



Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER  
Laboratoire d'Océanographie Spatiale

# Propriétés des champs de houle

Rapport de stage pour l'obtention du diplôme  
*d'Ingénieur de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg*

présenté par  
ROLLET Mylène

le  
2013

Maître de stage : Fabrice ARDHUIN  
Superviseur : Jean-Paul BOY  
Président :

# Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier le Laboratoire d'Océanographie Spatiale pour m'avoir accueillie durant ces 6 mois de stage ainsi que mon maître de stage Fabrice ARDHUIN pour m'avoir encadrée et aidée tout au long du stage. Je tenais également à remercier l'École et Observatoire des Sciences de la Terre et mon superviseur Jean-Paul BOY pour m'avoir permis d'effectuer ce stage.

# Résumé/Abstract

Après avoir donné une définition des champs de houle et avoir abordé quelques points théoriques et pratiques comme l'analyse spectrale et la théorie d'Airy, on visualisera les champs de houle synthétiques fournis par Romain HUSSON et provenant des observations SAR complétées théoriquement. A partir de ces champs de houle, on construira alors les champs de houle WAVEWATCH III en utilisant les deux configurations NL1 et NL3 de ce modèle. Le but étant de caractériser les trois champs de houle à travers leur largeur et leur dissipation, on suivra alors l'évolution des hauteurs significatives de ces trois champs de houle en fonction de la direction et de la distance. Finalement, on utilisera également les données in situ fournies par les bouées et les stations sismiques pour valider ponctuellement l'évolution de ces champs de houle. La complémentarité des deux types de données, les champs de houles et les observations in-situ, permettront alors de préférer la configuration NL1 à la configuration NL3 du modèle WAVEWATCH III et d'observer de fortes hétérogénéités dans la caractérisation de la largeur des champs de houle.

After giving a definition of swell fields and seeing some theoretical and practical points such as spectral analysis and Airy theory, we will see Romain HUSSON synthetic swell fields coming from theoretically completed SAR observations. Starting from these swell fields, we will build WAVEWATCH III swell fields using the two model configurations NL1 and NL3. The aim being to characterize the three swell fields through their width and dissipation, we will follow the significant wave height evolution of these three swell fields as a function of the direction and the distance. Finally, we will use in-situ data provided by buoys and seismic stations in order to validate the evolution of these swell fields. The complementarity of the two kinds of data, swell fields and in-situ data, will allow to prefer the WAVEWATCH III model configuration NL1 to the configuration NL3 and will observe an important heterogeneity in the width swell fields characterization.

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Visualisation des champs de houle</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>Champs de houle</b>	<b>15</b>
1.1	Définitions . . . . .	15
1.2	Analyse spectrale . . . . .	16
1.3	Théorie d'Airy . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Champs de houle synthétiques</b>	<b>21</b>
2.1	Principe du SAR . . . . .	21
2.2	Obtention des champs de houle synthétiques . . . . .	27
2.3	Visualisation des champs de houle synthétiques . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Champs de houle WAVEWATCH III</b>	<b>31</b>
3.1	Description du modèle . . . . .	31
3.2	Obtention des champs de houle WAVEWATCH III . . . . .	33
3.3	Visualisation des champs de houle WAVEWATCH III . . . . .	34
<b>II</b>	<b>Caractérisation des champs de houle</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction et de la distance</b>	<b>41</b>
4.1	Gestion de la dimension du temps . . . . .	41
4.2	Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction . . . . .	43
4.3	Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Validation par les bouées</b>	<b>47</b>
5.1	Principe des bouées . . . . .	47
5.2	Obtention des hauteurs significatives . . . . .	48
5.3	Précision des mesures . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Validation par les stations sismiques</b>	<b>52</b>
6.1	Principe des stations sismiques . . . . .	52
6.2	Obtention des hauteurs significatives . . . . .	55
6.3	Précision des mesures . . . . .	57

<b>7 Validation des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 par les bouées et les stations sismiques</b>	<b>59</b>
<b>A Tempête du 3 février 2009</b>	<b>65</b>
<b>B Tempête du 12 avril 2009</b>	<b>74</b>

# Table des figures

1	Centre Bretagne (provenant de l'IFREMER : <a href="http://wwz.ifremer.fr/">http://wwz.ifremer.fr/</a> ) .	12
1.1	Spectre en fréquence théorique . . . . .	16
1.2	Exemple de spectre en fréquence (provenant de [Ardhuin,2012]) . . . . .	17
1.3	Spectre directionnel théorique . . . . .	18
1.4	Exemple de spectre directionnel (provenant de [Ardhuin,2012]) . . . . .	18
2.1	Géométrie d'acquisition de l'instrument SAR . . . . .	22
2.2	Résolution en range . . . . .	23
2.3	Résolution en azimuth . . . . .	24
2.4	Hauteurs significatives mesurées le 19 janvier pour la tempête du 13 janvier 2008 (provenant de [Husson,2012]) . . . . .	28
2.5	Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 avril 2009 au temps $t = 1$ (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic avec à gauche la représentation sur la grille (distance,direction,temps) et à droite la représentation sur la grille (latitude,longitude,temps) . . . . .	29
2.6	Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic . . . . .	30
3.1	Spectre directionnel du modèle WW3 (a) Configuration NL1 (b) Configuration NL3 (provenant de Ardhuin) . . . . .	33
3.2	Périodes de pic pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	36
3.3	Directions de pic pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	37
3.4	Hauteurs significatives pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	38
3.5	Période de pic pour la tempête du 3 avril 2009 au temps $t = 1$ a) Champ de houle synthétique b) Champ de houle WW3 NL1 . . . . .	39

4.1	Hauteurs significatives pour la tempête du 3 avril 2009 (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3	42
4.2	Evolution de la hauteur significative le long d'une direction . . . . .	43
4.3	Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction pour la tempête du 3 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3) . . . . .	44
4.4	Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance . . . . .	45
4.5	Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance pour la tempête du 3 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1, en bleu le champ de houle WW3 NL3 et en jaune le champ de houle sans dissipation) . . . . .	46
5.1	Bouée 46050 (provenant du NDBC : <a href="http://www.ndbc.noaa.gov/">www.ndbc.noaa.gov/</a> ) . . . . .	48
5.2	Etape 1 : bouée . . . . .	48
5.3	Etape 4 : bouée (tempête du 3 avril 2009) . . . . .	49
5.4	Bouée avec sélection manuelle de $f_{min}$ et $f_{max}$ (tempête du 3 avril 2009) . . . . .	50
6.1	Classification des mécanismes de production du bruit microsismique (figure provenant de [Ardhuin et al,2011]) . . . . .	53
6.2	Station sismique BKS (provenant du BDSN : <a href="http://seismo.berkeley.edu/">http://seismo.berkeley.edu/</a> ) . . . . .	54
6.3	Station sismique COR (provenant du USGS : <a href="http://earthquake.usgs.gov/">http://earthquake.usgs.gov/</a> ) . . . . .	55
6.4	Etape 1 : station sismique . . . . .	55
6.5	Etape 6 : station sismique BKS (tempête du 3 avril 2009) . . . . .	56
6.6	Etape 6 : station sismique COR (tempête du 3 avril 2009) . . . . .	57
7.1	Légende . . . . .	60
7.2	Validation des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 par les bouées et les stations sismiques pour la tempête du 3 avril 2009 a) Station sismique BKS b) Bouée 46050 et station sismique COR avec à gauche la représentation en fonction de la direction et à droite la représentation en fonction de la distance . . . . .	61
A.1	Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 février 2009 au temps $t = 1$ (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic avec à gauche la représentation sur la grille (distance,direction,temps) et à droite la représentation sur la grille (latitude,longitude,temps) . . . . .	66
A.2	Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic . . . . .	67
A.3	Périodes de pic pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	68

