_HT** (code **STREAM_FM**). Notons également que ces modules ont été interfacés avec le code de mécanique Code_ASTER de EDF R&D, toujours pour le calcul des chargements sur des éoliennes en mer [RR50].

Signalons que cette méthode de fonction de courant, comme les théories non-linéaires à fond plat du paragraphe précédent, permettent de représenter l'asymétrie des vagues par rapport à un plan horizontal, caractéristique de la houle en eau peu profonde et/ou de vagues très cambrées : les crêtes deviennent plus pointues et les creux s'aplatissent à mesure que la profondeur d'eau diminue et/ou que la cambrure augmente. Par contre, ces théories ne peuvent modéliser la dissymétrie des vagues par rapport à un plan vertical qui apparaît en zone de shoaling lorsque la profondeur d'eau diminue. C'est pourquoi j'ai orienté mes travaux sur les techniques présentées dans les deux paragraphes suivants.

B.4.1.3. Méthode semi-empirique pour des fonds en pente

Je me suis également intéressé aux méthodes semi-empiriques applicables au cas de fond en pente (supposée constante). Il s'agit de méthodes travaillant à partir de la profondeur d'eau locale d , de la pente locale des fonds m , de la période des vagues T et de la hauteur de houle, qui peut être selon les cas une hauteur locale (notée H) ou une hauteur « au large » (notée H_0).

Dans cette catégorie, on peut citer *a minima* les trois approches suivantes, considérées et comparées par Hamm (1996) :

- la méthode proposée par Isobe et Horikawa (1982), qui ne donne en sortie que la vitesse orbitale horizontale,
- la théorie co-vorticale de Swart et Crowley (1988),
- une extension de la méthode de fonction de courant proposée par Hattori et Katsuragawa (1990).

Hamm (1996) a comparé deux de ces approches (les deux premières) sur plusieurs cas-tests expérimentaux. Il souligne en particulier l'intérêt de la méthode de Isobe et Horikawa (1982), qui donne de bons résultats sur une large gamme de conditions de houle et de bathymétrie, et qui est par ailleurs de mise en œuvre relativement simple et rapide. Sur cette base, j'ai décidé de retenir cette méthode lors des inter-comparaisons de différentes approches de modélisation dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC.

La méthode semi-empirique de Isobe et Horikawa (1982) est présentée en détail dans le rapport de recherche [RR47]. Un logiciel spécifique a été développé par mes soins (logiciel **ISORI82**). La programmation a été validée par comparaison à des résultats présentés par les auteurs de la méthode et à des mesures de vitesse réalisées en canal à houle, près du fond [RR47].

Cette méthode est intéressante car elle permet une estimation en général de bonne qualité de la vitesse horizontale sous la houle, au prix d'un effort de calcul très modeste. Elle permet en outre de prendre en compte l'effet de la pente des fonds, de façon schématique, mais réaliste. Ses principales limitations sont liées au fait qu'elle ne donne pas de profil de vitesse verticale et ne permet pas d'étudier les

corrélations avec le signal de surface libre. Par ailleurs, une singularité numérique, *a priori* non physique, a été relevée dans une des équations, ce qui peut remettre en cause les résultats au voisinage d'une période adimensionnelle particulière.

Enfin, la méthode originale telle que présentée par Isobe et Horikawa (1982) perd de sa validité dans la zone de déferlement et surestime les vitesses horizontales, de façon d'autant plus marquée qu'on progresse dans la zone de déferlement. J'ai travaillé sur trois variantes de la méthode originales et les avons implantées dans le logiciel **ISORI82**, puis testées et comparées. L'une d'elles, basée sur la connaissance de la hauteur de houle locale (Grasmeijer et Van Rijn, 1998), améliore très nettement les prédictions dans la zone de déferlement et est recommandée pour les applications pratiques [RR47] (voir aussi l'article [AC24] reproduit en Annexe 7).

B.4.1.4. Méthodes de fonction de transfert

Ce cas est différent de ceux considérés dans les paragraphes précédents, au sens où la donnée d'entrée n'est plus la hauteur de vague H (associée à la période T ou la longueur d'onde L), mais le signal d'élévation de surface libre $\eta(t)$, échantillonné sur une période T (ou une longueur d'onde L). Ce signal de surface libre peut être quelconque *a priori* (en général il est issu de mesures effectuées *in situ* ou en laboratoire). En particulier la surface libre peut tout à fait être dissymétrique par rapport à un axe horizontal et/ou par rapport à un axe vertical. On mentionne ci-après trois méthodes différentes avec lesquelles j'ai été amené à travailler et sur lesquelles j'ai réalisé des travaux de recherche et/ou des développements.

B.4.1.4.1. La méthode de fonction de transfert linéaire (LTFM)

La première approche consiste à utiliser pour calculer les vitesses orbitales u et w les résultats de la théorie linéaire d'Airy. Sa mise en œuvre est immédiate et ne présente pas de difficulté. Cette méthode est toutefois limitée dans son champ d'application. En particulier, elle n'est pas recommandée pour les houles cambrées. Par ailleurs, les comparaisons à des mesures de vitesses en laboratoire montrent que les vitesses horizontales sous la crête de la vague sont surestimées [AC24] [AC28]. Enfin, les estimations de vitesse dans la crête des vagues ne sont pas correctes. Des modèles dits de « stretching » ont été développées pour améliorer ce dernier point (Wheeler, 1970).

B.4.1.4.2. La méthode de fonction de transfert modifiée (MTFM)

Au vu des limitations de la fonction de transfert linéaire, suivant en cela les travaux de Christophe Chevalier (2000) et Chevalier *et al.* (2001), avec qui j'ai collaboré sur ce sujet entre 2001 et 2003, nous nous sommes intéressés à la méthode de fonction de transfert modifiée (MTFM), proposée par Koyama et Iwata (1985).

Nous avons essentiellement utilisé cette méthode pour calculer la vitesse orbitale horizontale, car les résultats de l'application de la méthode pour le calcul des vitesses verticales se sont révélés assez décevants. Nous avons obtenu, pour la vitesse horizontale, de bonnes prédictions par rapport à des mesures Vélocimétrie Laser-Doppler réalisées en canal à houle à l'Université de Caen, par Christophe Chevalier et Lars Messutat, de l'équipe de Michel Belorgey, à la fois pour les vitesses près du fond [AC24] et pour le profil sur la verticale de la vitesse horizontale [RR53] [AC26] [AJ07]. Cette méthode est intéressante, car sa mise en œuvre est aisée et rapide. Elle est recommandée pour les applications pratiques, dans les cas où l'on dispose bien entendu du signal de surface libre.

B.4.1.4.3. La méthode de fonction de courant « irrégulière » (ISFM)

Enfin, j'ai travaillé sur une méthode potentiellement plus précise, basée sur la décomposition en série de Fourier de la fonction de courant et généralisant la méthode présentée au § B.4.1.2. On parle alors de méthode de fonction de courant « irrégulière » (ISFM). Cette approche a été introduite par Dean (1965) et reprise par plusieurs auteurs, dont Chakrabarti *et al.* (1997).

Elle est basée sur la formulation d'un problème non-linéaire dont les inconnues sont les coefficients de Fourier de la fonction de courant (plus d'autres paramètres). Le problème doit être résolu sur une longueur d'onde de vague, de façon à tenir compte de toutes les dissymétries du profil de surface libre, et sa résolution nécessite d'avoir recours à un algorithme itératif spécifique. J'ai développé un logiciel spécifique pour cette problématique, appelé **STREAM_SL** [RR48], qui est un outil avancé et puissant, ayant peu d'équivalents.

Comme les différentes théories et méthodes présentées ci-avant, ce logiciel a été largement utilisé pour calculer la cinématique des vagues en zone de shoaling et de déferlement. Etant donné que cette approche permet de prendre en compte l'asymétrie des vagues par rapport à un plan vertical, il s'agit de la méthode qui donne en général les meilleurs résultats pour prédire la cinématique de houle sur la verticale [RR53] [AC28] [AJ07] et les efforts sur les structures [RR54] [AC30] [AC27] [AJ06] (cf. § B.5.2.3) (voir aussi l'article [AC24] reproduit en Annexe 7 et l'article [AJ07]).

B.4.2. Modélisation de la propagation des vagues en zone côtière

Dans le cas où la profondeur d'eau est faible, les variations de profondeur ont une influence forte sur les vagues : modification de la longueur d'onde, de la hauteur et de la direction de propagation (par réfraction et shoaling), modification de la forme du profil des vagues (par effets non-linéaires), etc.

J'ai travaillé sur différents types de modélisations de houle, linéaires ou non-linéaires, à phases moyennées (approche spectrale vue en partie B.3 sur laquelle repose le code **TOMAWAC**) ou à résolution de phase (approche déterministe). Pour chaque cas, l'évolution des vagues est résolue sur un maillage en espace représentant le domaine d'intérêt. Dans le cas non-linéaire, la modélisation est beaucoup plus délicate et nécessite des approches de modélisation plus complexes et des techniques numériques plus pointues. Dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC, nous avons proposé une classification générale des modèles de houle [RR51] [PR14]. Elle est présentée ci-après, en distinguant les trois approches suivantes : **déterministe**, **spectrale** et **probabiliste** (cf. Figure 20). Chaque classe de modèle peut ensuite être divisée en sous-classes selon le nombre de variables considérées et le nombre d'équations correspondantes.

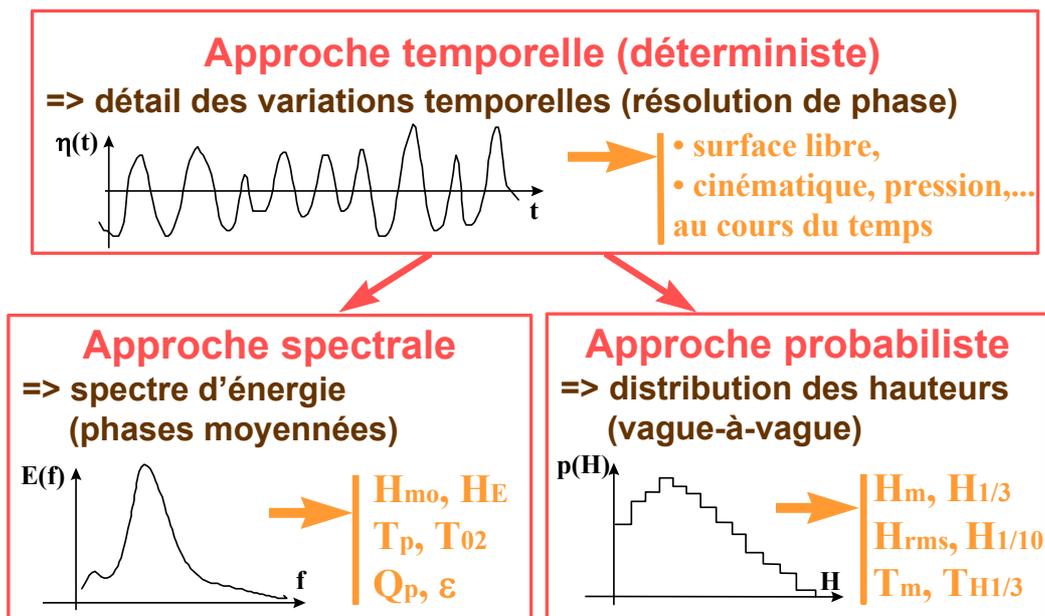


Figure 20 : Vue synoptique des différentes approches de représentation des états de mer

B.4.2.1. Modèles déterministes de propagation des vagues en zone côtière

Les modèles « déterministes » (ou « à résolution de phase ») résolvent l'évolution de chaque vague prise individuellement au sein d'un train de vagues irrégulières dans le cas général. Ces modèles permettent d'avoir accès à toute la cinématique sous la vague à une échelle spatio-temporelle intra-vague. Sur ce type de modèles numériques, j'ai travaillé à la fois sur des modèles linéaires (cf. § B.4.2.1.1) et non-linéaires (cf. § 0 et B.4.2.1.2).

B.4.2.1.1. Modélisation linéaire

Sous l'hypothèse que les variations de fond sont relativement lentes, on peut généraliser la théorie de Stokes d'ordre 1 ou théorie d'Airy (cf. B.4.1.1) au cas d'une bathymétrie irrégulière. On développe alors des équations linéaires qui modélisent l'évolution des vagues (dont on suppose qu'elles gardent un profil sinusoïdal). On dispose ainsi par exemple de modèles basés sur la théorie des rayons et la conservation du flux d'énergie des vagues, largement utilisés dans les années 1960 à 1980, mais délaissés depuis au profit de modèles basés sur l'équation de Berkhoff (prenant en compte la diffraction et la réflexion sur les ouvrages). Le LNHE dispose du logiciel **ARTEMIS** résolvant cette équation sur un maillage en éléments finis au sein du système **TELEMAC**, que j'ai utilisé pour différentes études [RI06] [RI07] [RI08].

En termes de recherche, j'ai développé dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC un modèle 1D résolvant l'équation de Berkhoff (ou « mild slope equation ») pour la propagation des vagues en zone côtière, mais incluant des termes d'ordres supérieurs pour mieux traiter des bathymétries présentant des variations rapides. Il s'agit du logiciel **REEF-2000** [RR38], qui comporte dans l'équation de Berkhoff étendue des termes proportionnels au carré de la pente des fonds et à la courbure des fonds. En effet, une limitation de l'équation de Berkhoff originale réside dans l'hypothèse de « pente douce » des fonds du domaine étudié. Or, pour un certain nombre de cas (ouvrages submergés, récifs coralliens,...), les pentes des fonds peuvent être plus raides que la limite de 1:3 traditionnellement admise pour l'équation de Berkhoff. Cette étude a permis d'examiner les effets de la prise en compte de ces termes complémentaires et d'évaluer la possibilité de les inclure ensuite en version opérationnelle dans le logiciel **ARTEMIS**. A cette fin, un algorithme simple a été développé pour traiter des cas monodimensionnels (profil bathymétrique cylindrique) et en se limitant à une houle linéaire (pas de termes dissipatifs d'énergie). L'application de ce modèle à des situations où des mesures ou des solutions de référence sont disponibles montre que les effets introduits par les termes complémentaires peuvent être significatifs si les fonds présentent une pente et/ou une courbure importante(s) [RR38].

B.4.2.1.2. Modélisations non-linéaires – Approche Boussinesq étendue

Les modèles de propagation de houle basés sur l'équation de Berkhoff mentionnés au § précédent reposent sur une hypothèse de houle linéaire. Cette hypothèse est assez limitative si on souhaite avoir une description précise des vagues en zone de faible profondeur d'eau, où les effets non-linéaires sont importants et modifient sensiblement le profil des vagues, ainsi que les propriétés cinématiques associées (vitesses, pression, etc.). Depuis une quinzaine d'années environ, des modélisations non-linéaires, basées sur les équations dites de Boussinesq (ou plus exactement « Boussinesq étendues »), ont été proposées dans la littérature scientifique et testées avec un certain succès pour les vagues en zone côtière (voir par exemple Nwogu (1993), Dingemans (1997), Wei *et al.* (1995), Madsen et Schäffer (1998, 1999), Gobbi et Kirby (1999)).

Il existe différentes versions de ces équations, selon l'ordre d'approximation en termes de propriétés de dispersion (en fonction du paramètre $\mu = kh$) et de non-linéarité (en fonction du paramètre $\delta = a/h$ où a est une amplitude caractéristique des vagues).

A partir de 2001, j'ai développé un modèle numérique, appelé **BSQ**, résolvant deux jeux différents des équations de Boussinesq : celles dites de Nwogu (1993) (version **BSQ_V1P1**) et celles de Wei *et al.* (1995) (version **BSQ_V2P0**), qui contiennent des termes non-linéaires supplémentaires [RR43]. Ces

deux versions présentent des propriétés de dispersion supérieures aux équations de Boussinesq originales (c'est à dire qu'elles sont applicables non seulement à des faibles profondeurs d'eau, mais également à des profondeurs moyennes).

Dans le cas d'une seule dimension d'espace (on utilise la coordonnée spatiale x), en notant η l'élévation de surface libre et u_α la vitesse horizontale suivant l'axe x à la cote $z_\alpha = C_\alpha \cdot h$ (où C_α est une constante choisie *a priori*), les équations de Nwogu (1993), correspondant à la version **BSQ_V1P1**, s'écrivent :

- Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left((h + \eta) u_\alpha \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[a_1 h^3 \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial x^2} + a_2 h^2 \frac{\partial^2 (h u_\alpha)}{\partial x^2} \right] = 0$$

$$\text{avec : } a_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{z_\alpha}{h} \right)^2 - \frac{1}{6} = \frac{1}{2} C_\alpha^2 - \frac{1}{6} \quad a_2 = \frac{z_\alpha}{h} + \frac{1}{2} = C_\alpha + \frac{1}{2}$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + u_\alpha \frac{\partial u_\alpha}{\partial x} + b_1 h^2 \frac{\partial^3 u_\alpha}{\partial x^2 \partial t} + b_2 h \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(h \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} \right) = 0$$

$$\text{avec : } b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{z_\alpha}{h} \right)^2 = \frac{1}{2} C_\alpha^2 \quad b_2 = \frac{z_\alpha}{h} = C_\alpha$$

Chacune de ces équations comporte des termes non-linéaires, ainsi que des termes dispersifs supplémentaires par rapport aux équations de Saint-Venant. Mises sous forme adimensionnelle, les équations ci-dessus contiennent des termes d'ordre μ^2 et δ . Elles sont dites d'ordre $O(\delta, \mu^2)$.

Les équations de Wei *et al.* (1995), correspondant à la version **BSQ_V2P0**, contiennent davantage de termes. En fait, elles incluent tous les termes non-linéaires pour l'ordre d'approximation en μ^2 sur les propriétés de dispersion. Elles sont d'ordre $O(\mu^2 \delta, \mu^2)$.

- Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = E(\eta, u_\alpha) + E_2(\eta, u_\alpha)$$

$$\text{où le terme : } E(\eta, u_\alpha) = - \frac{\partial}{\partial x} \left((h + \eta) u_\alpha \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[a_1 h^3 \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial x^2} + a_2 h^2 \frac{\partial^2 (h u_\alpha)}{\partial x^2} \right]$$

correspond à la version de Nwogu (1993), rappelée ci-dessus et le terme supplémentaire vaut :

$$E_2(\eta, u_\alpha) = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(a_1 h^2 \eta + \frac{1}{6} \eta (h^2 - \eta^2) \right) \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial x^2} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(a_2 h \eta - \frac{1}{2} \eta (h + \eta) \right) \frac{\partial^2 (h u_\alpha)}{\partial x^2} \right]$$

On vérifie que ce terme supplémentaire ne comprend que des termes non-linéaires d'ordres supérieurs ou égaux à ceux présents dans $E(\eta, u_\alpha)$.

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = F(\eta, u_\alpha) + F_2(\eta, u_\alpha, u_{\alpha t})$$

$$\text{en introduisant la variable } U \text{ définie par : } U = \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} + h \left[b_1 h \frac{\partial^3 u_\alpha}{\partial x^2 \partial t} + b_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(h \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} \right) \right]$$

et en notant : $u_{\alpha} = \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial t}$ la dérivée en temps de la vitesse u_{α} .

Comme précédemment, le terme : $F(\eta, u_{\alpha}) = - \left[g \frac{\partial \eta}{\partial x} + u_{\alpha} \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x} \right]$

correspond à la version de Nwogu (1993) et le terme supplémentaire vaut :

$$F_2(\eta, u_{\alpha}, u_{\alpha}) = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2} (z_{\alpha}^2 - \eta^2) u_{\alpha} \frac{\partial^2 u_{\alpha}}{\partial x^2} + (z_{\alpha} - \eta) u_{\alpha} \frac{\partial^2 (hu_{\alpha})}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial (hu_{\alpha})}{\partial x} + \eta \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x} \right)^2 \right] \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left[- \frac{1}{2} \eta^2 \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x} - \eta \frac{\partial (hu_{\alpha})}{\partial x} \right]$$

Ces équations de Wei *et al.* (1995) sont un peu plus délicates à manipuler et à modéliser numériquement, étant donné qu'elles contiennent davantage de termes non-linéaires, ainsi que des dérivées spatio-temporelles d'ordres plus élevés.

Dans le rapport de recherche [RR43], j'ai analysé les propriétés de dispersion des équations linéarisées à fond plat et exposé les méthodes et schémas numériques utilisées pour la résolution des équations non-linéaires dans le cas d'un fond variable (logiciel **BSQ**). De façon très succincte, le modèle numérique développé peut traiter des maillages irréguliers par une approche différences finies. Les dérivées d'ordre 1 sont calculées à l'aide d'un schéma d'ordre 4 et l'intégration en temps est réalisée à l'aide d'un schéma prédictor-correcteur d'ordre 4, de Adams-Bashforth-Moulton (voir le rapport de recherche [RR43] pour les détails sur les aspects numériques).

Les cas de validation que j'ai réalisés montrent que le modèle reproduit bien le shoaling d'une onde solitaire jusqu'à son déferlement (résultats non reproduits ici, mais consultables dans [RR43]). On retrouve sur ces cas des comportements similaires à ceux présentés par Wei *et al.* (1995) sur les mêmes cas.

Par ailleurs, le modèle a été appliqué aux expériences en canal à houle réalisées à Delft Hydraulics (Pays-Bas) par Dingemans (1994) dans le cadre d'un projet de recherche européen (voir aussi Luth *et al.*, 1994). Les conditions des expériences sont rappelées sur la Figure 21, qui présente également les conditions de vagues incidentes (extraits des signaux mesurés) pour trois cas-tests en houle régulière non-déferlante (cas A : H=2 cm et T=2.02 s / cas B : H=2.9 cm et T=2.525 s / cas C : H=4.1 cm et T=1.01 s). Ces cas-tests ont servi (et servent toujours) de référence pour évaluer les capacités des modèles de propagation de vagues en zone côtière. Ils sont très discriminants car les effets non-linéaires et dispersifs sont importants, modifiant très fortement le profil quasi-sinusoïdal des vagues incidentes.

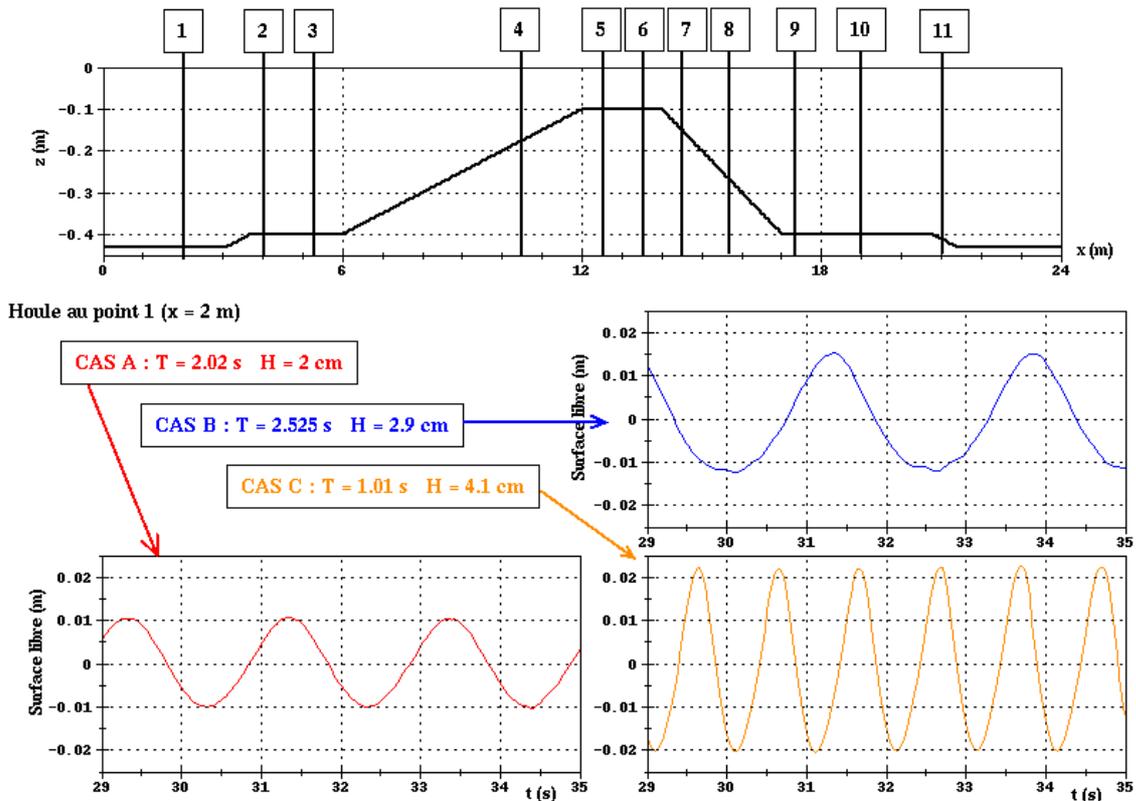


Figure 21 : Schéma descriptif des expériences en canal à houle de Dingemans (1994) et profils temporels des signaux de houle incidente pour trois cas-tests.

La comparaison des résultats des simulations **BSQ_V1P1** et **BSQ_V2P0** aux mesures est donnée sur la Figure 22 pour le cas A (période 2.02 s et hauteur 2 cm) et sur la Figure 23 pour le cas C (période 1.01 s et hauteur 4.1 cm). Sur le cas A, on voit clairement l'effet du haut-fond qui modifie fortement le profil de houle, en transférant de l'énergie vers les harmoniques supérieures lors du shoaling sur la pente et le replat (sondes 1 à 6). Après le haut-fond, ces harmoniques (jusqu'alors liés) se propagent librement avec leur propre célérité. Une bonne reproduction de ces effets par un modèle numérique exige de la part du modèle employé d'excellentes propriétés de dispersion. Ceci est bien restitué par les modèles, notamment au niveau des sondes 8 et 9. Sur les deux dernières sondes 10 et 11, les écarts par rapport aux mesures sont plus importants, même si l'allure générale du signal de surface libre est bien restituée. Sur ce cas-là, il n'est pas évident de distinguer une amélioration apportée par la version **BSQ_V2P0**, mais ce n'est pas véritablement surprenant car le signal de houle est de faible amplitude et les effets non-linéaires restent modérés. Par comparaison, il faut imaginer qu'un modèle linéaire classique donnerait tout au long de la propagation des vagues sur et après la barre un profil de surface libre sinusoïdal de période constante 2.02 s, ce qui, à l'évidence, est très éloigné des profils réels observés sur les sondes 7 à 11 et justifie pleinement le recours à des modèles non-linéaires.

Pour le cas C (cf. Figure 23), la période vaut la moitié de celle du cas A et la hauteur de houle est doublée. La phase de shoaling sur la barre est bien simulée par les deux modèles, la version **BSQ_V2P0** approchant mieux le profil mesuré aux sondes 6 et 7. Après la barre (sondes 8 à 11), l'accord avec les mesures est moins bon, ce qui n'est pas étonnant, vu que la période des vagues est courte. A l'évidence, il serait nécessaire d'augmenter encore les propriétés de dispersion du modèle numérique pour représenter la propagation des harmoniques libérés par la barre pour cette courte période. Pour bien traiter ce cas, il faudrait ajouter des termes d'ordres plus élevés en μ^4 , comme l'ont fait par exemple Gobbi et Kirby (1999) ou Madsen et Schäffer (1998, 1999).

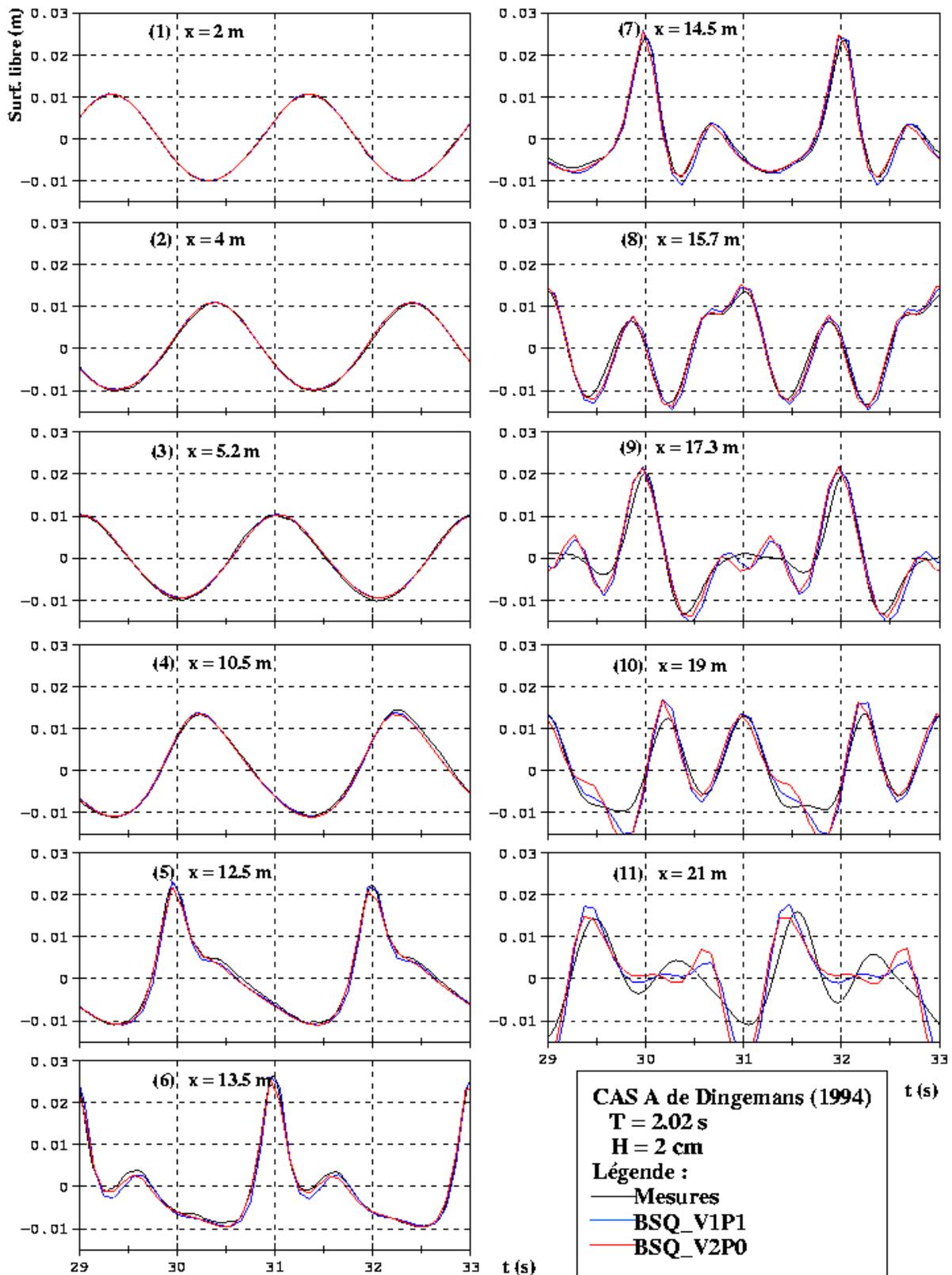


Figure 22 : Résultats d'application des modèles BSQ_V1P1 (équations de Boussinesq de Nwogu, 1993) BSQ_V2P0 (équations de Boussinesq de Wei *et al.*, 1995) à l'essai A ($H = 2$ cm et $T = 2.02$ s) des expériences en canal à houle de Dingemans (1994).

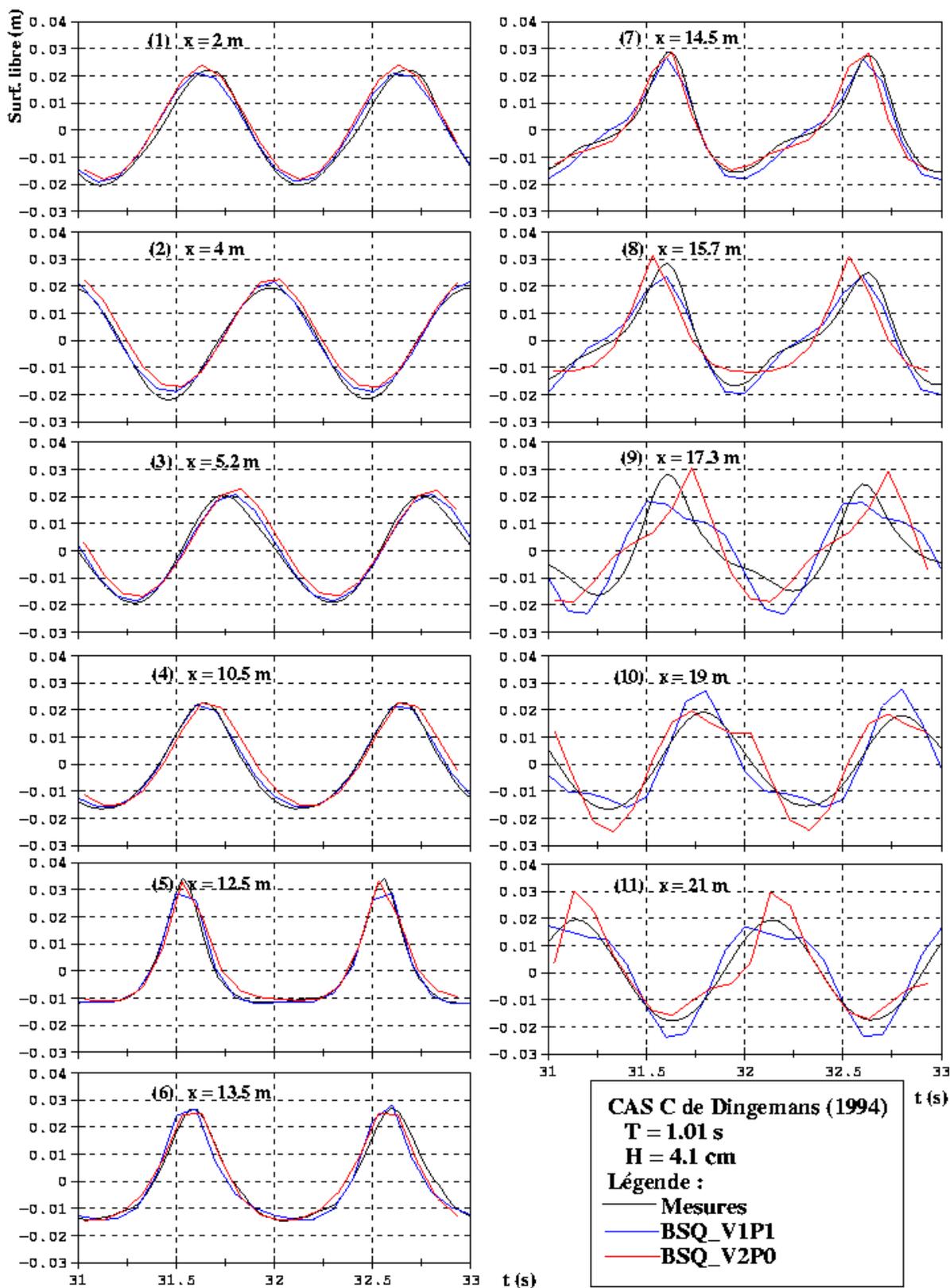


Figure 23 : Résultats d'application des modèles BSQ_V1P1 (équations de Boussinesq de Nwogu, 1993) BSQ_V2P0 (équations de Boussinesq de Wei *et al.*, 1995) à l'essai C ($H = 4.1$ cm et $T = 1.01$ s) des expériences en canal à houle de Dingemans (1994).

En 2002, j'ai introduit une modélisation du déferlement dans le code **BSQ**, sur la base des travaux de Kennedy *et al.* (2000). Le terme de dissipation suivant est ajouté au membre de droite de l'équation de quantité de mouvement du modèle de Boussinesq :

$$D_b = \frac{1}{h + \eta} \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial}{\partial x} ((h + \eta) u_x) \right]$$

où le paramètre de viscosité ν est calculé par l'expression :

$$\nu = B \delta_b^2 (h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

où δ_b est un coefficient fixé à la valeur 1.2 et B est un paramètre de transition variant progressivement de 0 à 1 à l'initiation du déferlement (Kennedy *et al.*, 2000). Cette modélisation de la dissipation d'énergie par déferlement est relativement simple. Des modèles plus sophistiqués existent reposant sur le concept de rouleau de déferlement (Schäffer *et al.*, 1993 ; Cienfuegos, 2005) ou des modèles de turbulence plus évolués (Nwogu, 1996 ; Veeramony et Svendsen, 1998), mais ces modèles n'ont pas encore été considérés dans mes travaux.

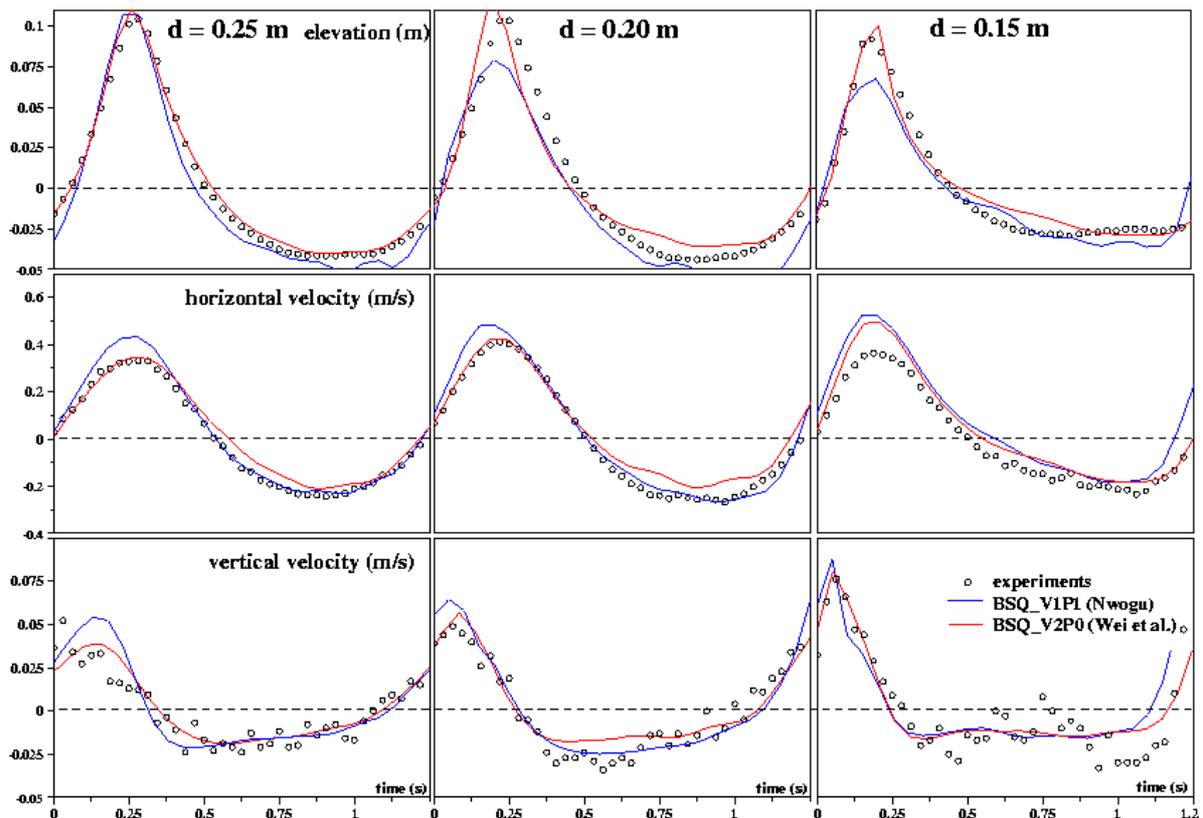


Figure 24 : Résultats d'application des modèles BSQ_V1P1 (équations de Boussinesq de Nwogu, 1993) BSQ_V2P0 (équations de Boussinesq de Wei *et al.*, 1995) à des expériences en canal à houle réalisées à l'Université de Caen Basse Normandie pour un cas de déferlement de type glissant sur une plage plane de pente 1/20. Trois positions sont considérées correspondant à 3 profondeurs décroissantes sur la pente (une position par colonne de graphes). Les graphes du haut représentent l'élévation de surface libre, ceux du milieu la vitesse horizontale et ceux du bas la vitesse verticale. Le déferlement débute pour une profondeur de 0.22 m (soit entre les deux premières positions représentées sur la figure).

Le modèle **BSQ** avec déferlement a été utilisé dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC pour modéliser les expériences en canal à houle réalisées à l'université de Caen Basse Normandie avec Marilyne Luck, dans le but d'étudier la cinématique des vagues en faible profondeur d'eau [RR51]. Nous avons notamment obtenu de bons résultats pour la prédiction des vitesses orbitales dues à la houle avant et après le déferlement [AC24] (cf. Annexe 7). Un exemple de résultat cette présentation est reproduit sur la Figure 24. Sur ce cas, on observe que les équations de Wei *et al.* (1995) (code **BSQ_V2P0**) donnent des résultats nettement meilleurs dans la zone de déferlement.

Actuellement, je travaille à améliorer la robustesse du modèle de déferlement, tout en cherchant à améliorer les propriétés de dispersion et de non-linéarité des équations résolues, en considérant des termes d'ordres supérieurs par le biais d'une approche différente. Cette approche de modélisation paraît prometteuse pour créer les bases de la prochaine génération de modèles déterministes de vague en zone côtière et portuaire, qui devront être non-linéaires et dispersifs, tout en prenant en compte les effets liés à la présence d'un champ de courant ambiant et les processus de dissipation d'énergie comme le frottement sur le fond et le déferlement.

Depuis mi-2005, je travaille sur ce sujet avec Jacques Sainte-Marie (chercheur au CETMEF-DRIM, anciennement à l'INRIA) dans le cadre de l'Equipe Commune de Recherche en Hydraulique Fluviale et Montée, montée en collaboration entre le CETMEF et EDF R&D LNHE. Jacques Sainte-Marie examine en profondeur les aspects théoriques (dérivation des équations à partir des équations de Navier-Stokes, analyse des différentes hypothèses faites au cours de la dérivation) et numériques des équations de Boussinesq étendues, avec la perspective de développer un modèle bidimensionnel en plan (2DH) qui pourrait être utilisé pour les applications d'ingénierie côtière et les étude d'agitation portuaire.

B.4.2.1.3. Modélisations non-linéaires – Approche potentielle

Début 2006, dans le cadre d'un projet que j'encadre à l'Ecole Centrale Paris (ECP), j'ai proposé aux élèves d'étudier une autre approche de modélisation pour les vagues non-linéaires. Plutôt que de considérer des équations intégrées sur la verticale (comme les équations de Boussinesq au § précédent), l'idée est de travailler en 3D (ou en 2DV) sur les équations complètes. On se place dans le cas d'un écoulement irrotationnel pour un fluide non-visqueux. Dans ce cas, il existe un potentiel des vitesses $\phi(x,y,z,t)$ satisfaisant l'équation de Laplace dans tout le domaine fluide :

$$\Delta\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{dans tout le domaine fluide } -h(x,y) \leq z \leq \eta(x,y)$$

On se limite dans la présentation (succincte) ci-après au cas 2DV (une seule dimension horizontale, notée x , et une dimension verticale, notée z), cas pour lequel l'équation de Laplace s'écrit :

$$\Delta\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{dans tout le domaine fluide } -h(x) \leq z \leq \eta(x)$$

Le problème est complété par des conditions aux limites :

- Conditions de parois latérales, sur les bords du domaine modélisé (conditions non-détaillées ici): génération des vagues en conditions incidentes, réflexion totale ou partielle, radiation, absorption par une technique d'éponge numérique, etc. Ces conditions sont de type Dirichlet ou Neumann (ou mixtes) sur le potentiel des vitesses.
- Condition d'imperméabilité au fond :

$$\left. \frac{\partial\phi}{\partial z} \right|_{z=-h} + \left. \frac{\partial\phi}{\partial x} \right|_{z=-h} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \text{en } z = -h(x)$$

- Conditions de surface libre. Ces conditions sont non-linéaires, ce qui constitue la difficulté principale du problème à résoudre, combinée au fait que la surface libre sur laquelle s'appliquent ces conditions est elle-même une inconnue du problème et évolue au cours du temps. Il y a d'une part une condition cinématique de surface libre :

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=\eta} + \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{z=\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \text{en } z = \eta(x)$$

et d'autre part une condition dynamique de surface libre, écrite ici en supposant par convention que la pression atmosphérique est nulle en surface :

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{z=\eta} + \frac{1}{2} \left(\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{z=\eta} \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=\eta} \right)^2 + g\eta = 0 \quad \text{en } z = \eta(x)$$

Le système d'équations ci-dessous est classique pour les vagues non-linéaires (voir par exemple Dingemans (1997) ou Fenton (1999)). Il peut être résolu par différentes méthodes numériques, dont la plus utilisée est sans doute la méthode des éléments frontières (BEM ou BIEM en Anglais), utilisée par de nombreux auteurs : voir en particulier les travaux de Grilli et collaborateurs sur cette méthode, par exemple Crilli *et al.* (1989), Grilli (1993), ou plus récemment Grilli *et al.* (2001) pour des vagues non-linéaires en 3D.

L'approche choisie ici est un peu différente. Encore peu employée dans le domaine des vagues, elle repose sur la méthode des solutions fondamentales (MFS pour « Method of Fundamental Solutions » en Anglais) combinée à l'utilisation de fonctions de base radiales (RBF pour « Radial Basis Functions » en Anglais) (Wu *et al.*, 2006).

Le principe de la méthode est d'utiliser le fait que l'on connaît la forme de la solution fondamentale de l'équation de Laplace, qui s'écrit en 2D :

$$q_j(x, z) = \ln(r_j(x, z))$$

où $r_j(x, z) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (z - z_j)^2}$ est la distance du point (x, z) considéré dans le domaine fluide à un point source donné (x_j, z_j) . Les fonctions q_j sont choisies comme fonctions de base radiales et leurs centres (x_j, z_j) sont placés en dehors du domaine fluide. De ce fait, on ne rencontre jamais de singularité dans l'évaluation de ces fonctions au cours du calcul.

La solution de l'équation de Laplace pour le potentiel est écrite sous la forme suivante :

$$\phi(x, z) = \sum_{j=1}^N \alpha_j q_j(x, z)$$

où les coefficients α_j ($j = 1, \dots, N$) sont les inconnues du problème, qui sont obtenues en résolvant un système de N équations obtenues en considérant N points sur les limites du domaine de calcul (méthode de co-localisation). Dans la mise en œuvre proposée par Wu *et al.* (2006) et dont nous nous sommes inspirés, les conditions de surface libre cinématique et dynamique sont utilisées pour mettre à jour à chaque pas de temps la cote de la surface libre $\eta(x, t)$, ainsi que le potentiel de surface libre. De sorte qu'à une date donnée, on connaît sur toutes les frontières du domaine soit la valeur du potentiel (condition de type Dirichlet), soit sa dérivée normale (condition de type Neumann).

Il est à noter d'ailleurs que la condition dynamique de surface libre telle que rappelée ci-dessus doit en fait être modifiée pour être écrite pour la variable « potentiel de surface libre ». On définit cette variable par : $\phi_s(x, t) = \phi(x, z = \eta(x, t), t)$ et on obtient alors l'équation suivante pour l'évolution en temps du potentiel de surface libre (cf. par exemple Dingemans, 1997 ; Fenton, 1999) :

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{z=\eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right)^2 \right) + g\eta - \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

Cette modification n'a visiblement pas été considérée par Wu *et al.* (2006), et elle peut avoir une certaine incidence sur les résultats, en particulier pour les cas où les effets non-linéaires sont significatifs (cas du shoaling d'une onde solitaire jusqu'à son déferlement par exemple, sur lequel travaillent les élèves de l'ECP suivant le projet).

On aboutit ainsi à un système d'équations linéaires sur les coefficients α_j , qui se résout de façon classique. La matrice du système est pleine, mais pas symétrique ; nous avons utilisé pour la résolution une méthode de décomposition L-U ou une méthode de Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) pour les cas où la matrice est quasi-singulière (Press *et al.*, 1992).

A titre d'illustration des potentialités de la méthode, la maquette de logiciel développée au cours de ce projet à l'ECP début 2006 a été appliquée sur les cas des expériences de Dingemans (1994), déjà utilisées au paragraphe précédent pour examiner les résultats des modélisations de type « Boussinesq étendues ». Les premiers résultats obtenus avec les élèves (mars 2006) sont tracés sur la Figure 25 pour le cas A ($H = 0.02$ m et $T = 2.02$ s) des expériences en canal à houle de Dingemans (1994).

On observe une très bonne concordance avec les mesures expérimentales, même après la barre. Les résultats obtenus par cette méthode sont visuellement de qualité identique à celle des résultats du code **BSQ_V2P0** (équations de Boussinesq de Wei *et al.*, 1995) sur la pente (phase de shoaling) et le replat, mais ils sont meilleurs après la barre, en particulier pour les 3 dernières sondes. La propagation des harmoniques libérés au passage de la barre est nettement mieux traitée par cette méthode.

Dingemans (1997, § 5.9.3) reproduit également des résultats d'une méthode potentielle développée par Broeze (1993) et appliquée sur ce cas, montrant une qualité de résultats comparable à celle que nous avons obtenue ici. A l'évidence, il s'agit d'une approche prometteuse pour la modélisation des vagues non-linéaires sur laquelle j'envisage de poursuivre des recherches et développements.

Plus généralement, on observe actuellement dans la littérature scientifique un essor des méthodes sans maillage (« meshless » ou « meshfree methods ») qui sont particulièrement indiquées pour la modélisation des vagues en profondeur finie (équation de Laplace ou d'Helmholtz). Cet axe de travail constitue une de mes pistes prioritaires de recherche pour les années ultérieures en matière de modélisation déterministe des vagues en zone côtière et portuaire.

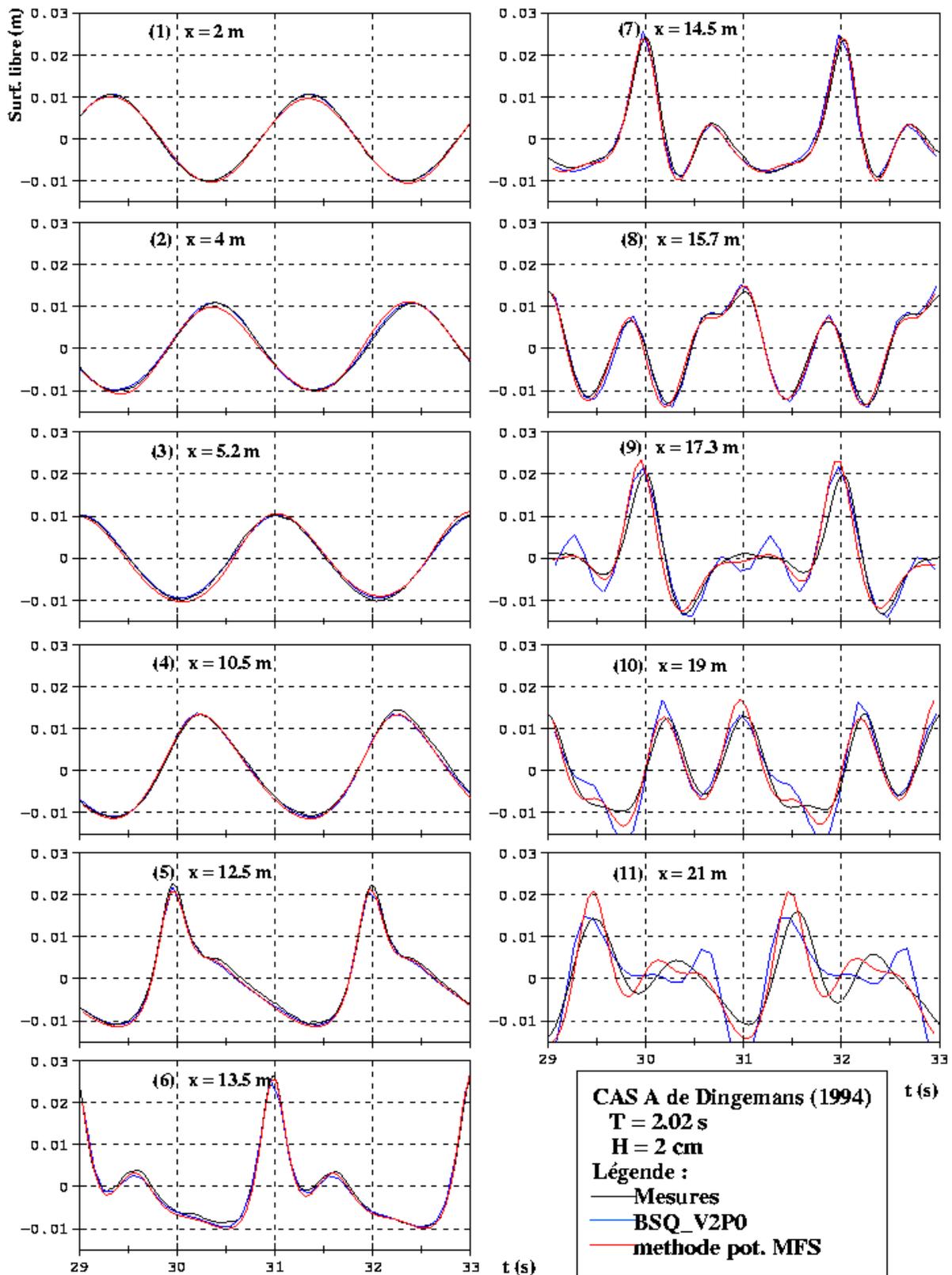


Figure 25 : Résultats d'application de la méthode potentielle avec solutions fondamentales et comparaison aux résultats de BSQ_V2P0 (équations de Boussinesq de Wei *et al.*, 1995) pour l'essai A ($H = 2$ cm et $T = 2.02$ s) des expériences en canal à houle de Dingemans (1994).

B.4.2.2. Modèles spectraux de propagation des vagues en zone côtière

B.4.2.2.1. Modélisations linéaires

- **Etude particulière de la réfraction et du shoaling**

En 1995-1996, dans le cadre du développement de la première version du code **TOMAWAC**, j'ai étudié et modélisé les effets de réfraction et de shoaling pour un spectre directionnel d'état de mer en incidence sur une bathymétrie cylindrique (profil de plage constant dans la direction longshore) à l'aide de la théorie linéaire pour la cinématique des vagues.

Sur la base de la théorie des rayons (effets de diffraction négligés), j'ai développé un programme simple (code **REFRA_3D**), qui fournit une solution analytique de référence pour le cas où il n'y a pas de dissipation d'énergie et qui a été utilisé pour valider **TOMAWAC**. Il permet de modéliser l'évolution d'une houle aléatoire et multidirectionnelle d'incidence quelconque par rapport à la côte. Le modèle et ses cas-tests de validation sont présentés dans le rapport de recherche [RR25]. Cet outil a été utilisé lors de la validation de **TOMAWAC** pour vérifier la bonne programmation de la propagation en espace, de la réfraction et du shoaling (cf. dossier de validation [RR27]).

- **Etude particulière de la diffraction dans les modèles spectraux d'états de mer**

Dans le cadre de la Convention Biparti EDF-Ministères, je me suis intéressé à la possibilité d'étendre l'approche spectrale de modélisation des états de mer (cf. § B.3.1) au cas de la diffraction derrière des îles ou des hauts-fonds. Les modèles spectraux instationnaires de "troisième génération" comme **TOMAWAC** ne prennent pas en compte à l'heure actuelle le phénomène de diffraction des vagues derrière des obstacles émergés (petites îles, plate-formes, jetées portuaires) ou au passage de hauts-fonds. En effet, l'approche de modélisation retenue reposant sur la notion de phases moyennées se prête mal à la modélisation de ce processus et n'est en théorie pas adaptée.

Néanmoins, des méthodes approchées existent et peuvent être envisagées pour représenter au moins les effets principaux de la diffraction (Mase, 2001 ; Holthuijsen *et al.*, 1997, 2002, 2003). On précise qu'il ne s'agit pas ici d'obtenir un outil utilisable pour des problématiques d'agitation portuaire car seules des modélisations déterministes (ou à résolution de phases) sont capables de modéliser correctement la réflexion et la diffraction autour d'obstacles.

Pour valider la possibilité d'implanter de façon opérationnelle ce nouveau processus physique dans un modèle spectral à phases moyennées, une étude de faisabilité a été engagée en 2001-2002, avec l'aide de Nicolas Cosqueric, élève-ingénieur ENSHEEIT en stage de fin d'étude, et nous avons abordé les points suivants :

- a. Etude théorique et bibliographique. Analyse de la faisabilité de la prise en compte de la diffraction en modifiant les vitesses de propagation de l'énergie de la houle en fonction du nombre d'onde effectif K , déduit du nombre d'onde k , issu de la relation de dispersion, par l'équation eikonale. Cette approche permet une formulation modifiée de l'équation de conservation du spectre d'énergie (ou de l'action d'onde).
- b. Implantation algorithmique de la formulation retenue, suivant les résultats de l'étape (a), d'abord dans une maquette informatique spécifique en différences finies sur la base des travaux de Mase (2001), puis dans un second temps dans le logiciel **TOMAWAC**.
- c. Tests et validation sur deux cas-tests (avec des solutions de référence connues).

Le codage de la solution proposée a été réalisé dans **TOMAWAC**. Sur les cas d'une brèche et d'une bosse immergée de forme elliptique (essais en cuve de Vincent et Briggs, 1989), la diffraction de la houle est assez bien représentée, sous réserve de limiter le calcul aux plus fortes valeurs du spectre de houle. En effet, les faibles valeurs du spectre de houle introduisent des instabilités dans le calcul du champ de houle. Ces problèmes numériques sont liés au calcul des dérivées secondes en espace des composantes spectro-angulaires de l'énergie des vagues. Le maillage en espace utilise des éléments finis triangulaires linéaires (de type P1), pour lesquels le calcul de dérivées secondes en espace est

assez imprécis. L'algorithme proposé montre donc certaines limitations, qui justifient des recherches complémentaires. Les résultats sont présentés en détail dans le rapport de recherche [RR52].

Suite à cette première étude, dans le cadre d'une collaboration avec Nigel Tozer de HR Wallingford, nous avons lancé depuis début mai 2005 une bourse de recherche Marie-Curie (financement européen) sur ce sujet (cf. § A.6.2). Le travail est réalisé par Ekaterini Kriezzi que je co-encadre avec Nigel Tozer. Cette action de recherche vise à résoudre les difficultés rencontrées lors de l'étude de faisabilité et d'aboutir à une solution opérationnelle et robuste pouvant être utilisée avec confiance sur les études appliquées. Début 2006, des progrès significatifs ont été obtenus, à la fois sur le plan théorique pour mieux prendre en compte les effets de diffraction, et au plan numérique pour améliorer la précision des calculs nécessaires (dérivées secondes en espace en particulier).

B.4.2.2.2. Modélisations non-linéaires

L'extension de la modélisation spectrale des états de mer vers le domaine côtier a représenté un axe majeur de mes travaux de recherches entre 1995 et 1999, notamment par le biais de la thèse de Françoise Becq-Girard, que nous avons lancée et encadrée avec Philippe Forget du LSEET-LEPI (Becq, 1998) (voir aussi § A.6.2). Outre le déferlement (discuté au § B.4.3), notre intérêt s'est porté essentiellement sur les interactions non-linéaires de faible profondeur d'eau et à la modélisation de leurs effets sur le spectre de vagues. En faible profondeur d'eau, ces interactions sont quasi-résonantes et s'effectuent entre trois composantes (« triad interactions » en Anglais).

Ces effets ont dans un premier temps été étudiés par Françoise Becq-Girard à l'aide d'approches déterministes formulées dans le domaine spectral (voir le rapport de recherche [RR32]), puis à l'aide de modélisations dites stochastiques, c'est à dire faisant abstraction de l'information sur les phases de l'état de mer. Plusieurs modélisations plus ou moins paramétriques ont été implantées dans des codes de recherche 1D et comparées à des essais en laboratoire. Nous avons notamment réalisé dans le cadre de cette thèse une campagne spécifique d'essais en canal à houle, spécialement destinée à mettre en évidence ces effets non-linéaires [AJ02] (article reproduit en Annexe 6). Cette campagne expérimentale est présentée brièvement au § B.2.2.4, avec des résultats d'analyses spectrales non-linéaires effectuées à cette occasion.

Ensuite certains modèles ont été étendus en 2 dimensions d'espace et comparés à des expériences en canal et en cuve à houle [AC17]. Enfin, deux solutions opérationnelles ont été retenues et mises en forme pour être utilisées dans le code **TOMAWAC** :

- l'approche très paramétrique LTA (Lumped Triad Approximation) de Eldeberky et Battjes (1995) et Eldeberky (1996), limitée aux auto-interactions et dans laquelle la bi-phase est donnée par une expression paramétrique en fonction du nombre d'Ursell (cf. § B.2.2.3),
- un nouveau modèle SPB (Stochastique Paramétrique basé sur les équations de Boussinesq) développé par Françoise Becq-Girard dans le cadre de sa thèse, qui permet de prendre en compte les interactions colinéaires et non-colinéaires et qui donne de meilleurs résultats sur les cas-tests réalisés (mais au prix d'un temps calcul plus important).

Ces deux modèles ont été capitalisés dans la version industrielle du code **TOMAWAC**, telle que diffusée à l'extérieur du LNHE [RR46]. Des exemples de résultats de simulation sont présentés sur la Figure 26 et comparés à des résultats d'expériences en laboratoire réalisées pour un spectre incident bimodal. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications dans des conférences nationales [AC19] et internationales [AC12] [AC17] et à un article dans la revue Coastal Engineering en 1999 [AJ02] (article reproduit en Annexe 6).

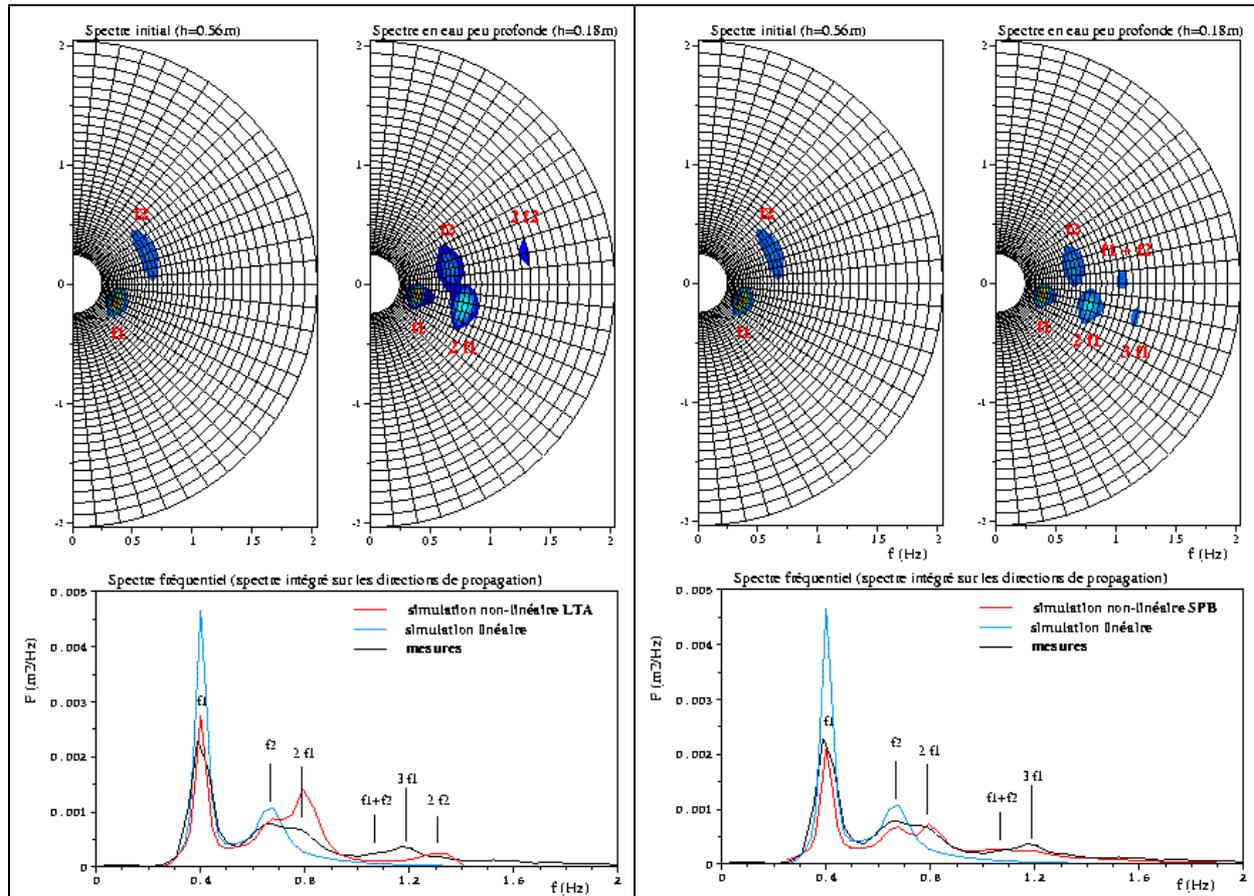


Figure 26 : Modélisation des interactions non-linéaires entre triplets de fréquences pour un spectre bimodal simulé en bassin à houle. Comparaison des résultats d'une simulation linéaire (courbe bleue) avec les modèles non-linéaires LTA (à gauche) et SPB (à droite). Calculs réalisés avec le logiciel TOMAWAC.

B.4.2.3. Modèles probabilistes de propagation des vagues en zone côtière

Dans cette catégorie de modèles, on s'intéresse à la distribution des hauteurs de vagues (cf. Figure 20), ainsi qu'éventuellement aux distributions conjointes hauteurs-périodes et hauteurs-directions de propagation. Chaque classe de hauteur ou chaque couple (hauteur, période) d'une distribution connue au large est propagée vers la côte à l'aide d'un modèle monochromatique basé sur l'équation de conservation du flux d'énergie (ou d'action en présence de courant). Le déferlement et le frottement sur le fond peuvent être pris en compte, ainsi que l'effet d'un courant sur les vagues.

Il est fait l'hypothèse que le fond est localement plat et que l'on peut utiliser localement les théories non-linéaires à fond plat vues au § B.4.1.1. On résout alors une équation de conservation du flux d'énergie des vagues en supposant que toutes les grandeurs de houle en un point peuvent être déterminées à partir de la valeur locale de ce flux à l'aide d'une théorie non-linéaire de type Stokes ou cnôïdale. Si on note F le flux d'énergie des vagues, θ l'angle de la direction d'incidente par rapport à la normale à la côte et D_b la dissipation d'énergie (ici on ne considère que le déferlement), l'équation d'évolution (en conditions stationnaires) s'écrit :

$$\frac{\partial(F \cos \theta)}{\partial x} = D_b$$

Cette approche est assez utilisée dans la pratique (voir par exemple Hamm (1995)) : on utilise en général un couplage entre une théorie de Stokes (d'ordre 1 ou 3 en général, parfois 5) pour les grandes profondeurs avec une théorie cnoidale (d'ordre 1, mais plus souvent 2, voire 3) pour les faibles profondeurs. Le passage d'une théorie à une autre s'effectue à l'aide d'un critère sur le nombre d'Ursell. Il existe aussi quelques modèles qui utilisent la même approche, mais avec la théorie de la fonction de courant (valable elle pour toutes les profondeurs).

Néanmoins, cette approche de modélisation présente des limitations importantes qui tiennent à ses hypothèses de base : le fait d'utiliser localement une théorie de houle à fond plat fait que les profils de houle calculés (ainsi que les profils de vitesses et d'accélération) gardent toujours une symétrie par rapport à un plan vertical, alors qu'il est bien connu qu'en faible profondeur d'eau, sous l'action des effets non-linéaires, les vagues perdent cette symétrie pour se rapprocher d'un profil en dent de scie. De plus, cette classe de méthodes ne permet pas de représenter des libérations d'harmoniques au passage d'un haut-fond, ni la propagation d'ondes libérées qui se déplacent à leurs propres célérités. En conséquence, l'emploi de ce type de méthodes ne me paraît pas recommandé, surtout si le profil bathymétrique n'est pas monotone.

Au cours de mes travaux, j'ai supervisé le développement et la validation par Marilyne Luck au cours de son stage de fin d'étude d'un modèle de ce type pour les cas de propagation de houle sur un profil de plage : code **PROFILH** (Luck, 2003). Ce modèle repose sur l'utilisation de théories analytiques de houle à fond plat (cf. § B.4.1.1) pour passer du flux d'énergie à la hauteur des vagues et pour calculer la vitesse de groupe. Pour l'instant le modèle **PROFILH** a été utilisé uniquement en conditions de vagues monochromatiques et les efforts ont porté sur la modélisation de la dissipation d'énergie par déferlement et du set-up. L'extension à la houle irrégulière (par la prise en compte d'une distribution des hauteurs de houle au large) est envisagée et ne devrait pas poser de difficulté majeure.

B.4.3. Déferlement des vagues et conséquences sur l'hydrodynamique côtière

En zone côtière, le déferlement des vagues est un processus déterminant, à la fois pour l'évolution des vagues (dont il dissipe une grande partie de l'énergie) et pour l'hydrodynamique côtière dont il constitue un « moteur » souvent dominant. Dans les paragraphes précédents, j'ai déjà mentionné sa prise en compte dans les modèles de propagation de vagues déterministes (cf. § B.4.2.1), spectraux (cf. § B.4.2.2) ou probabilistes (cf. § B.4.2.3).

Outre la dissipation d'une partie de l'énergie des vagues, les principaux effets du déferlement sont :

- Production de turbulence et de vorticité (dans le déferlement, l'écoulement ne peut plus être supposé irrotationnel),
- variations du niveau marin moyen au voisinage du point de déferlement (« set-up » et « set-down » en Anglais),
- génération d'un courant de retour dans le profil (« undertow » en Anglais),
- génération de courants littoraux, parallèles à la côte (« longshore currents » en Anglais),
- entraînement d'air et aération de la masse d'eau.

Au cours de mes recherches, j'ai travaillé à la fois sur la modélisation du déferlement dans les différents codes de propagation de houle présentés au § B.4.2 et sur l'étude des effets du déferlement. Certains de ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Françoise Becq-Girard (1998).

Avec Françoise Becq-Girard, nous avons en particulier étudié, implanté et comparé cinq modèles de déferlement pour des vagues irrégulières dans les modèles spectraux de propagation d' tats de mer :

1. modèle de Battjes et Janssen (1978)
2. modèle de Thornton et Guza (1983)
3. modèle de Roelvink (1993)
4. modèle de Izumiya et Horikawa (1984)
5. modèle de Larson (1995)

Les trois premiers modèles sont des modèles spectraux paramétriques introduit pour l'étude des vagues aléatoires. Le principe général des modèles spectraux paramétriques consiste à développer une expression pour la dissipation totale de l'énergie de la houle en combinant un taux de dissipation par vague déferlante avec une probabilité de déferlement. Le quatrième modèle est un modèle de turbulence développé initialement pour l'étude de la houle régulière, mais qui peut être généralisé au cas des houles aléatoires. Le cinquième modèle est de type probabiliste, plutôt indiqué pour une approche de modélisation probabiliste.

Ces modèles de déferlement ont été implantés et comparés, d'abord dans une maquette de logiciel monodimensionnel [RR29], puis dans le code **TOMAWAC** [RR46] [AC10]. Pour cette extension, la version spectro-directionnelle du terme de dissipation par déferlement bathymétrique repose sur l'hypothèse que le déferlement ne modifie pas la répartition fréquentielle et directionnelle de l'énergie du spectre de houle. Cette extension de **TOMAWAC** vers la zone de déferlement a été largement utilisée pour les études appliquées depuis son implantation et a donné toute satisfaction [RE05] [RE07] [RI06] [RI07] [RI08].

Parmi ces modèles, celui de Izumiya et Horikawa (1984) a été implanté par Marilyn Luck dans le modèle non-linéaire **PROFILH** présenté au § B.4.2.3 et utilisé pour reproduire des essais en canal à houle (Luck, 2003). Plusieurs de ces modèles ont aussi été implantés dans le logiciel de modélisation déterministe **REEF-2000** présenté au § B.4.2.1.1.

En parallèle, nous avons travaillé à la prise en compte des variations du niveau moyen de mer du fait du set-up, en résolvant de façon simultanée une équation sur la quantité de mouvement à partir des contraintes de radiation dues au champ de vagues. récemment, nous avons approfondi la question de la circulation induite par le déferlement, en nous intéressant à la prédiction du courant de retour et à son profil sur la verticale. Nous avons pour cela repris les expériences réalisées avec Christophe Chevalier à l'Université de Caen Basse Normandie et mis en œuvre un modèle simple de prédiction, basé sur les résultats de Rattanapitikon et Shibayama (2000). Quelques résultats sont présentés sur la Figure 27 extraite d'un article de conférence très récent [AC33]. Il s'agit de travaux en cours qui ont vocation à être poursuivis et notamment généralisés à des cas de bathymétries quelconques en 3D.

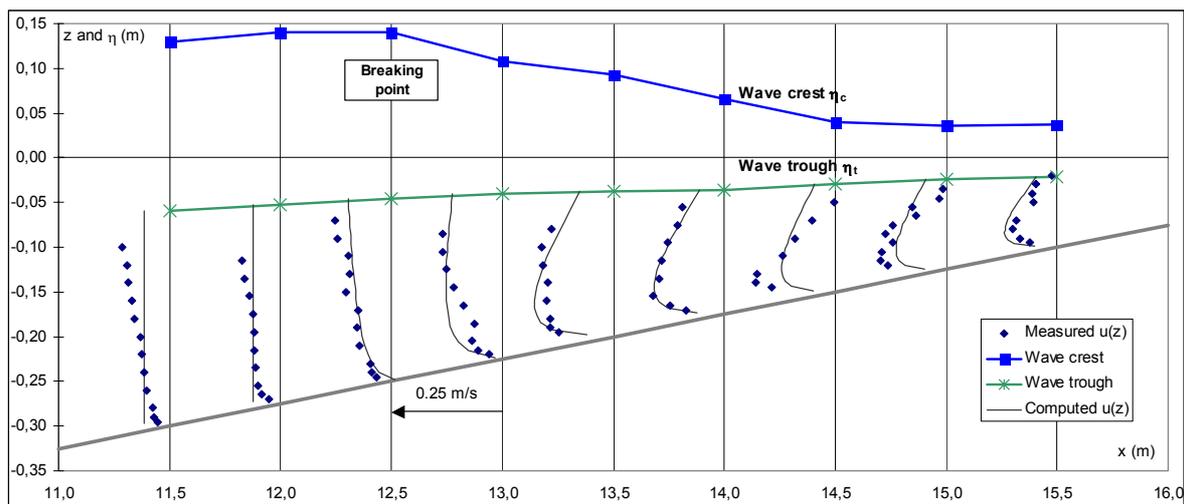


Figure 27 : Application d'une méthode de prédiction du courant de retour dans la zone de déferlement sur le cas-test HR1 (déferlement glissant) des expériences en canal à houle réalisées à l'Université de Caen (les lignes verticales indiquent les positions des profils de mesure).

Le déferlement est un processus complexe à appréhender et à modéliser, car il est très fortement non-linéaire, localisé en espace, intense et accompagné d'effets qui modifient l'hydrodynamique locale (génération de courants, surélévation du niveau moyen, etc.). Bien que les connaissances scientifiques et modèles numériques progressent, le déferlement reste toujours un sujet de recherche.

On peut distinguer deux niveaux de recherche concernant le déferlement :

- **Une échelle fine destinée à l'étude détaillée du mécanisme de déferlement d'une vague (ou de quelques vagues successives) afin de mieux comprendre les processus.** Des modélisations diphases (telles que la méthode Volume of Fluid (VOF) par exemple) ou des approches totalement lagrangienne (telles que la méthode Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) par exemple) rendent aujourd'hui possible des premières simulations complètes d'une vague déferlante, en 2D, et bientôt en 3D. Ces modèles relèvent cependant du domaine de la recherche exploratoire et sont encore largement perfectibles (modélisation de la turbulence, représentation de l'entraînement de bulles d'air, prise en compte des interactions avec les courants de déferlement, etc.). Des campagnes de mesure in situ et en laboratoire sont nécessaires pour recueillir des jeux de données de qualité et calibrer les modèles. Des projets de recherche multi-partenaires (au sein de programmes comme le PATOM) ont déjà permis des progrès significatifs et demandent à être poursuivis.
- **Une échelle plus macroscopique destinée à améliorer la représentation du déferlement dans les modèles d'ingénieur** pouvant être utilisés sur des échelles de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres. A ces échelles, il n'est pas aujourd'hui envisageable d'utiliser l'approche fine ci-dessus et des paramétrisations et des modèles simplifiés sont nécessaires. Que ce soit pour des modèles déterministes (de type Boussinesq, Berkhoff, ou autres) ou des modèles à phases moyennées (de type spectraux ou probabilistes), le besoin d'amélioration des outils logiciels existants est réel (meilleure représentation de différents types de déferlement, modélisation plus précise des évolutions dans la zone de surf externe et interne, etc.).

Les deux aspects ci-dessus sont tout aussi importants. Sur le premier point, mes recherches s'effectuent essentiellement par voie expérimentale, mais aussi en interaction avec des collègues qui développent des modèles numériques avancés au LNHE (méthode SPH). Le second point est un axe récurrent de mes travaux pour les différentes approches de modélisation des vagues avec lesquelles je travaille. A court terme, mon objectif est d'améliorer la modélisation du déferlement dans les modèles déterministes de propagation de vagues (cf. § B.4.2.1). Pour l'instant, j'ai considéré un modèle fonctionnant par analogie avec un terme de diffusion turbulente dans les équations de Boussinesq étendues (Kennedy *et al.*, 2000). Cette approche fonctionne assez bien (après calage) pour les cas de déferlement de type glissant (comme l'illustre par exemple la Figure 24 ci-avant), mais les résultats sont nettement moins bons pour des déferlements de type plongeant. Des pistes de solutions existent dans la littérature : modèle de rouleau de Schäffer *et al.* (1993) ou récemment amélioré par Cienfuegos (2005), modèle de Karambas et Tozer (2003), couplage du modèle de vagues avec un modèle de turbulence plus ou moins complexe (Drago et Iovenitti, 1995 ; Nwogu, 1996 ; Veeramony et Svendsen, 2000 ; Elnaggar et Watanabe, 2000). Analyser en détail, appliquer et améliorer un ou plusieurs de ces modèles constitue un de mes objectifs de recherche actuels et futurs.

B.5. Action de la houle sur les ouvrages maritimes

Dans cette partie, je présente quelques unes de mes recherches portant sur les interactions fluide-structure pour le cas de structures maritimes et côtières, exposées à l'action des vagues.

Il s'agit d'un type de recherches où **l'expérimentation en laboratoire** occupe une place primordiale, car les phénomènes d'interaction considérés (surtout s'ils se traduisent par une modification de la structure, comme c'est le cas pour les digues en enrochements par exemple) sont très difficiles à modéliser numériquement. L'approche expérimentale reste donc l'outil d'étude privilégié et les recherches présentées ci-après s'appuient pour l'essentiel sur des expériences en canal ou en cuve à houle réalisées au LNHE, lors de programmes de recherche européens, nationaux ou dans le cadre de la convention Biparti EDF-Ministères.

Cette partie est organisée en quatre sections correspondant à quatre types de structures différentes :

- Structures verticales perforées faiblement réfléchissantes
- Digue à talus (en enrochements et en blocs artificiels)
- Structures isolées en mer (de type pieux)
- Structures posées sur le fond marin

Pour cette partie, plus que les autres encore, mes recherches ont bénéficié du concours d'ingénieurs et de chercheurs du LNHE (notamment Philippe Donnars, Jean Allilaire et Marilyne Luck), et surtout de techniciens en charge des expérimentations (notamment Jean-Michel Menon, Fabrice Vinet, Bernard Claudé, Claude Bobin, Patrice Courcier, Joao Lopes, Carol Guéné). Qu'ils en soient tous remerciés...

B.5.1. Structures verticales perforées faiblement réfléchissantes

B.5.1.1. Introduction – Objectif des recherches

Dissiper l'énergie de la houle et minimiser sa réflexion sur des ouvrages fixes ou flottants sont des préoccupations constantes aussi bien pour les aménageurs maritimes du domaine côtier que pour les chercheurs, travaillant sur maquettes en laboratoire. Les structures côtière de type « paroi(s) verticale(s) perforée(s) » sont intéressantes au cause de leur faible encombrement (par rapport à des digues à talus). C'est une solution qui est employée assez couramment en ingénierie côtière et portuaire avec, par exemple, les caissons Jarlan.

Au cours de mes travaux, je me suis intéressé à ce type de structures pour concevoir des systèmes amortisseurs de houle en laboratoire. En effet, que ce soit pour un canal ou une cuve à houle, la mise au point de systèmes amortisseurs de houle doit satisfaire à un cahier des charges précis : encombrement réduit, robustesse mécanique, durabilité, efficacité sur une large gamme de périodes, de cambrures et de directions de houle, absence de manutention en fonction de la hauteur d'eau... La réponse apportée à ce problème peut recouvrir des formes diverses et faire appel à des solutions techniques parfois originales. Une revue des amortisseurs passifs utilisés en laboratoire (Ouellet et Datta, 1986) a montré cette variété (plages inclinées à pente constante ou à profil parabolique, plaques pleines horizontales ou inclinées, systèmes poreux, plaques verticales perforées, systèmes combinés à partir des solutions précédentes,...) tout en mettant clairement en évidence les conclusions suivantes :

- il existe très peu de solutions universelles fonctionnant sur une large gamme de profondeurs et de périodes. La majorité des systèmes sont dimensionnés pour des conditions données et exigent une manipulation pour suivre les variations de ces conditions,
- les données disponibles sur l'efficacité de ces systèmes sont assez réduites et souvent limitées à des conditions particulières, favorables pour l'amortisseur considéré.

La solution généralement employée est celle d'une plage inclinée de faible pente (de l'ordre de 5%), de préférence en cailloux. Ce système se révèle d'une grande efficacité, mais présente le double inconvénient de prendre des dimensions importantes si la profondeur d'eau augmente et d'être difficilement mobile. C'est toutefois la solution préconisée sur une installation fixe qui dispose de la place nécessaire.

Pour tenter de remédier à ces deux limitations, j'ai travaillé à la mise au point d'une solution alternative, basée sur **un système de plaques poreuses verticales**, d'encombrement plus réduit et facilement modulaire. Le but initial de ces recherches était de définir des amortisseurs destinés à équiper la cuve à houle multidirectionnelle et à courants du LNHE en 1993-1994. Aux limites latérales du générateur de houle segmenté se trouvent des murs verticaux parfaitement réfléchissants qui sont pris en compte par le programme de génération de houle et participent à l'augmentation de la zone utile d'étude par réflexion totale. Au delà, il convient au contraire d'essayer d'annuler la réflexion et de dissiper au maximum l'énergie réfléchi par l'ouvrage, tâche à laquelle sont dédiés les amortisseurs que nous avons mis au point au LNHE.

B.5.1.2. Etude expérimentale en canal à houle

Ces recherches ont combiné des essais en canal à houle, menés avec Jean Allilaire et Bernard Claudé [RR15], et des modélisations numériques à l'aide d'un modèle potentiel linéaire avec perte de charge au niveau de chaque plaque (Twu et Lin, 1990). Par ailleurs, cette étude a été l'occasion de comparer plusieurs méthodes d'analyse du processus de réflexion de la houle. En particulier, une modélisation au deuxième ordre, incluant l'harmonique du deuxième ordre de Stokes et la composante libre, a été développée et mise en œuvre pour les mesures.

Les essais sur modèle physique en laboratoire se sont déroulés dans un canal à houle du LNHE de longueur utile 40 m, de largeur 0.60 m (cf. Figure 28). Ce canal est équipé d'un générateur de houle régulière, commandé par un moteur électrique entraînant une came. Il s'agit d'un générateur mixte pouvant fonctionner en mode "piston" (mouvement de translation d'ensemble), en mode "voilet" (rotation autour d'un axe horizontal sur le fond) ou en mode combiné "piston/voilet". Les essais ont été réalisés en houle monochromatique pour une profondeur d'eau de 0.5 m. L'étendue des périodes explorées allait de 0.8 s à 2.5 s.

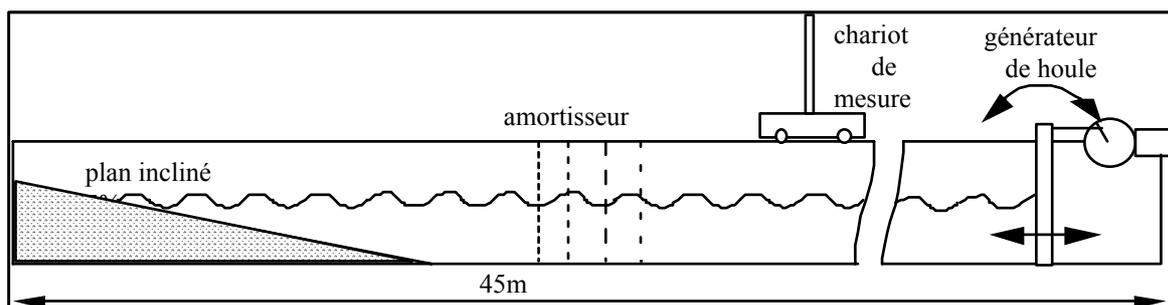


Figure 28 : Schéma de l'installation d'essais pour la mise au point des amortisseurs de houle à plaques verticales perforées en canal à houle.

Nous avons d'abord réalisé de nombreux essais en considérant une seule plaque sans paroi réfléchissante, en faisant varier la porosité de la plaque en question. L'influence de la cambrure des vagues sur le coefficient de réflexion a été analysée et le fonctionnement du système mis en évidence.

Puis nous avons considéré une succession de 8 plaques espacées de 0.50 m et positionnée devant une paroi réfléchissante. Pour la solution finalement retenue, les amortisseurs ont été réalisés avec des plaques poreuses en métal déployé, dont la porosité décroît à mesure que la distance au générateur de houle augmente (porosité des plaques : 11-11-24-24-30-40-44-60%). Les résultats de cette configuration sont présentés sur la Figure 29, où le coefficient de réflexion est évalué pour diverses cambrures et périodes. On remarque l'augmentation du coefficient de réflexion lorsque la cambrure

devient très faible ou très forte. Ce coefficient de réflexion conserve toutefois des valeurs de l'ordre de 5 à 10 % pour les conditions d'utilisation standard (périodes de 1. à 1.5 s, cambrures de l'ordre de 2 à 6%). Sa valeur maximale dans une gamme d'utilisation étendue (périodes comprises entre 0.8 et 2. s) reste toujours inférieure à 20% et donc satisfaisante. Pour la période de 0.8 s, le coefficient de réflexion est nettement plus élevé. L'analyse de ce cas montre que l'on se trouve dans un cas où l'intervalle inter-plaque (0.5 m) est un multiple de la demi-longueur d'onde (1 m exactement pour cette période de 0.8 s). Les plaques se trouvent alors centrées sur des ventres de l'agitation stationnaire provoquée par la réflexion sur la plaque pleine. Au niveau de ces ventres d'agitation, les vitesses horizontales sont très faibles et l'efficacité des plaques diminue sensiblement.

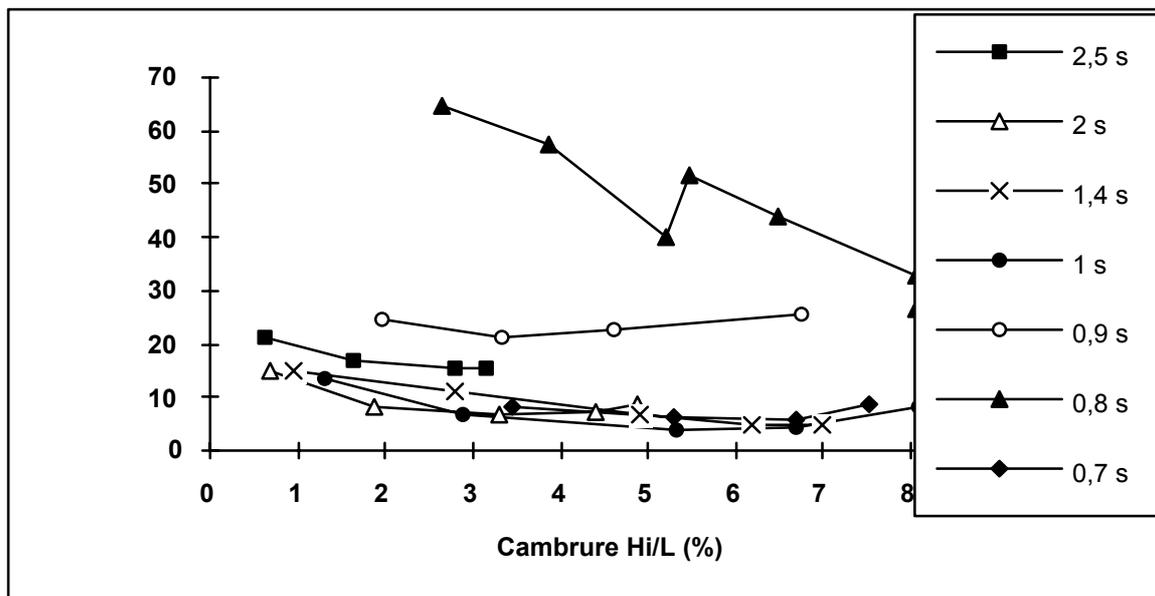


Figure 29 : Comportement d'un ensemble de 8 plaques espacées de 0.50 m à 7 périodes différentes en fonction de la cambrure.

B.5.1.3. Analyse de réflexion au second ordre

Au cours de ces recherches expérimentales, j'ai aussi développé une méthode d'analyse de la houle au 2^{ème} ordre en conditions incident-réfléchi. Cette méthode prend en compte la composante harmonique de Stokes du second ordre du mode fondamental (appelée « onde liée » car elle se déplace à la célérité du mode fondamental), ainsi qu'une autre composante harmonique du second ordre, générée par la condition à la limite au niveau du batteur et appelée « onde libre » car elle se déplace à sa célérité propre, donnée par sa période $T/2$. Afin de procéder de façon combinée à une analyse de houle au deuxième ordre et une séparation incident/réfléchi, la mesure de la surface libre a été réalisée de façon simultanée en cinq points successifs dont les positions relatives et les distances par rapport à l'amortisseur étudié sont connues. Le traitement pouvait ensuite s'effectuer sur un nombre K de capteurs (K compris entre 3 et 5) au choix de l'utilisateur. Ces traitements ont permis d'identifier les composantes du premier et de second ordre, à la fois pour la houle incidente et pour la houle réfléchi. Les coefficients de réflexion correspondants ont également été calculés.

Ces travaux sont présentés dans le rapport de recherche [RR15] et ont fait l'objet d'une communication scientifique lors des Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier 1994 [AC05].

B.5.2. Dignes à talus (réponse hydraulique et structurelle)

J'ai mené plusieurs projets de recherche sur les digues à talus, en enrochements ou en blocs artificiels. A nouveau ces travaux ont fait une large place à l'expérimental, au travers d'essais en canal ou en cuve à houle. Une synthèse en est proposée dans les paragraphes suivants.

B.5.2.1. Recherches sur les processus hydrauliques

Dans les années 1991 à 1993, j'ai consacré une part importante de mon effort de R&D sur les structures côtières à étudier les processus d'interactions hydrauliques entre les vagues et la structure, et notamment la réflexion des vagues sur l'ouvrage.

Dans le cadre de la Convention Biparti EDF-Ministères, j'ai en particulier défini et réalisé avec des techniciens d'essais un programme expérimental important portant sur l'influence de la direction d'incidence des vagues sur le processus de réflexion. Nous avons conduit des essais en cuve à houle aléatoire afin de connaître la façon dont varie le coefficient de réflexion d'un ouvrage pour des houles incidentes obliques. L'étude comportait une première phase destinée à mettre au point un dispositif de mesure et d'analyse du coefficient de réflexion en houle oblique et une deuxième phase d'essais proprement dits, où ont été testés 3 pentes, 4 incidences de houle, 1 type de bloc de carapace avec, pour chaque configuration, 3 hauteurs de houle.

Dans le cadre de la première phase, différentes méthodes de mesure et d'analyse de la réflexion ont été implantées, comparées et discutées. Les mesures de champ de surface libre étaient réalisées à l'aide d'un réseau 2D de capteurs de houle. Cette phase a mis en évidence une variation caractéristique du coefficient de réflexion en fonction de la direction d'incidence. Cette forme de variation est globalement confirmée par les méthodes d'analyse de houle directionnelle, elles aussi testées au préalable sur des simulations numériques [RR12] [RR14].

Lors de la deuxième phase, des essais ont été réalisés pour une seule période de houle, mais pour cinq directions d'incidence, trois hauteurs de houle et trois pentes de talus, soit 45 essais. Les analyses de ces essais systématiques en cuve ont permis d'identifier une forme de variation du coefficient de réflexion en fonction de la direction d'incidence, même si les variations restent assez faibles, au moins pour l'intervalle de directions $[0^\circ, 60^\circ]$ [RR28].

Outre les trois rapports de recherche cités ci-dessus, les résultats issus de cette étude ont été présentés lors de deux conférences internationales : WAVES'1994 [AC04] et ICCE'1994 [AC07].

B.5.2.2. Recherches sur la stabilité des digues à talus

B.5.2.2.1. Etude de la stabilité du talus arrière d'une digue à talus

Le talus arrière est une partie des digues à talus pour laquelle il existe très peu de résultats et de règles de dimensionnement. La règle généralement appliquée consiste à mettre des blocs identiques à ceux de la carapace dès que la digue est franchissable. Cette démarche n'est cependant pas optimale, puisqu'elle peut être très conservatrice (donc très onéreuse) si la digue est peu franchissable, ou au contraire insuffisante dans certaines conditions de franchissement où le talus arrière est plus sollicité que la carapace.

De façon à étudier plus en détail ces points, j'ai défini et réalisé dans le cadre de la Convention Biparti EDF-Ministères un programme de tests en canal à houle aléatoire. Ces essais, effectués au LNHE dans le canal 19, ont permis d'examiner les effets de plusieurs paramètres (hauteur de berme, largeur de berme, pente du talus arrière,...) sur la tenue du talus arrière [RR20].

Travaillant avec Jean Allilaire sur ce projet, nous nous sommes concentrés sur un profil de digue classique avec une berme horizontale constituée de blocs identiques à ceux de la carapace et sans

ouvrage de couronnement (cf. Figure 32). Vu la largeur du canal utilisé (5 m), il a été possible de réaliser 4 essais simultanément (2 valeurs de pente du talus arrière et 2 poids de blocs du talus arrière). De plus, trois valeurs de franc-bord, trois largeurs de berme et trois périodes de houle aléatoire ont été retenues et testées, ce qui porte le nombre d'essais à 108 (cf. Figure 30 et Figure 31).



Figure 30 : Vue de l'arrière de la digue sur une moitié du canal à houle (une taille de bloc, mais deux pentes différentes)



Figure 31 : Franchissements en cours d'essai, entraînant des dommages sur le talus arrière.)

Les dégâts sur le talus arrière ont été mesurés par comptage du nombre de blocs déplacés et par mesure de la surface érodée. A partir de l'analyse des résultats des essais, une formule générale, utilisable pour le prédimensionnement du talus arrière, a pu être proposée.

Cette formule est présentée graphiquement sur la Figure 33. L'ensemble des résultats de ce projet sont disponibles dans le rapport de recherche de Jean Allilaire (1996), que j'ai supervisé et validé en tant que chef de projet.

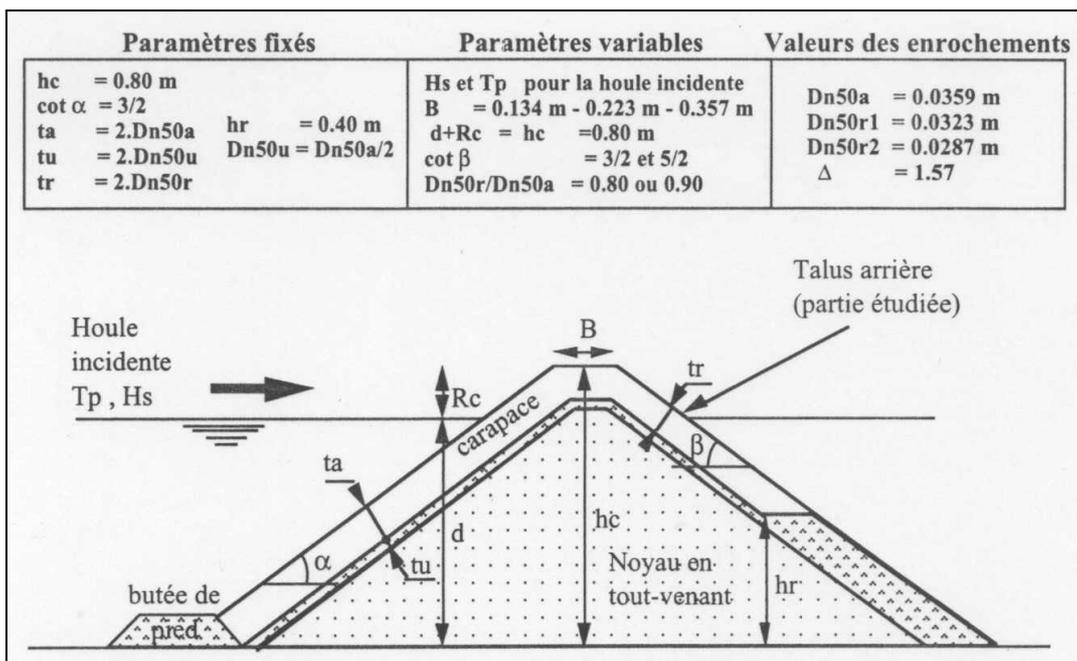


Figure 32 : Profil de digue testé en canal à houle et dimensions caractéristiques de la digue.

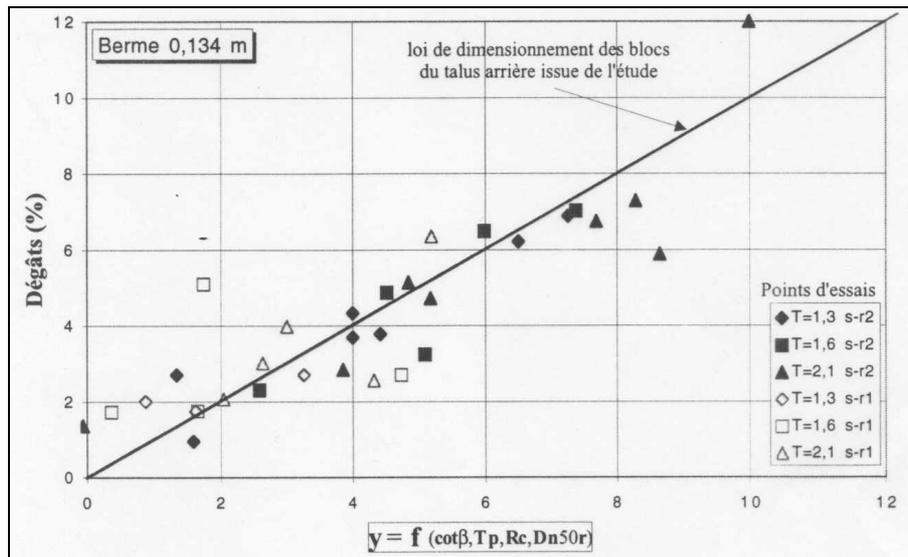


Figure 33 : Synthèse des résultats pour une pente du talus arrière de 3/2. Comparaison à la formule de prédiction de dommages issue de l'étude .

B.5.2.2.2. Etude des interactions carapace-butée de pied

Ce programme de recherche s'inscrivait dans le cadre du projet européen RMBFM (Rubble Mound Breakwater Failure Modes) de MAST-2 (contrat MAS2-CT92-0042), piloté par le Pr. Burcharth de l'Université d'Aalborg (Danemark). Notre contribution au sein de ce projet concernait l'étude en cuve à houle multidirectionnelle des interactions butée/carapace pour une digue à talus en enrochements. Ces essais venaient à la suite d'expériences réalisées en canal à l'Université de Bologne (Italie), par l'équipe du Pr. A. Lamberti.

Nous avons cherché à examiner les effets de la cambrure de la houle, de la pente de la carapace, du poids des blocs de butée, de la direction d'incidence et du caractère multidirectionnel de la houle sur l'interaction butée/carapace. Les essais ont été réalisés dans la cuve à houle multidirectionnelle du LNHE d'Avril 1995 à Septembre 1995 (cf. Figure 34). Les résultats ont été analysés et présentés au workshop final du projet RMBFM à Sorrento (Italie) le 11/11/1995.



Figure 34 : Vue du modèle en cuve à houle multidirectionnelle utilisé pour les essais du projet européen MAST2-RMBFM

Ce programme a permis de mettre en évidence certains aspects des interactions butée/carapace. Il apparaît toutefois que ces interactions demeurent assez faibles sauf si la carapace et/ou la butée de pied sont nettement sous-dimensionnées. Il a également été observé des dégâts plus importants en houle multidirectionnelle qu'en houle monodirectionnelle dans plusieurs cas, à la fois au musoir et en partie courante.

La Figure 35 présente un exemple de résultats issus de ce projet. Même si quelques différences de tendance ont été observées, les points expérimentaux issus de nos essais présentent un bon accord général avec les lois de dimensionnement d'Hudson et de Van der Meer (1988, 1993) pour la carapace de la digue à talus et de Gerding (1993) pour la butée de pied.

Les résultats de ce projet de recherche ont fait l'objet du rapport de recherche [RR26] et ont été présentés à la conférence internationale ICCE'1996 [AC11] (article reproduit en Annexe 8).

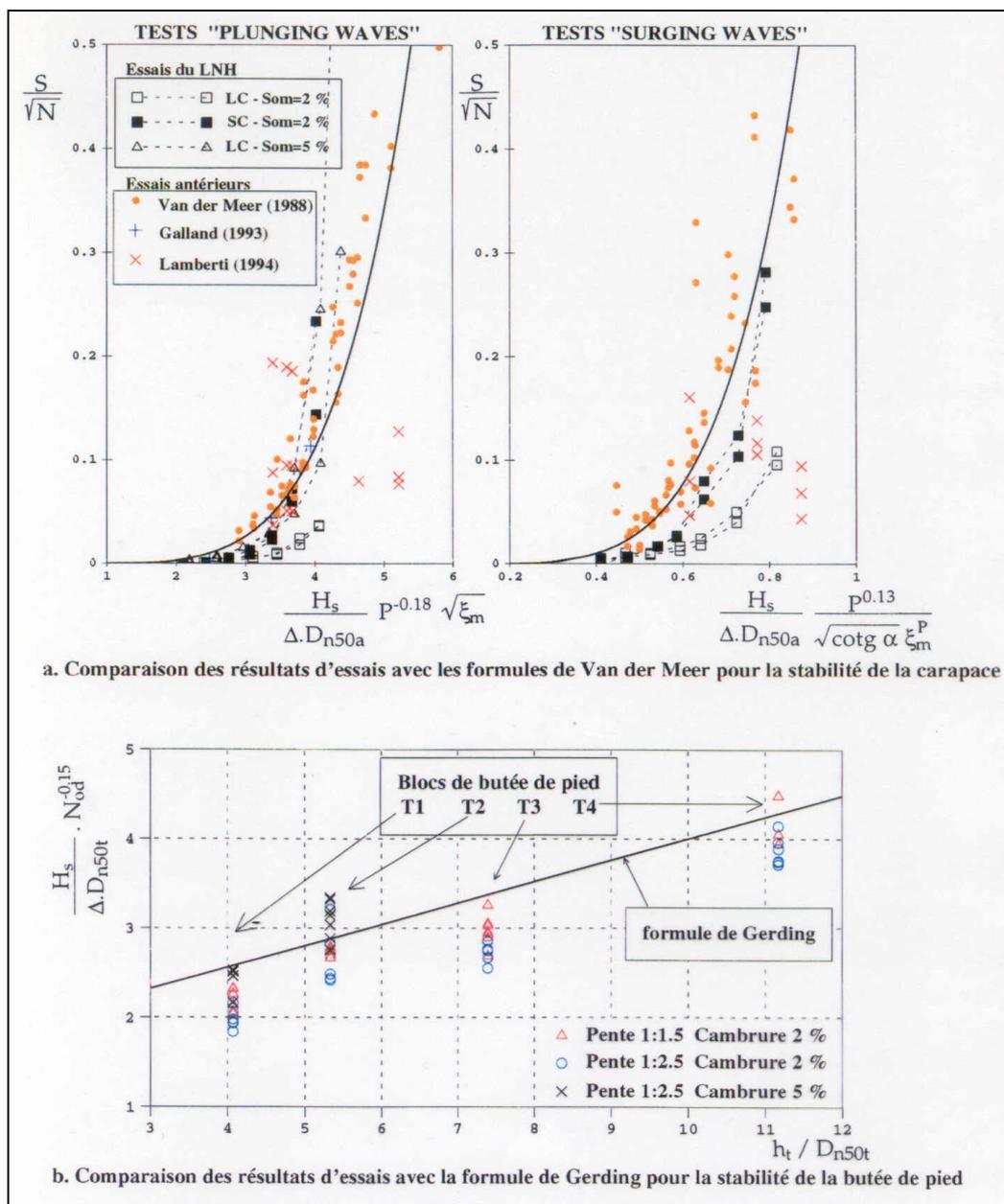


Figure 35 : Exemple de synthèse des résultats du projet européen MAST2-RMBFM. Les graphes du haut (a) sont relatifs à la carapace et le graphe du bas (b) est relatif à la butée de pied

B.5.2.3. Participation à la rédaction du Rock Manual

En 2003, à l'initiative du CIRIA (UK) et du CUR (Pays-Bas), une action européenne visant à produire une nouvelle version du guide intitulé « Manual on the use of Rock in coastal and shoreline engineering » édité en 1995 a été lancée. La participation française est coordonnée au niveau national par Sébastien Dupray du CETE de Lyon et Jean-Jacques Trichet du CETMEF. On trouve dans ce groupe de travail les principaux laboratoires, instituts et universités anglais et néerlandais (HR Wallingford, Halcrow, Delft Hydraulics, Delt University of Technology, GeoDelft, RIKZ, etc.).

J'assure la représentation du LNHE au sein de ce groupe de travail européen avec l'objectif de produire en 2006 une édition actualisée et complétée du guide CIRIA/CUR sur les enrochements (naturels et artificiels) pour les ouvrages maritimes et fluviaux (« Rock Manual » en abrégé) [LI05].

J'assure en particulier la responsabilité de la rédaction du chapitre 4 de ce manuel (synthèse des conditions bathymétriques, hydrauliques, géotechniques, etc.), ainsi qu'une participation à la réactualisation du chapitre 5, ce qui représente un volume de travail de coordination et d'écriture significatif. La dernière version du Chapitre 4 fait plus de 180 pages au total. Ce chapitre 4 a été diffusé, section par section, à une douzaine de relecteurs, et nous sommes en phase de collecte des retours, puis de leur prise en compte. La finalisation du texte définitif doit intervenir courant 2006.

Ma participation à ce groupe de travail est décrite plus en détail au § A.7.4, tandis que le projet « Rock Manual » a été présenté à la communauté scientifique française au cours des Journées Scientifiques et Techniques du CETMEF 2004 et fait l'objet d'un article de conférence [AC31].

B.5.3. Structures isolées en mer (de type pieux)

Dans le cadre d'un projet de R&D portant sur l'installation d'éoliennes en mer, j'ai été amené depuis 2002 à travailler sur les chargements dus à la houle pour des structures-supports d'éoliennes offshore de type « monopile ». Côté EDF R&D, nous nous intéressons plus particulièrement aux cas d'éoliennes qui seraient implantées par des profondeurs de l'ordre de 5 à 20 m et donc susceptibles de se trouver exposés à des conditions de vagues quasi-déferlantes, voire déferlantes.

Il s'agit d'un cas délicat, qui sort du champ traditionnel d'estimation des efforts couramment rencontré dans le domaine de l'industrie pétrolière offshore et pour lequel il existe des méthodes éprouvées. Ici, on se trouve en présence de vagues très asymétriques (aussi bien par rapport à un plan horizontal que par rapport à un plan vertical), potentiellement déferlante, avec dans ce cas un terme d'impact du déferlement important. Il est donc important d'améliorer la connaissance des efforts dus aux vagues sur les structures-supports d'éoliennes en faible profondeur d'eau, en particulier pour des structures de type « monopile ».

Une étude expérimentale a été engagée au LNHE, avec la réalisation d'essais dans des conditions de faible profondeur d'eau et pour des vagues cambrées (du fait de la remontée des fonds) jusqu'au déferlement. L'objectif de ces essais est triple :

- (i) disposer de résultats expérimentaux pouvant être extrapolés à des conditions réelles,
- (ii) examiner les capacités des méthodes numériques traditionnelles de prédiction d'effort,
- (iii) améliorer et valider des méthodes de prédiction d'efforts pour les faibles profondeurs d'eau.

Cette activité de recherche, qui combine approche expérimentale et numérique, se poursuit actuellement. Elle est effectuée en collaboration avec Marilyn Luck, que j'encadre sur ce sujet, et avec l'aide de techniciens d'essais du LNHE, et en particulier Jean-Michel Menon.

Un modèle réduit a été construit dans un canal à houle du LNHE, de longueur utile 72 m, de largeur 1.5 m et avec une hauteur d'eau au repos pouvant aller jusqu'à 1.2 m devant le batteur. Ce canal est équipé d'un générateur de houle de type « piston » et fonctionne pour ces essais en mode « houle régulière ». Les essais sont réalisés en similitude de Froude, à l'échelle $1/25^{\text{ème}}$. On considère une structure-support d'éolienne de type « monopile », représentée sur le modèle réduit par un cylindre

vertical de diamètre 0.2 m (soit 5 m au réel). Les fonds sont représentés par un plan incliné de pente constante en ciment. Deux pentes ont été considérées : 5% et 2.5 % (cf. Figure 36).

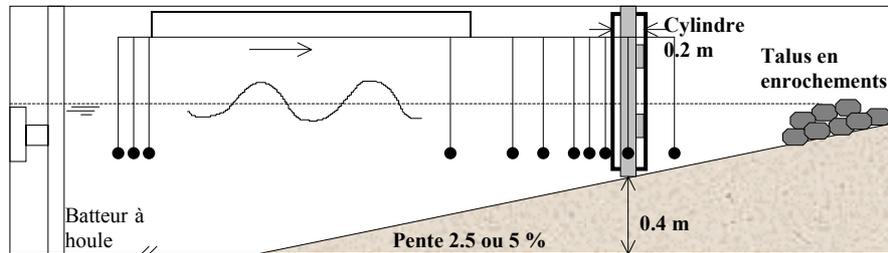


Figure 36 : Schéma simplifié de l'installation d'essais en canal à houle

Différentes périodes et hauteurs de houle ont été simulées, de façon à couvrir une large gamme de conditions de houle au niveau de la structure (vagues déferlant après, sur ou avant la structure). Les paramètres que l'on a fait varier sont :

- les paramètres de houle au large (période T et hauteur incidente H_0). Les périodes de houle testées varient de 1.6 à 2.4 s sur modèle réduit (8 à 12 s au réel). Les hauteurs incidentes H_0 sont choisies de manière à couvrir des conditions allant des vagues modérées jusqu'aux vagues déferlantes au niveau du cylindre, et même avant.
- la profondeur d'implantation de la structure (d) et la pente des fonds (m). Deux pentes ont été testées ($m = 2.5$ et 5%), ainsi que 4 profondeurs d'eau en pied de structure : 0.30, 0.40, 0.60 et 0.80 m (soit 7.5, 10, 15 et 20 m au réel).

Au total, 128 essais ont ainsi été réalisés en houle régulière, chacun correspondant à une valeur du quadruplet (T, H_0, m, d).

Des mesures de l'élévation de la surface libre sont réalisées au large et en différents points le long de la pente. Les efforts horizontaux s'exerçant sur le cylindre sont mesurés par le biais de deux capteurs d'efforts, fonctionnant aussi bien en traction qu'en compression et entièrement étanches. Ces capteurs sont positionnés à 0.2 m et 0.8 m du fond et constituent les uniques liaisons entre le cylindre et une poutre verticale située à l'intérieur du cylindre et servant de bâti fixe (cf. Figure 36).

La question fondamentale portant sur notre capacité à prédire les efforts horizontaux dus à la houle, nous avons mis en œuvre une méthode numérique d'estimation basée sur l'approche dite de Morison (Morison *et al.*, 1950). Un travail important a été réalisé pour comparer quatre modèles donnant la cinématique des vagues (vitesses et accélérations horizontales) utilisée en entrée dans cette formule :

- la théorie de la houle linéaire (Airy, 1845), classiquement utilisée, mais peu adaptée pour des vagues très cambrées, car fortement non linéaires ;
- la méthode de fonction de courant « classique » (Dean, 1965), permettant, à partir de la hauteur des vagues et de leur période, un calcul « exact » de la cinématique pour des vagues stables se propageant sans déformation sur un fond plat. Cette approche modélise l'asymétrie des vagues par rapport à un plan horizontal (dissymétrie entre le creux et la crête) ;
- la méthode de fonction de courant « irrégulière » (Dean, 1965 ; Chakrabarti *et al.*, 1997). Par rapport à la méthode précédente qui se base uniquement sur la hauteur et la période, celle-ci utilise en condition d'entrée le profil de surface libre mesuré sur une période, ce qui permet de représenter l'asymétrie des vagues par rapport à un plan horizontal et à un plan vertical ;
- la méthode de la fonction de transfert modifiée (Koyama et Iwata, 1985), qui utilise également en condition d'entrée le profil de surface libre mesuré sur une période, auquel elle applique directement une fonction de transfert dépendant de la période, de la profondeur et de la surface libre.

Les deux premières méthodes sont des théories de houle à fond plat, utilisant en entrée la hauteur et la période de la houle et la profondeur d'eau ; les deux dernières méthodes sont des méthodes de fonction de transfert, utilisant comme données d'entrée le profil temporel de surface libre, la période de la houle et la profondeur d'eau. Les caractéristiques de la houle utilisées en données d'entrée pour ces différentes théories sont les conditions de houle locales au niveau de la structure, mesurées dans la même section transversale du canal que la structure. Pour les coefficients hydrodynamiques, nous avons utilisé dans une première analyse des valeurs indiquées par Sarpkaya et Isaacson (1981), à savoir $C_D = 0.7$ et $C_M = 1.8$ (cas d'un cylindre lisse dans un écoulement à nombre de Reynolds élevé).

De nombreux traitements et comparaisons ont été réalisés pour examiner la validité des prédictions ; A titre d'exemple, la Figure 37 présente une comparaison des extrema (positifs et négatifs) des efforts horizontaux (totaux, c'est à dire intégrés sur la verticale) mesurés et prédits. Sur les quatre graphes de cette figure (un par méthode de calcul de la cinématique de la houle), les droites correspondant à une prédiction parfaite (droite $y=x$), ainsi qu'à une sous-estimation d'un facteur 2 et d'un facteur 4 des extrema des efforts mesurés ont également été tracées.

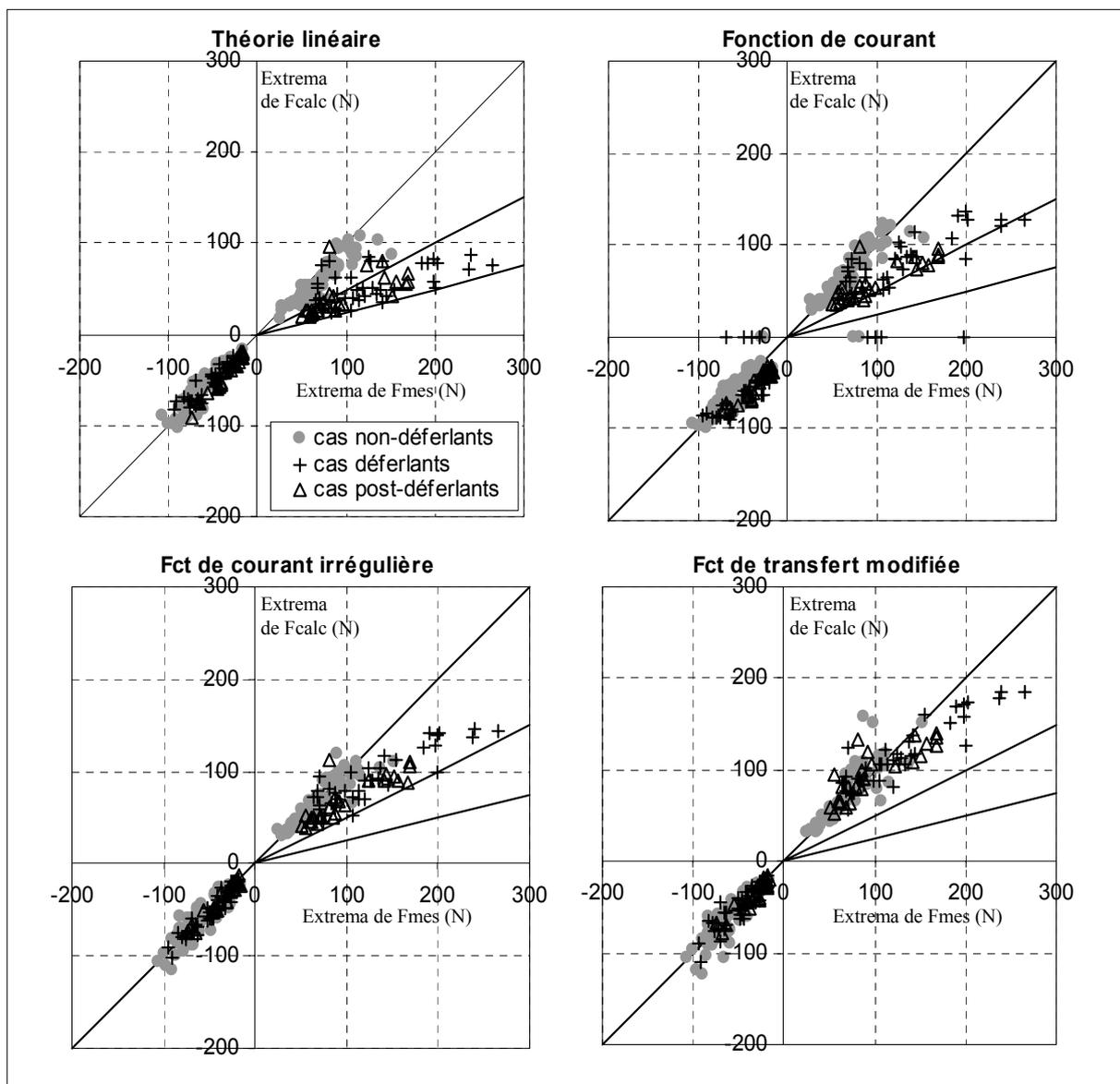


Figure 37 : Comparaison des extrema d'efforts mesurés et calculés avec les différentes modélisations utilisées pour le calcul de la cinématique de houle

De façon synthétique, les résultats obtenus jusqu'ici montrent que des estimations acceptables de l'effort horizontal total dû à la houle peuvent être obtenues dans la zone de levée (ou « shoaling ») par application de la formule de Morison, avec une cinématique de houle calculée par une méthode de fonction de courant irrégulière ou la méthode de la fonction de transfert modifiée. Cependant, dans le cas de vagues déferlantes, ces méthodes sous-estiment les efforts subis par la structure : les forces réelles peuvent être jusqu'à 2 fois supérieures aux prédictions, du fait du terme d'impact de déferlement. En comparaison, lorsqu'on utilise la théorie linéaire de houle, les efforts maximaux peuvent être sous-estimés d'un facteur 4 (même en utilisant la hauteur locale des vagues). La méthode de fonction de courant classique améliore les prédictions de la théorie linéaire, mais son intérêt est limité pour les vagues déferlantes sur des fonds en pente, vu qu'elle ne fonctionne que si $H/d < 0.78$.

La comparaison des différentes modélisations de houle montre que la prise en compte de l'asymétrie des vagues par rapport à un plan vertical (théorie de la fonction de courant irrégulière et méthode de la fonction de transfert modifiée) conduit à des prédictions meilleures que celles obtenues avec des théories de houle supposant un profil asymétrique uniquement par rapport à un plan horizontal (théorie de la fonction de courant classique). L'analyse des essais met ainsi en évidence la nécessité de disposer de modèles numériques décrivant correctement l'hydrodynamique des vagues cambrées et déferlantes.

Des travaux complémentaires sur l'amélioration de la prédiction de la cinématique de houle (par exemple par le biais d'un modèle non-linéaire de propagation de houle de type « Boussinesq étendu »), sur la recherche de valeurs plus adaptées des coefficients hydrodynamiques (déterminées par application d'une méthode des moindres carrés entre mesures et prédictions) et sur la modélisation de la composante d'impact due au déferlement doivent être réalisés, afin d'améliorer l'estimation des efforts et moments de renversement pour le cas le plus pénalisant des vagues déferlant sur la structure.

Les résultats de ces recherches font l'objet des rapports de recherche [RR44] et [RR54]. Ils ont été présentés lors d'un séminaire CLAROM [PR16], lors de la conférence internationale ICCE'2004 [AC30] et des Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier 2004 [AC27]. Ils font par ailleurs l'objet d'une publication dans la Revue Européenne de Génie Civil [AJ06] (article reproduit en Annexe 9).

B.5.4. Structures posées sur le fond marin (pipeline ou émissaire)

Dans le cadre du projet de recherche CLAROM-ECOMAC, j'ai travaillé avec Marilyne Luck sur le cas des ouvrages posés sur le fond et soumis à l'action des vagues en faible profondeur d'eau. Nous avons notamment traité le cas des pipelines posés près du fond, et cherché à étudier les efforts qu'ils subissent en zone côtière, notamment dans le cas où les vagues peuvent être déferlantes au niveau de l'ouvrage.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une revue bibliographique sur le sujet [RR39]. Les efforts induits par la houle sur la structure sont le résultat de la pression et des contraintes visqueuses ; ces efforts sont difficiles à prédire numériquement du fait de la complexité de l'écoulement au voisinage des structures. En effet, il est difficile de connaître le champ de pression et de contraintes en tout point de la surface de la structure immergée dans le fluide en mouvement. Il existe des résultats dans le domaine des calculs des efforts hydrodynamiques, mais aucune formule générale n'a été mise au point, du fait de la complexité des calculs entrant en jeu et de la diversité des paramètres influençant l'écoulement (géométrie de l'ouvrage, turbulence, localisation de l'ouvrage, rugosité de l'ouvrage,...). Les effets du déferlement sont difficiles à quantifier précisément dans le cas général. Les expériences réalisées par d'autres auteurs soulignent le caractère intermittent, très localisé et violent des efforts lorsque le pipeline est situé dans la zone où la vague déferlante plonge, avec un facteur d'amplification pouvant atteindre une valeur de 4 par rapport aux efforts juste avant le déferlement.

Dans un second temps, un programme expérimental a été défini et réalisé en canal à houle à l'Université de Caen Basse Normandie, en collaboration avec Christophe Chevalier et Michel Belorgey. L'objectif était de mesurer les efforts s'exerçant sur un pipeline dans la zone de shoaling et

de déferlement. Un cylindre (de diamètre variable) est posé près d'un fond en pente constante (pente 1 pour 20). On a fait varier, outre le diamètre du cylindre, la profondeur à laquelle il se trouve (i.e. la position par rapport au point de déferlement), l'écartement par rapport au sol, la hauteur et la période des vagues. La plupart des essais ont été effectués en houle régulière, mais trois essais en houle irrégulière ont également été réalisés.

Un grand nombre de mesures de vitesses ont été réalisées par la technique Vélocimétrie Doppler-Laser (VDL) en l'absence du cylindre. Les mesures d'efforts sur le cylindre ont été effectuées à l'aide de jauges de contraintes. Au cours de la phase 1 du projet ECOMAC, l'intérêt s'est essentiellement porté sur la cinématique. Une base de données de mesures a été produite : elle a servi à apprécier et comparer les capacités de différentes méthodes de prédiction de la cinématique [AC24] (article reproduit en Annexe 7).

Il apparaît que les méthodes les plus intéressantes sont celles basées sur des fonctions de transfert dans le cas où l'on dispose du signal d'élévation de surface libre (Méthode de fonction de transfert modifiée MTFM et méthode de fonction de courant irrégulière), la méthode semi-empirique de Isobe et Horikawa (1982), ainsi que les modèles non-linéaires de propagation de houle basés sur les équations de Boussinesq pour le cas où on ne connaît que les conditions de houle au large.

En ce qui concerne les efforts proprement dits s'exerçant sur le cylindre horizontal posé près du fond, seuls quelques essais ont été dépouillés et analysés [PR13]. Un exemple de résultat est présenté sur la Figure 38 pour deux positions de cylindre par rapport au fond et deux conditions de houle (régulière) différentes. Les estimations numériques des efforts ont été réalisées sur la base de la formule de Morison *et al.* (1950), en considérant en entrée une cinématique obtenue par la théorie linéaire de houle (courbes bleues) et une cinématique obtenue par la méthode de fonction de transfert modifiée MTFM (courbes rouges). Clairement, on s'aperçoit que les prédictions issues de la théorie linéaire ne sont pas valables sur ces cas de houle quasi-déferlante et déferlante. La méthode MTFM fournit au contraire de bonnes prédictions des efforts horizontaux, que ce soit en termes des maxima d'efforts ou en termes de profil temporel des efforts.

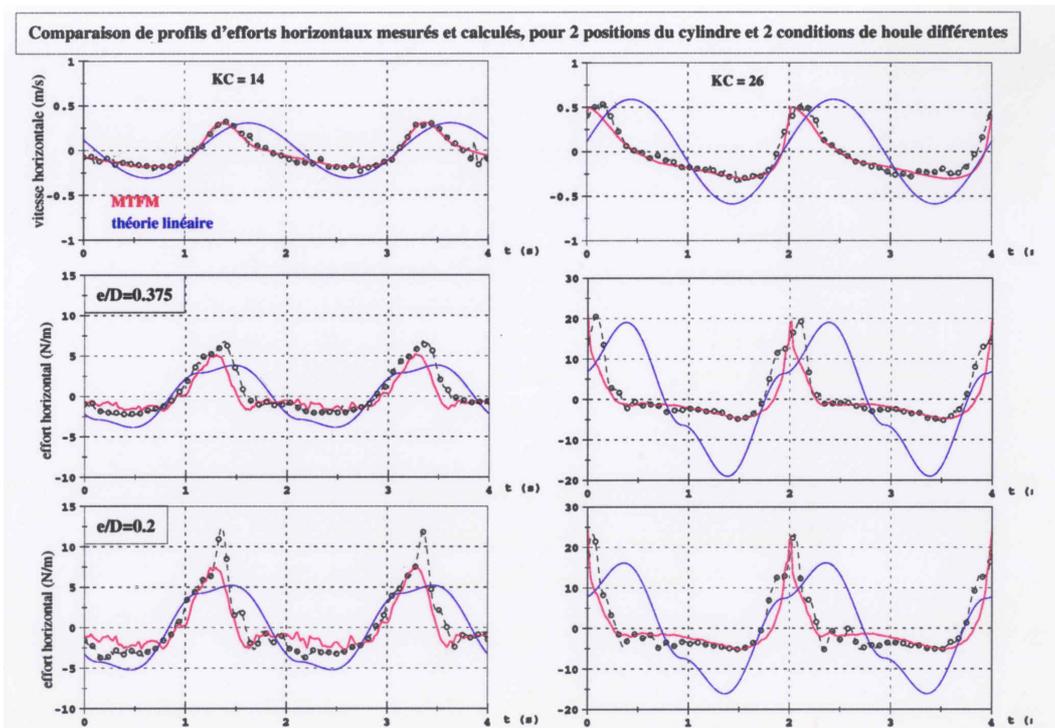


Figure 38 : Comparaison d'efforts mesurés et calculés pour un cylindre horizontal. Expériences réalisées à l'Université de Caen Base Normandie dans le cadre du projet CLAROM-ECOMAC.

B.6. LOGICIELS DEVELOPPES, CO-DEVELOPPES OU MAINTENUS

Au cours de plus de 15 années d'activité au LNHE, j'ai été amené à développer ou co-développé un nombre important de logiciels dans mes domaines de compétences. J'en donne un aperçu ci-après, en distinguant les logiciels que j'ai développés intégralement (§ 0), ceux que j'ai co-développés en collaboration avec des collègues (cf. § B.6.2) et enfin ceux sur lesquels j'ai une activité plus limitée (mise à niveau, extension de fonctionnalités, portage dans d'autres environnements informatiques, etc.) (cf. § B.6.3).

D'un point de vues des problématiques couvertes et des applications, ces logiciels peuvent être classés en quatre grandes catégories :

- a) **Simulation de propagation des vagues en zone côtière et d'agitation portuaire.** Dans cette catégorie, j'ai travaillé sur différentes approches de modélisation :
 - déterministe : **BSQ, REEF2000, DIFRA2, PHISAX**
 - spectrale : **TOMAWAC, COWADIS, BEACH, REFRA-3D**
 - probabiliste : **SWADIS,**
- b) **Analyse d'états de mer** et d'enregistrements de vagues (en laboratoire ou *in situ*) :
 - Analyse spectrale : **SPECAN,**
 - Analyse bi-spectrale : **BISPAN**
 - Analyse statistique : **ANASTA**
 - Analyse directionnelle : **PRDWAS, GADWAS, PADINES, DEPICT**
- c) Calcul de **cinématique et de chargements dus aux vagues**
 - Cinématique de vague : **ISOR182, STOKES5, STREAM_HT, STREAM-SL**
 - Calcul d'efforts : **STREAM-FM**
- d) **Pilotage de bancs d'essais** (génération de vagues en laboratoire)
 - Génération de signaux et de spectres de houle : **DIRSEA, COQUAD**
 - Pilotage de générateur de houle : **BATTOR**

Certains de ces logiciels ont été développés dans le cadre de procédures d'Assurance Qualité, en vigueur à EDF R&D et diffusés à l'externe de EDF R&D (notamment les codes **TOMAWAC** et **COWADIS**). La plupart ont été et sont utilisés par d'autres chercheurs et ingénieurs du LNHE.

B.6.1. Logiciels développés intégralement

Analyse (omnidirectionnelle) des états de mer réels:

- ANASTA** Module d'analyse statistique (vague-à-vague) de signaux de houle, par la méthode de zero up-crossing ou zero down-crossing. Calcul des hauteurs de vagues caractéristiques H_m , H_s , $H_{1/10}$, etc. et tracé d'histogrammes pour les hauteurs et les périodes. Ajustement de la loi de Rayleigh pour les hauteurs de vagues.
- SPECAN** Module d'analyse spectrale (directe et croisée) de signaux de houle, issus d'un capteur ponctuel à N composantes ou d'un réseau de N capteurs. Calcule les co- et quad-spectres utilisés ensuite par **PRDWAS** et **GADWAS**. Ce logiciel a ensuite été intégré dans **PADINES**, mais il est encore utilisé tel quel à certaines occasions.
- BISPAN** Module d'analyse bi-spectrale (non-linéaire) de signaux de houle. Permet de caractériser la présence d'harmoniques liés dans le signal de surface libre en faible profondeur d'eau. Programme utilisé par Françoise Becq-Girard pour analyser les mesures réalisées lors des essais en canal à houle de sa thèse.

SWADIS Module de calcul de la distribution des hauteurs de vagues en faible profondeur d'eau et en zone de déferlement, d'après les théorie de Hughes et Borgman (1987), Klopman (1996), Battjes et Groenendijk (200) et Mendez *et al.* (2004).

Simulation et analyse multidirectionnelle de houle – Calcul de paramètres directionnels:

COQUAD Module de calcul des valeurs exactes de co- et quad-spectres (densités spectrales croisées de signaux pris deux à deux) pour un capteur de houle ponctuel à trois composantes (bouée pilonnement-roulis-tangage, capteur η -u-v, etc.) à partir d'un spectre analytique donnée (type JONSWAP ou autre). Utilisé pour tester les programmes d'analyse directionnelle **PRDWAS** et **GADWAS**.

DIRSEA Module de calcul des séries temporelles d'états de mer multidirectionnels (par superposition linéaire). Méthodes de simple ou double sommation. Utilisé pour tester les programmes d'analyse directionnelle **PRDWAS**, **GADWAS** et **PADINES**.

PRDWAS Logiciel d'analyse de houle multidirectionnelle à partir des mesures délivrées par une bouée pilonnement-roulis-tangage (co- et quad-spectres issus de **COQUAD** ou de **SPECAN**). Prise en compte de différentes méthodes allant de la décomposition en série de Fourier de la Fonction de Répartition Angulaire (FRA) à la méthode bayésienne directionnelle, en passant par les méthodes de maximum de vraisemblance (MLM) et de maximum d'entropie (MEM). Ce logiciel a ensuite été intégré dans **PADINES** et n'est plus utilisé en tant que tel aujourd'hui.

GADWAS Logiciel d'analyse de houle multidirectionnelle à partir des mesures délivrées par une réseaux spatial de capteurs de surface libre (co- et quad-spectres issus de **COQUAD** ou de **SPECAN**). Prise en compte de différentes méthodes allant de la décomposition en série de Fourier de la Fonction de Répartition Angulaire (FRA) à la méthode bayésienne directionnelle, en passant par les méthodes de maximum de vraisemblance (MLM) et de maximum d'entropie (MEM).

PADINES Logiciel d'analyse de houle multidirectionnelle pour un capteur ponctuel à trois composantes. Réalise successivement les étapes d'analyse spectrale (ex-**SPECAN**), de calcul de paramètres directionnels (ex-**PARDIR**) et de calcul de spectre directionnel (ex-**PRDWAS**). Il capitalise plusieurs années de recherches. C'est un logiciel industriel utilisé au CETMEF pour l'analyse des signaux de bouées et au LNHE pour l'analyse des mesures en bassin à houle.

DEPICT Logiciel de post-traitement de spectres directionnels (issus d'un traitement de **PADINES** ou d'un modèle d'états de mer comme **TOMAWAC**), permettant de séparer les différentes composantes (pics) d'un spectre directionnel et de calculer leurs caractéristiques associées (hauteur significative spectrale, fréquence de pic, direction moyenne).

Analyse de mesures de houle et pilotage des installations d'essais du LNHE :

BATTOR Module de calcul du signal de pilotage d'un générateur de houle segmenté (bateur serpent) pour générer des vagues monodirectionnelle oblique et des états de mer multidirectionnels. Logiciel utilisé en conditions aux limites du logiciel de simulation numérique **PHISAX** et pour piloter le générateur de houle de la cuve à houle multidirectionnelle du LNHE. Trois options sont possibles : la méthode simple (reposant sur l'hypothèse d'un générateur de houle infiniment long), la méthode de « corner reflection » de Funke et Miles (1987) permettant d'augmenter la largeur de la zone utile du bassin et la méthode plus précise proposée par Dalrymple (1989), prenant en compte la diffraction.

Modélisation de la génération et de la propagation des vagues et états de mer:

- BEACH** Modélisation de la propagation des états de mer basée sur la conservation du flux d'énergie (modèle à phases moyennées) pour un profil de plage monodimensionnel. Théorie linéaire pour la propagation. Prise en compte du déferlement suivant différents modèles et du frottement sur le fond. Calcul des contraintes et radiation et couplage avec l'équation de quantité de mouvement donnant le set-up (calcul itératif).
- REEF2000** Modélisation déterministe de la propagation des vagues, basée sur l'équation de Berkhoff (1972) (modèle à résolution de phase), pour un profil de plage monodimensionnel. Théorie linéaire pour la propagation. Prise en compte du déferlement suivant différents modèles et du frottement sur le fond. Modélisation de la réflexion à la frontière côté plage. Calcul des contraintes et radiation et couplage avec l'équation de quantité de mouvement donnant le set-up.
- PHISAX** Module de calcul de champ de vague par une approche linéaire à fond plat (résolution de l'équation de Helmholtz). Application à la modélisation d'un bassin à houle multidirectionnelle. Prise en compte de la réflexion (totale ou partielle) sur les parois de la cuve. Les conditions aux limites sur le côté occupé par le batteur sont calculées par le programme **BATTOR**.
- REFRA_3D** Modélisation linéaire de la réfraction et du shoaling pour un spectre directionnel dans le cas d'une bathymétrie cylindrique (lignes bathymétriques parallèles à la côte), basée sur la conservation du flux d'énergie. A été utilisé pour fournir des solutions de référence lors de la validation de **TOMAWAC**.
- BSQ** Modélisation déterministe non-linéaire de la propagation des vagues en zone côtière, basée sur les équations de Boussinesq étendues de Nwogu (1993) en version V1P1 et de Wei *et al.* (1995) en version V2P0. Le modèle est limité aux profils de plage monodimensionnels, mais prend en compte le déferlement.

...ainsi que différentes maquettes de logiciels pour les processus physiques de **TOMAWAC**, et notamment pour le calcul des interactions non-linéaires entre quadruplets de fréquences.

Modélisation de la cinématique des vagues et théories de houle – Estimation des efforts

- ISORI82** Programmation de l'approche semi-empirique de Isobe et Horikawa (1982) pour calculer la vitesse orbitale horizontale de la houle en zone de levée. Implantation de l'amélioration proposée par Grasmeijer et Van Rijn (1998) pour étendre le domaine de validité de la méthode à la zone de déferlement.
- STOKES5** Module de calcul de la cinématique et des propriétés des vagues non-linéaires à fond plat par la théorie analytique de Stokes à l'ordre 5, d'après la formulation de Fenton (1990).
- STREAM_HT** Méthode de décomposition en série de Fourier de la fonction de courant pour le calcul du profil de surface libre et de la cinématique des vagues stables et périodiques se propageant à fond plat. Vagues données par une hauteur H et une période T (ou une longueur d'onde L), avec en plus la vitesse eulérienne moyenne ou le flux de masse. Méthode numérique non-linéaire applicable quelle que soit la profondeur et la cambrure des vagues, potentiellement exacte (pour un ordre de la fonction de courant suffisamment élevé).

STREAM_SL Méthode de décomposition en série de Fourier de la fonction de courant pour le calcul de la cinématique des vagues stables et périodiques se propageant à fond plat. Vagues données par un profil de surface libre sur une période, avec en plus la vitesse eulérienne moyenne ou le flux de masse. Méthode numérique non-linéaire applicable quelle que soit la profondeur et la cambrure des vagues, potentiellement exacte (pour un ordre de la fonction de courant suffisamment élevé).

B.6.2. Logiciels co-développés

Simulation et analyse multidirectionnelle de houle – Calcul de paramètres directionnels:

PARDIR (avec Jean-Claude Besnard) Module de calcul de paramètres directionnels d'états de mer (directions moyennes, étalement directionnels, etc.) et de critères permettant de détecter le caractère bimodal des états de mer. Ce logiciel a été intégré en 1999 dans le logiciel **PADINES**.

Modélisation de la génération et de la propagation des vagues et états de mer:

TOMAWAC (avec Frédéric Marcos, Françoise Becq-Girard et Damien Violeau). Logiciel de modélisation de la génération et de la propagation des états de mer au sein du système **TELEMAC**. C'est un modèle de troisième génération, qui utilise des maillages non-structurés pour représenter le domaine maritime. Ce code est diffusé hors du LNHE et utilisé par plusieurs organismes dans le monde.

COWADIS (avec Frédéric Marcos) Logiciel de modélisation de la propagation des états de mer en zone côtière au sein du système **TELEMAC**. C'est un modèle stationnaire et paramétrisé, qui utilise, comme **TOMAWAC**, des maillages non-structurés pour représenter le domaine maritime, mais qui est plus simplifié et ne peut être utilisé qu'à échelle locale pour des transferts de houle du large vers la côte. En 2002, **COWADIS** a été intégré comme une option de **TOMAWAC**.

Modélisation de la cinématique des vagues et théories de houle – Estimation des efforts

STREAM_FM (avec Marilyn Luck). Utilisation de la cinématique calculée par **STREAM_HT** ou **STREAM_SL** pour estimer les efforts horizontaux et le moment de renversement s'exerçant sur une structure mince exposée à l'action des vagues (utilisation de l'approche dite de Morison).

Modélisation de la dynamique sédimentaire d'un profil de plage:

PLAGE (avec Eric Jamois) Logiciel de modélisation de l'évolution d'un profil de plage soumis à l'action des houles de tempête. Utilise une approche intégrée basée sur la taux de dissipation de l'énergie de la houle (dans la zone de déferlement) pour calculer les flux de sédiments (approche théorique inspirée du code américain **SBEACH**). Permet de représenter l'érosion d'un profil de plage côtier et la formation d'une barre de déferlement.

B.6.3. Logiciels existants, maintenus ou améliorés

Modélisation de la génération et de la propagation des vagues et états de mer:

- WAM** Modèle d'états de mer de troisième génération développé pour le domaine océanique par le groupe international WAM, de 1984 à 1994. Plusieurs versions ont été installées au LNHE (cycles 2, 3 et 4) et interfacés avec les post-processeurs graphiques du LNHE. Ce logiciel a été utilisé pour simuler des épisodes de tempêtes en Atlantique, Manche et Mer du Nord.
- REFRAC** Modèle linéaire de propagation de houle monochromatique en zone côtière basé sur la théorie des rayons. Ce logiciel a été abandonné au milieu des années 1990, au profit de **TOMAWAC** et **COWADIS**.
- DIFRA2** Modèle linéaire de diffraction-réflexion de houle monochromatique en zone portuaire à fond plat, basé sur l'équation de Helmholtz. A été abandonné au début des années 1990, au profit de **ARTEMIS** et n'est plus utilisé que pour l'enseignement dans le cadre de projets réalisés avec les élèves.

Analyse de mesures de houle et pilotage des installations d'essais du LNHE :

- ANHOUL** Logiciel d'analyse statistique et spectrale de mesures de houle, développé dans les années 1980 et utilisé par le CETMEF. J'ai réalisé de l'assistance et quelques développements mineurs sur ce logiciel en 1990-1991, avant qu'il soit remplacé par **SPECAN**, puis par **PADINES**.
- GEDAP** Système de logiciels développé par le CHC-CNRC au Canada pour le pilotage des installations d'essais (génération et analyse des signaux de houle). Ce système équipe la cuve à houle multidirectionnelle du LNHE et nous avons effectué quelques développements sur cette base.
- CHAT** Système de logiciels développé par le LNH dans les années 1970-80 pour le pilotage des installations d'essais (génération et analyse des signaux de houle). Nous avons effectué des développements pour réaliser notamment des relevés automatiques d'agitation lors des études d'agitation portuaire en bassin à houle.

B.7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

B.7.1. Références internes au LNHE (rapports et thèses)

- ALLILAIRE J. (1996) Dimensionnement du talus arrière de digue en enrochement. Rapport EDF-LNH HE-42/96.51
- BECQ F. (1998) Extension de la modélisation spectrale des états de mer vers le domaine côtier. Thèse soutenue à l'Université de Toulon et du Var (France), le 26/11/1998.
- CHALOIN B. (1989) Modèle d'états de mer - Rapport N°1 - Equations et méthodes de résolution. Rapport EDF-LNH HE-42/89.06B.
- HERVOUET J-M. (2003) Hydrodynamique des écoulements à surface libre. Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 312 p, Paris (France).
- LUCK M. (2003) Modélisation de la propagation de la houle en zone côtière par couplage de théories non-linéaires. Rapport EDF-LNH LNHE HP-75/03/045/B, 30 pages.
- MARCOS F. (1995) TOMAWAC V1.0 - Notice d'utilisation et descriptif informatique. Rapport EDF-LNH HE-42/95.48

B.7.2. Références externes au LNHE

- AIRH / AIPCN (1986) Paramètres des états de mer. Supplément au bulletin N°52 de l'AIRH.
- AIRY G.B. (1845) Tides and waves. Encyclopaedia Metropolitana. Art. 192, pp 241-369.
- BATTJES J.A., JANSSEN J.P.F.M. (1978) Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., pp 569-587.
- BATTJES J.A., GROENENDIJK H.W. (2000) Wave height distributions on shallow foreshores. Coastal Eng., Vol. 40, pp 161-182.
- BERKHOFF J.C.W. (1972) Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., Vol. 1, pp 471-490.
- BINGHAM H.B, AGNON Y. (2005) A Fourier-Boussinesq method for nonlinear water waves. European J. Fluid Mech., B/Fluids. Vol. 24, pp 255-274.
- BOUWS E., KOMEN G. J. (1983) On the balance between growth and dissipation in an extreme depth-limited wind-sea in the southern North-Sea. J. Phys. Oceanogr., Vol. 13, pp 1653-1658.
- BRETHERTON F.P., GARRET C.J.R. (1969) Wavetrains in inhomogeneous moving media. Proc. Roy. Soc. London, Series A., Vol. 302, pp 529-554.
- BRISSETTE F.P., TSANIS I.K. (1994) Estimation of wave directional spectra from pitch-roll buoy data. J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 120, N°1, pp 93-115.
- BROEZE J. (1993) Numerical modelling of nonlinear free surface waves with a 3D panel method. PhD Thesis. Tech. Univ. Twente, Twente (The Netherlands).
- CHAKRABARTI S.K., KRIEBEL D., BEREK E.P. (1997) Force on a single pile caisson in breaking wave and current. Applied Ocean Research, Vol. 19, pp 113-140.
- CHEVALIER C. (2000) Action de la houle sur un cylindre immergé en zone côtière. Thèse de doctorat de l'université de Caen, 184 p.

- CHEVALIER C., LAMBERT E., BELORGEY M. (2001) Efforts sur une conduite sous-marine en zone côtière : Etude expérimentale des forces hydrodynamiques exercées par des houles pré-déferlantes sur un cylindre horizontal près du fond, *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 5 n°7, pp. 945-958.
- CHRISTOFFERSEN J.B., JONSSON I.G (1985) Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion. *Ocean Eng.*, Vol. 12, N°5, pp 387-423.
- COST ACTION 714 (2001) Measurement and use of directional spectra of ocean waves. Final Report Ref 20608. Commission Européenne.
- DALRYMPLE R.A. (1989) Directional wavemaker theory with sidewall reflection. *J. Hydraulic Research*, Vol. 27, N°1.
- DEAN R.G. (1965) Stream-function representation of non-linear ocean waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, n°18, pp 4561-4572.
- DINGEMANS M.W. (1994) Comparison of computations with Boussinesq-like models and laboratory measurements. Tech. Report H1684, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- DINGEMANS M.W. (1997) Water wave propagation over uneven bottoms. Part 1: Linear wave propagation & Part 2: Non-linear wave propagation. *Advanced Series on Ocean Engineering.*, Vol. 13, World Scientific.
- DOERING J.C., BOWEN A.J. (1986) Shoaling surface gravity waves : a bispectral analysis. *Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, Vol. I, pp 150-162.
- DOERING J.C., BOWEN A.J. (1995) Parameterization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis. *Coastal Eng.*, Vol. 26, pp 15-33.
- DRAGO M., IOVENITTI L. (1995) The modelling of plunging breakers by the introduction of a K-turbulence closure model. *Proc. Int. Conf. Coastal Dynamics'1995*, Gdansk (Poland), pp 317-328.
- ELDEBERKY Y., BATTJES J.A. (1995) Parameterisation of triads interactions in wave energy models. *Proc. Coastal Dynamics'1995*, pp 140-148.
- ELDEBERKY Y. (1996) Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. Thesis Report. *Comm. on Hydraulic and Geotech. Eng.*, report No 96-4, Delft University of Technology, Delft (The Netherlands).
- ELGAR S., GUZA R.T. (1985) Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 161, pp 1-18.
- ELNAGGAR Z., WATANABE A. (2000) Nonlinear wave dynamics in surf and swash zones. *Proc 27th Int. Conf. on Coastal Eng.*, Sydney (Australia), pp 664-676.
- FENTON J.D. (1988) The numerical solution of steady water wave problems. *Computers & Geosciences*, Vol. 14, pp 357-368.
- FENTON J.D. (1990) Nonlinear wave theories. *The Sea*, Vol. 9, Part A., Ed. Le Méhauté et Hanes, Wiley Interscience, pp 3-25.
- FENTON J.D. (1999) Numerical methods for nonlinear waves. "Advances in Coastal and Ocean Engineering", Vol. 5, pp 241-324, P.L.F. Liu Ed., World Scientific.
- FUNKE E.R., MILES M.D. (1987) Multidirectional wave generation with corners reflectors. Technical Report HY-021, National Research Council Canada.
- GERDING E. (1993) Toe structure stability of rubble mound breakwaters. Master's Thesis, Report H1874 - Delft University of Technology (The Netherlands).

- GOBBI M.F., KIRBY J.T. (1999) Wave evolution over submerged sills : tests of a high-order Boussinesq model. *Coastal Eng.*, Vol 37, pp 57-96.
- GODA Y. (2000) Random seas and design of maritime structures. *Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol. 15. World Scientific Ed., 444 p.
- GRANT W.D., MADSEN O.S. (1979) Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, N°C4, pp 1797-1808.
- GRASMEIJER B.T., VAN RIJN L.C. (1998) Breaker bar formation and migration. *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, Copenhagen (Denmark), pp 2750-2758.
- GRILLI S.T., SKOURUP J., SVENDSEN I. A. (1989) An efficient boundary element method for nonlinear water waves. *Eng. Anal. with Boundary Elements*, Vol. 6, pp 97-107.
- GRILLI S.T. (1993) Modeling of nonlinear wave motion in shallow water. In *Computational Methods for free and moving Boundary Problems in Heat and Fluid Flows*. Ed. L.C. Wrobel and C.A. Brebbia. Pp 37-65. Elsevier Applied Sciences, London, UK.
- GRILLI S.T., GUYENNE P., DIAS F. (2001) A fully non-linear model for three-dimensional overturning waves over an arbitrary bottom.. *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 35, pp 829-867.
- GUEDES-SOARES C. (1984) Representation of double-peaked sea wave spectra. *Ocean Eng.*, Vol. 11, pp 185-207.
- HAMM L. (1995) Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement. Thèse soutenue à l'Université Joseph Fourier (Grenoble) le 06/10/1995.
- HAMM L. (1996) Computation of the near-bottom kinematics of shoaling waves. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, Orlando (Florida, USA), pp 537-550.
- HAMM L. (2001) Depth-limited wave breaking for the design of nearshore structures. *Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis*. 2-6 September 2001. San-Francisco (USA)
- HASHIMOTO N., KOBUNE K., KAMEYAMA Y. (1987) Estimation of directional spectrum using the Bayesian approach and its application to field data analysis. *Rep. of Port and Harbour Research Inst.*, Vol. 26.
- HASHIMOTO N. (1997) Analysis of the directional wave spectrum from field data. *Advances in Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 3, Ed. P.L.F. Liu (Cornell Univ.), pp 103-143.
- HASSELMANN K. (1962) On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I : General theory. *J. Fluid Mech.*, Vol. 12, pp 481-500.
- HASSELMANN K., MUNK W., MAC DONALD G. (1963) Bispectra of ocean waves. Extrait de "Time series analysis", Ed. M. Rosenblatt, Wiley Ed., pp 125-139.
- HASSELMANN K., BARNETT T.P., BOUWS E., CARLSON H., CARTWRIGHT D.E., ENKE K., EWING J.A., GIENAPP H., HASSELMANN D.E., KRUSEMAN P., MEERBURG A., MULLER P., OLBERS D.J., RICHTER K., SELL W., WALDEN H. (1973) Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A (8°)*, N° 12.
- HASSELMANN S., HASSELMANN K., ALLENDER J.H., BARNETT T.P. (1985) Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in gravity-wave spectrum. Part II : Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 15, pp 1378-1391.
- HATTORI M., KATSURAGAWA T. (1990) Improved calculation of the shoaling wave field. *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, Delft (The Netherlands), pp 396-409.

- HAUBRICH R.A. (1965) Earth noise, 5 to 500 millicycles per second. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, N°6, pp 1415-1427.
- HAUSER D., GAUDAL G., RIJCKENBERG J., VIDAL-MADJAR D., LAURENT G., LANCELIN P. (1992) RESSAC : a new airborne FM/CW radar ocean wave spectrometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 30, pp 981-995.
- HAUSER D., SOUSSI E., THOUVENOT E., RE L. (2001) SWIMSAT : a real aperture radar to measure directional spectra of ocean waves from space. Main characteristics and performance simulation. *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, Vol. 18, N°3, pp 421-437.
- HINICH M.J., CLAY C.S. (1968) The application of the discrete Fourier transform in the estimation of power spectra, coherence and bispectra of geophysical data. *Rev. Geophys.*, Vol. 6, pp 347-363.
- HOLTHUIJSEN L.H., BOOIJ N., DOORN N., KIEFTENBURG A.T.M.M (1997) Diffraction in a spectral wave model. *Proc. Int. Conf. Waves 1997 "Ocean wave measurement and analysis"* Vol. 1, pp 243-255.
- HOLTHUIJSEN L.H., HERMAN A., BOOIJ N., CIESLIKIEWICZ W. (2002) Diffraction in SWAN. *Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Eng., Cardiff (UK)*, pp 405-411.
- HOLTHUIJSEN L.H., HERMAN A., BOOIJ N. (2003) Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave model. *Coastal Eng.*, Vol. 49, pp 291-305.
- HSU T-W., OU S-H., LIAU J-M. (2005) Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN. *Coastal Eng.*, Vol. 52, pp 177-195.
- HUGHES S.A., BORGMAN L.E. (1987) Beta-Rayleigh distribution for shallow-water wave heights. *Proc. Int. Conf. Coastal Hydrodynamics*, Ed R. Dalrymple (Delaware, Newark, USA), pp 17-31.
- ISOBE M., HORIKAWA K. (1982) Study on water particle velocities of shoaling and breaking waves. *Coastal Eng. in Japan*, vol. 25, pp 109-123.
- IZUMIYA T., HORIKAWA K. (1984) Wave energy equation applicable in and outside the surf zone. *Coastal Eng. in Japan*, Vol.27, pp.119-137.
- JACKSON F.C., WALTON W.T., BAKER P.L. (1985) Aircraft and Satellite Measurement of ocean wave directional spectra using scanning beam microwave radar. *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, N° C1, pp 987-1004.
- JANSSEN P.A.E.M. (1989) Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 19, pp 745-754.
- JANSSEN P.A.E.M. (1991) Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 21, pp 1631-1642.
- JENKINS G.M., WATTS D.G. (1968) *Spectral analysis and its applications*. Holden Day, 525 p.
- KARAMBAS T.V., TOZER N.P (2003) Breaking waves in the surf and swash zone. *J. Coastal Res.*, Vol. 19, N°3, pp 514-528.
- KAY S.M. (1988) *Modern spectral estimation : theory and applications*. Prentice Hall. 544 p.
- KENNEDY A.B., CHEN. Q., KIRBY J.T., DALRYMPLE R.A. (2000) Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. Part I : 1D. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 126, pp 16-25.
- KIM Y.C., POWERS E.J. (1979) Digital bispectral analysis and its application to nonlinear wave interactions. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. PS7, N°2, pp 120-131.
- KIM Y.C., BEALL J.M., POWERS E.J., MIKSAD R.W. (1980) Bispectrum and nonlinear wave coupling. *Physics of Fluids*, Vol. 23, N°2, pp 258-263.

- KIM T., LIN L., WANG H. (1993) Comparisons of directional wave analysis methods. Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (ASCE), pp 554-568, New-Orleans (USA).
- KLOPMAN G. (1996) Extreme wave heights in shallow water. Report H2486. WL / Delft Hydraulics, Delft (The Netherlands).
- KOBUNE K., SASAKI H., HASHIMOTO N. (1985) Characteristics of ocean waves off Cape Nojima in the Northwestern Pacific, measured with a discus buoy. Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 24, n° 3, pp 3-30.
- KOMEN G.J., HASSELMANN S., HASSELMANN K. (1984) On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. J. Phys. Oceanogr., Vol. 14, pp 1271-1285.
- KOMEN G.J., CAVALERI L., DONELAN M., HASSELMANN K., HASSELMANN S., JANSSEN P.A.E.M. (1994) Dynamics and Modelling of ocean waves. Cambridge University Press, 1994, 532 p.
- KOYAMA, H., IWATA, K. (1985) Estimation of water particle velocities by a modified transfer function method. Coastal Eng. in Japan, Vol. 28, pp 1-13.
- KROGSTAD H.E., GORDON R.L., MILLER M.C. (1988) High-resolution directional wave spectra from horizontally mounted acoustic Doppler current meters. J. Atmos. and Oceanic Techn., Vol. 5, pp 340-352.
- KROGSTAD H.E., BARSTOW S.F. (1999) Satellite wave measurements for coastal engineering applications. Coastal Eng., Vol. 37, pp 283-308.
- KROGSTAD H.E., BARSTOW S.F., AASEN S.E., RODRIGUEZ I. (1999) Some recent developments in wave buoy measurement technology. Coastal Eng., Vol. 37, pp 309-330.
- KUIK A.J., VAN VLEDDER G.Ph., HOLTHUIJSEN L.H. (1988) A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data. J. Phys. Oceanogr., Vol. 18.
- KUNT M. (1984) Traitement numérique des signaux. Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Vol. XX, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne (Suisse) 404 p.
- LARSON M. (1995) Model for decay of random waves in surf zone. J. Waterway., Port, Coastal and Ocean Eng., 121(1), pp 1-12.
- LAVRENOV I.V. (2001) Effect of wind wave parameter fluctuation on the nonlinear spectrum evolution. J. Phys. Oceanogr., Vol. 31, pp 861-873.
- L'HER J., GOASGUEN G., ROGARD M. (1999) CANDHIS data-base of in-situ sea states measurements on the French coastal zone. Proc. 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE'1999), 30 Mai – 4 Juin 1999, Brest (France).
- LIU P.C., GREEN A.W. (1978) Higher order wave spectra. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), Vol. I, pp 360-371.
- LONGUET-HIGGINS M.S., CARTWRIGHT D.E., SMITH N.D. (1963) Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, pp 111-136.
- LUTH H.R., KLOPMAN G., KITOU N. (1994). Project 13G : kinematics of waves breaking partially on an offshore bar. LVD measurements for waves without a net onshore current. Tech. Report H1573, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- LYGRE A., KROGSTAD H.E. (1986) Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra. J. Phys. Oceanogr., Vol. 16, pp 2052-2060.
- MADSEN P.A., SCHÄFFER H.A. (1998) Higher-order Boussinesq-type equations for surface gravity waves : derivation and analysis. Phil. Trans. Royal Soc. London, Vol. A-356, pp 3123-3184.

- MADSEN P.A., SCHÄFFER H.A. (1999) A review of Boussinesq-type equations for surface gravity waves. *Advances in Coastal and Ocean Eng.*, Vol 5, pp 1-94. P-L-F. Liu Ed, World Scientific, Singapore.
- MASE H. (2001) Multi-directional random wave transformation model based on energy balance equation. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 43, No 4, pp 317-337.
- MASSEL S.R. (1996) *Ocean surface waves : their physics and prediction*. Advanced Series on Ocean Eng. Vol. 11. World Scientific Ed., 492 p.
- MASUDO A., KUO Y.Y. (1981) A note on the imaginary part of bispectra. *Deep Sea Research*, Vol. 28A, N°3, pp 213-222.
- MEI C.C. (1983) *The applied dynamics of ocean surface waves*. John Wiley Ed., New-York (USA).
- MENDEZ F.J., LOSADA I.J., MEDINA R. (2004) Transformation model of wave height distribution on planar beaches. *Coastal Eng.*, Vol. 50, pp 97-115.
- MORISON J.R., O'BRIEN M.P., JOHNSON J.W., SCHAAF S.A. (1950) The force exerted by surface waves on piles. *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 189, TP 2846, pp 149-154.
- NWOGU O.G., MANSARD E.P.D., MILES M.D., ISAACSON M. (1987) Estimation of directional wave spectra by the maximum entropy method. *Proc. 17th IAHR Seminar, Lausanne (Switzerland)*, pp 363-376.
- NWOGU O.G. (1989) Maximum entropy estimation of directional wave spectra from an array of wave probes. *Applied Ocean Research*, Vol. 11, N°4, pp 176-193.
- NWOGU O.G. (1993) An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. Waterway., Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 119(6), pp 618-638.
- NWOGU O.G. (1996) A Boussinesq model for waves breaking in shallow water. *Proc 25th Int. Conf. on Coastal Eng., Orlando (Florida, USA)*, pp 4807-4820.
- OCHI M.K., HUBBLE E.N. (1976) On six-parameter wave spectra. *Proc. 15th Int Conf. on Coastal Eng.*, pp 301-328.
- OUELLET Y., DATTA I. (1986) A survey of wave absorbers. *J. Hydraulic Res.*, Vol. 24, pp 256-280
- PHILLIPS O.M. (1977) *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press, Second edition, 336 p.
- PISCOPIA R., PANIZZO A., DE GIROLAMO P. (2004) An efficient method to identify cross-spectra from wave measurements. *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp 941-965.
- PRESS W.H., FLANNERY B.P., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T. (1992) *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing (Fortran Version)*. Cambridge University Press. Cambridge (UK), 702 p.
- PRISLIN I., ZHANG J., JOHNSON P. (1996) Deterministic decomposition of irregular short-crested surface gravity waves. *Proc. 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE'1996)*, Vol. III, pp 57-64.
- PRISLIN I., ZHANG J., SEYMOUR R.J. (1997) Deterministic decomposition of deep-water short-crested irregular gravity waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, No C6, pp 12,677-12,688.
- RATTANAPITIKON W., SHIBAYAMA T. (2000) Simple model for undertow profile. *Coastal Eng. Journal*. Vol. 42, N°1, pp 1-30.
- ROELVINK J.A. (1993) Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal. Eng.*, Vol. 19, pp 127-150.
- SARPKAYA T., ISAACSON M. (1981) *Mechanics of wave forces on offshore structures*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 650 p.

- SCHAFFER H.A., MADSEN P.A., DEIGAARD R. (1993) A Boussinesq model for waves breaking in shallow water. *Coastal Eng.*, Vol. 200, pp 185-202.
- SNYDER. R.L., DOBSON F.W., ELLIOT J.A., LONG R.B. (1981) Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 102, pp 1-59.
- SORENSEN O.R., RUGBJERG M., KOFOED-HANSEN H., SORENSEN L.S. (2004) A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng.*, Lisbon (Portugal).
- SWAMP Group (1985) Sea Wave Modelling Project (SWAMP). An intercomparison study of wind wave prediction models. Part 1 : Principal results and conclusions. *Ocean Wave Modeling*, Plenum Press, New-York, 256 p.
- SWART D.H., CROWLEY J.B. (1988) Generalized wave theory for a sloping bottom. *Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng.*, (ASCE), Malaga (Spain), pp 181-203.
- THORNTON E.B., GUZA R.T. (1983) Transformation of wave height distribution, *J. Geophys. Res.*, vol. 88, N° C10, pp 5925-5938.
- TOLMAN H.L., CHALIKOV D. (1996) Source terms in a third generation wind wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 26, pp 2497-2518.
- TWU S.W., LIN D.T. (1990) Wave reflection by a number of thin porous plates fixed in a semi-infinitely long flume. *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng.*, Delft, The Netherlands.
- VAN DER MEER J. W. (1988) Rock slopes and gravel beaches under wave attack. Doctoral thesis. Publication N°396, Delft Hydraulics (The Netherlands).
- VAN DER MEER J. W. (1993) Conceptual design of rubble-mound breakwaters. Publication N°483, Delft Hydraulics (The Netherlands).
- VEERAMONY J., SVENDSEN I.A. (1998) A Boussinesq model for breaking waves : comparisons with experiments. *Proc 26th Int. Conf. on Coastal Eng.*, Copenhagen (Denmark), pp 258-271.
- VEERAMONY J., SVENDSEN I.A. (2000) The flow in surf-zone waves. *Coastal Eng.*, Vol. 39, pp 93-122.
- VINCENT C.L., BRIGGS M.J. (1989) Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 115, N°2, pp 269-284.
- WAMDI Group (1988) The WAM-model - A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 18, pp 1775-1810.
- WELCH P.D. (1967) The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra : a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans. Audio and Electro-acoustics*, Vol. AU-15, pp 70-73.
- WEI G., KIRBY J.T., GRILLI S.T., SUBRAMANYA R. (1995) A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 294, pp 71-92.
- WHEELER J.D. (1970) Method for calculating forces produced by irregular waves. *J. Petroleum. Tech.*, Vol. 22, no. 3, pp. 359-367
- WILLEBRAND J. (1975) Energy transport in a non-linear and inhomogeneous random gravity wave field. *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, pp 113-126.
- WU N-J., TSAY T-K., YOUNG D.L. (2006) Meshless numerical simulation for fully nonlinear water waves. *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 50, pp 219-234.
- WYATT L.R., THOMPSON S.P., BURTON R.R. (1999) Evaluation of high frequency radar wave measurement. *Coastal Eng.*, Vol. 37, pp 259-282.

**C. PUBLICATIONS, ARTICLES, RAPPORTS,
PRESENTATIONS**

C.1. Articles scientifiques (conférences et revues)

C.1.1. Chapitres de livres – Articles de synthèse de l'état de l'art (LI)

- [LI01] FRIGAARD P., HELM-PETERSEN J., KLOPMAN G., STANSBERG C.T., BENOIT M., BRIGGS M.J., MILES M., SANTAS J.C., SCHAFFER H.A., HAWKES P.J. (1997) IAHR list of sea-state parameters – An update for multidirectional waves. *Proc. IAHR Seminar on Multidirectional Waves and their Interactions with Structures, San-Francisco (Californie, USA), pp 15-24.*
- [LI02] HAWKES P.J., EWING J.A., HARFORD C.M., KLOPMAN G., STANSBERG C.T., BENOIT M., BRIGGS M.J., FRIGAARD P., HIRAISHI T., MILES M., SANTAS J.C., SCHAFFER H.A., (1997) Comparative analyses of multidirectional wave basin data. *Proc. IAHR Seminar on Multidirectional Waves and their Interactions with Structures, San-Francisco (Californie, USA), pp 25-87.*
- [LI03] MILES. M.D., BENOIT M., FRIGAARD P., HAWKES P.J., SCHAFFER H.A., STANSBERG C.T. (1997) A comparison study of multidirectional waves generated in laboratory basins. *Proc. IAHR Seminar on Multidirectional Waves and their Interactions with Structures, San-Francisco (Californie, USA), pp 89-129.*
- [LI04] BENOIT M., FRIGAARD P., SCHAFFER H.A. (1997) Analyzing multidirectional wave spectra: a tentative classification of available methods. *Proc. IAHR Seminar on Multidirectional Waves and their Interactions with Structures, San-Francisco (Californie, USA), pp 131-158.*
- [LI05] CIRIA, CUR, CETMEF (2005) The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. Second edition. *CIRIA Publication C683, London (UK), 1200 p environ. J'assure la coordination de la rédaction du Chapitre 4 : Physical site conditions and data collection (180 pages en version quasi-définitive à l'automne 2005).*
- [LI06] VAN VLEDDER G.PH., BENOIT M., ONORATO M., TOLMAN H., LAVRENOV I., POLNIKOV V., RESIO D. (2005-2006) Modelling nonlinear four-wave interactions in discrete spectral wave models. *Chapitre de l'ouvrage de synthèse (white-paper) préparé par le groupe de travail international WISE (Waves In Shallow water Environments).*

C.1.2. Articles de revues et de journaux scientifiques (AJ)

- [AJ01] BENOIT M., GOASGUEN G. (1996) Analyse directionnelle des états de mer : Comparaison de différentes méthodes d'analyse appliquées à des capteurs ponctuels. *Revue Technique des Phares et Balises, N°97, Décembre 1996, pp 3-27.*
- [AJ02] BECQ-GIRARD F., FORGET Ph., BENOIT M. (1999) Non-linear propagation of unidirectional wave fields over varying topography. *Coastal Engineering, Vol. 38, N°2, pp 91-113.*

- [AJ03] BENOIT M., AELBRECHT D., BELLUE G., LUCK M., VIOLEAU D. (2002) Propagation des houles et des surcotes extrêmes vers les côtes et les estuaires. Apports de la modélisation numérique. *Actes du séminaire « Les conditions maritimes extrêmes » de la Société Hydrotechnique de France (SHF), 5 Juin 2001, Paris (France). La Houille Blanche, N°2-2002, pp 86-89.*
- [AJ04] BENOIT M., VIOLEAU D., FOURNIER J-C., L'HER J., GOASGUEN G. (2003). Progress in building a wave climate database along the French coasts through numerical hindcast simulations over a 20-years period. In "Building the European capacity in operational oceanography", Dahlin, Flemming, Nittis and Petersson Eds., Elsevier Oceanography Series, Vol. 69, pp 386-391.
- [AJ05] AELBRECHT D., BENOIT M., ALLILAIRE J. (2003) Renforcement de la protection de la Centrale du Blayais contre l'inondation : apports conjoints des modélisations numérique et physique. *Actes du Colloque « Quels modèles physiques pour le XXI^{ème} siècle » de la Société Hydrotechnique de France (SHF) - Lyon (France), Octobre 2003. La Houille Blanche, N°3-2004, pp 37-44.*
- [AJ06] LUCK M., MENON J-M., BENOIT M. (2005) Efforts dus aux vagues sur un cylindre vertical en zone côtière. Etude expérimentale et méthodes de prédiction. *Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 9, N°7-8/2005, pp 979-991.*
- [AJ07] CHEVALIER C., LUCK M., BENOIT M. (2005) Prédiction de la cinématique de houle en zone de déferlement. *Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 9, N°7-8/2005, pp 871-887*

C.1.3. Articles de conférences avec comité de lecture (AC)

- [AC01] BENOIT M. (1992) Practical comparative performance survey of methods used for estimating directional wave spectra from heave-pitch-roll data. *Proc 23rd Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1992), 4-9 Octobre 1992, Venise (Italie), pp 62-75.*
- [AC02] BENOIT M. (1993) Extensive comparison of directional wave analysis methods from gauge array data. *Proc. 2nd Int. Conf. on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES'1993), 25-28 Juillet 1993, La Nouvelle-Orléans (Louisiane, USA), pp 740-754.*
- [AC03] BESNARD J-C., BENOIT M. (1994) Representative directional wave parameters – Review and comparison on numerical simulations. *Proc. Int. Symp. « Waves : physical and numerical modelling », 21-24 Août 1994, Vancouver (Canada), pp 901-910.*
- [AC04] BENOIT M., TEISSON C. (1994) Laboratory study of breakwater reflection. Effect of wave obliquity, wave steepness and mound slope. *Proc. Int. Symp. « Waves : physical and numerical modelling », 21-24 Août 1994, Vancouver (Canada), pp 1021-1030.*
- [AC05] ALLILAIRE J., BENOIT M. (1994) Optimisation en canal à houle d'un absorbeur à plaques poreuses verticales. *Actes des IIIèmes Journées Génie Civil Génie Côtier, Sète (France).*
- [AC06] BENOIT M., TEISSON C. (1994) Laboratory comparison of directional wave measurement systems and analysis techniques. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1994), 23-28 Octobre 1994, Kobe (Japon), pp 42-56.*

- [AC07] TEISSON C., BENOIT M. (1994) Laboratory measurement of oblique irregular wave reflection on rubble-mound breakwaters. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1994), 23-28 Octobre 1994, Kobe (Japon), pp 1610-1624.*
- [AC08] BENOIT M. (1995) Quelques aspects du développement d'un bassin numérique à houle multidirectionnelle. *Actes des 5èmes Journées de l'Hydrodynamique, 22-24 Mars 1995, Rouen (France), pp 73-86.*
- [AC09] BENOIT M., TEISSON C. (1995) Spectral wave modelling along the French Atlantic Coasts and in the Channel. *Proc. 26th Congress of the International Association for Hydraulic Research (HYDRA'2000), 11-15 Septembre 1995, Londres (UK), pp 156-161.*
- [AC10] BENOIT M., MARCOS F., BECQ F. (1996) Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1996), 2-6 Septembre 1996, Orlando (Floride, USA), pp 465-478.*
- [AC11] DONNARS P., BENOIT M. (1996) Interactions in the stability of toe-berm and main-armour for rubble mound breakwaters : an experimental study. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1996), 2-6 Septembre 1996, Orlando (Floride, USA), pp 1617-1630.*
- [AC12] BECQ F., BENOIT M., FORGET Ph. (1997) Laboratory observations and numerical simulations of shoaling surface gravity waves. *Proc. Int Conf. Coastal Dynamics'1997, 23-27 Juin 1997, Plymouth (UK), pp 167-176*
- [AC13] MARCOS F., BENOIT M., BECQ F. (1997) TOMAWAC : a prediction model for offshore and nearshore storm waves. *Proc. 26th Congress of the International Association for Hydraulic Research, San-Francisco (Californie, USA).*
- [AC14] LATTEUX B., BENOIT M. (1997) Morphodynamique : un couplage à échelles multiples entre forçage (écoulement) et sa réponse (évolution des fonds). *Actes du Symposium Saint-Venant "Analyse Multi-échelle et systèmes physiques couplés", 28-29 Août 1997, Paris (France), pp 187-194.*
- [AC15] BENOIT M., MARCOS F., JANIN J-M. (1997) Interactions atmosphère-houle-marée-surcotes appliquées à la simulation des tempêtes en mer. *Actes du Symposium Saint-Venant "Analyse Multi-échelle et systèmes physiques couplés", 28-29 Août 1997, Paris (France), pp 211-218.*
- [AC16] JANIN J-M., BENOIT M., GROSS T. (1997) Numerical simulation of tidal currents with TELEMAC for Olympic Games ATLANTA'96. *Proc. 5th Int. Conf. on Estuarine and Coastal Modelling, 22-24 Octobre 1997, Alexandrie (Virginie, USA).*
- [AC17] BECQ F., BENOIT M., FORGET Ph. (1998) Numerical simulations of directionally spread shoaling surface gravity waves. *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1998), 22-26 Juin 1998, Copenhagen (Danemark), pp 523-536.*
- [AC18] AELBRECHT D., BENOIT M., MARCOS F., GOASGUEN G. (1998) Prediction of offshore and nearshore storm waves using a third generation spectral wave model. *Proc 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE'1998), Montreal, (Canada), pp 71-76.*
- [AC19] BECQ F., BENOIT M., FORGET Ph. (1998) Evolution non-linéaire de la houle dans la zone de shoaling. *Actes des Vèmes Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier, Toulon (France).*

- [AC20] BENOIT M., GOASGUEN G. (1999) Comparative evaluation of directional wave analysis techniques applied to field measurements. *Proc. 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE'1999)*, 30 Mai – 4 Juin 1999, Brest (France), pp 87-94.
- [AC21] MARCOS F., BENOIT M. (1999) A steady-state shallow-water spectral wave model based on unstructured spatial meshing. *Proc. 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE'1999)*, 30 Mai – 4 Juin, 1999, Brest (France), pp 126-131.
- [AC22] VIOLEAU D., BENOIT M. (2001) A first assessment of Smoothed Particle Hydrodynamics in Fluid Mechanics. *Proc. 29th Congress of the International Association for Hydraulic Research (IAHR'2001)*, 16-21 Septembre 2001, Pékin (Chine), pp 347-352.
- [AC23] BUREL D., VILLARET C., BENOIT M. (2001) Clapage : modélisation du champ proche. *Actes des Journées Scientifiques et Techniques 2001 du CETMEF, Paris (France)*.
- [AC24] BENOIT M., LUCK M., CHEVALIER C., BELORGEY M. (2002) Near-bottom kinematics of shoaling and breaking waves : Experimental investigation and numerical prediction. *Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2002)*, 8-12 Juillet 2002, Cardiff (UK), pp 306-318.
- [AC25] VILLARET C., BENOIT M., MACHET C. (2003) Modélisation hydro-sédimentaire en zone littorale : Programme de développement au LNHE. *Actes des Journées Scientifiques et Techniques 2003 du CETMEF, 25-27 Mars 2003, Paris (France)*.
- [AC26] CHEVALIER C., LUCK M., BENOIT M. (2004) Experimental validation of prediction methods for wave kinematics in the coastal zone. *Proc. 14th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE'2004)*, Vol. III, pp 329-336, 24-28 Mai 2004, Toulon (France).
- [AC27] LUCK M., MENON J-M., BENOIT M. (2004) Efforts hydrodynamiques sur un cylindre vertical en zone côtière. *Actes des VIIIèmes Journées Génie Civil – Génie Côtier, 7-9 Septembre 2004, Compiègne (France)*.
- [AC28] CHEVALIER C., LUCK M., BENOIT M. (2004) Prédiction de la cinématique de houle en zone de déferlement. *Actes des VIIIèmes Journées Génie Civil – Génie Côtier, 7-9 Septembre 2004, Compiègne (France)*.
- [AC29] BENOIT M., LAFON F. (2004) A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modelling of wave climate over 25 years. *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2004)*, 19-24 Septembre 2004, Lisbonne (Portugal), pp 714-726.
- [AC30] LUCK M., BENOIT M. (2004) Wave loading on monopile foundation for offshore wind-turbines in shallow-water areas. *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2004)*, 19-24 Septembre 2004, Lisbonne (Portugal), pp 3992-4004.
- [AC31] DUPRAY S., FONS M., BENOIT M., TRICHET J-J. (2004) Rédaction d'un guide sur l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques 'Rock Manual – 2^{ème} édition'. *Actes des Journées Scientifiques et Techniques du CETMEF, 7-9 Décembre 2004, Paris (France)*.
- [AC32] BENOIT M. (2005) Evaluation of methods to compute the non-linear quadruplet interactions for deep-water wave spectra. *5th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES'2005)*, 3-7 Juillet 2005, Madrid (Espagne).

- [AC33] LUCK M., BENOIT M. (2005) Verification of prediction models for undertow profile in the surf zone. *5th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES'2005)*, 3-7 Juillet 2005, Madrid (Espagne).

Articles et résumés soumis et acceptés pour présentation ou publication :

- [AC34] LAFON F., BENOIT M. (2006) Estimation of extreme wave conditions from hindcast simulations with application to the wave climate along French coasts. *30th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2006)*, 3-8 Septembre 2006, San Diego (Californie, USA).
- [AC35] BENOIT M. (2006) Implementation and test of improved methods for evaluation of nonlinear quadruplet interactions in a third generation wave model. *30th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2006)*, 3-8 Septembre 2006, San Diego (Californie, USA).
- [AC36] ARDHUIN F., GIRARD-BECQ F., BENOIT M., BAZOU F., WOLF J., OSUNA P. (2006) Comparison and validation of spectral wave models with tidal effects. *30th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2006)*, 3-8 Septembre 2006, San Diego (Californie, USA).
- [AC37] LEE E-S., VIOLEAU D., BENOIT M., ISSA R. (2006) Prediction of wave overtopping on coastal structures by using extended Boussinesq and SPH models. *30th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2006)*, 3-8 Septembre 2006, San Diego (Californie, USA).
- [AC38] HAMM L., GOASGUEN G., BENOIT M. (2006) Analyse et caractérisation des états de mer complexes à partir de mesures in situ par bouées directionnelles. *IXèmes Journées Génie Civil – Génie Côtier*, 12-14 Septembre 2006, Brest (France).
- [AC39] BENOIT M., LAFON F., GOASGUEN G. (2006) Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 25 ans. *IXèmes Journées Génie Civil – Génie Côtier*, 12-14 Septembre 2006, Brest (France).