A.4	Directions de pic pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	69
A.5	Hauteurs significatives pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	70
A.6	Hauteurs significatives pour la tempête du 3 février 2009 (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	71
A.7	Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction pour la tempête du 3 février 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3)	72
A.8	Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance pour la tempête du 3 février 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3 et en jaune le champ de houle sans dissipation) . . . . .	73
B.1	Hauteurs significatives pour la tempête du 12 avril 2009 (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3 . . . . .	74
B.2	Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction pour la tempête du 12 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3) .	75
B.3	Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance pour la tempête du 12 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3 et en jaune le champ de houle sans dissipation) . . . . .	76
B.4	Etape 6 : station sismique BKS (tempête du 12 avril 2009) . . . . .	77
B.5	Validation des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 par la bouée BKS pour la tempête du 12 avril 2009 et avec la représentation en fonction de la direction . . . . .	78

# Liste des tableaux

2.1	Bandes de l'instrument SAR . . . . .	22
2.2	Satellite SEASAT . . . . .	25
2.3	Instrument SAR du satellite SEASAT . . . . .	26
2.4	Satellites embarquant des instruments SAR . . . . .	26
3.1	Données du modèle WW3 . . . . .	31
3.2	Construction du champ de houle WW3 . . . . .	34

# Acronymes

ALT	radar ALTimeter
BDSN	Berkeley Digital Seismic Network
CERSAT	Centre d'Exploitation et de Recherche SATellite
CSA	Canadian Space Agency
DIA	Discrete Interaction Approximation
DSN	Global Seismographic Network
ENVISAT	ENVIronment SATellite
ERS-1	European Resource Sensing-1
ERS-2	European Resource Sensing-2
ESA	European Space Agency
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LOS	Laboratoire d'Océanographie Spatiale
LRR	Laser Retro-Reflector
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NDBC	National Data Buoy Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PRF	Pulse Repetition Frequency
RADAR	Radio Detection And Ranging
RADARSAT-1	RADAR SATellite-1
RADARSAT-2	RADAR SATellite-2
SAR	Synthetic Aperture Radar
SASS	Seasat-A Satellite Scatterometer
SEASAT	SEAfaring SATellite
SMMR	Scanning Multichannel Microwave Radiometer
VIRR	Visible and Infrared Radiometer

# Notations

$a$	coefficient de calibration de la station sismique par rapport à la bouée
$b$	coefficient de calibration de la station sismique par rapport à la bouée
$C_d$	coefficient de direction de pic
$C_{groupe}$	vitesse de groupe
$C_{phase}$	vitesse de phase
$C_t$	coefficient de période de pic
$d_{S-R}$	distance source-récepteur
$D$	hauteur d'eau locale
$D_a$	fauchée en azimuth
$D_r$	fauchée en range
$D^n$	distance caractéristique
$E$	variance de l'élévation de la surface
$Ef$	densité spectrale de la bouée
$Efs$	densité spectrale de la station sismique
$E(f)$	densité spectrale
$E(f, \theta)$	densité spectro-angulaire
$f$	fréquence
$f$	fréquence de la bouée
$fs$	fréquence de la station sismique
$f_{max}$	fréquence maximale pour le champ synthétique
$f_{min}$	fréquence minimale pour le champ synthétique
$f_p$	fréquence de pic
$f_p^n$	fréquence de pic de la partition n du modèle WW3
$g$	accélération de la gravité
$H_{sat}$	altitude du satellite
$H_S$	hauteur significative
$H_S^m$	hauteur significative de la partition choisie du modèle WW3

$i$	inclinaison de l'orbite
$k$	nombre d'onde
$L$	longueur d'onde
$L^*l$	dimension de l'antenne (longueur * largeur)
$L_p$	longueur d'onde de pic
$m$	partition choisie
$n$	partition du modèle WW3
$R$	rayon de la Terre
$R$	distance antenne-point au sol
$S_{nl}$	terme de transfert non linéaire
$t_{bouee}$	temps pour la bouée
$t_{station}$	temps pour la station sismique
$t_{synthetique}$	temps pour le champ synthétique
$t_R$	date d'observation du champ de houle
$t_S$	date de génération de la tempête
$T$	période
$T$	période de l'orbite
$T_p$	période de pic
$T_p^{dominant}$	moyenne de la période sur toute la grille (distance,direction,temps)
$T_p^n$	période de pic de la partition n du modèle WW3
$T_p^{syn}$	période de pic du champ de houle synthétique
$Z$	déviations standard
$\alpha$	distance sphérique entre la source et le récepteur
$\delta a$	résolution en azimuth
$\delta r$	résolution radiale / au sol en range
$\Delta t$	durée de la réception de tout les échos du pulse
$\theta$	direction
$\theta$	angle d'incidence de l'émission des pulses
$\theta_a$	angle d'ouverture en azimuth
$\theta_p$	direction de pic
$\theta_r$	angle d'ouverture en range
$\theta_p^n$	direction de pic de la partition n du modèle WW3
$\theta_p^{syn}$	direction de pic du champ de houle synthétique
$\lambda$	longueur d'onde du pulse
$\lambda_R$	longitude du récepteur
$\lambda_S$	longitude de la source
$\sigma$	pulsation
$\tau$	durée du pulse
$\phi_R$	latitude du récepteur
$\phi_S$	latitude de la source

# Lieu du stage

Créé en 1984, l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Il a pour objectif de mieux connaître les océans et leurs ressources et compte pour cela 5 centres répartis sur l'ensemble des façades maritimes françaises (Manche-Mer du Nord, Bretagne, Atlantique, Méditerranée et Pacifique).

Le centre Bretagne visible sur la figure 1 est lui le plus grand centre de l'IFREMER avec 750 salariés répartis sur 11 départements de recherche qui couvrent l'ensemble des domaines de recherche en océanographie (biologie, géologie, physique, etc ...) et qui sont en partenariat avec de nombreux organismes nationaux et internationaux. De nombreux moyens y sont regroupés comme par exemple les moyens d'élevage aquacole, les moyens d'essais avec le bassin à houle et les moyens informatiques avec le centre de calcul.

Le LOS (Laboratoire d'Océanographie Spatiale) qui est une unité de recherche se situant sur le centre Bretagne regroupe des chercheurs, ingénieurs et techniciens spécialisés dans la gestion et la valorisation des mesures d'observations des océans. Il est en lien directe avec le CERSAT (Centre d'Exploitation et de Recherche SATellitaire) qui traite puis distribue les données satellites dans différents domaines tels que l'océanographie ou la climatologie.



FIGURE 1 – Centre Bretagne (provenant de l'IFREMER : <http://wwz.ifremer.fr/>)

# Introduction

La connaissance des propriétés des champs de houle représente de nombreux enjeux tant pour l'amélioration des connaissances en océanographie que pour la mise au point de nouvelles applications liées aux activités maritimes et portuaires. La connaissance des caractéristiques des champs de houle permettrait en effet de mieux comprendre la dynamique océanique et atmosphérique et d'obtenir une meilleure prévision de l'état de mer qui assurerait ainsi une navigation et des opérations en mer plus sûres. La conception et le dimensionnement des structures maritimes et portuaires tels que les plateformes pétrolières ou les digues pourrait également être amélioré grâce à une meilleure prévision de l'état de mer.