C.1.4. Participation à des articles de vulgarisation scientifique (AV)

- [AV01] BENOIT M., MARCOS F., TEISSON C. (1996) Modéliser les houles de tempêtes. Prévoir l'assaut des vagues sur le littoral et les équipements côtiers. *Supplément intitulé « Chercheurs d'énergie » du magazine La Recherche (Décembre 1996)*
- [AV02] «Traquer la houle. La protection des infrastructures littorales». Article de Eléna SENDER-DUMOULIN. *Sciences et Avenir (Mars 2000) pp 66-68.*

C.1.5. Posters dans des conférences et congrès scientifiques (PO)

- [PO01] NICOLLE A., KARPYTCHEV M., BENOIT M. (2005) Wave-tide-surge interactions in a shallow coastal region : hindcast of a storm in the Pertuis Charentais (Bay of Biscay). Preliminary results. European Geosciences Union (EGU) Conf., 24-29 avril 2005, Vienne (Autriche).
- [PO02] BOULET T., VIOLEAU D., BENOIT M., LAFON F. (2005) Long-term storm surge modelling along French coasts. *4th Int. Conf. EuroGOOS*, 6-8 Juin 2005, Brest (France).
- [PO03] GIRARD-BECQ F., SEILLE B., BENOIT M., BAZOU F., ARDHUIN F. (2005) Evaluation of wave and current models from EPEL-GNB 2003 observations. *4th Int. Conf. EuroGOOS*, 6-8 Juin 2005, Brest (France).

C.2. Présentations lors de séminaires et réunions de projets européens

C.2.1. Séminaires des groupes de travail internationaux WAM et WISE

- [PR01] BENOIT M. (1993) Numerical wave prediction with WAM-cycle 4 along the French Atlantic coasts. Application to the storms of January-February 1990. *WAM-HISVA workshop, 4-6 octobre 1993, Thessalonique (Grèce)*.
- [PR02] BENOIT M., MARCOS F. (1995) Development of a third-generation wave model within the finite elements TELEMAC package. *WISE meeting, 14-18 Mai 1995, Ensenada (Mexico)*.
- [PR03] BECQ F., BENOIT M. (1996) Evaluation and validation of various breaking formulations in TOMAWAC wave model. *WISE meeting, 14-18 Avril 1996, Venise (Italie)*.
- [PR04] BENOIT M. (1997) Shallow-water effects in coupling waves, curenents and storm-surges. *WISE Meeting, 13-17 Avril 1997, San-Francisco (USA)*.
- [PR05] BENOIT M. (2002) Comparisons of the DIA and RIA methods for computing the quadruplet-interaction transfer term. Preliminary results. *WISE meeting, 13-16 Mai 2002, Bergen (Norvège)*.
- [PR06] BENOIT M., LAFON F. (2002) Wave hindcast modelling project over a 25-year period along the French coasts. *WISE meeting, 13-16 Mai 2002, Bergen (Norvège)*.
- [PR07] BENOIT M. (2004) Evaluation of methods for computing non-linear quadruplet interactions for deep water wave spectra. *WISE meeting, 7-10 Juin 2004, Reading (UK)*. ARDHUIN F., MAGNE R., GIRARD F., BENOIT M., WOLF J., OSUNA P., BAZOU F., LEFEVRE J-M. (2006) Wave over currents, some new theory and "state-of-the-art" modelling. *WISE meeting, 24-27 Avril 2006, Venise (Italie)*. BENOIT M. (2006) On the influence of the method chosen for computing nonlinear quadruplet interactions on the modelling of wave growth. *WISE meeting, 24-27 Avril 2006, Venise (Italie)*.

du projet européen ECAWOM

- [PR10] BENOIT M., JANIN J-M., MARCOS F., BECQ F., THELLIER P. (1995) Progress in coupling currents/waves/surges within the TELEMAC finite element system. *Annual ECAWOM meeting, 14-15 Septembre 1995, Danish Hydraulic Institute (DHI), Copenhagen (Danemark)*. BENOIT M., JANIN J-M., THELLIER P. (1996) Simulation of waves and storm-surges for the storm of February 1993 in the North Sea. *Annual ECAWOM meeting, 12-14 Juin 1996, IFREMER, Brest (France)*.

CLAROM

- [PR12] BENOIT M. (1999) Analyse directionnelle des données de la bouée Béatrice. Premiers résultats su traitement par PADINES. *Séminaire du projet CLAROM/HOUDIM, 16 Septembre 1999, Rueil-Malmaison (France)*.
- [PR13] BENOIT M., LUCK M. (2000) Efforts de houle déferlante sur les pipelines. *Séminaire du groupe de compétences « Océano-météo et Hydrodynamique » du CLAROM, 18 Octobre 2000, Rueil-Malmaison (France)*.

- [PR14] GIRARD F., BENOIT M. (2001) Application de modélisations numériques spectrales et temporelles des états de mer en faible profondeur. *Séminaire du groupe de compétences « Océano-météo et Hydrodynamique » du CLAROM, 24 Octobre 2001, Rueil-Malmaison (France).*
- [PR15] BENOIT M., VIOLEAU D. (2002) Construction d'une base de données de houle sur les côtes françaises par simulation numérique sur une période de 20 ans. Etat d'avancement et premiers résultats. *Séminaire du groupe de compétences « Océano-météo et Hydrodynamique » du CLAROM, 20 Novembre 2002, Rueil-Malmaison (France).*
- [PR16] BENOIT M., LUCK M., ABONNEL C. (2002) Estimation des charges hydrodynamiques dues à la houle sur des structures de type monopile en faible profondeur d'eau. *Séminaire CLAROM-ADEME Eoliennes Offshore, 21 Novembre 2002, Rueil-Malmaison (France).*
- [PR17] BENOIT M. (2004) Sur la prise en compte de la direction de provenance des vagues dans la détermination des hauteurs de houle de projet. *Séminaire du groupe de compétences « Océano-météo et Hydrodynamique » du CLAROM, 24 Novembre 2004, Rueil-Malmaison (France).*
- [PR18] LAFON F., BENOIT M. (2005) Atlas numérique d'états de mer par simulations de hindcast sur 25 ans : exemples d'analyses climatologiques de conditions moyennes et extrêmes. *Séminaire du groupe de compétences « Océano-météo et Hydrodynamique » du CLAROM, 16-17 Novembre 2005, Rueil-Malmaison (France).*

C.2.4. Réunions du Club des Utilisateurs TELEMAT

- [PR19] BENOIT M., VIOLEAU D., ZEGOS C. (2001) Long-term Wave Hindcast with the TOMAWAC model. A wave reproduction over 20 years along the French Atlantic coastline. *Club des Utilisateurs TELEMAT, 15-16 Novembre 2001, LNHE, Chatou (France).*
- [PR20] BENOIT M. (2001) TOMAWAC V5P2. Unified spectral wave modelling. *Club des Utilisateurs TELEMAT, 15-16 Novembre 2001, LNHE, Chatou (France).* BENOIT M. (2002) TOMAWAC V5P3. Applications and recent developments. *Club des Utilisateurs TELEMAT, 17-18 Octobre 2002, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (Allemagne).* BENOIT M. (2003) TOMAWAC V5P4. Ongoing developments and some examples of applications. *Club des Utilisateurs TELEMAT, 16-17 Octobre 2003, SOGREAH, Grenoble (France).*

C.2.5. Autres séminaires

- [PR23] BENOIT M. (2000) Transformation des vagues et houles à la côte. *Atelier de télédétection côtière du PNEC (Programme National d'Environnement Côtier). 9 et 10 février 2000, Wimereux (France). Coordination Hélène Dupuis (DGO, Bordeaux).* BENOIT M. (2003) Modélisation des états de mer et propagation des houles en zone côtière : applications de TOMAWAC. *Journée CETMEF-LNHE sur la modélisation numérique en hydraulique, 4 Septembre 2003, Chatou (France).*

- [PR25] BENOIT M. (2003) Agitation portuaire et côtière : exemples d'applications de ARTEMIS. *Journée CETMEF-LNHE sur la modélisation numérique en hydraulique, 4 Septembre 2003, Chatou (France).*
- [PR26] BENOIT M., BOULET T., DANDIN P. (2004) Modélisation numérique des surcotes-décotes et des vagues dans l'estuaire de la Gironde. *Atelier de modélisation organisé par le SCHAPI, 29-30 Janvier 2004. Toulouse (France).*
- [PR27] BENOIT M., LAFON F. (2004) Construction d'une base de données de houle sur les côtes françaises par simulation numérique sur une période de 25 ans. *Séminaire IFREMER-ACTIMAR-SHOM-CETMEF-LNHE sur les états de mer, 16 Novembre 2004, Brest (France). Coordination Marc Prevosto (IFREMER).*

C.3. Rapports d'études et de recherches

C.3.1. Rapports sur activités et projets de recherche (RR)

- [RR01] LATTEUX B., BENOIT M., PELTIER E. (1989) TRANSO : un modèle numérique d'évolution des fonds par charriage sous l'action des courants marins. Notice descriptive, limitations et quelques applications-tests. Rapport EDF-LNH HE-42/89/030.
- [RR02] BENOIT M. (1990) Modèle d'états de mer - Rapport n° 3. Utilisation de WAM - Cycle 2 sur un cas réel simple afin de mettre en évidence les caractéristiques de son fonctionnement. Rapport EDF-LNH HE-42/90/062.
- [RR03] BENOIT M. (1991) Comparaison des méthodes de mesure de houle directionnelle. Tome 1. Etude de la capacité des diverses méthodes à reconstruire un spectre directionnel donné, à partir des mesures d'une bouée pilonnement/roulis/tangage en supposant une analyse spectrale parfaite. Rapport EDF-LNH HE-42/91/032.
- [RR04] BENOIT M. (1992) Logiciel DIRSEA - Simulation numérique de houle aléatoire linéaire mono- et multidirectionnelle. Version 1.0 : présentation et utilisation. Rapport EDF-LNH HE-42/92/005.
- [RR05] BENOIT M., BESNARD J-C. (1992) Prise en compte de l'aspect directionnel de la houle dans le code de réfraction REFRAC. Rapport EDF-LNH HE-42/92/044.
- [RR06] BENOIT M., TOURON F. (1992) Comparaison des méthodes de mesure de houle directionnelle. Tome 3 : application de l'approche bayésienne à l'analyse de la houle directionnelle. Présentation, mise en oeuvre et validation. Rapport EDF-LNH HE-42/92/046.
- [RR07] BENOIT M. (1993) Modèle d'états de mer - Rapport n° 4 - Guide d'utilisation de WAM - Cycle 4. Implantation et mise en oeuvre sur un cas-test. Rapport EDF-LNH HE-42/93/020.
- [RR08] BENOIT M., BESNARD J-C. (1993) Comparaison de différentes méthodes de résolution de l'équation de dispersion de la houle. Rapport EDF-LNH HE-42/93/023.
- [RR09] BENOIT M. (1993) Description physique de la houle. Recueil des transparents du cours dispensé aux agents techniques du LNH le 04/03/93. Rapport EDF-LNH HE-42/93/025.

- [RR10] BENOIT M., BESNARD J-C. (1993) Paramètres directionnels de houle. 1ère partie : Etude sur des simulations numériques de spectres croisés de houle. Rapport EDF-LNH HE-42/93/027.
- [RR11] BENOIT M., THELLIER P. (1993) Modèle d'états de mer. Rapport n° 5. Simulation des tempêtes observées en Manche début 1990 à l'aide du modèle d'états de mer WAM – Cycle 4. Rapport EDF-LNH HE-42/93/029.
- [RR12] BENOIT M. (1993) Réflexion de houle et incidence oblique sur une digue à talus. Tome 1 : comparaison de différentes méthodes de mesure et d'analyse de réflexion. Rapport EDF-LNH HE-42/93/040.
- [RR13] BENOIT M., MAUREL F. (1994) Calcul de champs de houle aléatoire multidirectionnelle à l'aide d'un modèle de diffraction linéaire incluant la réflexion sur des parois verticales. Rapport EDF-LNH HE-42/94/015.
- [RR14] BENOIT M. (1994) Réflexion de houle en incidence oblique sur une digue à talus - Tome 2 : Comparaison de différentes méthodes de mesure et d'analyse de réflexion. Deuxième partie : examen de l'apport des méthodes d'analyse de houle multidirectionnelle. Rapport EDF-LNH HE-42/94/036.
- [RR15] ALLILAIRE J., BENOIT M., CLAUDE B. (1994) Essais en laboratoire d'un amortisseur de houle multi-écrans à plaques verticales perforées. Rapport EDF-LNH HE-42/94/038.
- [RR16] BENOIT M. (1994) Modélisation numérique des états de mer en éléments finis - Cahier des charges. Rapport EDF-LNH HE-42/94/053.
- [RR17] BESNARD J-C., BENOIT M. (1995) Paramètres directionnels de houle - 2ème partie : Etude sur des simulations numériques de séries temporelles pilonnement-roulis-tangage. Rapport EDF-LNH HE-42/95/030.
- [RR18] BENOIT M., ALLILAIRE J. (1995) Absorption active de houle - Développement théorique et mise en œuvre de méthodes applicables en canal à houle. Rapport EDF-LNH HE-42/95/036.
- [RR19] BENOIT M. (1995) TOMAWAC V 1.0 - Notice de principe. Rapport EDF-LNH HE-42/95/047.
- [RR20] BENOIT M. (1995) Programme de tests pour le dimensionnement du talus arrière d'une digue en enrochements. Rapport EDF-LNH HE-42/95/049.
- [RR21] MARCOS F., BENOIT M., THELLIER P. (1995) Simulation des tempêtes observées en Manche en 1990 à l'aide du modèle d'états de mer TOMAWAC V1.0. Rapport EDF-LNH HE-42/95/059.
- [RR22] BENOIT M. (1995) Code TOMAWAC - Plan Qualité Logiciel. Rapport EDF-LNH HE-42/95/061.
- [RR23] BENOIT M. (1995) Code d'agitation DIFRA2 - Portage et notice d'utilisation sur station de travail. Rapport EDF-LNH HE-42/95/064.
- [RR24] BENOIT M., PECHON P. (1995) Modèles de propagation de houle. Rapport EDF-LNH HE-42/95/075.
- [RR25] BENOIT M. (1996) Réfraction d'un spectre multidirectionnel de houle - Effets de la bathymétrie. Rapport EDF-LNH HE-42/96/001.

- [RR26] BENOIT M., DONNARS P. (1996) Interactions in the stability of main-armour and toe-berm for a rubble-mound breakwater : an experimental study under both long-crested and short-crested waves - MAST2 - RMBFM Project - Final report. Rapport EDF-LNH HE-42/96/002.
- [RR27] BENOIT M., MARCOS F., BECQ F., THELLIER P. (1996) TOMAWAC V1.0 - Note de validation. Rapport EDF-LNH HE-42/96/010.
- [RR28] BENOIT M., BOBIN C., COURCIER P. (1996) Réflexion de houle en incidence oblique sur une digue à talus - Tome 3 : Analyse des essais en Laboratoire. Rapport EDF-LNH HE-42/96/023.
- [RR29] BECQ F., BENOIT M. (1996) Implantation et comparaison de différents modèles de houle dans la zone de déferlement. Rapport EDF-LNH HE-42/96/037.
- [RR30] BENOIT M. (1996) On some advanced physical and numerical models for studying sea waves and their effects. Rapport EDF-LNH HE-42/96/048.
- [RR31] BENOIT M. (1997) Logiciel TOMAWAC de modélisation des états de mer en éléments finis. Interactions non-linéaires de houle entre quadruplets de fréquences - Développement et mise en oeuvre de la méthode des interactions discrètes. Rapport EDF-LNH HE-42/97/005.
- [RR32] BECQ F., BENOIT M. (1997) Modélisation déterministe de l'évolution non-linéaire des vagues en eau peu profonde. Rapport EDF-LNH HE-42/97/009.
- [RR33] BENOIT M., JANIN J-M., BECQ F., THELLIER P. (1997) MAST 2 - ECAWOM - Final Report. Rapport EDF-LNH HE-42/97/013.
- [RR34] BENOIT M., MACHET C. (1997) Revue des techniques probabilistes pour le dimensionnement des digues à talus. Rapport EDF-LNH HE-42/97/059.
- [RR35] ALLILAIRE J., BENOIT M. (1997) Projet CLAROM "Houle en bassin" Phase 1 - Synthèse des connaissances sur la génération et la mesure de houle en laboratoire. Rapport EDF-LNH HE-42/97/073.
- [RR36] BENOIT M. (1998) Application de l'analyse bi-spectrale à l'étude de la houle non-linéaire. Rapport EDF-LNH non référencé.
- [RR37] BENOIT M., BESNARD J-C. (1999) Paramètres directionnels de houle - Intégration dans le logiciel PADINES 2.0 et validation du module de calcul de paramètres directionnels de houle. Rapport EDF-LNH HE-42/99/019.
- [RR38] BENOIT M. (1999) Extension de l'équation de réfraction-diffraction de Berkhoff pour traiter des bathymétries rapidement variables. Développement et validation d'un algorithme applicable aux cas monodimensionnels pour une houle linéaire. Rapport EDF-LNH HE-42/99/049.
- [RR39] LUCK M., BENOIT M. (2000) Projet CLAROM-ECOMAC. Synthèse bibliographique des méthodes de prédiction des efforts hydrodynamiques sur les pipelines. Rapport EDF-LNHE HP-72/2000/019.
- [RR40] BENOIT M. (2000) Projet CLAROM-ECOMAC. STREAM_2 : programme de calcul de houle non-linéaire en faible profondeur par la méthode d'approximation par série de Fourier. Rapport EDF-LNHE HP-72/2000/060.

- [RR41] LUCK M., BENOIT M. (2001) Projet CLAROM-HOUDIM. Intercomparaison des théories de houle et des méthodes associées de calcul de cinématique. Rapport EDF-LNHE HP-75/01/007.
- [RR42] BENOIT M. (2001) Constitution d'une base de données d'états de mer par simulation numérique sur 20 ans. Rapport n°1. Construction et mise au point du modèle océanique. Première simulation sur deux années complètes. Rapport EDF-LNHE HP-75/01/059.
- [RR43] BENOIT M. (2001) Projet CLAROM-ECOMAC (FICHE CEP&M M06101.99). Modélisation non-linéaire par les équations de Boussinesq de la propagation des vagues non-déferlantes en zone côtière. Rapport EDF-LNHE HP-75/01/069.
- [RR44] BENOIT M. (2002) Estimation des charges hydrodynamiques sur les structures support d'éoliennes en moyenne et faible profondeur d'eau. Revue des outils numériques disponibles et définition d'un programme d'essais en canal à houle. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/048.
- [RR45] JAMOIS E., BENOIT M. (2002) Evolution de profils de plage sous l'action de houles de tempête. Développement du code morphodynamique PLAGE. Etablissement du modèle et guide d'utilisation. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/064.
- [RR46] BENOIT M. (2002) Logiciel TOMAWAC de modélisation des états de mer en éléments finis. Notice théorique de la version 5.2. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/065.
- [RR47] BENOIT M. (2003) Estimation de la vitesse horizontale due à la houle en zone de shoaling à l'aide de la méthode semi-empirique de Isobe et Horikawa (1982) (logiciel ISORI82). Rapport EDF-LNHE HP-75/03/016.
- [RR48] BENOIT M., LUCK M. (2003) Système logiciel STREAM : modules de calcul de houle non-linéaire sur fond plat et d'efforts sur une structure verticale de petit diamètre. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/026.
- [RR49] BENOIT M., LAFON F. (2003) Constitution d'une base de données d'états de mer par simulation numérique sur 20 ans. Rapport n°2. Etude de sensibilité du modèle d'états de mer océanique. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/051.
- [RR50] BENOIT M., LUCK M. (2003) Interfaçage des modules stream_HT et stream_FM avec le code de mécanique code_ASTER pour le calcul des chargements dus à la houle sur une fondation d'éolienne offshore. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/068.
- [RR51] BENOIT M. (2003) Projet CLAROM-ECOMAC (FICHE CEP&M M.6101/99). Rapport final de projet. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/074.
- [RR52] COSQUERIC N., BENOIT M. (2003) Etude de faisabilité de la prise en compte de la diffraction dans un modèle spectral de propagation de houle. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/076.
- [RR53] CHEVALIER C., LUCK M., BENOIT M. (2003) Validation expérimentale des méthodes de prédiction de la cinématique de houle - Estimation des vitesses orbitales près du fond en zone côtière. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/077.
- [RR54] LUCK M., BENOIT M., MENON J-M. (2003) Experimental study of wave loading on offshore pile for wind-turbines in shallow water depth. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/078.

- [RR55] LUCK M., BENOIT M., DEBAILLON P., SERGENT P. (2004) Convergence des logiciels d'agitation côtière et portuaire ARTEMIS et REFONDE. Spécifications techniques pour le logiciel commun. Rapport EDF-LNHE HP-75/04/025.
- [RR56] BENOIT M. (2004) A note on the estimation of the maximum wave height in shallow water areas and in the breaking zone for the design of offshore wind turbine structures. Rapport EDF-LNHE HP-75/04/030.
- [RR57] LAFON F., BENOIT M. (2004) Constitution d'une base de données d'états de mer par simulation numérique sur 20 ans. Rapport n°3. Indicateurs chiffrés de comparaison entre résultats de modèle et mesures. Rapport EDF-LNHE HP-75/04/049.
- [RR58] LAFON F., BENOIT M. (2005) Constitution d'une base de données d'états de mer par simulation numérique sur 20 ans. Rapport n°4. Résultats et analyses statistiques préliminaires obtenus avec le modèle océanique à partir des champs de vent de la réanalyse NOAA/NCEP-2. Rapport EDF-LNHE HP-75/05/007.
- [RR59] BENOIT M., BAZOU F. (2006) Modélisation numérique des états de mer sur le Golfe Normand-Breton avec prise en compte des effets de marée (Campagne EPEL-GNB). Rapport EDF-LNHE HP-75/06/009.

C.3.2. Rapports sur études appliquées pour EDF (RI)

- [RI01] BENOIT M. (1990) Centrale de Flamanville. Comparaison entre les relevés de thermographies aériennes en vive-eau et les prévisions. Rapport EDF-LNH HE-42/90/056.
- [RI02] BENOIT M. (1991) Centrale de Flamanville. Examen de l'évolution sédimentologique du chenal de prise d'eau de la centrale entre Janvier 1990 et Février 1991. Rapport EDF-LNH HE-42/91/017.
- [RI03] BENOIT M. (1992) Suivi thermographique des panaches de rejet des centrales en bord de mer. Examen des possibilités offertes par la télédétection satellitaire. Rapport EDF-LNH HE-42/92/023.
- [RI04] BENOIT M. (1992) Centrale de Flamanville. Examen de l'évolution sédimentologique du chenal de prise d'eau de la Centrale entre Janvier 1990 et Septembre 1992. Rapport EDF-LNH HE-42/92/073.
- [RI05] ALLILAIRE J., BENOIT M., AELBRECHT D., VINET F., MENON J-M. (2000) CNPE du Blayais. Etude sur modèle réduit de la protection du front de Gironde. Rapport EDF-LNHE HP-72/2000/053.
- [RI06] BENOIT M., BOULET T. (2002) Affaire « REX-Inondation Blayais ». Protection des tranches nucléaires contre les risques d'inondation externe. Etude de l'aléa houle (C.B.M.H) pour le CNPE de Penly. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/017.
- [RI07] BENOIT M., BOULET T. (2002) Affaire «REX-Inondation Blayais». Protection des tranches nucléaires contre les risques d'inondation externe. Etude de l'aléa houle (C.B.M.H) pour le CNPE de Paluel. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/029.
- [RI08] BOULET T., BENOIT (2002) Affaire «REX-Inondation Blayais». Protection des tranches nucléaires contre les risques d'inondation externe. Etude de l'aléa houle (C.B.M.H) pour le CNPE de Flamanville. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/060.

- [RI09] BENOIT M. (2002) Modèles hydro-météorologiques d'alerte sur l'estuaire de la Gironde pour le CNPE du Blayais. Rapport n°1 : démarche générale de modélisation et analyse des modèles existants au LNHE. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/061.
- [RI10] GARAPON A., BENOIT M., DUPUIS B. (2003) Modélisation du déplacement d'une nappe d'hydrocarbure aux environs du CNPE du Blayais. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/005.
- [RI11] MACHET C., BENOIT M. (2003) Vérification de la continuité de l'alimentation « SEC » en cas d'endommagement important des digues de protection du CNPE dans le cadre de l'étude de l'Aléa « Houle » sur le site de Flamanville. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/006.
- [RI12] CHEVIET C., MARTIN L., RISSOAN C., BENOIT M., LENES A. (2003) Protection des sites nucléaires contre le risque d'inondation externe. Justification des marges et conservatismes. Rapport EDF-LNHE HP-76/03/016/B.
- [RI13] LAFON F., LUCK M., BENOIT M. (2003) Caractérisation préliminaire des conditions marines pour cinq sites potentiels d'implantation de parcs éoliens offshore le long des côtes françaises. Rapport EDF-LNHE HP-75/03/080.
- [RI14] LAFON F., BENOIT M. (2004) Marine conditions on the site "La Banche" - Preliminary results of the study of hydrodynamical conditions (sea level, currents, waves). Rapport EDF-LNHE HP-75/04/024.
- [RI15] LAFON F., BENOIT M. (2004) Offshore wind farm project on the "Banche" site - Results of the study of the hydrodynamic conditions. Rapport EDF-LNHE HP-75/04/029.
- [RI16] BENOIT M. (2004) CNPE de Flamanville. Elaboration et définition d'un système d'alerte pour l'aléa « Houle ». Rapport EDF-LNHE HP-75/04/066.
- [RI17] BENOIT M. (2005) CNPE du Blayais. Estimation par expertise des efforts horizontaux dus aux vagues sur le mur pare-houle en front de Gironde. Rapport EDF-LNHE HP-75/05/005.
- [RI18] BENOIT M. (2005) Expertise des documents disponibles sur les conditions océano-météo et sédimentaires pour le parc éolien en mer de Burbo (UK). Rapport EDF-LNHE HP-75/05/030.
- [RI19] BENOIT M., BOULET T. (2005) Présentation du modèle hydraulique LNHE-GIRONDE pour la prévision des niveaux d'eau en Gironde. Version 1.0 diffusée pour tests de fonctionnement. Rapport EDF-LNHE HP-75/05/049.
- [RI20] BENOIT M., VIOLEAU D., LAFON F., BOULET T., PAREY S. (2006) Projet Patrimonial "REX Inondation Blayais" - Réponse au questionnaire de l'IRSN sur la méthodologie de détermination des aléas Houle (C.B.M.H) et Clapot (I.V.F). Rapport EDF-LNHE HP-75/06/003.

C.3.3. Rapports sur études appliquées lors de prestations externes (RE)

- [RE01] BENOIT M., SAMIE R. (1991) Extension du port de Roscoff-Bloscon. Rapport n°4 - Etude des courants sur modèle numérique. Rapport EDF-LNH HE-42/91/009.
- [RE02] BENOIT M., THELLIER P. (1992) Aménagement du Port du Conquet. Etude des courants sur modèle numérique. Rapport EDF-LNH HE-42/92/008.

- [RE03] BENOIT M. (1992) Extension du port de Roscoff-Bloscon. Rapport n°8. Projet avec passe d'entrée élargie. Etude des courants sur modèle numérique. Rapport EDF-LNH HE-42/92/030.
- [RE04] BENOIT M., MARCHAL D. (1994) Extension du Port de Roscoff-Bloscon. Etude des courants sur modèle numérique. Rapport EDF-LNH HE-42/94/047.
- [RE05] BENOIT M., BECQ F. (1996) NorFra Pipeline - Implementation and validation of surf-breaking dissipation in TOMAWAC wave model. Rapport EDF-LNH HE-42/96/013.
- [RE06] BENOIT M., THELLIER P. (1997) Aménagement du port de pêche en eau profonde de Roscoff-Bloscon. Analyse des conditions naturelles et détermination des conditions de projet au niveau du port. Rapport EDF-LNH HE-42/97/035.
- [RE07] BENOIT M. (2002) Complexe portuaire de Port-Louis (Guadeloupe) - Etude par modélisation numérique du transfert vers la côte des conditions de houle cyclonique déterminées au large. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/030.
- [RE08] BENOIT M., MENON J-M., GUENE C. (2002) Aménagement du site du Canier (Saint-Mandrier). Optimisation sur modèle réduit des protections du chenal d'accès à la darse et étude de l'agitation dans la darse. Rapport EDF-LNHE HP-75/02/037.

C.3.4. Rapports de management (RM)

- [RM01] BENOIT M. (1997) Contrat de groupe du Groupe Hydraulique Maritime et Ouvrages d'eau pour la période du 01/01/1997 au 31/12/1999. Rapport EDF-LNH HE-42/97/029.
- [RM02] BENOIT M. (1998) Groupe Hydraulique Maritime - Bilan d'activité 1997. Rapport EDF-LNH HE-42/98/007.
- [RM03] BENOIT M. (1999) Bilan du contrat du Groupe E42 Groupe Hydraulique Maritime et Ouvrages d'eau pour la période du 01/01/1997 au 31/12/1999. Rapport EDF-LNH HE-42/99/054.
- [RM04] BENOIT M. (2000) Avenant au contrat du Groupe Hydraulique Maritime et Ouvrages d'eau (P72) pour la période du 01/01/2000 au 31/12/2000. Rapport EDF-LNH HP-72/00/016.
- [RM05] BENOIT M., DE ROCQUIGNY E., MOULIN C. (2001) Etudes Générales 2001 au titre de la Convention EDF-Ministères du 23 Juillet 1965. Document préparatoire à la réunion du Comité Biparti 2001. Rapport EDF-LNHE HP-70/01/008.
- [RM06] BENOIT M., TEISSON C. (2002) Etudes Générales 2002 au titre de la Convention EDF-Ministères du 23 Juillet 1965. Document préparatoire à la réunion du Comité Biparti 2002. Rapport EDF-LNHE HP-70/02/003.
- [RM07] BENOIT M., TEISSON C. (2003) Etudes Générales 2003 au titre de la Convention EDF-Ministères du 23 Juillet 1965. Document préparatoire à la réunion du Comité Biparti 2003. Rapport EDF-LNHE HP-70/03/001.
- [RM08] BENOIT M. (2003) Etat d'avancement à mi-juillet 2003 des études 1999 à 2002 du Comité Biparti EDF-Ministères. Rapport EDF-LNHE HP-70/03/002.

- [RM09] BENOIT M., TEISSON C., SERGENT Ph., CAUDE G. (2004) Document de synthèse des travaux de R&D menés dans le cadre de la Convention Biparti EDF-Ministères. Rapport EDF-LNHE et CETMEF du 11 Février 2004.
- [RM10] BENOIT M., TEISSON C. (2004) Etudes Générales 2004 au titre de la Convention EDF-Ministères du 23 Juillet 1965. Document préparatoire à la réunion du Comité Biparti 2004. Rapport EDF-LNHE HP-70/04/001.
- [RM11] BENOIT M., TEISSON C. (2005) Etudes Générales 2005 au titre de la Convention EDF-Ministères du 23 Juillet 1965. Document préparatoire à la réunion du Comité Biparti 2005. Rapport EDF-LNHE HP-70/05/002.

C.3.5. Rapports d'expertises et divers (RD)

- [RD01] BENOIT M., FRITSCH D. (1992) Cuve à houle directionnelle. Installation et réception définitive du générateur de houle segmenté. Rapport EDF-LNH HE-42/92/064.
- [RD02] BENOIT M. (1993) Rapport d'expertise technico-économique d'une demande d'aide à l'innovation pour l'ANVAR - Pays de Loire. Développement d'un système de mesure locale de position d'une interface air/eau. Rapport EDF-LNH HE-42/93/035.
- [RD03] SAMIE R., BENOIT M. (1993) Cuve à houle multidirectionnelle et à courants. Dossier de mise en exploitation. Rapport EDF-LNH HE-42/93/038.
- [RD04] BENOIT M. (2002) Rapport d'expertise d'un projet de R&D soumis à la labellisation RITEAU. Rapport envoyé le 21/01/2002 (3 pages).
- [RD05] COMITE D'EVALUATION, présidé par Philippe WALDTEUFEL (2002) Rapport d'évaluation du Laboratoire de Sondages Electromagnétiques et de l'Environnement Terrestre (LSEET-UMR 6017), sur la période 1999-2002. Rapport envoyé le 11/10/2002 (6 pages).
- [RD06] BENOIT (2002) Expertise du dossier déposé au réseau NOVELECT "Développement d'un système de mesure de déplacement de corps immergé". Courrier EDF-LNHE MB/P75/2002/487 avec rapport d'expertise annexe (2 pages)

**D. ANNEXES : TEXTES COMPLETS
DE NEUF PUBLICATIONS SELECTIONNEES**

LISTE DES ANNEXES

SELECTION D'ARTICLES DE REVUES ET DE CONFERENCES SCIENTIFIQUES

- ANNEXE 1 : BENOIT M., GOASGUEN G. (1996) Analyse directionnelle des états de mer : Comparaison de différentes méthodes d'analyse appliquées à des capteurs ponctuels. *Revue Technique des Phares et Balises*, N°97, Décembre 1996, pp 3-27.
- ANNEXE 2 : BENOIT M., FRIGAARD P., SCHAFFER H.A. (1997) Analyzing multidirectional wave spectra : a tentative classification of available methods. *Proc. IAHR Seminar on Multidirectional Waves and their Interactions with Structures, San-Francisco (Californie, USA)*, pp 131-158.
- ANNEXE 3 : BENOIT M., MARCOS F., BECQ F. (1996) Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1996)*, 2-6 Septembre 1996, Orlando (Floride, USA), pp 465-478
- ANNEXE 4 : BENOIT M. (2005) Evaluation of methods to compute the non-linear quadruplet interactions for deep-water wave spectra. *5th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES'2005)*, 3-7 Juillet 2005, Madrid (Espagne).
- ANNEXE 5 : BENOIT M., LAFON F. (2004) A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modelling of wave climate over 25 years. *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2004)*, 19-24 Septembre 2004, Lisbonne (Portugal), pp 714-726.
- ANNEXE 6 : BECQ-GIRARD F., FORGET Ph., BENOIT M. (1999) Non-linear propagation of unidirectional wave fields over varying topography. *Coastal Engineering, Vol. 38, N°2*, pp 91-113.
- ANNEXE 7 : BENOIT M., LUCK M., CHEVALIER C., BELORGEY M. (2002) Near-bottom kinematics of shoaling and breaking waves : Experimental investigation and numerical prediction. *Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2002)*, 8-12 Juillet 2002, Cardiff (UK), pp 306-318.
- ANNEXE 8 : DONNARS P., BENOIT M. (1996) Interactions in the stability of toe-berm and main-armour for rubble mound breakwaters : an experimental study. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1996)*, 2-6 Septembre 1996, Orlando (Floride, USA), pp 1617-1630.
- ANNEXE 9 : LUCK M., MENON J-M., BENOIT M. (2005) Efforts dus aux vagues sur un cylindre vertical en zone côtière. Etude expérimentale et méthodes de prédiction. *Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 9, N°7-8/2005*, pp 979-991.

ANNEXE 1

Auteurs : **Michel BENOIT**, Gérard GOASGUEN*
* *CETMEF-DELCE (Brest)*

Titre : Analyse directionnelle des états de mer : Comparaison de différentes méthodes d'analyse appliquées à des capteurs ponctuels.

Année : 1996.

Source : Revue Technique des Phares et Balises, N°97, Décembre 1996, pp 3-27.

ANALYSE DIRECTIONNELLE DES ETATS DE MER

Comparaison de différentes méthodes d'analyse appliquées à des capteurs ponctuels

Michel BENOIT

Ingénieur-chercheur EDF / Laboratoire National d'Hydraulique

Gérard GOASGUEN

Ingénieur C.N.A.M STNMTE / Cellule Etudes Océanographiques

RESUME

Des capteurs et bouées capables de mesurer la répartition directionnelle de l'énergie de la houle sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Ces systèmes délivrent en sortie une information directionnelle synthétique (direction de propagation principale et étalement directionnel) ou au contraire détaillée, avec l'analyse complète du spectre directionnel d'énergie de la houle. C'est ce sur ce dernier point que porte le présent article, en considérant en particulier des capteurs de mesure "ponctuels" (bouée pilonnement-roulis-tangage, courantomètre associé à un capteur de pression,...). La caractéristique commune de ces capteurs est de ne mesurer simultanément qu'un nombre réduit —trois, en général— de signaux de houle.

Estimer le spectre directionnel de houle à partir de si peu d'informations est un problème particulièrement complexe, pour lequel de nombreuses méthodes numériques ont été proposées. La plupart de ces méthodes ont été implantées dans un logiciel d'analyse opérationnel, développé par le LNH et le STNMTE. Elles sont présentées brièvement dans cet article, puis appliquées à des mesures réalisées en cuve à houle multidirectionnelle. Trois états de mer différents sont simulés de façon à tester et illustrer les caractéristiques et limitations des diverses méthodes.

Les cas-tests unimodaux se révèlent correctement analysés par les capteurs ponctuels, pour peu qu'une méthode d'analyse de qualité soit appliquée. Par contre, pour les cas bimodaux, les systèmes ponctuels ne reconstituent que de façon partielle les deux modes directionnels, et encore faut-il qu'ils soient associés à des méthodes d'analyse avancées (méthode de maximum d'entropie, approche bayésienne). Pour ces cas complexes, le réseau de capteurs de houle s'avère supérieur en capacité de résolution directionnelle.

ABSTRACT

Wave gauges and buoy are nowadays available for measuring the directional spreading of wave energy. These devices allow to analyse the directional characteristics of a wave field, either in a synthetic manner (main wave direction and directional spreading) or in a detailed way, by the full analysis of the directional wave energy spectrum. The later item lies at the core of the present paper, in particular by considering "single-point" gauges (heave-pitch-roll buoy, current-meter plus a pressure probe,...). The characteristic shared by these gauges is to record simultaneously only few wave signals (three, in general).

Estimating the directional wave spectrum from so few data is a particularly awkward problem, for which numerous analysis methods have been proposed. Most of these methods have been implemented in an operational software, developed by LNH and STNMTE. They are briefly described in this paper, and then applied to wave data recorded in a multidirectional wave basin. Three different sea-states are simulated in order to test and highlight the properties and limitations of the various methods.

The unimodal test-cases appear to be correctly analysed by the "single-point" gauges, provided that a suitable analysis method is applied. For the bimodal cases however, the "single-point" gauges only partially estimate the two directional modes, under the further condition that an advanced method is used (maximum entropy method, bayesian approach). For these difficult cases, the wave probe array appears to have higher directional resolving capabilities.

1. INTRODUCTION A L'ANALYSE MULTIDIRECTIONNELLE DE LA HOULE

1.1 La houle multidirectionnelle

Le terme de "houle" est généralement utilisé pour décrire l'ensemble des ondes se propageant à la surface de l'océan, générées par le vent et dont la période est typiquement comprise entre 2.5 et 25 s. Parler de houle au singulier est cependant par trop réducteur, tant la houle peut recouvrir des aspects différents, en divers endroits à la surface du globe bien sûr, mais également souvent sur un même site. Il suffit simplement de citer les houles océaniques, les mers du vent, les clapots, les houles cycloniques, les mers croisées,... Ces différences proviennent du type de situation météorologique créant la houle, de la distance sur laquelle elle s'est propagée, des propriétés du milieu de propagation (bathymétrie, courants,...), etc...

La houle sinusoïdale (monochromatique et monodirectionnelle) n'est qu'une représentation d'école de ces déformations de surface libre. L'observation visuelle de la surface de la mer révèle un caractère nettement plus irrégulier, chacune des vagues possédant une hauteur, une période et une direction de propagation particulière. Plus scientifiquement, on dit alors que l'énergie de la houle est répartie sur une gamme de fréquences (aspect "aléatoire" de la houle) et sur un intervalle de directions de propagation (aspect "multidirectionnel" ou simplement "directionnel" de la houle).

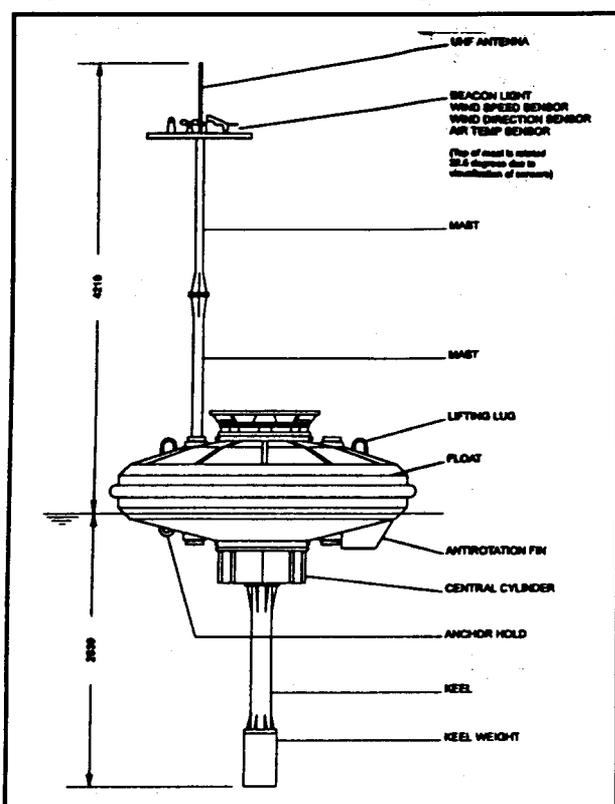


Figure 1: Bouée directionnelle WAVESCAN de SEATEX utilisée au STNMTE

Pour la modélisation de la houle, les modèles d'étude (physiques et numériques) sont capables de prendre en compte, depuis maintenant une quinzaine d'années environ, l'aspect aléatoire de la houle. Pour caractériser la houle, on parle alors de période de pic, de hauteur significative, de facteur de pic,... autant de paramètres synthétiques déduits d'une fonction de répartition fréquentielle de l'énergie de la houle. Depuis quelques années, du fait des progrès sensibles effectués aussi bien par les techniques de mesures en nature que par les outils de simulation en laboratoire, il est possible de s'intéresser en plus à la répartition directionnelle de l'énergie de la houle. Il s'agit alors de déterminer la ou les directions principales de propagation de la houle, l'étalement directionnel de l'énergie autour de ces directions principales et plus généralement la fonction de répartition angulaire (ou directionnelle) de l'énergie de la houle.

Dès 1985, le Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Équipement (STNMTE) avait installé à Ouessant une station de mesure multidirectionnelle : la bouée Béatrice. Depuis, le STNMTE s'est équipé de plusieurs autres bouées directionnelles (cf. figure 1, par exemple, pour la bouée WAVESCAN) qui sont déployées sur différents sites au gré des campagnes de mesure sur le littoral français (Regnault, 1990 ; 1994).

Le Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) a pour sa part mis en service en 1992 une cuve à houle multidirectionnelle et à courants. Cette cuve, équipée d'un générateur de houle segmenté, permet d'améliorer sensiblement la modélisation physique des conditions de projet pour les études de génie maritime et côtier : stabilité d'ouvrages, agitation portuaire, évolutions morphodynamiques du littoral,...

1.2 Les différents systèmes de mesure de houle multidirectionnelle

Pour accéder à la répartition directionnelle de l'énergie de la houle, il est nécessaire de disposer de plus de sources de données que pour une mesure non-directionnelle classique, où un seul capteur d'accélération ou de pression suffit à déterminer l'élévation de surface libre. Il faut maintenant mesurer soit plusieurs grandeurs de houle en une même position (élévation de surface libre, vitesses, pentes de surface libre,...), soit une même grandeur de houle (en général l'élévation de surface libre) en plusieurs positions, soit encore, en combinant les deux approches, différentes grandeurs de houle en plusieurs positions.

Parmi les systèmes de mesure utilisés en nature et/ou en laboratoire pour effectuer une mesure directionnelle de la houle, il est possible d'établir une rapide classification :

A. Systèmes basés sur une analyse de corrélations temporelles : Ces systèmes de mesure délivrent des séries temporelles pour différents signaux échantillonnés simultanément en une ou plusieurs positions d'espace.

- # **systèmes ponctuels** (plusieurs propriétés mesurées en un même point d'espace)
 - **bouée pilonnement / roulis / tangage**, mesurant l'élévation de surface libre et ses deux pentes suivant deux axes orthogonaux.
 - **bouée à trois composantes de déplacement**, mesurant les déplacements de surface libre suivant les trois axes.
 - **vélocimètre 2D associé à un capteur de surface libre**, mesurant l'élévation de surface libre et les deux composantes de la vitesse horizontale
 - **vélocimètre 3D**, mesurant les vitesses suivant les trois axes.
 - **bouée cloverleaf ("fleur de trèfle") à 6 composantes**, mesurant, outre l'élévation de surface libre et les pentes de surface libre, les dérivées secondes de la surface libre
- # **réseaux de capteurs** (une ou plusieurs propriétés mesurées en différents points)
 - **réseaux de capteurs de surface libre (ou de pression)** : plusieurs capteurs (de trois à une dizaine) disposés suivant un réseau géométrique mesurent simultanément l'élévation de surface libre.
 - **réseaux mixtes incluant des capteurs de surface libre (ou de pression) et des courantomètres** : diverses configurations peuvent être imaginées, mais rapidement se posent des problèmes de maintenance et de traitement des données.

B. Systèmes basés sur une analyse de corrélations spatiales : Une "photographie" de l'état de la surface de la mer est réalisée à un instant donné sur une certaine emprise. Cette technique appelle des traitements différents de ceux appliqués aux systèmes précédents et nécessite notamment le recours à une analyse spatiale et non plus temporelle. Les moyens de prise de vue utilisés sont :

- **observation aérienne** (avion, hélicoptère)
- **observation satellitaire** : plusieurs techniques sont déjà employées de façon opérationnelle ou sont encore en cours de développement : altimètre, radar à synthèse d'ouverture, diffusiomètre.
- **observation par radar au sol**

Depuis plusieurs années, le LNH et le STNMTE mènent en commun des recherches sur l'analyse de houle directionnelle, en s'intéressant principalement aux systèmes de mesure basés sur une analyse de corrélations temporelles. Les travaux présentés dans cet article concernent plus spécifiquement les systèmes de mesure ponctuels, de type "bouée directionnelle" par exemple.

1.3 Définitions liées à l'approche multidirectionnelle

1.3.1 Modélisation discrète de l'état de mer :

Le moyen le plus simple d'introduire l'approche multidirectionnelle est de considérer l'état de mer comme une superposition linéaire d'ondes sinusoïdales élémentaires. L'élévation de surface libre η est fonction de la position (x,y) et du temps t et s'écrit alors :

$$\eta(x,y,t) = \sum_{m=1}^M \eta_m(x,y,t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos[k_m(x \cdot \cos\theta_m + y \cdot \sin\theta_m) - \omega_m t + \varphi_m] \quad (1.1)$$

avec les définitions suivantes pour chaque composante élémentaire η_m :

a_m est l'amplitude de la houle (en mètres). On utilise aussi la hauteur (crête à creux) : $H_m = 2 \cdot a_m$

ω_m est la pulsation de la houle (en rad/s). On utilise aussi la période (en secondes) $T_m = 2\pi/\omega_m$ ou la fréquence (en Hertz) $f_m = 1/T_m = \omega_m/(2\pi)$.

k_m est le nombre d'onde de la houle (en rad/m). On utilise également la longueur d'onde (en mètres) : $L_m = 2\pi/k_m$. Le nombre d'onde k_m est donné par la relation de dispersion des ondes de surface libre, en fonction de la pulsation ω_m et de la profondeur d :

$$\omega_m^2 = g \cdot k_m \cdot \tanh(k_m \cdot d) \quad (1.2)$$

θ_m est la direction de propagation de la houle (en radians).

φ_m est la phase de la houle (en radians), supposée ici aléatoire (probabilité uniforme sur $[0 ; 2\pi]$). Cette distribution aléatoire des phases correspond à une houle linéaire. Elle ne permet pas de représenter les ondes "liées", résultant de la déformation des vagues en très faible profondeur.

L'énergie par unité de surface de la composante progressive η_m est égale à :

$$E_m = 1/2 \rho g a_m^2 = 1/8 \rho g H_m^2 \quad (1.3)$$

g est l'accélération de la pesanteur ($g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$)

ρ est la masse volumique de l'eau (en kg/m^3) ($\approx 1025 \text{ kg/m}^3$ en mer).

Par superposition et étant donné que les phases sont supposées aléatoires, l'énergie par unité de surface de l'état de mer est égale à la somme des énergies des différentes composantes:

$$E = \sum_{m=1}^M \frac{1}{2} \rho g a_m^2 \quad (1.4)$$

1.3.2 Spectres directionnels d'énergie et de variance :

Dans le paragraphe précédent, la houle réelle a été introduite comme une somme discrète de composantes élémentaires. La répartition réelle de l'énergie à la fois sur les fréquences et sur les directions de propagation est en réalité une fonction continue. La variable permettant de représenter cette répartition

d'énergie de l'état de mer est la **densité spectro-angulaire d'énergie** de la houle (en $\text{Joule.Hz}^{-1}.\text{rad}^{-1}$), encore appelée **spectre directionnel d'énergie** de la houle et notée $E(f, \theta)$. Cette fonction dépend de :

- la fréquence f de la houle (en Hertz), avec la convention que f est uniquement positive
- la direction de propagation θ , comprise dans un intervalle de longueur 2π .

La correspondance avec le cas discret (1.4) du paragraphe précédent est donnée par :

$$\sum_f \sum_{\theta} \frac{1}{2} \rho g a_m^2 = E(f, \theta) df d\theta \quad (1.5)$$

La variable utilisée préférentiellement pour la représentation et la modélisation des états de mer est plutôt la **densité spectro-angulaire de variance** ou **spectre directionnel de variance** (et parfois encore "spectre directionnel de houle" simplement). Cette fonction, notée $S(f, \theta)$ et exprimée en $\text{m}^2.\text{Hz}^{-1}.\text{rad}^{-1}$ se déduit simplement du spectre directionnel d'énergie par la relation :

$$S(f, \theta) = E(f, \theta) / (\rho g) \quad (1.6)$$

La relation entre le spectre directionnel de variance et l'élévation de surface libre s'écrit alors sous la forme pseudo-intégrale suivante :

$$\eta(x, y, t) = \iint \sqrt{2 S(f, \theta)} df d\theta \cos[k(x.\cos\theta + y.\sin\theta) - 2\pi ft + \varphi] \quad (1.7)$$

1.3.3 Décomposition du spectre directionnel de variance :

Le spectre directionnel de variance $S(f, \theta)$ introduit dans le paragraphe précédent est généralement décomposé de la façon suivante :

$$S(f, \theta) = E(f).D(f, \theta) \quad (1.8)$$

$E(f)$ est le **spectre omni-directionnel (ou non-directionnel) de variance**, encore appelé "densité spectrale de variance", classiquement établi lorsque n'est pas pris en compte l'aspect directionnel de la houle. Il est égal à la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation de l'élévation de surface libre. Il s'obtient à partir du spectre directionnel de variance $S(f, \theta)$ en intégrant sur les directions de propagation :

$$E(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (1.9)$$

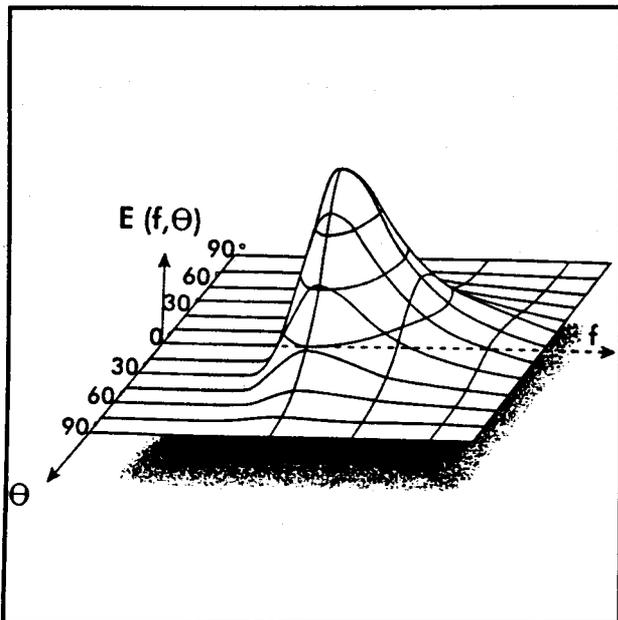


Figure 2 : Exemple de spectre directionnel d'énergie d'un état de mer.

- # $D(f, \theta)$ est la **Fonction de Répartition Angulaire (FRA)** de l'énergie. Elle exprime la façon dont est répartie angulairement l'énergie $E(f)$ associée à la fréquence f . C'est une fonction positive, dont une propriété fondamentale est un corollaire de la relation (1.9) :

$$\int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1 \quad (1.10)$$

2. PRINCIPE DE L'ANALYSE DIRECTIONNELLE APPLIQUEE AUX CAPTEURS PONCTUELS

2.1 Méthode générale de l'analyse directionnelle

Les méthodes d'analyse de houle directionnelle à partir des mesures issues d'un capteur ponctuel utilisent la décomposition du spectre directionnel de variance (1.8) et procèdent de la façon suivante :

- A Détermination "classique" du spectre omni-directionnel $E(f)$ à l'aide d'un enregistrement d'élévation de surface libre, d'accélération verticale ou de pression.
- B Pour chaque fréquence à laquelle est estimé $E(f)$, détermination de la FRA $D(f, \theta) = D_f(\theta)$ en utilisant les "corrélations" entre plusieurs signaux de houle (trois en général), réalisés simultanément. C'est sur ce problème que portent plus précisément les méthodes d'analyse directionnelle et cette présentation.

2.2 Formulation mathématique du problème

2.2.1 Calcul des densités spectrales de corrélation :

On considère un capteur directionnel de houle, capable de mesurer simultanément trois grandeurs de houle en une même position (par exemple une bouée pilonnement / roulis / tangage). Ces trois signaux sont, pour l'exposé général du problème, notés : $P_m(t)$ ($m=1$ à 3).

L'analyse de la "corrélation" entre les divers enregistrements s'effectue en passant dans le domaine fréquentiel par analyse spectrale. Les grandeurs calculées sont les **densités spectrales de corrélation** ou **densités spectrales croisées** entre ces signaux pris deux à deux (m et n variant de 1 à 3) :

$$G_{mn}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{mn}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad \text{avec} \quad R_{mn}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_m(t) \cdot P_n(t+\tau) dt \quad (2.1)$$

2.2.2 Propriétés des densités spectrales de corrélation

- Les densités $G_{mn}(f)$ sont dans le cas général complexes et se décomposent en :

$$G_{mn}(f) = C_{mn}(f) - i \cdot Q_{mn}(f) \quad (2.2)$$

$C_{mn}(f)$ est appelé "co-spectre" ("coincident spectral density function")

$Q_{mn}(f)$ est appelé "quad-spectre" ("quadrature spectral density function")

- Les densités $G_{mn}(f)$ et $G_{nm}(f)$ sont des grandeurs complexes conjuguées, si bien qu'on se limite généralement à la détermination des densités $G_{mn}(f)$ pour $m \leq n$.
- Pour les cas où $m = n$, la partie imaginaire de la densité spectrale (i.e. le quad-spectre) est nulle.
- Si de plus le signal de houle considéré $P_m(t)$ est l'élévation de surface libre, alors le co-spectre est égal au spectre omni-directionnel de variance de la houle $E(f)$.
- A partir de 3 signaux de houle, il est ainsi possible d'obtenir $3 \cdot (3+1) / 2 = 6$ densités spectrales de corrélation complexes ($m \leq n$), dont 3 sont des densités spectrales d'auto-corrélation ($m=n$).

2.2.3 Expression des densités spectrales de corrélation :

Il est possible de montrer, dans le cadre de la théorie linéaire de la houle, que les densités spectrales de corrélation s'expriment, pour un système ponctuel, sous la forme générale suivante :

$$G_{mn}(f) = \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) S(f, \theta) d\theta \quad (2.3)$$

$H_m(f, \theta)$ désigne la fonction de transfert permettant de passer de l'élévation de surface libre au type de signal de houle $P_m(t)$ (pression, vitesses,...). Le symbole * dans (2.3) est utilisé pour représenter le nombre complexe conjugué. La fonction de transfert $H_m(f, \theta)$ est décomposée sous la forme :

$$H_m(f, \theta) = h_m(f) \cdot \cos^{\alpha_m} \theta \cdot \sin^{\beta_m} \theta \quad (2.4)$$

Les valeurs de h_m , α_m et β_m dépendent de la grandeur de houle considérée et sont données dans le tableau 2.1 en considérant la théorie de la houle linéaire (Voir aussi Isobe *et al.*, 1984).

Grandeur de houle	P_m	$h_m(f)$	α_m	β_m
Surface libre	$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \Big _{z=0} = \frac{H}{2} \exp(i \cdot (\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega \cdot t))$	1	0	0
Pente de surface suivant x	$\frac{\partial \eta}{\partial x} = [i k \cos \theta] \eta$	ik	1	0
Pente de surface suivant y	$\frac{\partial \eta}{\partial y} = [i k \sin \theta] \eta$	ik	0	1
Vitesse suivant x	$u_x = - \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \left[\omega \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \cos \theta \right] \eta$	$\omega \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	1	0
Vitesse suivant y	$u_y = - \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \left[\omega \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \sin \theta \right] \eta$	$\omega \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	1
Vitesse suivant z	$u_z = - \frac{\partial \Psi}{\partial z} = \left[-i \omega \frac{\text{sh}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \right] \eta$	$-i \omega \frac{\text{sh}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	0
Vitesse verticale de surface	$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \Big _{z=0} = -i \cdot \omega \cdot \eta$	$-i \cdot \omega$	0	0
Accélération suivant x	$a_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = \left[-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \cos \theta \right] \eta$	$-i \cdot \omega^2 \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	1	0
Accélération suivant y	$a_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} = \left[-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \sin \theta \right] \eta$	$-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	1
Accélération suivant z	$a_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} = \left[-\omega^2 \frac{\text{sh}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \right] \eta$	$-\omega^2 \frac{\text{sh}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	0
Accél. verticale de surface	$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \omega^2 \cdot \eta$	$-\omega^2$	0	0
Déplacement suivant x	$\xi_x = \int u_x dt = \left[i \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \cos \theta \right] \eta$	$i \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	1	0
Déplacement suivant y	$\xi_y = \int u_y dt = \left[i \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \sin \theta \right] \eta$	$i \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	1
Déplacement suivant z	$\xi_z = \int u_z dt = \left[\frac{\text{sh}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)} \right] \eta$	$\frac{\text{sh}(k \cdot (d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	0
Pression dynamique	$p = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[\rho g \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{ch}(kd)} \right] \eta$	$\rho g \frac{\text{ch}(k \cdot (d+z))}{\text{ch}(kd)}$	0	0

Tableau 2.1 : Fonctions de transfert pour les différentes propriétés de houle.

Dans le tableau 2.1, la variable $\Psi(x,y,z,t)$ désigne le potentiel des vitesses pour une houle monochromatique et monodirectionnelle :

$$\Psi = i \frac{g}{\omega} \frac{H}{2} \frac{\text{ch}(k.(d+z))}{\text{ch}(kd)} \exp(i.(k.\vec{x} - \omega.t)) \quad (2.5)$$

2.2.4 Estimation du spectre directionnel :

A l'issue de l'analyse spectrale, il est donc possible de disposer pour un système de mesure ponctuel à 3 signaux de 6 densités spectrales complexes $G_{mn}(f)$ ($m \leq n$), soit en théorie de 12 informations réelles en comptant les parties réelles $C_{mn}(f)$ et imaginaires $Q_{mn}(f)$.

Les relations liant les densités spectrales de corrélation au spectre directionnel sont aisément obtenues en utilisant la relation (2.3) avec les données du tableau 2.1. Par exemple, on obtient pour le cas de d'une bouée pilonnement-roulis-tangage, mesurant les signaux $(P_1(t); P_2(t); P_3(t)) = \left(\eta(t); \frac{\partial \eta}{\partial x}(t); \frac{\partial \eta}{\partial y}(t) \right)$:

$$\begin{aligned} C_{11}(f) &= \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta = E(f) & Q_{11}(f) &= 0 \\ C_{22}(f) &= E(f)k^2 \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \cos^2(\theta) d\theta & Q_{22}(f) &= 0 \\ C_{33}(f) &= E(f)k^2 \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \sin^2(\theta) d\theta & Q_{33}(f) &= 0 \\ C_{12}(f) &= 0 & Q_{12}(f) &= E(f)k \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \cos(\theta) d\theta \\ C_{13}(f) &= 0 & Q_{13}(f) &= E(f)k \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \sin(\theta) d\theta \\ C_{23}(f) &= E(f)k^2 \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta & Q_{23}(f) &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ce que l'on observe sur les expressions (2.6) pour le cas de la bouée pilonnement-roulis-tangage peut être généralisé aux autres systèmes ponctuels, à savoir que, sur les 12 densités croisées (réelles) disponibles :

- 1 d'entre elles (C_{11}) donne directement ou indirectement le spectre omni-directionnel $E(f)$
- 6 d'entre elles (Q_{11}, Q_{22}, Q_{33} , et selon le cas C_{12}, C_{13}, Q_{23} ou Q_{12}, Q_{13}, C_{23}) sont nulles
- 3 d'entre elles (C_{11}, C_{22}, C_{33}) sont liées par une relation. Par exemple, on a pour la bouée pilonnement/roulis/tangage:

$$k^2 \cdot C_{11}(f) = C_{22}(f) + C_{33}(f) \quad (2.7)$$

En définitive, il ne reste donc que quatre informations véritablement indépendantes pour estimer la FRA à une fréquence donnée. Les expressions (2.6) montrent également que les co- et quad-spectres font intervenir les moments circulaires de la FRA, ou bien de façon équivalente, ses coefficients de Fourier :

$$a_n = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \cos(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad \text{et} \quad b_n = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \sin(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad (2.8)$$

A l'aide des spectres croisés, seuls les 4 premiers coefficients de Fourier (a_1, b_1, a_2, b_2) peuvent être calculés et ils contiennent toute l'information directionnelle disponible pour estimer la FRA. Les expressions de ces coefficients pour différents systèmes de mesure ponctuels sont rassemblées dans le tableau 2.2.

En résumé, toute la problématique de l'estimation du spectre directionnel consiste à calculer une FRA à chaque fréquence d'analyse, à partir des seules informations contenues dans ses quatre premiers coefficients de Fourier et de la condition d'intégrale égale à 1 sur $[0; 2\pi]$. Déterminer une fonction continue à partir de seulement cinq équations intégrales de cette fonction est un problème particulièrement complexe, car "mathématiquement mal posé" : cinq équations pour une infinité d'inconnues ! Tout l'art de l'analyse directionnelle consiste donc à chercher malgré tout une solution à ce problème. Pour cela, de nombreuses méthodes ont été proposées, basées sur des hypothèses plus ou moins fortes. La plupart d'entre elles ont été implantées de façon opérationnelle au LNH et sont présentées brièvement dans la partie suivante.

n°	Système de mesure ponctuel (3 signaux)	E(f)	a ₁ (f)	b ₁ (f)	a ₂ (f)	b ₂ (f)
1	Bouée pilonnement-roulis-tangage [η ; $\frac{\partial \eta}{\partial x}$; $\frac{\partial \eta}{\partial y}$]	C ₁₁	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
2	Capteur de houle + vélocimètre 2D [η ; u _x (z ₂) ; u _y (z ₂)]	C ₁₁	$\frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
3	Capteur de pression + vélocimètre 2D [p(z ₁) ; u _x (z ₂) ; u _y (z ₂)]	$C_{11} \left(\frac{1}{\rho g} \frac{\text{ch}(k \cdot d)}{\text{ch}(k(d+z_1))} \right)^2$	$\frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
4	Capteur mesurant trois déplacements [η ; $\xi_x(0)$; $\xi_y(0)$]	C ₁₁	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
5	Capteur mesurant trois vitesses [u _z (z ₁) ; u _x (z ₂) ; u _y (z ₂)]	$C_{11} \left(\frac{1}{\omega} \frac{\text{sh}(k \cdot d)}{\text{sh}(k(d+z_1))} \right)^2$	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
6	Capteur mesurant trois accélérations [a _z (z ₁) ; a _x (z ₂) ; a _y (z ₂)]	$C_{11} \left(\frac{1}{\omega^2} \frac{\text{sh}(k \cdot d)}{\text{sh}(k(d+z_1))} \right)^2$	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$

Tableau 2.2 : Expressions des coefficients de Fourier de la Fonction de Répartition Angulaire pour différents systèmes de mesure

3. LES DIFFERENTES METHODES D'ANALYSE MULTIDIRECTIONNELLE

3.1 Décomposition en série de Fourier :

Etant donné que la Fonction de Répartition Angulaire (FRA) est une fonction continue (dans le cas général multidirectionnel tout au moins) sur $[0 ; 2\pi]$ et telle que $D(f,0)=D(f,2\pi)$, il est possible d'écrire sa décomposition en série de Fourier :

$$D(f,\theta) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + b_n \cdot \sin(n \cdot \theta) \right] \quad (3.1)$$

avec : $a_0 = 1$ du fait de la condition de normalisation de la FRA,

$$\text{et : } a_n = \int_0^{2\pi} D(f,\theta) \cdot \cos(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad \text{et} \quad b_n = \int_0^{2\pi} D(f,\theta) \cdot \sin(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad (3.2)$$

3.1.1 Décomposition en série de Fourier tronquée (TFS) :

La variante la plus simple de mise en œuvre de cette approche consiste à tronquer simplement la décomposition en série de Fourier ci-dessus (TFS signifiant "Truncated Fourier Series") et à ne garder que les harmoniques dont les coefficients peuvent être déterminés. Il découle de l'analyse menée au §2.2.4 que, pour un système ponctuel à trois composantes, seuls les deux premiers harmoniques peuvent être calculés à partir des co- et quad-spectres. On a donc pour cet estimateur de la FRA :

$$\widehat{D}_{TFS}(f,\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} [a_1 \cdot \cos(\theta) + b_1 \cdot \sin(\theta) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)] \quad (3.3)$$

Quoique simple et facile à mettre en œuvre, cet estimateur présente l'inconvénient de pouvoir prendre des valeurs négatives, ce qui est une propriété indésirable pour une FRA. Deux variantes sont présentées ci-après pour remédier à cette limitation.

3.1.2 Décomposition en série de Fourier positivée (PFS) :

L'idée la plus simple pour supprimer les éventuelles parties à valeurs négatives de l'estimateur TFS est de forcer à 0 ces parties négatives, puis de renormaliser la FRA (facteur Δ) de façon à conserver une intégrale égale à l'unité sur $[0 ; 2\pi]$. PFS signifie ainsi "Positived truncated Fourier Series".

$$\widehat{D}_{PFS}(f,\theta) = \Delta \cdot \text{MAX} \left\{ 0 ; \widehat{D}_{TFS}(f,\theta) \right\} \quad (3.4)$$

Cette façon quelque peu "brutale" de positiver la FRA rend ensuite son interprétation plus délicate et peut par exemple, en ne laissant subsister que la partie positive d'un lobe secondaire, faire croire à un état de mer bimodal. Cet estimateur est, de ce fait, peu utilisé dans la pratique, sauf éventuellement comme point de départ pour la méthode itérative inverse de Long et Hasselmann (cf. § 3.6).

3.1.3 Décomposition en série de Fourier pondérée (WFS) :

En adoptant une approche plus rigoureuse, il est possible d'utiliser une fonction de pondération, rendant l'estimateur tronqué positif sur $[0 ; 2\pi]$ (Longuet-Higgins *et al.*, 1963) :

$$\widehat{D}_{WFS}(f,\theta) = \int_0^{2\pi} D(f,\theta') \cdot W_2(\theta' - \theta) \cdot d\theta' \quad \text{avec} \quad W_2(\theta) = \frac{8}{3} \cdot \cos^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.5)$$

Cette fonction-fenêtre $W_2(\theta)$ possède une décomposition en série de Fourier finie :

$$W_2(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{2}{3} \cos(\theta) + \frac{1}{6} \cos(2 \cdot \theta) \right] \quad (3.6)$$

L'estimateur en série de Fourier tronquée pondérée WFS (pour "Weighted truncated Fourier Series") s'obtient alors par convolution de l'estimateur TFS avec la fonction de pondération W_2 :

$$\widehat{D}_{WFS}(f,\theta) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{3} (a_1 \cdot \cos(\theta) + b_1 \cdot \sin(\theta)) + \frac{1}{6} (a_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)) \right] \quad (3.7)$$

Le fait d'utiliser une fonction de pondération pour l'estimateur en série de Fourier présente cependant l'inconvénient de diffuser exagérément l'énergie sur les directions voisines de la direction dominante. Les pics sont systématiquement aplatis et étalés en directions par cette pondération.

3.2 Ajustement à un modèle paramétrique unimodal :

Le principe commun des méthodes d'ajustement à des modèles paramétriques consiste à supposer une forme analytique paramétrique *a priori* pour la FRA et à ajuster les paramètres de cette fonction aux co-et quad-spectres issus des mesures. Cette façon de procéder permet de réduire sensiblement le nombre d'inconnues liées à la FRA. Dans le cas d'un modèle unimodal, le problème est en effet ramené à la détermination de deux paramètres réels : la direction principale de propagation de l'énergie et un paramètre d'étalement directionnel autour de cette direction. Deux modèles paramétriques parmi les plus utilisés sont donnés ci-après, mais d'autres expressions sont utilisées dans la pratique (cf. par exemple Borgman, 1969).

Cette méthode est largement utilisée dans la pratique car elle présente l'avantage d'être très rapide en temps calcul et de fournir un estimateur vérifiant par définition les propriétés d'une FRA. Par contre, de par sa nature fortement paramétrique, elle est incapable de représenter avec finesse des états de mer complexes (dissymétrie directionnelle autour de la direction principale, état de mer bimodal,...).

3.2.1 Modèle paramétrique unimodal de type "Mitsuyasu" (1MFM) :

A partir de nombreuses observations, Mitsuyasu *et al.* (1975) ont proposé d'utiliser le modèle :

$$\widehat{D}_{1MFM}(f, \theta) = \frac{1}{\Delta(s)} \cos^2 s \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (3.8)$$

Les paramètres θ_0 (direction principale) et s (étalement directionnel) sont calculés à partir des coefficients de Fourier de la FRA. Vu qu'il suffit de deux équations pour déterminer ces paramètres, un couple de coefficients de Fourier (a_n, b_n) fournit les informations suffisantes. On peut ainsi calculer les paramètres à partir du premier (a_1, b_1) ou du second harmonique (a_2, b_2) de la décomposition de la FRA. On parle alors de modèle de rang 1 ou 2 respectivement :

$$\text{Rang 1:} \quad \theta_0 = \text{Arctan} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \quad s = \frac{r_1}{1 - r_1} \quad \text{avec} \quad r_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (3.9)$$

$$\text{Rang 2:} \quad \theta_0 = \frac{1}{2} \text{Arctan} \left(\frac{b_2}{a_2} \right) \quad s = \frac{1 + 3.r_2 + \sqrt{r_2^2 + 14.r_2 + 1}}{2(1 - r_2)} \quad \text{avec} \quad r_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (3.10)$$

Il faut bien noter que, dans le modèle de rang 2, la direction principale θ_0 est déterminée à π près, ce qui rend son interprétation délicate. Il est donc préférable d'utiliser dans la pratique le modèle de rang 1.

3.2.2 Modèle paramétrique unimodal de type "Gaussien" (1MFG) :

On suppose une répartition de l'énergie suivant une loi normale, tronquée sur $[\theta_0 - \pi; \theta_0 + \pi]$ autour de la direction principale θ_0 :

$$\widehat{D}_{1MFG}(f, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left(- \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2 \sigma^2} \right) \quad (3.11)$$

Comme précédemment, les paramètres θ_0 (direction principale) et σ (écart-type directionnel) sont calculés à partir d'un couple de coefficients (a_n, b_n). On peut de même établir un modèle de rang 1 ou de rang 2 (avec une préférence, comme pour 1MFM, pour le rang 1) :

$$\text{Rang 1:} \quad \theta_0 = \text{Arctan} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \quad \sigma = \sqrt{-2 \cdot \ln(r_1)} \quad \text{avec} \quad r_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (3.12)$$

$$\text{Rang 2:} \quad \theta_0 = \frac{1}{2} \text{Arctan} \left(\frac{b_2}{a_2} \right) \quad \sigma = \frac{\sqrt{-2 \cdot \ln(r_2)}}{2} \quad \text{avec} \quad r_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (3.13)$$

3.3 Ajustement à un modèle paramétrique bimodal (2MF) :

De façon à rendre plus universelles les méthodes d'ajustement à un modèle paramétrique, certains auteurs (cf. par exemple Van Heteren (1983)) ont proposé d'utiliser des modèles paramétriques bimodaux, obtenus par combinaison linéaire de deux modèles paramétriques unimodaux. Comme précédemment, plusieurs expressions paramétriques peuvent être mises en œuvre, mais nous nous limitons ici à un modèle de type "Gaussien". L'estimateur de la FRA prend alors la forme suivante :

$$\widehat{D}_{2MF}(f, \theta) = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp \left(- \frac{(\theta - \theta_1)^2}{2 \sigma_1^2} \right) + \frac{1 - \lambda}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} \exp \left(- \frac{(\theta - \theta_2)^2}{2 \sigma_2^2} \right) \quad \text{avec} \quad \lambda \in [0, 1] \quad (3.14)$$

La principale difficulté liée à la mise en œuvre de ce type de méthode tient au fait que l'estimateur comporte cinq inconnues ($\theta_1, \sigma_1, \theta_2, \sigma_2, \lambda$) alors qu'on ne dispose que de quatre équations à partir des

mesures (données par les coefficients de Fourier a_1, b_1, a_2, b_2). Il est donc nécessaire d'introduire au moins une condition supplémentaire pour fermer le problème. On peut par exemple imposer $\sigma_1 = \sigma_2$ (Van Heteren, 1983), mais cela réduit quelque peu l'universalité recherchée par l'introduction du modèle bimodal. Benoit (1991) a appliqué des méthodes de minimisation sous contraintes, en gardant les cinq inconnues du problème et en introduisant des conditions supplémentaires sur les variations de ces inconnues. Ces méthodes, dont l'exposé sort du cadre de cette présentation, nécessitent des algorithmes de résolution assez complexes. Bien qu'elles soient en général plutôt rapides en temps calcul, elles sont d'une mise en œuvre assez délicate (sensibilité à la solution de départ) et peuvent diverger dans certaines conditions.

3.4 Méthodes de Maximum de Vraisemblance (MLM ; IMLM1 ; IMLM2) :

3.4.1 Méthode de Maximum de Vraisemblance (MLM) :

Introduite par Capon *et al.* (1967) en détection sismique, puis reprise par divers auteurs dont Isobe *et al.* (1984) et Krogstad (1988), la méthode MLM (pour "Maximum Likelihood Method") consiste à trouver un estimateur de la FRA basé sur une combinaison linéaire des densités spectrales croisées :

$$\widehat{D}_{MLM}(f, \theta) = \frac{1}{\widehat{E}(f)} \sum_{m, n} \alpha_{mn}(f, \theta) \cdot G_{mn}(f) \quad (3.15)$$

Il est possible de montrer que cet estimateur est lié à la FRA recherchée $D(f, \theta)$ par :

$$\widehat{D}_{MLM}(f, \theta) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot w(\theta, \theta') \, d\theta' \quad \text{où } w(\theta, \theta') = \sum_{m, n} \alpha_{mn}(f, \theta) \cdot H_m(f, \theta) \cdot H_n^*(f, \theta') \quad (3.16)$$

L'estimateur MLM est donc une convolution de la FRA recherchée par une fonction de pondération $w(\theta, \theta')$. Cet estimateur sera d'autant plus proche de la FRA recherchée que la fonction de pondération sera proche d'une fonction de Dirac. L'estimateur qui satisfait au mieux cette condition s'écrit (Isobe *et al.*, 1984) :

$$\widehat{D}_{MLM}(f, \theta) = \frac{\kappa}{\sum_{m, n} H_m(f, \theta) \cdot G_{mn}^{-1}(f) \cdot H_n^*(f, \theta)} \quad (3.17)$$

Dans l'expression ci-dessus, $G_{mn}^{-1}(f)$ désigne les éléments de la matrice inverse de la matrice des densités spectrales croisées et κ est une constante de normalisation permettant d'assurer la condition d'intégrale égale à 1 de l'estimateur sur $[0 ; 2\pi]$.

3.4.2 Méthodes de Maximum de Vraisemblance Itératives (IMLM) :

Un examen détaillé de l'estimateur MLM fait apparaître qu'il n'est pas consistant avec la matrice de covariance issue des mesures, c'est-à-dire que les co- et quad-spectres calculés à partir de l'estimateur MLM sont différents de ceux issus des mesures. Pawka (1983), puis Oltman-Shay et Guza (1984) ont donc proposé de modifier de façon itérative l'estimateur MLM de façon à la rendre consistant avec la matrice de covariance initiale. Deux variantes itératives sont introduites, toutes deux basées sur l'équation suivante :

$$\widehat{D}_{IMLM}^i(f, \theta) = \widehat{D}_{IMLM}^{i-1}(f, \theta) + \varepsilon^i(f, \theta) \quad \text{avec } \widehat{D}_{IMLM}^0(f, \theta) = \widehat{D}_{MLM}(f, \theta) \quad (3.18)$$

$$\text{IMLM1: } \varepsilon^i(f, \theta) = \frac{|\lambda|^{\beta+1}}{\lambda \gamma} \widehat{D}_{IMLM}^{i-1}(f, \theta) \quad \text{avec } \lambda = 1 - \frac{\Delta_{MLM}^{i-1}(f, \theta)}{\widehat{D}_{MLM}(f, \theta)} \quad (3.19)$$

$$\text{IMLM2: } \varepsilon^i(f, \theta) = \frac{|\lambda|^{\beta+1}}{\lambda \gamma} \quad \text{avec } \lambda = \widehat{D}_{MLM}(f, \theta) - \Delta_{MLM}^{i-1}(f, \theta) \quad (3.20)$$

Dans les expressions ci-dessus, $\Delta_{MLM}^{i-1}(f, \theta)$ désigne l'estimateur MLM obtenu à partir des co- et quad-spectres basés sur $\widehat{D}_{IMLM}^{i-1}(f, \theta)$. β et γ sont deux paramètres qui contrôlent la convergence de l'algorithme itératif. Les valeurs employées pour ces paramètres sont en général de l'ordre de 1 pour β et de l'ordre de 10 pour γ (Oltman-Shay et Guza, 1984). Le processus itératif est stoppé à l'aide d'un critère de convergence sur $\widehat{D}_{IMLM}^i(f, \theta)$ (Krogstad *et al.*, 1988).

Les tests sur simulations numériques et en laboratoire (Benoit, 1992 ; Benoit et Teisson, 1994) montrent que dans la majorité des cas la deuxième version itérative (IMLM2) donne de meilleurs résultats que la première. En général, 10 à 20 itérations sont nécessaires pour une bonne convergence, ce qui entraîne une augmentation significative du temps (et du coût) de calcul par rapport à la méthode MLM simple.

3.5 Méthodes de type Vecteurs Propres (EVM ; IEVM1 ; IEVM2) :

Cette méthode (notée EVM pour "Eigen-Vector Method") a été appliquée à l'analyse de la houle directionnelle par Mardsen et Juszko (1987). La modélisation de départ est la même que pour la méthode de maximum de vraisemblance (cf. § 3.4), mais avec l'hypothèse supplémentaire qu'il est possible d'identifier et de séparer une composante "signal non-bruité" et une composante "bruit" dans la matrice des densités spectrales croisées issues des mesures. Cette matrice est donc décomposée en :

$$\mathbf{M} = \hat{\mathbf{S}} + \hat{\mathbf{N}} \quad (3.21)$$

où $\hat{\mathbf{S}}$ est un estimateur de la composante "signal non-bruité" et $\hat{\mathbf{N}}$ est un estimateur de la composante "bruit". La séparation entre "signal pur" et "bruit" s'effectue en diagonalisant la matrice de covariance. En théorie, cette matrice est hermitienne définie positive : elle possède donc des valeurs propres toutes réelles et positives. Pour un capteur ponctuel à trois signaux, on suppose alors que le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre représente le signal non-bruité tandis que les deux vecteurs propres associés aux deux plus petites valeurs propres représentent le bruit. En utilisant le fait que les vecteurs propres sont orthogonaux deux à deux, et que donc la composante "signal pur" de la matrice de covariance est orthogonale à sa composante "bruit", l'estimateur EVM s'écrit :

$$\hat{D}_{\text{EVM}}(f, \theta) = \frac{\kappa}{\sum_{m, n} H_m(f, \theta) \cdot \hat{N}_{mn}^{-1}(f) \cdot H_n^*(f, \theta)} \quad (3.22)$$

De façon similaire à la méthode MLM, $\hat{N}_{mn}^{-1}(f)$ désigne les éléments de la matrice inverse de la matrice des composantes "bruit" du signal et κ est une constante de normalisation assurant la condition d'intégrale égale à 1 de l'estimateur sur $[0 ; 2\pi]$.

L'estimateur EVM requiert la recherche des valeurs propres et vecteurs propres d'une matrice hermitienne de dimension 3 : il est de ce fait moins rapide que l'estimateur MLM (environ le double de temps calcul). L'aspect "détection de signal" étant plus marqué ici qu'avec la méthode MLM, l'estimateur possède en général des pics plus étroits et plus hauts. Appliquée à des simulations numériques, cette méthode se révèle en général moins performante que la méthode MLM (Benoit, 1992). En fait, de par son principe, cette méthode est plutôt destinée à être utilisée sur des applications réelles comportant un niveau de bruit important. Les essais réalisés par Mardsen et Juszko (1987) confirment une diminution de la qualité de l'estimateur EVM, relativement aux autres méthodes, lorsque le niveau de bruit décroît.

Comme l'estimateur MLM, l'estimateur EVM n'est pas consistant avec la matrice de covariance initiale. Il est donc possible de lui appliquer les algorithmes itératifs présentés pour la méthode MLM au § 3.4. On obtient ainsi les méthodes de vecteurs propres itératives, notées respectivement IEVM1 et IEVM2 pour "Iterative Eigen-Vector Method".

3.6 Méthode de Long-Hasselmann (LHM)

Cette méthode a été proposée par Long et Hasselmann (1979) et Long (1980) (LHM signifie "Long-Hasselmann Method"). Elle a été adaptée au STNMTE dès 1989 pour analyser les mesures issues de la bouée directionnelle BEATRICE (Racapé, 1989). Basée sur une technique inverse, elle s'applique à tout problème d'ajustement d'un modèle à des données représentant des propriétés intégrales de la fonction recherchée.

L'idée de base consiste à augmenter le nombre de contraintes intégrales sur l'estimateur cherché jusqu'à ce que le système soit surcontraint. Les contraintes intégrales supplémentaires représentent des conditions indépendantes de celles contenues dans les expressions des co- et quad-spectres et permettent de préciser la 'qualité' du modèle. Elles sont basées sur la condition de positivité de l'estimateur, d'intégrale égale à 1 sur $[0 ; 2\pi]$ et sur la proximité de l'estimateur cherché à un estimateur de base, donné au départ. Le modèle "optimal" sera celui qui minimise une "fonction d'erreur", définie comme combinaison pondérée des contraintes à respecter. Il prend la forme générale suivante :

$$\hat{D}_{\text{LHM}}(\theta) = \Delta \cdot \text{MAX} \left[0 ; \tilde{D}(\theta) + \mu_1 + \mu_2 \cos \theta + \mu_3 \sin \theta + \mu_4 \cos 2\theta + \mu_5 \sin 2\theta \right] \quad (3.23)$$

où $\tilde{D}(\theta)$ est l'estimateur de base et les μ_j sont des coefficients déterminés par un algorithme itératif, de façon à satisfaire (au sens statistique) les différentes contraintes imposées.

Cet estimateur fournit en général des résultats globalement corrects, mais souvent caractérisés par des pics assez étalés angulairement. Il n'est pas très indiqué pour les faibles étalements directionnels, sauf à choisir un estimateur de base permettant de représenter ces pics pointus. Par ailleurs, c'est un estimateur très difficile à implanter de façon opérationnelle et qui est assez lent à l'exécution.

3.7 Méthodes de type Maximum d'Entropie (MEM1 ; MEM2)

L'idée d'utiliser les méthodes du maximum d'entropie (notée MEM pour "Maximum Entropy Method") repose sur les analogies qui existent entre une FRA et une densité de probabilité classique (positivité sur $[0 ; 2\pi]$ et intégrale égale à 1 sur cet intervalle). En fait, une FRA peut s'interpréter comme la densité de probabilité de l'énergie de la houle selon les directions de propagation. Le principe de la méthode consiste à définir une fonction "entropie" que l'on cherche à maximiser tout en respectant des contraintes intégrales sur l'estimateur de la FRA. Deux variantes de cette méthode sont utilisées selon la définition adoptée pour l'entropie.

3.7.1 Méthode de Maximum d'Entropie - Version 1 (MEM1) :

La définition utilisée pour l'entropie est celle proposée par Barnard (1969) et reprise par Lygre et Krogstad (1986). Il s'agit d'une méthode plus spécifiquement utilisée en analyse spectrale et pour laquelle certains auteurs préconisent de parler de 'variation d'entropie' plutôt que d'entropie'. L'entropie H_1 est la fonctionnelle définie par :

$$H_1(\hat{D}) = - \int_0^{2\pi} \ln(\hat{D}(\theta)) d\theta \quad (3.24)$$

Le principe de la méthode MEM1 est de chercher l'estimateur positif qui maximise cette entropie H et dont les deux premiers harmoniques sont identiques aux premiers coefficients de Fourier de la FRA tels qu'ils sont obtenus à partir des co- et quad-spectres issus des mesures. On peut montrer (Lygre et Krogstad, 1986) que l'estimateur qui satisfait ces conditions s'écrit :

$$\hat{D}_{MEM1}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1 - \phi_1 c_1^* - \phi_2 c_2^*}{|1 - \phi_1 (\cos \theta - i \sin \theta) - \phi_2 (\cos 2\theta - i \sin 2\theta)|^2} \quad (3.25)$$

où ϕ_1 et ϕ_2 sont des nombres complexes obtenus à partir des coefficients de Fourier complexes c_1 et c_2 de la FRA ($c_1 = a_1 + i b_1$ et $c_2 = a_2 + i b_2$)

Le principal avantage de cet estimateur réside dans le fait qu'il est extrêmement rapide à calculer. Par contre, il possède le fâcheux inconvénient de fournir souvent, pour le cas d'un état de mer unimodal, un estimateur possédant deux pics. Cette particularité, reconnue par les auteurs de la méthode (Lygre et Krogstad, 1986), fait qu'il est difficile de pouvoir affirmer, lorsqu'on a deux pics sur le spectre analysé, s'il s'agit d'un cas réellement bimodal ou de l'effet parasite de la méthode. De ce fait, cette méthode est assez peu utilisée dans la pratique.

3.7.2 Méthode de Maximum d'Entropie - Version 2 (MEM2) :

Cette variante utilise la définition de Shannon de l'entropie plus particulièrement utilisée dans le domaine des probabilités. Elle a été appliquée à l'analyse de houle directionnelle par Kobune et Hashimoto (1986) et Nwogu *et al.* (1987). L'entropie H_2 que l'on cherche à minimiser est définie par :

$$H_2(\hat{D}) = - \int_0^{2\pi} \hat{D}(\theta) \ln(\hat{D}(\theta)) d\theta \quad (3.26)$$

Les contraintes à respecter pour l'estimateur sont, comme pour la méthode MEM1, les valeurs des premiers coefficients de Fourier de la FRA issus des mesures (5 conditions, en comptant la condition d'intégrale égale à 1). On montre que l'estimateur MEM2 possède la forme générale suivante :

$$\hat{D}_{MEM2}(\theta) = \exp(-\mu_1 - \mu_2 \cos \theta - \mu_3 \sin \theta - \mu_4 \cos 2\theta - \mu_5 \sin 2\theta) \quad (3.27)$$

où les μ_j sont des multiplicateurs de Lagrange. Ils sont déterminés en résolvant le système non-linéaire des cinq conditions sur les coefficients de Fourier. Il faut pour cela avoir recours à un algorithme de résolution itératif, de type Newton-Raphson ou Levenberg-Marquardt par exemple.

L'estimateur MEM2 se révèle très performant dans la plupart des cas. C'est sans doute la méthode la plus utilisée dans la pratique lorsqu'on cherche une analyse directionnelle fine à partir d'un capteur ponctuel. Par contre, la méthode n'est pas triviale à programmer et n'est pas des plus rapides, à cause de la résolution du système non-linéaire. Elle reste toutefois la méthode à privilégier pour le cas d'un capteur ponctuel (Benoit, 1992 ; Kim *et al.*, 1993).

3.8 Méthode bayésienne (BDM)

Cette méthode est basée sur l'approche bayésienne utilisée en théorie des probabilités (BDM signifiant "Bayesian Directional Method"). Elle a été adaptée à l'analyse directionnelle par Hashimoto *et al.* (1987). C'est sans doute la méthode la plus sophistiquée dans son aspect théorique et la plus complexe à mettre en œuvre. Mais c'est également la plus puissante, au sens où elle introduit un niveau de conditions a priori sur la FRA nettement inférieur à toutes les autres méthodes.

L'intervalle $[0 ; 2\pi]$ est divisé en un certain nombre, noté ici K , d'intervalles ou de segments de largeur $\Delta\theta = 2\pi/K$. L'estimateur de la FRA est simplement supposé être une fonction constante par morceaux, définie par ses valeurs x_k (constantes) sur chacun des K segments.

$$x_k = \ln [\widehat{D}_{BDM}(\theta_k)] \quad (3.28)$$

$$\widehat{D}_{BDM}(\theta) = \sum_{k=1}^K \exp(x_k) \cdot I_k(\theta) \quad \text{avec } I_k(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } (k-1)\Delta\theta \leq \theta \leq k\Delta\theta \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.29)$$

K est généralement de l'ordre de 40 à 90, ce qui représente un nombre d'inconnues particulièrement élevé, notamment en regard du nombre d'équations disponibles, données par les expressions des densités spectrales croisées. D'autant que la méthode suppose que ces équations sont satisfaites au sens statistique, c'est-à-dire en introduisant un niveau d'incertitude dans les densités spectrales issues des mesures.

Le système d'équations (non-linéaires) donné par les co- et quad-spectres est complété par une condition de non-discontinuité forte de l'estimateur de la FRA entre deux segments consécutifs. Mathématiquement, cette condition prend la forme suivante :

$$\sum_{k=1}^K (x_{k+1} - 2x_k + x_{k-1})^2 \rightarrow 0 \quad (3.30)$$

La méthode introduit un hyperparamètre u qui permet de combiner et d'ajuster les poids relatifs des équations issues des spectres croisés d'une part et des conditions de non-discontinuité d'autre part. La valeur de cet hyperparamètre est déterminée comme étant celle qui minimise le critère ABIC (Akaike Bayesian Information Criterion) (Hashimoto *et al.*, 1987).

L'implantation informatique de cette méthode est assez délicate, mais l'algorithme est assez stable. Cette méthode est plus particulièrement indiquée pour les réseaux de capteurs et les systèmes de mesure complexes où l'on dispose de nombreux signaux. Benoit (1992) et Benoit et Teisson (1994) ont cependant montré que cette méthode donne de bons résultats même pour les systèmes ponctuels à trois composantes. Par contre, pour ces systèmes ponctuels, la méthode BDM nécessite des temps de calcul nettement plus importants que d'autres méthodes à niveau de résolution équivalent (Benoit, 1992). Il en résulte que cette méthode est assez peu utilisée pour les systèmes de mesure à trois composantes.

4. ANALYSE DIRECTIONNELLE D'ETATS DE MER GENERES EN BASSIN

4.1 Description des expériences en cuve à houle multidirectionnelle

4.1.1 But et portée des cas-tests expérimentaux

Dans cette partie, les différentes méthodes d'analyse directionnelle présentées dans la partie 3 sont appliquées à des mesures de houle réalisées en laboratoire.

Cette démarche de validation présente un double intérêt : d'une part les méthodes sont appliquées dans des conditions proches des conditions réelles en mer et d'autre part les états de mer simulés sont parfaitement connus. Le premier point permet de tester les performances des méthodes d'analyse dans un contexte opérationnel où sont simultanément présents des problèmes liés à l'étape d'acquisition des mesures (échantillonnage temporel discret et de durée finie, imprécisions et bruit éventuel dans les capteurs de mesures,...) et à l'étape d'analyse spectrale (choix de l'estimateur spectral, de ses options, de sa résolution fréquentielle,...) comme on peut les rencontrer en mer. Le second point permet quant à lui de disposer d'une référence pour apprécier les résultats délivrés en sortie par les méthodes d'analyse et pour, in fine, identifier les méthodes les plus intéressantes pour une application opérationnelle (capacité de résolution, robustesse des algorithmes, rapidité d'exécution,...).

4.1.2 Brève description de l'installation expérimentale

Les mesures expérimentales présentées ici ont été réalisées dans la cuve à houle multidirectionnelle et à courant du LNH. Ce bassin de grandes dimensions (50 * 30 m) est de conception récente. Il se situe à la pointe de l'état de l'art en ce qui concerne la simulation de la houle en laboratoire et de l'étude de ses effets

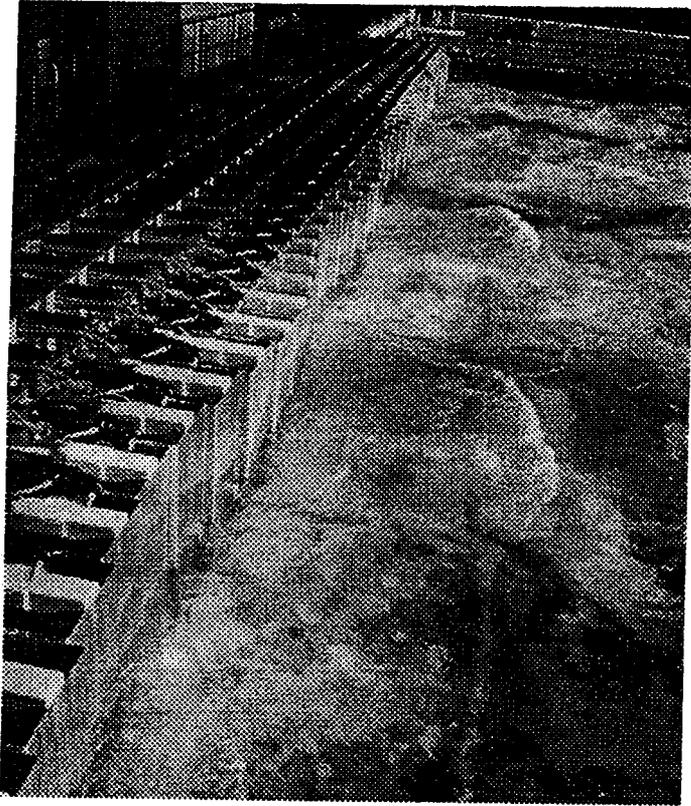


Figure 3: Batteur-serpent du LNH en fonctionnement.

dans le domaine du génie maritime et côtier. Il est équipé d'un générateur de houle segmenté —encore appelé "batteur-serpent"— composé de 56 pelles de 0.40 m de large (cf. figure 3). Chaque pelle de ce batteur est pilotée individuellement par son propre système moteur + actionneur. En spécifiant convenablement les caractéristiques des mouvements de chacune des pelles en termes de fréquence, d'amplitude et de phase, il est possible de générer toute une gamme de conditions de houle différentes, allant de la simple houle monochromatique monodirectionnelle à la houle aléatoire multidirectionnelle, en passant par les cas de mers croisées...

Calculer les mouvements des batteurs dans ces situations complexes n'est pas à proprement parler un problème simple, surtout si l'on veut tenir compte des réflexions de la houle sur les parois latérales du bassin. Pour maximiser la surface de la zone de travail utile en bassin et produire une houle la plus homogène possible sur cette zone, des méthodes numériques spécifiques ont été développées et mises en œuvre au LNH (cf. Benoit (1995) par exemple).

4.1.3 Description des cas-tests effectués

Dans le but de tester les méthodes d'analyse dans différentes conditions de houle, trois cas-tests ont été définis. Ces trois cas-tests sont caractérisés par le même spectre omnidirectionnel $E(f)$, mais par des fonctions de répartition angulaire $D(f, \theta)$ différentes. Dans les tests effectués, chaque fonction angulaire est néanmoins supposée indépendante de la fréquence [i.e. $D(f, \theta) = D(\theta)$]. Dans cette étude, le modèle suivant de fonction de répartition angulaire à deux paramètres —souvent appelé modèle de Mitsuyasu— est utilisé :

$$D(\theta) = \Delta(s) \cos^2 s \left(\frac{\theta - \alpha}{2} \right) \quad \text{pour } \theta \in [0; 2\pi] \quad (4.1)$$

Dans cette expression paramétrique unimodale, α représente la direction principale de propagation de la houle et le paramètre s contrôle l'étalement directionnel de l'énergie de la houle autour de cette direction principale. Plus s est fort, plus l'énergie se trouve concentrée autour de la direction α . Lorsque s devient infini, on retrouve le cas de la houle monodirectionnelle. Le facteur $\Delta(s)$ permet de satisfaire la contrainte d'intégrale égale à l'unité de la fonction de répartition angulaire sur $[0; 2\pi]$.

$$\Delta(s) = \frac{2^{2s-1} \Gamma^2(s+1)}{\pi \Gamma(2s+1)} \quad (4.2)$$

où $\Gamma(x)$ est la fonction GAMMA, eulérienne de deuxième espèce.

Pour la simulation des états de mer en bassin, les directions de houle générées sont limitées au secteur angulaire de $\pm 60^\circ$ par rapport à la direction perpendiculaire au batteur à houle. Le modèle de FRA (4.1) est ainsi modifié de la façon suivante :

$$D'(\theta) = \begin{cases} \Delta'(s) \cos^2 s \left(\frac{\theta - \alpha}{2} \right) & \text{pour } \theta \in [-60^\circ; 60^\circ] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.3)$$

Le facteur $\Delta'(s)$ est corrigé par rapport à l'expression (4.2) de $\Delta(s)$ pour continuer à respecter la condition d'intégrale égale à 1 sur $[0 ; 2\pi]$.

- **Cas 1** fonction de répartition angulaire unimodale large : une seule direction principale de houle (perpendiculaire au batteur : $\alpha = 0$), mais un étalement relativement important de l'énergie autour de cette direction ($s = 1$). Ce cas est plutôt représentatif d'une "mer du vent", quand les vagues sont en phase de formation et de croissance. La FRA imposée sur ce cas est :

$$D'_1(\theta) = \Delta'(1) \cos^2(\theta/2) \quad \text{pour } \theta \in [-60^\circ ; 60^\circ] \quad (4.4)$$

- **Cas 2** fonction de répartition angulaire unimodale étroite : toujours une seule direction principale de houle ($\alpha = 0$), avec maintenant une énergie assez concentrée autour de cette direction ($s = 15$). Ce cas se rapproche davantage d'une situation de houle océanique, avec des vagues bien formées et assez régulières. La FRA imposée sur ce cas est :

$$D'_2(\theta) = \Delta'(15) \cos^{30}(\theta/2) \quad \text{pour } \theta \in [-60^\circ ; 60^\circ] \quad (4.5)$$

- **Cas 3** fonction de répartition angulaire bimodale : cas de mer croisée, correspondant à deux directions de propagation principales à la même fréquence. Chacun des deux "modes" directionnels présente ses propres caractéristiques d'étalement angulaire. Cette situation, souvent assez difficile à analyser finement, n'est pas rare sur des sites exposés à différents climats de houle et où l'on peut voir superposées, par exemple, une houle venant de l'océan et une mer du vent générée localement suivant une autre direction. Le problème est ici compliqué par le fait qu'on suppose que ces deux modes ont la même fréquence. La FRA est obtenue par combinaison linéaire de deux fonctions unimodales de type (4.3) :

$$D'_3(\theta) = \frac{1}{2} \left(\Delta'(25) \cos^{50}\left(\frac{\theta + 40^\circ}{2}\right) + \Delta'(5) \cos^{10}\left(\frac{\theta - 30^\circ}{2}\right) \right) \quad \text{pour } \theta \in [-60^\circ ; 60^\circ] \quad (4.6)$$

L'écart angulaire entre les deux directions principales de propagation ($\alpha_1 = -40^\circ ; \alpha_2 = 30^\circ$) est de 70° et les étalements directionnels des deux modes sont différents ($s_1 = 25 ; s_2 = 5$).

Les fonctions de répartition angulaire correspondant à ces trois cas-tests sont représentées graphiquement sur le figure 4, qui illustre bien les différences de nature entre les trois cas-tests.

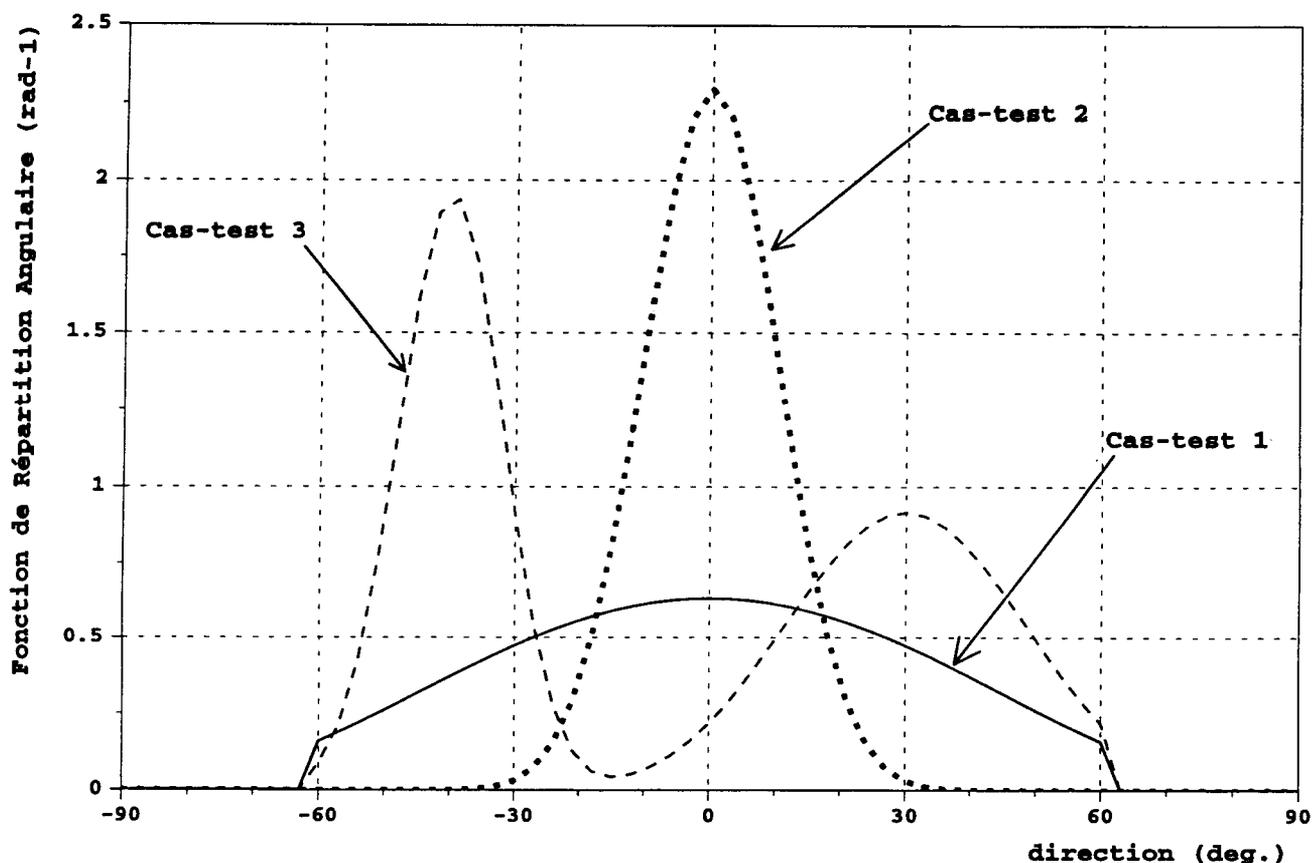


Figure 4: Les trois Fonctions de Répartition Angulaire (FRA) simulées lors des essais en bassin

4.1.4 Procédure de génération des états de mer en laboratoire

Les expériences en cuve à houle ont été réalisées sur fond plat par une profondeur de 0.60 m. Le spectre omnidirectionnel choisi pour les trois cas est de type JONSWAP, avec une période de pic de $T_p = 1.3$ s, une hauteur significative énergétique de $H_{m0} = 0.10$ m et un facteur de pic égal à 5.

Les signaux de pilotage du batteur à houle, et par conséquent le champ d'élévation de surface libre, sont obtenus à l'aide d'une méthode de superposition linéaire de différentes composantes sinusoïdales élémentaires (Miles, 1989 ; Benoit, 1995) :

$$\eta(x,y,t) = \sum A_n \cos(2\pi.f_n.t - k_n(x.\cos \theta_n + y.\sin \theta_n) + \varphi_n) \quad (4.7)$$

L'amplitude de chaque composante est liée au spectre directionnel $S(f, \theta)$ à simuler par :

$$A_n = \sqrt{2 S(f_n, \theta_n) \Delta f_n \Delta \theta_n} \quad (4.8)$$

Les phases φ_n sont tirées de façon aléatoire avec une densité de probabilité uniforme sur l'intervalle $[0, 2\pi]$. Les directions θ_n sont de la forme $j.\Delta\theta$, mais distribuées de façon aléatoire sur l'intervalle des directions utiles $[-60^\circ ; 60^\circ]$. La méthode utilisée est dite de "simple sommation", car ce sont des couples (fréquence ; direction) qui sont déterminés, de façon à n'avoir qu'une seule direction de propagation pour chaque fréquence d'échantillonnage du spectre. Cette approche permet d'obtenir des états de mer plus homogènes par rapport à une approche de "double sommation" où fréquences et directions sont échantillonnées de façon indépendante sur une grille bidimensionnelle (Miles, 1989).

4.1.5 Systèmes de mesure utilisés lors des expériences en cuve à houle

Durant les essais, trois systèmes de mesure de houle multidirectionnelle ont été utilisés à titre de comparaison (cf. figure 5). Deux de ces trois systèmes (systèmes référencés 2 et 3) sont des systèmes de type "ponctuel" auxquels s'appliquent les méthodes d'analyse directionnelles telles qu'elles ont été introduites dans cette étude. Le système 1 procède pour sa part suivant une approche un peu différente, mais ses résultats sont néanmoins présentés ici, à titre d'illustration de ses capacités et de comparaison avec les systèmes ponctuels.

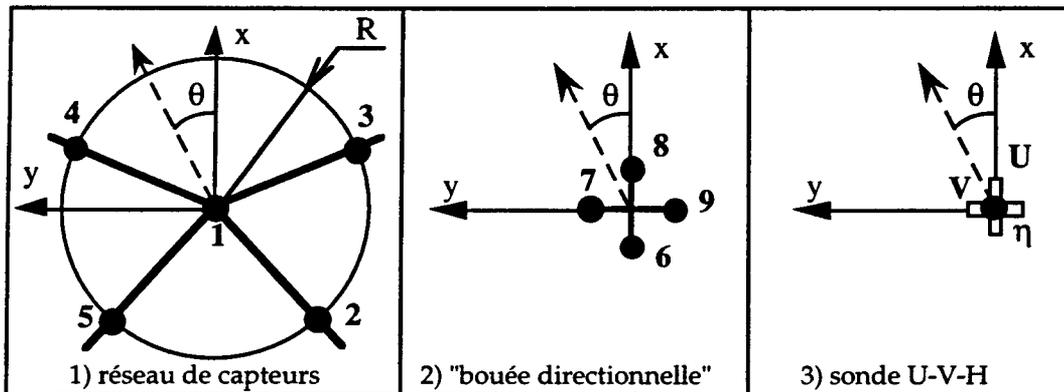


Figure 5: Les trois systèmes de mesure de houle utilisés en laboratoire.

Système 1 "Réseau de sondes" : ce premier système est un réseau géométrique de sondes de houle. Il diffère des systèmes considérés dans cet article au sens où il consiste à mesurer la même grandeur de houle (ici l'élévation de surface libre), mais en des points d'espace distincts. Pour ce type de système, il est également possible d'utiliser les méthodes d'analyse présentées au § 3, mais leur mise en œuvre diffère quelque peu : les relations entre le spectre directionnel et les spectres croisés n'ont pas la même forme. Les développements correspondants ont été réalisés et sont opérationnels au LNH, mais ne sont pas détaillés ici (cf. par exemple Benoit (1993)). Signalons simplement que le fait d'utiliser un réseau permet en théorie d'augmenter le nombre de signaux disponibles en entrée (par rapport aux capteurs ponctuels, généralement limités à trois signaux) et donc le nombre de spectres croisés. En sortie, il est donc possible d'attendre du réseau de sondes une résolution plus fine et plus précise du spectre directionnel. Par contre, ce système de mesure repose sur l'hypothèse que la houle est homogène sur le réseau de mesure, ce qui n'est pas toujours vérifié si, par exemple, le réseau est implanté sur des fonds variables ou à proximité d'une structure réfléchissante. Le réseau utilisé lors des essais comporte 5 capteurs (cf. figure 5-1). Son rayon vaut $R = 0.40$ m, ce qui correspond à un ratio R/L_p de 16 %, où L_p est la longueur d'onde à la fréquence de pic du spectre de houle.

Système 2 "Bouée directionnelle" : le deuxième système est du type "pilonnement-roulis-tangage" et vise à reproduire l'équivalent d'une bouée directionnelle utilisée en mer (cf. figure 5-2). A cet effet, quatre sondes de mesure de houle ont été disposées en forme de croix et très proches les unes des autres. A partir des quatre signaux acquis, l'élévation de surface libre au centre de la croix (le "pilonnement") et les deux pentes de cette surface libre suivant les deux axes de la croix (le "roulis" et le "tangage") sont simplement déduits par les relations suivantes :

$$\eta(t) = (\eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_9)/4 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \eta(t)}{\partial x} = \frac{\eta_8(t) - \eta_6(t)}{d_{6-8}} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \eta(t)}{\partial y} = \frac{\eta_7(t) - \eta_9(t)}{d_{7-9}} \quad (4.11)$$

Les distances inter-capteurs utilisées valent respectivement $d_{6-8} = 11.4$ cm et $d_{7-9} = 13.2$ cm.

Système 3 "Sonde U-V-H" : le troisième système résulte de l'association sur une même verticale d'une sonde de mesure de houle et d'un courantomètre bi-dimensionnel horizontal (cf. figure 5-3). Ce système ponctuel délivre donc en sortie l'élévation de surface libre et les deux composantes horizontales de la vitesse orbitale de la houle à une profondeur donnée. Un tel système peut être utilisé en mer, fixé sur le fond pour les faibles profondeurs ; le capteur de surface libre est alors souvent remplacé par un capteur de pression. Lors des expériences en laboratoire, un vélocimètre acoustique à trois composantes a été utilisé, mais seules les deux composantes horizontales ont été conservées pour l'analyse.

4.1.6 Acquisition des mesures et étape d'analyse spectrale

Les enregistrements temporels sont réalisés avec un pas d'échantillonnage de 0.05 s sur une durée de 819.2 s, soit 16 384 points de signal. L'étape d'analyse spectrale utilise la méthode dite du "périodogramme", basée une transformée de Fourier rapide (FFT) des signaux temporels (Jenkins et Watts, 1968). Chaque signal est découpé en segments de 512 points, avec un taux de recouvrement de 25 % entre deux segments consécutifs. Les densités spectrales croisées obtenues sur chaque segment sont ensuite moyennées pour minimiser la variance des estimateurs spectraux obtenus en sortie. La résolution fréquentielle des spectres est alors de 0.039 Hz. L'analyse directionnelle n'est réalisée que dans la partie du spectre contenant un niveau d'énergie suffisant, pour les fréquences comprises entre 0.5 et 1.25 Hz.

4.2 Présentation et interprétation des résultats

Les spectres directionnels analysés pour les trois systèmes de mesure utilisés en cuve à houle (cf. § 4.1.5) sont représentés pour les trois cas-tests considérés (cf. § 4.1.3) sur les figures 6, 7 et 8 respectivement. Sept méthodes d'analyse directionnelle ont été appliquées dans chaque cas :

- WFS** Décomposition en série de Fourier pondérée (cf. § 3.1.3)
- 2MF** Ajustement à un modèle paramétrique bimodal de type Gaussien (cf. § 3.3)
- MLM** Méthode de maximum de vraisemblance (cf. § 3.4.1)
- IMLM2** Méthode de maximum de vraisemblance itérative version 2 (cf. § 3.4.2)
- LHM** Méthode de Long-Hasselmann (cf. § 3.6)
- MEM2** Méthode de maximum d'entropie version 2 (cf. § 3.7.2)
- BDM** Méthode bayésienne (cf. § 3.8)

Les résultats des analyses directionnelles sont présentés et discutés, pour les trois cas-tests, dans les paragraphes suivants.

4.2.1 Cas-test 1 : Spectre unimodal large (cf. figure 6)

— Réseau de capteurs : Les méthodes MEM2 et surtout BDM produisent des spectres de qualité correcte. Les méthodes WFS, MLM et LHM ont tendance à donner un étalement directionnel plus important que celui du spectre simulé. Les estimateurs IMLM2 et 2MF ne sont pas très performants sur ce cas et sont soit trop étroits, soit quasiment bimodaux, ce qui révèle quelques problèmes d'instabilités numériques.

— "Bouée directionnelle" : Des estimations à la fois très proches du spectre simulé et très similaires entre elles sont obtenues par les méthodes 2MF, IMLM2, MEM2 et BDM. La méthode MLM produit un résultat acceptable, quoique le spectre analysé soit un peu plus étalé. Les spectres issus des méthodes WFS et LHM sont quant à eux nettement plus étalés en directions que le spectre simulé.

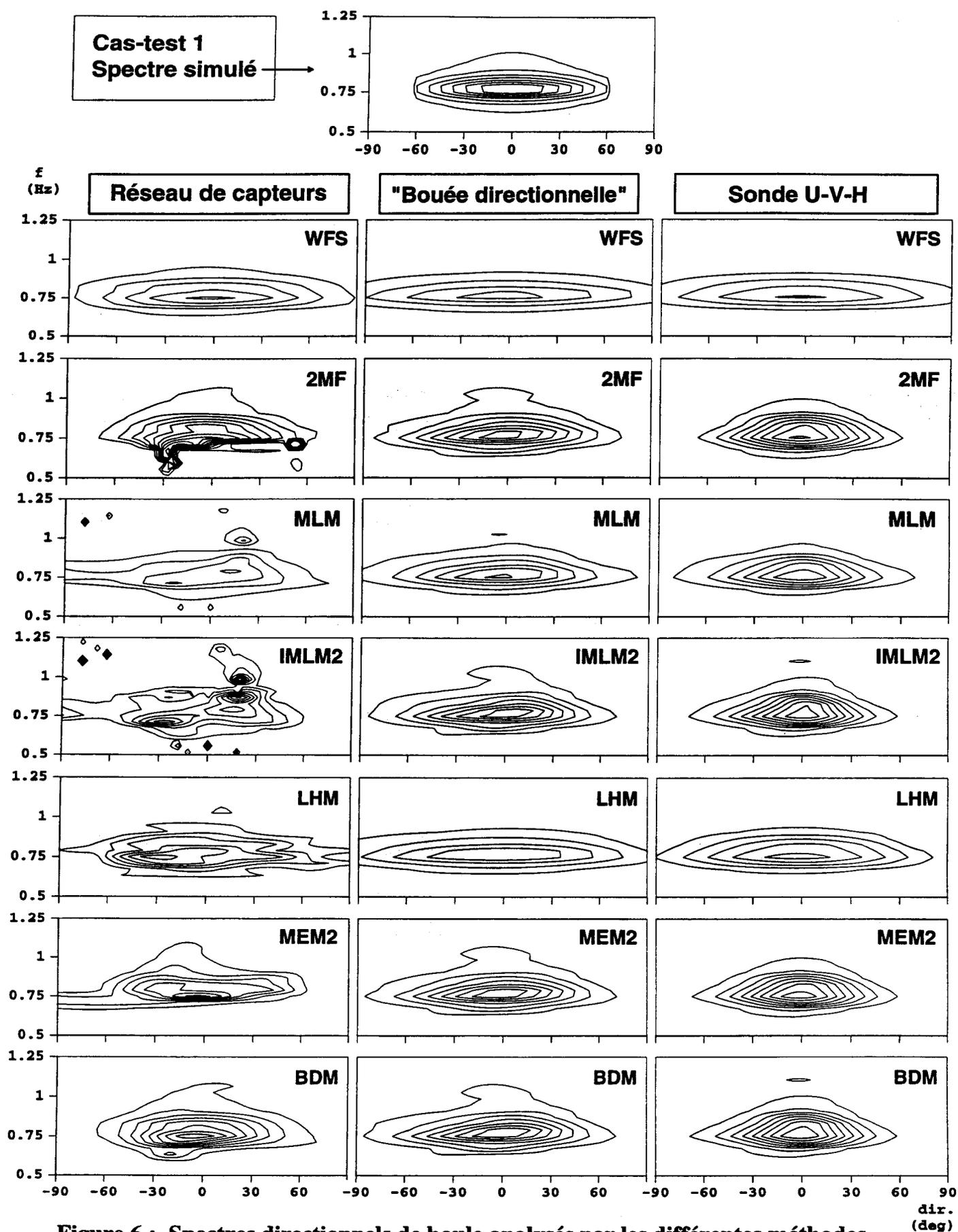


Figure 6 : Spectres directionnels de houle analysés par les différentes méthodes sur le cas-test 1 (spectre unimodal large)

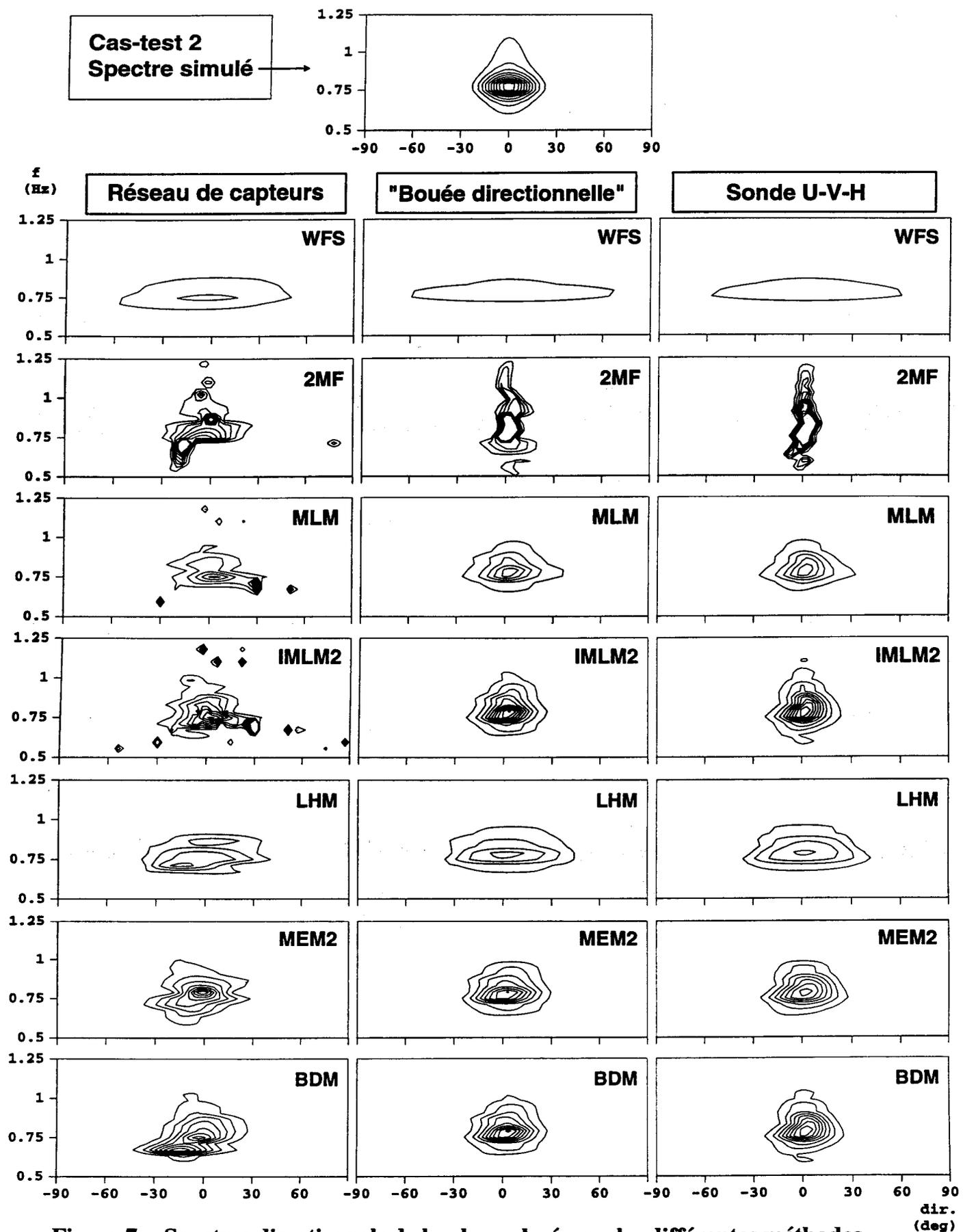


Figure 7 : Spectres directionnels de houle analysés par les différentes méthodes sur le cas-test 2 (spectre unimodal étroit)

— Sonde U-V-H : Les conclusions sur les performances des différentes méthodes rejoignent tout à fait celles émises pour la "bouée directionnelle", mais les spectres estimés ont ici des pics un peu plus pointus. Les méthodes 2MF, IMLM2, MEM2 et BDM donnent à nouveau les meilleures estimations.

4.2.2 Cas-test 2 : Spectre unimodal étroit (cf. figure 7)

— Réseau de capteurs : c'est la méthode MEM2 qui fournit la meilleure estimation du spectre simulé. Ensuite viennent les méthodes BDM et IMLM2, mais cette dernière fait apparaître un certain nombre de pics parasites, dus à des instabilités numériques de la méthode. Ces pics sont d'ailleurs déjà présents sur l'estimateur MLM simple. La méthode 2MF produit également quelques pics parasites, tandis que les méthodes WFS et LHM donnent un spectre nettement plus étalé directionnellement que le spectre simulé. Ces deux dernières méthodes ne se révèlent pas très indiquées pour les cas de spectres étroits.

— "Bouée directionnelle" : On observe, comme sur le cas-test 1, des estimations à la fois très proches du spectre simulé et très similaires entre elles sont obtenues par les méthodes IMLM2, MEM2 et BDM. La méthode MLM donne un spectre analysé plus étalé que le spectre simulé, alors qu'au contraire la méthode 2MF donne un spectre trop étroit. Comme pour le réseau de capteurs, les méthodes LHM et surtout WFS produisent des spectres nettement plus étalés directionnellement que le spectre simulé.

— Sonde U-V-H : On note les mêmes comportements de méthodes que pour la "bouée directionnelle". Par ailleurs, pour chaque méthode d'analyse, les spectres estimés par les deux systèmes ponctuels sont très similaires. Les méthodes IMLM2, MEM2 et BDM donnent les meilleurs résultats.

4.2.3 Cas-test 3 : Spectre bimodal (cf. figures 8 et 9)

— Réseau de capteurs : Sur ce cas assez difficile, cinq méthodes (2MF, IMLM2, LHM, MEM2 et BDM) détectent le caractère bimodal de l'état de mer, alors que les méthodes WFS et MLM ne donnent qu'un seul pic avec un étalement directionnel très large. Parmi les méthodes qui donnent deux pics, les meilleures estimations sont produites par les méthodes BDM, MEM2 et IMLM2. La méthode 2MF est perturbée par quelques pics parasites. La méthode LHM produit deux pics quasiment de formes identiques.

— "Bouée directionnelle" : Les spectres analysés par ce système de mesure sont nettement moins proches du spectre simulé que ceux issus du réseau de capteurs. Il est clair qu'il s'agit là d'un effet lié au nombre de signaux disponibles en entrée (3 pour la bouée et la sonde U-V-H contre 5 pour le réseau de capteurs). Cette différence ne se faisait pas sentir sur les cas unimodaux, mais elle devient significative dès que le spectre directionnel prend une forme un peu complexe. Néanmoins, le caractère bimodal est clairement détecté par les méthodes 2MF, IMLM2, BDM et, dans une moindre mesure, MEM2. Les autres méthodes (WFS, LHM, MLM) ne produisent qu'un spectre unimodal, largement étalé en directions.

— Sonde U-V-H : Les commentaires généraux émis ci-dessus pour la bouée s'appliquent à nouveau, si ce n'est que les estimations sont dans l'ensemble moins bonnes que pour la bouée directionnelle. Seules les méthodes IMLM2 et BDM font apparaître clairement deux pics directionnels

4.2.4 Quelques observations générales sur les systèmes de mesure et méthodes d'analyse :

Entre les deux systèmes de mesure ponctuels, c'est la "bouée directionnelle" qui donne sur ces cas-tests les meilleures estimations. Toutefois, il faut bien considérer qu'il ne s'agit que d'un système analogue à la bouée et pas une véritable bouée suivant la surface libre. Le système de mesure est ici fixe et les conditions de mesure sont sans doute meilleures qu'en nature (pas d'effets d'inertie, du vent, d'ancrage,...).

Les systèmes ponctuels sont capables d'analyser correctement les états de mer unimodaux. Si une méthode de qualité est employée, il est tout à fait possible d'obtenir des informations fiables sur la répartition directionnelle (hauteur et largeur du pic). Pour les cas bimodaux, ces systèmes reproduisent plus difficilement les deux pics directionnels et encore faut-il utiliser une méthode d'analyse avancée (IMLM2, MEM2, BDM). Pour ces cas, le réseau de capteurs s'avère supérieur en capacité de résolution, lorsqu'il est utilisé avec les méthodes MEM2 ou BDM (cf. figure 9).

Les méthodes directionnelles ont des capacités de résolution différentes. Les méthodes WFS et MLM ne sont pas recommandées, car elles produisent en général des pics trop étalés. La méthode 2MF donne souvent de bons résultats, mais peut être perturbée par des instabilités numériques liées à son algorithme de traitement. La méthode LHM donne les bonnes tendances, mais les pics estimés sont, dans la plupart des cas, trop étalés. Restent les méthodes IMLM2, MEM2 et BDM qui fournissent des résultats satisfaisants dans la majorité des cas testés. Parmi ces méthodes, la méthode BDM est sans doute la moins indiquée car la plus gourmande en temps calcul (son emploi est plutôt réservé pour les réseaux de capteurs). En définitive, ce sont les méthodes IMLM2 et MEM2 qui paraissent les plus adaptées pour un capteur ponctuel.

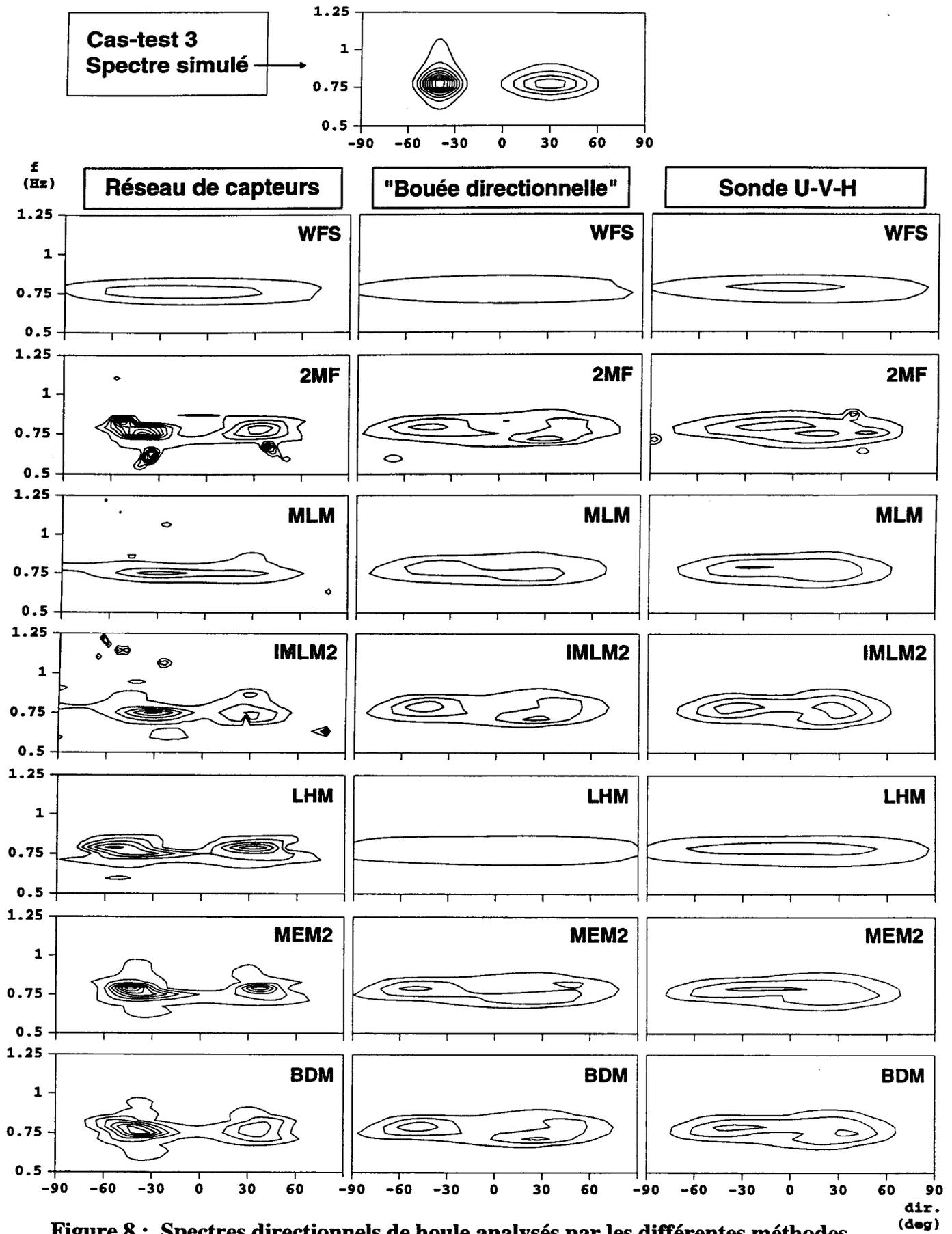
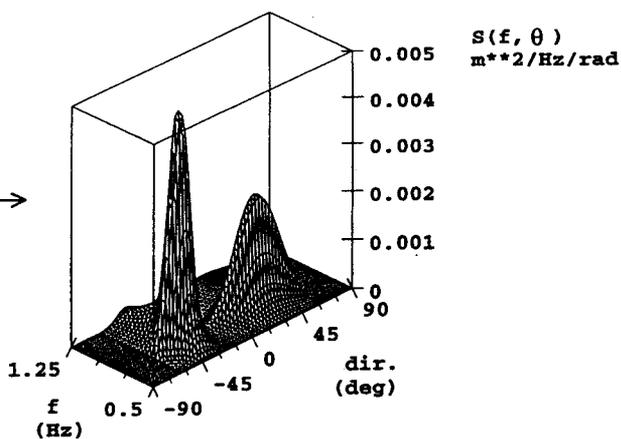


Figure 8 : Spectres directionnels de houle analysés par les différentes méthodes sur le cas-test 3 (spectre bimodal)

Cas-test 3
Spectre simulé



Réseau de capteurs

"Bouée directionnelle"

Sonde U-V-H

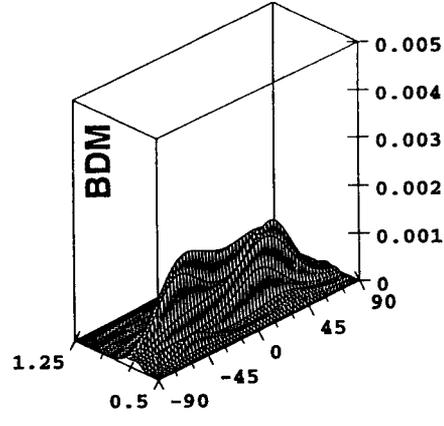
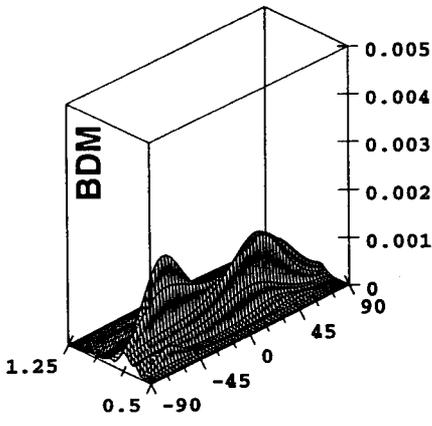
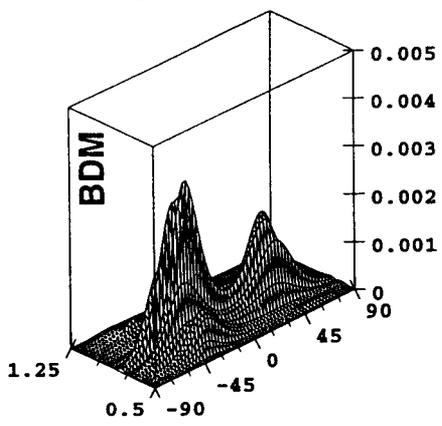
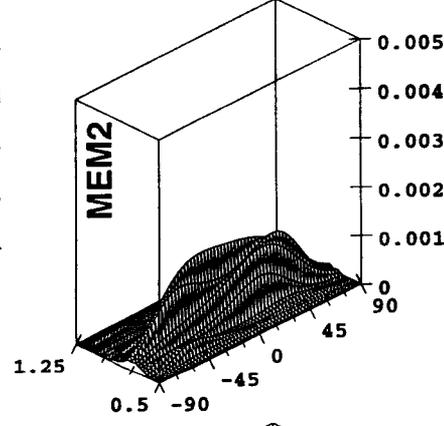
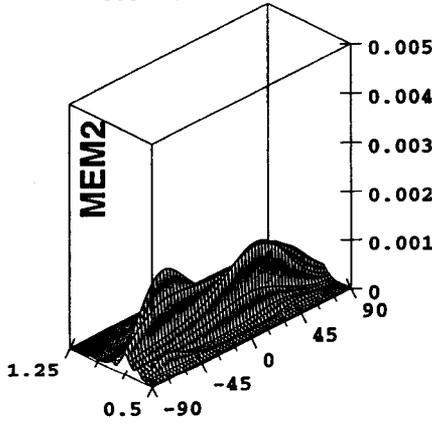
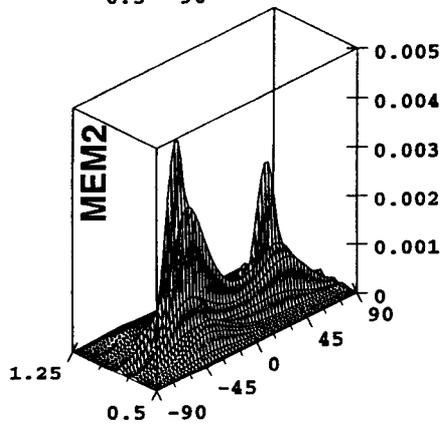
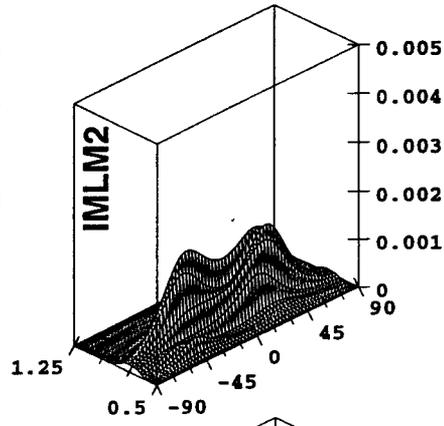
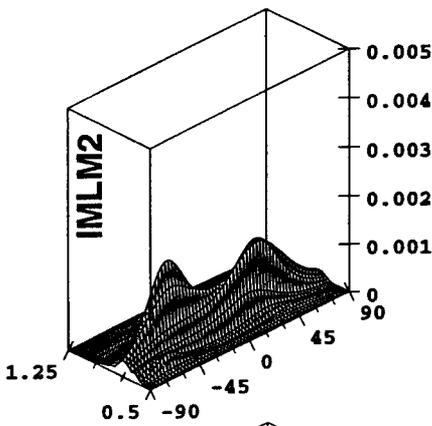
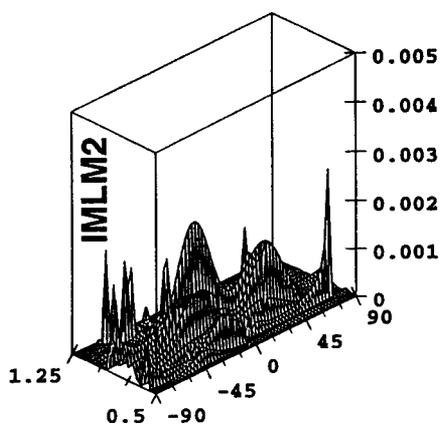


Figure 9 : Spectres directionnels de houle analysés par les méthodes IMLM2, MEM2 et BDM sur le cas-test 3 (spectre bimodal)

5. CONCLUSIONS — RECOMMANDATIONS PRATIQUES

Ainsi que nous avons tenté de l'illustrer dans cette présentation, estimer le spectre directionnel d'énergie (ou de variance) d'un état de mer à partir des mesures issues d'un capteur ponctuel (bouée directionnelle, courantomètre 2D associé à un capteur de pression,...) est loin d'être un problème trivial à résoudre. Cela est principalement lié au faible volume d'informations disponibles en entrée pour estimer la répartition directionnelle de l'énergie. Pour tenter malgré tout de traiter ce problème, de nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature scientifique. La plupart d'entre elles ont été brièvement présentées ici, puis appliquées à différents états de mer générés en cuve à houle multidirectionnelle. A la lumière des tests réalisés dans cette étude, les principales conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- Toutes les méthodes ne sont pas équivalentes en termes de ressources nécessaires à leur mise en œuvre (facilité de programmation, mémoire informatique nécessaire, temps calcul). Certaines sont quasi immédiates à implanter et rapides à exécuter (Décompositions en série de Fourier, Ajustement à un modèle paramétrique unimodal,...), d'autres font au contraire appel à des techniques numériques pointues et requièrent des temps de calcul assez longs (Méthode de maximum d'entropie version 2, Algorithme de Long-Hasselmann, approche bayésienne,...). Entre les méthodes les plus rapides et les plus lentes à exécuter, le rapport des temps de calcul peut atteindre un facteur 10 000 ! (Benoit, 1992).
- Toutes les méthodes ne sont pas non plus équivalentes —loin s'en faut !— en termes de capacité de résolution (estimation des hauteurs et largeurs des pics directionnels, analyse des cas bimodaux,...). En général, les méthodes "simples" à implanter sont inférieures sur ce plan aux méthodes plus sophistiquées mentionnées précédemment. Ces différences peuvent être très significatives, car certaines méthodes introduisent des hypothèses très fortes. En fait, lorsqu'on cherche à interpréter un résultat de spectre directionnel analysé, il faudrait le considérer en rapport avec la méthode d'analyse utilisée. Par exemple, si on utilise une méthode d'ajustement à un modèle paramétrique unimodal, on ne pourra jamais avoir en sortie deux pics directionnels à la même fréquence. Et pourtant, cela peut très bien se produire dans la réalité : le risque dans ce cas est d'affirmer qu'il n'y a jamais d'états de mer bimodaux sur un site, alors que c'est la méthode d'analyse qui est, par nature, incapable de les détecter...
- Sur les cas-tests unimodaux réalisés en bassin, les systèmes de mesure ponctuels se révèlent aptes à analyser assez finement les différentes situations considérées, pour peu qu'ils soient associés à une méthode d'analyse de qualité (ajustement à des modèles paramétriques unimodaux, méthode de maximum de vraisemblance itérative, méthode de maximum d'entropie). Par contre, pour les cas bimodaux, les systèmes ponctuels ne reconstituent que partiellement les deux modes directionnels, et encore faut-il qu'ils soient associés à des méthodes d'analyse avancées (méthode de maximum d'entropie, approche bayésienne). Pour ces cas complexes, le réseau de capteurs de houle s'avère supérieur en capacité de résolution directionnelle, car il offre un volume d'informations plus important en entrée.

En résumé, s'il fallait identifier des méthodes à privilégier pour les capteurs de mesure ponctuels, la préférence semble devoir être donnée à la méthode de maximum de vraisemblance itérative (IMLM2) ou à la méthode de maximum d'entropie version 2 (MEM2). Ces méthodes sont certes plus complexes à implanter et plus gourmandes en temps calcul que les traitements généralement fournis avec les capteurs opérationnels. Cependant, elles leur sont en général nettement supérieures en capacité de résolution.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARNARD T.E. (1969) : Analytical studies of techniques for the computation of high-resolution wavenumber spectra, *Texas instruments Advanced Array Research Spec. Rep. N°9*.

BENOIT M. (1991) : Comparaison des méthodes de mesure de houle directionnelle. Tome 1 : Etude de la capacité des diverses méthodes à reconstruire un spectre directionnel donné à partir des mesures d'une bouée pilonnement/roulis/tangage. *Note technique EDF-LNH HE-42/91.32*

BENOIT M. (1992) : Practical comparative performance survey of methods used for estimating directional wave spectra from heave-pitch-roll data. *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 62-75, Venice (Italy)*.

BENOIT M. (1993) : Extensive comparison of directional wave analysis methods from gauge array data. *Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (ASCE), pp 740-754, New-Orleans (USA)*.

- BENOIT M., TEISSON C. (1994) : Laboratory comparison of directional wave measurement systems and analysis techniques. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, pp 42-56, Kobe (Japan).
- BENOIT M. (1995) : Quelques aspects du développement d'un bassin numérique à houle multidirectionnelle. *Actes des 5èmes Journées de l'Hydrodynamique*, pp 73-86, Rouen (France).
- BORGMAN L.E. (1969) : Directional spectra models for design use. *Offshore Technology Conf., Houston, Texas*.
- CAPON J, GREENFIELD R.J., KOLKER R.J. (1967) : Multidimensional maximum-likelihood processing of a large aperture seismic array. *Proc. IEEE, Vol 55*, 1pp 92-211.
- HASHIMOTO N., KOBUNE K., KAMEYAMA Y. (1987) : Estimation of directional spectrum using the Bayesian approach and its application to field data analysis. *Rep. of Port and Harbour Research Inst., vol 26*.
- ISOBE M., KONDO K., HORIKAWA K. (1984) : Extension of MLM for estimating directional wave spectrum. *Proc. Symp. on Description and Modelling of Directional Seas., Lyngby (Denmark)*.
- JENKINS G.M., WATTS D.G. (1968) : *Spectral analysis and its applications*, Holden Day, 525 pp
- KIM T., LIN L., WANG H. (1993) : Comparisons of directional wave analysis methods. *Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (ASCE)*, pp 554-568, New-Orleans (USA).
- KOBUNE K., HASHIMOTO N. (1986) : Estimation of directional spectra from the maximum entropy principle. *Proc. 5th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp., Tokyo (Japan)*, vol 1, pp 80-85.
- KROGSTAD H.E. (1988) : Maximum likelihood estimation of ocean wave spectra from general arrays of wave gauges. *Modelling, Identification and Control, vol 9*, pp 81-97
- KROGSTAD H.E., GORDON R.L., MILLER M.C. (1988) : High-resolution directional wave spectra from horizontally mounted acoustic Doppler current meters. *J. of Atmos. and Oceanic Techn., Vol 5*, pp 340-352.
- LONG R. B., HASSELMANN K. (1979) : A variational technique for extracting directional spectra from multicomponent wave data. *J. Phys. Oceanogr., Vol 9*, pp 373-381.
- LONG R. B. (1980) : The statistical evaluation of directional spectrum estimates derived from pitch/roll buoy data. *J. Phys. Oceanogr., Vol 10*, pp 944-952.
- LONGUET-HIGGINS M.S., CARTWRIGHT D.E., SMITH N.D. (1963) : Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. *Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall*, pp 111-136.
- LYGRE A., KROGSTAD H.E. (1986) : Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra. *J. Phys. Oceanogr., Vol 16*, pp 2052-2060.
- MARSDEN R.F., JUSZKO B.A. (1987) : An eigenvector method for the calculation of directional spectra from heave, pitch and roll buoy data. *J. Phys. Oceanogr., Vol 17*, pp 2157-2167.
- MILES M.D. (1989) : A note on directional random wave synthesis by the Single Summation Method. *Proc. 23rd IAHR Congress, Vol C*, pp243-250, Ottawa (Canada).
- MITSUYASU H., TASAI F., SUHARA T., MIZUNO S., OHKUSO M., HONDA T., RIKISHI K. (1975) : Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Phys. Oceanogr., Vol 5*, N°2, pp 750-760.
- NWOGU O.U., MANSARD E.P.D., MILES M.D., ISAACSON M. (1987) : Estimation of directional wave spectra by the maximum entropy method. *Proceedings of 17th IAHR Seminar - Lausanne (Suisse)*.
- OLTMAN-SHAY J., GUZA R.T. (1984) : A data-adaptative ocean wave directional-spectrum estimator for pitch-roll type measurements. *J. Phys. Oceanogr., Vol 14*, pp 1800-1810
- PAWKA S.S. (1983) : Island shadows in wave directional spectra. *J. Phys. Res., Vol 88*, pp 2579-2591
- RACAPE J-F. (1989) : Notice d'utilisation des programmes d'application de l'algorithme de Long-Hasselmann pour le traitement des mesures de houle directionnelle. *Rapport STNMTE, Bonneuil s/ Marne*
- REGNAULT P. (1990) : Traitement des mesures directionnelles de houle. Application aux données recueillies au cours des tempêtes exceptionnelles du début de l'année 1990. *Proc. CEIFICI 1990, PARIS*
- REGNAULT P. (1994) : Etat de l'art dans le domaine de l'instrumentation pour la mesure in-situ des paramètres d'états de mer. *Revue Technique des Phares et Balises, N°94*, pp 3-22.
- VAN HETEREN J. (1983) : Estimation of multi-modal directional wave spectra from tri-orthogonal measurements. *Coastal Eng., Vol 7*, pp 205-231.

ANNEXE 2

Auteurs : **Michel BENOIT**, Peter FRIGAARD*, Hemming A. SCHAFFER**

* *Aalborg University (Danemark)*

** *Danish Hydraulic Institute (Danemark)*

Titre : Analyzing multidirectional wave spectra : a tentative classification of available methods.

Année : 1997.

Source : Proceedings IAHR Seminar on Multidirectional Waves and their Interactions with Structures, San-Francisco (Californie, USA), pp 131-158.

ANALYSING MULTIDIRECTIONAL WAVE SPECTRA : A TENTATIVE CLASSIFICATION OF AVAILABLE METHODS

Michel BENOIT¹, Peter FRIGAARD², Hemming A. SCHÄFFER³

ABSTRACT

Wave gauges and buoys are nowadays available for measuring the directional spreading of wave energy in the ocean or in laboratory basins. These devices allow to analyse the directional characteristics of a wave field in a detailed way, by the full analysis of the directional wave spectrum. This item lies at the core of the present paper, in particular by considering multi-component gauges, recording simultaneously and over a given duration several wave signals (typically 3 to 10), either on the same vertical (the so-called « single-point » systems) or at different locations (wave gauges arrays).

Estimating the directional wave spectrum from so few data is a particularly awkward problem, for which numerous analysis methods have been proposed. A great number of these methods are considered in this paper, in particular the ones used within the IAHR Working Group on Multidirectional Waves. The theoretical backgrounds of these methods are briefly described. Special attention is focused on the underlying assumptions of each type of method, in order to highlight and discuss their capabilities and limitations. To that end, it was attempted to sort the methods and to propose a tentative classification, not with the objective of finding the « best » method, but rather to offer a comparative overview of the existing methods with some comments on their characteristics.

0. INTRODUCTION

This paper is a contribution from the IAHR Working Group on Multidirectional Waves. This Group was composed of 11 participating laboratories from 10 different countries in the World. Although most of the Group members were involved in the discussions related to the various steps of the review and classification of directional wave analysis methods, the paper was prepared for the Working Group by Michel BENOIT, assisted by the co-authors. The contributions and discussions with the other members of the Working Group are anyway highly acknowledged.

¹ EDF - Laboratoire National d'Hydraulique, 6 quai Watier, F-78 400 CHATOU, FRANCE

² Aalborg Univ, Dept. Civil Eng., Sohngaardsholmsvej 57, DK-9000 AALBORG, DENMARK

³ Danish Hydraulic Institute (DHI), Agern Allé 5, DK-2970 HØRSBOLM, DENMARK

This paper is organized as follows. Chapter I introduces the scope of the work and gives some basic definitions. A brief overview of measuring devices for multidirectional waves is given in Chapter II. Chapter III is devoted to stochastic analysis methods and it represents the bulk of this paper. Chapter IV discusses deterministic analysis methods and Chapter V briefly mentions some time-domain approaches. Chapter VI draws up some conclusions.

I SCOPE OF THE PAPER - BASIC DEFINITIONS

I.1 Scope of the paper

This paper is mainly devoted to the linear analysis of ocean surface waves in the absence of reflection. This corresponds to the so-called "open ocean" case, for which a lot of methods have been proposed in the scientific literature. It is out of the scope of this paper to review, present in detail and discuss all the methods that have been published in the literature for several decades. Several journal papers or book reviews are available in the bibliography for the reader who is interested in more detailed descriptions or comparative evaluations of a great part of the methods considered in the present work (e.g. Horikawa, 1988 ; Benoit, 1992, 1993 ; Kim *et al.*, 1993 ; Brissette and Tsanis, 1994 ; Benoit and Teisson, 1994 ; Hashimoto, 1997 among other authors).

The main goal of this paper is to provide some general descriptions of the underlying principles, capabilities and limitations of some of the most widely used methods, and in particular (but not only) the ones used within the Working Group.

I.2 The directional wave spectrum

A directional analysis of field or laboratory wave fields basically consists in determining the way the energy (or equivalently the variance) of this wave field spreads over both frequencies (or wave-numbers) and directions of propagation.

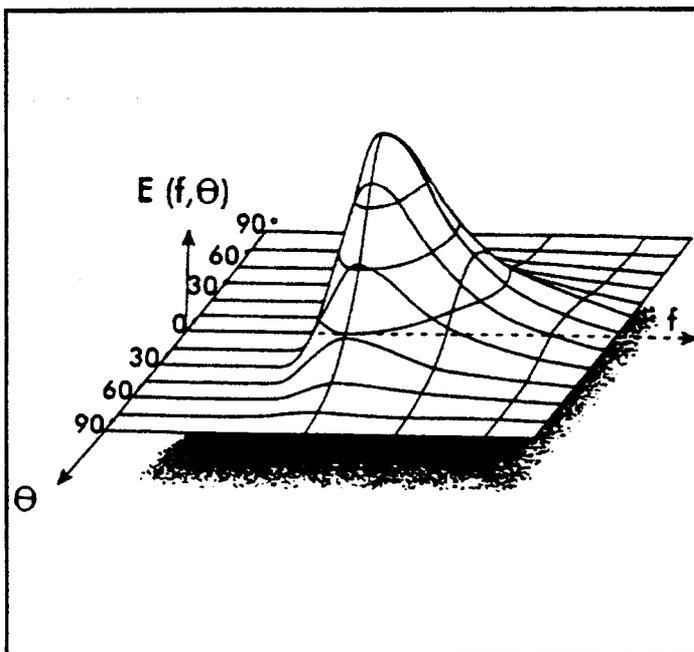


Figure 1 : Example of a directional wave spectrum

This spectral and angular distribution is formally represented by the directional energy spectrum of the wave field $E(f, \theta)$ (unit : $N \cdot m^{-1} \cdot Hz^{-1} \cdot rad^{-1}$), a function of wave frequency f and direction of propagation θ .

Another more widely used variable is the **directional variance spectrum** $S(f, \theta)$ (unit : $m^2 \cdot Hz^{-1} \cdot rad^{-1}$), which is directly proportional to the energy spectrum :

$$S(f, \theta) = E(f, \theta) / (\rho g) \quad (1)$$

where g is the gravitational acceleration ($g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$) and ρ the water density.

$S(f, \theta)$ is often simply referred as the directional spectrum. Its estimation from wave measurements lies at the core of this paper.

A way to describe more practically what the directional spectrum represents may be given on the basis of the decomposition of the wave field into a large number of elementary sine wave components :

$$\eta(x,y,t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos[k_m(x.\cos\theta_m + y.\sin\theta_m) - \omega_m t + \varphi_m] \quad (2)$$

In this expression, the surface elevation η is a function of both time t and location (x,y) . It is written as the superposition of M elementary sine waves, each having amplitude a_m , angular frequency $\omega_m = 2\pi f_m$, wave-number k_m , direction θ_m and phase φ_m . Each wave component satisfies the linear dispersion relationship (d : water depth) :

$$\omega_m^2 = g.k_m.\tanh(k_m.d) \quad (3)$$

Under the assumption that the phases φ_m are randomly distributed over $[0 ; 2\pi]$ (with an uniform probability density), the following relationship holds between the directional variance spectrum and the amplitudes of the wave components comprised in the bidimensional range $[f ; f+df] \times [\theta ; \theta+d\theta]$.

$$\sum_f^{f+df} \sum_\theta^{\theta+d\theta} \frac{1}{2} a_m^2 = S(f,\theta) df d\theta \quad (4)$$

I.3 Classical decomposition of the directional spectrum

The following conventional decomposition of the directional spectrum is often used :

$$S(f,\theta) = E(f).D(f,\theta) \quad (5)$$

$E(f)$ is the classical one-sided variance spectrum, that may be estimated by a single record of free-surface elevation. It is related to the directional spectrum by :

$$E(f) = \int_0^{2\pi} S(f,\theta) d\theta \quad (6)$$

$D(f,\theta)$ is the Directional Spreading Function (DSF) satisfying two important properties :

$$D(f,\theta) \geq 0 \text{ over } [0, 2\pi] \quad (7)$$

$$\int_0^{2\pi} D(f,\theta) d\theta = 1 \quad (8)$$

The former condition expresses that the DSF is a non-negative function, whereas the latter is a direct consequence of (6). The DSF thus models the directional spreading of the wave energy at each frequency f . The directional analysis problem thus consists in determining the directional spectrum $S(f,\theta)$, or equivalently the variance spectrum $E(f)$ and the DSF $D(f,\theta)$.

It should be noted that the directional variance spectrum may alternatively be expressed as a function of wave-number and direction (k, θ) or wave-number vector $(k_x, k_y) = (k.\cos\theta ; k.\sin\theta)$. The relationships between these expressions are recalled below :

$$S(f,\theta) = \frac{2\pi}{C_g} S(k,\theta) = \frac{2\pi k}{C_g} S(k_x,k_y) \quad (9)$$

where C_g is the group velocity for frequency f , as given by the linear wave theory.

II BRIEF REVIEW OF EXISTING MEASURING DEVICES :

A great effort has been devoted in the recent years to the determination of the directional wave spectrum. Several measurement techniques have been proposed for in situ or laboratory applications (see e.g. Horikawa (1988) for a more detailed description with some photographs).

They can be divided into several groups depending on the way they proceed :

- i. the single-point systems : they measure simultaneously at the same location (i.e. on the same vertical) several properties of waves. In general, these system record 3 wave signals. The most widely used are :
 - * the heave-pitch-roll buoy (e.g. Longuet-Higgins *et al.*, 1963 ; Lygre and Krogstad, 1986 ; Mardsen and Juszko, 1987 ; Brissette and Tsanis, 1994), which delivers the sea-surface elevation (heave) and two orthogonal slopes of sea-surface (pitch and roll).
 - * the two-component current-meter associated with a pressure sensor or a wave elevation probe (e.g. Briggs, 1984 ; Schäffer and Hyllested, 1994 ; Benoit and Teisson, 1994),

Other possible combinations include three-dimensional current-meter, a buoy recording three accelerations or three displacements over three axis,...

Among these systems the heave-pitch-roll buoy is probably the most widely employed for operational use because it is a compact single-point measurement system of moderate cost and easy keeping.

The clover-leaf buoy developed by Mitsuyasu *et al.* (1975) was designed to measure 6 wave signals, namely the surface curvatures $\left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 \eta}{\partial xy}\right)$ in addition to the three signals delivered by a classical heave-pitch-roll buoy.

- ii. the gauge arrays : they are composed of several sensors set up at various locations over a fixed frame. The sensors may be either identical (wave elevation probes) or of various types including for instance current meters and pressure sensors (e.g. Hashimoto *et al.*, 1987, 1997 ; Benoit and Teisson, 1994).
- iii. the remote-sensing systems : These techniques proceed in a different way, based on spatial correlations, rather than time correlations. Their common principle is to make a « picture » of the wave field over a given area. The wave field is assumed to be homogeneous over that area, so that the (wave-number) directional spectrum may be computed by Fourier transform of the surface elevation field. These techniques include microwave radars (Jackson *et al.*, 1985), aerial stereo-photography techniques,... They have been significantly developed in the recent years with the use of the Synthetic Aperture Radar (SAR), on the satellite ERS-1 and 2 for example.

Within the frame of this review we mainly consider measuring systems of types i and ii, recording several wave signals at one or several positions and delivering simultaneously sampled time series. These systems will be termed multi-component arrays in the following. We will thus mainly consider analysis methods based on temporal analysis of wave signals at a limited number of locations. Methods based on spatial correlations for systems of type iii will thus not be dealt with in this review.

III STOCHASTIC ANALYSIS METHODS :

III.1 Characterization of stochastic methods :

Methods of this class are based on the assumption that the wave field may be expressed in a form close to (2), but written in a continuous way :

$$\eta(x,y,t) = \iint \sqrt{2 S(f,\theta)} df d\theta \cos[k(x.\cos\theta + y.\sin\theta) - 2\pi ft + \varphi] \quad (10)$$

An important assumption is that the phase function φ is randomly distributed over $[0 ; 2\pi]$ (with an uniform probability density), expressing that the wave components are all independent of each other. There are no « phase-locked » waves. This remark clearly emphasizes that these methods are not suitable to deal with situations where such phase-lock relation exist, e.g. close to a reflective structure. Specific additional refinements are necessary to deal with this case (see Chapter VI).

In the so-called « stochastic approach », the information on the phase distribution of the wave field is thus ignored and interest is only focused on the determination of the directional spectrum. These methods proceed in two steps :

1. perform spectral analysis of the recorded time-series, by computing the cross-spectra between each pair of signals (cf. III.2),
2. determine the directional spectrum (or equivalently the DSF at each frequency) by inverting the relationship (established in III.3) between the cross-spectra and the directional spectrum, by making use of one of the methods presented in section III.5 and subsequent ones.

III.2 Cross-spectral analysis :

We consider a general multi-component measuring device composed of N sensors. As seen in chapter II, several of these probes may be located at the same position. Each probe records a wave signal (surface elevation, velocity, surface slope,...), noted here for convenience : $P_n(t)$ ($n=1$ to N). The locations of the probes are noted : x_n ($n=1$ to N) relative to an arbitrary origin.

The signals are recorded simultaneously at the N probes of the array, over a given duration T and with a sampling time-step Δt .

The analysis of the correlation between each pair of signals is performed in the frequency domain, by estimating of the cross-covariance spectral densities (i.e. the cross-spectra) $G_{mn}(f)$ between each couple ($P_m ; P_n$), defined by :

$$G_{mn}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{mn}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad \text{with} \quad R_{mn}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_m(t).P_n(t+\tau) dt \quad (11)$$

In practice, the cross-spectra $G_{mn}(f)$ are usually estimated from the discretely sampled and finite duration time-series, by digital procedures based on the Fast Fourier Transform (e.g. Jenkins and Watts, 1968).

These cross-spectra are usually computed for $m \leq n$ only, as one can show that $G_{mn}(f)$ and $G_{nm}(f)$ are complex conjugate quantities. The total number of (complex) cross-spectra to compute for a measuring device composed of N probes is thus $N.(N+1)/2$. Among these, one can note that :

- * N are auto-spectra ($m = n$), which are real quantities. If $P_n(t)$ is the surface elevation time-series, then $G_{nn}(f)$ is directly an estimation of the variance spectrum $E(f)$.
- * $N.(N-1)/2$ are actual cross-spectra ($m < n$), whose real parts $C_{mn}(f)$ are called "coincident spectral density functions" or "co-spectra" and imaginary parts $Q_{mn}(f)$ are called "quadrature spectral density functions" or "quad-spectra".

III.3 Relationship between the cross-spectra and the directional spectrum (or the directional spreading function) :

Within the frame of the linear theory and by assuming that the phases of the various components of the wave field are randomly distributed over $[0 ; 2\pi]$, the following equation is obtained between the directional spectrum $S(f, \theta)$ and the cross-spectra $G_{mn}(f)$:

$$G_{mn}(f) = \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) e^{-i \vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)} S(f, \theta) d\theta \quad (m=1, \dots, N ; m < n) \quad (12)$$

which may also be written as an equation over the Directional Spreading Function $D(f, \theta)$, by using the decomposition (5) of the directional spectrum :

$$G_{mn}(f) = E(f) \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) e^{-i \vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)} D(f, \theta) d\theta \quad (13)$$

$H_m(f, \theta)$ is the transfer function between the surface elevation signal and any other wave signal $P_m(t)$ (pressure, velocity, slope of the surface,...).

The symbol * stands for the conjugate operator, as $H_m(f, \theta)$ is a complex function in the general case.

The transfer function $H_m(f, \theta)$ may be decomposed in the following form :

$$H_m(f, \theta) = h_m(f) \cdot \cos^{\alpha_m} \theta \cdot \sin^{\beta_m} \theta \quad (14)$$

The quantities h_m , α_m and β_m depend on the type of wave signal $P_m(t)$. Their expressions are given in Table 1 for several wave signals and by considering the linear wave theory results (e.g. Isobe *et al.*, 1984). In this table, the variable $\Psi(x, y, z, t)$ represents the velocity potential for a long-crested monochromatic wave :

$$\Psi = i \frac{g}{\omega} \frac{H}{2} \frac{\text{ch}(k.(d+z))}{\text{ch}(kd)} \exp(i.(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega.t)) \quad (15)$$

For convenience, (13) is also rewritten in the following form :

$$\phi_{mn}(f) = \frac{G_{mn}(f)}{E(f)} = \int_0^{2\pi} q_{mn}(f, \theta) D(f, \theta) d\theta \quad (16)$$

Wave signal	P_m	$h_m(f)$	α_m	β_m
Surface elevation	$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \Big _{z=0} = \frac{H}{2} \exp(i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t))$	1	0	0
Surface slope (x axis)	$\frac{\partial \eta}{\partial x} = [i k \cos \theta] \eta$	ik	1	0
Surface slope (y axis)	$\frac{\partial \eta}{\partial y} = [i k \sin \theta] \eta$	ik	0	1
Velocity (x axis)	$u_x = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \left[\omega \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \cos \theta \right] \eta$	$\omega \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	1	0
Velocity (y axis)	$u_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} = \left[\omega \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \sin \theta \right] \eta$	$\omega \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	1
Velocity (z axis)	$u_z = -\frac{\partial \Psi}{\partial z} = \left[-i \omega \frac{\text{sh}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \right] \eta$	$-i \omega \frac{\text{sh}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	0
Vertical surface veloc.	$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \Big _{z=0} = -i \omega \eta$	-iω	0	0
Acceleration (x axis)	$a_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = \left[-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \cos \theta \right] \eta$	$-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	1	0
Acceleration (y axis)	$a_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} = \left[-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \sin \theta \right] \eta$	$-i \omega^2 \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	1
Acceleration (z axis)	$a_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} = \left[-\omega^2 \frac{\text{sh}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \right] \eta$	$-\omega^2 \frac{\text{sh}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	0
Vertical surface accel.	$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \omega^2 \eta$	$-\omega^2$	0	0
Displacement (x axis)	$\xi_x = \int u_x dt = \left[i \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \cos \theta \right] \eta$	$i \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	1	0
Displacement (y axis)	$\xi_y = \int u_y dt = \left[i \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \sin \theta \right] \eta$	$i \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	1
Displacement (z axis)	$\xi_z = \int u_z dt = \left[\frac{\text{sh}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)} \right] \eta$	$\frac{\text{sh}(k(d+z))}{\text{sh}(kd)}$	0	0
Dynamic pressure	$p = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[\rho g \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{ch}(kd)} \right] \eta$	$\rho g \frac{\text{ch}(k(d+z))}{\text{ch}(kd)}$	0	0

Ψ = wave potential ; ω = angular frequency ; k = wave-number ; θ = direction ; d = water depth
 z = elevation from the still water level ; ρ = water density ; g = gravitational acceleration

Table 1 : Transfer functions for various wave signals (from linear theory).

III.4 Estimation of the directional spectrum :

Solving the system of integral equations (12) or (16) for estimating the directional spectrum of the DSF lies at the core of directional wave analysis. When considering (16), the problem is to find at each frequency $D(f, \theta)$, a continuous function over $[0 ; 2\pi]$ from a finite (and often very limited) number of equations, given by the cross-spectra. If an infinite number of wave signals were simultaneously recorded (i.e. if we had an infinite number of cross-spectra), the DSF could in principle be determined uniquely.

As the operational measuring devices usually have a number of gauges ranging from 3 to 10, the mathematical problem is not fully defined and one has to introduce some additional assumptions or conditions of the DSF in order to get a unique solution.

For instance, for the case of a heave-pitch-roll buoy, recording at the same location the surface elevation and two slopes on two orthogonal axis ($N=3$), we have the following

$$\text{set of signals : } (P_1(t) ; P_2(t) ; P_3(t)) = \left(\eta(t) ; \frac{\partial \eta}{\partial x}(t) ; \frac{\partial \eta}{\partial y}(t) \right)$$

This gives the following set of 6 complex cross-spectra :

$$\begin{aligned} C_{11}(f) &= \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta = E(f) & Q_{11}(f) &= 0 \\ C_{22}(f) &= E(f).k^2 \int_0^{2\pi} D(f, \theta). \cos^2(\theta) d\theta & Q_{22}(f) &= 0 \\ C_{33}(f) &= E(f).k^2 \int_0^{2\pi} D(f, \theta). \sin^2(\theta) d\theta & Q_{33}(f) &= 0 \\ C_{12}(f) &= 0 & Q_{12}(f) &= E(f).k \int_0^{2\pi} D(f, \theta). \cos(\theta) d\theta \\ C_{13}(f) &= 0 & Q_{13}(f) &= E(f).k \int_0^{2\pi} D(f, \theta). \sin(\theta) d\theta \\ C_{23}(f) &= E(f).k^2 \int_0^{2\pi} D(f, \theta). \cos(\theta). \sin(\theta) d\theta & Q_{23}(f) &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

From the twelve real cross-spectral coefficients, only six are different from zero. Furthermore $C_{11}(f)$ does not carry any information about the directional distribution, but directly gives the variance spectrum $E(f)$. In addition, $C_{11}(f)$, $C_{22}(f)$, $C_{33}(f)$ are related by the following relationship :

$$C_{22}(f) + C_{33}(f) = k^2.C_{11}(f) \quad (18)$$

This relation is often used for obtaining an empirical value of the wave number, instead of using the linear dispersion relation (3) :

$$k = \sqrt{\frac{C_{22}(f) + C_{33}(f)}{C_{11}(f)}} \quad (19)$$

It is thus possible to compute only five independent coefficients at each frequency, from which one is devoted to the estimation of the frequency spectrum $E(f)$ and the four

others may be used for the computation of the DSF $D(f, \theta)$ at this frequency. This information may be rewritten in terms of Fourier coefficients of the DSF, defined by :

$$a_n = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \cos(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad b_n = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cdot \sin(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad (20)$$

For single-point systems ($N = 3$), only the four Fourier coefficients (a_1, b_1, a_2, b_2) may be computed. They carry all the available information on the DSF. The expressions of these Fourier coefficients from the cross-spectra are gathered in Table 2 for various single-point systems.

In the following section, several directional methods aiming at solving (16) will be briefly reviewed and discussed. These methods are not equivalent. Their resolving capabilities and limitations are related to the modelling assumptions they are based on, as discussed in the next sub-sections.

III.5 Fourier Series Decomposition Methods

III.5.1 Truncated Fourier Series Decomposition (TFS)

As the Directional Spreading Function (DSF) is, at least in the general short-crested case, a continuous function over $[0 ; 2\pi]$ satisfying $D(f, 0) = D(f, 2\pi)$, it is possible to write its Fourier series decomposition :

$$D(f, \theta) = \frac{a_0}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + b_n \cdot \sin(n \cdot \theta)] \quad (21)$$

where a_n and b_n ($n > 0$) are given by (20),

$$\text{and : } a_0 = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1 \quad (22)$$

The most straightforward way to use this approach consists in truncating the above Fourier series decomposition in order to only keep the terms whose coefficients may be determined from the available cross-spectral data. If we note K the maximum value of the rank of the decomposition that can be computed, we then get :

$$\hat{D}_{\text{TFS}}(f, \theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^K [a_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + b_n \cdot \sin(n \cdot \theta)] \quad (23)$$

For a single-point measuring devices for instance, only terms of ranks 1 and 2 may be computed from the co- and quad-spectra (cf. III.4). We thus obtain for this estimate :

$$\hat{D}_{\text{TFS}}(f, \theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} [a_1 \cdot \cos(\theta) + b_1 \cdot \sin(\theta) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)] \quad (24)$$

This estimate is easy to implement and computationally efficient. But, as a drawback of its limited number of component terms, it may sometimes produce negative values, which is not acceptable for a DSF. A refinement of this method is presented in the next section (cf. III.5.2), in order to overcome this shortcoming.

n°	Single-point measuring device	E(f)	a ₁ (f)	b ₁ (f)	a ₂ (f)	b ₂ (f)
1	Heave-pitch-roll buoy [η ; $\frac{\partial \eta}{\partial x}$; $\frac{\partial \eta}{\partial y}$]	C ₁₁	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
2	Elevation probe + 2D current-meter [η ; u _x (z ₂) ; u _y (z ₂)]	C ₁₁	$\frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
3	Pressure gage + 2D current-meter [p(z ₁) ; u _x (z ₂) ; u _y (z ₂)]	$C_{11} \left(\frac{1}{\rho g} \frac{ch(k \cdot d)}{ch(k(d+z_1))} \right)^2$	$\frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
4	Device recording three displacements [η ; $\xi_x(0)$; $\xi_y(0)$]	C ₁₁	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
5	Device recording three velocities [u _z (z ₁) ; u _x (z ₂) ; u _y (z ₂)]	$C_{11} \left(\frac{1}{\omega} \frac{sh(k \cdot d)}{sh(k(d+z_1))} \right)^2$	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$
6	Device recording three accelerations [a _z (z ₁) ; a _x (z ₂) ; a _y (z ₂)]	$C_{11} \left(\frac{1}{\omega} \frac{sh(k \cdot d)}{sh(k(d+z_1))} \right)^2$	$\frac{Q_{12}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{Q_{13}}{\sqrt{C_{11}(C_{22}+C_{33})}}$	$\frac{C_{22} - C_{33}}{C_{22} + C_{33}}$	$\frac{2 \cdot C_{23}}{C_{22} + C_{33}}$

Table 2: Expressions of the first Fourier coefficients of the DSF for various single-point measuring devices

For an array of N wave elevation gauges, the number of harmonics in the decomposition may theoretically be increased up to $N(N-1)/2$, if the gauge pairs are independent (e.g. Borgman, 1969). In fact, it is often preferable to keep harmonics only up to rank $K = N(N-1)/2 - 2$ (or even less) in order to get a stable estimate.

The Fourier coefficients a_n and b_n are thus obtained from the measured co- and quad-spectra by using a least-squares method. This leads to solve two linear systems of equations : one for the harmonics of even rank and one for harmonics of odd rank (Borgman, 1969).

III.5.2 Weighted Fourier Series Decomposition (WFS) :

In order to get a positive estimate of the DSF from the Fourier series decomposition, it is possible to use a weighting function of the following form (Longuet-Higgins *et al.*, 1963):

$$W_K(\theta) = R_K \cdot \cos^{2K}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (25)$$

where K is the rank of the truncated Fourier series decomposition. The normalisation constant R_K is determined in order to verify :

$$\int_0^{2\pi} W_K(\theta) \cdot d\theta = 1 \quad (26)$$

which gives after some algebra :

$$R_K = \frac{2^{2K-1} (K!)^2}{\pi (2K)!} \quad (27)$$

The weighting function $W_K(\theta)$ has a finite Fourier series decomposition :

$$W_K(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^K a_k^K \cdot \cos(n \cdot \theta) \quad (28)$$

It may be shown after little algebra that its Fourier coefficients read :

$$a_k^K = \frac{(K!)^2}{(K-k)! (K+k)!} \quad (29)$$

The DSF estimate based on the weighted Fourier series decomposition is thus obtained by the convolution of the TFS estimate and the weighting function $W_K(\theta)$:

$$\hat{D}_{WFS}(f, \theta) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta') \cdot W_K(\theta' - \theta) d\theta' \quad (30)$$

which finally gives :

$$\hat{D}_{WFS}(f, \theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^K a_n^K \cdot (a_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + b_n \cdot \sin(n \cdot \theta)) \quad (31)$$

For the case of single-point measuring devices for instance, $K = 2$ and the weighting function takes the following form :

$$W_2(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{2}{3} \cos(\theta) + \frac{1}{6} \cos(2\theta) \right] \quad (32)$$

which then gives the following expression of the DSF estimate :

$$\hat{D}_{WFS}(f, \theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{2}{3\pi} (a_1 \cdot \cos(\theta) + b_1 \cdot \sin(\theta)) + \frac{1}{6\pi} (a_2 \cdot \cos(2\theta) + b_2 \cdot \sin(2\theta)) \quad (33)$$

Compared to the TFS estimate, the WFS estimate is always positive, but the use of the weighting function usually results in a diffusion of the energy over the directions surrounding the main peaks. These directional peaks are systematically lowered and broadened by this convolution. Due to that, this estimate is not widely used. It may however be used as a first guess for other iterative methods, due to its computational efficiency.

III.6 Parametrical Methods

III.6.1 Direct fitting to parametrical models :

Unimodal models

The common principle of the fitting methods consists in assuming *a priori* a given parametrical expression for the DSF and determining the low number of parameters of this expression from the measured cross-spectra. This approach allows to significantly reduce the number of unknowns related to the DSF. In the case of a unimodal parametrical model, the problem is indeed reduced to the determination of two parameters : the main direction of propagation and a directional spreading factor, which represents the angular spreading of wave energy around the main direction. These coefficients are best computed for the first rank coefficients a_1 and b_1 of the Fourier series decomposition of the DSF, but higher rank coefficients could also be alternatively used.

Several expressions are used for the parametrical unimodal model. For instance, Mitsuyasu *et al.* (1975) proposed the following model :

$$\hat{D}_{1MFM}(f, \theta) = \Delta(s) \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (34)$$

The normalisation coefficient is found from then condition that the integral of the DSF over $[0 ; 2\pi]$ remains equal to 1 (Γ is the gamma function) :

$$\Delta(s) = \frac{2^{2s-1} (\Gamma(s+1))^2}{\pi \Gamma(2s+1)} \quad (35)$$

The main direction θ_0 and the directional index s may be computed from the Fourier coefficient of rank 1 or 2 :

$$\text{Rank 1: } \theta_0 = \text{Arg}(a_1 + i \cdot b_1) \quad s = \frac{r_1}{1 - r_1} \quad (36)$$

$$\text{Rank 2: } \theta_0 = \frac{1}{2} \text{Arg}(a_2 + i \cdot b_2) \quad s = \frac{1 + 3 \cdot r_2 + \sqrt{r_2^2 + 14 \cdot r_2 + 1}}{2(1 - r_2)} \quad (37)$$

$$\text{where : } r_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (38)$$

In the latter case, it should be emphasized that the main direction is given modulo π , which makes it quite difficult to use. This and the fact that parameters given by rank 1 are usually more stable than those given by rank 2 lead to recommend the use of the pair $(a_1 ; b_1)$ in determining the parameters of the unimodal model.

Another quite widely used model is the Gaussian model, for a wave direction falling in the range $[\theta_0 - \pi ; \theta_0 + \pi]$:

$$\hat{D}_{1\text{MFG}}(f, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2 \sigma^2}\right) \quad (39)$$

Again the main direction θ_0 and the directional width σ are computed from the Fourier coefficient of rank 1 or 2 :

$$\text{Rank 1 : } \theta_0 = \text{Arg}(a_1 + i.b_1) \quad \sigma = \sqrt{-2.\ln(r_1)} \quad (40)$$

$$\text{Rank 2 : } \theta_0 = \frac{1}{2} \text{Arg}(a_2 + i.b_2) \quad \sigma = \frac{\sqrt{-2.\ln(r_2)}}{2} \quad (41)$$

Other expressions may be found in the literature (e.g. Borgman, 1969), but their principle is always similar to the one presented here. Only the expressions giving the parameters of the model vary from one parametrical model to another.

Methods of this type were (and are still) widely used as they are very computationally efficient and robust. Furthermore the corresponding estimate satisfies the various properties of the DSF. But these methods suffer from some shortcomings related to the strong assumptions they are based on : by definition, they are only suitable to model unimodal and symmetrical directional peaks. They are thus unable to detect non-symmetrical unimodal peaks, nor bimodal sea-states (two directional peaks at the same frequency). This explains why these methods are not advised here.

The interpretation of results given by these methods thus requires great care. Before concluding that there is no bimodal conditions (at the same frequency) at a given location, it is stressed that one should first check that the method used for directional analysis allows for the representation of two peaks at the same frequency.