Les champs de houle synthétiques fournis par Romain HUSSON sont alors de très bon outils pour visualiser un grand nombre de champs de houle. Ces observations étant obtenues à partir des observations SAR complétées théoriquement, elles permettent en effet d'avoir une vision globale sur la propagation des champs de houle ce qui n'a jamais été obtenu auparavant avec d'autres types de données. Une comparaison de ces champs de houle avec ceux obtenus grâce au modèle WAVEWATCH III sera alors possible et devrait permettre de comprendre les erreurs faites par le modèle WAVEWATCH III et de comparer les deux configurations NL1 et NL3 du modèle. Pour finir, l'utilisation d'observations in-situ fournies par les bouées et les stations sismiques qui sont plus robustes que les observations faites par les satellites vont alors permettre de valider les trois champs de houle et de caractériser leurs erreurs.

Première partie

Visualisation des champs de houle

# Chapitre 1

## Champs de houle

### 1.1 Définitions

**Vague** Une vague est une onde de gravité de surface qui se propage à la surface de la mer et qui suit une évolution en trois étapes :

- la génération de la vague : le vent donne de l'énergie à la vague via un transfert d'énergie de l'atmosphère vers la vague
- le transfert non linéaire de l'énergie de la vague : il s'agit de la dynamique de la vague
- la dissipation de la vague : la vague perd de l'énergie en la donnant principalement à la turbulence océanique et à l'atmosphère

**Etat de mer** L'état de mer d'un océan décrit l'agitation locale de la mer en décomposant les mouvements de la surface de la mer en différents systèmes de vagues tels que la mer du vent provoquée par le vent local présent dans la zone d'observation au moment de l'observation et les houles qui sont dues à des tempêtes ayant eu lieu loin de la zone d'observation. Chaque système de vagues composant l'état de mer (la mer du vent, la houle primaire qui correspond à la houle la plus énergétique, la houle secondaire moins énergétique, etc. . . ) peut alors être décrit par différents paramètres tels que :

- la hauteur significative  $H_S$  : hauteur moyenne sur le tiers des vagues les plus hautes du système de vagues
- la fréquence de pic  $f_p$  : fréquence des vagues dominantes du système de vagues
- la direction de pic  $\theta_p$  : direction des vagues dominantes du système de vagues

**Champ de houle** Ici, nous nous intéresserons plus particulièrement à la houle en définissant le champ de houle comme étant l'ensemble des ondes de gravité de surface générées par une tempête considérée ponctuelle en temps et en espace dans l'océan et se propageant sur de grandes distances loin de la zone de génération. On peut remarquer ici que ces ondes sont généralement longues ce qui leur permet de se propager avec une faible dissipation et d'atteindre une distance pouvant aller jusqu'à 20 000 km, nécessitant ainsi la prise en compte de la sphéricité de la Terre.

## 1.2 Analyse spectrale

L'analyse spectrale décrit l'état de mer en décomposant l'énergie selon la fréquence pour le spectre en fréquence et selon la fréquence et la direction pour le spectre directionnel. Elle permet donc de distinguer les systèmes qui composent l'état de mer et de les caractériser via leurs hauteurs significatives et fréquences de pic pour le spectre en fréquence et via leurs hauteurs significatives, fréquences de pic et directions de pic pour le spectre directionnel.

**Spectre en fréquence** Le spectre en fréquence représente la variance de l'élévation de la surface  $E$  en fonction de la fréquence  $f$  afin d'obtenir la densité spectrale  $E(f)$  pour une fréquence donnée ainsi que le spectre en fréquence qui est la densité spectrale  $E(f)$  pour l'ensemble des fréquences présentes.

Pour un spectre en fréquence théorique dont l'état de mer est constitué uniquement d'un système de vagues, la fréquence de pic de ce système de vagues est déterminée à partir de la fréquence pour laquelle l'élévation de la surface est maximale (figure 1.1).

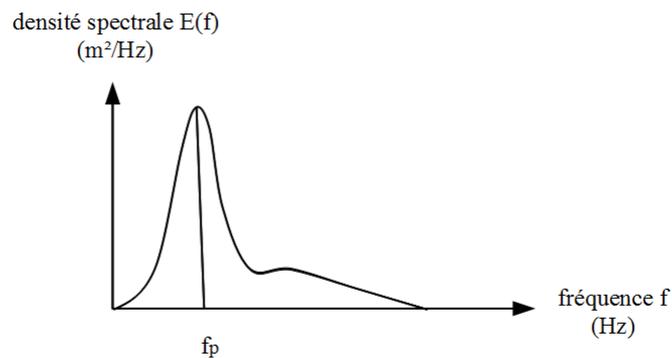


FIGURE 1.1 – Spectre en fréquence théorique

En prenant l'exemple d'un spectre en fréquence réel obtenu à partir des mesures de la bouée 51001 le 11 janvier 2007 (figure 1.2), on peut observer trois pics de l'élévation de la surface qui correspondent à trois systèmes de vagues composant l'état de mer :

- une houle secondaire 2 ( $f_p = 0,06$  Hz)
- une houle primaire 1 ( $f_p = 0,09$  Hz)
- la mer du vent 3 ( $f_p = 0.13$  Hz)

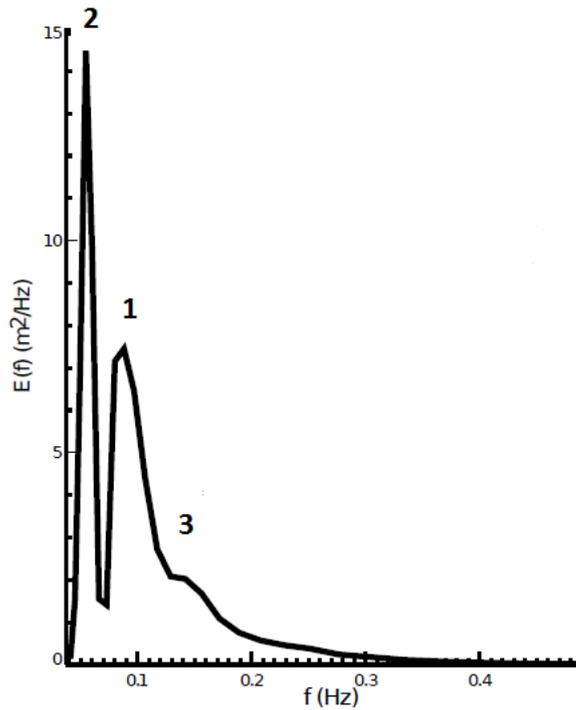


FIGURE 1.2 – Exemple de spectre en fréquence (provenant de [Ardhuin,2012])

**Spectre directionnel** Pour le spectre directionnel on représente la variance de l'élévation de la surface  $E$  en fonction de la fréquence  $f$  et de la direction  $\theta$  afin d'obtenir la densité spectro-angulaire  $E(f, \theta)$  pour une fréquence et direction donnée ainsi que le spectre directionnel qui est la densité spectro-angulaire  $E(f, \theta)$  pour l'ensemble des fréquences et directions présentes.

En reprenant l'exemple du cas théorique où l'état de mer est uniquement constitué d'un système de vagues, on obtient un spectre directionnel nous permettant de connaître la fréquence et la direction de pic en prenant la fréquence et la direction pour laquelle l'élévation de la surface est maximale (figure 1.3).