Bimodal models

In order to make the fitting methods more suitable, several authors have suggested to use bimodal parametrical models (Van Heteren, 1983 ; Benoit, 1992). Those bimodal models are obtained by a linear combination of two unimodal models such as the one proposed in the previous section. Again various expressions may be used. We only give here, as an example, the bimodal estimate based of the Gaussian model :

$$\hat{D}_{2\text{MFG}}(f, \theta) = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_1)^2}{2 \sigma_1^2}\right) + \frac{1 - \lambda}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_2)^2}{2 \sigma_2^2}\right) \quad \lambda \in [0, 1] \quad (42)$$

This type of models has 5 unknowns $(\theta_1, \sigma_1, \theta_2, \sigma_2, \lambda)$ and is able to model both unimodal and bimodal sea-states with two peaks at the same frequency.

For single point systems however, the number of available data is limited to 4 independent Fourier coefficients. One has thus to introduce an additional condition in order to solve the problem. It is for instance possible to impose $\sigma_1 = \sigma_2$ (Van Heteren, 1983), but this somewhat restricts the general capabilities introduced by the bimodal

expression introduced above. On the other hand, Benoit (1992) tried to use method of minimisation under constraints by keeping the 5 unknown parameters and introducing additional conditions on the variations of these unknowns. These methods are clearly out of the scope of this presentation and require sophisticated algorithms. They may be quite efficient, but they are not easy to deal with in the general case. They appear to be quite sensitive to the first guess given as input to the algorithm. As they may become unstable in some conditions, they are not advised for operational use with single-point systems.

For the array of wave gauges however, this method is more suitable as the larger number of measured cross-spectra allows for a better determination of the unknown parameters by using a least-squares method. Benoit and Teisson (1994) developed and used such a method with an array of 5 probes in laboratory experiments both under unimodal and bimodal waves conditions. They showed that the method usually depicts the correct shape of the spectrum, but that there are still some numerical problems of stability at frequencies located away from the peak frequency. Further improvements on the numerical algorithms are required in order to make this method more robust in a large variety of situations.

III.6.2 Statistical fitting to unimodal parametrical models :

In the unimodal method presented in section III.6.1, the parameters of the parametrical model of DSF are determined in deterministic way, by making use of only one harmonic of the Fourier series decomposition of the DSF. In order to use more data information and to proceed to a statistical fitting of the model, Isobe (1990) developed a Maximum Likelihood Fitting method (MLF) to be used on data from single-point systems, as a wave elevation probe and a bidimensional horizontal current-meter.

The DSF is still assumed to be given in a standard form. Isobe (1990) used a Mitsuyasu-type expression as in (34):

$$\widehat{S}_{MLF}(f, \theta) = E(f) \cdot \Delta(s) \cos^2 s \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (43)$$

but the values of the parameters of the models ($E(f)$, θ_0 , s) are the ones which maximize a likelihood function for the Fourier coefficients of the signals (see Isobe (1990) for more details). In addition, a level of noise, noted ε , is allowed in the data, so that finally we get a set of four unknown parameters at each frequency :

$$(\lambda_1 = E(f) ; \lambda_2 = \theta_0 ; \lambda_3 = s ; \lambda_4 = \varepsilon)$$

This method requires of course a higher computational effort than the direct fitting technique of the previous section. One has to find the set of parameters which maximize the Likelihood, i.e. that make its partial derivatives vanish. Isobe (1990) used a Newton-Raphson method for that purpose, but this approach also requires the computation of the second derivatives of the Likelihood function, which makes the algorithm not straightforward to implement.

By definition, as presented above, this method is in principle only applicable to unimodal and symmetrical DSF. For single-point systems, it is not able to resolve two directional peaks at the same frequency, but this extension should be possible and interesting for more complex arrays. Isobe (1990) applied his method to field data and found that its results were very similar to the direct estimation of directional parameters such as the main direction and the long-crestedness parameter.

III.7 Maximum Likelihood Methods :

III.7.1 Maximum Likelihood Method (MLM) :

Introduced by Capon *et al.* (1967) in seismic wave detection, and then extended by several authors (e.g. Isobe *et al.*, 1984 ; Krogstad, 1988), the Maximum Likelihood Method (MLM) is based on the assumption that the estimate of the DSF may be expressed as a linear combination of the cross-spectra :

$$\hat{D}_{MLM}(f,\theta) = \frac{1}{\hat{E}(f)} \sum_{m,n} \alpha_{mn}(f,\theta).G_{mn}(f) \quad (44)$$

One can then show that this estimate is related to the actual DSF $D(f,\theta)$ by the following relationship :

$$\hat{D}_{MLM}(f,\theta) = \int_0^{2\pi} D(f,\theta).w(\theta,\theta') d\theta'$$

$$\text{where : } w(\theta,\theta') = \sum_{m,n} \alpha_{mn}(f,\theta).H_m(f,\theta').H_n^*(f,\theta') \quad (45)$$

The MLM estimate may thus be seen as the convolution product of the actual DSF by a window function $w(\theta,\theta')$. This estimate will best approach the actual DSF as the window function tends towards a Dirac function $\delta(\theta,\theta')$.

The estimate that best satisfies this condition is found to be (Isobe *et al.*, 1984) :

$$\hat{D}_{MLM}(f,\theta) = \frac{\kappa}{\sum_{m,n} H_m(f,\theta).G_{mn}^{-1}(f).H_n^*(f,\theta)} \quad (46)$$

In the above expression, $G_{mn}^{-1}(f)$ stands for the elements of the inverse of the cross-spectral matrix and κ is determined from the condition that the integral of the MLM estimate over $[0 ; 2\pi]$ is equal to 1. In the case of a single-point measuring system, the cross-spectral matrix is of dimension 3 and can be inverted analytically, which makes the method very computationally efficient. For the case of a multi-component array, a matrix inversion subroutine has to be run. The MLM method is quite widely used and has proven to have a good level of accuracy in estimating the DSF. Tests on numerical and laboratory data (Benoit and Teisson, 1994) however show that this method usually tends to produce broader directional peaks, compared to the target directional spectra.

III.7.2 Iterative Maximum Likelihood Methods (IMLM1 ; IMLM2)

When considering the MLM estimate, one can notice that it is not consistent with the cross-spectral matrix. This means that the cross-spectra computed from the MLM estimate differ from the cross-spectra computed from the wave signals. Pawka (1983) and then Oltman-Shay and Guza (1984) have thus proposed an iterative refinement of the MLM in order to get a consistent estimate. Two iterative schemes were introduced, corresponding respectively to the versions 1 (IMLM1) and 2 (IMLM2) of the Iterative Maximum Likelihood Method, and both based on the following expression :

$$\hat{D}_{IMLM}^i(f,\theta) = \hat{D}_{IMLM}^{i-1}(f,\theta) + \varepsilon^i(f,\theta) \quad \text{with} \quad \hat{D}_{IMLM}^0(f,\theta) = \hat{D}_{MLM}(f,\theta) \quad (47)$$

$$\text{IMLM1: } \varepsilon^i(f, \theta) = \frac{|\lambda|^{\beta+1}}{\lambda \gamma} \widehat{D}_{\text{IMLM}}^{i-1}(f, \theta) \quad \text{with } \lambda = 1 - \frac{\Delta_{\text{MLM}}^{i-1}(f, \theta)}{\widehat{D}_{\text{MLM}}(f, \theta)} \quad (48)$$

$$\text{IMLM2: } \varepsilon^i(f, \theta) = \frac{|\lambda|^{\beta+1}}{\lambda \gamma} \quad \text{with } \lambda = \widehat{D}_{\text{MLM}}(f, \theta) - \Delta_{\text{MLM}}^{i-1}(f, \theta) \quad (49)$$

In the above expressions, $\Delta_{\text{MLM}}^{i-1}$ stands for the MLM estimate computed from the cross-spectra based on $\widehat{D}_{\text{IMLM}}^{i-1}(f, \theta)$. The parameters β and γ control the convergence of the iterative algorithm. Their standard values are in general of order 1 for β and of order 10 for γ (Oltman-Shay and Guza, 1984). The iterations are stopped after a fixed number of steps or when a convergence criterion is satisfied on $\widehat{D}_{\text{IMLM}}^i(f, \theta)$ (Krogstad *et al.*, 1988).

Tests on numerical and laboratory wave (Benoit, 1992 ; Benoit and Teisson, 1994) show that in most cases the IMLM2 version exhibit more reliable results than the IMLM1 version. In general, 10 to 20 iterations are required to reach a good convergence, which produces a significant increase of the computing time compared to the standard MLM approach. However, the IMLM2 is one of the suitable methods that may be operationally used, as it clearly improves the standard MLM estimate, in particular for single-point measuring devices. It is not very difficult to implement and very stable if an efficient procedure is used for testing the convergence.

III.7.3 Eigenvector methods (EVM ; IEVM1 ; IEVM2) :

This method originally used in acoustic wave detection was applied to directional wave analysis by Mardsen and Juszko (1987) for single-point measuring systems. The theoretical background is similar to the MLM approach, but they introduce the additional assumption that it is possible to split the matrix of cross-spectra \mathbf{M} into noise and signal components :

$$\mathbf{M} = \widehat{\mathbf{S}} + \widehat{\mathbf{N}} \quad (50)$$

where $\widehat{\mathbf{S}}$ is an estimate of the signal component of the cross-spectral matrix and $\widehat{\mathbf{N}}$ is an estimate of the noise component. The partitioning of the noise and signal components is achieved through the diagonalization of the cross-spectral matrix, which allows to find the eigenvalues and eigenvectors of this matrix. The cross-spectral matrix is theoretically Hermitian, definite and positive : all these eigenvalues are thus real and positive. Mardsen and Juszko (1987) proposed that the largest eigenvalue is related to the signal component whereas the two lower ones span the noise component. They furthermore used the fact that the noise component is orthogonal to the signal component. For a multi-component array, the separation of the cross-spectral matrix into signal and noise is more critical. Some indications to apply this method to that type of measuring device may be found in Barrodale *et al.* (1985).

Compared to the MLM, only the noise component of the directional spectrum is minimized, which finally gives an estimate of the form :

$$\widehat{D}_{\text{EVM}}(f, \theta) = \frac{\kappa}{\sum_{m, n} H_m(f, \theta) \cdot \widehat{\mathbf{N}}_{mn}^{-1}(f) \cdot H_n^*(f, \theta)} \quad (51)$$

where κ is determined from the condition that the integral of the DSF over $[0 ; 2\pi]$ is equal to 1. As for the MLM, $\hat{N}_{mn}^{-1}(f)$ stands for the elements of the inverse of the signal component matrix \hat{N} .

Note that if all three eigenvalues were assumed to span the signal, the method would be equivalent to the MLM.

The EVM requires an algorithm to find the eigenvalues and eigenvectors of a complex matrix (dimension 3 for a single-point system) : it is thus less computationally efficient than the MLM (about twice the CPU time on tests performed by Benoit, 1992). This method being more oriented to signal detection than the MLM, the directional peaks of the spectrum are usually more sharp and narrow. Applied to numerical simulated signals, this method usually appears less efficient than the MLM in estimating the target spectrum (Benoit, 1992). In fact, this approach is much more recommended to real measured signals with a significant level of noise in the data. Comparisons performed by Mardsen and Juszko (1987) confirm in comparison to other methods that the reliability of the EVM estimates decreases as the noise level on numerical simulated data decreases.

As for the MLM method, the EVM estimate is not consistent with the cross-spectral matrix. It is thus possible to set up the same iterative procedure as presented for the MLM in the previous section. We thus obtain two Iterative EigenVector Methods, termed IEVM1 and IEVM2 respectively, based on the schemes introduced for the MLM (Mardsen and Juszko, 1987).

III.8 Long-Hasselmann Method (LHM)

This method was proposed by Long and Hasselmann (1979) and Long (1980). It is based on an inverse technique, applicable to the problem of fitting a model to some data, representing integral properties of the function to be estimated. An initial simple estimate (e.g. a uniform DSF, a Fourier series decomposition estimate TFS or WFS, a unimodal fitted parametrical model) is iteratively modified to minimize a "nastiness" function that takes into account the various conditions on the spreading function, namely the equations given by the cross-spectra, the condition of unit integral of the DSF, the fact that the DSF should remain positive).

This method also takes into account the statistical variability of the cross-spectral estimates. The « optimal » estimate is the one which minimizes the nastiness function.

For a single-point system, this estimate finally takes the following general form :

$$\hat{D}_{LHM}(\theta) = \Delta \cdot \text{MAX} \left[0 ; \tilde{D}(\theta) + \mu_1 + \mu_2 \cos \theta + \mu_3 \sin \theta + \mu_4 \cos 2\theta + \mu_5 \sin 2\theta \right] \quad (52)$$

where $\tilde{D}(\theta)$ is the initial estimate and μ_j ($j=1, \dots, 5$) are model coefficients determined by an iterative algorithm, in order to satisfy (in statistical sense) the various constraints mentioned above. The application of this method to buoy data is described in detail by Long (1980).

This method usually produces reliable results for the DSF, although it was observed both on numerical and laboratory tests (Benoit, 1992 ; Benoit and Teisson, 1994) that the peaks of the estimate are often somewhat broader and lower compared to the target peaks. This method is thus not very suitable to analyse sharp and thin directional peaks, unless the initial estimate is already able to do so. Furthermore, at least for single-point

systems, the interpretation of the results of this method may be delicate due to the MAX operator in (52). Due to its truncated Fourier series-like expression, LHM estimate may have some lobes whose negative portions will be truncated by the MAX operator. The remaining positive part of these lobes may be interpreted as secondary directional peaks in the DSF, whereas they are sometimes just spurious peaks produced by the method. Finally, the method is quite difficult to implement and rather time consuming, so that it is in fact not very widely used for operational analysis.

III.9 Maximum Entropy Methods (MEM1 ; MEM2)

The Maximum Entropy Methods have been adapted from the theory of probability to directional wave analysis due to the similarities between a DSF and a probability density function (PDF). Indeed, both a DSF and a PDF are positive functions, whose integral is equal to 1. In fact, a DSF may be seen as the PDF of the wave energy over the directions of propagation.

The principle of these methods is to define an « entropy » function, which has to be maximized under the various constraints given by the cross-spectra equations. Two such methods have been proposed depending on the definition used for the entropy.

III.9.1 Maximum Entropy Method - Version 1 (MEM1) :

The first definition for the entropy was proposed by Barnard (1969), and then adapted to single-point systems by Lygre and Krogstad (1986). This approach is more specifically used in spectral analysis. Some authors suggest to rather speak of « change in entropy » (Nwogu *et al.*, 1987).

The entropy H_1 is defined by :

$$H_1(\hat{D}) = - \int_0^{2\pi} \ln(\hat{D}(\theta)) d\theta \quad (53)$$

The basic idea of MEM1 is to search a estimate that maximizes the entropy H_1 and whose two first harmonics of the Fourier series decomposition are identical to the ones of the TFS estimates (i.e. obtained from the measured co- and quad-spectra). Lygre and Krogstad (1986) established that the estimate satisfying these conditions has the following form :

$$\hat{D}_{MEM1}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1 - F_1 c_1^* - F_2 c_2^*}{|1 - F_1 (\cos \theta - i \sin \theta) - F_2 (\cos 2\theta - i \sin 2\theta)|^2} \quad (54)$$

where F_1 and F_2 are complex numbers, obtained from the complex Fourier coefficients c_1 and c_2 of the DSF ($c_1 = a_1 + i b_1$ and $c_2 = a_2 + i b_2$):

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{(c_1 - c_2 c_1^*)}{1 - |c_1|^2} \\ F_2 &= c_2 - c_1 F_1 \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

The main advantage of this method lies in its high computational efficiency. In addition, the MEM1 estimate is always consistent with the cross-spectral data.

But this estimate also presents a quite important drawback in the fact that it consistently overpredicts the height of the directional peaks. Furthermore, it sometimes produces double peaks on unimodal cases (Benoit, 1992 ; Kim *et al.*, 1993 ; Brissette and Tsanis, 1994). This latter shortcoming was also noted by the authors of the method both on numerical test-cases and field observations (Lygre and Krogstad, 1986). This constitutes a quite severe limitation of the approach, because in the presence of an estimate with two peaks, one can not systematically conclude to a bimodal sea-state. Due to this, it is not advised to use only that method for wave analysis, but rather to run it with other methods in a comparative evaluation exercise.

III.9.2 MEM2 or Maximum Entropy Principle (MEP) :

This approach is based on the Shannon definition for the entropy, which is more specifically used in probability theory. It has been applied to directional wave analysis by Kobune and Hashimoto (1986) and Nwogu *et al.* (1987) for single-point systems, and extended to wave probe arrays by Nwogu (1989). In scientific literature, this method is called MEM2 or MEP (for « Maximum Entropy Principle »). The entropy H_2 we try to maximize is defined by :

$$H_2(\hat{D}) = - \int_0^{2\pi} \hat{D}(\theta) \ln(\hat{D}(\theta)) d\theta \quad (56)$$

The constraints to be satisfied are (as for the MEM1 method) the values of the first four Fourier coefficients of the DSF determined from the-cross spectral data, together with the condition of unit integral of the DSF over $[0 ; 2\pi]$.

It may be shown (e.g. Kobune and Hashimoto, 1986) that the estimate satisfying these conditions has the following form :

$$\hat{D}_{MEM2}(\theta) = \exp \left\{ \sum_{I=1}^{L+1} \mu_I \cdot q_I(\theta) \right\} \quad (57)$$

where the $q_I(\theta)$ functions are defined on (16). The important point is that these functions are some combinations of sin and cosine functions of θ . The μ_I ($I=1, \dots, L+1$) coefficients are unknown Lagrange multipliers. L is the number of independent and non-zero real cross-spectral quantities from the system of N sensors. The μ_I coefficients are determined by solving the non-linear system of equations given by the L cross-spectral equations and the condition of unit integral of the estimate.

In the case on single-point measuring systems, we have $N=3$ and $L=4$ (see section III.4), thus 5 equations and the estimate (57) takes the following form, suitable to model both unimodal and bimodal DSF :

$$\hat{D}_{MEM2}(\theta) = \exp (-\mu_1 - \mu_2 \cos \theta - \mu_3 \sin \theta - \mu_4 \cos 2\theta - \mu_5 \sin 2\theta) \quad (58)$$

For wave arrays consisting of more than 3 probes, it is possible to increase the number of harmonics in the Fourier series appearing in (57). Nwogu (1989) introduced a method to find the most suitable order of this decomposition. The numerical procedure then used for solving the system of non-linear equations may be based on classical techniques, e.g. Newton-Raphson or Levenberg-Marquardt.

The MEP or MEM2 estimate appears to be very suitable in most of cases. From its definition (57), it is clear that it is always positive. Tests on numerical or laboratory

tests have proven that this method is equally efficient for dealing with unimodal or bimodal sea-states (Nwogu *et al.*, 1987 ; Nwogu, 1989 ; Benoit, 1992 ; Kim *et al.* , 1993 ; Benoit and Teisson, 1994).

The method is however not simple to implement (especially for wave probe arrays) and requires more computing time than most of methods presented above (e.g. WFS, 1MFG, MLM, IMLM) due to the iterative algorithm needed for solving the set of non-linear equations. Recently, Kim *et al.* (1994) proposed some approximations to the numerical scheme of the MEM2 method, in order to remove occasional convergence problems that may occur with real sea data.

Although the numerical effort associated with MEM2 is quite important, this method is very recommended if one wishes to get a precise and reliable directional analysis. In particular, several authors suggest that it is probably the most powerful and reliable technique for estimating the DSF when using single-point measuring systems (Nwogu *et al.*, 1987 ; Benoit, 1992 ; Kim *et al.* , 1993, 1994 ; Benoit and Teisson, 1994).

III.9.3 Extended Maximum Entropy Principle (EMEP) :

Recently, Hashimoto *et al.* (1994) developed the Extended Maximum Entropy Principle (EMEP), which represents an improvement to the MEP for the general case of a multi-component array, but is equivalent to the MEP for single-point measuring systems (delivering 3 wave signals).

Based on the MEP estimate (57), the following expression is adopted for the EMEP estimate, which again yields only positive values :

$$\widehat{D}_{EMEP}(f, \theta) = \frac{1}{\Delta} \exp \left\{ \sum_{k=1}^K [A_k \cdot \cos(k \cdot \theta) + B_k \cdot \sin(k \cdot \theta)] \right\} \quad (59)$$

$$\text{with : } \Delta = \int_0^{2\pi} \exp \left\{ \sum_{k=1}^K [A_k \cdot \cos(k \cdot \theta) + B_k \cdot \sin(k \cdot \theta)] \right\} d\theta$$

In (59) the coefficients A_k and B_k ($k = 1, \dots, K$) are unknown parameters. If we note L the number of co- and quad spectra both different from zero and independent from each other, we get L independent equations of the problem. Each equation corresponds to the difference between the measured co- or quad-spectrum and the model co- or quad-spectrum, obtained by substitution of (59) in the general expression of the cross-spectra (12) or (16).

In fact, Hashimoto *et al.* (1994) do not impose this difference to be zero, but consider the possible existence of errors in the cross-spectral data and note ε_l ($l=1, \dots, L$) this difference. The ε_l residuals are assumed to be independent of each other and the probability of their occurrence is expressed by a normal distribution having zero mean and a variance σ^2 given by the cross-spectral estimates (see Hashimoto *et al.* (1994) for details). The optimal estimate is then the one which minimizes the sum of the squares of the residuals :

$$\sum_{l=1}^L \varepsilon_l^2 \rightarrow 0 \quad (60)$$

This leads to a non-linear problem which may be solved by applying Newton's technique of local linearization and iterations (Hashimoto *et al.*, 1994). The determination of the optimal finite order K of the model (59) requires the use of Akaike's Information Criterion (AIC) (Akaike, 1973) :

$$\text{AIC} = L (\ln(2\pi) + 1 + \ln(\hat{\sigma}^2)) + 4K + 2 \quad (61)$$

where $\hat{\sigma}^2$ is an estimate of the variance of ε_l ($l=1, \dots, L$). In practice, the computation is performed from lower ($K=1$) to higher orders, in order to stop at the order minimizing the AIC.

This method is superior to the MEP in the sense that the number of harmonics in the estimate (59) is directly adapted to the available cross-spectral information. Another advantage of this method lies in the fact that statistical variability in the measured cross-spectra is accounted for in the analysis. Hashimoto *et al.* (1994) showed on numerical test-cases that this estimate gives the same results as the MEP method for single-point systems. For multi-component measuring devices, the EMEP gives results comparable to the Bayesian Directional Method (see III.10).

III.10 Bayesian Directional Method (BDM)

This method is based on the Bayesian technique used in probability theory. It has been adapted to the problem of directional wave analysis by Hashimoto *et al.* (1987). Among the methods presented in this chapter, it is probably the most awkward to implement for numerical analysis, but also the most powerful in terms on resolving capabilities as no *a priori* assumption is made about the shape of the DSF.

The range $[0 ; 2\pi]$ is divided in a number of K sub-ranges or segments, each having a width of $\Delta\theta = 2\pi/K$. The BDM estimate of the DSF is simply considered as a piecewise-constant function over each segment. It is defined by a series of K values x_k (each value corresponding to the logarithm of the constant value of the BDM estimate on each segment) :

$$x_k = \ln [\hat{D}_{\text{BDM}}(\theta_k)] \quad \text{where} \quad \theta_k = (k-1/2)\Delta\theta \quad (62)$$

$$\hat{D}_{\text{BDM}}(\theta) = \sum_{k=1}^K \exp(x_k) \cdot I_k(\theta) \quad \text{with} \quad I_k(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } (k-1)\Delta\theta \leq \theta \leq k\Delta\theta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (63)$$

K is usually in the order of 40 to 90, which means a rather high number of unknowns, in particular with respect to the number of available equations, given by the expressions of the co- and quad-spectra. Furthermore possible errors in the estimated cross-spectra are taken into account, so that these equations are assumed to be verified in a statistical sense. This method clearly presents a stochastic feature in dealing with the cross-spectral data.

The system of non-linear equations given by the co- and quad-spectra is completed by a smoothness condition of the estimated DSF. This is mathematically expressed by the following relationship between three consecutive values of the estimate :

$$\sum_{k=1}^K (x_{k+1} - 2x_k + x_{k-1})^2 \rightarrow 0 \quad (64)$$

An hyperparameter u is introduced in order to combine the above smoothness condition and the equations giving the cross-spectra. The value of this hyperparameter is determined as the one which minimizes the ABIC criterion (Akaike Bayesian Information Criterion) (Akaike, 1973).

Due to its large number of degrees of freedom, the BDM is able to represent almost all kinds of DSF shapes : unimodal, bimodal and even trimodal, symmetrical peaks or not,... This method is more specifically devoted to multi-component arrays, for which the number of available cross-spectra is quite large. Benoit (1992) and Benoit and Teisson (1994) have however shown that the method still produce correct results when applied to single-point systems (application to numerical and laboratory simulated data). For single-point systems however, the BDM requires quite a lot of computing time for a result whose accuracy is usually comparable to those of more rapid analysis methods (e.g. MEM2). The BDM is therefore not advised for such single-point systems. For multi-component arrays, it is usually considered as one of the most powerful techniques to analyse any kind of spectra.

IV DETERMINISTIC ANALYSIS METHODS

IV.1 Characterization of deterministic analysis methods :

While stochastic methods presented in chapter III rely on the random phase assumption, the deterministic methods retain the phase information inherent in the data set to be analysed. As opposed to the stochastic approaches, methods for deterministic analysis of directional waves are sparse.

While the stochastic methods rely on the cross-spectra between the different measured quantities, most deterministic methods utilize the complex Fourier coefficients of each signal. The process of splitting a wave field into a number of wave components each given by a direction, an amplitude and a phase is often referred to as deterministic decomposition. The surface elevation may then be seen as a superposition of numerous sine components, in a generalized form of (2) :

$$\eta(x,y,t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \cos[k_m(x.\cos\theta_n + y.\sin\theta_n) - \omega_m t + \phi_{mn}] \quad (65)$$

where subscript m refers to frequency bins and subscript n to directional bins. The deterministic analysis approach assumes a large number M of frequencies, but a low number N (i.e. $N = 1$ or 2) of directions per frequency, so that both the amplitude a_{mn} and the phase ϕ_{mn} of each component may be determined from the Fourier coefficients of the recorded time-series. Smoothing the decomposition data can then provide an estimate of the underlying directional spectrum.

Another application of the decomposition data (which will not be pursued here) is the deterministic reproduction of a wave field, also by starting from an expression like (65). It deserves to be mentioned that a wave field constructed using a discrete set of frequencies is not spatially homogeneous if more than one wave component appears at each frequency. Spatial variation is typically present near reflecting structures, while the wave field in open waters is homogeneous.

IV.2 General approaches for deterministic analysis :

Presumably the first deterministic method for directional spectral analysis is the work by Panicker and Borgman (1970, 1974), who derived the so-called "locked phase method". Their work resembles the early stochastic models in using a Fourier expansion of the directional distribution at each frequency. In this respect it differs from the following approaches, which assume a few discrete directional components at each frequency. According to Sand (1979), it seems probable that the "locked phase" method was never used in practice, and we are not aware of any applications of the method since then. The reason for this is unknown, but it appears that the poor resolution inherent in the directional Fourier expansion makes it less attractive than more recent methods.

The locked phase method was derived for wave elevation gauge arrays (Panicker and Borgman, 1970) as well as for measurements of more general wave properties (Panicker and Borgman, 1974). The remainder of deterministic methods all basically assume that the sea-state can be approximated by a sum of a few unidirectional wave components at each "raw" frequency. When smoothing is applied to reduce the variance of the spectral density then a large number of components representing a directional distribution are typically present within each frequency bin. Except for the work by Prislín *et al.* (1996), the remainder of the deterministic approaches were confined to single-point measurements (e.g. the surface elevation and components of particle velocity measured at the same vertical.)

A common feature of the work by Sand (1979, 1984) and Lundgren and Klinting (1987a, 1987b) is that each set of complex Fourier coefficients were used in determining two components.

$$\text{Let : } C_u = A_u - i B_u \text{ and } C_v = A_v - i B_v \quad (66)$$

denote the complex Fourier coefficients resulting from the respective Fourier transforms of two orthogonal velocity time series measurements, then the vector (A_u, A_v) determines the direction of one component and (B_u, B_v) determines the direction of the other. It turns out that this approach has the undesirable property that the two directions depend on the phase of the underlying signals, except in case the two directions coincide. In other words, changing the origin of the time axis yields another set of directions. This makes the approach physically unsound. However, reasonable results have been obtained using this concept and one may conjecture that the problem is reduced in the subsequent smoothing process, although this is not clear.

IV.3 Single and Double Direction Analysis (SDA ; DDA) :

Schäffer and Hyllested (1994) devised two different methods for deterministic decomposition, assuming one and two components per frequency, respectively [$N = 1$ or 2 in (65)]. The corresponding directional wave analysis were termed Single Direction Analysis (SDA) and Double Direction Analysis (DDA), respectively. The first method was basically to find the principal direction from complex Fourier coefficients of the velocity components and assign this direction to a wave component with amplitude and phase taken from the Fourier coefficient for the surface elevation. The directional spectrum was then obtained by smoothing the raw decomposition data in direction as well as in frequency. The second method resembled the approach by e.g. Sand (1979) in the assumption of two components at each frequency. However, these components were found by determining the directions and complex amplitudes of two crossing wave

trains requiring their superposition to match the complex Fourier coefficients from the measurements of surface elevation and horizontal velocity components. The solution was found analytically and situations where no solution was possible were identified. As in the SDA the raw decomposition data were smoothed to obtain the directional spectrum. The energy at frequencies where no solution could be obtained was discarded (approximately 5-10 % in practical applications). Although the SDA and DDA methods are fundamentally different from stochastic methods, they usually produce results which are very similar to those of e.g. MEM2 method (Hawkes *et al.*, 1997).

IV.4 Other deterministic work

Recently Prislin *et al.* (1996) introduced a hybrid between a deterministic and a stochastic method in a framework allowing for mixed instrumentation. Their idea is to use a stochastic method for determination of the directional distribution at each frequency followed by a deterministic fit to the data to regain the lost phase information. Specifically they used the Maximum Likelihood Method (Isobe *et al.*, 1984) to obtain the directional distribution and then chose a few wave components to distend this distribution at each frequency. In the time domain a subsequent least squares fitting to the measured data then provided the phases for the components chosen. Despite the problem of inhomogeneous wave fields encountered when more than one component is present at each frequency, the use of several components may be attractive for an accurate description of the local wave field. However, the approach of starting with a stochastic method requires spectral smoothing which implies comparatively large frequency bins. Although several wave components are allowed at each frequency in this approach, the total number of wave components for all frequencies may be smaller than e.g. using just one component per frequency in raw decomposition data with a very fine frequency resolution.

The work of Prislin *et al.* (1996) does not really represent a new technique for estimating directional spectra, but rather a way of using the directional information to deterministically describe the local wave field.

V. TIME DOMAIN ANALYSIS METHODS

Time-domain analysis methods are quite sparse in operational applications. We only report below some general ideas about this approach of analysis, as these methods were not used within the IAHR Working Group on multidirectional waves. A first way of presenting this approach is to consider the distribution of kinetic and potential wave energy at each time-step for a single-point measuring system composed of a surface elevation probe (signal η) and a bi-dimensional current-meter (signals U and V) :

Distribution of kinetic energy : The kinetic energy $E = U^2 + V^2$ and the angle of wave energy propagation are computed, allowing for finding the distribution of kinetic energy against direction.

Distribution of potential energy : The potential energy is computed from η^2 . By using the wave direction determined above, it is also possible to get a plot of the distribution of potential energy against direction.

These basic remarks represent the starting point of more sophisticated approaches, such as the Instantaneous Direction Spreading Function by Egozcue and Arribas (1991).

VI. CONCLUSIONS - MAIN DEVELOPMENT AXIS

In this paper, we made an attempt to review, present and, to a certain extent, classify a large number of directional analysis methods for linear waves in open water conditions. The exercise is quite difficult because we did not consider all the methods presented in the scientific literature, nor perform any comprehensive comparison of the methods on common test-cases. We rather focused on the main modelling assumptions associated to each method in order to highlight their advantages/shortcomings.

According to the authors, the main points that deserve to be mentioned are :

- * one should not think that all the methods have similar capabilities. When looking at a plot of an analysed directional spectrum, one should keep in mind which method was used for the analysis. This may to a certain extent have some influence on the conclusions from the analysis. For instance, one should not conclude that there is no case of crossed waves at the same frequency if the method used is unable to detect such case (e.g. fitting to unimodal model method).
- * Some of the methods have a high level of parameterization (e.g. the Fourier Series decomposition methods or the fitting to unimodal parametrical models) while other ones are able to model a large variety of directional shapes (e.g. EMEP, BDM, DDA).
- * The methods are not equivalent in terms of implementation and computing time. Benoit (1992) shows that there is a ratio of almost 10 000 between the quickest and the lowest methods for a heave-pitch-roll buoy.
- * It seems important to preferably use methods that try to fit to the data in a statistical sense (MLF, EMEP, BDM) than in a deterministic way (TFS, WFS, 1MF) even if the distinction between both approaches is not always easy.
- * The method to preferably use also depends on the type of measuring device and in particular of the number of wave signals. For a single-point system, reliable choices for analysis methods are MLM, IMLM2, MEM2 (or MEP), SDA, DDA among others. For wave probe arrays, more sophisticated methods may be used : EMEP, BDM, among others.

Some research axis, not discussed in detail in this paper, concern :

- Analysis of reflection :

In the vicinity of a reflective structure, the wave field results from the superposition of incident and reflected wave components. These components are phase-locked and this phase relationship is in contradiction with the "random phase" assumption the stochastic methods of Chapter III are based on. Special refinements are then introduced : e.g. the Modified Maximum Likelihood Method (MMLM), proposed by Isobe and Kondo (1984) or the Modified Likelihood Fitting Method (MMLFM) from Yokoki *et al.* (1994). It should be noted that the Double Decomposition Analysis (DDA) is applicable to this case as it permits two directions per frequency. However, for a linear structure, a constraint based on Green law of reflection (DDAC) can further improve the results of DDA.

- Analysis of non-linear waves, with in particular :

- the analysis of second-order (superharmonic) spectrum (e.g. Sekimoto, 1995)
- the analysis of the second-order long wave spectrum (e.g. Sand, 1981).

All these items are enough to show that the analysis of multidirectional waves still need to receive a lot of work and attention.

VII. REFERENCES

- AKAIKE H. (1973) : Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *2nd Int. Symp. on Information Theory. Petrov and Csaki Eds. Akademiai Kiado, Budapest, pp 267-281.*
- BARNARD T.E. (1969) : Analytical studies of techniques for the computation of high-resolution wavenumber spectra, *Texas Instr. Advanced Array Research Spec. Rep. N°9.*
- BARRODALE I., GREENING M., ZALA C. (1985) : An indepth study of the eigenvector method for high-resolution beamforming, *Defence Research Establishment Pacific-Contractors Report 85-7, 65 pp.*
- BENOIT M. (1992) : Practical comparative performance survey of methods used for estimating directional wave spectra from heave-pitch-roll data. *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 62-75, Venice (Italy).*
- BENOIT M. (1993) : Extensive comparison of directional wave analysis methods from gauge array data. *Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (ASCE), pp 740-754, New-Orleans (USA).*
- BENOIT M., TEISSON C. (1994) : Laboratory comparison of directional wave measurement systems and analysis techniques. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 42-56, Kobe (Japan).*
- BORGMAN L.E. (1969) : Estimation of wave directional spectra from pitch-roll buoy data. *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol 120, N°1, pp 93-115.*
- BRIGGS M.J. (1984) : Calculation of directional wave spectra by the Maximum Entropy Method of spectral analysis. *Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Eng., Paper 33, pp 484-500, ASCE, New York*
- BRISSETTE F.P., TSANIS I.K. (1994) : Directional spectra models for design use. *Offshore Technology Conf., Houston, Texas.*
- CAPON J., GREENFIELD R.J., KOLKER R.J. (1967) : Multidimensional maximum-likelihood processing of a large aperture seismic array. *Proc. IEEE, Vol 55, 1pp 92-211.*
- EGOZCUE J.J., ARRIBAS M.A. (1991) : Directional description of ocean waves by the instantaneous direction spreading function. *Proc. Computer Modelling in Ocean Eng., Arcilla et al. Eds, Balkema, Rotterdam (The Netherlands).*
- HASHIMOTO N., KOBUNE K., KAMEYAMA Y. (1987) : Estimation of directional spectrum using the Bayesian approach and its application to field data analysis. *Rep. of Port and Harbour Research Inst., vol 26.*
- HASHIMOTO N., NAGAI T., ASAI T. (1994) : Extension of Maximum Entropy Principle Method for directional wave spectrum estimation. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 232-246, Kobe (Japan).*
- HASHIMOTO N. (1997) : Analysis of the directional wave spectrum from fiel data. *Advances in Coastal and Ocean Eng., Vol 3, Ed. P. L.F. Liu (Cornell Univ.), 288 pp.*
- HAWKES P.J. et al. (1997) : Comparative analyses of multidirectional wave basin data. *Proc. IAHR Seminar « Multidirectional waves and their interaction with structures », San-Francisco (USA), 10-15 August 1997 (This seminar).*
- HORIKAWA K. (1988) : Nearshore dynamics and coastal processes. Theory, measurement and predictive models - Part V - Chapter 3 (Measurement of wave direction). *Univ. of Tokyo Press, 522 p.*

- ISOBE M., KONDO K., HORIKAWA K. (1984) : Extension of MLM for estimating directional wave spectrum. *Proc. Symp. on Description and Modelling of Directional Seas., Lyngby (Denmark).*
- ISOBE M., KONDO K. (1984) : Method for estimating directional wave spectrum in incident and reflected wave field. *Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Eng., pp 467-483*
- ISOBE M. (1990) : Estimation of directional spectrum expressed in standard form. *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 647-660, Delft (The Netherlands).*
- JACKSON F.C., WALTON W.T., BAKER P.L. (1985) : Aircraft and Satellite Measurement of Ocean Wave Directional Spectra Using Scanning Beam Microwave Radar. *J. Geophys. Res., vol 90, N° C1, pp 987-1004*
- JENKINS G.M., WATTS D.G. (1968) : *Spectral analysis and its applications*, Holden Day, 525 pp
- KIM T., LIN L., WANG H. (1993) : Comparisons of directional wave analysis methods. *Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (ASCE), pp 554-568, New-Orleans (USA).*
- KIM T., LIN L., WANG H. (1994) : Application of the maximum entropy method to the real sea data. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 340-355, Kobe (Japan).*
- KOBUNE K., HASHIMOTO N. (1986) : Estimation of directional spectra from the maximum entropy principle. *Proc. 5th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp., Tokyo (Japan), vol I, pp 80-85.*
- KROGSTAD H.E. (1988): Maximum likelihood estimation of ocean wave spectra from general arrays of wave gauges. *Modelling, Identification and Control, vol 9, pp 81-97*
- KROGSTAD H.E., GORDON R.L., MILLER M.C. (1988) : High-resolution directional wave spectra from horizontally mounted acoustic Doppler current meters. *J. of Atmos. and Oceanic Techn., Vol 5, pp 340-352.*
- LONG R. B., HASSELMANN K. (1979) : A variational technique for extracting directional spectra from multicomponent wave data. *J. Phys. Oceanogr., Vol 9, pp 373-381.*
- LONG R. B. (1980) : The statistical evaluation of directional spectrum estimates derived from pitch/roll buoy data. *J. Phys. Oceanogr., Vol 10, pp 944-952.*
- LONGUET-HIGGINS M.S., CARTWRIGHT D.E., SMITH N.D. (1963) : Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. *Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, pp 111-136.*
- LUNDGREN H., KLINTING P. (1987a) : Rigorous analysis of directional waves. *Proc. IAHR Seminar : "Wave analysis and generation in laboratory basins", pp 351-362.*
- LUNDGREN H., KLINTING P. (1987b). Wave directionality: The elliptic distribution (the fourier vector method). *Proc. 6th Int. Offshore Mech. & Arctic Engrg. (OMAE) Symp., Vol II, 231-238.*
- LYGRE A., KROGSTAD H.E. (1986) : Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra. *J. Phys. Oceanogr., Vol 16, pp 2052-2060.*
- MARDSEN R.F., JUSZKO B.A. (1987) : An eigenvector method for the calculation of directional spectra from heave, pitch and roll buoy data. *J. Phys. Oceanogr., Vol 17, pp 2157-2167.*

- MITSUYASU H., TASAI F., SUHARA T., MIZUNO S., OHKUSO M., HONDA T., RIKISHI K. (1975) : Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol 5, N°2, pp 750-760.
- NWOGU O.U., MANSARD E.P.D., MILES M.D., ISAACSON M. (1987) : Estimation of directional wave spectra by the maximum entropy method. *Proceedings of 17th IAHR Seminar - Lausanne (Switzerland)*.
- NWOGU O.U. (1989) : Maximum entropy estimation of directional wave spectra from an array of wave probes. *Applied Ocean Research*, Vol 11, N°4, pp 176-193.
- OLTMAN-SHAY J., GUZA R.T. (1984) : A data-adaptative ocean wave directional-spectrum estimator for pitch-roll type measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol 14, pp 1800-1810
- PANICKER N.N, BORGMAN L.E. (1970) : Directional spectra from wavegage arrays. *Proc. 12th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, pp 117-136, Washington, D.C (USA).
- PANICKER N.N, BORGMAN L.E. (1974) : Enhancement of directional wave spectrum estimates. *Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE)*, pp 258-279, Copenhagen (Denmark).
- PAWKA S.S. (1983) : Island shadows in wave directional spectra. *J. Phys. Res.*, Vol 88, pp 2579-2591
- PRISLIN I., ZHANG J., JOHNSON P. (1996) : Deterministic decomposition of irregular short-crested surface gravity waves. *Proc. 6th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf.*, Vol III, pp 57-64.
- SAND S.E. (1979) : Three-dimensional deterministic structure of ocean waves. *Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Eng., Tech. Univ. of Denmark, PhD Thesis, Series Paper 24*, 189 pp.
- SAND S.E. (1981) : Short and long wave directional spectra. *Proc. Directional wave spectra applications. Univ of California, Berkeley (USA). 14-16 September 1981*.
- SAND S.E. (1984) : Deterministic decomposition of pitch-and-roll buoy measurements. *Coastal Eng.*, Vol 8, N°3, pp 243-263.
- SCHAFFER H.A., HYLLESTED P. (1994) : Analysis of multidirectional waves using deterministic decomposition. *Proc. Int. Symp. « Waves - Physical and numerical modelling », Vancouver B.C. (Canada)*.
- SEKIMOTO T. (1995) : Nonlinear effect on the estimation of directional wave spectrum. *Proc. Symp. Wave generation, analysis and related problems in experimental tanks. Yokohama Nat. Univ.*, pp 44-59.
- VAN HETEREN J. (1983) : Estimation of multi-modal directional wave spectra from tri-orthogonal measurements. *Coastal Eng.*, Vol 7, pp 205-231.
- YOKOKI H., ISOBE M., WATANABE A. (1994) : On a method for estimating reflection coefficient in short-crested random seas. (ASCE) - *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp 719-730

ANNEXE 3

Auteurs : **Michel BENOIT**, Frédéric MARCOS*, Françoise BECQ**

* EDF R&D LNHE (Chatou)

** Etudiante en thèse, EDF R&D LNHE et Université du Sud Toulon Var

Titre : Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing.

Année : 1996.

Source : Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'1996), 2-6 Septembre 1996, Orlando (Floride, USA), pp 465-478.

DEVELOPMENT OF A THIRD GENERATION SHALLOW-WATER WAVE MODEL WITH UNSTRUCTURED SPATIAL MESHING

Michel BENOIT¹, Frédéric MARCOS¹, Françoise BECQ²

Abstract

A numerical third-generation wave model dedicated both to deep water and near-shore applications is presented and applied to several test-cases to highlight its capabilities. Among its main features, this model uses a finite-elements technique for the discretization of the modelled area, which makes it suitable to represent complex bottom topographies and irregular shorelines. Furthermore, the piece-wise ray method used for wave propagation allows to use rather large time-steps, which in turn allows to keep the computational time at a very moderate level. The implementation of shallow-water physics in the model is also described, in particular with respect to depth-induced breaking. Several applications of the model are presented and compared to field or laboratory data for their validation. Finally, the main research and development items are mentioned and discussed.

1. INTRODUCTION

Although originally developed for deep water applications and meteorological purpose (e.g. WAMDI Group, 1988), spectral "phase-averaged" wave models are presently being extended towards the near-shore and coastal domains. This extension implies first to improve the physics of the numerical models so that they become able to reproduce shallow-water effects. Several efforts have already been attempted in this way by developing numerical formulations for bottom friction, depth-induced breaking and non-linear interactions between triplets of waves (the so-called "triad-interactions") (e.g. Ris *et al.*, 1994 ; Van Vledder *et al.*, 1994).

A second point to consider is the ability of the model to deal with the complex bottom topography of coastal and near-shore areas. Compared to oceanic applications, these shallow-water domains usually need a finer spatial discretization to properly represent bathymetric gradients and irregular shorelines. This requires a number of properties from the numerics of the wave model (discretization techniques, integration schemes) which are usually not encountered in present third-generation wave models. For instance, if one wishes to apply the WAM model to local areas, the size of the finite-difference spatial grid has to be decreased over the whole domain, which highly increases the number of computational points and

¹ Research Engineer — Maritime Group

² PhD Student — Maritime Group

EDF - Laboratoire National d'Hydraulique, 6, quai Watier 78400 CHATOU, FRANCE

often leads to use nested grids. Furthermore, the explicit scheme for wave propagation in WAM will then imply a strong decrease of the time-step in order to ensure that the Courant Number remains lower than 1. This, in turn, will cause a significant increase of the computational time, so that the computation will likely become unrealistic at an operational stage.

This paper deals with the development of a third generation spectral wave code applicable to deep water oceans, but also dedicated to shallow-water domains. This model, named TOMAWAC (which stands for "TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation"), is included in the TELEMAC modelling package developed by LNH, which contains numerous finite elements modules covering a wide range of maritime hydrodynamics applications.

The TOMAWAC model is presented in Section 2. Special attention to the implementation and validation of depth-induced breaking is paid in Section 3. Section 4 presents the application of the model on a test-case of waves propagating on a current whirl. In Section 5, the model is applied to the simulation of an actual storm in the North-eastern part of the Atlantic Ocean and in the Channel. Finally, present and future research items are presented and discussed in Section 6.

2. PRESENTATION OF TOMAWAC WAVE MODEL

2.1 Main modelling equations of TOMAWAC

TOMAWAC solves the wave action conservation equation (or wave action balance equation) in spherical or Cartesian co-ordinates for infinite or finite water depth. The wave action density N is defined as the ratio of directional variance density F to relative (or intrinsic) angular frequency σ : $N = F / \sigma$.

The directional variance density $F(f, \theta)$ corresponds to the "classical" directional spectrum of waves and models the way the wave energy (or variance) spreads over frequency f and direction θ .

In the presence of a current field \vec{U} , the action density is conserved (Bretherton and Garret, 1968). This leads to the following equation for the variance density $\tilde{F}(x, y, f_r, \theta, t)$, expressed in TOMAWAC as a function of time t , spatial Cartesian co-ordinates x and y , direction of propagation θ and relative frequency f_r :

$$\frac{\partial(B \cdot \tilde{F})}{\partial t} + C_x \frac{\partial(B \cdot \tilde{F})}{\partial x} + C_y \frac{\partial(B \cdot \tilde{F})}{\partial y} + C_\theta \frac{\partial(B \cdot \tilde{F})}{\partial \theta} + C_{fr} \frac{\partial(B \cdot \tilde{F})}{\partial f_r} = B \cdot Q \quad (1)$$

$$\text{with : } F(f, \theta) = \frac{C_g}{C_g + \vec{U} \cdot \vec{k} / k} \tilde{F}(f_r, \theta)$$

The absolute angular frequency $\omega = 2\pi \cdot f$ (as observed in a fixed frame of reference) is related to the relative angular frequency $\sigma = 2\pi \cdot f_r$ (as observed in a frame moving with the speed \vec{U}) by the Doppler equation : $\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U}$, where k is the wave-number vector, as given by the dispersion relation for linear waves as a function of water depth d : $\sigma^2 = g k \tanh(k \cdot d)$

The transfer rates in space, direction and relative frequency are computed according to the linear wave theory :

$$\begin{aligned} C_x &= C_g \cdot \sin \theta + U_x & C_\theta &= -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \vec{n}} - \frac{\vec{k}}{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{n}} \\ C_y &= C_g \cdot \cos \theta + U_y & C_{fr} &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} d \right) - C_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{s}} \right) \end{aligned}$$

\vec{n} is the direction perpendicular to wave propagation direction and \vec{s} corresponds to the direction of propagation (given by θ). The coefficient B results from the fact that the conservation equation must be basically written for the action density expressed as a function of wave number : $B = C.C_g / (2\pi \sigma^2)$.

$C = \sigma / k$ and $C_g = \partial \sigma / \partial k$ are the phase and group speeds respectively.

The TOMAWAC model is unsteady (variable wind forcing conditions usually given by the wind-speed 10 m above the sea surface), but the current field \vec{U} is assumed to be steady in version 1.2 of the code, as well as the water depth.

2.2 Modelisation of source and sink terms in TOMAWAC

In the Q term at the right-hand side of the balance equation (1), TOMAWAC 1.2 operationally includes the following physical processes : generation by wind (Q_{in}), dissipation by white-capping (Q_{wc}), bottom friction (Q_{bf}) and depth-induced breaking (Q_{br}), non-linear interactions between quadruplets of frequencies (Q_{nl4}). For each of these processes, several state-of-the-art formulations, calibrated against data from experimental campaigns in the field, are available in TOMAWAC and summarized in Table 1. The presentation of all the formulations is clearly out of the scope of this paper and can be found in the mentioned references. However, a more detailed presentation of depth-induced breaking is given in Section 3. In addition to these processes, a term modelling the non-linear transfers between triads of waves in shallow water (Eldeberky and Battjes, 1995) is presently under development and will be soon operational for use.

	<i>Formulation 1</i>	<i>Formulation 2</i>	<i>Formulation 3</i>
Q_{in} wind input	Janssen (1991)	Snyder <i>et al.</i> (1981) + u^* from drag law	Snyder <i>et al.</i> (1981) + u^* from Charnock
Q_{wc} white-capping	Komen <i>et al.</i> (1984)	Janssen (1991)	
Q_{nl4} quadruplets	Hasselmann <i>et al.</i> (1985)	Webb (1978) (<i>under development</i>)	
Q_{bf} bot. friction	Bouws and Komen (1983) + JONSWAP	Madsen <i>et al.</i> (1988)	Christoffersen and Jonsson (1985)
Q_{br} surf-breaking	Battjes and Janssen (1978)	Thornton and Guza (1983)	Roelvink (1993)

Table 1 : Review of source and sink terms available in TOMAWAC 1.2.

2.3 Numerical aspects of TOMAWAC

2.3.1 Spatial and spectral discretizations

Finite elements spatial discretization

Spectral wave models usually use finite differences grids for spatial meshing. This may however become a limitation for nearshore applications, where complex bathymetry and irregular shoreline often require a refined resolution. As already mentioned in the introduction, the first solution to this problem is to use nested grids, but this implies an heavy management of input/output files, complicates programming and significantly increases the computational effort.

The finite elements technique used in TOMAWAC (and in all the models of the TELEMAC system as well) overcomes this problem quite elegantly because the user can determine locally the size of the mesh and then optimize the number of nodes according to the accuracy expected in the various parts of the computational domain. The maritime area to be modelled is then discretized in a number of triangular elements whose size may be varied according to the desired resolution. This unique feature allows for instance to have on a same grid large oceanic areas (with mesh size in the order of several hundreds of kilometres) and nearshore areas (with mesh size in the order of one kilometre or less). Examples of spatial grids used by TOMAWAC are given in the following sections of this paper dealing with applications and validation test-cases.

Directional-spectral discretization

The range $[0 ; 2\pi]$ of wave directions is discretized in a number of equally spaced directions. This number of directions usually lies between 12 ($\Delta\theta = 30^\circ$) and 72 ($\Delta\theta = 5^\circ$). The discretized frequencies follow a logarithmic distribution ($f_{i+1} = (1+\epsilon).f_i$). The number of frequencies usually lies between 15 and 30. This results in a directional-spectral grid for the directional wave spectrum which is regular over directions and logarithmic over frequencies.

2.3.2 Numerical schemes

The wave action balance equation is solved in TOMAWAC by a fractional step method, including :

- a convection step (left-hand side of the balance equation (1)) :

$$\frac{\partial(B.\tilde{F})}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\text{grad}}(B.\tilde{F}) = 0 \quad \text{with : } \vec{V} = (C_x; C_y; C_\theta; C_f)$$

- and a source terms integration step (right-hand side of the equation (1)) :

$$\frac{\partial(B.\tilde{F})}{\partial t} = B.Q \quad \text{which reduces to : } \frac{\partial\tilde{F}}{\partial t} = Q \quad \text{as B is independent of time.}$$

Propagation step :

The convection step is treated by a piece-wise ray method or method of characteristics. Due to the fact that the convective field is stationary, the characteristics curve have to be computed only once, at the beginning of computation. The results are stored in computer memory. At each time step, the convection step is thus reduced to an interpolation, which allows to save a good amount of computing time.

Source terms step

The source terms integration is carried out through a weighted implicit scheme :

$$\frac{\tilde{F}^{n+1} - \tilde{F}^*}{\Delta t_s} = \alpha.Q^* + (1-\alpha).Q^{n+1}$$

where \tilde{F}^* is the value of the variance spectrum after the propagation step and Q^* represent the value of source-terms based on \tilde{F}^* .

Choosing $\alpha = 0$ ($\alpha = 1$) makes the scheme fully implicit (explicit). In one selects $\alpha = 0.5$, this scheme reduces to the semi-implicit scheme used in the WAM model (WAMDI Group, 1988).

2.3.3 Vectorization

TOMAWAC is fully vectorized and may be run either on super-computers or on workstations, depending on the size of the computational domain.

3. IMPLEMENTATION OF DEPTH-INDUCED BREAKING IN TOMAWAC

The modelling in TOMAWAC of energy dissipation due to depth-induced breaking is achieved by solving two successive problems : (i) estimation of the total energy dissipation due to breaking for the whole directional wave spectrum and (ii) distribution of this total dissipation over both frequencies and directions.

(i) Total dissipation of wave energy due to breaking:

The transformation of statistical parameters of an incident random wave train across the surf zone can be basically treated by two classes of models both based on the wave energy balance. The "probabilistic models" are based on a wave-by-wave approach (e.g. Dally, 1992) and offer a detailed description of the transformation of wave height distribution. This type of models was however not selected in TOMAWAC because of their important computational cost. The second class of models, the so-called "parametric models", assumes that the wave height distribution $p(H)$ and the breaking probability conform to distributions whose shapes are *a priori* known all along the bathymetric profile. By combining these distributions with a dissipation rate per breaking wave, the total dissipation term \bar{D} is obtained as a function of local wave and bathymetric parameters. As mentioned in Table 1, three such parametric models together with a model based on turbulence considerations for monochromatic waves have been implemented in TOMAWAC :

- Battjes and Janssen (1978) model (BJ78) : The authors assume that the local depth limits the wave heights in the distribution to a maximum height H_m which is a function of water depth and incident conditions (Miche criterion). So the wave height distribution follows a Rayleigh distribution clipped at $H=H_m$. All the waves having a wave height of H_m are assumed to break. The dissipation rate per unit area for a breaking wave is evaluated by using the analogy with an hydraulic jump. As the breaking wave height H_m is assumed to be in the order of water depth, the combination with the fraction of breaking waves Q_b leads, after algebraic manipulations, to the formulation for the breaking dissipation rate:

$$\bar{D} = \frac{\alpha}{4} f_p \rho g H_m^2 Q_b \quad \text{with } \alpha = 1$$

$$H_m \text{ is given by : } H_m = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\gamma \frac{k \cdot d}{0.88}\right) \quad \text{with } 0.5 < \gamma < 0.8$$

Note that in shallow-water the above criterion reduces to : $H_m = \gamma \cdot d$.

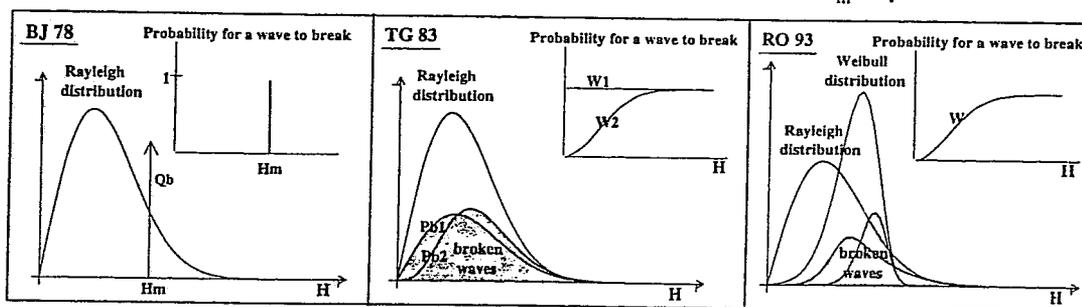


Figure 1 : Schematic diagram of parametric surf-breaking models.

- Thornton and Guza (1983) model (TG83) : Based on field observations, the authors assume a Rayleigh distribution for the wave heights even in the surf zone, but propose two different formulations for the breaking probability. The first one assumes that all waves may break with the same probability, so the repartition of breaking waves, $p_{b1}(H)=W_1(H) \cdot p(H)$ is directly proportional to the Rayleigh distribution (figure 1.b). As, in general however, the largest waves of the

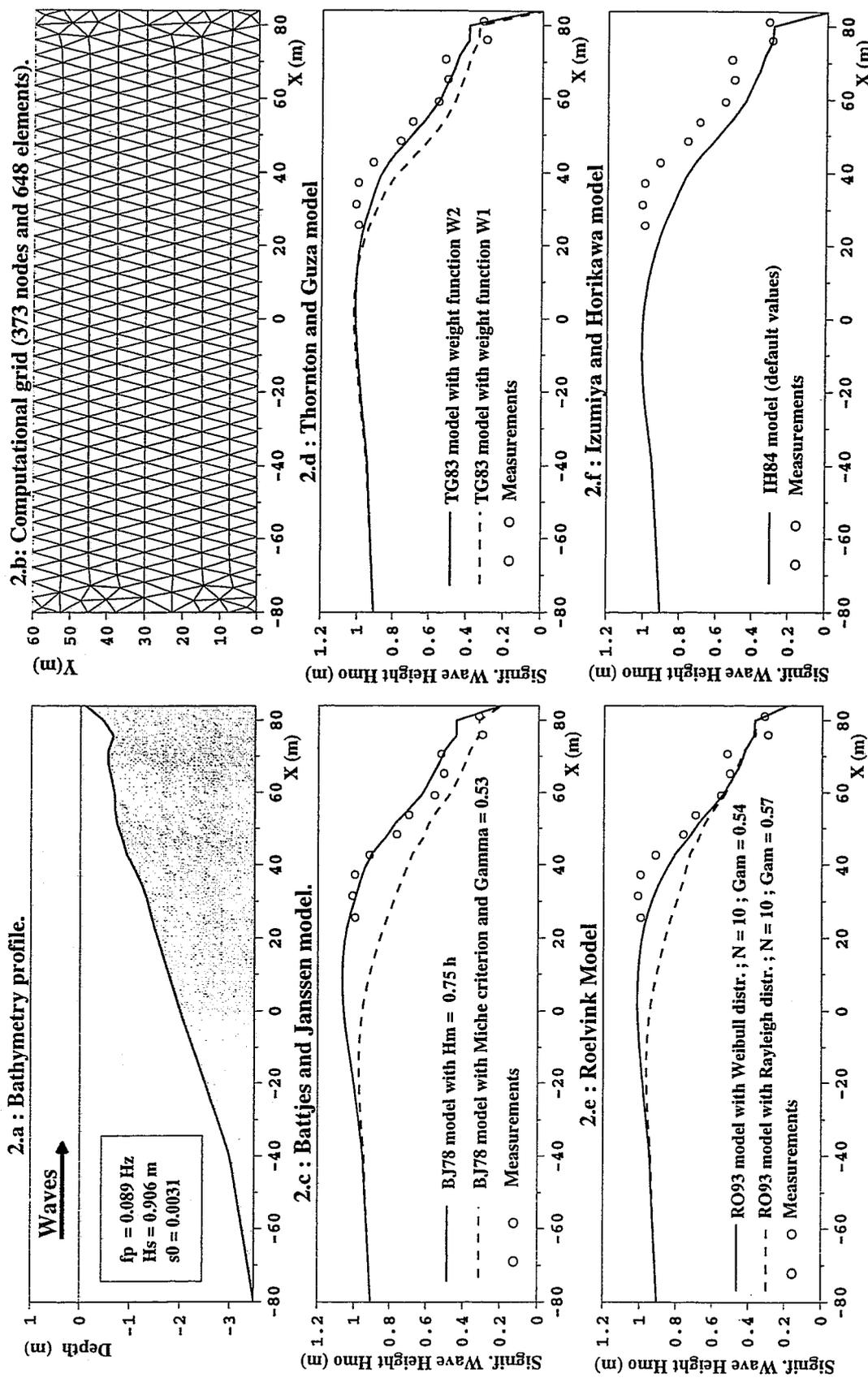


Figure 2 : Application of TOMAWAC wave model to case DUCK 41510 - Validation of surf-breaking models

distribution are more likely to break, another formulation W_2 (leading to $p_{b2}(H)$) is formulated. The average dissipation rates are obtained by combining $p_b(H)$ with a dissipation rate per breaking wave (based on bore theory) :

$$\bar{D}_1 = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} B^3 \rho g f_p \frac{H_{rms}^7}{H_m^4 h} \quad \text{and} \quad \bar{D}_2 = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} B^3 \rho g f_p \frac{H_{rms}^5}{H_m h} \left[1 - \left(1 + \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \right)^{-5/2} \right]$$

• Roelvink (1993) model : The originality of this model lies in the use of two different functions for the distribution of wave heights, namely a Rayleigh and a Weibull distributions. The breaking probability is close to the second formulation of the TG83 model where the H_{rms} dependence is suppressed. The average dissipation terms \bar{D} then read (m and A depend on local wave parameters) :

$$\bar{D}_{Weibull} = \frac{\alpha}{2} \rho g f_p m A H_{rms} \int_0^{\infty} \left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^{2m+1} \exp \left[-A \left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^{2m} \right] \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{H}{\gamma h} \right)^n \right) \right] dH$$

$$\bar{D}_{Rayleigh} = \frac{\alpha}{2} \rho g f_p H_{rms} \int_0^{\infty} \left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^3 \exp \left[- \left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^2 \right] \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{H}{\gamma h} \right)^n \right) \right] dH$$

• Izumiya and Horikawa (1984) model (IH84) : this model is based on the Reynolds equations and was developed for monochromatic waves propagating over a bathymetry profile. The breaking dissipation term is expressed as a function of wave energy E :

$$D = -\beta_0 \left(\frac{C_g}{C} \cdot \frac{E}{\rho g h^2} - M_{*s}^2 \right)^{1/2} \frac{E^{3/2}}{\rho^{1/2} d^{3/2}} \left(\frac{2C_g}{C} - 1 \right)^{1/2}$$

where M_{*s}^2 is a stable wave criterion (about $0.9 \cdot 10^{-2}$) and $\beta_0 = 1.8$.

(ii) Distribution of total dissipation over both frequencies and directions :

No directional dependence has been demonstrated until now, so the discussion will be restricted to the frequency dependence. Vincent *et al.* (1994) have analyzed laboratory data for the evolution of single-peaked spectra along a monotonic bathymetry profile. The normalised energy loss was found to be quite independent of frequency allowing the assumption that the spectral distribution of energy dissipation is directly proportional to the energy density, so that :

$$Q_{br}(f, \theta) = -\bar{D}(m_0, f_p, d) \frac{F(f, \theta)}{m_0} \quad \text{with} \quad m_0 = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) df d\theta$$

Experiments from Beji and Battjes (1993) for waves propagating over a bar also indicate the same trend, leading to the above state-of-the-art method currently used in other wave models (Ris *et al.*, 1994 ; Van Vledder *et al.*, 1994).

On the other hand, Mase and Kirby (1992) observed in their laboratory experiments a frequency dependence of the breaking dissipation. They proposed to add a quadratic dependence on frequency, so that :

$$Q_{br}(f, \theta) = -(a_0 + f^2 a_1) \cdot F(f, \theta) \quad \text{with} \quad \bar{D}(m_0, f_p, d) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} (a_0 + f^2 a_1) \cdot F(f, \theta) df d\theta$$

As, from the observations, a linear dependence on frequency could not be excluded, both the quadratic and linear dependences have been implemented in TOMAWAC (in addition to the above classical approach neglecting any frequency dependence). The inclusion of the frequency dependence for the breaking sink term does not significantly modify the evolution of the significant wave height along the

profile. As expected however, the mean frequency is found to decrease when a quadratic dependence of frequency is activated. Indeed the higher frequencies of the spectrum are more concerned by breaking dissipation, shifting the spectral shape towards the lower frequencies. However, such a behaviour can not be validated solely, but must be analysed in conjunction with (in particular) triad interactions, which play a central role in the energy flux between the spectral components in shallow water.

(iii) Example of validation of depth-induced breaking in TOMAWAC model :

A field experiment was conducted on September 4-6, 1985, at the Field Research Facility of the U.S. Army Coastal Engineering Research Center (CERC) in Duck, North California (Ebersole and Hughes, 1987). The case presented below was recorded on September 4, 15:10 hrs (41510). The wave conditions imposed at the seaward boundary for the application of TOMAWAC are summarized on figure 2.a. The numerical simulations were carried out for the bathymetry profile shown on figure 2.a with a computational grid of approximately constant mesh (figure 2.b). The surf-breaking dissipative term was assumed to be frequency independent.

The TOMAWAC results (figures 2-c to 2-f) show that all breaking models are able to correctly reproduce the significant wave height variations along the bathymetry profile. BJ78 model was used in a first run with a value of γ determined from the Battjes and Stive (1984) formulation ($\gamma=0.53$) and with the Miche criterion for the computation of H_m (Figure 2.c). This results in an overestimation of the dissipation. In fact, Battjes and Stive formulation is not efficient for low values of steepness s_0 . This test-case requires to increase γ up to 0.75, which gives quite good results. The use of the weighting function W_2 in TG83 model gives better results on this experiment than W_1 (figure 2.d), even if it does not well reproduce the wave height enhancement observed before breaking. RO93 model gives too much dissipation with the Rayleigh distribution (figure 2.e), but the use of the Weibull distribution improves the results. The IH84 model is also too much dissipative (figure 2.f), but partly reproduces the wave height enhancement before breaking.

4. WAVES PROPAGATING OVER A CURRENT WHIRL

This computation has to show the capability of TOMAWAC to represent wave-current interactions on a realistic (although schematic) case of a current eddy. This case was proposed by Mathiesen (1987) as fairly representative of the whirls sometimes occurring in the nearshore zone.

4.1 Description of the test case

The spatial domain is a square of 80 km (figure 3). We consider an idealised circular whirl, centered on the origin :

- The tangential current velocity increases linearly from zero at the center of the whirl : $u(r) = u_1 \frac{r}{r_1}$ for $r \leq r_1 < r_0$

- Further away from the whirl center, the current follows a gaussian profile :

$$u(r) = u_{\max} \exp \left[- \left(\frac{r - r_0}{b r_0} \right)^2 \right] \text{ for } r > r_1$$

For this run, $u_{\max} = 1$ m/s, $r_0 = 10$ km and $b = 0.3$, which leads to $r_1 = 9.5277$ km.

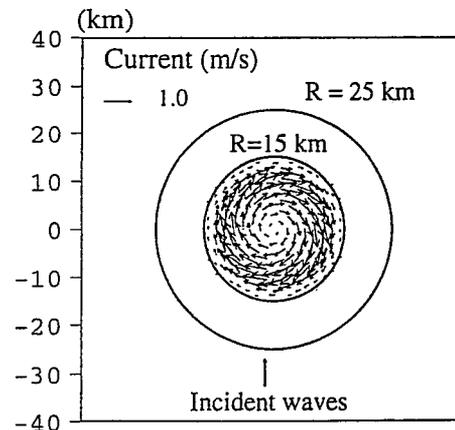


Figure 3 : Definition sketch and current field for the whirl test-case.

Mathiesen (1987) developed a semi-analytical model for this refraction problem using a ray tracing technique. This technique can be carried out upward or backward. Mathiesen used the backward ray method to determine the point (x,y,f,θ) where the energy originates to reach the point of interest. Such computations were performed for different wave frequencies and directions in order to build a complete wave spectrum. Therefore, his results can be compared with those of TOMAWAC.

The input offshore directional wave spectrum, chosen by Mathiesen (1987), is written in the form : $F(f,\theta) = S(f).D(f,\theta)$ where $S(f)$ is the frequency spectrum and $D(f,\theta)$ is the directional spreading function. The frequency spectrum is a classical JONSWAP spectrum with a peak frequency f_p equal to 0.1 Hz. $D(f,\theta)$ is based a Gaussian-shaped directional distribution :

$$D(f,\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_m)^2}{2\sigma_0^2}\right)$$

θ_m is the mean incident wave direction (here $\theta_m = 0$) and σ_0 is the circular standard deviation given by the following expression :

$$\sigma_0 = \sigma_{0p} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-2.03} \quad \text{if } f < f_p$$

$$\sigma_0 = \sigma_{0p} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{1.04} \quad \text{if } f \geq f_p$$

where $\sigma_{0p} = \sigma_0(f_p) = 25^\circ$

The water depth is supposed to be constant at 200 m. The computation is achieved with Cartesian co-ordinates, without any source term ($Q=0$). The mesh used consists of 1876 points and 3590 elements of about 2 km on one side.

4.2 Results and discussion

Several computations were performed with TOMAWAC, using different time-steps and different directional resolutions. Only the results obtained with a time-step of 1200 s and a directional resolution of 7.5° will be presented below. The 25 discretized frequencies range from 0.04 Hz to 0.4 Hz (geometrical factor 1.1).

The computed normalised significant wave height is given on figure 4. We can clearly see two zones where wave heights are enhanced separated by a zone where they are decreased. The greatest increase in wave height is obtained when waves propagate against the current while the greatest decrease is observed when they go the same way. The variations of significant wave height remain in the range $\pm 30\%$.

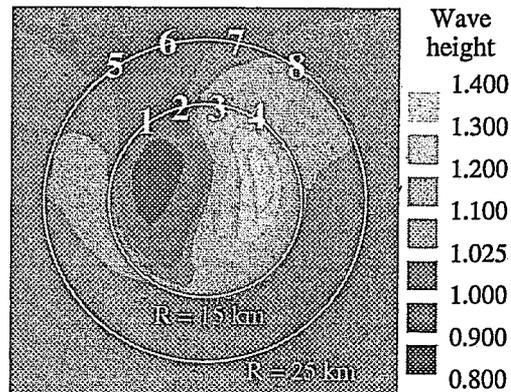


Figure 4 : Map of normalised significant wave height

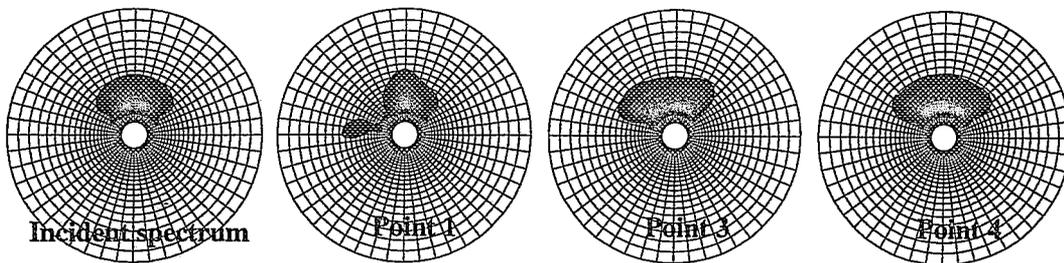


Figure 5 : Computed directional wave spectra at various locations

Figure 5 shows the wave spectra computed at various locations. We can see the presence of crossing seas, with several directional peaks in the spectrum, especially at points n°1 and 3. The directional distribution of wave energy is very inhomogeneous on this test-case. On figure 6, the directional spectra at $f = 0.1$ Hz are plotted for the eight points presented in figure 4. Mathiesen (1987) gives similar results with his model whose directional discretization (2.5°) was finer than ours. The TOMAWAC results compare very satisfactorily with the semi-analytical solution. The model thus appears to be able to reproduce the main features of the directional spectra, although they have a quite complex shape at several locations.

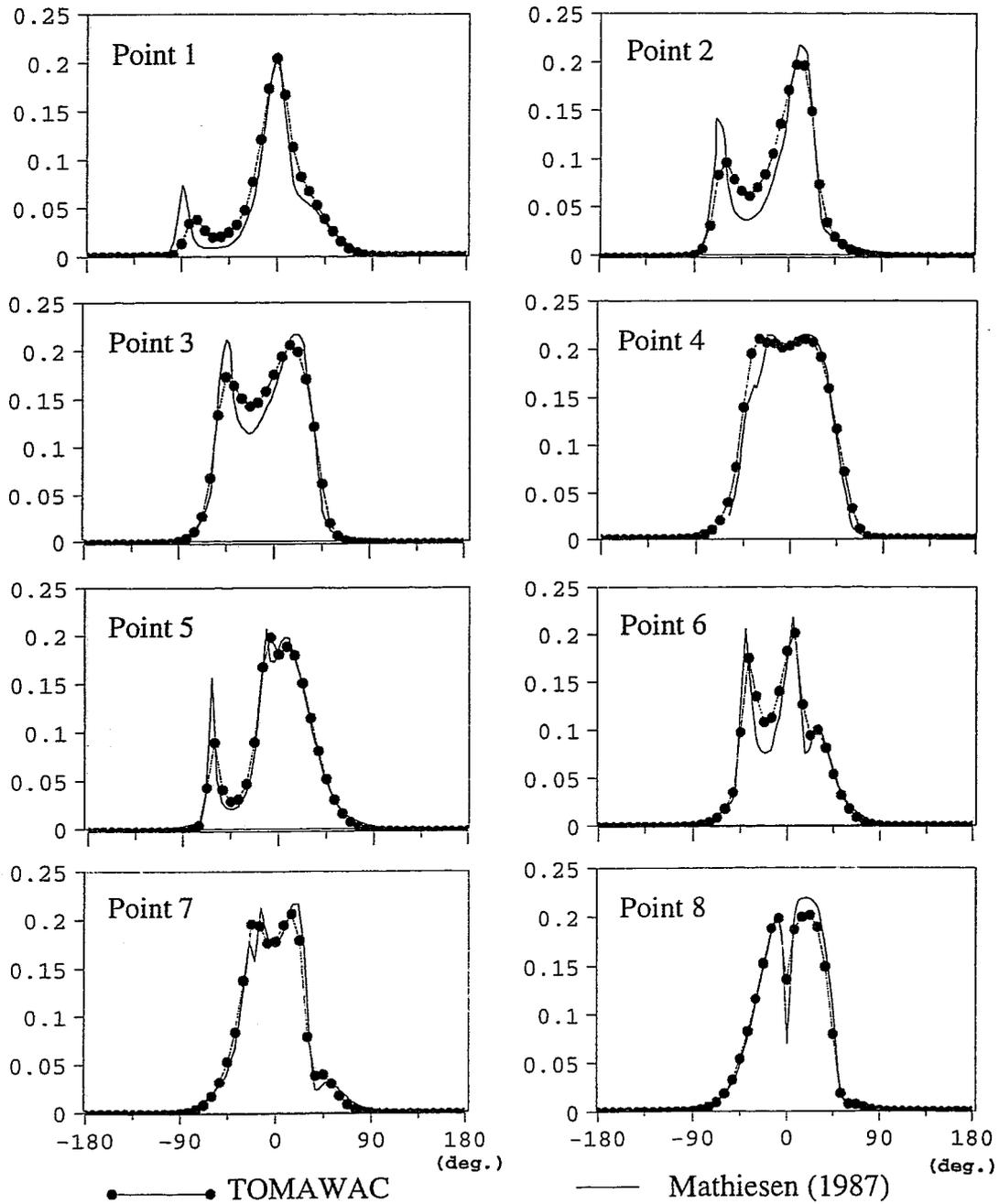


Figure 6 : Directional spectra at $f = f_p = 0.1$ Hz - Comparison with Mathiesen (1987) model

5. SIMULATION OF THE STORM OF JANUARY 25, 1990 IN THE CHANNEL

Of all the storms to hit the Atlantic coast of France during the winter of 1989-1990, the one on January 25, 1990 was one of the most violent, with winds of force 9 to 11 (on the Beaufort scale) over French Brittany. On this particular day, the strongest gust of wind recorded at the Hague signal station was measured at 46 m/s (166 km/h). The winds blew continuously from the West, which was particularly conducive to the formation of strong waves to the West of Cotentin, and on that day, the buoys located at Ouessant registered wave heights of over 16 metres !

The period chosen for computer simulation with TOMAWAC runs from January 16 to 30, 1990, with a time-step of 5 minutes. The computational mesh consists of 6 205 nodes and 11 444 triangular elements (figure 7). The broadest meshes cover approximately 40 km on the grid boundaries, whereas the most refined ones cover less than 5 km in the English Channel. The directional wave energy spectrum has been discretized into 25 frequencies and 12 directions. The windfields (two horizontal components of the 10 m wind-speed) were provided every 6 hours from the French meteorological model results. Boundary conditions were provided by a previous simulation performed on a coarser grid covering the Northern part of the Atlantic Ocean. All source terms, including surf-breaking, were activated for this computation. The simulation was carried out without taking tidal effects into account. It required less than two hours of computing time on a Cray C98 computer for modelling an actual duration of 14 days.

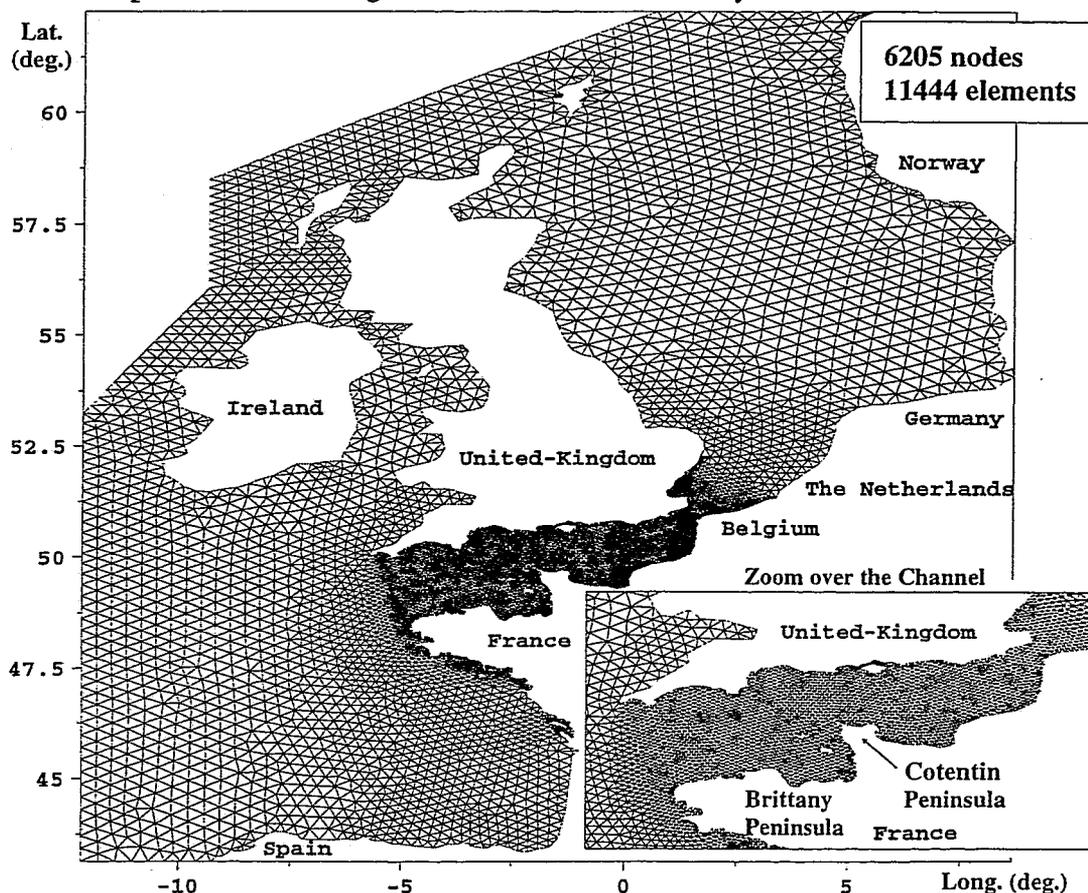


Figure 7 : Grid used for the simulation of the storm of January 25, 1990.

Figure 8 shows a chart of significant wave heights computed at the paroxysm of the storm, along with the energy spectra at the same moment at various points in the Channel. We can see that the storm's maximum intensity occurs close to the West Brittany. The further we move into the Channel, the smaller the wave heights, even though heights still manage to reach 5.5 m to the West of Cotentin (Flamanville). To validate the simulation, computational results are compared with the buoy measurements at Ouessant and Flamanville on figure 9. On both places, numerical results compare quite satisfactorily to buoy data. Furthermore, it appears from figure 8 that wave breaking significantly contributes to decrease the wave heights along the coasts of the French Brittany Peninsula.

The TOMAWAC model thus gave a good overall account of itself as far as reproducing the height of the waves was concerned, even though it slightly underestimated the January 25, 1990 peak at Ouessant. The mean periods are also fairly well reproduced, despite being generally rather overestimated by the code.

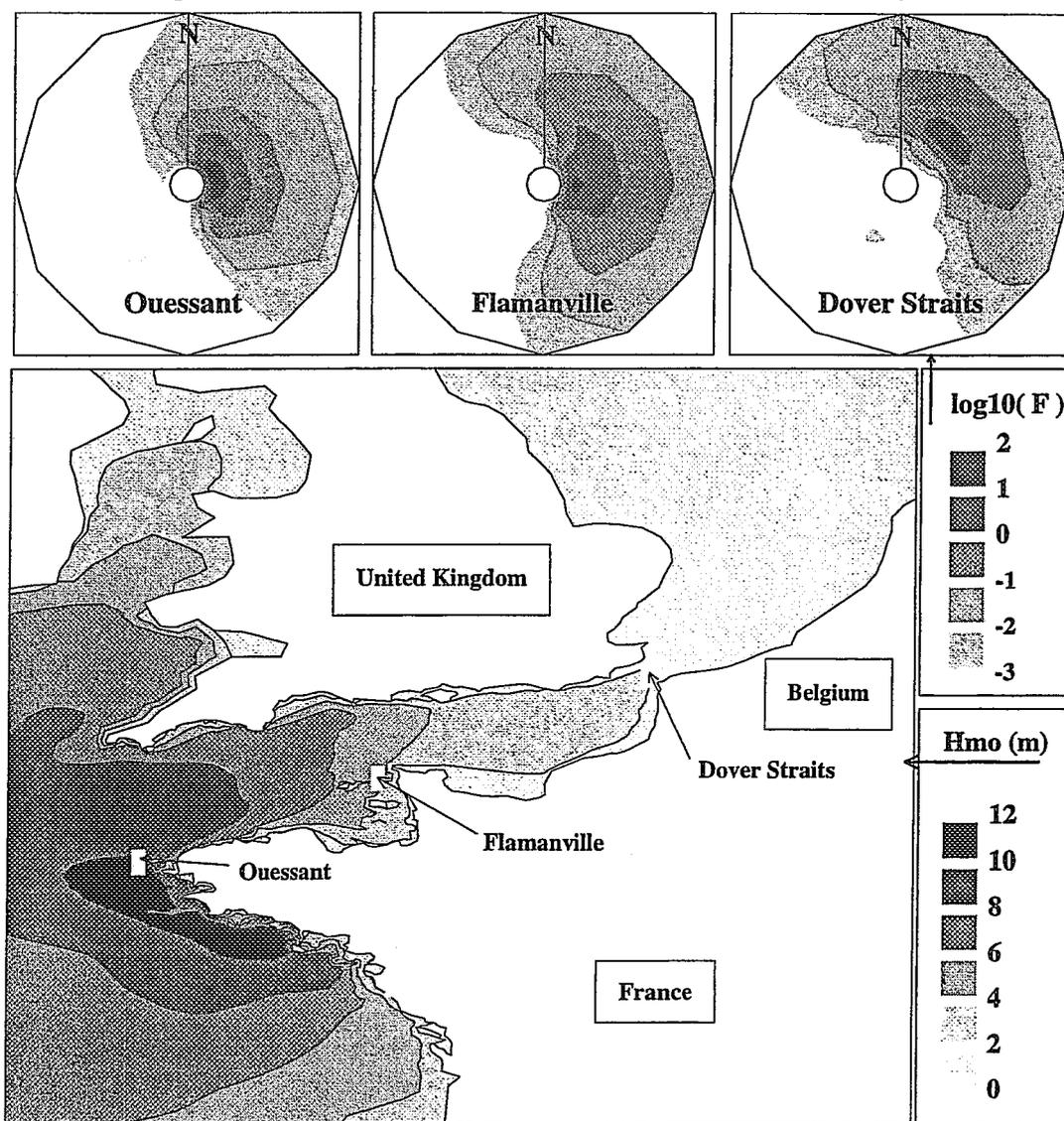


Figure 8 : Results of TOMAWAC at the peak of the storm of January 25, 1990. (Upper plots : directional spectra ; Lower plot : map of significant wave height)

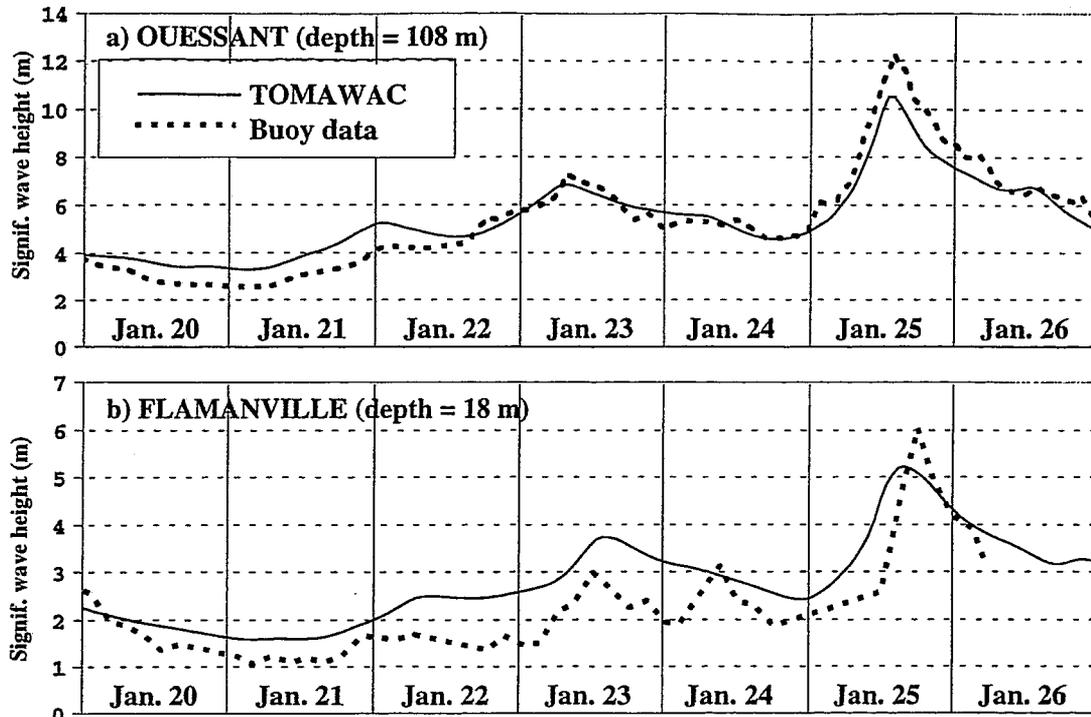


Figure 9 : Comparison of TOMAWAC results with buoy data at two locations.

6. CONCLUSIONS — FUTURE WORK

The applications presented in the previous sections show some of the capabilities of the TOMAWAC wave model, in particular for the simulation of storm waves for both offshore and nearshore areas. These cases are however only samples from the numerous test-cases performed during the validation step of the model. As a part of the TELEMAC modelling system, TOMAWAC indeed follows the Insurance Quality Procedure of EDF-LNH, with precise development rules and a complete documentation.

The inclusion of shallow-water effects such as bottom friction and depth-induced breaking has allowed to further extend the range of validity of the model towards the nearshore zone. In addition, the numerical background for spatial discretization (unstructured “finite elements” grid) and propagation scheme (piece-wise ray method) make the model very attractive for the modelling of shelf seas and shallow-water domains.

Present development efforts are dedicated to the extension of the TOMAWAC model towards the very shallow water depth, in particular by considering the non-linear interactions between triads of waves. The possibility to deal with unsteady currents and water levels is also a field of present research, in order to study the interactions between waves, storm-surges and tides.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This study is a joint research program between EDF-Laboratoire National d'Hydraulique and the French Ministry of the Sea (Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement — STNMTE).

8. REFERENCES

- BATTJES J.A., JANSSEN P.A.E.M. (1978) : Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Vol 1, pp 569-587*
- BATTJES J.A., STIVE M.J.F. (1984) : Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Proc. 19th Int. Conf on Coastal Eng., Vol. 1, pp 649-660*
- BEJI S., BATTJES J.A. (1993) : Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coastal Eng., Vol. 19, pp 151-162*
- BOUWS E., KOMEN G. J. (1983) : On the balance between growth and dissipation in an extreme depth-limited wind-sea in the southern North-Sea. *J. Phys. Oceanogr., Vol 13, pp 1653-1658.*
- BRETHERTON F.P., GARRET C.J.R. (1968) : Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc. A. 302, pp 529-554.*
- CHRISTOFFERSEN J.B., JONSSON I.G. (1985) : Bed friction in a combined current and wave motion. *Ocean Eng., Vol 12, pp 387-423.*
- DALLY W.R. (1992) : Random breaking waves : Field verification of a wave-by-wave algorithm for engineering applications. *Coastal Eng., Vol. 16, pp 369-397.*
- EBERSOLE B.A., HUGHES S.A. (1987) : DUCK85 photopole experiment. *US Army Waterways Experiment Station, Misc. paper CEREC-87-18, Vicksburg, MS.*
- ELDEBERKY Y., BATTJES J.A. (1995) : Parameterisation of triad interactions in wave energy models. *Proc. Int. Conf. Coastal Dynamics'95, pp 140-148.*
- HASSELMANN S., HASSELMANN K., ALLENDER J.H., BARNETT T.P. (1985) : Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in gravity-wave spectrum. Part II : Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr., Vol 15, pp 1378-1391.*
- IZUMIYA T., HORIKAWA K. (1984) : Wave energy equation applicable in and outside the surf zone. *Coastal Engineering in Japan, Vol. 27, pp 119-137*
- JANSSEN P.A.E.M. (1991) : Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr., Vol 21, pp 1631-1642.*
- KOMEN G.J., HASSELMANN S., HASSELMANN K. (1984) : On the existence of a fully developed windsea spectrum. *J. Phys. Oceanogr., Vol 14, pp 1271-1285.*
- MADSEN O.S., POON Y.K., GRABER H.C. (1988) : Spectral wave attenuation by bottom friction : theory. *Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., pp 492-504.*
- MASE H., KIRBY J.T. (1992) : Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation. *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp 474-487.*
- MATHIESEN M. (1987) : Wave refraction by a current whirl. *J. Geophys. Res., Vol 92, n° C4, pp 3905-3912.*
- RIS R.C., HOLTHUIJSEN L.H., BOOIJ N. (1994) : A spectral wave model for waves in the near shore zone. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp 68-78.*
- ROELVINK J.A. (1993) : Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Eng., Vol. 19, pp 127-150.*
- SNYDER R.L., DOBSON F.W., ELLIOT J.A., LONG R.B. (1981) : Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *J. Fluid. Mech., Vol 102, pp 1-59.*
- THORNTON E.B., GUZA R.T. (1983) : Transformation of wave height distribution. *J. Geophys. Res., Vol. 88, N° C10, pp 5925-5938*
- VAN VLEDDER G.P., DE RONDE J. G., STIVE M.J.F. (1994) : Performance of a spectral wind-wave model in shallow water. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., p 761.*
- VINCENT C.L., SMITH J.M., DAVIS J. (1994) : Parametrization of wave breaking in models. *Proc. Int. Symposium "Waves : Physical and numerical modelling", Vancouver (Canada), pp 753-762*
- WAMDI Group (1988) : The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr., Vol 18, N°12, p 1775-1810.*
- WEBB D.J. (1978) : Non-linear transfer between sea waves. *Deep Sea Research, vol 25, pp 279-298.*

ANNEXE 4

Auteur : **Michel BENOIT**

Titre : Evaluation of methods to compute the non-linear quadruplet interactions for deep-water wave spectra.

Année : 2005.

Source : Proceedings 5th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES'2005), 3-7 Juillet 2005, Madrid (Espagne).

EVALUATION OF METHODS TO COMPUTE THE NONLINEAR QUADRUPLET INTERACTIONS FOR DEEP-WATER WAVE SPECTRA

Michel Benoit¹

Abstract: Several numerical methods to compute the nonlinear transfer of energy between quadruplets of waves are considered and applied to some test spectra in deep water conditions. We consider two “exact” methods for the evaluation of the Boltzmann integral (which are used to produce reference results for the nonlinear transfer term) and six approximate techniques for this intercomparison. Some of the latter ones are currently used in operational third-generation wave models and invoke either reduced integration space, coarser discretization or alternative simpler formulations. Comparisons with reference results for a given spectrum show that the accuracy of currently used approximations (e.g. DIA and diffusion operators) are quite low. Improved results are obtained with more advanced methods (e.g. MDIA, RIA). Additional work is needed to improve the computational methods to be used in operational wave models.

INTRODUCTION

The numerical evaluation of the nonlinear third-order wave-wave interactions for ocean wave spectra is an awkward problem. It is still not properly resolved in operational third-generation wave models, although the theoretical model was derived more than 40 years ago (Hasselmann 1962). On one hand, “exact” methods do exist (e.g. Webb 1978, Hasselmann and Hasselmann 1981, Masuda 1980). However due to their algorithmic complexity and the required amount of CPU time, these exact methods have only been used on schematic or simplified cases (e.g. time-evolution of a point spectrum or fetch-limited growth in 1D situations). On the other hand, in operational wave models used for hindcasting or forecasting of wave conditions, only simplified and/or approximate numerical techniques are used in order to keep acceptable computational time. In the last 5 years, there have been a number of efforts to reduce the gap between the above two options and several alternatives have been proposed. This paper aims at reviewing recently developed methods and comparing some of them on a reference test-case for a deep-water wave spectrum.

¹ EDF R&D, Laboratoire National d’Hydraulique et Environnement (LNHE),
6 quai Watier, 78400 Chatou, France, michel.benoit@edf.fr

THEORETICAL EXPRESSION FOR NONLINEAR INTERACTIONS

The spectrum of ocean surface gravity waves evolves under the combined action of several processes due to the interactions of waves with the atmosphere, with ambient marine currents and with the bottom topography in finite water depth. In addition, nonlinear wave-wave interactions between components of the wave spectrum play an important role in transferring and redistributing the energy within the spectrum (e.g. Hasselmann 1962, Resio and Perrie 1991, Young and Van Vledder 1993).

In deep water and intermediate water depth, the dominant wave-wave interactions are third-order and resonant. They occur between quadruplets of wave components. Hasselmann (1962) and Zakharov (1968) independently derived the expression of the nonlinear transfer term, expressed here by the so-called Boltzmann integral:

$$\frac{\partial N_I}{\partial t} = \int_{\underline{k}_2} \int_{\underline{k}_3} \int_{\underline{k}_4} G(\underline{k}_1, \underline{k}_2, \underline{k}_3, \underline{k}_4) \{N_3 N_4 (N_1 + N_2) - N_1 N_2 (N_3 + N_4)\} \\ \times \delta(\underline{k}_1 + \underline{k}_2 - \underline{k}_3 - \underline{k}_4) \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) d\underline{k}_2 d\underline{k}_3 d\underline{k}_4 \quad (1)$$

N is the wave action density, defined as : $N(\underline{k}) = F(\underline{k})/\sigma$ where $F(\underline{k})$ is the directional variance spectrum of ocean waves, expressed here as a function of the wave-number vector $\underline{k} = (k_x, k_y)$ in the wave-number plane. In the Boltzmann integral (1), the notation N_j stands for $N(k_j)$ with $j=1$ to 4.

$\sigma = 2\pi f$ is the angular frequency, which is related to the wave number k and water depth h by the linear dispersion relationship:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (2)$$

Note that we only consider in this paper deep water conditions. In this case the dispersion relationships reduces to:

$$\sigma^2 = gk \quad (3)$$

From equation (1) it is clear that interactions only occur between quadruplets of four wave components which fulfill the following resonance conditions, corresponding to argument of the Dirac δ functions in (1):

$$\underline{k}_1 + \underline{k}_2 = \underline{k}_3 + \underline{k}_4 \quad (4)$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3 + \sigma_4 \quad (5)$$

$G(\underline{k}_1, \underline{k}_2, \underline{k}_3, \underline{k}_4)$ is the coupling coefficient which has a complicated expression, given by Webb (1978) for deep water and by Herterich and Hasselmann (1980) for finite depth.

Equation (1) shows that the nonlinear transfer results from a six-fold integral of a function which comprises two Dirac δ functions. This renders the numerical computation of (1) a very awkward and time-consuming task. The exact evaluation of (1) requires specific algorithms together with a large computational time, so that this nonlinear term is always evaluated by approximate or simplified methods in operational third-generation wave models, as e.g. the WAM model (WAMDIG 1988).

EXACT METHODS TO COMPUTE THE BOLTZMANN INTEGRAL

Precise and accurate computational techniques which permit “exact” evaluation of (1) have been proposed only about 20 years after the expression of the Boltzmann integral was established. A brief review allows to identify four main approaches:

1. Hasselmann and Hasselmann (1981, 1985) developed the EXACT-NL code, from which some results will be used here for comparison.
2. Webb (1978) proposed an alternative way for computing (1) by eliminating the Dirac δ functions and introducing a line-integral along a locus. This technique was used and extended by Resio and Perrie (1991) and is often referred to as the WRT (Webb-Resio-Tracy) method.
3. Masuda (1980) made use of a local analytical integration scheme to deal with singularities which arose during the manipulation of (1). This approach was further developed by and extended to the finite depth case by Hashimoto *et al.* (1998). Along similar lines Polnikov (1997) also used a local analytical integration to resolve the singularities.
4. Lavrenov (2001) developed an efficient numerical algorithm based on the use of optimal integration techniques (in particular Gaussian quadratures designed to resolve the singularities arising in the course of the manipulation of the Boltzmann integral). It involves a limited number of interacting quadruplets. This method will be referred to as LGQ (Lavrenov Gaussian Quadrature) method.

We implemented two “exact” methods, namely the WRT and the LGQ methods. They will be used to provide reference results when they are run with high precision.

APPROXIMATE METHODS TO EVALUATE THE BOLTZMANN INTEGRAL

Three classes of approximate methods that can (or could be) used in operational models are considered and briefly described below:

Reduced Exact Methods (REM)

The principle of these methods is to start from a potentially “exact” method of the preceding section and to use a similar algorithm with either a coarser resolution and/or a reduced integration range. We consider here two candidates from this class:

- the Reduced Interaction Approximation (RIA) method of Lin and Perrie (1998) which originates from the WRT method (Webb 1978). For a given wave-number k_l in (1), the range of wave-numbers k_3 is limited to a subset of values around k_l . The integration is thus local and limited to a subset of configurations.
- Similarly the LGQ method (Lavrenov 2001) can be used with a lower number of points in the quadrature formulae for integration, plus some filtering to discard configurations which have negligible or minor contributions to the integral.

These simplifications typically allow to gain 1 to 2 orders of magnitude in CPU time compared to the parent “exact” versions of algorithms, with acceptable errors.

The Discrete Interaction Approximation (DIA) and its extensions

The Discrete Interaction Approximation (DIA) of Hasselmann *et al.* (1985) is the most widely used option in third-generation wave models (e.g. WAMDIG 1988). The method restricts the evaluation of the integral at a unique quadruplet configuration (plus its mirror image) where two wave numbers are equal, defined by a single parameter λ :

$$\underline{k}_1 = \underline{k}_2 = \underline{k} \quad (6)$$

$$f_1 = f_2 = f \quad f_3 = (1+\lambda)f = f^+ \quad f_4 = (1-\lambda)f = f^- \quad (7)$$

The nonlinear transfer rates for the three (instead of four, as two of them are equal) involved wave components in this configuration is expressed in compact form as:

$$\begin{bmatrix} Q_{nl4}(f) \\ Q_{nl4}(f^-) \\ Q_{nl4}(f^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{C_{DIA}}{g^4} f^{11} \left(F^2 \left(\frac{F^+}{(1+\lambda)^4} + \frac{F^-}{(1-\lambda)^4} \right) - 2F \frac{F^+ F^-}{(1-\lambda^2)^4} \right) \quad (8)$$

In this paper, we consider the original DIA of Hasselmann *et al.* (1985), run with its default parameters ($\lambda = 0.25$, $C_{DIA} = 3 \cdot 10^7$) as proposed by WAMDIG (1988).

The DIA however possesses a number of shortcomings and often produces a transfer rate which is quite different from the exact one (van Vledder *et al.* 2000). There have been various attempts to improve the original DIA (Hashimoto and Kawaguchi 2001, Polnikov and Farina 2002, van Vledder 2001, Tolman 2004). As an example we use here the Multiple DIA (MDIA) as proposed by Tolman (2004) with a combination of several quadruplet configurations. The individual quadruplet configurations have a slightly different form, defined by two parameters (λ, μ) with $0 < \mu < \lambda < 0.5$:

$$\underline{k}_1 + \underline{k}_2 = \underline{k}_3 + \underline{k}_4 = 2\underline{k} \quad (9)$$

$$f_1 = (1+\mu)f \quad f_2 = (1-\mu)f \quad f_3 = (1+\lambda)f \quad f_4 = (1-\lambda)f \quad (10)$$

The nonlinear transfer rates at the four components for each configuration of MDIA are then obtained as:

$$Q_{nl4}(f_1) = Q_{nl4}(f_2) = -Q_{nl} \quad \text{and} \quad Q_{nl4}(f_3) = Q_{nl4}(f_4) = Q_{nl} \quad (11)$$

$$Q_{nl} = \frac{C}{g^4} f^{11} \left(\frac{F_1 F_2}{(1-\mu^2)^4} \left(\frac{F_3}{(1+\lambda)^4} + \frac{F_4}{(1-\lambda)^4} \right) - \frac{F_3 F_4}{(1-\lambda^2)^4} \left(\frac{F_1}{(1+\mu)^4} + \frac{F_2}{(1-\mu)^4} \right) \right)$$

The MDIA results from the (linear) superposition of 4 such configurations, with the values of parameters (λ, μ, C) for each configuration as optimized by Tolman (2004).

Diffusion-type methods

The use of such a diffusion-type operator to approximate the Boltzmann integral was first suggested by Hasselmann *et al.* (1985), and later used by Zakharov and Pushkarev (1999), Jenkins and Phillips (2001) and Polnikov (2002). The approximation of Zakharov and Pushkarev (1999) and Polnikov (2002), referred to as DE1, is expressed in terms of frequency and direction, and then reads:

$$Q_{nl4}(f, \theta) = C_{DE1} \frac{(2\pi)^9}{g^4} f L_f \left[f^{12} F^3(f, \theta) \right] \quad (12)$$

where the second order operator L_f has the following form, with $A(f, \theta) = f^{12} F^3(f, \theta)$:

$$L_f[A] = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial f^2} + \frac{1}{f^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \theta^2} \quad (13)$$

C_{DEI} is a non-dimensional constant, which value varies between 0.03 et 0.23 depending on the shape of the directional wave spectrum (see table 1 in Polnikov (2002)). The mean value $C_{DEI} = 0.10$ is recommended by Polnikov (2002) and used in this paper.

This method has some interesting features. First, it can be shown that under isotropic conditions it has analytical solutions which are identical to those of the Boltzmann integral (1) (Zakharov and Pushkarev 1999). Second, there are no singularities at all in equation (12) and the method is very efficient for computational application.

Recently Pushkarev *et al.* (2004) proposed two variants of this approach based on non-local diffusion models which showed some improvements compared to the original approximation (12). We consider in this paper the second of these variants, termed DE3, where the $A(f, \theta)$ function used in (12) and (13) is replaced by the non-local form:

$$A(f, \theta) = f^{l2} F(f, \theta) F^2(f) \quad \text{with} \quad F(f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) d\theta \quad (14)$$

A TEST SPECTRUM IN DEEP-WATER CONDITIONS

In order to compare the various methods and highlight their performances and shortcomings, we consider a directional wave spectrum corresponding to case 3 of the reference work of Hasselmann and Hasselmann (1981) (see Fig. 1). This test spectrum is obtained as $F(f, \theta) = E(f).D(\theta)$. It combines a JONSWAP frequency spectrum $E(f)$ with Phillips constant $\alpha = 0.01$, peak frequency $f_p = 0.3$ Hz, peak enhancement factor $\gamma = 3.3$, $\sigma = 0.07$ if $f < f_p$ and $\sigma = 0.09$ if $f > f_p$, and a frequency-independent angular spreading function $D(\theta) = \Delta \cos^4(\theta)$ over $[-\pi/2, \pi/2]$. Note that due to symmetry, only one quarter of the frequency-direction plane is plotted for $F(f, \theta)$ on left panel of Fig. 1.

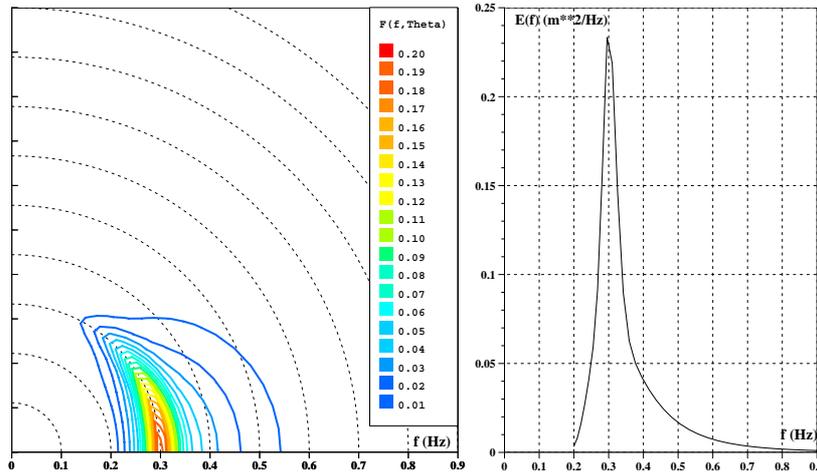


Fig. 1. Test wave spectrum (case 3 of Hasselmann and Hasselmann 1981).
Left panel : directional spectrum $F(f, \theta)$. Right panel : frequency spectrum $E(f)$

NUMERICAL PARAMETERS FOR DISCRETIZATION OF SPECTRUM

All computations are performed on a grid consisting of 36 directions with constant spacing ($\Delta\theta = 10^\circ$) and 25 frequencies with a logarithmic spacing ($f_k = f_l q^{k-1}$ with $q = 1.065$) from $f_l = 0.2$ Hz $= 2/3 f_p$ to $f_{25} \approx 0.9$ Hz $= 3 f_p$.

Note that for all computations (including exact methods) the input spectrum is provided as a set of discrete values on this grid (and not by analytical continuous expressions). Bilinear interpolation is used wherever necessary to compute values of the spectrum at points which do not coincide with nodes of the frequency-direction grid. In addition, the high frequency range of the spectrum (above the last discrete frequency) is assumed to decay as f^{-n} , where $n = 5$ for the purpose of this study, and the low frequency range (below the first discrete frequency) contains no energy.

ANALYSIS OF RESULTS FROM THE VARIOUS METHODS

Results obtained for the nonlinear transfer rate by the eight methods considered in this study are plotted on Fig. 2 for $Q_{nl4}(f, \theta)$ and on Fig. 3 for $Q_{nl4}(f)$, after integration of $Q_{nl4}(f, \theta)$ over wave directions.

First, it can be observed that the “exact” methods WRT and LGQ produce similar nonlinear transfer rates, although some differences are noticeable in the high frequency range (Fig. 2.a, 2.b and 3). Both transfer rates exhibit the same structure of positive and negative lobes with similar amplitudes. First, there is a positive lobe below the peak frequency in the main wave direction, which corresponds to an increase of wave energy for these frequencies lower than the peak frequency. Then, there is a large negative lobe for frequencies above the peak still in the main wave direction. In this region of the spectrum, the nonlinear interactions pump energy. Finally, there are also positive lobes for frequencies higher than the peak, but about 45 degrees off the main direction.

The “reduced” versions of these exact methods, namely RIA (Fig. 2.c) and especially LGQ-raw (Fig. 2.d), produce good approximations of the exact transfer rate while the CPU time is significantly reduced (by a factor of 20 typically). The main features of the exact transfer rate are present (position and amplitude of the various lobes), but with some differences, in particular in the high frequency range. However these methods (as implemented and partially optimized in our study) still require about 200 to 300 times more CPU time compared to DIA. More work is needed to try to reach if possible a ratio lower than 100 in order to get valuable candidates for operational wave models.

Fig. 2.e shows that the original DIA produces a transfer rate with some similarities with exact evaluations in the overall shape, but also significant and pronounced differences. The first (positive) lobe is lower and shifted about 40 degrees off the main direction. The second (negative) lobe is much higher than the exact one and it is shifted to higher frequencies. Finally the positive lobes at ± 45 degrees off the main direction are present, but at lower frequencies and they are clearly higher than the exact ones. The position and magnitude of the positive lobes result for the DIA in a trend to excessively spread the energy over directions, making the spectrum broader than it should be. On Fig. 3 the differences between DIA results and exact evaluation are clear, in particular for the negative lobe which is twice larger than the exact one and also shifted towards higher frequencies. The improvement brought by the multiple DIA (MDIA) is clear on Fig. 2.f. Differences with exact computations are lower. The various lobes have better positions both in frequency and direction. Our simulations confirm that the increase of CPU time needed for MDIA compared to DIA is about 10 as stated by Tolman (2004). MDIA might represent a valuable improvement over DIA, provided that its efficiency is confirmed on a wide range of spectral shapes (this is presently under examination).

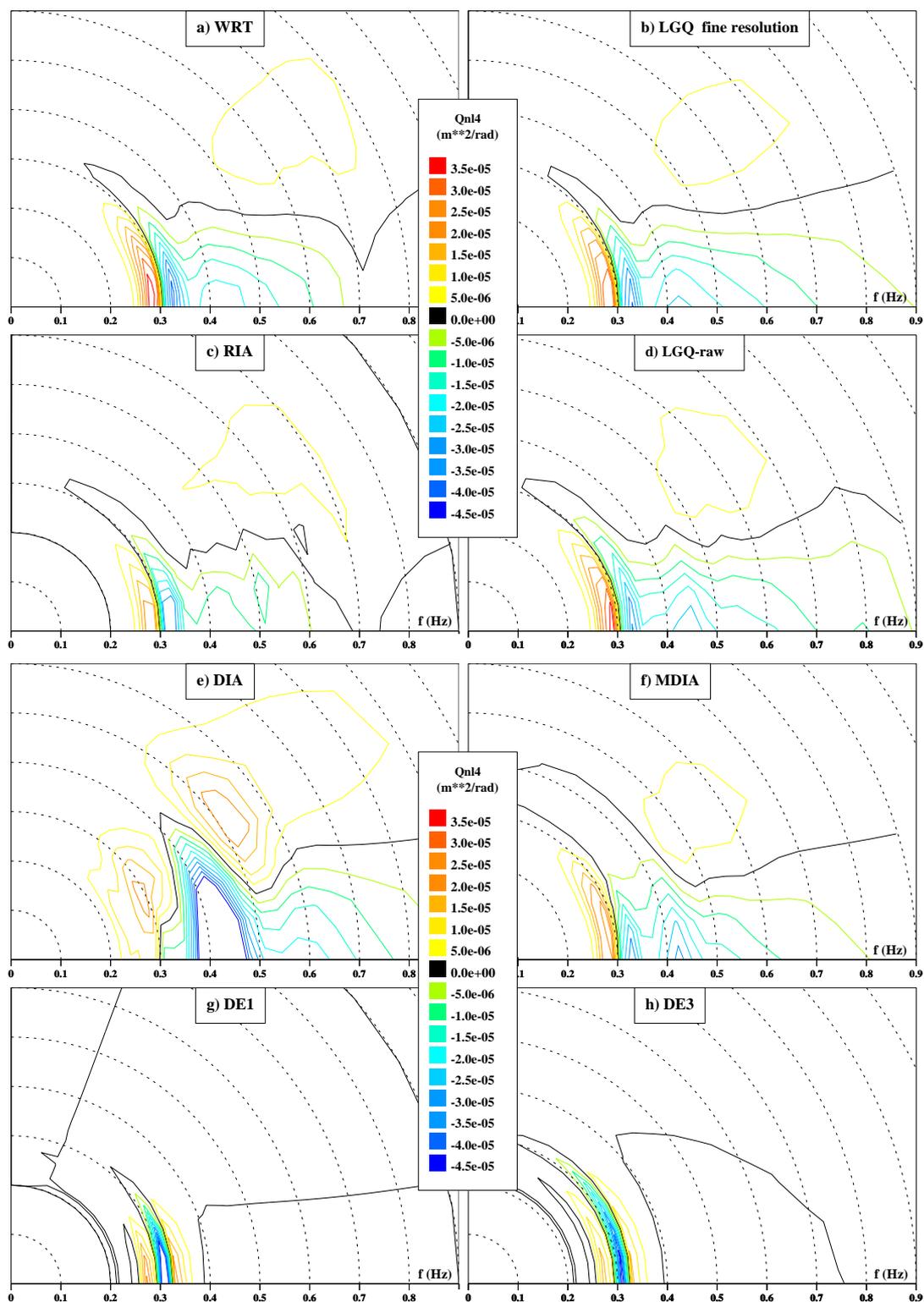


Fig. 2. Nonlinear transfer term $Q_{nl4}(f, \theta)$ computed for the test spectrum of Fig. 1 in deep water by the eight methods considered in this paper.

Finally the results of diffusion methods DE1 and DE3 plotted on Fig. 2.g, 2.h and 3 are quite similar for this test spectrum, but they show large differences with the exact transfer rate. The first (positive) lobe is present but with a lower amplitude, while the second (negative) lobe has a larger amplitude than the exact solution. These differences can not be resolved by tuning the single proportionality constant of the method in (12). More important, the transition between positive and negative transfer is shifted towards a lower frequency than f_p . In addition there is a spurious positive lobe just above f_p in the main direction and the high frequency structure of the transfer rate is quite different from the exact one. Additional computations (not reported here) show that the results are slightly improved when a finer frequency-direction grid is used for the spectrum. Although this method is faster than DIA (by a factor 2 approximately), our present analyses do not suggest that it can be regarded as a definite improvement compared to DIA, even for the recent variant DE3.

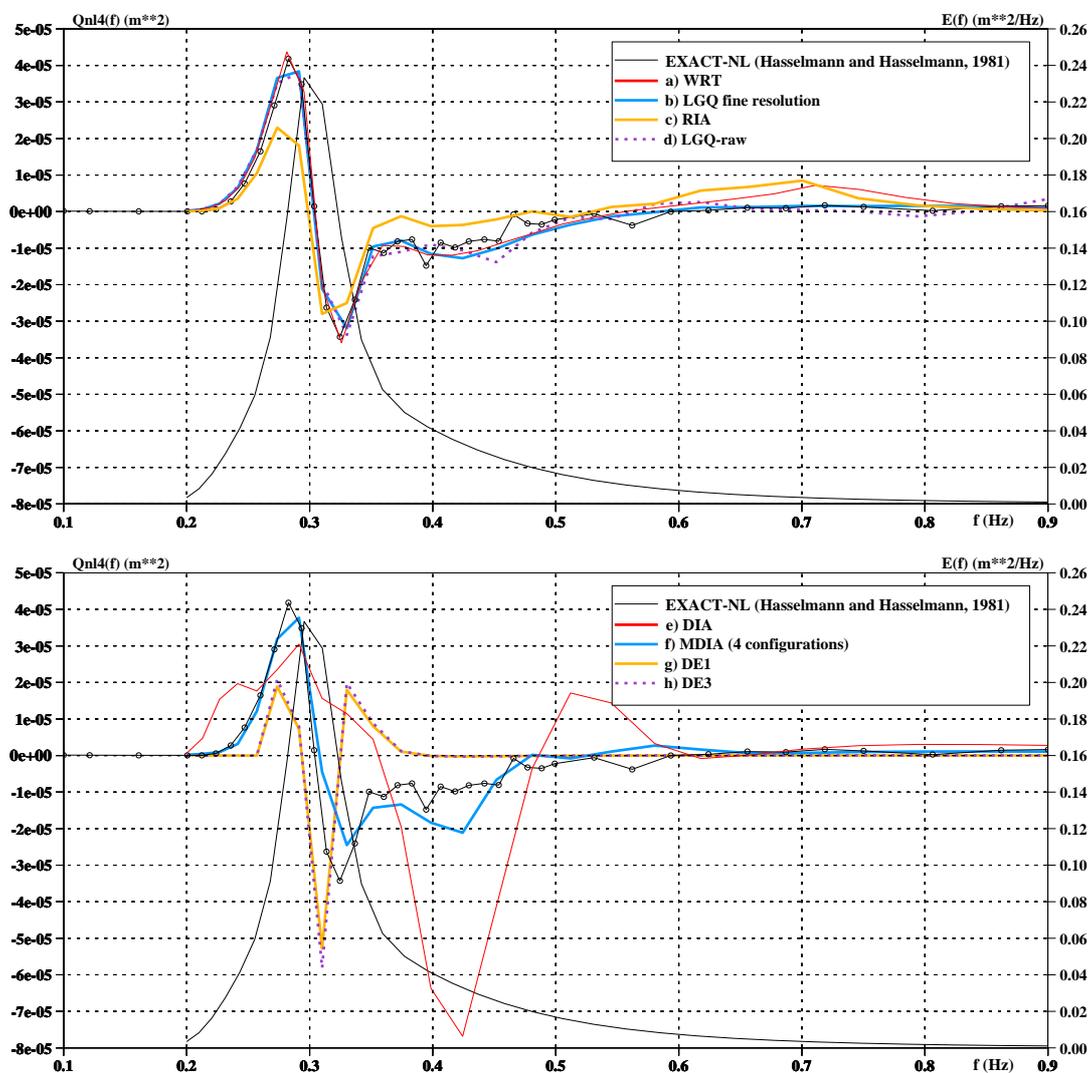


Fig. 3. Nonlinear transfer term $Q_{nl4}(f)$ computed for the test spectrum of Fig. 1 in deep water by the eight methods considered in this paper. These curves are obtained by integration over wave directions of the terms $Q_{nl4}(f, \theta)$ of Fig. 2.

CONCLUSIONS – FUTURE WORK

From this limited comparison (one single test spectrum presented here) the following provisional conclusions can be drawn:

1. The two “exact” methods tested in this study (WRT and LGQ) produce equivalent results when they are run with high precision. These results correspond to EXACT-NL results of Hasselmann and Hasselmann (1981).
2. It is confirmed that the original DIA is a crude approximation of the exact solution. Only some dominant features are present, but with significant errors.
3. The MDIA of Tolman (2004) significantly improves the results compared to the original DIA, but at the expense of an increase by a factor of 10 on CPU time. Furthermore its applicability to other different spectral shapes needs to be examined and confirmed by additional tests.
4. Diffusion-like operators do not appear as a suitable alternative, at least in the frame of the present application (with the adopted frequency-direction grid).
5. Finally, REM methods exhibit the higher capabilities, but the required CPU time is still in the order of 200-300 compared to DIA. Based on our preliminary experience, the LGQ method (Lavrenov 2001) seems more stable and versatile to pursue the optimization of a REM method, but additional tests are necessary.

Ongoing and future research will address the following objectives:

1. Optimization of the numerical algorithms of the most promising methods, namely MDIA, WRT and LGQ. It is anticipated that the optimal solution for operational use should lie between a MDIA with a higher number of configurations, and simplified versions of “exact” methods with a reduced set of configurations. Both directions seem interesting to be further investigated.
2. Extension of these methods to consider finite water depth, which is not so straightforward for some of them and will require specific attention and efforts.

REFERENCES

- Hashimoto, N., Tsuruya, H. and Nakagawa, Y. 1998. Numerical computations of the nonlinear energy transfer of gravity-wave spectra in finite water depths. *Coastal Eng. Journal*, 40, 23-40.
- Hashimoto, N. and Kawaguchi, K. 2001. Extension and modification of Discrete Interaction Approximation (DIA) for computing nonlinear energy transfer of gravity wave spectrum. *Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Waves Measurement and Analysis (ASCE)*, San-Francisco (California, USA), 530-539.
- Hasselmann, K. 1962. On the non-linear energy transfer in gravity-wave spectrum. Part I : General theory. *J. Fluid Mech.*, 12, 481-500.
- Hasselmann, S., and Hasselmann, K. 1981. A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum. *Hamburg Geo. Einzelschriften*, Report 1981-52.
- Hasselmann, S., and Hasselmann, K. 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in gravity-wave spectrum. Part I : a new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1369-1377.

- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.A. and Barnett, T.P. 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in gravity-wave spectrum. Part II : Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1378-1391.
- Herterich, K. and Hasselmann, K. 1980. A similarity relation for the non-linear energy transfer in a finite-depth gravity-wave spectrum. *J. Fluid Mech.*, 97, 215-224.
- Jenkins, A.D. and Phillips, O.M. 2001. A simple formula for nonlinear wave-wave interaction. *Int. Journal of Offshore and Polar Eng.*, 11(2), 81-86.
- Lavrenov, I.V. 2001. Effect of wind wave parameter fluctuation on the nonlinear spectrum evolution. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 861-873.
- Lin, R.Q. and Perrie, W. 1998. On the mathematics and approximation of the nonlinear wave-wave interactions. In "*Nonlinear Ocean Waves*", *Advances in Fluid Mechanics*, W. Perrie Ed., Comp. Mech. Publ., Southampton (UK), 61-88.
- Masuda, A. 1980. Nonlinear energy transfer between wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 2082-2093.
- Polnikov, V.G. 1997. Nonlinear energy transfer through the spectrum of gravity waves for the finite depth case. *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 1481-1491.
- Polnikov, V.G. 2002. A basing of the diffusion approximation derivation for the four-wave kinetic integral and properties of the approximation. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9, 355-366.
- Polnikov, V. G. and Farina, L. 2002. On the problem of optimal approximation for the four-wave kinetic integral. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9, 497-512.
- Pushkarev, A.N., Resio, D.T. and Zakharov, V.E. 2004. Second generation diffusion model of interacting gravity waves on the surface of deep fluid. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 329-342.
- Resio, D.T. and Perrie, W. 1991. A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions. Part 1: Methodology and basic results. *J. Fluid Mech.*, 223, 609-629.
- Tolman, H.L. 2004. Inverse modeling of Discrete Interaction Approximations for nonlinear interactions in wind waves. *Ocean Modelling*, 6, 405-422.
- Van Vledder, G.Ph., Herbers, T.H.C., Jensen, R.E., Resio, D.T. and Tracy, B.A. 2000. Modeling of non-linear quadruplet wave-wave interactions in operational wave models. *Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Eng.*, Sydney (Australia), 797-811.
- Van Vledder, G.Ph. 2001. Extension of the discrete interaction approximation for computing nonlinear quadruplet wave-wave interactions in operational wave prediction models. *Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Waves Measurement and Analysis (ASCE)*, San-Francisco (California, USA), 540-549.
- WAMDIG, 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1809.
- Webb, D.J. 1978. Non-linear transfers between sea waves. *Deep-Sea Research*, 25, 279-298.
- Young, I.R. and van Vledder, G.Ph. 1993. A review of the central role of non-linear interactions in wind-wave evolution. *Phil Trans. R. Soc. London*, A342, 505-524.
- Zakharov, V.E. 1968. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of deep fluid. *PMTF Zh. Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, 3, 80-94.
- Zakharov, V.E. and Pushkarev, A.N. 1999. Diffusion model of interacting gravity waves on the surface of deep fluid. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 6, 1-10.

ANNEXE 5

Auteurs : **Michel BENOIT**, Florence LAFON*
* *EDF R&D LNHE (Chatou)*

Titre : A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modelling of wave climate over 25 years.

Année : 2004.

Source : Proceedings 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'2004), 19-24 Septembre 2004, Lisbonne (Portugal), pp 714-726.

**A NEARSHORE WAVE ATLAS ALONG THE COASTS
OF FRANCE BASED ON THE NUMERICAL MODELING
OF WAVE CLIMATE OVER 25 YEARS**

MICHEL BENOIT, FLORENCE LAFON

*EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)
6 quai Watier, BP 49, 78400 Chatou, France*

A first version of a numerical wave data-base along the French Atlantic coasts, the English Channel and the North Sea has been built by hindcasting sea-state conditions over a period of 25 years (1979-2003) with the TOMAWAC wave model. Two sources of wind-data have been considered and two nested grids have been used, in order to reach a resolution of about 3 km along the coasts. The results of the various runs are analysed and discussed, by comparing models' results with buoy data over a period of 2 years (1999 and 2000). From the first version of the data-base statistical analyses are performed in order to build synthetic charts showing average values of the wave climate, as well as wave heights which are exceeded 10 % or 1 % of time. Finally a preliminary estimation of extreme wave heights is tentatively obtained for the coarser model.

1. Introduction – Scope of the study

A research project has been set up with the objective to improve our knowledge of the wave climate along the French Atlantic coasts, in the English Channel and in the North Sea. It aims at building a data-base of continuous series of sea-state parameters (e.g. significant wave height, mean and peak periods, mean direction, directional spreading,...) with high spatial resolution. This is achieved by performing hindcast simulations of wave conditions over a period of 25 years (1979-2003) driven by re-analyzed wind fields.

From these data statistical analyses can be carried out in order to characterize the average wave climate as well as the extreme values of wave height, corresponding to various return periods. Such a data-base will be helpful for a number of applications, e.g. building charts showing wave statistics and areas of potential risks, allowing a better design and reducing costs of sea defenses, obtaining accurate wave climate data for modeling coastal morphodynamics and littoral changes, evaluating available wave power, etc.

The methodology is based on the use of the TOMAWAC spectral wave software applied to two nested grids (Section 2) driven by re-analyses wind-fields which are provided over the models' grids for the target period of time (Section 3). Models' results are compared with buoy data in order to examine the effect of the source of wind data (Section 4) and the influence of model's grid (Section 5). In Section 6 synthetic charts showing average or high values of significant wave

height are built by statistical analysis of the hindcast results. Finally a tentative analysis of extreme wave heights is performed in Section 7 on the coarser grid, but this first version still needs to be validated and improved.

2. Description of the numerical models used for the hindcast runs

2.1. *The third-generation spectral wave code TOMAWAC*

The simulations are performed with the third generation spectral wave model TOMAWAC (Benoit *et al.* 1996), which is part of the TELEMAC hydro-informatics suite, developed at EDF-LNHE. TOMAWAC solves the wave action density balance equation (e.g. Bretherton and Garret 1969, Komen *et al.* 1994) and models the evolution (in space and time) of the directional wave spectrum, under unsteady wind forcing. It takes into account the input of energy from the wind, nonlinear wave-wave interactions, as well as dissipation due to white-capping, bottom friction and depth-induced breaking in shallow-water. A feature of high interest of TOMAWAC for nearshore and coastal applications is the use of unstructured spatial grids, which allows to refine the mesh in areas of complex bathymetry and irregular shoreline. The model has already been validated for the hindcast of several real storms (Benoit *et al.* 1996, Aelbrecht *et al.* 1998).

For this project, two nested numerical grids have been set up at different scales (see Sections 2.2 and 2.3). For both models the wave spectrum grid uses 21 frequencies on a logarithmic scale with $\Delta f/f = 0.122$ (between 0.04 Hz and 0.4 Hz) and 36 directions (constant angular resolution of 10 deg.). Output time-step for the results is 1 h. Both models are run with steady-state water levels (corresponding to mean tidal level) and without tidal current effects, although the code may deal with unsteady currents and water levels. Coupled runs with the flow model TELEMAC-2D allowing to study the interactions between waves, tides and storm surges will be addressed in a future phase of this project.

2.2. *The OCEANIC wave model*

The coarser model (called OCEANIC model) covers the northern part of the Atlantic Ocean (30°N to 70°N in latitudes and 50°W to 10°E in longitudes), with a grid of variable mesh size, from about 1 degree offshore down to 20 km along the French coastline (see Figure 1). The spatial grid comprises 2279 nodes and 4218 triangles. No wave spectra are imposed at the boundaries of this model: all the wave energy is generated inside the domain. Some finite depth effects are active in the simulations (refraction, shoaling, bottom friction), but not depth-induced breaking. The computational time-step is 15 min, which permits the simulation of a whole year in about 14 h of CPU time on a basic workstation (model HP 9000/785-C3700 – 750 MHz – 2 Gb RAM).

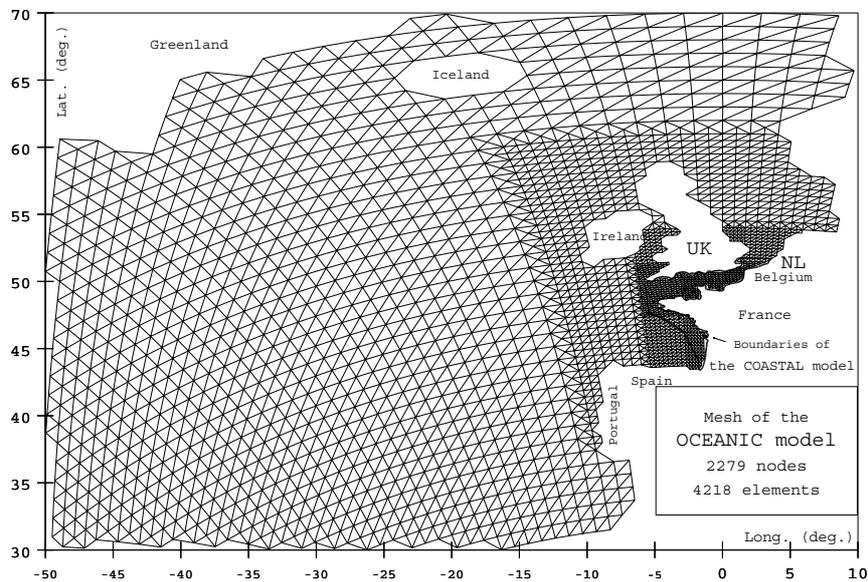


Figure 1 – Spatial mesh of the OCEANIC model.

2.3. The COASTAL wave model

The fine model (called COASTAL model) covers the European continental shelf and the English Channel (see Figure 2). The spatial mesh is composed of 5028 nodes and 9261 triangles with a fine resolution of about 2 to 3 km over the nearshore domain and along the French coasts. Shallow-water processes (including breaking) are considered in this model, which uses on its boundaries the directional spectra provided by the OCEANIC model. The computational time-step is 4 min and the required CPU time to model a whole year is about 5 days on the same workstation as mentioned in the previous section.

3. Wind data used for the hindcast runs

Two sources of wind-fields (two components of U_{10} , the speed at 10 m above sea level) are considered and linearly interpolated on the computational grids:

- Winds from the ERA-40 reanalysis from the European Center for Medium-range Weather Forecast (ECMWF). They are provided every 6 hours over a rectangular grid of resolution 0.5 degree, both in latitude and longitude.
- Winds from the NOAA/NCEP reanalysis (version 2), available on Internet (see www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis2.html). They are also provided every 6 hours, but over a much coarser grid (global Gaussian grid T62 which mesh size is about 1.875 degrees).

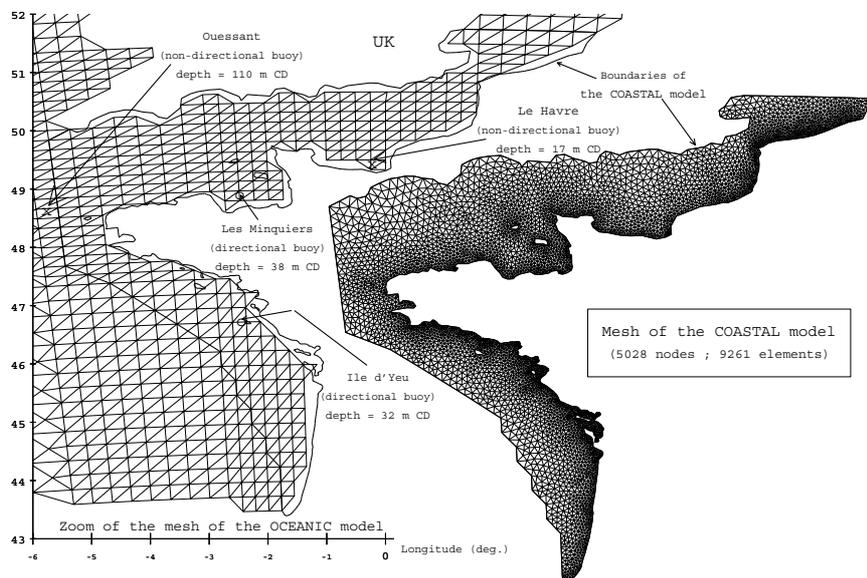


Figure 2 – Mesh of the COASTAL model (right panel) compared with the mesh of the OCEANIC model zoomed near the French coasts (left panel), with the locations of wave buoys used in this study.

4. Effect of the source of wind data (OCEANIC model runs)

In a first step we examine the influence of the source of wind data by performing hindcast runs over a period of 2 years (1999 and 2000) with the OCEANIC model only. In both cases, all options and parameters of TOMAWAC (time-step, source and sink terms, etc.) are the same, the only difference being the wind fields, either ECMWF or NCEP2 winds.

A brief comparison of the two sources of wind data revealed that the NCEP2 wind speeds are in general higher than the ECMWF ones, and this is particularly noticeable for the highest wind speeds. In order to use the wave model with the same settings and parameters, we decided to apply a correction factor to the wind speeds. After some tests and calibration runs, the ECMWF winds were increased by 2 % to 10 % depending on the wind speed U_{10} , and the NCEP2 winds were reduced by 10 % uniformly.

Models' results (in particular the significant wave height H_{m0} , the mean period $T_m = T_{02}$ and the main incoming wave direction θ_m) are compared with measurements from buoys of the French network operated by the CETMEF. Four measuring buoys are considered in this paper: two of them are directional wave buoys (Ile d'Yeu and Les Minquiers) and the two other ones are non-directional buoys (Ouessant and Le Havre). The locations of these buoys are indicated on Figure 2. Two of them are exposed to waves and swell coming from the Atlantic

The time series of both H_{m0} and T_m are fairly well reproduced by the model, with the two sources of wind data. One can note that the largest peaks of computed H_{m0} are higher for the NCEP2 winds than for the ECMWF winds (in particular during the storms of the end of December 1999). The evolution of the computed mean period compares favorably with the measured one, even for a succession of swell and wind-sea events (see Figure 3.d at Les Minquiers).

However such temporal profiles of wave parameters do not permit a detailed and quantitative comparison of model's performances. To that end so-called Q-Q plots are drawn which show the correspondence between measured and computed quantiles (from 1 % to 99 %) of the statistical distribution of H_{m0} over the two years 1999 and 2000 (see Figure 4). We also compute some quantitative measures of the agreement between the measured and computed times series of H_{m0} (see Table 2). The analysis of this information clearly confirms that the wave heights obtained from the NCEP2 winds are higher than the ones obtained from ECMWF winds. This is particularly noticeable for the locations exposed to Atlantic wave climate (Ouessant and Ile d'Yeu), whereas the differences for the buoys located inside the Channel are significantly weaker. The differences between measurements and model's results at Ouessant are partly explained by some limitations of the buoy (this was checked and confirmed by CETMEF).

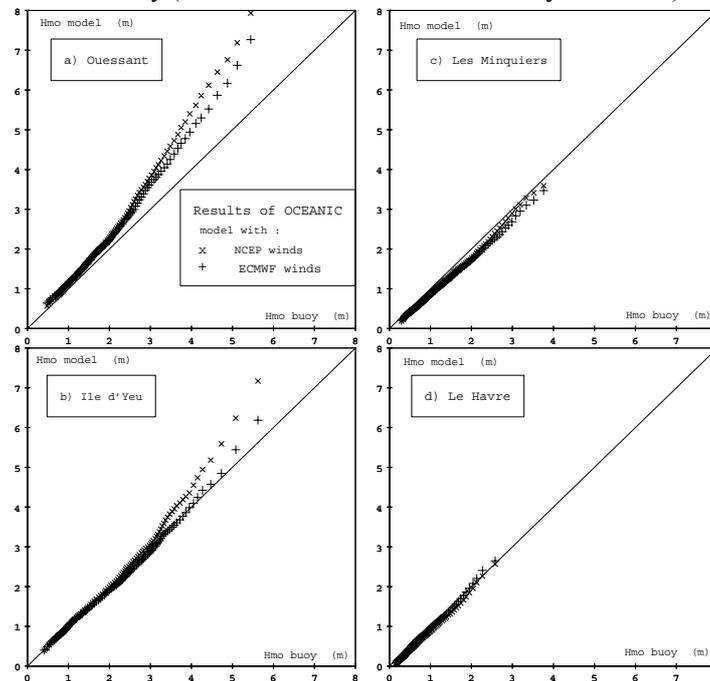


Figure 4 – Q-Q plot of significant wave height H_{m0} for the years 1999-2000 at the 4 wave buoys. a) Ouessant ; b) Ile d'Yeu ; c) Les Minquiers ; d) Le Havre.

Table 2. – Quantitative measures of model's performance on the variable Hmo for the 4 wave buoys for the years 1999-2000

	Mean absolute error (m)		Root mean square error (m)		Slope of the regression line	
	ECMWF	NCEP2	ECMWF	NCEP2	ECMWF	NCEP2
Winds						
Ouessant	0.45	0.57	0.63	0.88	1.24	1.39
Ile d'Yeu	0.27	0.37	0.37	0.59	0.98	1.11
Les Minquiers	0.25	0.27	0.33	0.37	0.87	0.90
Le Havre	0.19	0.24	0.27	0.34	0.93	0.84

In general the comparison with buoy data is also better for the results obtained with the ECMWF winds as it can be seen from Table 2. The mean absolute error and the root mean square error at the four buoys are lower when ECMWF winds are used. The slope of the regression line does not reflect any systematic bias in the model. It is closer to 1 for the results obtained with ECMWF wind fields, except at Les Minquiers where the OCEANIC model tends to slightly underestimate the wave height. It is likely that the results obtained with the NCEP2 winds could be improved by further correction of the wind speeds or calibration of the wave model, but this was not undertaken in the frame of this project. It should also be reminded that the mesh size of NCEP winds is almost 4 times the one of ECMWF winds (see Section 3).

One should also note that the results obtained at Le Havre (in rather shallow water, 17 m CD) and with this coarse grid (see Figure 1) are remarkably good compared with buoy data. Such a good agreement was not expected from the OCEANIC model, but it indicates that its results may still be used with confidence even quite close to the coast.

On Figure 5 a similar Q-Q plot is presented for the mean wave period over the years 1999-2000. A very good agreement is observed at the directional buoys of Ile d'Yeu and Les Minquiers. The effect of the source of wind is weak. In general the mean periods obtained from NCEP2 winds are a little bit higher. Limitations of the buoys regarding the range of recorded periods explains to a large extent the different pattern observed at Ouessant and Le Havre. At Ouessant for instance, it can be seen from Figure 5.a that the periods measured by the buoy do not exceed 10 s which is obviously not the case in reality as this location is largely exposed to Atlantic swell. Similarly the buoy at Le Havre does not indicate periods higher than 7 s which again are known to sometimes occur.

Finally for the mean wave direction (analyzed at the directional buoys of Ile d'Yeu and Les Minquiers only) good and very similar results are obtained from the two sources of winds, but are not presented here.

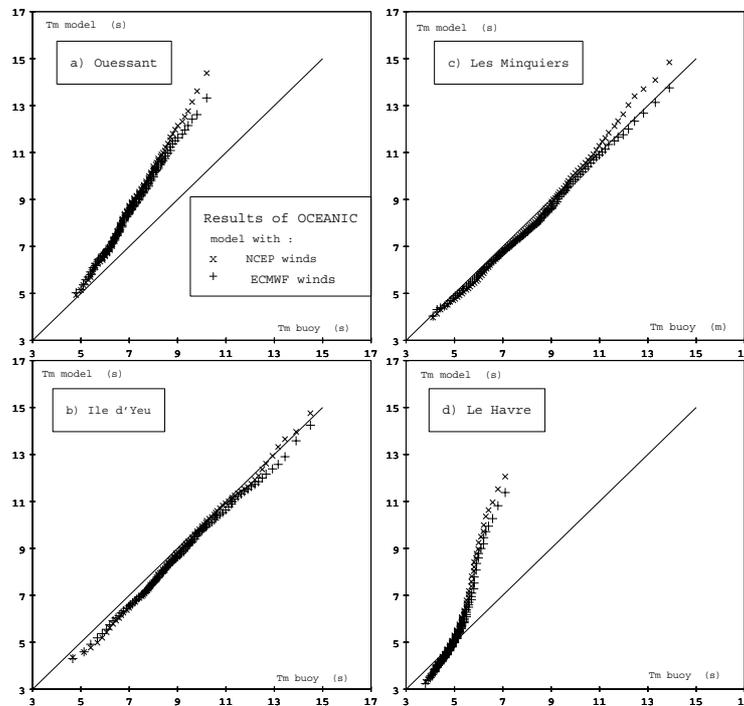


Figure 5 – Q-Q plot of mean period T_m for the years 1999-2000 at the 4 wave buoys.
 a) Ouessant ; b) Ile d'Yeu ; c) Les Minquiers ; d) Le Havre.

5. Improvements brought by the COASTAL grid (ECMWF winds only)

We then examine the influence of using a finer grid, namely the COASTAL model (see Section 2.3 and Figure 2) driven at its boundaries by wave spectra computed by the OCEANIC model. For this purpose we only present one case corresponding to the year 1999 and the use of ECMWF wind fields. The COASTAL model uses the same physical parameters and options as the OCEANIC model except that depth-induced breaking is activated (formulation of Battjes and Janssen 1978). The time-step is decreased to 4 min to accommodate for the finer mesh size.

Although time series of various parameters can again be plotted, we only present below the Q-Q plots for the wave height H_{m0} at the 3 buoys of Ile d'Yeu, Les Minquiers and Le Havre (see Figure 6). The most offshore buoy of Ouessant is outside the grid of the COASTAL model. The analysis of this figure shows that there is almost no differences between the two models for the location of Ile d'Yeu. This is not surprising for two reasons: first, this area is characterized by intermediate water depths (32 m CD) where shallow water effects are not expected to be significant and, second, its exposition to incoming waves from the Atlantic Ocean is very well resolved by the OCEANIC grid.

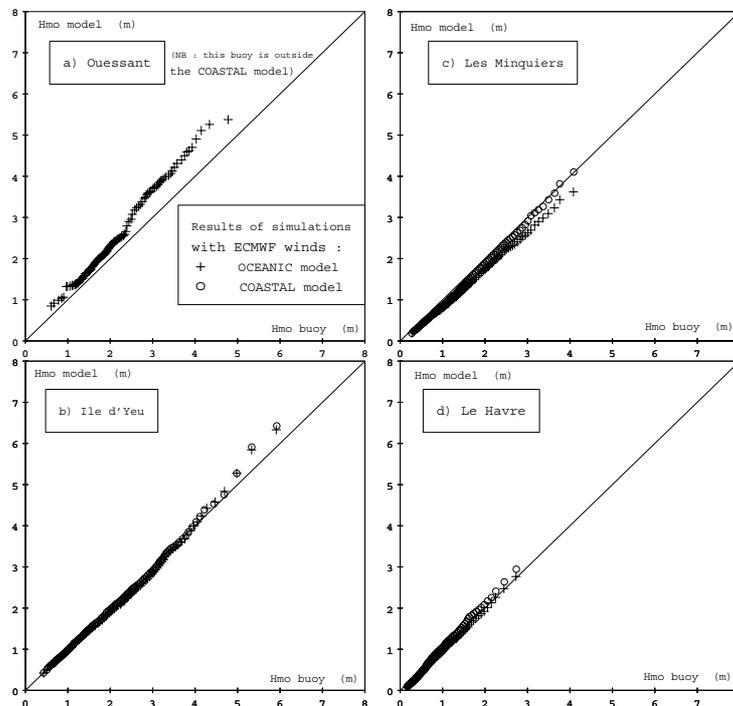


Figure 6 – Q-Q plot of significant wave height H_{mo} for the year 1999 at the 4 wave buoys.
a) Ouessant ; b) Ile d'Yeu ; c) Les Minquiers ; d) Le Havre.

At the location of Les Minquiers (see Figure 6.b) the computed wave heights are greater with the COASTAL model and the agreement of model's results with buoy data is significantly improved, even for the highest sea-states of the distribution. In this case the better representation of the maritime domain and its bathymetry brought by the COASTAL grid is evident. Finally at Le Havre we again note an increase of the wave heights in the results of the COASTAL model. There the computed wave heights are a little bit higher than the measured ones but the overall agreement remains good.

6. Synthetic charts of some representative wave heights

At the present stage of the project not all the ECMWF wind data over the period 1979-2003 were available to us for the hindcast runs, so we only performed the first complete hindcast run over this period of time with the NCEP2 wind data, although we found in Section 4 that better results were obtained with ECMWF wind data over a limited period of time. The first version of the complete hindcast simulation (termed NCEP2_A) must thus be regarded as preliminary and will be completed soon by similar hindcast runs driven by ECMWF winds.

Simulations results are presented here for the OCEANIC grid only. Results on synthetic wave parameters (H_{m0} , T_m , θ_m, \dots) are stored at each node of the computational grid every hour over the 25 years. Then a statistical analysis is automatically performed at each node so as to determine the histogram of each wave parameter, the joint distribution of H_{m0} and T_m , or H_{m0} and θ_m , etc. as it is usually done for buoy data in order to prepare synthetic plots describing the wave climate. Here we present some results from the statistical analysis of the distribution of the wave height H_{m0} . Figure 7 presents two plots representing average wave heights: the (arithmetical) mean of H_{m0} over the whole period (see Figure 7.a) and the median value of H_{m0} (value which is exceeded half of time) (see Figure 7.b). The spatial distribution of these two wave heights is quite similar with a difference of about 0.3 to 0.6 m over the plotted area, the median height being lower than the mean height.

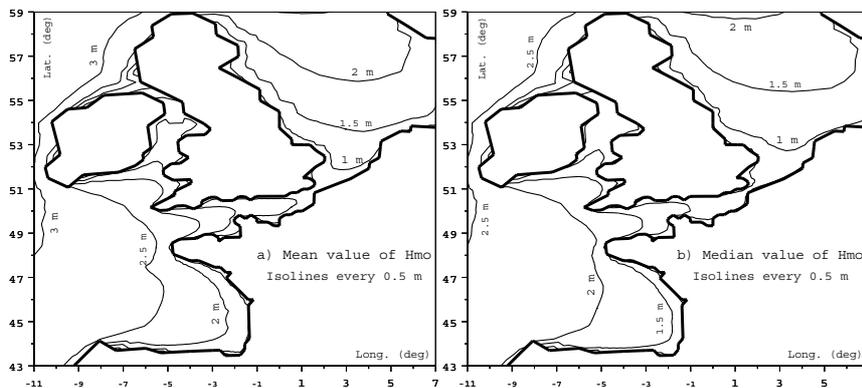


Figure 7 – Charts of the mean value (a) and median value (b) of wave height H_{m0} computed over the period 1979-2003 with the OCEANIC model driven by NCEP wind fields.

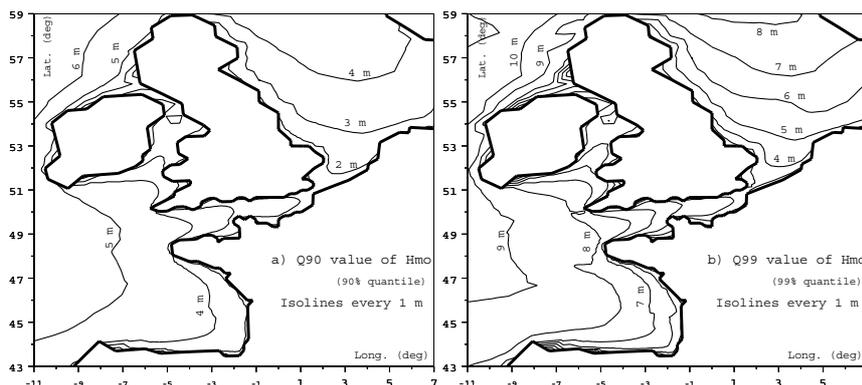


Figure 8 – Charts of the Q90 value (a) and Q99 value (b) of wave height H_{m0} computed over the period 1979-2003 with the OCEANIC model driven by NCEP wind fields.

In addition to these average wave heights other interesting wave heights can be computed from the simulated distribution of wave heights. In particular it is possible to draw plots of Q_{nn} value of wave height (nn lying between 0 and 100) which corresponds to the value which is not exceeded nn % of time (or which is exceeded $(100-nn)$ % of time. To illustrate this we present on Figure 8 charts corresponding to the Q_{90} and Q_{99} values of H_{mo} , i.e. the values which are exceeded only 10 % and 1 % of time respectively. This kind of figures provides a quick overview of the highest computed sea-states conditions over the European continental shelf, the Bay of Biscay, the Channel and the North Sea. The general pattern is quite similar between the two plots of Figure 8, but the wave heights are significantly higher for the Q_{99} wave height: there is a factor of about 1.7 to 2 between the H_{mo_Q90} et H_{mo_Q99} over the plotted area.

7. Tentative estimation of extreme wave heights

In the previous section we considered the largest wave heights over the simulated period. Another point of interest is the estimation of extreme values of wave heights, which have a return period higher than the duration of the available sample. This is a frequent question in marine engineering. Specific extreme value analysis methods have been developed to perform this extrapolation and are currently applied to buoy data (e.g. Mathiesen et al. 1994, Goda 2000). Although, as already mentioned in the previous section, more reliable hindcast results are expected from the ongoing runs driven by the ECMWF wind fields, we tentatively apply the extreme value analysis to the results obtained over the period 1979-2003 with the NCEP2 wind data, so has to have a first insight on the distribution of extreme wave heights.

The methodology used for this purpose is based on the following steps (automatic treatment of all grid nodes of the OCEANIC model):

- Selection of samples of storm events. We use the Peaks Over Threshold (POT) method to build a set of storm events. The threshold H_o for H_{mo} is node-dependent and is chosen as the Q_{95} value of the local distribution of H_{mo} (the value which is exceeded only 5 % of time). With this threshold 250 to 400 events are selected over the 25 years period (i.e. 10 to 16 events per year). It was also checked that these events are independent.
- Fit of a distribution of wave heights. Somewhat arbitrarily we selected a two-parameter Weibull model for the distribution of the significant wave height H_{mo} :

$$F(H) = 1 - \exp\left(-\rho(H - H_o)^p\right)$$

A Maximum Likelihood Method is used to determine the shape parameter P and the scale parameter ρ of the distribution at each grid-point.

- Compute the values of significant wave height for given return periods and the associated confidence interval. For the Weibull distribution the wave height H_T which has a return value of T years is obtained as:

$$H_T = H_o + \left(\frac{1}{\rho} \ln(12\mu.T) \right)^{1/P}$$

where μ is the average number of storm events per month (or 12μ is the average number of storm events per year).

Examples of results obtained along these lines are presented on Figure 9 for the significant wave height which has a return period of 50 years (twice the duration of the sample). For the reasons stated above, it is emphasized that the results are provisional and need to be compared with results obtained from the ECMWF wind data and with extrapolation performed from buoy data as well.

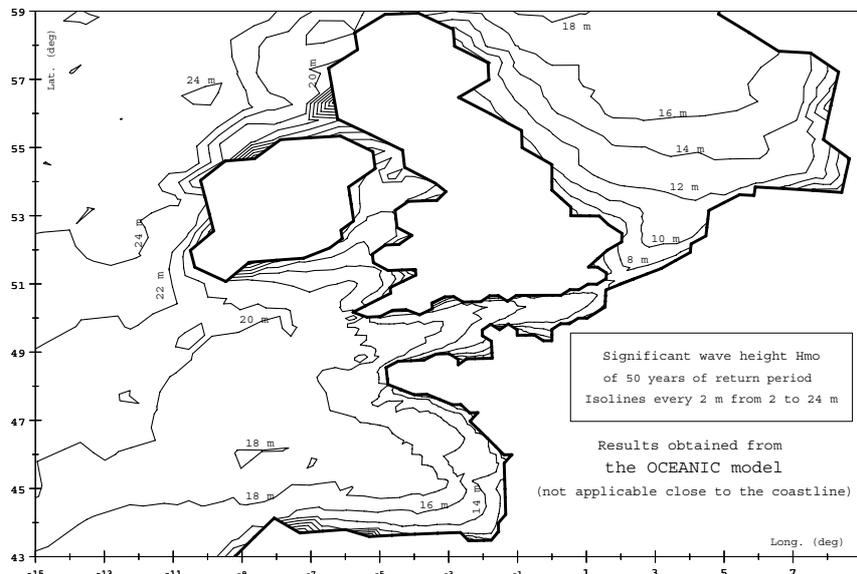


Figure 9 – Chart of the extreme wave height with return period of 50 years computed over the period 1979-2003 with the OCEANIC model driven by NCEP wind fields.

8. Conclusions and future work

With the aim of producing a continuous data-base of sea-states along the coasts of France, in the Channel and the North Sea by hindcast over the period 1979-2003, two efficient numerical models (OCEANIC and COASTAL models) have been built and calibrated on the basis of the third-generation wave code TOMAWAC.

Several sensitivity runs have been performed, some of them being outlined in this paper. Two sources of re-analyzed wind data were considered (ERA-40 re-analysis from ECMWF and version 2 of the NOAA/NCEP reanalysis) and it was

shown by comparison with buoy measurements over a period of 2 years that better results are obtained with ECMWF winds (wave heights seem to be overestimated in the results obtained with NCEP winds). We also noted that the COASTAL model improves the results of the OCEANIC model in particular inside the Channel or close to the coastline, when the contour of the maritime domain and/or the bathymetry are not well resolved by the coarser grid.

A first version of the hindcast results over 25 years is available for the OCEANIC grid (resolution of 20 km along French coasts) on the basis of NCEP winds. Procedures for statistical analysis have been developed which allow to draw charts of various wave heights, representative of the local wave climate.

Ongoing work deals with the simulation of the 25 years period with the COASTAL model driven by ECMWF winds, with particular examination of shallow water effects. Next, statistical treatments of results such as those presented in the paper will be performed for both models (average wave climate and extreme values of wave heights associated with different return periods).

Acknowledgements

This project is a joint collaboration between EDF-LNHE, CETMEF and Météo-France. The authors gratefully acknowledge the financial support of the French Ministry in charge of the Sea, through the CETMEF (Grant n°02000322).

References

- Aelbrecht, D., M. Benoit, F. Marcos, and G. Goasguen. 1998. Prediction of offshore and nearshore storm waves using a third generation spectral wave model, Proc. 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE), vol. III, 71-76.
- Battjes, J.A., and J.P.F.M. Janssen. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 569-587.
- Benoit, M., F. Marcos, and F. Becq. 1996. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing, Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 465-478.
- Bretherton, F.P., and C.J.R. Garret. 1969. Wavetrains in inhomogeneous moving media, Proc. Roy. Soc. London, Series A, 302, 529-554.
- Goda, Y. 2000. Random seas and design of maritime structures, Advanced Series on Ocean Eng., 15, World Scientific Publishing (Singapore), 444 p.
- Komen, G.J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P.A.E.M. Janssen. 1994. Dynamics and modeling of ocean waves, Cambridge Univ. Press, 532 p.
- Mathiesen, M., Y. Goda, P.J. Hawkes, E.P.D. Mansard, M.J. Martin, E. Peltier, E.F. Thompson, and G.P. van Vledder. 1994. Recommended practice for extreme wave analysis, Journal of Hydraulic Research, 32(6), 803-814.

ANNEXE 6

Auteurs : Françoise BECQ-GIRARD*, Philippe FORGET**, **Michel BENOIT**

** Etudiante en thèse, EDF R&D LNHE et Université du Sud Toulon Var*

*** Université du Sud Toulon Var (LSEET-LEPI)*

Titre : Non-linear propagation of unidirectional wave fields over varying topography.

Année : 1999.

Source : Coastal Engineering, Vol. 38, N°2, pp 91-113.



ELSEVIER

Coastal Engineering 38 (1999) 91–113

**COASTAL
ENGINEERING**

www.elsevier.com/locate/coastaleng

Non-linear propagation of unidirectional wave fields over varying topography

Françoise Becq-Girard ^{a,1}, Philippe Forget ^{b,2}, Michel Benoit ^{a,*}

^a EDF, Laboratoire National d'Hydraulique, 6 quai Watier, Chatou 78 400, France

^b LSEET, Université de Toulon et du Var, BP 132, La Garde 83 957, France

Received 2 June 1998; accepted 21 April 1999

Abstract

The present study aims at investigating the non-linear triad interaction process affecting shoaling surface gravity wave fields. The triad interaction phenomenon being enhanced towards the shore, the domain of study is extended up to the surf zone. Three 1D non-linear wave models (one phase-resolving and two phase-averaged spectral models) have been implemented and compared to laboratory experiments performed in a wave flume. This set of models includes two existing models and a new one which has been developed in the frame of this work. The models include a breaking dissipation term based on the parametrical model of Battjes and Janssen [Battjes, J.A., Janssen, P.A.E.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng. (ASCE), Vol. 1, pp. 569–587.]. The investigations concern the evolution of variance spectra, spectral significant wave height and mean period over a barred bathymetric profile. In addition, the performances of the different models are analysed by computing the spectral source term for triad interactions. We found that all models are able to reproduce the main features of non-linear mechanisms affecting a wave field in the near-shore zone. The phase-resolving model gives the most accurate results for non-breaking situations. It correctly reproduces the non-linear coupling effect in decreasing water depths due to wave–wave interactions, as well as the harmonic release after a bar. However, the model is computationally time-consuming. The CPU time is considerably reduced using phase-averaged models. They give satisfactorily results on harmonic generation. However, they do not reproduce the release of harmonics as water depth increases. In breaking conditions, the variance spectra undergo significant changes under the combined effects of non-linear energy transfers and dissipation. The

* Corresponding author. Tel.: +33-1-30-87-72-70; fax: +33-1-30-87-80-86; E-mail: michel.benoit@edf.fr

¹ Present address: OPTIMER, 21 rue Jean Macé, Brest 29200, France. E-mail: girard@optimer.fr.

² E-mail: forget@lseet.univ-tln.fr.

depth-induced wave breaking model included in the equations provides a good estimate of the energy decay in the surf zone. © 1999 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Non-linear shoaling; Deterministic model; Stochastic model; Boussinesq equations; Wave breaking

1. Introduction

Accurate estimation of wave properties in the coastal zone is of major concern for many applications such as the design of coastal structures and the study of morphological evolutions (hydrodynamics and stress at the bottom, sediment transport, etc.). Unlike the offshore region, the coastal zone is characterised by numerous different processes (refraction, diffraction, shoaling, non-linear interactions, breaking, etc.), which may act simultaneously and generate strong modifications of the wave field. This study focuses on non-linear triad interactions and depth-induced wave breaking. Non-linear interactions between triplets of waves are characterised by cross-spectral energy transfers and modal phase modifications as waves propagate shorewards in the shoaling zone (Freilich and Guza, 1984; Liu et al., 1985). As triad interactions lead to skewed wave profiles characterising near-breaking conditions and as shallower water yields stronger interactions, the surf zone must be included in the domain of interest.

Wave propagation models can be split into two major classes. Deterministic (phase-resolving) models have been extensively used to study the non-linear shallow water effects. Generally, these models use Fourier expansions to represent in the frequency domain either variants of the Boussinesq equations (Freilich and Guza, 1984; Madsen and Sorensen, 1993; Nwogu, 1993), or the Korteweg de Vries equation (Mei, 1983; Mase and Kirby, 1992) or directly the boundary-value problem for Laplace equation (Agnon et al., 1993; Kaihatu and Kirby, 1995; Eldeberky and Madsen, 1998). This class of models is computationally time-consuming because equations governing both amplitude and phase variations along the bathymetric profile must be solved simultaneously with a fine spatial discretisation.

Stochastic (phase-averaged) models are commonly used for applications in open ocean conditions because wind-generated waves have essentially random phases and because the determination of phase-averaged quantities such as the energy spectrum reduces in a significant way the computational cost (Battjes, 1994). These models solve the energy balance equation which can be extended to the coastal zone by including spectral source terms associated with wave propagation in shallow water (bottom dissipation, depth-induced wave breaking, non-linear triplets interactions, etc.). The fundamental problem in the derivation of a spectral source term for non-linear wave-wave interactions is the closure of the infinite set of interconnected equations governing the evolution of the spectral moments. Abreu et al. (1992) first presented a non-linear spectral wave transformation model simulating combined refraction, shoaling and triad interactions effects. The model is based on Hamilton equations for weakly non-linear shallow water (non-dispersive) waves (Zakharov, 1968) and uses the asymptotic closure of Newell and Aucoin (1971). The energy transfer mechanisms are supplied by two terms representing, respectively, the resonance between collinear interacting waves and

an angular redistribution of energy. The first term depends on products of lower-order moments and the second has a natural asymptotic closure due to the dispersive effect of waves travelling in different directions. Thus, the model cannot be restricted to unidirectional situations.

Holloway (1980) studied the triad interactions of oceanic internal waves and proposed a new closure hypothesis. The originality of his work was to take into account the fourth-order cumulant in the moment equations, in contrast to the quasi-Gaussian hypothesis commonly used (Zakharov et al., 1992; Eldeberky and Battjes, 1995). Holloway (1980) assumes that the sum over fourth-order moments draws some contribution from third-order moments through a coupling coefficient, interpreted as a broadening of the resonance condition. Eldeberky et al. (1996) adapted the model for surface gravity waves by using the so-called Zakharov equation (Zakharov et al., 1992; Stiassnie and Shemer, 1984) and by considering the coupling coefficient as a constant to be determined empirically. Simulation results were compared to laboratory measurements. As numerical results did not always fit the measurements, Eldeberky et al. (1996) recommended the use of the Lumped Triad Approximation (LTA) model proposed by Eldeberky and Battjes (1995). This parameterised approach to model the phase-averaged effects of triad wave interactions is derived from the deterministic model of Madsen and Sorensen (1993). This model is restricted to self–self interactions and therefore results in a high computational efficiency. It has been already implemented in the spectral wave model, SWAN (Ris, 1997).

More recently, new stochastic models have been proposed by Herbers and Burton (1997) and Agnon and Sheremet (1997). They are, respectively, derived from the deterministic model of Freilich and Guza (1984) and from the work of Agnon et al. (1993). These two models apply to directional wave fields propagating over a sloping beach with parallel depth contours and solve coupled equations governing the evolution of the variance density and the bispectrum (or a function containing implicitly the information about the bispectrum). The simultaneous integration of variance spectrum and bispectrum is, however, too time-consuming for operational applications. Furthermore, it is not straightforward to extend this formalism to fully bidimensional situations. The problem concerns the derivation of the evolution equation for the bispectrum, since it is composed of three distinct spectral components which propagate along their own wave ray. For this reason, implementation of this latter approach in the spectral wave model, TOMAWAC (Benoit et al., 1996), developed at Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) cannot be considered.

Analyses and comparisons of the above-mentioned models and formalisms have been performed in a detailed way by Becq (1998). The results incited us to develop stochastic models based on the works of Agnon et al. (1993) and Madsen and Sorensen (1993) and using the statistical closure proposed by Holloway (1980).

The present work aims at studying and comparing three such non-linear models of wave propagation in shallow water (one deterministic and two stochastic models). They are based on the extended spectral Boussinesq equations of Madsen and Sorensen (1993) in order to focus on the effects of statistical closure and parameterisations. The models are presented in Section 2. They have been extended to the surf zone by including in the equations a damping term based on the parametrical model of Battjes and Janssen

(1978). The spectral distribution of the total dissipation term is described in Section 3. The performances of the non-linear models are compared to data collected during laboratory experiments performed in a wave flume at LNH. Observations and model predictions are compared in Section 4. Summary and conclusions are drawn in Section 5.

2. Presentation of the models

2.1. Deterministic model

Madsen and Sorensen (1992) derived a new form of the Boussinesq equations. These equations are expressed in terms of sea surface elevation and depth-integrated velocity components. They include a linear dispersion parameter B improving the linear shoaling and dispersion mechanisms. The dispersion relationship reads:

$$\frac{\omega^2 h}{g} = \frac{k^2 h^2 (1 + Bk^2 h^2)}{1 + (B + 1/3)k^2 h^2}, \quad (2.1)$$

where ω is the angular frequency, k is the wavenumber, h is the water depth and g is the gravitational acceleration. The optimal value $B = 1/15$ was obtained by the authors by a fit to the reference linear dispersion relation predicted by the Stokes first-order theory (using Padé's approximant). The standard form of the Boussinesq equations can be recovered by setting $B = 0$.

Madsen and Sorensen (1993) transformed the extended Boussinesq equations to the spectral domain by using truncated Fourier series with slowly varying amplitudes. The sea surface elevation η is represented by the discrete Fourier series:

$$\eta(x, t) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} A_p(x) e^{i(\omega_p t - \psi_p)} \quad (2.2)$$

where A_p denotes the spatially varying complex Fourier amplitude (satisfying the Hermitian property: $A_{-p} = A_p^*$), ω_p is the angular frequency ($\omega_{-p} = -\omega_p$) and ψ_p is the linear phase ($\psi_{-p} = -\psi_p$; $k_p = d\psi_p/dx$). The spatial evolution equation of A_p over a mildly sloping bottom is described by (Madsen and Sorensen, 1993):

$$\frac{dA_p}{dx} = -C_p^{\text{shoal}} A_p - i \frac{1}{S_p} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{m,p-m} A_m A_{p-m} \exp[-i(\psi_m + \psi_{p-m} - \psi_p)]. \quad (2.3)$$

The first term on the right-hand side of Eq. (2.3) represents linear shoaling, whereas the second term models non-linear triad interactions. The latter can be expressed as the sum of two terms which describe the energy transfers to component p resulting from

sum interactions of components $(m, p - m)$ and difference interactions of components $(p + m, m)$:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{m,p-m} A_m A_{p-m} \exp[-i(\psi_m + \psi_{p-m} - \psi_p)] \\ &= \sum_{m=1}^{p-1} R_{m,p-m} A_m A_{p-m} \exp[-i(\psi_m + \psi_{p-m} - \psi_p)] \\ & \quad + 2 \sum_{m=1}^{\infty} R_{-m,p+m} A_m^* A_{m+p} \exp[-i(\psi_{m+p} - \psi_m - \psi_p)]. \end{aligned} \tag{2.4}$$

The strength of the interactions depends on the coupling coefficient R and on the phase mismatches of the interacting components. The coupling coefficient of the model (hereafter referred as the DB (Deterministic Boussinesq) model) is given by (Madsen and Sorensen, 1993):

$$R_{m,p-m} = (k_m + k_{p-m})^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{\omega_m \omega_{p-m}}{ghk_m k_{p-m}} \right], \tag{2.5}$$

and

$$S_p = -\frac{2}{g} (ghk_p + 2Bgh^3k_p^3 - (B + 1/3)h^2\omega_p^2k_p). \tag{2.6}$$

With this model, Eq. (2.3) must be numerically integrated in space, together with the equation on phases: $k_p = d\psi_p/dx$.

2.2. Stochastic models

2.2.1. General description

On the basis of deterministic equations, such as Eq. (2.3), stochastic evolution equations can be derived for the higher-order moments of the complex Fourier amplitudes A_p . The formalism is based on the use of the statistical description of a wave field and leads to an infinite set of interconnected equations (Zakharov et al., 1992; Eldeberky, 1996; Agnon and Sheremet, 1997; Herbers and Burton, 1997). For instance, the evolution equation for the second-order moment is obtained from:

$$\frac{dF_p}{dx} = \left\langle C_p^* \frac{dC_p}{dx} \right\rangle + \left\langle C_p \frac{dC_p^*}{dx} \right\rangle, \tag{2.7}$$

where C_p is the complex Fourier amplitude defined as:

$$C_p = A_p e^{-i\psi_p}. \tag{2.8}$$

F_p is the discrete power spectrum:

$$F_p = \langle C_p C_p^* \rangle, \tag{2.9}$$

and $\langle \dots \rangle$ denotes the ensemble averaged operator. Substitution of Eq. (2.3) into Eq. (2.7) yields:

$$\frac{dF_p}{dx} = -2C_p^{\text{shoal}}F_p + \frac{2}{S_p} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{m,p-m} \text{Im}(B_{m,p-m}). \tag{2.10}$$

Here $B_{m,p-m}$ is the third-order moment, the so-called discrete bispectrum, defined as:

$$B_{m,p-m} = \langle C_m C_{p-m} C_p^* \rangle, \quad (2.11)$$

and $\text{Im}()$ denotes the imaginary part. An evolution equation for $B_{m,p-m}$ is obtained with the same formalism from:

$$\frac{dB_{m,p-m}}{dx} = \left\langle C_p^* C_{p-m} \frac{dC_m}{dx} \right\rangle + \left\langle C_p^* C_m \frac{dC_{p-m}}{dx} \right\rangle + \left\langle C_m C_{p-m} \frac{dC_p^*}{dx} \right\rangle. \quad (2.12)$$

Substitution of Eq. (2.3) into Eq. (2.12) yields:

$$\begin{aligned} \frac{dB_{m,p-m}}{dx} = & - \left(C_p^{\text{shoal}} + C_m^{\text{shoal}} + C_{p-m}^{\text{shoal}} \right) B_{m,p-m} - i(\Delta k) B_{m,p-m} \\ & + i \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[\frac{R_{q,p-q}}{S_p} T_{-q,q-p,m,p-m} - \frac{R_{q,m-q}}{S_m} T_{q,m-q,p-m,-p} \right. \\ & \left. - \frac{R_{q,p-m-q}}{S_{p-m}} T_{q,p-m-q,m,-p} \right], \end{aligned} \quad (2.13)$$

where Δk is the wavenumber mismatch:

$$\Delta k = k_{p-m} + k_m - k_p, \quad (2.14)$$

and $T_{-q,q-p,m,p-m}$ is the fourth-order moment, the so-called discrete trispectrum:

$$T_{-q,q-p,m,p-m} = \langle C_q^* C_{p-q}^* C_m C_{p-m} \rangle. \quad (2.15)$$

To solve the infinite set of evolution equations, which is being created by the use of ensemble-averaging, a statistical closure assumption must be introduced. The choice of the closure assumption, eventually combined with other simplifying hypotheses, leads to different kinds of models. A first attempt based on the deterministic extended Boussinesq equations was proposed by Eldeberky and Battjes (1995) and Eldeberky (1996). The so-called LTA model, presented in Section 2.2.2, is tested and compared to a new stochastic model derived using the closure assumption proposed by Holloway (1980) and presented in Section 2.2.3.

2.2.2. LTA model

The parameterised LTA model was developed by Eldeberky and Battjes (1995) and Eldeberky (1996) in order to represent the phase-averaged effects of triad interactions in coastal energy-based wave models. Computational efficiency is obtained by different simplifying assumptions and parameterisations.

For brevity, the shoaling term in Eqs. (2.10) and (2.13) is temporarily dropped during the development of the model. The bispectrum, $B_{m,p-m}$, is split into its magnitude and phase (called the biphasic). An explicit parametrical formulation, derived from laboratory experiments, is given for the biphasic β (Eldeberky and Battjes, 1995):

$$\beta(f_p, f_p) = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{U_r}\right), \quad (2.16)$$

where Ur is the Ursell number. The magnitude of the bispectrum, $|B_{m,p-m}|$, is obtained from the evolution equations of moments. The wavefield is assumed to be nearly Gaussian in order to express the fourth-order moments in terms of the second-order moments and to close the system of equations. So, Eq. (2.13) becomes:

$$\frac{dB_{m,p-m}}{dx} = -i(\Delta k)B_{m,p-m} + 2i\frac{R_{m,p-m}}{S_p} [F_m F_{p-m} - F_p F_m - F_p F_{p-m}]. \quad (2.17)$$

It is important to notice that in deriving Eq. (2.17), Eldeberky (1996) implicitly made the approximation:

$$\frac{R_{m,p-m}}{S_p} = \frac{R_{p,m-p}}{S_m} = \frac{R_{p,-m}}{S_{p-m}}. \quad (2.18)$$

To determine $|B_{m,p-m}|$, Eq. (2.17) is spatially integrated. The spatial dependence of the discrete variance spectrum and the initial bispectrum are neglected. The integration of Eq. (2.17) gives two terms which evolve on different spatial scales. The fast oscillating function involving the wavenumber mismatch is neglected leading to:

$$|B_{m,p-m}| = 2\frac{R_{m,p-m}}{S_p} [F_m F_{p-m} - F_p F_m - F_p F_{p-m}] \frac{1}{\Delta k}. \quad (2.19)$$

The triad interactions process is restricted to self–self interactions in order to reduce the computational cost. This considerably simplifies the net source term due to triad interactions, which is finally expressed as (Eldeberky, 1996):

$$\begin{aligned} \left. \frac{d(CgF)}{dx} \right|_{f=f_p} &= Q_{nl}^+(f_p) + Q_{nl}^-(f_p), \\ Q_{nl}^+(f_p) &= \alpha C_p Cg_p \frac{R_{(p/2,p/2)}^2}{S_p^2} \sin|\beta_{p/2,p/2}| [F^2(f_{p/2}) - 2F(f_p)F(f_{p/2})], \\ Q_{nl}^-(f_p) &= -2Q_{nl}^+(f_{2p}). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Q_{nl}^\pm represent the positive and negative contributions to the self–self interactions; C_p and Cg_p are, respectively, the phase and group velocities for the p harmonic; R is the coupling coefficient for sum interactions taken from the DB model (Eq. (2.5)) and α is a tuning parameter. In the numerical integration of the energy balance equation, the source term for triad interactions is calculated only for frequencies lower than $2.5f_{m01}$, with f_{m01} being the mean frequency (Ris, 1997).

2.2.3. SPB model

By applying the statistical closure hypothesis proposed by Holloway (1980) to the set of Eqs. (2.10) and (2.13), we built up a new stochastic model called Stochastic Parametric model based on Boussinesq equations (SPB).

In a general way, the fourth-order moments can be expressed in terms of products of second-order moments and an irreducible quantity, a so-called fourth-order cumulant

(Monin and Yagloom, 1979). The closure hypothesis of Holloway (1980) assumes that the fourth-order cumulant, neglected in the quasi-Gaussian hypothesis, is proportional to the third-order moment. Hence, the evolution equation for the bispectrum (Eq. (2.13)) reduces to (by omitting temporarily the shoaling term):

$$i \frac{dB_{m,p-m}}{dx} - (\Delta k - iK) B_{m,p-m} = -2 \left[\frac{R_{m,p-m}}{S_p} F_m F_{p-m} - \frac{R_{p,m-p}}{S_m} F_p F_{p-m} - \frac{R_{p,-m}}{S_{p-m}} F_m F_p \right]. \quad (2.21)$$

In our model, the proportionality coefficient K , which allows for a broadening of the resonance condition, is assumed to be a constant to be empirically determined.

To compute the bispectrum, Eq. (2.21) is spatially integrated in the same way as the LTA model. So, the spatial dependence of the discrete variance spectrum and the initial bispectrum are neglected. The integration of Eq. (2.21) gives two terms which evolve on different spatial scales. By neglecting the fast oscillating function involving the wavenumber mismatch, we obtain:

$$B_{m,p-m} = \left[\frac{R_{m,p-m}}{S_p} F_m F_{p-m} - \frac{R_{p,m-p}}{S_m} F_p F_{p-m} - \frac{R_{p,-m}}{S_{p-m}} F_m F_p \right] \frac{2}{(\Delta k - iK)}. \quad (2.22)$$

The discrete variance spectrum in Eq. (2.10) evolves according to the imaginary part of the bispectrum, and from Eq. (2.22), we have

$$\text{Im}(B_{m,p-m}) = 2 \left[\frac{R_{p-m,m}}{S_p} F_{p-m} F_m - \frac{R_{m-p,p}}{S_m} F_p F_{p-m} - \frac{R_{-m,p}}{S_{p-m}} F_p F_m \right] \mu_{p,m,p-m}(K), \quad (2.23)$$

where

$$\mu_{p,m,p-m}(K) = \frac{K}{(\Delta k)^2 + K^2}, \quad (2.24)$$

μ acts as a spectral filter through the wavenumber mismatch Δk and through the parameter K , allowing for a broadening of the resonance condition.

Eq. (2.10) is rewritten in term of continuous variance density, $F(f_p)$, by setting:

$$F_p = \frac{1}{2} F(f_p) \Delta f, \quad (2.25)$$

$$B_{m,p-m} = B(f_m, f_{p-m}) \Delta f^2, \quad (2.26)$$

where Δf is the frequency increment. This leads to the final expression:

$$\begin{aligned} \frac{d(F(f_p))}{dx} = & -2C_p^{\text{shoal}}F(f_p) + \frac{4}{S(f_p)} \int_0^{f_p} df_m R_{m,p-m} \text{Im}(B(f_m, f_p - f_m)) \\ & - \frac{8}{S(f_p)} \int_0^{+\infty} df_m R_{-m,p+m} \text{Im}(B^*(-f_m, f_p + f_m)), \end{aligned} \quad (2.27)$$

where

$$\begin{aligned} \text{Im}(B(f_m, f_p - f_m)) = & \frac{1}{2} \left[\frac{R_{m,p-m}}{S_p} F(f_m) F(f_p - f_m) - \frac{R_{p,-m}}{S_{p-m}} F(f_p) F(f_m) \right. \\ & \left. - \frac{R_{p,m-p}}{S_m} F(f_p) F(f_p - f_m) \right] \mu_{p,m,p-m}(K). \end{aligned} \quad (2.28)$$

3. Depth-induced wave breaking mechanism

Eldeberky and Battjes (1996) extended the DB model to the surf zone by including in the deterministic Eq. (2.3) a damping term. Considering their work, we also included in the above-presented stochastic models the corresponding breaking dissipation term. The damping term is derived from the parametric model of Battjes and Janssen (1978) (BJ model) expressing the total energy dissipation \bar{D}_{br} in terms of local wave parameters:

$$\bar{D}_{\text{br}} = \frac{\alpha_{\text{BJ}}}{4} f_c (\gamma_{\text{BJ}} h)^2 Q_b. \quad (3.1)$$

f_c is a characteristic frequency, Q_b is the breaking probability, α_{BJ} is a dissipation parameter of order 1, and γ_{BJ} is the breaking coefficient. The BJ model is one of the most-used models for wave breaking; it has been extensively applied to numerous field and laboratory experiments. Concerning the distribution of \bar{D}_{br} with frequency, Mase and Kirby (1992) proposed a frequency-dependent law, whereas Eldeberky and Battjes (1996) opted for a uniform distribution. Chen et al. (1997) compared the two assumptions using field and laboratory observations. They showed that the evolution of simulated variance spectra along a bathymetric profile was nearly insensitive to the choice of the frequency distribution of the dissipation term. However, the simulation of higher-order statistics such as skewness and asymmetry requires a partial dependence on the square of the frequency for the breaking dissipation term. The primary objective of our work was to compare three non-linear models for wave propagation in shallow water and as the comparison mainly concerns the variance spectra, the spectral distribution of breaking dissipation will be assumed to be frequency-independent. This avoids the inclusion of an additional free parameter to be fitted. Furthermore, such a refinement is not useful for the two stochastic models since they include a tuning parameter governing the strength of the non-linear interactions and the evolution of variance spectra along the bathymetric profile.