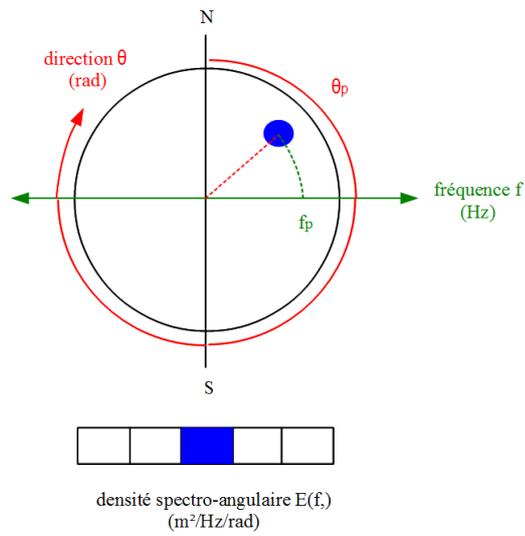


FIGURE 1.3 – Spectre directionnel théorique

Pour le spectre directionnel réel obtenu avec la bouée 51001 le 11 janvier 2007 (figure 1.4), on retrouve la superposition :

- d’une houle secondaire 2 ( $f_p = 0,06$  Hz et  $\theta_p = 310^\circ$ )
- d’une houle primaire 1 ( $f_p = 0,09$  Hz et  $\theta_p = 55^\circ$ )
- de la mer du vent 3 ( $f_p = 0.13$  Hz et  $\theta_p = 90^\circ$ )

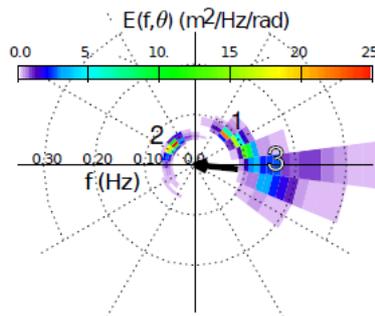


FIGURE 1.4 – Exemple de spectre directionnel (provenant de [Ardhuin,2012])

### 1.3 Théorie d'Airy

La théorie d'Airy est un modèle théorique et linéaire basé sur l'hypothèse des petites amplitudes de mouvement. Elle décrit le comportement des champs de houle en nous disant que la houle se propage le long d'un géodésique qui dans le cas de la sphère est un grand cercle (cercle ayant le même centre que la Terre).

**Définition** On définit ici quelques paramètres importants qui interviennent dans la théorie d'Airy :

- la période  $T : \frac{1}{f}$
- la pulsation  $\sigma : 2\pi f$
- la longueur d'onde  $L : L$
- le nombre d'onde  $k : \frac{2\pi}{L}$

**Vitesse de phase** La vitesse de phase est la vitesse à laquelle la crête de la vague évolue. Elle est définie comme étant le rapport entre la pulsation et le nombre d'onde ou encore comme le rapport entre la longueur d'onde et la période.

$$C_{phase} = \frac{\sigma}{k} = \frac{L}{T} \quad (1.1)$$

La relation de dispersion qui est la solution de l'équation d'onde formulée par la théorie d'Airy nous permet alors de connaître la pulsation et d'en déduire une nouvelle expression de la vitesse de phase ( $g$  est l'accélération de la gravité et  $D$  la hauteur d'eau locale).

$$\sigma^2 = gk \tanh(kD) \quad (1.2)$$

$$C_{phase} = \sqrt{\frac{g \tanh(kD)}{k}} \quad (1.3)$$

Dans le cas d'une eau peu profonde, la relation de dispersion devient  $\sigma^2 = gDk^2$  et on a alors la vitesse de phase  $C_{phase} = \sqrt{gD}$ . De la même manière, dans le cas d'une eau profonde, la relation de dispersion devient  $\sigma^2 = gk$  et la vitesse de phase  $C_{phase} = \sqrt{\frac{g}{k}}$ . On remarque ici que pour une eau profonde la vitesse de phase dépend du nombre d'onde et donc de la longueur d'onde de la vague et que plus la vague est longue plus elle se propage vite. On dit alors que les vagues sont dispersives ce qui implique qu'à un point d'observation fixe, on observera en premier lieu les vagues de longueur d'onde élevée puis les vagues avec des longueurs d'ondes plus faibles.

**Vitesse de groupe** La vitesse de groupe est la vitesse moyenne de l'énergie. Elle peut être définie comme étant la vitesse de propagation d'un groupe de vagues ayant un contenu en fréquence proche.

$$C_{groupe} = \frac{\partial \sigma}{\partial k} \quad (1.4)$$

Si on reprend le cas de l'eau profonde, on peut approximer la vitesse de groupe comme étant la moitié de la vitesse de phase.

$$\begin{aligned}
C_{groupe} &= \frac{1}{2}C_{phase} \quad | \quad C_{phase} = \sqrt{\frac{g}{k}} \\
&= \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{k}} \quad | \quad \rightarrow 1 \\
&= \frac{gT_p}{4\pi} \quad | \quad T_p = \frac{1}{f_p} \\
&= \frac{g}{4\pi f_p}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

$$\rightarrow 1 \quad \left. \begin{aligned} \sigma^2 = gk &\Leftrightarrow k = \frac{\sigma^2}{g} \\ T_p = \frac{2\pi}{\sigma} &\Leftrightarrow \sigma = \frac{2\pi}{T_p} \end{aligned} \right\} k = \frac{4\pi^2}{gT_p^2}$$

On peut aussi définir la vitesse de groupe comme étant le rapport entre une distance et un temps. On considère pour cela une source  $S$  (une tempête) générée au temps  $t_S$  et localisée au point  $S$  de coordonnées  $(\lambda_S, \phi_S)$  avec  $\lambda_S$  la longitude et  $\phi_S$  la latitude de la source. On considère ensuite un récepteur  $R$  (le point d'observation loin de la tempête) qui observe le champ de houle au temps  $t_R$  et au point  $R$  de coordonnées  $(\lambda_R, \phi_R)$  avec  $\lambda_R$  la longitude et  $\phi_R$  la latitude du récepteur. La vitesse de groupe peut alors être définie comme étant le rapport entre la distance source-récepteur  $d_{S-R}$  et le temps écoulé entre la date de génération de la tempête  $t_S$  et la date d'observation  $t_R$  [Collard et al,2009].

$$C_{groupe} = \frac{d_{S-R}}{t_R - t_S} \tag{1.6}$$

La distance source-récepteur  $d_{S-R}$  se situant sur une sphère, elle peut être définie à partir de la distance sphérique  $\alpha$  entre la source et le récepteur (angle au centre de la Terre entre les deux points) et  $R$  le rayon de la Terre.

$$d_{S-R} = R\alpha \tag{1.7}$$

$$\alpha = (\cos \phi_R \cos \phi_S \cos(\lambda_R - \lambda_S) + \sin \phi_R \sin \phi_S) \tag{1.8}$$

On obtient ainsi les expressions de la fréquence et de la période de pic.

$$C_{groupe} = \frac{g}{4\pi f_p} \text{ et } C_{groupe} = \frac{R\alpha}{t_R - t_S} \tag{1.9}$$

$$f_p = \frac{g(t_R - t_S)}{4\pi R\alpha} \tag{1.10}$$

$$T_p = \frac{4\pi R\alpha}{g(t_R - t_S)} \tag{1.11}$$

## Chapitre 2

# Champs de houle synthétiques

### 2.1 Principe du SAR

Les champs de houle se propageant à l'échelle d'un bassin océanique sur plusieurs jours, l'observation par satellite est apparue comme étant un bon moyen pour suivre la propagation de ces champs de houle. L'apparition de l'instrument SAR (Synthetic Aperture Radar) en 1951 suite aux recherches de Carl Wiley et l'embarquement d'un instrument SAR sur le satellite SEASAT (SEAFaring SATellite) en 1978 a alors ouvert la voie à de nombreux travaux permettant aujourd'hui d'obtenir une information spectrale de l'état de mer à partir d'une instrument SAR embarqué par satellite.