The spectral source term due to depth-induced wave breaking, added on the right-hand side of the energy balance equation for stochastic models, simply reads:

$$Q_{br}(f) = - \frac{\bar{D}_{br}}{\int F(f)df} F(f), \tag{3.2}$$

whereas the damping term for the DB model, added to Eq. (2.3), writes (Eldeberky and Battjes, 1996):

$$d_{br} = - \frac{1}{2} \frac{\bar{D}_{br}}{F_{tot}} A_p, \tag{3.3}$$

where F_{tot} is the total energy flux per unit width.

4. Comparison between DB, LTA, SPB models and laboratory results

The performances of the three above-presented models were tested against experiments carried out in a wave flume at LNH.

4.1. Experimental set-up and analysis procedures

The flume has a length of 45 m and a width of 0.60 m. It is equipped with a piston-type random wave-maker which can generate monochromatic waves or random-phase time series corresponding to JONSWAP-type spectra for various peak enhancement factors.

The bathymetric profile (Fig. 1) was designed for representing a submerged bar over which non-linear triad interactions are expected to occur in a significant way (Freilich and Guza, 1984; Elgar and Guza, 1985a). Experiments were carried out for different wave conditions. Depending on the test-case, the water depth was in the range 0.61–0.65 m in the deepest region and in the range 0.11–0.15 m in the shallowest region (on the bar). Bottom friction dissipation and reflection from the beach were assumed negligible in the experiments, since the profile was made of smooth metal sheets and an absorbing sponge layer was set up in the upper part of the beach.

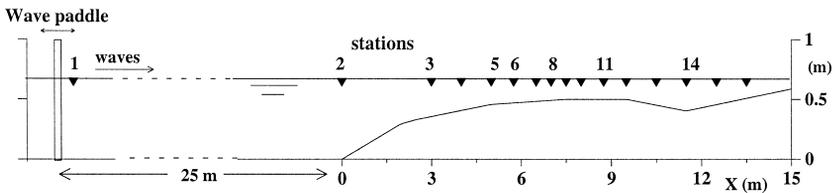


Fig. 1. Description of the wave flume.

Time series of free surface elevation were recorded by means of resistive probes disposed at various locations along the wave flume (Fig. 1). The record duration was chosen long enough (40 mn) to increase the number of degrees of freedom of the estimated spectra. Wave-by-wave (statistical) and spectral analyses were performed at each probe. Non-linear interactions were studied using bispectral analysis (Kim and Powers, 1979; Elgar and Guza, 1985b). The bispectrum ($B_{p,m}$), defined as the Fourier transform of the third-order correlation function of the surface elevation, is used to identify coupled modes in the wave train. The normalised magnitude $b_{p,m}^2$ (bicoherence) and phase $\beta_{p,m}$ (biphase) of the bispectrum are defined by:

$$b_{p,m}^2 = \frac{|B_{p,m}|^2}{\langle |A_p A_m|^2 \rangle \langle |A_{p+m}| \rangle}, \tag{4.1}$$

$$\beta_{p,m} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(B_{p,m})}{\text{Re}(B_{p,m})} \right], \tag{4.2}$$

where A_i represent the complex Fourier amplitudes of the interacting waves.

For a Gaussian wave field, wave phases are statistically uncorrelated. In this case, biphase values are uniformly distributed over the interval $[-\pi; \pi]$ and bicoherence is zero. Under non-linear effects, coupled modes build up. The bicoherence of phase-correlated wave components (p, m) exhibits a peak at the frequencies (f_p, f_m). $b_{p,m}^2$ gives the fraction of the total energy at the sum frequency ($f_p + f_m$) due to non-linear interaction between f_p and f_m (Kim and Powers, 1979) and $\beta_{p,m}$ represents the phase mismatch between the three interacting components.

Two particular test-cases have been selected for application of the numerical models. The target spectra imposed at the wave generator are JONSWAP spectra ($\gamma = 3.3$) with a peak frequency of 0.435 Hz. The first experiment was conducted for non-breaking waves. From the wave generator, waves propagate over a water depth of 0.65 m with a significant wave height of 3.4 cm. For the second experiment, the water depth was reduced to 0.61 m and the significant wave height increased up to 8.0 cm, allowing for

Table 1

Non-breaking case

Normalised differences between measurements and simulations at frequencies corresponding to the spectral peak and its harmonics.

		Station 6	Station 9	Station 11	Station 14
DB	f_p	-0.275	0.016	-0.105	-0.196
	$2f_p$	-0.417	-0.125	-0.161	-0.351
	$3f_p$	-0.297	-0.343	-0.445	-0.439
LTA	f_p	-0.118	0.237	0.187	0.068
	$2f_p$	-0.039	0.752	0.337	-0.157
	$3f_p$	-0.386	-0.890	-0.743	-0.248
SPB	f_p	-0.129	0.224	0.114	-0.088
	$2f_p$	-0.364	-0.043	-0.324	-0.582
	$3f_p$	-0.426	-0.560	-0.538	0.547

Table 2

Breaking case

Normalised differences between measurements and simulations at frequencies corresponding to the spectral peak and its harmonics.

		Station 3	Station 5	Station 8	Station 11
DB	f_p	-0.216	-0.234	-0.180	0.136
	$2f_p$	-0.127	0.066	0.695	0.230
	$3f_p$	-0.174	-0.293	-0.134	0.099
LTA	f_p	0.024	-0.055	0.657	1.163
	$2f_p$	0.789	1.085	2.175	2.618
	$3f_p$	-0.621	-0.739	-0.656	-0.491
SPB	f_p	-0.067	-0.071	-0.045	-0.042
	$2f_p$	-0.88	-0.115	0.088	-0.032
	$3f_p$	-0.596	-0.405	0.049	0.360

strong wave breaking on the bar. The experimental spectrum measured at station 2 was used as reference for the numerical simulations.

4.2. Numerical integration

The energy balance equation, including the triad-interaction source term (stochastic models) and the evolution equation for complex Fourier amplitudes (deterministic model), are integrated using a fourth-order Runge–Kutta method. For realistic comparison between deterministic and stochastic models, information on wave phases at the

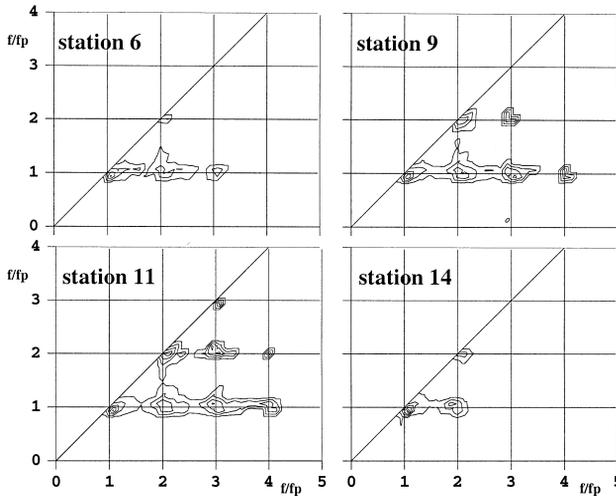


Fig. 2. Non-breaking case. Evolution of the bicoherence along the bathymetric profile.

upwave location is not used. Only the wave spectrum (at station 2) is considered as a boundary condition of the models. The wave spectrum is discretized in frequency bands Δf and it is assumed that $|A_p|^2 = (0.5F_p\Delta f)$ (Eldeberky and Battjes, 1996). The initial phases of wave components in the deterministic model are set to random values uniformly distributed over $[-\pi; \pi]$. Twenty independent runs and three neighbouring frequency bands are averaged to obtain the spectral evolution along the bathymetric profile. This procedure significantly reduces the influence of initial wave phases set (Won and Battjes, 1992; Eldeberky and Battjes, 1996). The number of frequency components was chosen high enough to correctly sample the initial wave spectrum. One-hundred frequency bands were used for the stochastic models and 200 for the deterministic model (because of the averaging over three frequency bands).

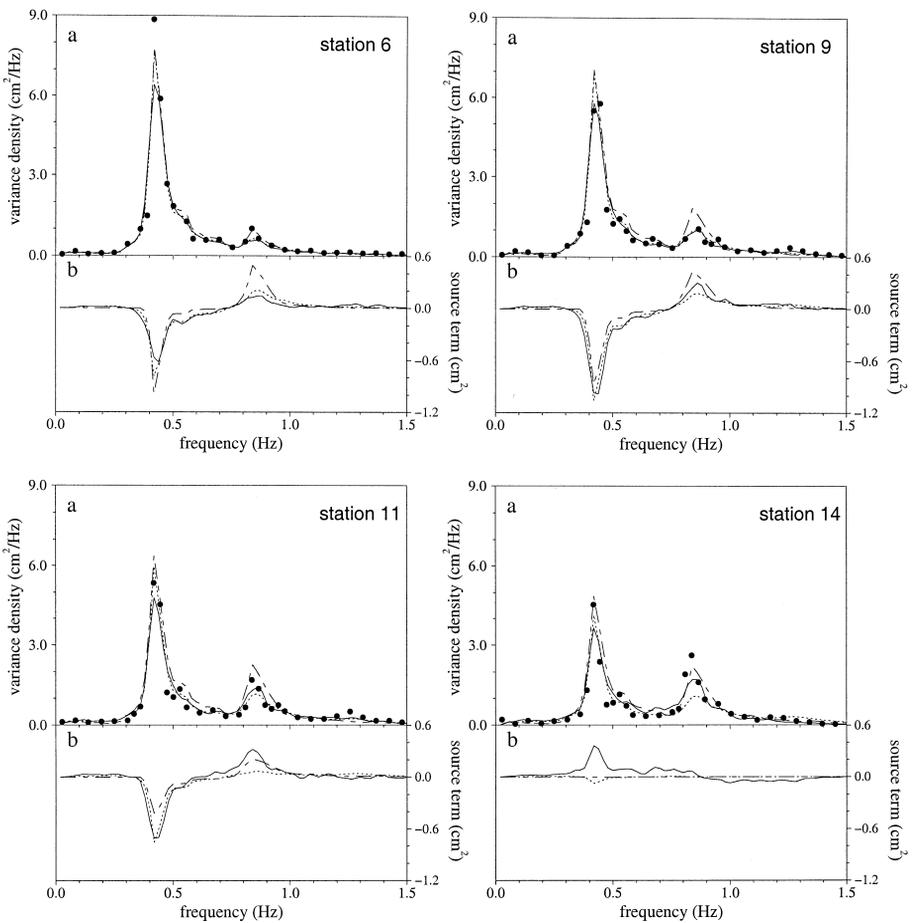


Fig. 3. Non-breaking case. (a) Spatial evolution of variance density spectra (upper part of plots). (b) Spectral evolution of the numerical triad source term (lower part of plots). Comparison between measurements (circle), the DB model (solid line), the LTA model (dot-dashed line) and the SPB model (dotted line).

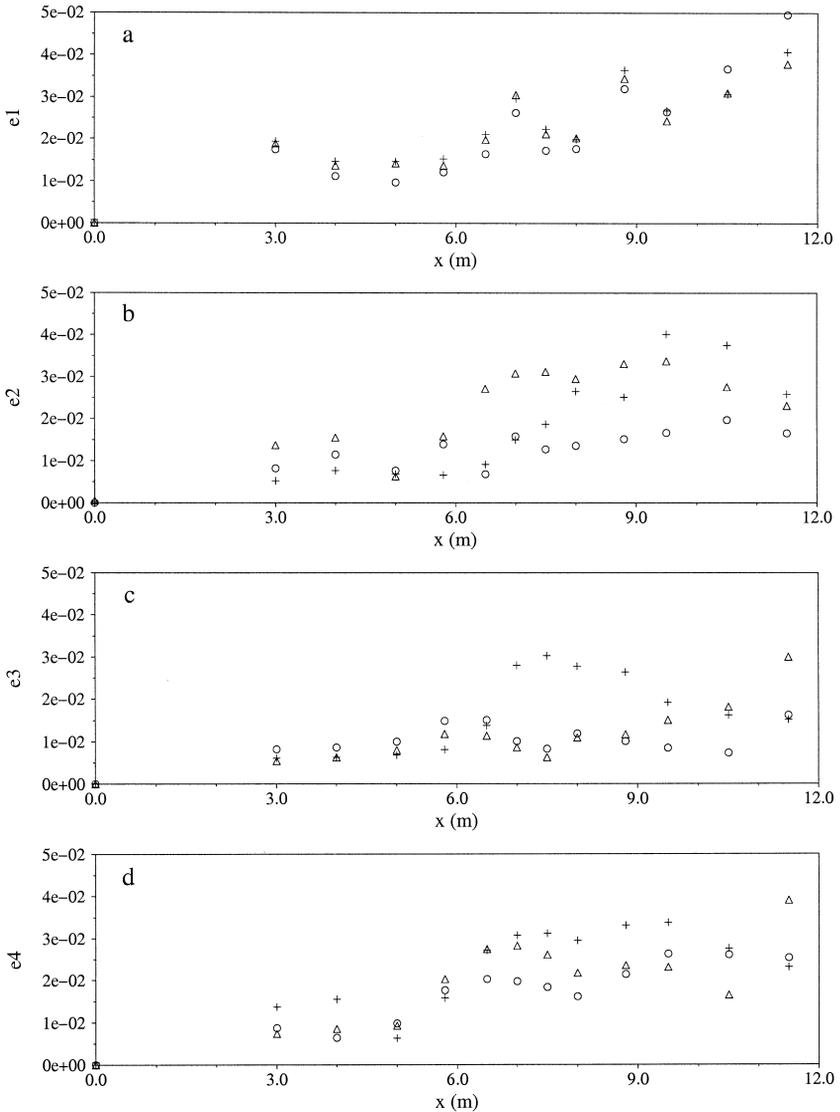


Fig. 4. Non-breaking case. Normalised rms errors between models and measurements. DB model (circle), LTA model (cross) and SPB model (triangle).

Estimations of differences between measured and modelled wave spectra are obtained by computing:

- the normalised differences at frequencies corresponding to the spectral peak (f_p) and its harmonics (Tables 1 and 2):

$$d_i = \frac{F_{\text{sim}}(if_p) - F_{\text{mes}}(if_p)}{F_{\text{mes}}(if_p)} \quad i = 1, 2, 3, \tag{4.3}$$

- the normalised root mean square (rms) errors between simulated spectra, F_{sim} , and measured spectra, F_{mes} , at each station x_n (Figs. 4 and 9):

$$e_i = \frac{\sqrt{\int_{f_{1,i}}^{f_{2,i}} (F_{mes}(x_n, f) - F_{sim}(x_n, f))^2 df}}{\int_{f_{1,i}}^{f_{2,i}} F_{mes}(x_n, f) df} \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4.4)$$

When computing e_i , four frequency intervals are defined in order to separate the spectral peaks: [0;0.3]; [0.3;0.7]; [0.7;1.1] and [1.1;1.5] (values in Hz).

4.3. Non-breaking waves

Bispectral analysis is applied to wave measurements for studying the effects of non-linearities. The evolution of the bicoherence for the non-breaking test-case is given on Fig. 2. Bicoherence at station 2 is not plotted here because the ‘seaward’ wave distribution is Gaussian with a good approximation and gives nearly zero values. Fig. 2 shows that non-linear wave–wave interactions, which occur from probe 6, increase as the water depth decreases (stations 9 and 11). They mainly take place between the peak frequency and its super-harmonics. After the bar (station 14), the strength of the interactions decreases as the water depth increases, leading to a release of the generated higher harmonics.

The evolution of experimental and simulated variance spectra along the bathymetric profile is presented on Fig. 3a. Simulation results obtained using DB, LTA and SPB models compare quite well with laboratory measurements. Non-linearities are characterised by a spectral signature in the vicinity of the first ($2f_p$) and second ($3f_p$) harmonics of the main spectral peak (f_p). Only the first harmonic is simulated by the

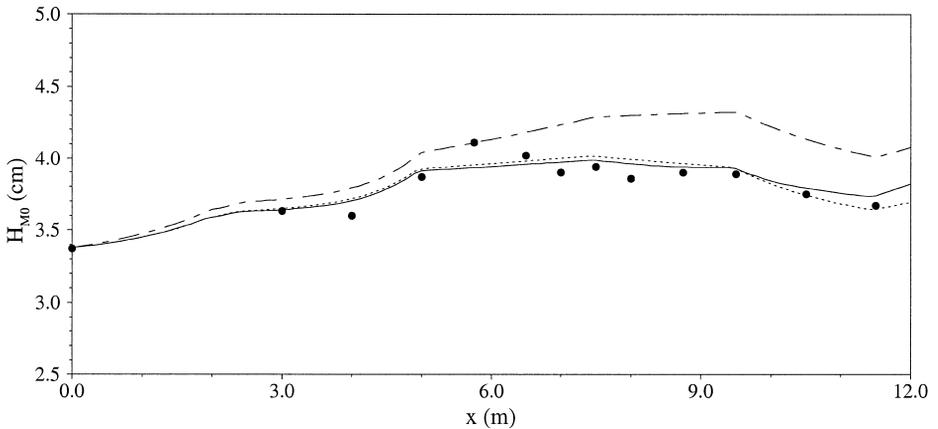


Fig. 5. Non-breaking case. Evolution of the spectral significant wave height H_{m0} along the bathymetric profile. Comparison between measurements (circle), the DB model (solid line), the LTA model (dot-dashed line) and the SPB model (dotted line).

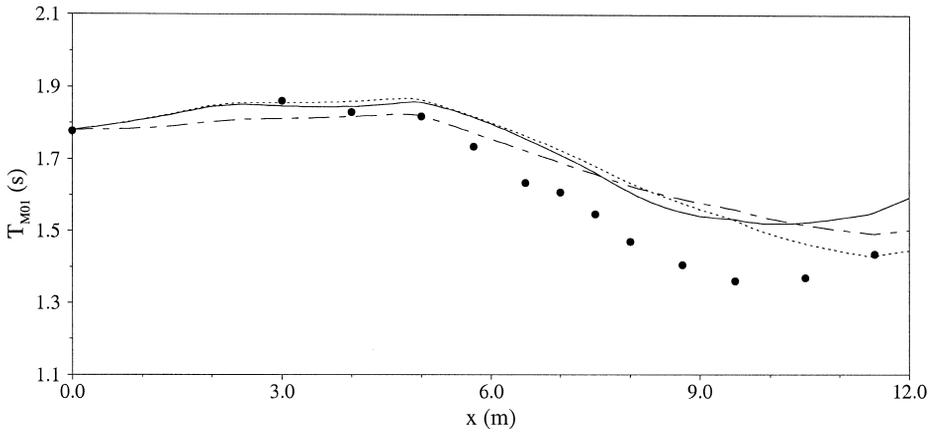


Fig. 6. Non-breaking case. Evolution of the mean period T_{m01} along the bathymetric profile. Comparison between measurements (circle), the DB model (solid line), the LTA model (dot-dashed line) and the SPB model (dotted line).

LTA model, because of the restriction to self–self interactions. The energy in the vicinity of the second harmonic is largely underestimated over decreasing water depths using the DB and SPB models (see stations 9 and 11 of Table 1 giving the normalised differences at the frequencies of the peaks). The extended Boussinesq equations include lowest-order non-linearity and are not fully dispersive (they are restricted to h/λ_0 less than about 0.5 (Madsen and Sorensen, 1992); so in the deeper region of the flume ($h = 0.65$ m), waves are propagated accurately only when $f \leq 1.1$ Hz and this limit is

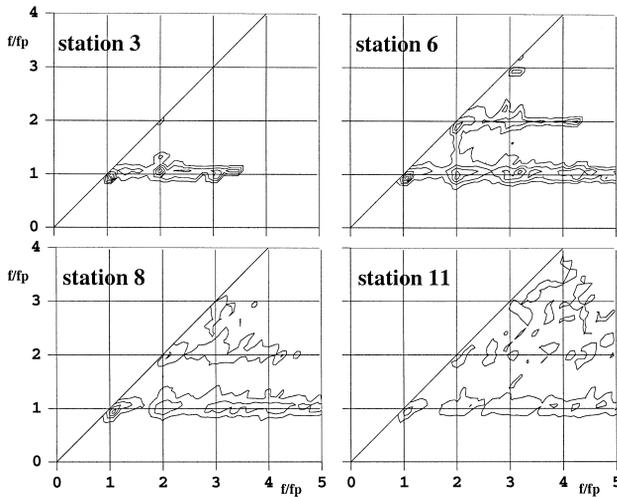


Fig. 7. Breaking case. Evolution of the bicoherence along the bathymetric profile.

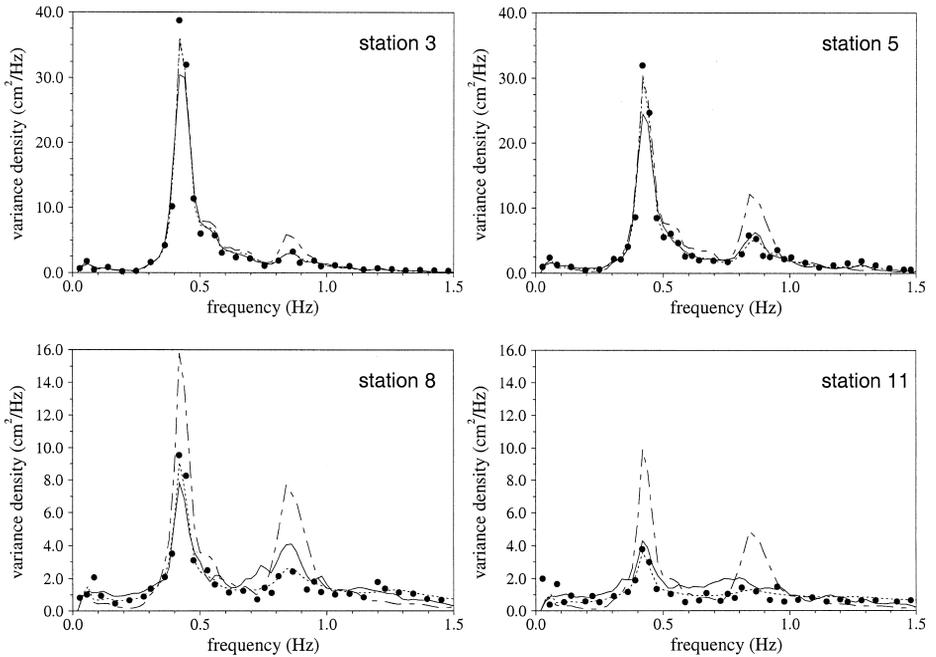


Fig. 8. Breaking case. Spatial evolution of variance density spectra. Comparison between measurements (circle), the DB model (solid line), the LTA model (dot-dashed line) and the SPB model (dotted line).

lower than $3f_p = 1.3$ Hz). For these reasons, non-linearities are underestimated by the models for high values of kh (Madsen and Sorensen, 1993).

The energy transfers between the main spectral peak and its harmonics are examined by representing the triad source term for the three models (Fig. 3b). As the water depth decreases (stations 6 and 9), the DB and SPB triad source terms exhibit a three lobes structure: two positive lobes at low- and high frequencies and a negative lobe around the primary peak, whereas the LTA source term is characterised by a two-lobe structure since it does not allow energy transfers towards bound lower-harmonics. As the water depth increases (station 14), changes are observed in the cross-spectral energy transfers. The DB source term shows a two-lobe structure with a negative lobe at high frequencies and a positive lobe elsewhere. This coincides with the release of higher harmonic components observed by bispectral analysis. The LTA and SPB source terms are nearly zero at station 14, but energy transfers are always pointed towards high frequencies and these models do not reproduce the release of higher harmonics.

The rms errors between simulations and measurements (Fig. 4) show that differences are more significant with the LTA model, around the top of the bar for e_3 and e_4 (errors around the first and second harmonics of the peak frequency) and after station 11 for e_2 .

Non-linearities also modify averaged integral parameters such as the significant wave height (H_{m0}) and the mean period (T_{m01}), defined as:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}, \tag{4.5}$$

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}, \tag{4.6}$$

where

$$m_i = \int_0^\infty f^i F(f) df. \tag{4.7}$$

H_{m0} is correctly estimated along the bathymetric profile by using DB and SPB models (Fig. 5), whereas it is largely overestimated after station 6 by the LTA model.

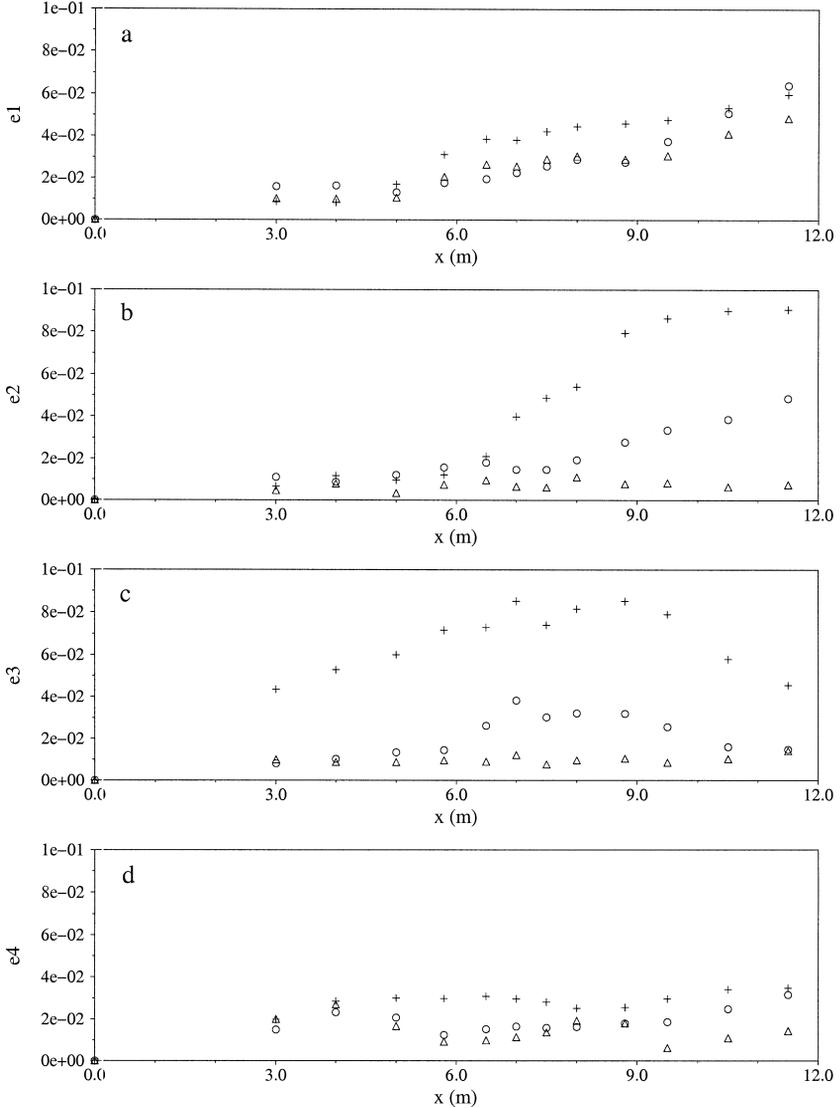


Fig. 9. Breaking case. Normalised rms errors between models and measurements. DB model (circle), LTA model (cross) and SPB model (triangle).

The overestimation of H_{m0} comes from the fact that the LTA model is energy-conservative and it is considered that:

$$\int_f \frac{d(F(f)Cg^{lin}(f))}{dx} df = 0 \text{ instead of } \int_f \frac{d(F(f)Cg^{nl}(f))}{dx} df = 0. \quad (4.8)$$

The non-linear group velocities associated with bound higher harmonics (Cg^{nl}) are imposed by the wavenumbers of the primary waves and are higher than the linear group velocities associated with the bound wave frequency (Cg^{lin}). As the integration of the energy balance equation assumes that waves propagate according to the linear group velocity, the total variance density is overestimated when energy transfers occur towards higher harmonics.

The underestimation of non-linearities at high values of kh with the extended Boussinesq equations (Madsen and Sorensen, 1993) leads to an overestimation of T_{m01} after station 4 (Fig. 6) with the DB and SPB models. The restriction to self–self interactions and the frequency cut-off imposed at $2.5f_{m01}$ are responsible of the overestimation of T_{m01} after station 5 with the LTA model. The stochastic models (LTA and SPB) do not reproduce the increase of T_{m01} after station 12, corresponding to the release of harmonics observed by the bispectral analysis.

4.4. Breaking waves

The evolution of the bicoherence for the breaking test-case is presented on Fig. 7. Strong non-linear interactions take place from probe 3 between the main spectral peak and its harmonics. As surf breaking occurs (after station 5), the bicoherence becomes less structured and shows weak and spread interactions.

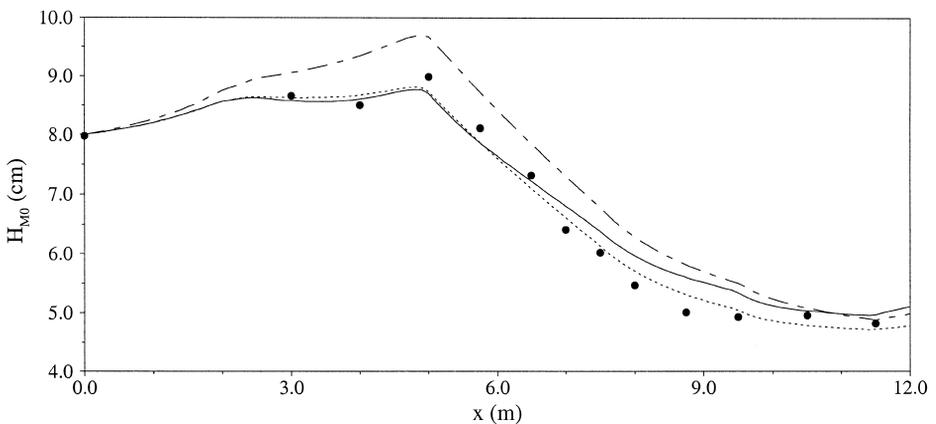


Fig. 10. Breaking case. Evolution of the spectral significant wave height H_{m0} along the bathymetric profile. Comparison between measurements (circle), the DB model (solid line), the LTA model (dot-dashed line) and the SPB model (dotted line).

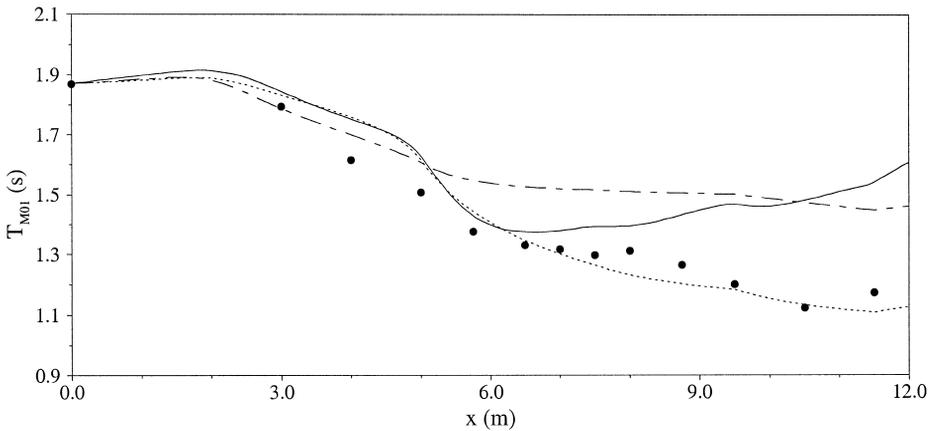


Fig. 11. Breaking case. Evolution of the mean frequency T_{m01} along the bathymetric profile. Comparison between measurements (circle), the DB model (solid line), the LTA model (dot-dashed line) and the SPB model (dotted line).

The non-linear evolution of experimental and simulated variance spectra is presented on Fig. 8. The simulations were performed using the same parameters in all three models for the BJ breaking dissipation term: $\alpha_{BJ} = 1$ and $\gamma_{BJ} = 0.7$. All models are able to transfer energy towards super-harmonics. However, the LTA model develops a bimodal structure which does not correspond to measured spectra. This misbehaviour is due to the restriction to self–self interactions. Figs. 8 and 9; Table 2 show that best results are obtained, on this test-case, with the SPB model rather than the DB model, especially around the peak frequency and its first harmonic (see e_2 and e_3 on Fig. 9).

Along the bathymetric profile, a good fit to measurements of H_{m0} is obtained using the DB and SPB models (Fig. 10). The LTA model overestimates wave energy and would require a more dissipative breaking term.

The evolution of T_{m01} is well-estimated using the SPB model (Fig. 11). The DB and LTA models overestimate this spectral parameter. We tried to improve the numerical DB results by testing a frequency-dependent breaking dissipation term (Mase and Kirby, 1992; Chen et al., 1997) and by setting different combinations of parameters α_{BJ} and γ_{BJ} in the BJ model (Riviero et al., 1994; Hamm, 1995). The effort focused on the simulation of the mean period T_{m01} , but no significant improvement was obtained (Becq, 1998).

5. Summary and conclusions

Three non-linear numerical wave models have been considered in this study. Comparisons between measurements and numerical simulations show that each of these models is able to reproduce at least the main effects of the non-linear triad interactions phenomenon. Since the models are based on the extended Boussinesq equations of Madsen and Sorensen (1993), non-linearities are underestimated for high values of kh .

This mainly results in an underestimation of the energy level on the tail of the wave spectrum and consequently leads to an overestimation of the mean period T_{m01} .

The LTA model correctly reproduces the generation of the first harmonic of the spectral peak in the non-breaking case. The cross-spectral energy transfers increase with the tuning parameter α . However, the model overestimates the integrated spectral parameters H_{m0} and T_{m01} . The overestimation of T_{m01} mainly results from the restriction to self–self interactions and from the frequency cut-off imposed in the model. Indeed, the LTA source term is calculated only for frequencies lower than $2.5f_{m01}$. This avoids an unrealistic energy transfer in the vicinity of the second harmonic of the spectral peak (Eldeberky, personal communication). In the breaking test-case, the model develops a bimodal structure which does not correspond to measurements and a stronger breaking dissipation would be required for a better fit to data.

Variance spectra and integrated parameters are correctly reproduced using the SPB model, outside and inside the surf zone. However, a better fit to measurements for T_{m01} is obtained for the breaking case by comparison with the non-breaking one. There are mainly two reasons for this. First, the dispersive effects are slightly weaker in the breaking experiment since the relative water depth is lower. Second, the breaking dissipation term is assumed to be frequency-independent, whereas wave breaking may affect preferentially high frequencies (Mase and Kirby, 1992; Chen et al., 1997). The behaviour of the SPB model depends on a tuning parameter K . Successive simulations realised on different datasets from wave flume experiments have led to the empirical (dimensional) expression for a first choice of parameter K (Becq, 1998):

$$K = 0.95k_p - 0.75, \quad (5.1)$$

where k_p is the seaward peak wavenumber computed from the peak frequency f_p . This first trial for determining the parameter K needs to be verified and improved, in particular for its application to field cases.

Outside the surf zone, best agreements are obtained using the deterministic model DB. Especially, the harmonic release observed after the bar with the bispectral analysis is only simulated with the DB model. After the bar, the computed source terms show that the net energy flux in the spectrum is in opposite directions between deterministic and parameterised stochastic models. As a consequence, the increase of the mean period after the bar is well-recovered by the DB model, and not by the LTA and SPB models. However, stochastic models offer the advantage of a lower computational cost, especially for the parameterised LTA model which is restricted to self–self interactions.

In order to model the triad interactions process in spectral wave models for coastal regions, the stochastic model SPB has been extended to bidimensional situations and implemented in a spectral third-generation wave model (Becq, 1998). Unlike the LTA model, the SPB model offers the advantage to be directionally coupled and allows for both collinear and non-collinear triad interactions.

Recently, Eldeberky and Madsen (1998) derived a new deterministic equation based on the boundary problem for Laplace equation. The originality of their developments, when compared to the work of Agnon et al. (1993) or Kaihatu and Kirby (1995), was to invoke the non-linear dynamic free surface condition (instead of the linear one). When compared to measurements, the model predictions are significantly improved using the

new equation. So, the development of a stochastic parameterised model (such as SPB) based on this deterministic equation would improve the simulation results, since the fully dispersive equations are expected to be superior to the Boussinesq ones for increasing kh .

References

- Abreu, M., Larraza, A., Thornton, E., 1992. Non-linear transformation of directional wave spectra in shallow water. *J. Geophys. Res.* 97, 15579–15589.
- Agnon, Y., Sheremet, A., 1997. Stochastic non-linear shoaling of directional spectra. *J. Fluid Mech.* 345, 79–99.
- Agnon, Y., Sheremet, A., Gonsalves, J., Stiassnie, M., 1993. Non-linear evolution of a unidirectional shoaling wave field. *Coastal Eng.* 20, 29–58.
- Battjes, J.A., 1994. Shallow water wave modelling. *International Symposium: Waves — Physical and Numerical Modelling*, pp. 1–23.
- Battjes, J.A., Janssen, P.A.E.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng. (ASCE)* 1, 569–587.
- Becq, 1998. Extension de la modélisation spectrale des états de mer vers le domaine côtier. PhD dissertation, Université de Toulon et du Var, France, 250 pp.
- Benoit, M., Marcos, F., Becq, F., 1996. Development of a third-generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng. (ASCE)*, pp. 465–478.
- Chen, Y., Guza, R.T., Elgar, S., 1997. Modeling spectra of breaking surface waves in shallow water. *J. Geophys. Res.* 102, 25035–25046.
- Eldeberky, Y., 1996. Non-linear transformation of wave spectra in the nearshore zone. PhD dissertation, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, ISSN 0169-6548. Delft University of Technology, the Netherlands.
- Eldeberky, Y., Battjes, J.A., 1995. Parameterisation of triads interactions in wave energy models. *Proc. Int. Coastal Dynamics '95*, pp. 140–148.
- Eldeberky, Y., Battjes, J.A., 1996. Spectral modelling of wave breaking: application to Boussinesq equations. *J. Geophys. Res.* 101 (C1), 1253–1264.
- Eldeberky, Y., Madsen, P.A., 1998. Fully dispersive spectral models of triad wave interactions. *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng. (ASCE)*.
- Eldeberky, Y., Polnikov, V., Battjes, J.A., 1996. A statistical approach for modeling triad interactions in dispersive waves. *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng. (ASCE)*, pp. 1088–1101.
- Elgar, S., Guza, R.T., 1985a. Shoaling surface gravity waves: comparisons between field observations, linear theory, and a non-linear model. *J. Fluid Mech.* 158, 47–70.
- Elgar, S., Guza, R.T., 1985b. Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. *J. Fluid Mech.* 161, 425–448.
- Freilich, M.H., Guza, R.T., 1984. Non-linear effects on shoaling surface gravity waves. *Philos. Trans. Royal Soc. London A* 311, 1–41.
- Hamm, L., 1995. Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- Herbers, T.H.C., Burton, M.C., 1997. Non-linear shoaling of directionally spread waves on a beach. *J. Geophys. Res.* 102 (C9), 21101–21114.
- Holloway, G., 1980. Oceanic internal waves are not weak waves. *J. Phys. Oceanogr.* 10, 906–914.
- Kaihatu, J.M., Kirby, J.T., 1995. Non-linear transformation of waves in finite water depth. *Phys. Fluids* 7 (8), 1903–1914.
- Kim, Y.C., Powers, E.J., 1979. Digital bispectral analysis and its application to the non-linear wave interactions. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 120–131.
- Liu, P.L.-F., Yoon, S.B., Kirby, J.T., 1985. Non-linear refraction–diffraction of waves in shallow water. *J. Fluid Mech.* 153, 185–201.

- Madsen, P.A., Sorensen, O.R., 1992. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics: 2. A slowly varying bathymetry. *Coastal Eng.* 18, 183–205.
- Madsen, P.A., Sorensen, O.R., 1993. Bound waves and triads interactions in shallow water. *Ocean Eng.* 20 (4), 359–388.
- Mase, H., Kirby, J.T., 1992. Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation. *Proc. 19th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp. 474–487.
- Mei, C.C., 1983. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. Wiley-Interscience, New York, 740 pp.
- Monin, A.S., Yagloom, A.M., 1979. *Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence*, Vol. 1. MIT Press, Cambridge.
- Newell, A.C., Aucoin, P.J., 1971. Semidispersive wave systems. *J. Fluid Mech.* 49, 618–638.
- Nwogu, O., 1993. Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng. (ASCE)* 119, 618–638.
- Ris, R.C., 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. *Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, ISSN 0169-6548, Report No. 97-4, Delft University of Technology, the Netherlands.
- Riviero, F.J., Arcilla, A.S., Beyer, B., 1994. Comparison of a wave transformation model with LIP-11D data. *Proc. Coastal Dynamics*, pp. 518–532.
- Stiassnie, M., Shemer, L., 1984. On modifications of the Zakharov equation for surface gravity waves. *J. Fluid Mech.* 143, 47–67.
- Won, Y.S., Battjes, J.A., 1992. Spectral Boussinesq modelling of random waves. *Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Report No. 93-2, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 27 pp.
- Zakharov, V.E., 1968. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep water. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 4, 86–94, English translation.
- Zakharov, V.E., L'vov, V.S., Falkovich, G., 1992. *Kolmogorov Spectra of Turbulence: I. Wave Turbulence*. Springer-Verlag, 264 pp.

ANNEXE 7

Auteurs : **Michel BENOIT**, Marilyne LUCK*, Christophe CHEVALIER**, Michel BELORGEY**

* EDF R&D LNHE (Chatou)

** Université de Caen Basse Normandie (Morphodynamique Continentale et Côtère)

Titre : Near-bottom kinematics of shoaling and breaking waves : Experimental investigation and numerical prediction.

Année : 2002.

Source : Proceedings 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'2002), 8-12 Juillet 2002, Cardiff (UK), pp 306-318.

NEAR-BOTTOM KINEMATICS OF SHOALING AND BREAKING WAVES : EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND NUMERICAL PREDICTION

Michel BENOIT¹, Marilyne LUCK², Christophe CHEVALIER³, Michel BELORGEY⁴

Abstract : In order to predict the near-bottom kinematics under shoaling and breaking waves, five possible numerical modeling strategies are reviewed and applied to two test-cases performed under regular waves in a wave flume. These tests correspond to spilling and plunging breakers over a plane and smooth slope of 1:20. By comparing the numerical predictions with LDA velocity measurements close to the bottom, it is found that the Modified Transfer Function Method gives good estimations for the horizontal velocity, but it must be emphasized that this approach requires the knowledge of the free-surface signal on input. If only offshore wave conditions are known, best results are obtained from Nonlinear Deterministic Models, in particular from the extended Boussinesq equations. In the breaking zone, however, the agreement with measurement is better for the spilling breaker case ; the treatment of plunging breaker needs to be improved in the numerical model.

1. INTRODUCTION

The accurate prediction of wave kinematics (orbital velocities, pressure, etc) in the shoaling zone and in the breaking zone is of highest interest both for the design of marine structures (such as breakwaters, platforms, pipelines) and for the prediction of morphodynamical changes (due to sediment transport). The final aim of this research project is to propose numerical methods or tools applicable for the prediction of efforts acting on a pipeline laid on the bottom in the coastal zone. Although some experimental

¹ Research-engineer, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), EDF R&D, 6 quai Watier, BP 49, 78400 Chatou, France, e-mail : michel.benoit@edf.fr

² Research-engineer, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), EDF R&D, 6 quai Watier, BP 49, 78400 Chatou, France, e-mail : marilyne.luck@edf.fr

³ Dr. Res. Assist., University of Caen-Basse Normandie, Morphodynamique Continentale et Côtière 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France, e-mail : christophe.chevalier@meca.unicaen.fr

⁴ Professor, University of Caen-Basse Normandie, Morphodynamique Continentale et Côtière, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France, e-mail : belorgey@meca.unicaen.fr

results are available on given configurations for the case of a horizontal pipeline exposed to near-breaking and breaking waves (Yuksel and Narayanan, 1994 ; Chevalier *et al.*, 2000), numerical methods to predict these efforts are quite few and remain an open topic for research and development of operational tools.

In this paper, as a first step towards the prediction of these efforts, attention is paid to the estimation of near-bottom kinematics (in the absence of the pipeline). This problem has been addressed by several authors, both on experimental basis or by numerical methods (e.g. Isobe and Horikawa, 1982 ; Hamm, 1996). In the present work, experimental tests are performed in a wave flume on a sloping bottom. In order to highlight the resolving capabilities and limitations of these methods, the measured kinematics are compared to the predictions obtained by various numerical methods.

2. EXPERIMENTAL SET-UP AND SELECTED LABORATORY TEST-CASES

2.1 Experimental set-up

As a first step, in order to build a reference data-base of measurements, a series of experimental tests has been performed in a wave flume at the University of Caen Basse Normandie (France) for a constant and smooth slope of 5 % (1:20).

The wave flume is 22 m long, 0.80 m wide and the maximum water depth is 0.70 m. It is equipped with a wavemaker, able to generate regular and irregular waves, and to absorb waves reflected by the structure placed in the flume.

The present tests were performed under regular wave conditions for an offshore depth (flat bottom part) of 0.50 m. Wave period T and incident wave height H were varied during the tests, so that various breaking type conditions (plunging and spilling breakers) and various positions of the breaking point were considered.

The free-surface elevation was recorded by means of 10 resistive probes (3 “offshore” probes for analysing the incident wave height and 7 probes along the slope to measure the evolution of waves during shoaling). The orbital velocities were measured by using a Laser-Doppler Anemometer (LDA). This technique offers precise measurements of the horizontal and vertical components of the velocity. Vertical profiles were measured at given locations and near-bottom velocities were recorded 2 cm above the bed. Measurements were performed over a duration of at least 90 s, and then averaged for producing the signals over one period.

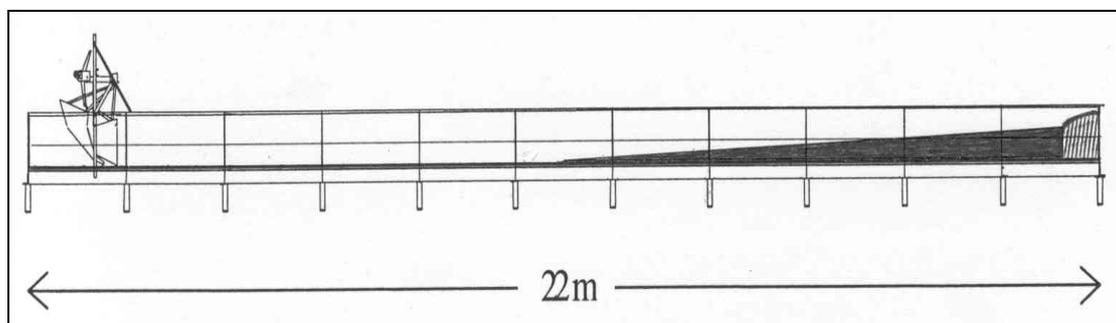


Figure 1 : Experimental set-up in the wave flume

2.2 Selected test-cases for comparison with numerical methods

Among the experiments, two test-cases were selected, corresponding to two different modes of breaking. Their characteristics are given in the table below :

Case		(1) Spilling breaker	(2) Plunging breaker
Incident wave height	H	14.7 cm	17.9 cm
Wave period	T	1.25 s	2.00 s
Breaking wave height	H _b	16.8 cm	23 cm
Breaking water depth	d _b	22 cm	30 cm

In this paper, measurements are presented at three locations ($X = 5$ m, 6 m and 7 m, with $X = 0$ corresponding to the beginning of the slope). The corresponding still water depths are 25 cm, 20 cm and 15 cm respectively. Figure 2 shows the positions of the measuring lines, as well as the locations of breaking points (BP) for the two cases.

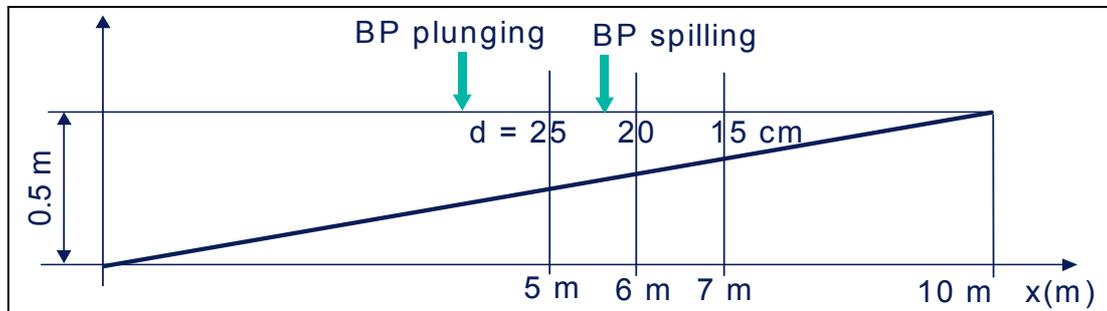


Figure 2 : Locations of the 3 measurements positions and breaking points (BP)

3. NUMERICAL METHODS FOR PREDICTING NEAR-BOTTOM VELOCITIES

3.1 Overview of modeling approaches

Various numerical methods can be applied to the tests described previously. They can be sorted depending on one hand on the level of available information both on wave conditions and bathymetry and, on the other hand, on the assumptions and theoretical grounds they rely on (see figure 3 for a schematic overview).

3.2 Flat-Bottom Theories (FBT)

The first idea is to use existing wave theories or numerical algorithm, which were developed for progressive waves of permanent form over a flat bottom (e.g. Sobey *et al.*, 1987). The input data is simply the wave period (T), the local wave height (H) and the water depth (d). The Airy theory or linear theory for small amplitude waves is the simplest approach of this family. Nonlinear theories include Stokes theories (of order 2, 3 or 5) and cnoidal theories (of order 1, 2, 3 or 5). For shallow-water waves, Stokes theories are not suitable (and thus not considered in this paper) and cnoidal theories are more appropriate. We use here the first order (Isobe, 1985) and third order cnoidal (Horikawa, 1988) theories. The “Stream-Function” approach can also be used (e.g. Sobey *et al.*, 1987), as it provides a more accurate solution of the problem, whatever the relative water depth and the wave steepness are.

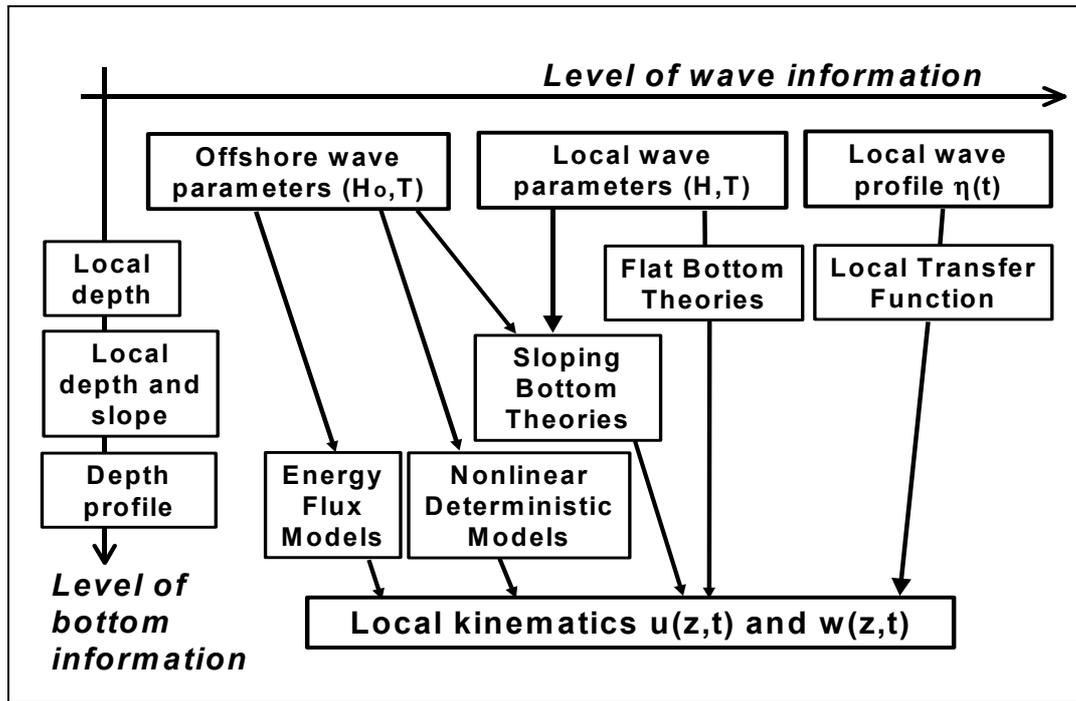


Figure 3 : Overview of modeling strategies for computing local wave kinematics

3.3 Sloping-Bottom Theories (SBT)

Although nonlinear FBT can account for the asymmetry of wave profile with respect to a horizontal plane, they are not able to reproduce the asymmetry with respect to a vertical plane, induced by nonlinear shoaling. So, there have been several attempts to modify FBT methods or to propose alternative semi-empirical methods for including this asymmetry (e.g. Hamm (1996) for a review). For instance, Hattori and Katsuragawa (1990) developed a Modified Stream Function Method by shifting the phases of the harmonics of the wave profile in order to obtain the skewed shape of near-breaking waves. Swart and Crowley (1988) established a so-called “covocoïdal” theory, suitable for sloping bottom profiles. Another approach, widely used for practical applications, is the parameterised method of Isobe and Horikawa (1982) for estimating the horizontal velocity. For SBT methods, the input data are the wave period (T), the local wave height (H), the water depth (d) and the local bottom-slope (m). In this work, we present results obtained with the method of Isobe and Horikawa (1982), which has proven to be efficient for shoaling waves, while remaining quite easy to use (Hamm, 1996).

3.4 Transfer Function Methods (TFM)

In the case where the local time-series of free surface elevation $\eta(t)$ and local water depth d are known, one may use a Transfer Function Method (TFM) to compute the velocity profiles from the free surface elevation profile (e.g. Koyama and Iwata, 1986):

$$u(z,t) = G_u(z,d,T) \eta(t + \phi_u) \quad (1.a)$$

$$w(z,t) = G_w(z,d,T) \eta(t + \phi_w) \quad (1.b)$$

where G_u and G_w are local transfer functions, and ϕ_u and ϕ_w time-lags between

velocities and free surface signals. Several methods are available for obtaining G and ϕ . The simplest one is based on the small amplitude wave theory and called the Linear Transfer Function Method (LTFM) :

$$G_u = \omega \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \quad \phi_u = 0 \quad (2.a)$$

$$G_w = \omega \frac{\sinh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \quad \phi_w = T/4 \quad (2.b)$$

Koyama and Iwata (1986) observed that LTFM usually predicts correctly the negative values of the horizontal velocity u , but overestimates its positive values. They then developed a Modified Transfer Function Method (MTFM) by which they modify the linear transfer function only under the wave crest. For the positive values of the horizontal velocity, the inclusion of finite amplitude effects was achieved by replacing the water depth d by $f.d$, where f is a correction term (and keeping $\phi_u = 0$) :

$$G_u = \omega \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh\left\{k\left(d+\eta\left(1-\frac{d+z}{d+\eta}\right)\right)\right\}} \quad \text{for } \eta > 0 \quad (3.a)$$

$$G_u = \omega \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \quad \text{for } \eta \leq 0 \quad (3.b)$$

Dean (1965) also proposed a Stream Function Method (DSFM) which can be used once the free-surface elevation signal is known ; this method is not tested in this work. Recent work by Chevalier *et al.* (2000) confirmed that the MTFM method is suitable in modeling nonlinear effects in the horizontal velocity profile near the bottom.

3.5 Energy Flux Models (EFM)

Starting from offshore wave conditions (wave period T , offshore wave height H_o , direction θ_o) and knowing the bottom profile ($d(x)$), another approach is to solve the energy flux equation for wave propagation (with surf-breaking dissipation included) and to combine it with a flat bottom theory (FBT) which is assumed to be locally valid. For the case of a bottom profile constant along the y direction the equation reads :

$$\frac{\partial(F \cos \theta)}{\partial x} = D_b \quad (4)$$

Once F is known at a given location, the local properties of the waves (height H , wave-number k , phase and group celerities C and C_g , etc.) can be computed by the use of the relationships of the corresponding FBT. Then, the velocities and pressure profiles can be evaluated for the local water depth. EFM methods are usually based on the coupling of a Stokes theory (order 1, 3 or 5) for the deeper part of the domain with a cnoidal theory (order 1,2 or 3) for the shallow-water area, the transition being done when the Ursell number Us reaches a given value. In this work, we solve equation (4) by using the linear wave theory and the first order cnoidal theory, with a transition when $Us = 25$. For the breaking dissipation term D_b , we use the formulation from Izumiya and Horikawa (1984) with its default parameters.

3.6 Nonlinear Deterministic Models (NDM)

When offshore wave conditions and the bathymetric profile are given, a more accurate way of computing wave propagation is to use Nonlinear Deterministic wave Models (NDM). Such models solve the nonlinear equations of motion for wave evolution in space and time (e.g. Laplace, Euler or Boussinesq equations) and each wave is discretized by 20 to 50 mesh points. In this work, we consider two models based on extended Boussinesq equations, with improved dispersion and nonlinear properties. Evaluation of nonlinearity and dispersion characteristics is provided by the following dimensionless parameters $\varepsilon = a/h$ and $\mu = kh$ respectively (where a , h and k are characteristic wave amplitude, water depth and wave-number respectively). Various forms of Boussinesq equations may be obtained, depending on the order of the terms which are retained when developments in ε and μ are performed in the equations put in a non-dimensional form. Two particular sets of such extended Boussinesq equations are used in two versions of a code developed at LNHE :

- equations by Nwogu (1993) including terms of order $O(\mu^2 ; \varepsilon)$ corresponds to version 1.1 of BSQ (BSQ_V1P1)
- equations by Wei *et al.* (1995) including terms of order $O(\mu^2 ; \varepsilon^3 \cdot \mu^2)$ corresponds to version 2.0 of BSQ (BSQ_V2P0). These latter equations are fully nonlinear with respect to the order of truncation of the dispersive terms

The equations are solved on a computational mesh (1D case here) for free surface elevation η and the horizontal velocity u_α at a depth $z_\alpha = C_\alpha \cdot d$, where C_α is a constant value chosen to optimise the dispersion properties of the model (here $C_\alpha = -0.53$, as suggested by Nwogu, 1993). Surf-breaking dissipation is included by adding an eddy viscosity-like term in the momentum equation. For instance, the one-dimensional version of the equations of Nwogu (1993) solved by BSQ (version 1.1) read :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} ((d + \eta)u_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{1}{2} C_\alpha^2 - \frac{1}{6} \right) d^3 \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial x^2} + \left(C_\alpha + \frac{1}{2} \right) d^2 \frac{\partial^2 (du_\alpha)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (5.a)$$

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + u_\alpha \frac{\partial u_\alpha}{\partial x} + \frac{z_\alpha^2}{2} \frac{\partial^3 u_\alpha}{\partial x^2 \partial t} + z_\alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(d \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} \right) - D_b = 0 \quad (5.b)$$

where the dissipative term due to breaking has the following expression :

$$D_b = \frac{1}{d + \eta} \frac{\partial}{\partial x} \left[v \frac{\partial}{\partial x} ((d + \eta)u_\alpha) \right] \quad (6)$$

The model and formulations used to compute the eddy viscosity v , incipient breaking, etc. are implemented following the approach of Kennedy *et al.* (2000). The 1D code BSQ uses the finite difference technique and the high order numerical scheme proposed by Wei *et al.* (1995). First-order spatial derivatives are computed by a 4th order scheme while the time-integration is performed by a 5th order predictor and 6th order corrector method. The horizontal velocity as a function of the elevation z reads :

$$u(z) = u_\alpha + \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right) \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial x^2} + (z_\alpha - z) \frac{\partial^2 (du_\alpha)}{\partial x^2} \quad (7)$$

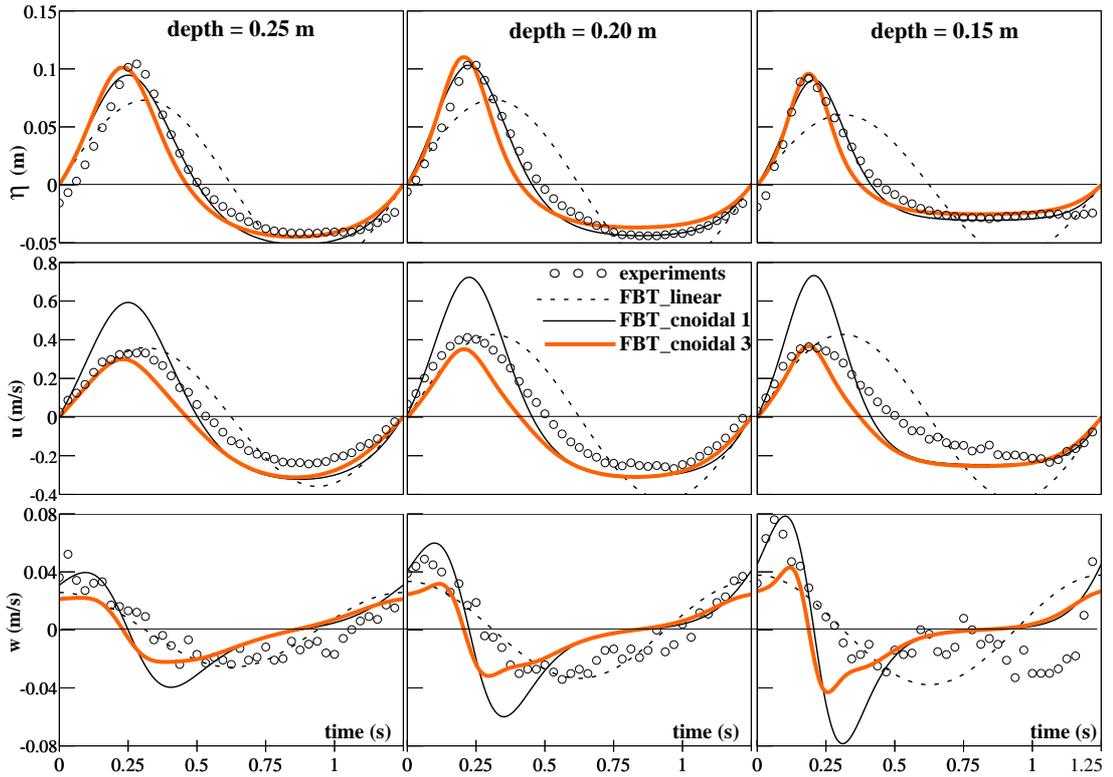


Figure 4 : Results of FBT methods for case 1 (spilling breaker)

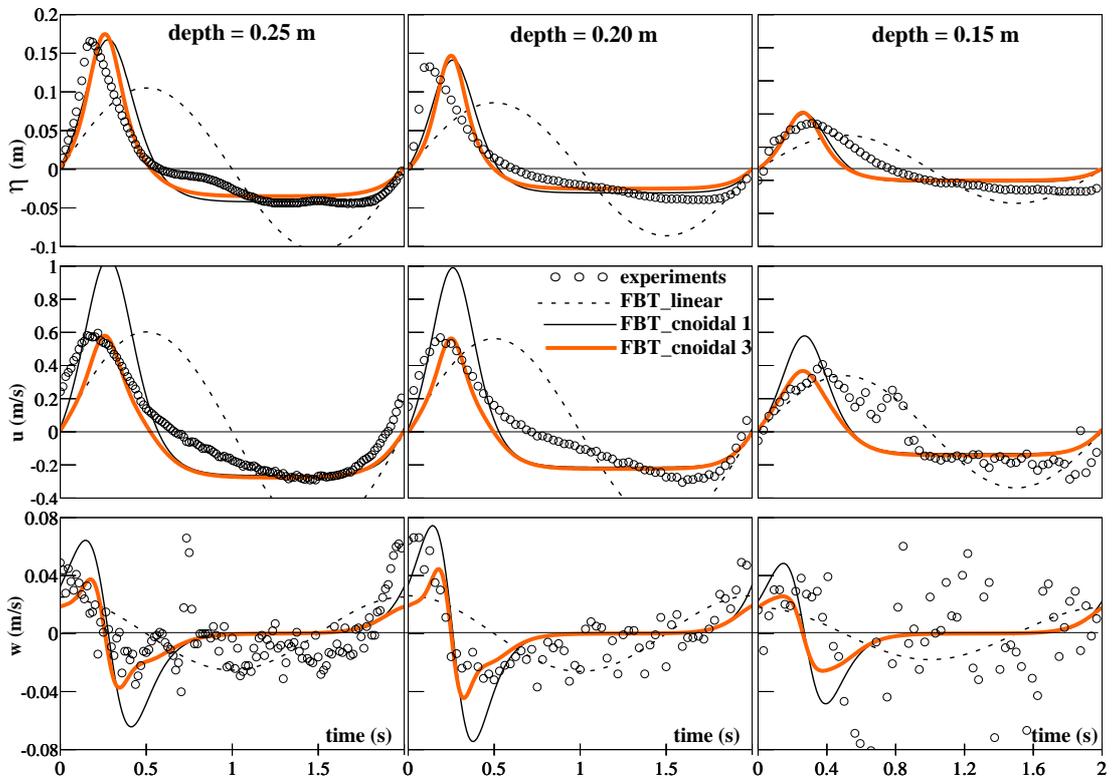


Figure 5 : Results of FBT methods for case 2 (plunging breaker)

4. ANALYSIS OF NUMERICAL PREDICTIONS FOR THE TWO TEST-CASES

4.1 Content and layout of figures of results

Results of the application of representative methods of the five categories of modeling techniques presented in Section 3 are plotted on figures 4 to 9. Figures 4, 6 and 8 correspond to test-case 1 (spilling breaker – $T= 1.25$ s), while figures 5, 7 and 9 correspond to test-case 2 (plunging breaker – $T= 2$ s). On each of these figures, nine graphs are plotted : each column corresponds to a value of the still water-depth (25 cm, 20 cm and 15 cm from the left to the right). On the first row, free surface elevations are plotted, while horizontal and vertical velocities at the elevation 2 cm above the bottom are plotted on the second and third rows respectively.

4.2 Flat-Bottom Theories (FBT)

Results are plotted on figure 4 for case 1 (spilling breaker) and figure 5 for case 2 (plunging breaker). It is clear from these figures that the linear theory fails to predict the profiles of both surface elevations and velocities. As the water depth decreases, the agreement is getting worse, as this method is unable to model both the vertical and horizontal asymmetries of the wave. This is very clear after wave breaking, in particular for the plunging case (figure 5) and confirms that the small amplitude theory should not be used in such near-breaking and breaking conditions. As they are able to represent the asymmetry of the waves with respect to a horizontal plane, cnoidal theories of order 1 and 3 bring some improvements. For the spilling case (figure 4), predictions of free-surface elevations are quite correct, in particular for the third order theory, even after breaking. The magnitudes of velocities are however overestimated by the first order cnoidal theory and this trend increases after breaking. Even if the shape of the horizontal velocity profile is not perfectly matched by the third order theory method, the magnitudes of the extrema are well predicted for the spilling case.

For the plunging case (figure 5), cnoidal theories are less successful in modeling the profile of free-surface elevation, because the asymmetry with respect to a vertical plane is also important in that case. Some comments arise for the predictions of kinematics : the first order cnoidal method significantly overestimates the maximum value of the horizontal velocity. Results of third-order theory are in better agreement with the measurements, but still suffer from the inability of the method to model such a skewed profile after breaking.

Another limitation related to FBT (including the stream function method) lies in the fact that the maximum height of a stable wave over a flat bottom is about 0.78 times the water depth. Under shoaling conditions however, it is well known that the ratio of wave height over water depth may exceed 1 and reach 1.3 or 1.4 for mild slopes (e.g. Goda 2000). Under such circumstances, it is expected that FBT methods will fail or diverge just prior to breaking, when the above ratio exceed 0.8.

4.3 Sloping-Bottom Theories (SBT)

From this class of methods, we only consider the method from Isobe and Horikawa (1982), hereafter referred as IH82. From that method, only the horizontal velocity can be computed. Results presented on figure 6 for case 1 (spilling breaker) show that a very

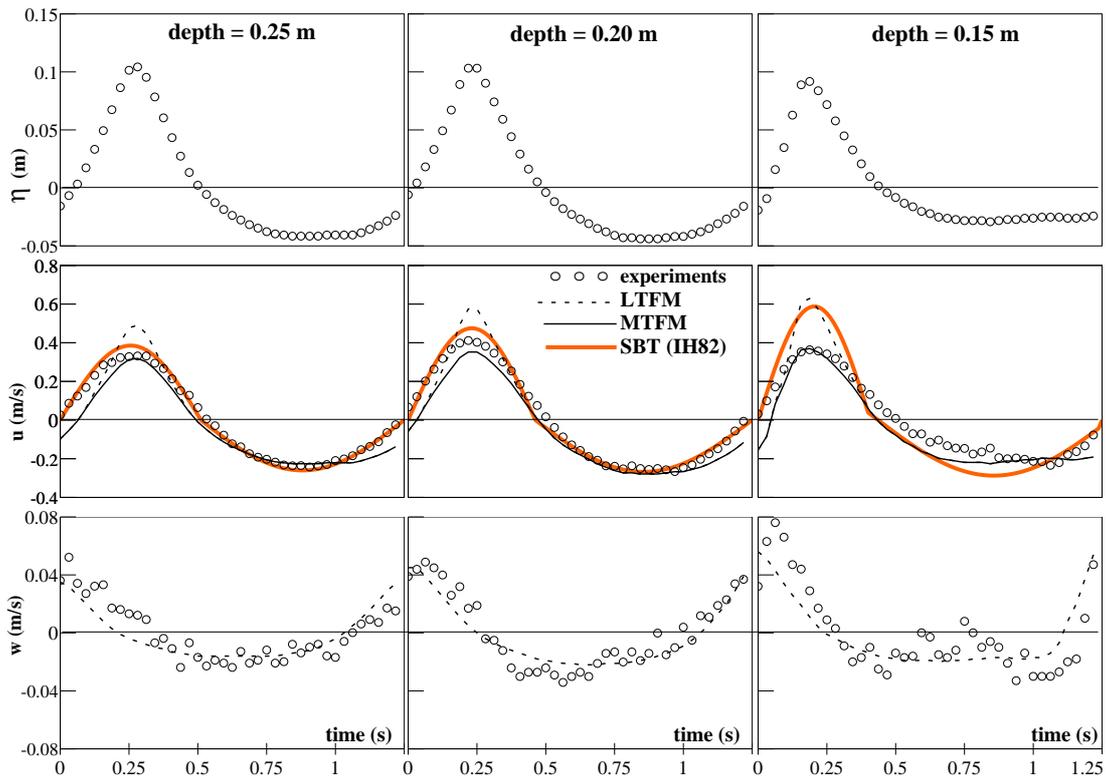


Figure 6 : Results of TFM and SBT(IH82) methods for case 1 (spilling breaker)

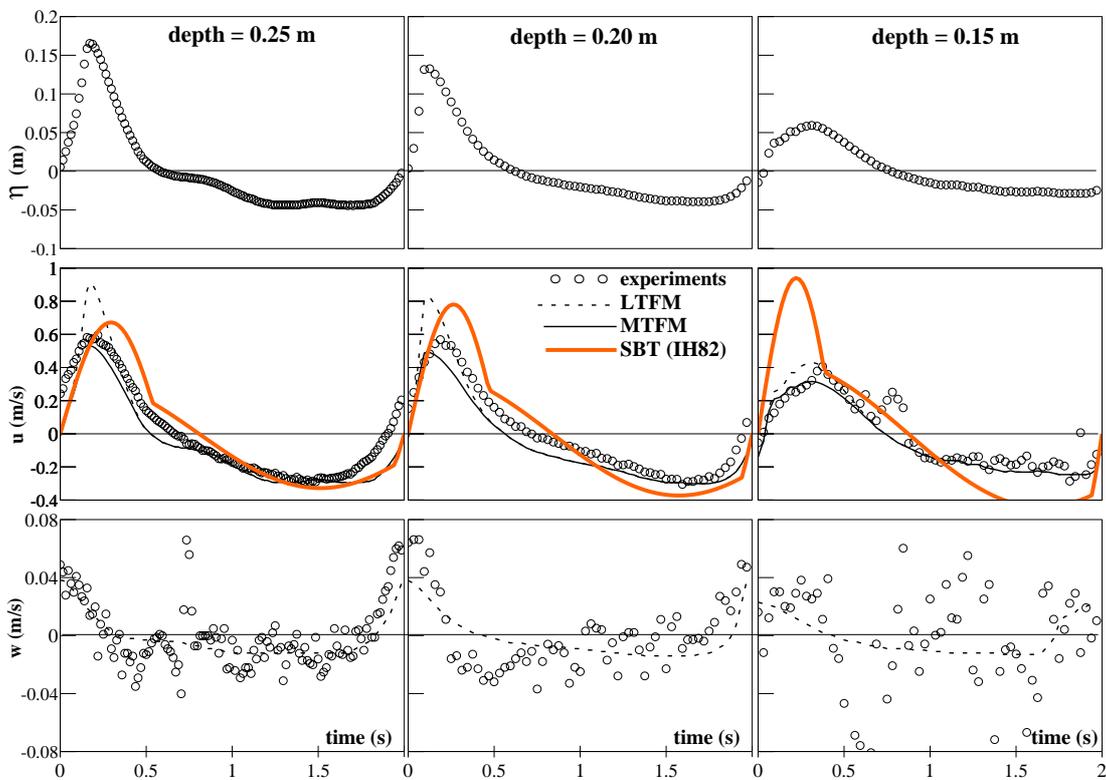


Figure 7 : Results of TFM and SBT(IH82) methods for case 2 (plunging breaker)

good agreement is obtained before breaking (depth = 25 cm), but as the water depth decreases the method tends to overestimate the peak value of the horizontal velocity. This is also observed for case 2 (plunging breaker) for which waves break offshore of the three measurement locations. This application of SBT_IH82 method clearly demonstrates that this technique should not be used in the breaking zone, although it may give accurate predictions of horizontal velocity before breaking. This limitation was already observed by several authors (e.g. Hamm, 1996).

4.4 Transfer Function Methods (TFM)

Results are plotted on figure 6 for case 1 (spilling breaker) and figure 7 for case 2 (plunging breaker). For these methods, the measured free-surface elevation signal is used on input. Thanks to this, it is observed for both cases that the predictions of kinematics from the (linear) LTFM method are significantly improved in comparison to the linear FBT predictions (figures 4 and 5) where only the wave height was used. However, there is a systematic trend of the method to overestimate the maximum value of the horizontal velocity under the crest. The MTFM method (Koyama and Iwata, 1986) partly overcomes this shortcoming and produces good estimations of the horizontal velocity before and after breaking, both for the shape and the extrema of the profile. Chevalier *et al.* (2000) came the same conclusion and recommended this method. The vertical velocity is well predicted by the LTFM method, but this component is significantly lower than the horizontal one.

4.5 Energy Flux Models (EFM)

Results are plotted on figure 8 for case 1 (spilling breaker) and figure 9 for case 2 (plunging breaker). For the spilling breaker case, EFM method gives very good estimation of the free-surface profile (as it was already observed in section 4.2 for the first order cnoidal FBT theory) because the asymmetry with respect to the vertical plane is low in the spilling breaking case. It must be emphasised that, for the EFM approach, the local wave height is computed from (4). For this case, this means that the combination of the first-order cnoidal theory and an efficient dissipation model allows to reach acceptable predictions for the free surface profile. For the kinematics however, we again notice the trend of first-order cnoidal method to overestimate the velocities under the crest, as was observed in section 4.2. Same comments are drawn from the plunging breaker case, for which, in addition (and as expected due to the strong skewed shape of the wave), the predictions of the free surface elevation are worse after breaking. For this case, at the water depth of 15 cm, the local wave height predicted by the EFM model is higher than the measured one, which means that the surf-breaking dissipation term D_b in (4) is not strong enough and should be re-calibrated for this type of breaking.

3.6 Nonlinear Deterministic Models (NDM)

Results are plotted on figure 8 for case 1 (spilling breaker) and figure 9 for case 2 (plunging breaker). The curves labeled BSQ_V1P1 refer to the Boussinesq equations of Nwogu (1993), whereas the curves labeled BSQ_V2P0 refer to the equations of Wei *et al.* (1995). For the spilling breaker case (figure 8), good predictions of the free-surface profile are obtained in particular from the fully nonlinear (to the order of the dispersive term) model BSQ_V2P0. Predictions of kinematics are also in close agreement with the

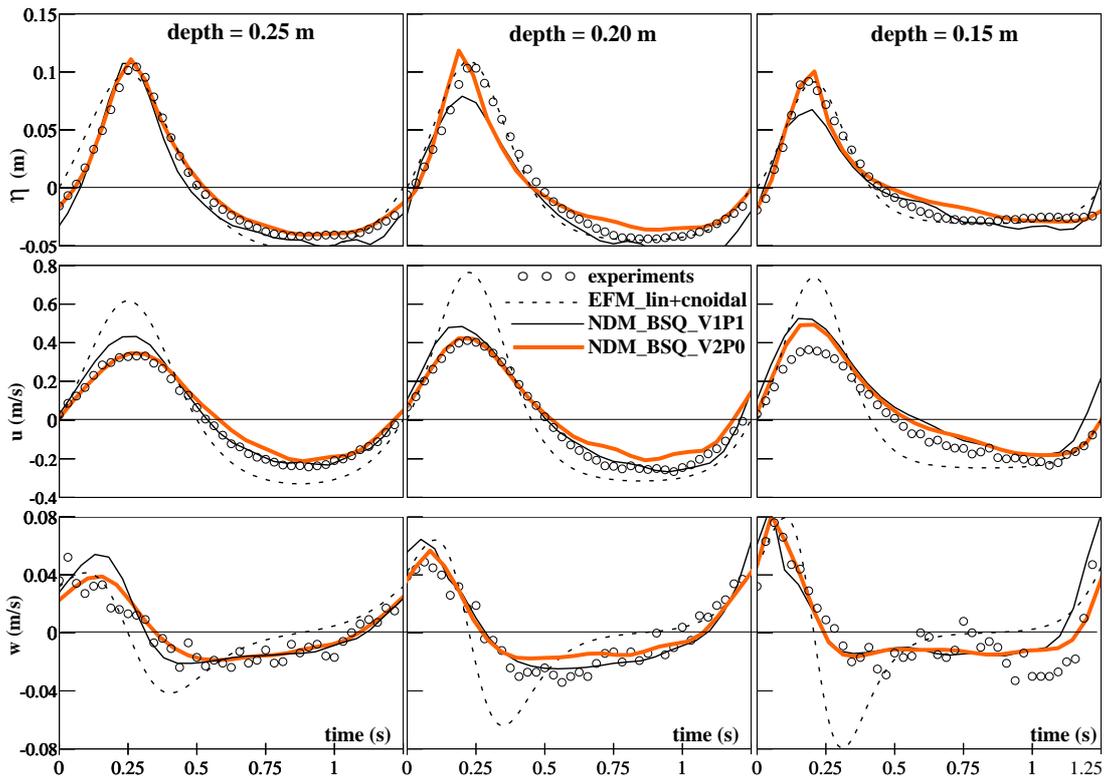


Figure 8 : Results of EFM and NDM methods for case 1 (spilling breaker)

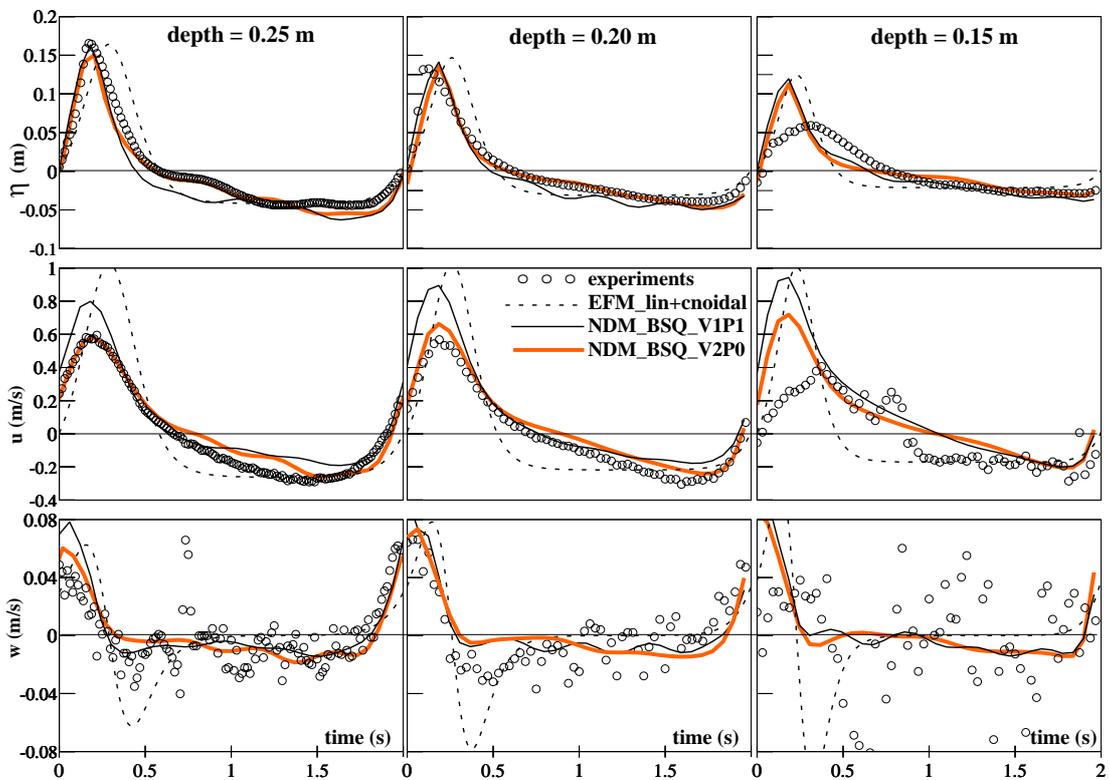


Figure 9 : Results of EFM and NDM methods for case 2 (plunging breaker)

measurements, and again BSQ_V2P0 performs slightly better than BSQ_V1P1. The peak horizontal velocity at the shallower water depth ($d = 15$ cm) is however a bit overestimated. Both models correctly reproduce the vertical velocity profiles.

For the plunging breaker case (figure 9), very good agreement with the measurements is observed after breaking (depth = 25 and 20 cm) for BSQ_V2P0. At the third station (depth = 15 cm), the shapes of free-surface elevation and velocities are not well resolved by the models. On one hand, the predicted wave height is higher than the measured one and on the other hand the measured profile is less skewed than the predicted one. This indicates that the model adopted for the breaking term in (5) is not fully adapted for this case. This is not surprising as the eddy viscosity formulation (6) is mostly suitable for moderate breaking conditions, such as spilling breakers.

5. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

In this paper, through comparisons with laboratory experiments (regular waves over a smooth and plane slope of 1:20), we addressed the problem of accurate prediction of near-bottom kinematics under shoaling and breaking waves, both for spilling and plunging breaker conditions. The following conclusions can be drawn from the study :

1. Flat Bottom Theories (FBT) are not suitable for modeling waves in pre-breaking and breaking conditions. In particular, the linear (small amplitude) wave theory should not be used due to its inability to model the asymmetry of waves. For moderate breaking conditions (spilling breaker), cnoidal theories may be used as a first guess, but acceptable results were obtained only for the third-order theory (while the first order theory overestimates the horizontal velocity).
2. Sloping Bottom Theories (SBT) : the semi-empirical method of Isobe and Horikawa (1982) gives good predictions of horizontal velocities up to the breaking point, but should not be used after breaking as it then overestimates the horizontal velocity. Other approaches from this family are presently under test.
3. Transfer Functions Methods (TFM) : the LTFM (linear) method is not recommended, but the MTFM method (Koyama and Iwata, 1986) exhibited good overall performances, prior and after breaking. It is a recommended technique for use when the free surface signal is available.
4. Energy Flux Models (EFM) : Such models may be tuned for modeling wave height evolution, but kinematics remain poorly predicted, because these models invoke locally a Flat Bottom Theory (FBT) for the kinematics.
5. Nonlinear Deterministic Models (NDM) : Numerical models based on extended Boussinesq equations look promising, both for the shoaling and breaking zones. The model by Wei *et al.* (1995) gave better predictions than the model of Nwogu (1993), which is of lower order in nonlinearity. Better agreement was obtained for spilling breakers and improvements of the modeling of the breaking mechanism are needed for plunging breakers.

Ongoing and future work will consider the presence of a pipeline laid on the bottom and the determination of efforts due to near-breaking and breaking waves. Again, experimental tests will be performed and numerical prediction methods (based on the results of the present study for the kinematics) will be evaluated and improved.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is partly funded by the French Ministry of Economy and Industry (FSH - Fond de Soutien aux Hydrocarbures) under Research Grant n° 99DM06101 – project CLAROM-ECOMAC.

REFERENCES

- Dean R.G. 1965. Stream function representation of nonlinear ocean waves. *J. Geophys. Res.*, vol. 70, n°18, pp 4561-4572.
- Chevalier C., Lambert E., Belorgey M. 2000. Wave forces on a horizontal cylinder in the coastal zone. *Proc. of the 10th ISOPE Conf., Seattle (USA)*, pp 524-531.
- Goda Y. 2000. Random seas and design of maritime structures. *Advanced Series on Ocean Eng. Vol. 15, World Scientific*, 444 p.
- Hamm L. 1996. Computation of the near-bottom kinematics of shoaling waves. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), Orlando (Florida, USA)*, pp 537-550.
- Hattori M., Katsuragawa T. 1990. Improved calculation of the shoaling wave field. *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), Delft (The Netherlands)*, pp 396-409.
- Horikawa K. 1988. Nearshore dynamics and coastal processes. *University of Tokyo Press, Tokyo (Japan)*, 522 p.
- Isobe M., Horikawa K. 1982. Study on water particle velocities of shoaling and breaking waves. *Coastal Eng. in Japan*, vol. 25, pp 109-123.
- Isobe M. 1985. Calculation and application of first-order cnoidal wave theory. *Coastal Eng.*, vol. 9, pp 309-325.
- Izumiya T., Horikawa K. 1984. Wave energy equation applicable in and outside the surf zone. *Coastal Eng. in Japan*, vol.27, pp119-137.
- Kennedy A.B., Chen. Q., Kirby J.T., Dalrymple R.A., 2000. Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. Part I : 1D. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol 126, pp 16-25.
- Koyama H., Iwata K. 1986. Estimation of wave particle velocities of shallow water waves by a modified transfer function method. *Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Eng., (ASCE), Taipei (Taiwan)*, pp 425-436.
- Nwogu O.G. 1993. Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, vol. 119, pp 618-638.
- Sobey R.J., Goodwin P., Thieke R.J., Westberg R.J. 1987. Application of Stokes, cnoidal and Fourier wave theories. *J. of Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng.*, vol. 113, pp 565-587.
- Swart D.H., Crowley J.B. 1988. Generalized wave theory for a sloping bottom. *Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., (ASCE), Malaga (Spain)*, pp 181-203.
- Wei G., Kirby J.T., Grilli S.T., Subramanya R. 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. *J. Fluid Mech.*, vol. 294, pp 71-92.
- Yuksel Y., Narayanan R. 1994. Breaking wave forces on horizontal cylinders close to the sea bed. *Coastal Eng.*, vol. 23, pp 115-133.

ANNEXE 8

Auteurs : Philippe DONNARS*, **Michel BENOIT**
* *EDF R&D LNHE (Chatou)*

Titre : Interactions in the stability of toe-berm and main-armour for rubble mound breakwaters : an experimental study.

Année : 1996.

Source : Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'1996), 2-6 Septembre 1996, Orlando (Floride, USA), pp 1617-1630.

INTERACTIONS IN THE STABILITY OF TOE-BERM AND MAIN-ARMOUR FOR RUBBLE-MOUND BREAKWATERS : AN EXPERIMENTAL STUDY

Philippe DONNARS ¹ and Michel BENOIT ¹

Abstract

This experimental study is concerned with one particular aspect of possible failure modes for a rubble-mound breakwater : the interactions between the toe-berm and the main-armour of the breakwater. Through a series of laboratory tests in a wave basin under long-crested and short-crested waves, we investigate the mutual influence of both these component parts of the breakwater on its general stability. The effects of several wave parameters are examined for four sizes of toe-berm stones. For the trunk section, experimental results are found to compare quite satisfactorily with existing design formulas both for the main-armour and the toe-berm. As a general trend from the tests results, the interaction processes appear to have only moderate effect. Their major feature is an increase of damage to the armour when the toe-berm is unstable. On the opposite, minor effects of main-armour on toe-berm stability were observed. In particular, the "toe-berm armouring process" (by units falling from the armour) appears to occur only marginally and under precise conditions.