**L'instrument SAR** L'instrument SAR est basé sur le principe du RADAR (RADio Detection And Ranging) apparu à la fin des années 1930. Sa géométrie d'acquisition est illustrée dans la figure 2.1. On y voit l'instrument SAR, représenté par son antenne de dimension  $L \times l$ , qui suit l'orbite du satellite et se déplace dans la direction azimutale tout en émettant des pulses perpendiculairement à la direction de son déplacement, c'est à dire dans la direction range. Pour des raisons que l'on verra plus tard, ces pulses sont émis en direction de la surface avec un angle d'incidence  $\theta$ . La surface illuminée par le pulse, aussi appelée empreinte au sol de l'antenne, renvoie alors une partie du pulse vers l'antenne. Dans le cas de notre exemple, les antennes émettrices et réceptrices sont confondues et on parle alors d'instrument monostatique en opposition à un instrument bistatique où l'antenne émettrice est distincte de l'antenne réceptrice. L'antenne monostatique entraîne ici un fonctionnement de l'instrument en alternance entre un mode d'émission qui dure le temps du pulse  $\tau$  et un mode de réception qui dure le temps de la réception de tous les échos du pulse  $\Delta t$ . La dimension de l'empreinte au sol est alors donnée par la fauchée en range  $D_r$  et en azimuth  $D_a$  directement liées aux angles d'ouvertures en range  $\theta_r$  et en azimuth  $\theta_a$ .

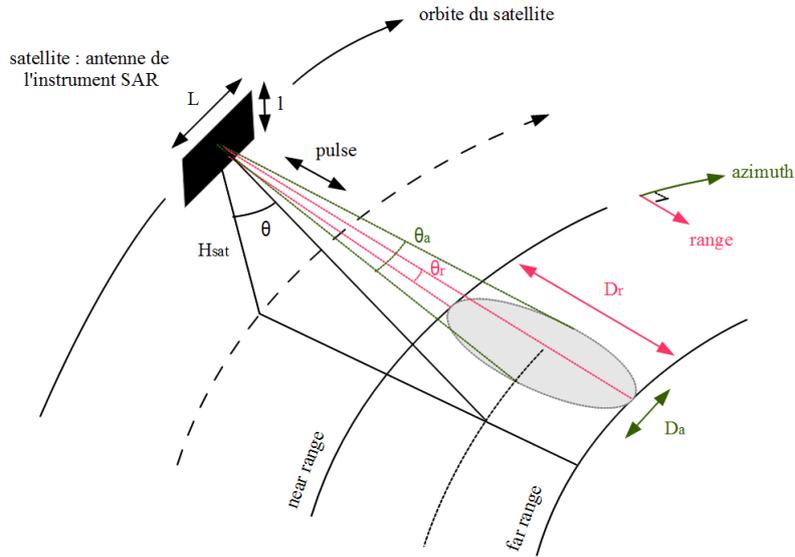


FIGURE 2.1 – Géométrie d'acquisition de l'instrument SAR

Les pulses sont ici des ondes électromagnétiques dont les fréquences sont généralement comprises entre 0.22 GHz et 36 GHz correspondant à des longueurs d'ondes allant de 0.83 cm à 133 cm. On découpe généralement ces fréquences en 7 bandes présentées dans le tableau 2.1. La polarisation de ces ondes électromagnétiques peut alors être de deux types, soit horizontale lorsque le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence, soit verticale lorsque celui-ci est parallèle au plan d'incidence. L'instrument SAR peut donc émettre les ondes électromagnétiques avec une polarisation H ou V et recevoir ces ondes après rétrodiffusion avec une polarisation H ou V également. Cela donne donc lieu à quatre configurations possibles : deux polarisations parallèles HH et VV et deux polarisations croisées HV et VH.

bande	fréquence (GHz)	longueur d'onde (cm)
P	0,22 - 0,39	133 - 76,9
L	0,39 - 1,55	76,9 - 19,3
S	1,55 - 4,2	19,3 - 7,1
C	4,2 - 5,75	7,1 - 5,2
X	5,75 - 10,9	5,2 - 2,7
Ku	10,9 - 22	2,7 - 1,36
Ka	22 - 36	1,36 - 0,83

TABLE 2.1 – Bandes de l'instrument SAR

**Image SAR** L'image SAR est obtenue en triant les échos des pulses en fonction de leurs temps de trajet aller-retour entre l'antenne et les points au sol, l'image en range étant obtenue grâce à un unique pulse et l'image en azimuth étant obtenue grâce à la succession des pulses qui se suivent à une fréquence PRF (Pulse Repetition Frequency =  $1 / \tau + \Delta t$ ) lors du déplacement du satellite. On remarque ici la nécessité d'envoyer les pulses latéralement pour éviter toute ambiguïté introduite par un envoi central qui ne pourrait pas distinguer les échos provenant de la droite et de la gauche du satellite et ayant les mêmes temps de trajet.

**Résolution en range** La résolution en range dépend uniquement de la durée du pulse, le délai séparant les échos de deux points au sol devant obligatoirement être supérieur à cette durée pour qu'il puisse y avoir différenciation et donc tri des échos. La résolution radiale en range peut alors être donnée par la distance radiale minimale entre les deux points au sol pour lesquels les échos ne se chevauchent pas.

$$\delta r = \frac{c\tau}{2} \quad (2.1)$$

En projetant cette résolution radiale au sol on obtient alors la résolution au sol en range.

$$\delta r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \quad (2.2)$$

En faisant un rapide calcul, on observe ici que pour obtenir une résolution en range de l'ordre du mètre, une durée de pulse de l'ordre du nanomètre serait nécessaire. Cependant, en réduisant ainsi la durée du pulse, on diminuerait sa puissance et le pulse ne serait plus détectable. Pour palier à ce problème, l'instrument SAR utilise le principe de la compression d'impulsion qui consiste à émettre des pulses modulés en fréquence afin de faire correspondre à chaque point au sol dans la direction range une fréquence qui lui est propre, facilitant ainsi le tri des échos (figure 2.2).

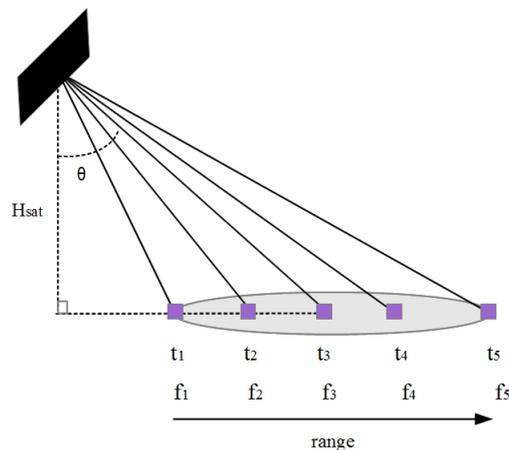


FIGURE 2.2 – Résolution en range

**Résolution en azimuth** La résolution en azimuth dépend de l'ouverture de l'antenne en azimuth qui dépend elle-même de la longueur d'onde du pulse émis et de la longueur de l'antenne.

$$\theta_a = \frac{\lambda}{L} \quad (2.3)$$

En connaissant la distance antenne - point au sol  $R$  à partir de l'altitude du satellite et de l'angle d'incidence des pulses émis, on peut ainsi obtenir une résolution en azimuth.

$$\begin{aligned} \delta a &= R\theta_a \\ &= \frac{R\lambda}{L} \\ &= \frac{H_{sat}\lambda}{L \cos \theta} \end{aligned} \quad (2.4)$$

En réalisant une application numérique dans le cas d'une antenne se trouvant à 1000 km du point au sol et émettant des pulses de longueur d'onde de l'ordre du centimètre on se rend compte que pour avoir une résolution en azimuth de l'ordre du décimètre il faudrait une antenne de plus plusieurs kilomètres de long ce qui n'est bien évidemment pas réalisable. Pour remédier à ce problème, l'instrument SAR utilise la modulation de fréquence introduite naturellement par l'effet Doppler lorsque le satellite se déplace par rapport à un point au sol fixe. Chaque point au sol dans la direction de l'azimuth porte alors un décalage Doppler différent ce qui permet donc de faciliter le tri des échos (figure 2.3).

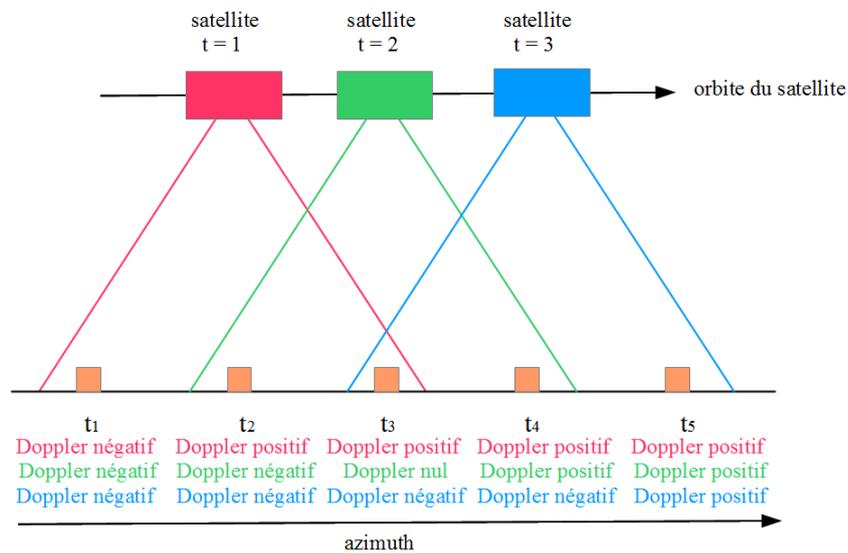


FIGURE 2.3 – Résolution en azimuth

**Les satellites embarquant un instrument SAR** Le satellite SEASAT développé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et plus particulièrement par le JPL (Jet Propulsion Laboratory) fut le premier satellite embarquant un instrument SAR en plus de différents autres instruments comme l'altimètre, le diffusomètre, le radiomètre et le laser. Ce satellite, lancé par le lanceur Atlas Agena le 26 juin 1978 à la base Vandenberg Air Force en Californie, atteint son orbite polaire quasi-circulaire d'altitude 800 km, d'inclinaison  $108^\circ$  et de période 101 minutes et y fonctionna durant 110 jours jusqu'au court-circuit de son système électrique mettant prématurément fin à sa mission le 10 octobre 1978. Malgré sa courte durée de vie, les 42 heures de données en temps réel obtenues sur les 110 jours de fonctionnement du satellite ont donné lieu à de nombreux articles validant l'intérêt des observations satellites pour l'étude de l'océan à une échelle globale (tableau 2.2 et 2.3) [Evans et al,2005].

agence	NASA (National Aeronautics and Space Administration) JPL (Jet Propulsion Laboratory)
lancement	date : 26 juin 1978 lieu : Vandenberg Air Force Base en Californie lanceur : Atlas Agena
fin de la mission	date : 10 octobre 1978 raison : court-circuit du système électrique
orbite	type : polaire quasi - circulaire altitude : $H_{sat} = 800$ km inclinaison : $i = 108^\circ$ période : $T = 101$ minutes
instruments	ALT : radar ALTimeter SASS : Seasat-A Satellite Scatterometer SMMR : Scanning Multichannel Microwave Radiometer SAR : Synthetic Aperture Radar VIRR : Visible and Infrared Radiometer LRR : Laser Retro-Reflector

TABLE 2.2 – Satellite SEASAT

bande	L fréquence : 1,28 GHz longueur d'onde : 23,5 cm
polarisation	HH
durée du pulse $\tau$	33.4 $\mu$ s
PRF (Pulse Repetition Frequency)	1463 – 1640 pps
dimension de l'antenne $L * l$	10,74*2.16 m
angle d'incidence $\theta$	23 °
ouverture d'antenne $\theta_r$ et $\theta_a$	range : 6 ° azimuth : 1 °
fauchée $D_r$ et $D_a$	range : 100 km azimuth : 15 km
résolution spatiale $\delta r$ et $\delta a$	range : 25 m azimuth : 25 m

TABLE 2.3 – Instrument SAR du satellite SEASAT

Suite au satellite SEASAT, de nombreux autres satellites ont embarqué des instruments SAR. Les caractéristiques de certains de ces satellites sont présentées dans le tableau 2.4.

satellite	durée de vie	agence (pays)	bande
SEASAT	1978 - 1978	NASA (USA)	L
ERS-1	1991 - 2000	ESA (Europe)	C
ERS-2	1995 - 2011	ESA (Europe)	C
RADARSAT-1	1995 - 2013	CSA (Canada)	C
ENVISAT	2002 - 2012	ESA (Europe)	C
RADARSAT-2	2007 - aujourd'hui	CSA (Canada)	C

TABLE 2.4 – Satellites embarquant des instruments SAR

L'instrument SAR embarqué dans un satellite a permis d'observer les champs de houle sur une couverture spatiale jamais atteinte jusqu'à présent avec d'autres instruments comme les bouées et les stations sismiques par exemple. En plus de cet avantage, l'instrument SAR présente également l'avantage de fonctionner de manière continue. En effet, l'instrument SAR étant un capteur actif qui se charge lui-même d'émettre et de recevoir les ondes électromagnétiques, il ne nécessite pas la présence de l'énergie solaire et peut ainsi fonctionner de jour comme de nuit. De plus, l'instrument SAR fonctionnant dans le domaine des longueurs d'ondes centimétriques la transmission de ces ondes n'est quasiment pas perturbée par l'atmosphère ce qui lui permet de fonctionner quelque soit les conditions météorologiques.

## 2.2 Obtention des champs de houle synthétiques

Les champs de houle synthétiques ont été fournis par Romain HUSSON et découlent du travail qu'il a effectué durant sa thèse "Développement et validation d'un modèle global de houle basé sur les observations de Radar à Ouverture Synthétique en mode vague" soutenue le 26 octobre 2012. Dans le cas de ce stage seuls les champs de houle synthétiques se propageant dans le Pacifique ont été sélectionnés, leur propagation étant moins rapidement stoppée par les côtes. Les champs de houle synthétiques de Romain HUSSON permettent alors de visualiser les observations des champs de houle, la hauteur significative, la longueur d'onde de pic et la direction de pic avec un échantillonnage régulier dans le temps et l'espace (application du surface fitting) et sans valeurs aberrantes (application de l'iterative filtering).

**Surface fitting** L'application du surface fitting permet de régler le problème de l'échantillonnage discret et irrégulier des observations brutes SAR provoqué par les contraintes de passage du satellite. Il complète pour cela les données observées en utilisant la cohérence des champs de houle et recouvre ainsi toute la région touchée par le champ de houle et cela avec un échantillonnage régulier dans le temps et l'espace. Les méthodes linéaires de moindre carré comme la régression polynomiale ou la méthode de Kriging ont été appliquées de manière itérative afin d'aboutir à une grille de système de coordonnées (distance,direction,temps) avec :

- distance : la distance sur le grand cercle entre la source et le récepteur
- direction : la direction de l'angle entre le Nord et le récepteur
- temps : le temps pris à partir de 3 jours après la génération de la tempête  $t_S$  et avec un pas de 3 heures entre chaque observation

**Iterative filtering** L'application de l'iterative filtering permet de régler le problème de la présence de valeurs aberrantes dans les observations brutes SAR en filtrant les observations de manière itérative afin de rejeter les observations aberrantes et de ne conserver que les observations les plus justes. Des masques ont également été appliqués afin de se limiter aux régions océaniques profondes loin des côtes et des îles ainsi qu'aux régions où la densité d'observation est satisfaisante.