1. INTRODUCTION - SCOPE OF WORK

The common practice for designing a breakwater is usually to use existing design formulas and rules for each individual part of the breakwater (main armour, rear armour, crest,...). This design approach is quite well documented in the scientific literature, in particular for the main armour (e.g. Van der Meer, 1992). In a following step, the whole breakwater profile has to be further tested and optimized through model tests in wave flume or basin, to obtain a reliable and safe structure.

The overall stability of the breakwater is however not only a function of the stability of each individual component part of the breakwater, but also of the interaction mechanisms between these parts. Present knowledge on the latter point is quite limited and it is not straightforward to find in the literature precise and quantitative descriptions of these possible interaction effects. Improving this knowledge was the main objective of the European Research Project "Rubble-Mound Breakwater Failure Modes (RMBFM)" of MAST-2. The study presented in this paper is concerned with one particular aspect of these possible failure modes : the interactions between the toe-berm and the main-armour of a breakwater.

¹ Research Engineer — Maritime Group
EDF - Laboratoire National d'Hydraulique, 6, quai Watier 78400 CHATOU, FRANCE

This experimental study continues previous tests performed in a wave flume at the University of Bologna (UB) in Italy (Lamberti and Aminti, 1994) within the same RMBFM project. In particular, Lamberti (1994) emitted the idea that, for sufficiently wide toe-berms, the main feature of this interaction process could be a phenomenon of "toe-armouring" by stones falling down from the damaged armour. If these stones remain on the toe-berm, they may increase its stability (lower damage to the toe-berm). Still addressing these possible interactions, we focus here more closely on three-dimensional effects, by considering the following aspects :

- wave obliquity (effect of angle of wave incidence)
- wave directionality (effect of angular spreading of wave energy)
- behaviour on the trunk section and at round-heads. Within the frame of this paper, attention will be mainly paid to the trunk section. Additional results for the round-head section may be found in Benoit and Donnars (1996).

In the present study, these effects are investigated through a series of laboratory experiments in a multidirectional wave basin. The experimental conditions and procedure are described in Section 2. Results for the main-armour and the toe-berm are presented and compared with other experimental results and existing design formulas in Section 3 and 4 respectively. The effects of the interaction processes are discussed in Section 5. The conclusion of Section 6 summarizes the main findings of this study and gives some recommendations for practical design.

2. EXPERIMENTAL SET-UP AND TEST CONDITIONS

2.1 Brief description of the wave basin used for laboratory tests.

The tests have been conducted in the multidirectional wave basin of Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) in Chatou (France) (Figure 1). This experimental facility is dedicated to physical modelling applied to maritime and coastal studies. The overall dimensions of the basin are 54 m x 31 m x 1.3 m (maximum water depth for operational use : 0.80 m). This basin is fitted out with a multidirectional piston-type wave-maker composed of 56 paddles (segment width : 0.40 m).

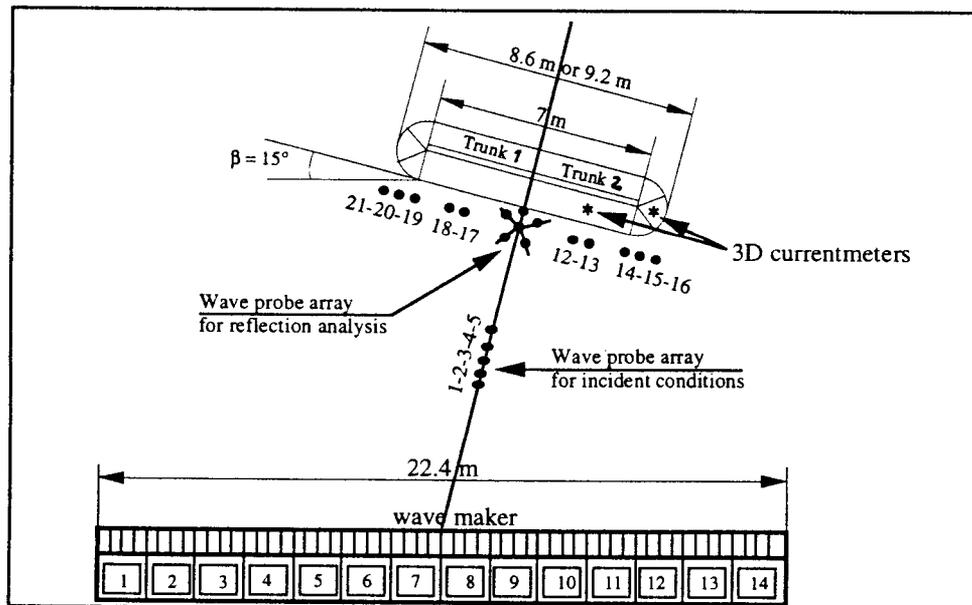


Figure 1 : General lay-out of experimental set-up in LNH wave basin.

The total length of the wave-maker thus reaches 22.4 m. It can operate in the frequency range [0.2 ; 2.0 Hz]. During the experiments, vertical side-walls (of 2 m in length) were set up at each side of the wave-maker in order to increase the work area by making use of "corner-reflection" method (Funke and Miles, 1987).

2.2 Breakwater lay-out and cross-sections.

The present tests were aimed to continue previous tests, performed within the same research project in a wave flume at the University of Bologna (UB) in Italy (Lamberti and Aminti, 1994). So, we started from the same breakwater characteristics, except that the geometric scale was multiplied by a factor of 1.32 with respect to UB tests in order to adapt to the characteristics of LNH wave basin.

The main features of breakwater cross-sections (Figure 2 for the slope of 1:1.5) are summarized below :

- tests are performed with a flat bottom at a water depth of $d=0.45$ m.
- the ratio of water depth above toe-berm h_t to design wave height H_{sd} is about 1 ($h_t/H_{sd} \approx 1$)
- the width of toe-berm B_t is constant over the whole test programme and is taken to be three times the diameter of design toe-berm stones $D_{n50t}(\text{design})$
- the thickness of the toe-berm is constant and is taken to be that of two layers of design toe-berm stones $D_{n50t}(\text{design})$.
- two armour slopes are considered : 1:1.5 ($\cotg \alpha = 3/2 = 1.5$) and 1:2.5.

The breakwater is not parallel to the wave-maker, but there is an angle of 15 degrees between them (Figure 1). This orientation has been chosen in order to ensure a sufficiently high frequency limit for generated waves even for oblique incidences. In the paper, we only make use the direction of incidence as referred to the breakwater (for instance, a 0° direction corresponds to normal wave attack).

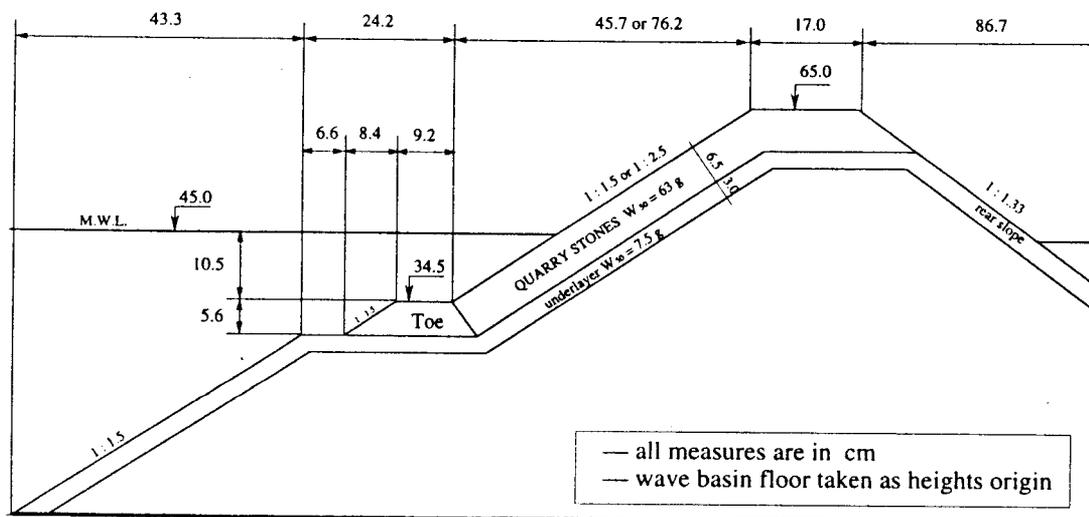


Figure 2 : Cross-section of breakwater (slope 1:1.5).

The breakwater used for the experiments consists in two half-breakwaters, each of them being composed of a trunk section and a round-head section (Figure 3). Each half-breakwater has the same armour units, but different toe-berm stones. A 1 m long test section is considered on each trunk section. The round-head sections are divided in 6 angular sectors of 36 degrees (Figure 3). By this way, it is possible to test simultaneously 4 sections (2 trunks and 2 round-heads) under normal waves and 3 sections under oblique waves (2 trunks, 1 round-head).

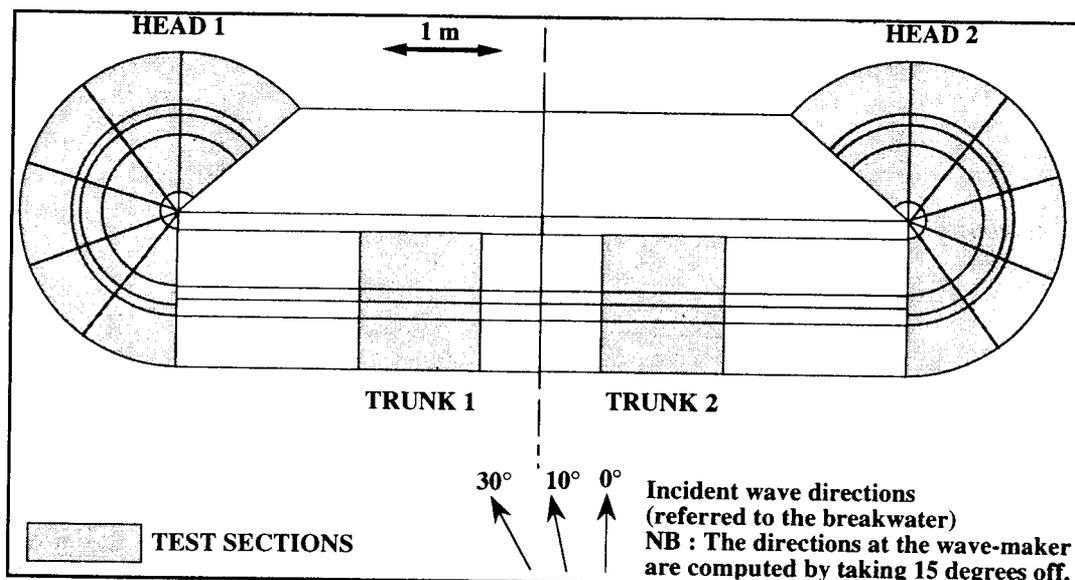


Figure 3 : Test sections on the breakwater and wave directions.

2.3 Choice of governing parameters and test programme.

The choice of varying governing parameters for the experimental tests is based on the analysis performed by Gerding (1993) and Lamberti (1994) :

- the **nominal diameter of the toe-berm stones** [4 values]. The first value corresponds to the "design" value as determined by a conventional design approach, whereas the other ones lead to "unstable" berms (see § 2.5).
- the **slope of the main-armour** [2 values : 1:1.5 and 1:2.5] (see §2.2).
- the **wave steepness** [2 values : $s_{om} = 2\%$ and $s_{om} = 5\%$]
The wave steepness is defined as : $s_{om} = H_s/L_{0m} = H_s/1.56T_m^2$. As "longer" waves ($s_{om} = 2\%$) are thought to be more severe for the stability of the breakwater than "shorter" waves ($s_{om} = 5\%$), most of tests are performed with the 2% steepness for incident waves.
- the **angle of wave incidence** [2 values : $\beta = 0^\circ$ and $\beta = 30^\circ$]. One test has also been conducted under a $\beta = 10^\circ$ angle of wave incidence to check whether such a value could lead to higher damage, as shown by Galland (1994) for toe-berm stability at concrete armoured structures or by Juhl and Sloth (1994) for wave overtopping.
- the **angular spreading of energy** [2 values : $s = \infty$ (unidirectional waves) and $s = 15$]. The spreading index s corresponds to the exponent in the model of directional spreading function used for generating drive signals for the wave-maker $D(\theta) = 1/\Delta \cos^{2.s}(\theta)$. The short-crested case ($s = 15$) produces a directional sea-state with moderate angular spreading (directional width of about 10 degrees).

The test programme is based on the above choice of governing parameters. Due to this rather large number of parameters, it was not possible to test all the combinations between all parameters, which would have resulted in $4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 64$ tests. This number has been reduced to 30 by considering only some of the above combinations (Benoit and Donnars, 1996). Because two half-breakwaters are tested simultaneously, the overall number of tests is finally equal to 15. Due to the fact that only three sections are tested under oblique wave, the total number of sections (trunk + round-head) examined during the experiments is equal to 52.

2.4 Review of incident wave conditions.

A JONSWAP-type spectrum is used for the distribution of wave energy over frequencies with a value of the peak enhancement factor $\gamma = 5$ for the tests at steepness $s_{om} = 0.05$ and a value of $\gamma = 1$ for the tests at steepness $s_{om} = 0.02$.

For a given test, the wave steepness is constant and the target wave height is increased by successive steps : each step corresponds to a run. A test is thus composed of 7 runs. The target wave characteristics for the experiments (in terms of significant wave height H_s and mean period T_m) are summarized in Table 1.

Each run has a duration of about 2000 waves of target mean period T_m .

run n°	$s_{om} = 0.05$ ($\gamma = 5$)		$s_{om} = 0.02$ ($\gamma = 1$)	
	H_s (m)	T_m (s)	H_s (m)	T_m (s)
1	0.060	0.88	0.045	1.20
2	0.071	0.95	0.053	1.30
3	0.082	1.02	0.061	1.40
4	0.093	1.09	0.069	1.49
5	0.104	1.15	0.077	1.57
6	0.115	1.21	0.085	1.65
7	0.126	1.27	0.093	1.73

Table 1 : Target wave characteristics for model experiments (H_s , T_m).

2.5 Review of incident wave conditions.

• **Armour stones** : The following characteristics were obtained for the stones of the main armour (two layers) : Density=2.55 ; Nominal diameter $D_{n50a} = 2.91$ cm ; Nominal weight $W_{n50a} = 63$ g ; $\Delta.D_{n50a} = 4.51$). Same stones are used for the armour-layer both at the trunk sections and at the round-heads.

• **Toe-berm stones** : The "design" value of toe-berm stones for trunk section (labelled T1) was determined according to the design formula of Gerding (1993), leading to the following characteristics : Density=2.72 ; Nominal diameter $D_{n50t} = 2.58$ cm ; Nominal weight $W_{n50t} = 47$ g ; $\Delta.D_{n50t} = 4.44$

From the design value of toe-berm stones, the three other values (termed T2 to T4) are computed from the relationship proposed by Lamberti (1994) :

$$W_{n50t}(T_j) = \frac{W_{n50t}(T_1)}{2^{K_j}} \quad \text{or} \quad K_j = \ln_2 \left(\frac{W_{n50t}(T_1)}{W_{n50t}(T_j)} \right)$$

The values of K_j are chosen to be :

- toe-berm stones T2 : $K_2 = 1.2$ $W_{n50t}(T2) = W_{n50t}(T1) / 2.3 \approx 20$ gr
- toe-berm stones T3 : $K_3 = 2.5$ $W_{n50t}(T3) = W_{n50t}(T1) / 5.66 \approx 7.5$ gr
- toe-berm stones T4 : $K_4 = 4.5$ $W_{n50t}(T4) = W_{n50t}(T1) / 22.6 \approx 2.2$ gr

The weight of toe-berm stones at the round-head are increased by about 25 % from the above values determined for the trunk section.

The sorting index D_{85} / D_{15} for the various toe-berm stones lies in the range [2 ; 2.5]. It must be emphasised that this sorting index is much larger (but also more representative of natural conditions) than the value of 1.1 used during the flume experiments at UB (Lamberti, 1994).

2.6 Measurement and analysis of damage.

There is no rebuilding of the breakwater between consecutive steps of a test : cumulative damage is observed and reported during the experiments.

Damage is first evaluated by counting the number of units displaced from the armour-layer and the toe-berm. This is the standard method for measuring damage during the tests. For the trunk section, the damage index is given by the number N_{od} of units displaced within a strip of width equal to one D_{n50} :

$$N_{od} = N_d \frac{D_{n50}}{l} \quad \text{where } l \text{ is the width of the trunk section.}$$

An optical sensor has also been used for several tests in order to get information on the changes in the profile of the breakwater and to estimate the eroded area A_e in the breakwater profile. The damage level is then defined as : $S = A_e / D_{n50}^2$.

By combining present experimental results and previous observations (Van der Meer, 1992 ; Burcharth, 1993), the relationship : $S \approx 2 \cdot N_{od}$ is obtained and will be used further in the analysis of test results.

3. STABILITY OF THE MAIN-ARMOUR FOR THE TRUNK SECTION

3.1 Descriptive analysis of the stability of the main-armour of the trunk

We only report here the main observations from the tests. A more complete description and analysis of results may be found in Benoit and Donnars (1996).

3.1.1 Influence of wave direction and directionality (angular spreading)

Examples of test results for the stability of the main-armour are plotted on Figure 4 for four wave conditions and the four toe-berm stone sizes (armour-slope 1:2.5 only). In the range of tested values, the wave direction does not appear to have a significant effect on the stability of the main-armour as long as the toe-berm is stable (toe-berms T1 and T2). When the toe-berm is unstable, damage levels are higher on the armour layer and the normal direction seems to be more severe than an oblique (30°) direction.

Damage on the main-armour is higher under short-crested waves (only one tested value of angular spreading) than under long-crested waves for the same incident wave height. This is a clear observation from present experiments, which appears to be in some contradiction with other experimental test results. For instance, Thunbo Christensen *et al.* (1984) found from model tests on a breakwater armoured with quarry stones that uni-directional waves result in 30-40 % more damage to the breakwater when compared to short-crested waves. Canel and De Graauw (1992) also concluded that short-crested waves result in an increase of the stability number (from 0 to 60 %) for rock for the 1 % damage level. Although no definite conclusion may be drawn from the rather low number of present experiments, this increase of damage under short-crested waves appears quite clearly. It is assumed to be due to a rather low angular spreading of wave energy.

This increase of damage under short-crested waves is clearly observed for the normal attack, but seems to be quite feeble for the 30° direction.

3.1.2 Influence of wave steepness (long-crested waves ; armour slope 1:2.5)

The effect was examined for toe-berms T1 and T2 only. For the same wave height, it is observed that the "longer" waves ($s_{om} = 2$ %) clearly result in more damage to the armour-layer than the "shorter" waves ($s_{om} = 5$ %).

3.1.3 Influence of toe-berm stones weight (long-crested waves only)

For the normal wave attack, a clear increase of damage to the main-armour with decreasing toe-berm stone weight is observable. For toe-berm stones T1 and T2, damage to the armour remains at an acceptable and comparable level. But for lighter stones (toe-berm stones T3 and T4), the main-armour is significantly more damaged. Severe damage occurs for the lightest toe-berm stones T4.

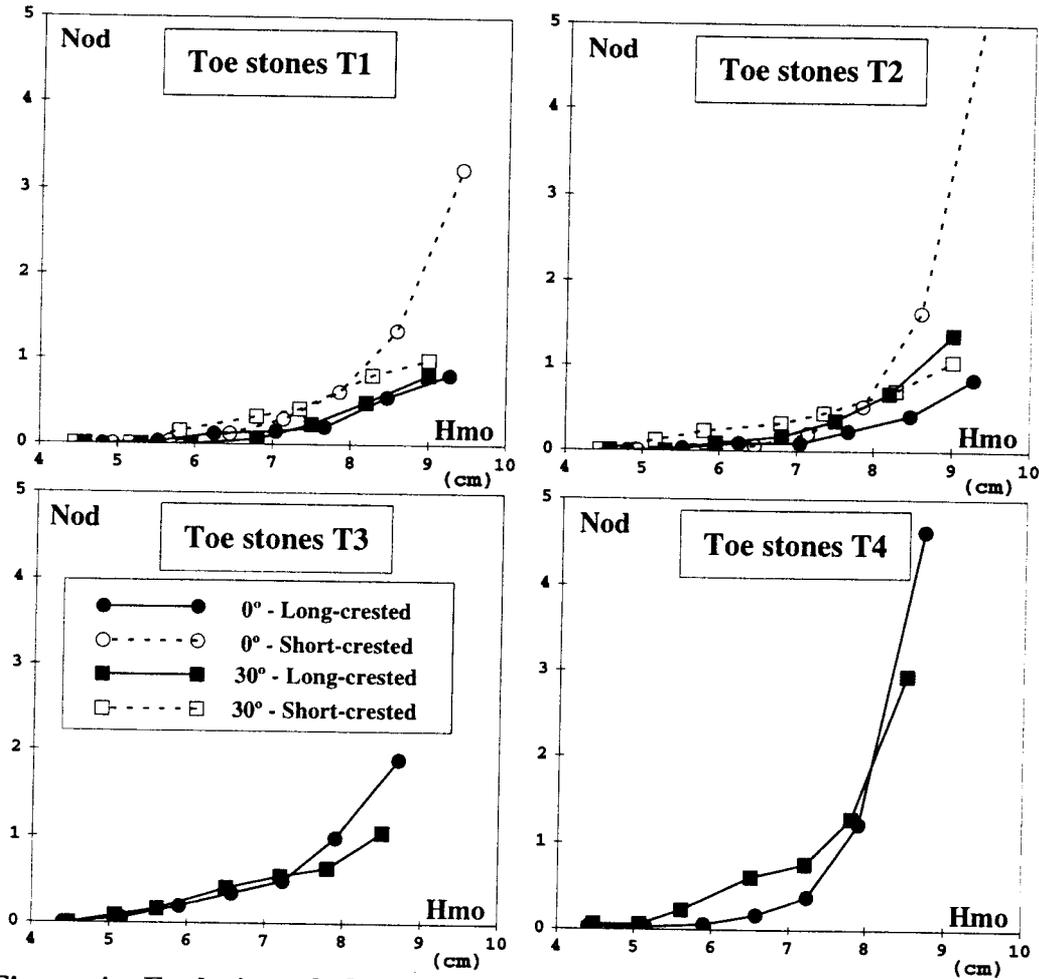


Figure 4 : Evolution of observed damage to the main-armour for four wave conditions (armour-slope 1:2.5 only).

3.2 Synthetic analysis of the stability of the main-armour of the trunk

In order to compare our test results to existing design formulas, we consider the Van der Meer design formulas (Van der Meer, 1988) for the armour layer :

$$\text{Plunging waves } (\xi_m < \xi_{mc}) : \frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n50a}} = 6.2 \frac{P^{0.18}}{\sqrt{\xi_m}} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2}$$

$$\text{Surging waves } (\xi_m > \xi_{mc}) : \frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n50a}} = 1.0 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cotg \alpha} \xi_m^P$$

where N is the number of waves in a storm or in the test ($N=2000$), S is the damage index defined from the eroded area A_e (here, S is computed from N_{od} by : $S = 2 \cdot N_{od}$; see § 2.6), ξ_m is the surf-similarity parameter defined from the mean wave period T_m , P is the notional permeability factor (taken to be 0.4 as suggested by Van der Meer (1988) for a permeable core with a filter and an armour composed of two layers of natural rocks). ξ_{mc} is the critical value of surf-similarity parameter ξ_m , determining the transition from plunging waves to surging waves :

$$\xi_{mc} = \left[6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right]_{P+0.5}^{\frac{1}{P}}$$

The values surf-similarity parameter ξ_m depend on both the steepness (two possible values) and the slope of the armour (two possible values). From these

values, it appears that tests performed for the 1:1.5 slope are of "surging" type whereas they are of "plunging type" for the 1:2.5 slope (and 2 values of steepness).

The tests results are plotted and compared to Van der Meer stability formulas on Figure 5.a (plunging waves) and 5.b (surging waves). Experimental points from Van der Meer (1988), Galland (1994) and Lamberti (1994) are also superimposed.

— Analysis of the "plunging waves" tests (figure 5.a) :

An acceptable agreement is found between experimental points and the formula. However, one can observe that the lower values of damage are overpredicted by the formula, whereas the higher values seem to be underpredicted. This is in particular quite clear for the tests with 5 % steepness, which may indicate that the effect of steepness is not perfectly resolved in the Van der Meer formula for plunging waves. If we consider the experimental points from Van der Meer (1988) for permeable core, we again note that most of points lie above the design curve.

— Analysis of the "surging waves" tests (figure 5.b) :

Based on present experiments, the general trend of the formula is to overpredict the observed damage levels. The use of Van der Meer formula on these experiments thus seems to lead to a conservative design of the armour. Test results from Lamberti (1994) also confirm this trend in spite of a rather high scatter. However, one should also note that Van der Meer formula appears to be a good fit to the Van der Meer (1988) test results obtained with a permeable core. Additional analysis and comparisons should be performed in order to check this point. In particular, it was observed that the permeability factor P may play a significant role in the formula and the precise determination of P for an existing breakwater is not straightforward.

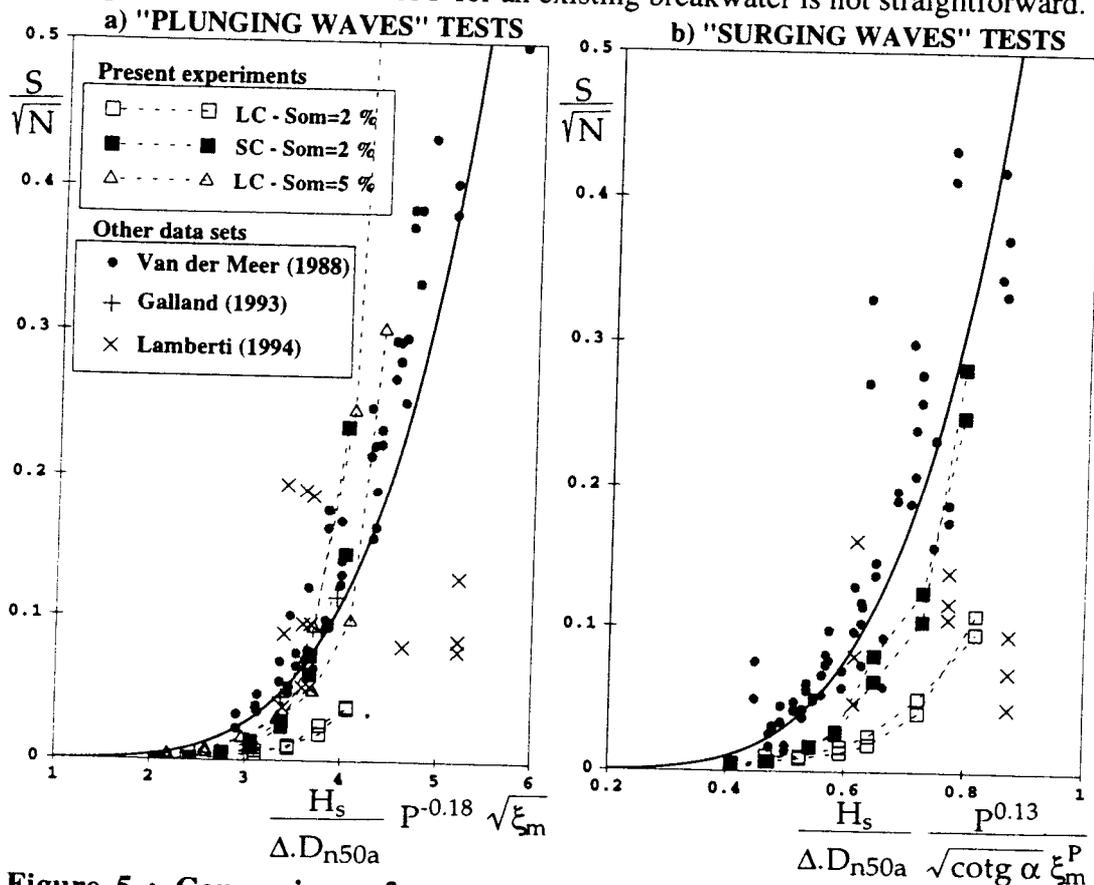


Figure 5 : Comparison of present test results with Van der Meer (1988) formula for the stability of the main armour (tests under normal wave attack).

4. STABILITY OF THE TOE-BERM FOR THE TRUNK SECTION

4.1 Descriptive analysis of the stability of the toe-berm of the trunk

4.1.1 Influence of wave direction and directionality (angular spreading)

Examples of test results are plotted on Figure 6 for four wave conditions and the four toe-berm stone sizes (armour-slope 1:2.5 only). From the tests, we observe that the normal direction seems to be usually more severe than the 30° direction.

Damage to the toe-berm is higher under short-crested waves than under long-crested waves only for the normal attack, whereas long-crested waves produce more damage for the 30° direction.

The toe-berms are less stable for the slope 1:2.5 slope of armour than the same ones associated with the 1:1.5 slope. This may be related to slight different hydrodynamical conditions of wave breaking and run-down, resulting in stronger action to the toe-berm.

4.1.2 Influence of wave steepness (long-crested waves ; armour slope 1:2.5)

The longer waves ($s_{om} = 2\%$) create more damage to the toe-berm than shorter waves ($s_{om} = 2\%$), but this trend is stronger than for the damage to the main-armour (see § 3.12). This indicates that the toe-berm is more sensitive to the steepness of incident waves than the main-armour.

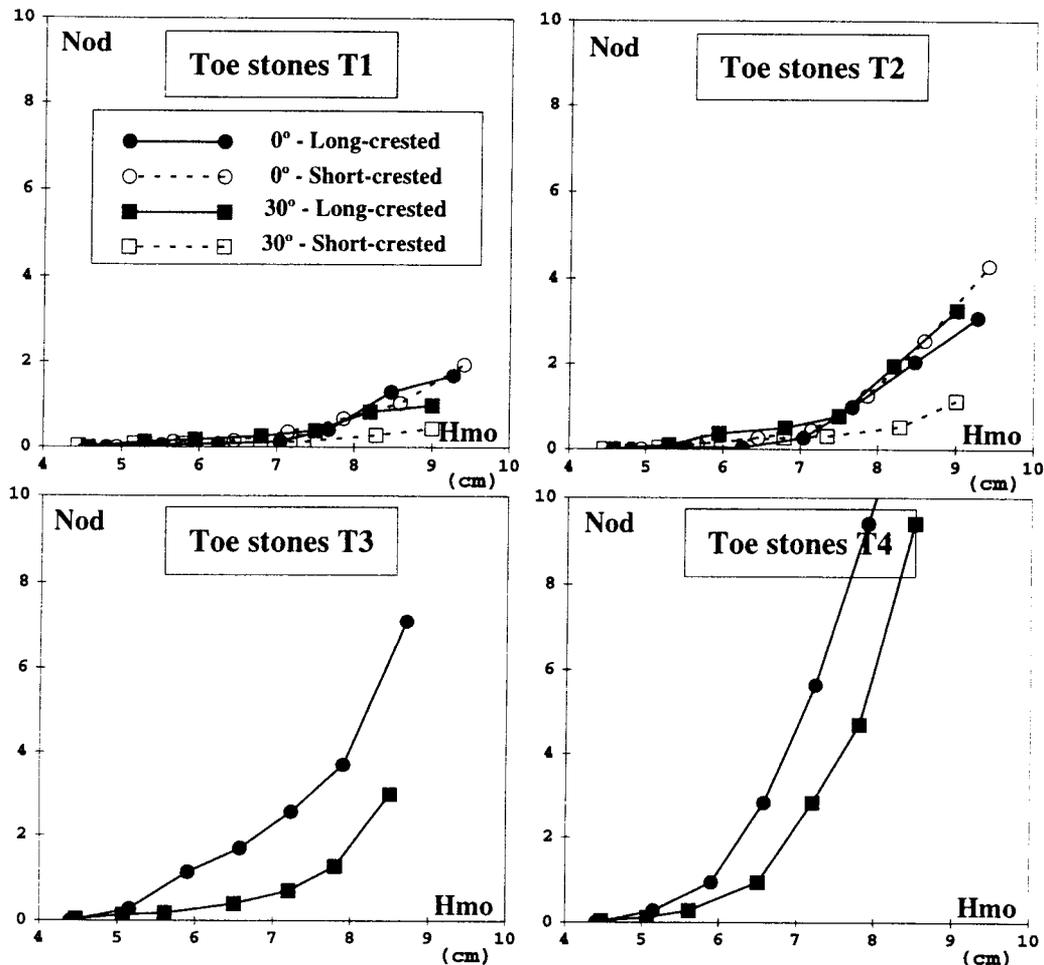


Figure 6 : Evolution of observed damage to the toe-berms for four wave conditions (armour-slope 1:2.5 only).

4.1.3 Influence of toe-berm stones weight (long-crested waves only)

For the normal wave attack, damage to the toe-berm increases with decreasing toe-berm stone weight. The effect of the toe-berm stone size is clearly more sensitive on the damage to the toe-berm itself than on the damage to the main-armour. However, one may distinguish two different behaviour : toe-berms T1 and T2 are quite stable with low damage levels, whereas toe-berms T3 and T4 are clearly unstable with higher damage levels.

4.2 Synthetic analysis of the stability of the toe-berm of the trunk

In this section, we consider the formula established by Gerding (1993) for the stability of the toe-berm of a rubble-mound breakwater :

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n50t}} = \left(0.24 \frac{h_t}{D_{n50t}} + 1.6 \right) N_{od}^{0.15}$$

where Δ is the relative buoyant density of toe-berm stones ($\Delta = \rho_r / \rho_w - 1$), D_{n50t} is the nominal diameter of stones composing the toe-berm, h_t is the depth of toe-berm below the Mean Water Level and N_{od} is the damage index to the toe-berm.

The damage level is classified as : $N_{od} = 0.5$: hardly any damage ; $N_{od} = 2$: acceptable damage (design criteria) and $N_{od} = 4$: unacceptable damage.

On Figure 7, the experimental data points plotted on the graph are composed of all the present experiments conducted with normal wave attack and long-crested waves (including 2 slopes of main-armour, 4 toe-berm stone sizes and 2 values of wave steepness). On this figure, an acceptable agreement between present experiments and the formula from Gerding (1993) is obtained. However, one must note that the effects of mound-slope and wave-steepness are not included in Gerding's formula. Although these effects do not appear as dominant on experimental points, it is possible to distinguish on Figure 7 the data points for the 1:1.5 slope (triangles) and for the 1:2.5 slope (circles). The effect of steepness is more sensitive (compare crosses and circles for toe-berm stones T1 and T2), indicating that damage to the toe-berm appears to be lower for the "shorter" waves than for the "longer" waves. The inclusion of these effects in an extended formula appears as an interesting research item.

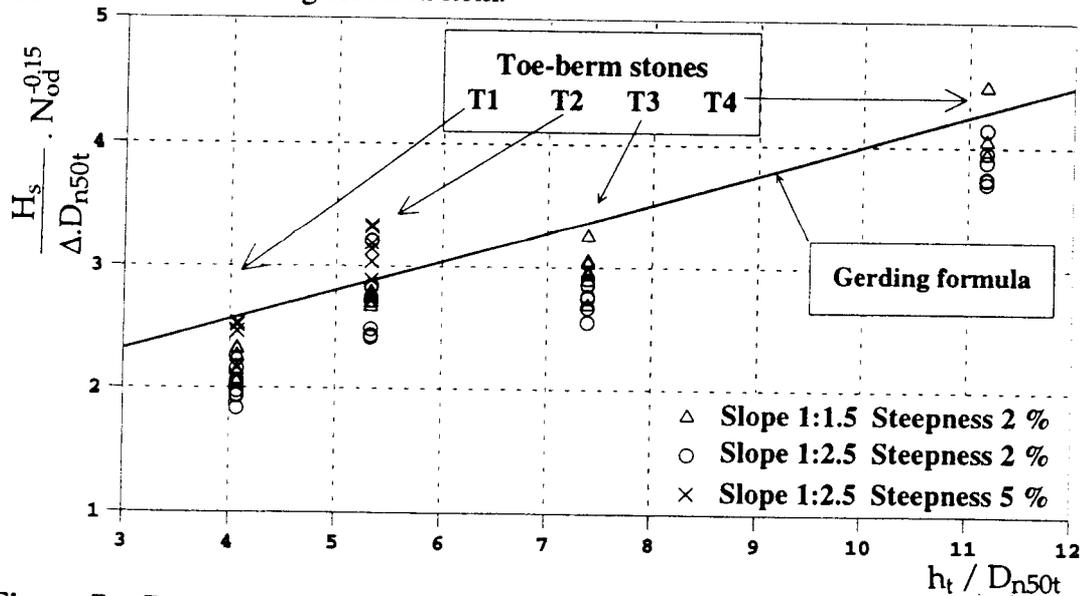


Figure 7 : Comparison of present test results with Gerding (1993) formula for the stability of the toe-berm (tests under normal wave attack only).

5. DISCUSSION OF THE INTERACTION PROCESSES

During the experiments, the following points have been observed :

- For most of tests, as the wave height increases between each run, damage first appears on the toe-berm and then on the main-armour. This is not really surprising, as the main-armour is made of stones whose weight is determined from "standard" design value whereas the toe-berm stones weight are equal (toe-berm stones T1) or lower than the design value (toe-berm stones T2 to T4). It is thus quite a "normal" behaviour that toe-berms are damaged first.
- The stability of the toe-berm continuously decreases as the weight of toe-berm stones decreases. The stability of the main-armour is also decreasing with the size of toe-berm stones (in particular for toe stones T3 and T4).
- Damage to the main-armour for the trunk section is mainly located between the toe (- 0.10 m referred to MWL) and about + 0.05 m referred to MWL.

In order to describe the interaction processes between the main-armour and the toe-berm, we start from the classification of evolution mechanisms proposed by Lamberti (1994). We further tentatively propose a correlation diagram between damage to toe-berm and damage to main-armour where the evolution processes (A, a, B, b, c) from Lamberti (1994) are schematically summarized (figure 8).

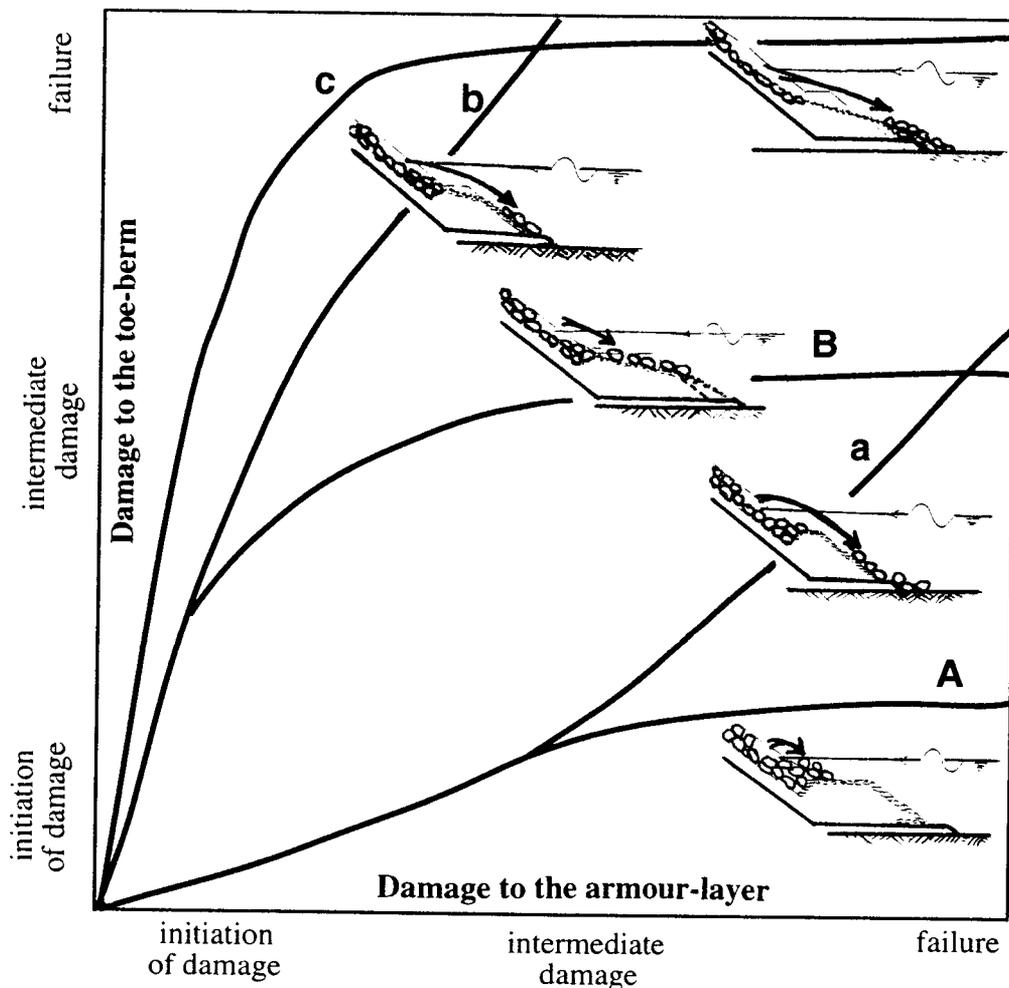


Figure 8 : Tentative analysis of correlation between damage to armour and damage to toe-berm after a classification of mechanisms from Lamberti (1994)

Based on the data from our experiments, it is possible to build such plots for the four toe stones used and for different wave conditions (Figure 9). On these plots, we can directly compare the synthetic evolution of the observed interaction process to the classification of evolution processes of figure 8. The main comments raising from this analysis are summarized below :

• Toe-berm stones T1 and T2 : **evolution process : a**

The toe-berm is rather narrow, but quite stable for the various wave conditions. Damage appears approximately at the same time on the main-armour and the toe-berm. There is no significant effect of toe-armouring process. As the toe-berm is quite narrow, the stones falling down from the armour do not stop on the toe-berm.

• Toe-berm stones T3 : **evolution process : b**

The toe-berm is less stable than the armour layer and is damaged first. It thus becomes narrower and is then not very effective in retaining armour units when damage further appears on the main armour.

• Toe-berm stones T4 : **evolution process : c**

The toe-berm is severely unstable and the static support of the armour layer fails when the toe-berm is fully damaged. The armour layer may then slide down abruptly, exposing the underlayer.

In particular, the evolution process B (stones falling down from the armour layer stop on the toe-berm and enhance its stability : toe-armouring process) only rarely occurred and then exhibited quite feeble effect on the stability of the toe-berm. Most

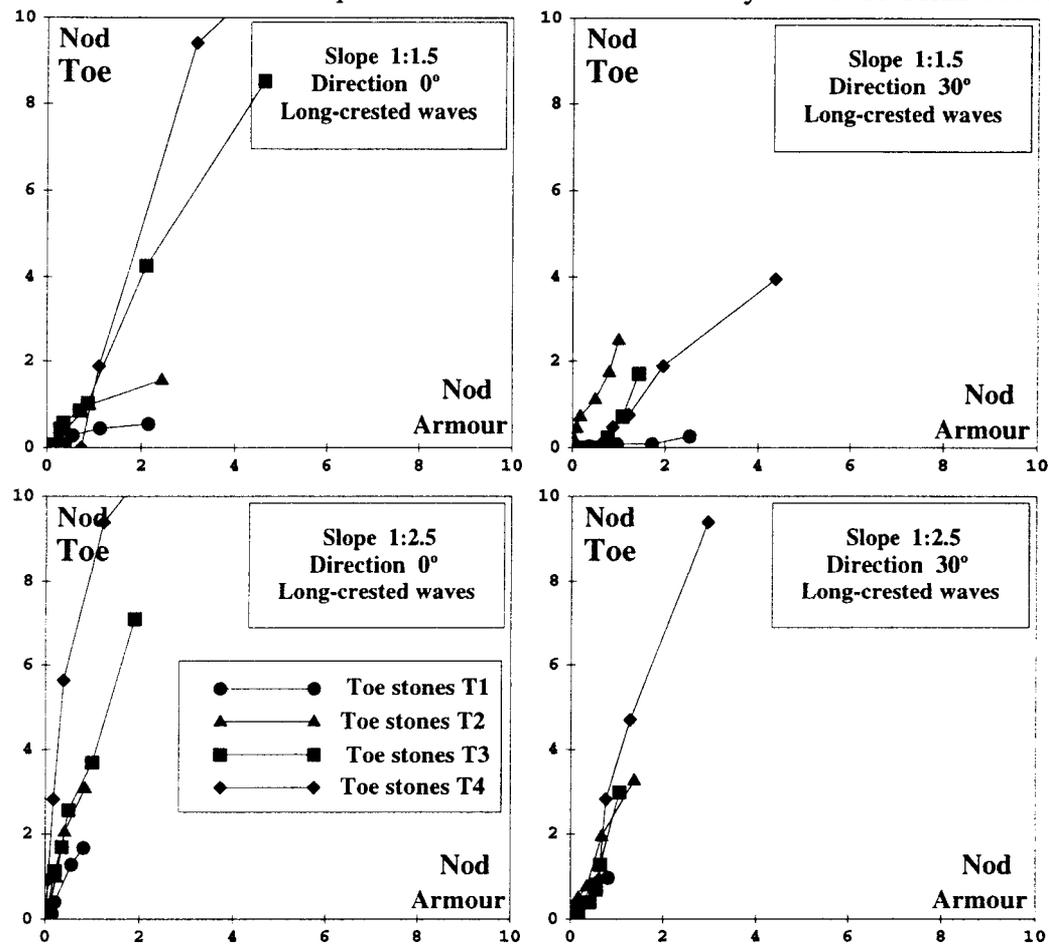


Figure 9 : Correlation diagrams based on present experiments for various conditions

of stones falling from the armour went directly to the floor of basin either because the berm was too narrow (toe-berm stones T1 and T2) or because it was already significantly damaged when damage started on the main-armour (toe-berm stones T3 and T4). For the breakwater profiles tested in the present study, there thus appears to be only a weak coupling in the stability of the main-armour and the toe-berm for the trunk section. It is suspected that the considered toe-berms were either too unstable or too narrow for the occurrence of the "toe-armouring" process. Such a process could maybe be observed with a wider and still quite stable toe-berm, but tests in this direction remain to be performed.

6. CONCLUSIONS

The major observations and conclusions raising from present experiments are very briefly summarized below for the trunk section of the breakwater :

- Effect of wave incoming direction : No definite effect emerges from the tests results for the main-armour. For the toe-berm however, the normal direction seems more severe than the 30° direction, at least for long-crested waves.
- Effect of wave directionality : More damage to the main-armour and to the toe-berm is observed under short-crested waves, in particular for normal wave attack. This point is rather in contradiction with previous experiments (Thunbo Christensen *et al.*, 1984 ; Canel and De Graauw, 1992), but is rather clear from present tests. It is supposed to be related to a quite low angular spreading of energy, which could be more severe for the stability. This point has however to be addressed by additional tests.
- Effect of wave steepness : Among the two tested values of steepness (2 % and 5%), the one corresponding to "longer" waves results in more damage both to the armour-layer and to the toe-berm. However, the toe-berm appears to be more sensitive to the steepness of incident waves than the main-armour.
- Effect of toe-berm stones size : when the toe-berm is "stable" (T1 or T2), the stability of the armour is not significantly affected by the stability of toe-berm. However, when the toe-berm is unstable (T3 or T4), higher damage is observed on the main-armour, leading sometimes to its failure. As expected, damage to the toe-berm increases as the toe-berm stone size decreases.

Comparing present results with existing design formulas, acceptable agreement was observed with the Van der Meer formulas for the stability of the main-armour. However some differences were also noted, in particular for the "plunging waves" formula : the lower values of damage to the armour-layer are overpredicted by the formula, whereas the higher values seem to be underpredicted. The Van der Meer formula for "surging waves" appears to lead to a somewhat conservative design. For the toe-berm, the formula from Gerding (1993) lies in acceptable agreement with present results, although the effects of wave steepness and mound-slope (not included in the formula) slightly increase the scatter of experimental points.

As a matter of conclusion, it appears from the present tests that the major feature of the interaction process between main-armour and toe-berm is an increase of damage to the armour when the toe-berm is unstable. This may lead to a total failure of the armour if the toe-berm is sufficiently eroded to fail in providing static support to the armour-layer. On the opposite, minor effect of main-armour on toe-berm stability was observed. In particular the "toe-armouring" process appeared to occur only marginally and under precise conditions. This process is thus regarded as a particular mechanism, which will occur only under specific conditions (precise relative stability of the toe-berm and the armour-layer, wide berm, ...).

As the effects of interaction processes between main-armour and toe-berm appear quite weak (unless toe-berm stones are significantly lighter than their design value), it appears both more natural and safe to use state-of-the-art stability formulas to establish a first design of both the toe-berm and the armour-layer independently. The full breakwater profile should then be tested in a wave flume, or preferably in a wave basin with a correct representation of the actual bathymetry in order to validate its design.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded partly by the European Union (Directorate General XII of the European Communities) under contract MAS2-CT92-0042 of MAST-2 programme and partly by the French Sea State Secretary (Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables). The authors are grateful to the participants of the Rubble-Mound Breakwater Failure Modes (RMBFM) project for their fruitful discussions and suggestions.

8. REFERENCES

- Benoit M., Donnars P. (1996) : Interactions in the stability of main-armour and toe-berm for a rubble-mound breakwater : an experimental study under both long-crested and short-crested waves. *MAST II RMBFM Project, Final report, January 1996.*
- Burcharth H.F. (1993) : Structural integrity and hydraulic stability of dolos armour layers. *Series paper N°9. Aalborg University (Denmark).*
- Canel M., De Graauw A. (1992) : Rubble-mound breakwater stability with multidirectional waves. *MAST I G6-S Project. Final report. Sogreah Ing. (France).*
- Funke E.R., Miles M.D. (1987) : Multi-directional wave generation with corner reflectors. *National Research Council Canada. Technical report TR-HY-O21.*
- Galland J-C. (1994) : Rubble mound breakwater stability under oblique waves : an experimental study. *Proc. of the 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 1061- 1074, Kobe (Japan).*
- Gerding E. (1993) : Toe structure stability of rubble mound breakwaters. *Master's Thesis, Report H1874 - Delft University of Technology (The Netherlands).*
- Juhl J., Sloth P. (1994) : Wave overtopping of breakwaters under oblique waves. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 1182-1196, Kobe (Japan).*
- Lamberti A., Aminti P. (1994) : Program of tests on main armour - toe berm interaction and preliminary check of scale effects. *MAST II RMBFM Project, Proc. of the 2nd workshop, Bressanone (Italy), 20-21 January 1994.*
- Lamberti A. (1994) : Preliminary results on main-armour toe-berm interaction. *MAST II RMBFM Project, Proc. of the 3rd workshop, De Voorst (The Netherlands), 15-16 November 1994.*
- Thunbo Christensen F., Broberg P.C., Sand S.E., Tryde P. (1984) : Behaviour of rubble-mound breakwater in directional and uni-directional waves. *Coastal Engineering, Vol 8, pp 265-278.*
- Van der Meer J. W. (1988) : Rock slopes and gravel beaches under wave attack. *Doctoral thesis. Publication N°396, Delft Hydraulics (The Netherlands).*
- Van der Meer J. W. (1992) : Conceptual design of rubble-mound breakwaters. *Proc. of the Short Course on Design and reliability of coastal structures. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), Venice (Italy).*

ANNEXE 9

Auteurs : Marilynne LUCK*, Jean-Michel MENON*, **Michel BENOIT**
* EDF R&D LNHE (Chatou)

Titre : Efforts dus aux vagues sur un cylindre vertical en zone côtière. Etude expérimentale et méthodes de prédiction.

Année : 2005.

Source : Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 9, N°7-8/2005, pp 979-991.

Efforts dus aux vagues sur un cylindre vertical en zone côtière

Etude expérimentale et méthodes de prédiction

Marilyne LUCK — Jean-Michel MENON — Michel BENOIT

*EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)
6, quai Watier, BP 49, F-78400 Chatou
marilyne.luck@edf.fr*

RÉSUMÉ. Les efforts dus aux vagues sur une structure de type monopile ont été étudiés par le biais d'essais en canal à houle avec un cylindre vertical sur fond incliné, dans des conditions de faible profondeur d'eau et jusqu'au déferlement. La comparaison des efforts mesurés aux prédictions obtenues (formule de Morison utilisant différentes méthodes de calcul de la cinématique des vagues) montre la nécessité de disposer de méthodes précises pour la détermination de la cinématique de la houle en zone côtière. En effet, en faible profondeur d'eau, l'utilisation de la théorie linéaire conduit souvent à une sous-estimation des efforts ; l'utilisation de méthodes basées sur la fonction de courant ou de la méthode de la fonction de transfert modifiée réduit cette sous-estimation, mais des travaux doivent encore être menés pour améliorer la prédiction des forces d'impact dues au déferlement.

ABSTRACT. Wave-induced loadings acting on a monopile structure were investigated by experimental tests on a vertical cylinder in a wave flume with a sloping bottom, considering non-breaking, breaking and broken wave conditions. Measured forces were compared to numerical predictions obtained by applying Morison formula and by using different methods to compute the wave kinematics. This comparison highlights the need for accurate prediction methods for wave kinematics of shoaling and breaking waves. Indeed the linear wave theory often leads to significant underestimation of the measured forces. Using advanced stream function methods or the modified transfer function method, this under-prediction is significantly reduced, but additional work is needed to better predict the impulsive force due to breaking on the structure.

MOTS-CLÉS : Eolienne offshore, structure-support, monopile, cinématique de houle, efforts hydrodynamiques, cylindre vertical, zone côtière, faible profondeur d'eau, vagues déferlantes, zone de levée.

KEYWORDS: Offshore wind farm, support-structure, monopile, wave kinematics, wave loadings, vertical cylinder, coastal area, shallow water conditions, breaking waves, shoaling zone.

1. Contexte et objectifs

L'estimation des forces dues aux vagues sur des structures minces et par grande ou moyenne profondeur d'eau se fait habituellement à l'aide de formules de calcul d'efforts de type Morison (1950), à partir de la connaissance des conditions marines, locales ou « au large » de la structure. Cependant, pour les profondeurs moyennes ou faibles (inférieures à 20 m environ), la physique des processus côtiers n'est en général pas prise en compte par les méthodes et outils industriels : les effets d'interaction des vagues avec le fond marin contribuent à rendre les vagues plus cambrées, dissymétriques et peuvent conduire au déferlement lorsque les vagues ne sont plus stables en faible profondeur d'eau. Ces spécificités liées aux faibles profondeurs d'eau rendent nécessaire le recours à des essais sur modèle réduit pour déterminer les chargements sur les ouvrages exposés à l'action des vagues côtières.

Depuis quelques années, des projets d'installation de parcs éoliens en zone marine pré-côtière sont proposés. A ce titre, il est important d'améliorer la connaissance des efforts dus aux vagues sur les structures-supports d'éoliennes en faible profondeur d'eau, en particulier pour des structures de type « monopile ».

Une étude expérimentale a été engagée au LNHE, avec la réalisation d'essais dans des conditions de faible profondeur d'eau et pour des vagues cambrées (du fait de la remontée des fonds) jusqu'au déferlement. L'objectif est double : (i) disposer de résultats expérimentaux pouvant être extrapolés à des conditions réelles, et (ii) valider et améliorer des outils et méthodes de prédiction de ces efforts.

2. Etude expérimentale des efforts en canal à houle

2.1. Installation d'essais et structure étudiée

Le modèle réduit est construit dans un canal à houle du LNHE, de longueur utile 72 m, de largeur 1.5 m et avec une hauteur d'eau au repos pouvant aller jusqu'à 1.2 m devant le batteur. Ce canal est équipé d'un générateur de houle de type « piston », qui peut produire des vagues régulières ou irrégulières.

Les essais sont réalisés en similitude de Froude, à l'échelle $1/25^{\text{ème}}$. Les fonds sont représentés par un plan incliné de pente constante en ciment lissé ; deux valeurs de pente ont été testées : $1/40 = 2.5 \%$ et $1/20 = 5 \%$. Afin d'amortir la houle en bout de canal, un talus en enrochements a été mis en place (figure 1).

On considère une structure-support d'éolienne de type « monopile », représentée sur le modèle par un cylindre vertical lisse de diamètre 0.2 m (soit 5 m au réel), dont la base est positionnée 0.4 m au-dessus du fond « naturel » du canal, ce qui permet de faire varier la profondeur d'eau locale de 0.3 à 0.8 m (7.5 à 20 m au réel). Les figures 1 et 2 présentent un schéma et des photographies de l'installation d'essais.

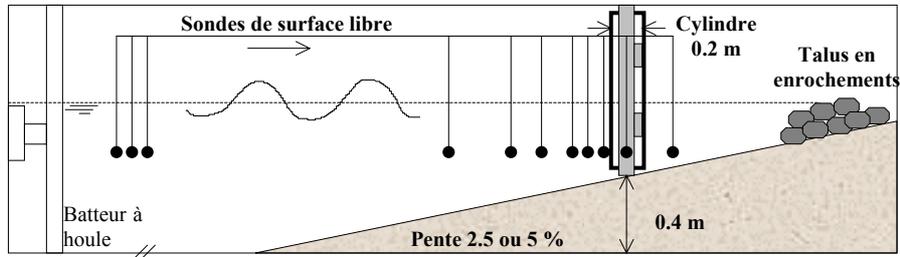


Figure 1. Schéma simplifié de l'installation d'essais en canal à houle

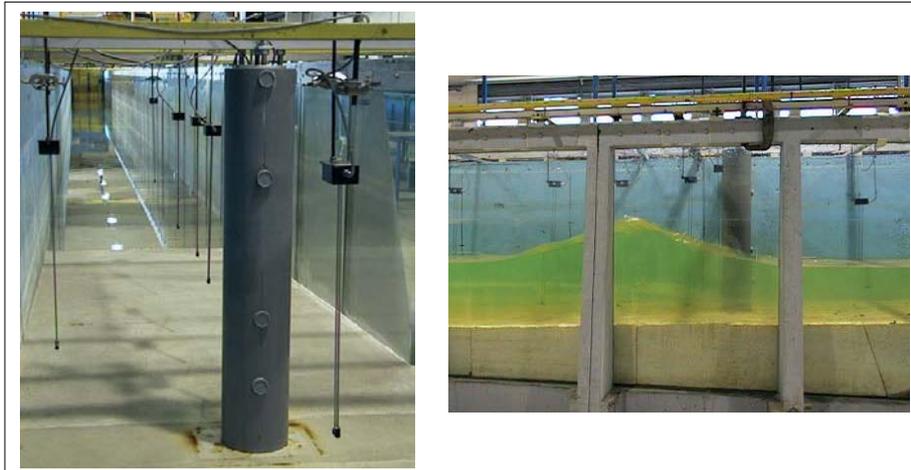


Figure 2. Photographies de l'installation d'essais. A gauche : une vue prise de l'arrière du cylindre depuis l'intérieur du canal (on distingue le générateur de houle à l'extrémité du canal). A droite : une vue de côté en cours d'expérience.

2.2. Mesures réalisées durant les essais

Des mesures de l'élévation de la surface libre sont réalisées au large et en différents points le long de la pente, par le biais de 11 capteurs résistifs, afin de déterminer les caractéristiques de la houle incidente, de connaître les conditions de houle à l'approche et au niveau de la structure et de mesurer le « run-up » sur la structure (à l'aide d'un capteur situé directement sur la face avant du cylindre).

Les efforts horizontaux s'exerçant sur le cylindre sont mesurés par le biais de deux capteurs d'efforts, fonctionnant aussi bien en traction qu'en compression et entièrement étanches. Ces capteurs sont positionnés à 0.2 m et 0.8 m de la base du cylindre et constituent les uniques liaisons entre le cylindre et une poutre verticale située à l'intérieur du cylindre et servant de bâti fixe (figures 1 et 2).

L'acquisition des signaux de surface libre et d'efforts est réglée de façon à enregistrer au moins 50 vagues consécutives et à obtenir de l'ordre de 80 à 100 points de signal par période de vague, ce qui permet une mesure précise des profils temporels et des valeurs de pic aussi bien pour la surface libre que pour les efforts.

2.3. Conditions d'essais

Les essais ont été réalisés sans courant et en houle régulière. Différentes périodes et hauteurs de houle ont été simulées, de façon à couvrir une large gamme de conditions de houle au niveau de la structure (vagues déferlantes ou non).

Les paramètres que l'on a fait varier sont :

- les paramètres de houle au large (période T et hauteur incidente H_0)

Les périodes de houle testées varient de 1.6 à 2.4 s sur modèle réduit (8 à 12 s au réel). Les hauteurs incidentes H_0 sont choisies de manière à couvrir des conditions allant des vagues modérées jusqu'aux vagues déferlantes au niveau du cylindre.

- la profondeur d'implantation de la structure (d) et la pente des fonds (m)

Deux pentes ont été testées ($m = 2.5$ et 5%), ainsi que 4 profondeurs d'eau en pied de structure : 0.30, 0.40, 0.60 et 0.80 m (soit 7.5, 10, 15 et 20 m au réel).

Au total, 128 essais ont ainsi été réalisés en houle régulière, chacun correspondant à une valeur du quadruplet (T, H_0, m, d).

Les caractéristiques de ces essais sont synthétisées sur la figure 3, par un diagramme adimensionnel $H/L_0 = f(d/L_0)$, où H est la hauteur de houle au niveau de la structure, et L_0 est la longueur d'onde en profondeur infinie $L_0 = gT^2/(2\pi)$. A noter que des symboles différents sont utilisés pour distinguer les cas non-déferlants (la houle déferle après le cylindre), déferlants (la houle déferle sur ou au voisinage du cylindre), ou post-déferlants (la houle a déferlé avant d'atteindre le cylindre). A titre indicatif, la courbe correspondant au critère de déferlement de Goda (1970) a été superposée à ce diagramme. Cette courbe donne H/L_0 en fonction de d/L_0 au point de déferlement, pour chacune des deux pentes (m) testées, selon la formule suivante :

$$H_b = 0.17L_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi d_b}{L_0} (1 + 15m^{4/3}) \right] \right\}$$

où H_b et d_b sont respectivement la hauteur de houle et la profondeur d'eau au point de déferlement.

La figure 3 montre que les conditions d'essais couvrent une large gamme de valeurs de d/L_0 (de 0.03 à 0.2) et H/L_0 (de 0.015 à 0.1), avec de nombreux points au voisinage de la courbe de déferlement, en particulier pour les faibles valeurs de d/L_0 .

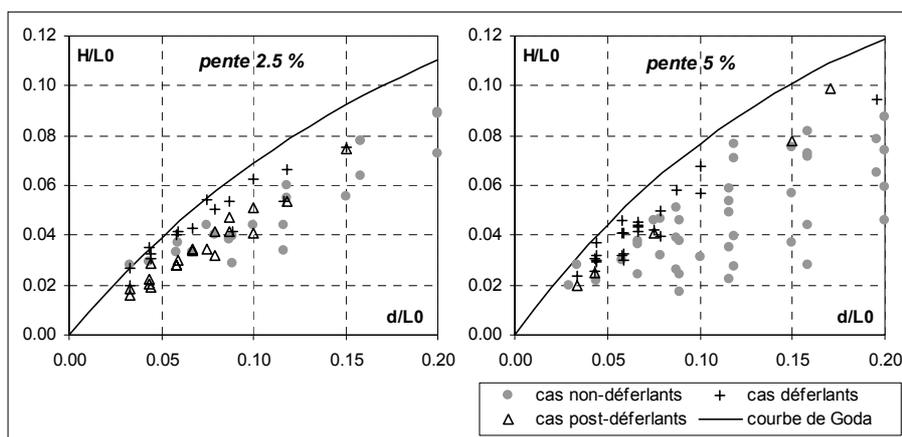


Figure 3. Caractéristiques des conditions de houle pour les essais réalisés

3. Extrema des efforts horizontaux et des moments de renversement mesurés

Les signaux mesurés (élevations de surface libre et efforts horizontaux) ont été moyennés sur une série de cinq vagues successives, afin d'obtenir des profils temporels caractéristiques sur une période de houle. Des exemples de signaux mesurés sont donnés sur la figure 4 pour un essai particulier.

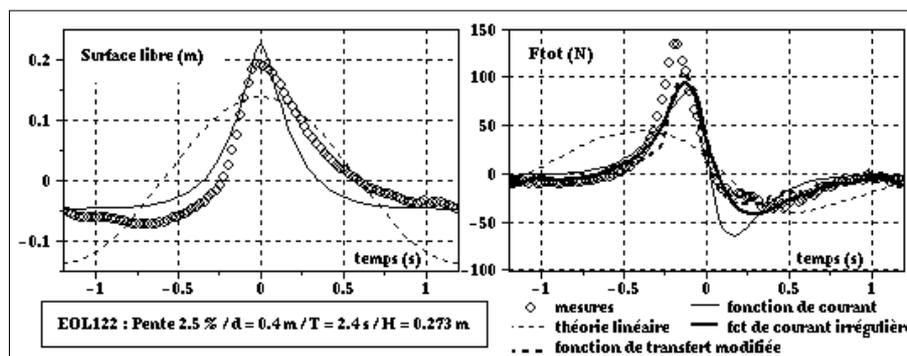


Figure 4. Exemple de profils temporels de surface libre et d'effort horizontal pour un essai particulier, avec comparaison à des modèles de prédiction

Les valeurs maximales et minimales (sur une période de houle) de l'effort horizontal total et du moment de renversement total mesurés sont représentées sur la figure 5, en fonction de la hauteur de houle locale (i.e. au niveau du cylindre), à raison d'un graphe par profondeur d'eau en pied de cylindre.

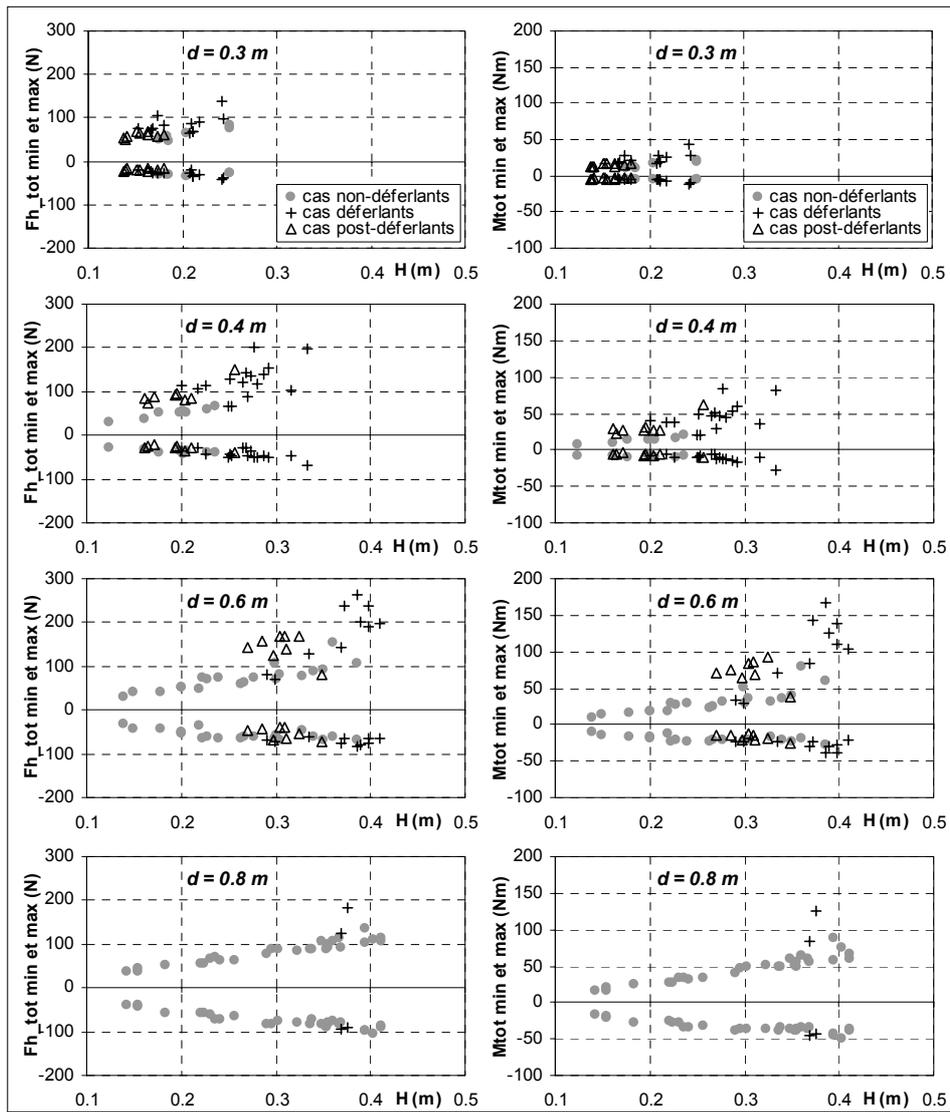


Figure 5. Extrema de l'effort horizontal et du moment de renversement mesurés

Les efforts maximaux mesurés (efforts positifs, dans le sens de propagation de la houle) s'étalent d'environ 25 à 265 N (soit 390 à 4 140 kN au réel), et les efforts minimaux (efforts négatifs, dans le sens opposé à celui de propagation de la houle) varient entre 15 et 110 N (soit 235 à 1 718 kN au réel).

Ces efforts et moments maximaux sont en général bien corrélés à la hauteur de houle locale et à la profondeur en pied de cylindre : ils augmentent globalement avec la hauteur de houle et la profondeur. C'est dans les cas de houles déferlantes sur la structure que les efforts et moments sont les plus importants, du fait de l'effort d'impact des vagues déferlantes. La figure 5 indique que, pour une profondeur fixée, on peut avoir une amplification d'un facteur de 2 à 3 dans le cas d'une houle déferlante, par rapport à une houle non-déferlante de même hauteur locale (mais de période différente). En comparant les résultats pour les profondeurs 0.4 et 0.8 m (soit 10 et 20 m au réel), on note aussi qu'une même hauteur de houle locale peut induire des efforts plus importants dans le cas de la profondeur 0.4 m, si elle est déferlante. Par contre, le déferlement n'a pas d'effet significatif sur les efforts minimaux.

4. Comparaison des résultats d'essais à des modèles de prédiction d'effort

4.1. Approche de modélisation retenue pour l'évaluation des efforts

Etant donné que le diamètre du cylindre D reste faible devant la longueur d'onde L des vagues considérées (ratio D/L inférieur à 0.1 pour les essais réalisés), on peut considérer que les effets de diffraction sont négligeables (Sumer et Fredsøe, 1997). La prédiction des efforts est ainsi basée sur l'utilisation de la formule dite de Morison (Morison et al., 1950).

La force horizontale théorique s'exerçant sur un élément de cylindre vertical de hauteur dz , situé à la cote z est alors donnée par l'expression :

$$dF_{dz}^h(z, t) = dF_{traînée}^h + dF_{inertie}^h = \frac{1}{2} \rho C_D D |u(z, t)| u(z, t) dz + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a(z, t) dz$$

où z varie entre $-d$ (fond) et $\eta(t)$ (surface libre), l'origine des z correspondant au niveau d'eau au repos.

Cette force est fonction de la cinématique de la houle (vitesse horizontale $u(z, t)$ et accélération horizontale $a(z, t)$ calculées en l'absence de structure) et des coefficients hydrodynamiques de traînée C_D et d'inertie C_M du cylindre, dépendant des caractéristiques de l'écoulement et de la structure étudiée (valeurs caractéristiques se trouvant entre 0.5 et 1.4 pour C_D et entre 1.5 et 2 pour C_M , d'après Sarpkaya et Isaacson, 1981).

La force horizontale totale est obtenue par intégration sur la hauteur immergée du cylindre entre le fond ($z = -d$) et la surface libre ($z = \eta(t)$) :

$$F_{\text{totale}}^h(t) = \int_{z=-d}^{\eta(t)} \left[\frac{1}{2} \rho C_D D |u(z,t)| u(z,t) + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a(z,t) \right] dz$$

Le moment de renversement total s'obtient de façon analogue :

$$M_{\text{total}}^r(t) = \int_{z=-d}^{\eta(t)} \left[\frac{1}{2} \rho C_D D |u(z,t)| u(z,t) + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a(z,t) \right] (d+z) dz$$

Pour la détermination de la cinématique de la houle, nous avons mis en œuvre et comparé quatre méthodes de calcul :

- la théorie de la houle linéaire (Airy, 1845), classiquement utilisée, mais peu adaptée pour des vagues très cambrées, car fortement non linéaires ;

- la méthode de fonction de courant « classique » (Dean, 1965), permettant, à partir de la hauteur des vagues et de leur période, un calcul « exact » de la cinématique pour des vagues stables se propageant sans déformation sur un fond plat. Cette approche modélise l'asymétrie des vagues par rapport à un plan horizontal (dissymétrie entre les creux et les crêtes des vagues) ;

- la méthode de fonction de courant « irrégulière » (Dean, 1965 ; Chakrabarti et al., 1997). Par rapport à la méthode précédente qui se base uniquement sur la hauteur et la période, celle-ci utilise en condition d'entrée le profil de surface libre mesuré sur une période, ce qui permet de représenter l'asymétrie des vagues par rapport à un plan horizontal et à un plan vertical ;

- la méthode de la fonction de transfert modifiée (Koyama et Iwata, 1986), qui utilise également en condition d'entrée le profil de surface libre mesuré sur une période, auquel elle applique directement une fonction de transfert dépendant de la période, de la profondeur et de la surface libre.

Les deux premières méthodes sont des théories de houle à fond plat, utilisant en entrée seulement quelques paramètres : la hauteur et la période (ou la longueur d'onde) de la houle et la profondeur d'eau (et éventuellement une vitesse de courant ambiant). Les deux dernières méthodes, quant à elles, sont des méthodes de fonction de transfert, utilisant comme données d'entrée des informations plus détaillées : le profil temporel de surface libre, la période de la houle et la profondeur d'eau ; leur utilisation pour des études d'ingénierie est donc plus délicate et moins fréquente.

Les caractéristiques de la houle utilisées en données d'entrée pour ces différentes théories sont les conditions de houle locales au niveau de la structure, mesurées dans la même section transversale du canal que la structure. Pour les coefficients hydrodynamiques, nous avons utilisé dans une première analyse des valeurs indiquées par Sarpkaya et Isaacson (1981), à savoir $C_D = 0.7$ et $C_M = 1.8$ (cas d'un cylindre vertical lisse dans un écoulement à nombre de Reynolds élevé).

4.2. Analyse des performances de méthodes de prédiction d'efforts

4.2.1. Modélisation des profils temporels d'efforts horizontaux

Un exemple de comparaison des profils temporels mesurés et prédits de l'effort horizontal total est donné sur la figure 4 pour un cas de vague déferlante. On voit que la théorie linéaire ne permet pas de représenter correctement l'effort mesuré. Les méthodes de fonction de courant améliorent nettement les prédictions, notamment la méthode fonction de courant irrégulière.

Des figures analogues à la figure 4 permettent une évaluation visuelle de la validité de nos prédictions, mais n'offrent pas une mesure quantitative de cette validité. De plus, compte-tenu du nombre d'essais réalisés, il est difficile de présenter tous les graphiques pouvant ainsi être construits. Afin d'obtenir des indicateurs quantitatifs de validité des méthodes de prédiction des profils d'efforts horizontaux, nous avons donc utilisé un indicateur d'erreur δ , proposé par Sumer et Fredsøe (1997), et défini par :

$$\delta = \left[\int_{t=0}^T [F_{\text{mes}}(t) - F_{\text{calc}}(t)]^2 dt \right] / \left[\int_{t=0}^T [F_{\text{mes}}(t)]^2 dt \right]$$

où $F_{\text{mes}}(t)$ et $F_{\text{calc}}(t)$ sont respectivement les profils temporels d'effort horizontal total mesuré et calculé.

Ce paramètre δ représente l'erreur moyenne entre les deux séries temporelles d'efforts. Les valeurs du paramètre δ obtenues avec les quatre méthodes de prédiction apparaissent sur la figure 6, en fonction du ratio H/d local.

On note qu'avec la théorie linéaire, même dans les cas sans déferlement, le paramètre δ prend des valeurs élevées (supérieures à 0.2, et souvent supérieures à 0.6 pour les cas déferlants ou post-déferlants). L'utilisation de la méthode de fonction de courant classique permet d'obtenir des valeurs de δ plus faibles, toujours comprises entre 0 et 0.4 dans le cas non déferlants, mais pouvant tout de même atteindre 0.9 dans le cas de vagues post-déferlantes, présentant un profil temporel très asymétrique en forme de dent de scie. En outre, il faut signaler que cette méthode ne fonctionne que si le rapport H/d est inférieur à la limite théorique de 0.78 en faible profondeur d'eau : au-delà de cette valeur limite il n'existe en effet pas de vague stable se propageant sans déformation sur un fond plat et la méthode numérique ne converge pas. Or cette valeur est dépassée très souvent sur nos essais pour les cas déferlants, et donc la méthode ne donne pas de résultats sur ces cas (comme on peut le voir en comparant le graphe « fonction de courant » de la figure 6 aux deux autres : il y a nettement moins de points pour les valeurs de H/d supérieures à 0.7).

Les méthodes de fonction de courant irrégulière et de fonction de transfert modifiée fonctionnent quant à elles sur tous les cas considérés et conduisent à des valeurs de δ nettement améliorées, quasiment toujours inférieures à 0.2 pour la fonction de courant irrégulière et à 0.3 pour la méthode de fonction de transfert modifiée, excepté pour certains cas déferlants ou post-déferlants.

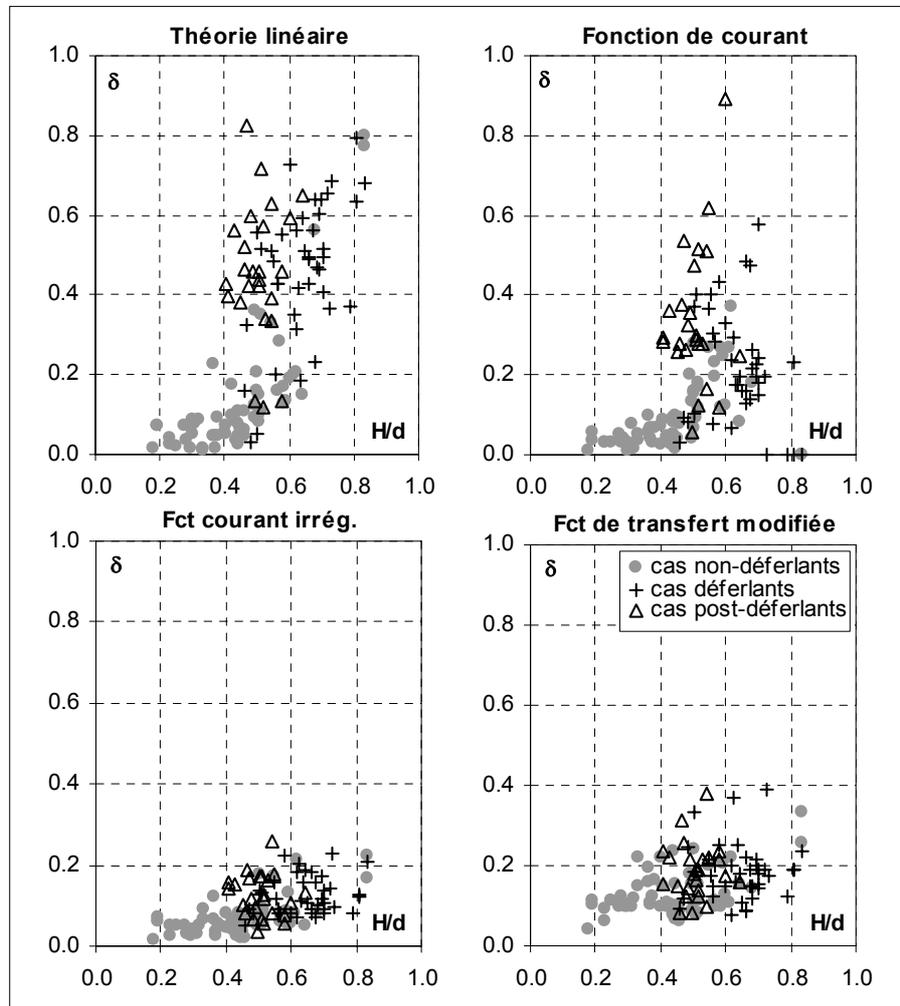


Figure 6. Evolution du paramètre d'erreur δ entre l'effort total mesuré et calculé (pour les quatre modèles de houle utilisés) en fonction de H/d local.

4.2.2. Prédiction des efforts minimaux et maximaux

Dans un second temps, les extrema (positifs et négatifs) des efforts horizontaux mesurés et prédits ont été comparés et les résultats sont présentés sur la figure 7. Sur les quatre graphes de cette figure (un par méthode de calcul de la cinématique de la houle), les droites correspondant à une prédiction parfaite (droite $y=x$ en trait plein), ainsi qu'à une sous-estimation d'un facteur 2 (droite en trait discontinu) et d'un

facteur 4 (droite en pointillés) des extrema des efforts mesurés ont également été tracées.

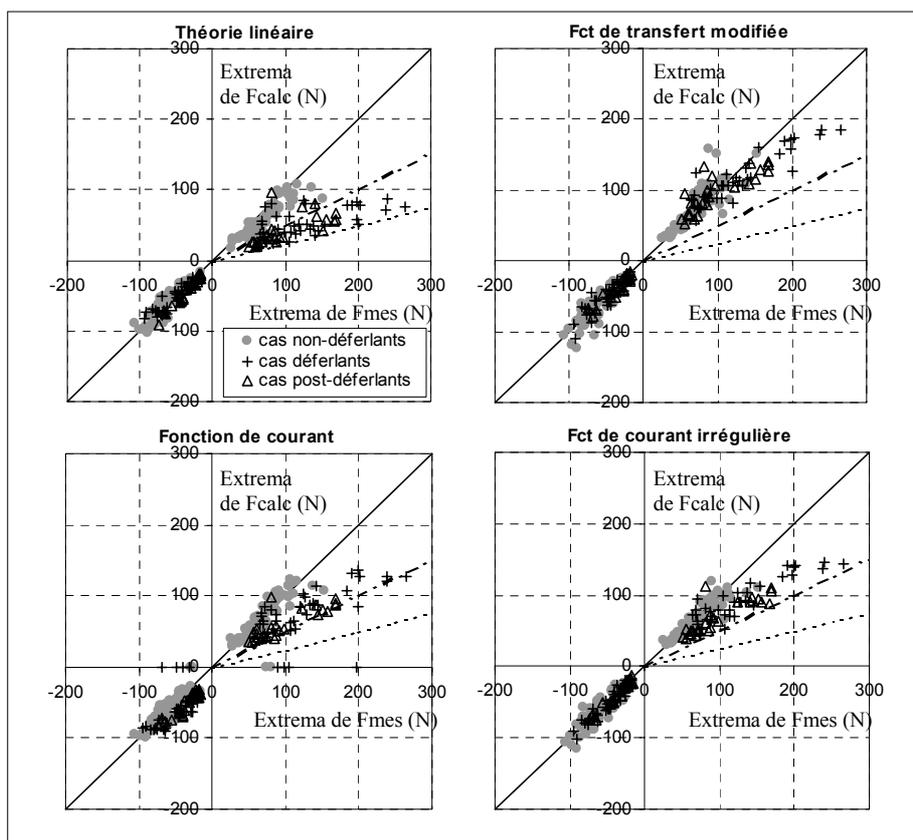


Figure 7. Comparaison des extrema d'efforts mesurés et calculés avec les différentes modélisations utilisées pour le calcul de la cinématique de houle (trait plein = prédiction parfaite ; trait discontinu = sous-estimation d'un facteur 2 ; trait pointillé = sous-estimation d'un facteur 4)

En ce qui concerne les efforts minimaux (négatifs, dans le sens opposé au sens de propagation des vagues), il n'apparaît pas d'effet particulier lié au déferlement (les nuages de points des différents symboles se recouvrent largement). Les quatre méthodes donnent des prédictions de bonne qualité, pour toutes les conditions de houle. La méthode de fonction de courant irrégulière minimise la dispersion du nuage des points autour la droite correspondant à une prédiction exacte, mais les prédictions de la théorie linéaire sont à peine moins bonnes.

En ce qui concerne les efforts maximaux (positifs, dans le sens de propagation des vagues), il convient de distinguer différents cas selon la nature déferlante ou non des vagues. Pour les cas non-déferlants au niveau de la structure, les estimations des maxima données par les différentes théories sont proches des maxima mesurés, avec des rapports $F_{\text{mes_max}}/F_{\text{calc_max}}$ en général compris entre 0.8 et 1.3 lorsqu'on met en œuvre les théories de la fonction de courant, et allant de 1 à 1.5 (voire 2) pour la théorie linéaire. Dans les cas déferlants ou post-déferlants, les prédictions sont moins bonnes : le ratio entre effort maximum mesuré et calculé peut atteindre 2.4 pour la théorie de la fonction de courant classique et 4 pour la théorie linéaire. Pour les méthodes de fonction de courant irrégulière et de fonction de transfert modifiée, les estimations sont un peu meilleures, mais le ratio est compris entre 0.75 et 2 (i.e. la sous-estimation des efforts réels peut encore être d'un facteur 2). On peut noter que l'utilisation des méthodes de fonction de courant ou de la méthode de la fonction de transfert modifiée conduit parfois à surestimer les forces, alors que la théorie linéaire les sous-estime toujours (ratio $F_{\text{mes_max}}/F_{\text{calc_max}}$ toujours supérieur à 1).

5. Conclusions et perspectives de recherche

Les résultats obtenus à ce stade de l'étude montrent que des estimations acceptables de l'effort horizontal total dû à la houle peuvent être obtenues dans la zone de levée (ou « shoaling ») par application de la formule de Morison, avec une cinématique de houle calculée par une méthode de fonction de courant irrégulière ou la méthode de la fonction de transfert modifiée.

Cependant, dans le cas de vagues déferlantes, ces méthodes sous-estiment l'effort subi par la structure : les forces réelles peuvent être jusqu'à 2 fois supérieures aux prédictions, du fait du terme d'impact de déferlement. En comparaison, lorsqu'on utilise la théorie linéaire de houle, les efforts maximaux peuvent être sous-estimés d'un facteur 4 (même en utilisant la hauteur locale des vagues). La méthode de fonction de courant classique améliore les prédictions de la théorie linéaire, mais son intérêt est limité pour les vagues déferlantes sur des fonds en pente, vu qu'elle ne fonctionne que si $H/d < 0.78$.

La comparaison des différentes modélisations de houle montre que la prise en compte de l'asymétrie des vagues par rapport à un plan vertical (théorie de la fonction de courant irrégulière et méthode de la fonction de transfert modifiée) conduit à des prédictions meilleures que celles obtenues avec des théories de houle supposant un profil asymétrique uniquement par rapport à un plan horizontal (théorie de la fonction de courant classique). L'analyse des essais met ainsi en évidence la nécessité de disposer de modèles numériques décrivant correctement l'hydrodynamique des vagues cambrées et déferlantes.

D'un point de vue pratique, en zone côtière et plus particulièrement dans la zone de déferlement, les essais réalisés montrent que les prédictions obtenues à partir de méthodes classiques doivent être significativement majorées pour estimer les efforts maximaux. Dans l'attente de méthodes plus adaptées pour estimer les efforts

hydrodynamiques dans des conditions quasi-déferlantes ou déferlantes, il est recommandé de réaliser des essais sur modèle réduit pour mesurer les efforts subis par les structures.

Des travaux complémentaires sur l'amélioration de la prédiction de la cinématique de houle (par exemple par le biais d'un modèle non-linéaire de propagation de houle de type « Boussinesq étendu »), sur la recherche de valeurs plus adaptées des coefficients hydrodynamiques (déterminées par application d'une méthode des moindres carrés entre mesures et prédictions) et sur la modélisation de la composante d'impact due au déferlement doivent être réalisés, afin d'améliorer l'estimation des efforts et moments de renversement pour le cas le plus pénalisant des vagues déferlant sur la structure.

6. Bibliographie

- Airy G.B., 1845. Tides and waves. *Encyclopaedia Metropolitana*, Art. 192, pp 241-369.
- Dean R.G., 1965. Stream-function representation of non-linear ocean waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, n°18, pp 4561-4572.
- Chakrabarti S.K., Kriebel D., Berek E.P., 1997. Force on a single pile caisson in breaking wave and current. *Applied Ocean Research*, Vol. 19, pp 113-140.
- Goda Y., 1970. A synthesis of breaker indices. *Trans. Japan Society of Civil Eng.*, Vol. 2, pp 227-230.
- Koyama, H., Iwata, K., 1986. Estimation of wave particle velocities of shallow water waves by a modified transfer function method. *Proc. of the 20th Int. Conf. on Coastal Engineering (ASCE)*, Taipei (Taiwan), pp 425-436
- Morison J.R., O'Brien M.P., Johnson J.W., Schaaf S.A., 1950. The force exerted by surface waves on piles. *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 189, TP 2846, pp 149-154.
- Sarpkaya T., Isaacson M., 1981. *Mechanics of wave forces on offshore structures*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 650 p.
- Sumer B.M., Fredsøe J., 1997. *Hydrodynamics around cylindrical structures*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 12, World Scientific, 530 p.