On peut ici prendre l'exemple des mesures effectuées le 19 janvier et concernant la tempête du 13 janvier 2008. On y trouve d'une part les hauteurs significatives obtenues avant l'application du surface fitting et de l'iterative filtering et d'autre part les hauteurs significatives obtenues après leur application (figure 2.4). On remarque ici que les hauteurs significatives obtenues avant l'application du surface fitting et de l'iterative filtering ne sont pas des observations brutes SAR car les points de mesure ne suivent pas les traces d'un satellite mais sont beaucoup plus dispersés. Ces observations ont donc subi un traitement préalable basé sur l'extrapolation des points de mesure de la trace du satellite par propagation du champ de houle cohérent à l'aide des informations de période et de direction.

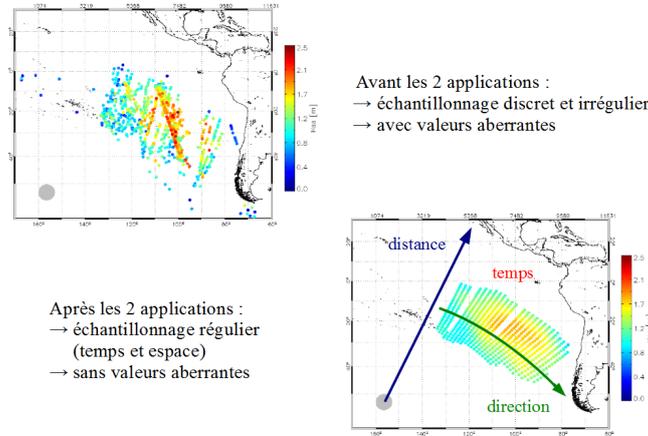


FIGURE 2.4 – Hauteurs significatives mesurées le 19 janvier pour la tempête du 13 janvier 2008 (provenant de [Husson,2012])

### 2.3 Visualisation des champs de houle synthétiques

En fixant le temps, on peut maintenant visualiser les hauteurs significatives, les périodes de pic et les directions de pic d'un champ de houle synthétique sur la grille (distance,direction,temps) définie grâce au surface fitting. Pour faciliter la visualisation de ces paramètres, on peut également utiliser un grille (latitude,longitude,temps) où l'on pourra localiser la tempête par une croix rouge. La période de pic est ici obtenue à partir de la longueur d'onde de pic en utilisant la théorie d'Airy appliquée dans le cas d'une eau profonde.

$$\begin{aligned}
 T_p &= \frac{2\pi}{\sigma} & | & \sigma^2 = gk \\
 &= \frac{2\pi}{\sqrt{gk}} & | & k = \frac{2\pi}{L_p} \\
 &= \sqrt{\frac{2\pi L_p}{g}}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

On peut maintenant prendre l'exemple de la tempête du 3 avril 2009 et visualiser les paramètres du champ de houle synthétique, la hauteur significative, la période de pic et la direction de pic à l'aide des deux grilles (distance,direction,temps) et (latitude,longitude,temps) pour le premier temps du système et suivre leur évolution au cours du temps sur la grille (latitude,longitude,temps) afin d'avoir une vision plus globale du champ de houle synthétique (figure 2.5 et 2.6).

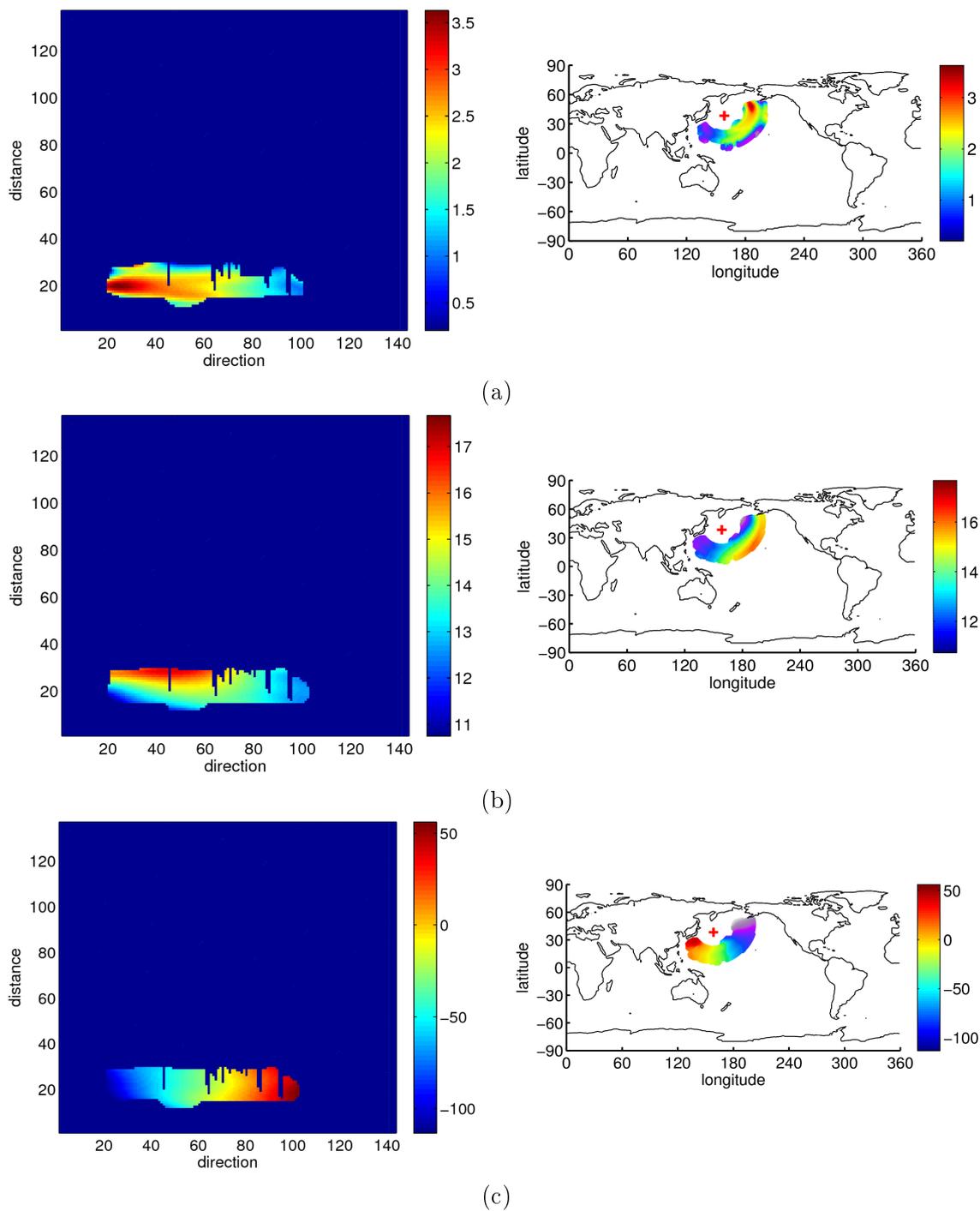


FIGURE 2.5 – Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 avril 2009 au temps  $t = 1$  (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic avec à gauche la représentation sur la grille (distance,direction,temps) et à droite la représentation sur la grille (latitude,longitude,temps)

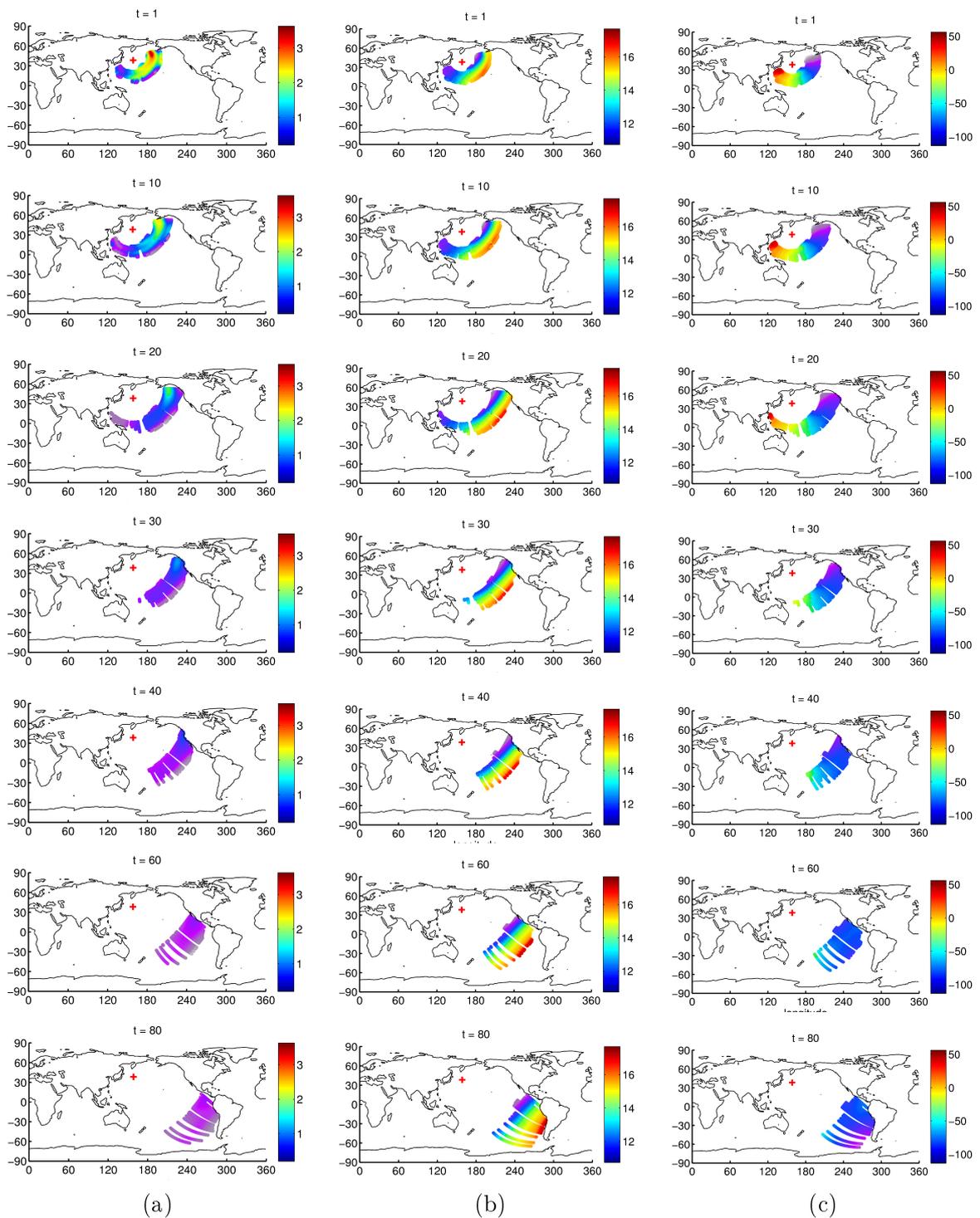


FIGURE 2.6 – Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic

## Chapitre 3

# Champs de houle WAVEWATCH III

### 3.1 Description du modèle

WAVEWATCH III noté WW3 est la troisième génération du modèle numérique de vague développé par NOAA/NCEP en collaboration avec d'autres organismes comme l'IFREMER.

**Données du modèle** Le modèle WW3 décompose l'état de mer en six partitions (0 pour la mer du vent et de 1 à 5 pour les houles de moins en moins énergétique) et fournit les paramètres de chacune de ces partitions comme la période de pic, la direction de pic et la hauteur significative (tableau 3.1).

partition	0	1	2	3	4	5
période de pic	$T_p^0$	$T_p^1$	$T_p^2$	$T_p^3$	$T_p^4$	$T_p^5$
direction de pic	$\theta_p^0$	$\theta_p^1$	$\theta_p^2$	$\theta_p^3$	$\theta_p^4$	$\theta_p^5$
hauteur significative	$H_S^0$	$H_S^1$	$H_S^2$	$H_S^3$	$H_S^4$	$H_S^5$

TABLE 3.1 – Données du modèle WW3

**Configurations NL1 et NL3** La différenciation des deux configurations du modèle WW3 réside dans le choix de l'approximation du transfert non linéaire de l'énergie qui est la deuxième étape de l'évolution d'une vague et qui joue un rôle très important dans la modélisation de l'évolution du spectre de l'état de mer.

Le transfert non linéaire de l'énergie peut être décrit de manière exacte grâce au terme de transfert non linéaire  $S_{nl}$  qui a été établi une première fois par Hasselmann en 1962 puis de manière indépendante par Zakharov en 1968. Dans le cas des eaux profondes qui

nous intéressent, les interactions dominantes intervenant dans ce terme  $S_{nl}$  sont les interactions du troisième ordre qui correspondent aux interactions vague-vague provoquées par la résonance entre les quadruplets de composantes spectrales. La redistribution de l'énergie sur le spectre est alors irréversible et conservative car il n'y pas de perte ou de gain d'énergie sur l'ensemble du spectre mais uniquement des pertes et gains qui se compensent entre les différentes composantes spectrales [Gagnaire-Renou,2009].

$$S_{nl} = \int_{k_1} \int_{k_2} \int_{k_3} G(k, k_1, k_2, k_3) [N_2 N_3 (N + N_1) - N N_1 (N_2 + N_3)] \\ * \delta(k + k_1 - k_2 - k_3) \delta(\omega + \omega_1 - \omega_2 - \omega_3) dk_1 dk_2 dk_3 \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} k+k_1 = k_2 + k_3 \\ \omega + \omega_1 = \omega_2 + \omega_3 \end{array} \right\} \text{conditions de résonance}$$

Le terme de transfert non linéaire  $S_{nl}$  peut être calculé de manière exacte comme on vient de le voir mais l'intégrale sur trois dimensions calculée pour chaque composante spectrale et pour chaque point de l'espace rend le calcul très couteux et nécessite donc des approximations. C'est donc ici qu'intervient la différenciation des modèles WW3 avec d'une part la configuration NL1 qui correspond à l'approximation DIA (Discrete Interaction Approximation) fournie par Hasselmann en 1985 et d'autre part la configuration NL3 correspondant à l'approximation de Tolman mise au point en 2004. L'approximation DIA simplifie les interactions du terme  $S_{nl}$  en ne prenant en compte qu'une seule configuration géométrique pour chaque composante du spectre alors que l'approximation de Tolman prend elle en compte quatre configurations géométriques pour chaque composante du spectre et devrait donc donner des résultats plus proches de la réalité.

Un effet local est également observé avec un lissage du spectre qui a tendance à gommer toutes les perturbations introduites dans le spectre. Dans le cas de la mer du vent cet effet est très facilement observable sur le spectre en fréquence et sur le spectre directionnel car les vagues constituant la mer du vent sont très cambrées, par contre, dans le cas des houles dont les vagues sont moins cambrées l'effet local n'est pas visible sur le spectre en fréquence mais un élargissement du spectre directionnel est par contre visible.

On peut maintenant prendre l'exemple de deux spectres directionnels obtenus à partir du modèle WW3 pour un même moment et un même endroit avec les deux configurations NL1 et NL3 (figure 3.1). En comparant ces deux spectres directionnels on observe alors que la configuration NL3 semble plus étroite que la configuration NL1 car elle concentre l'énergie de la vague sur un intervalle de direction beaucoup plus court.

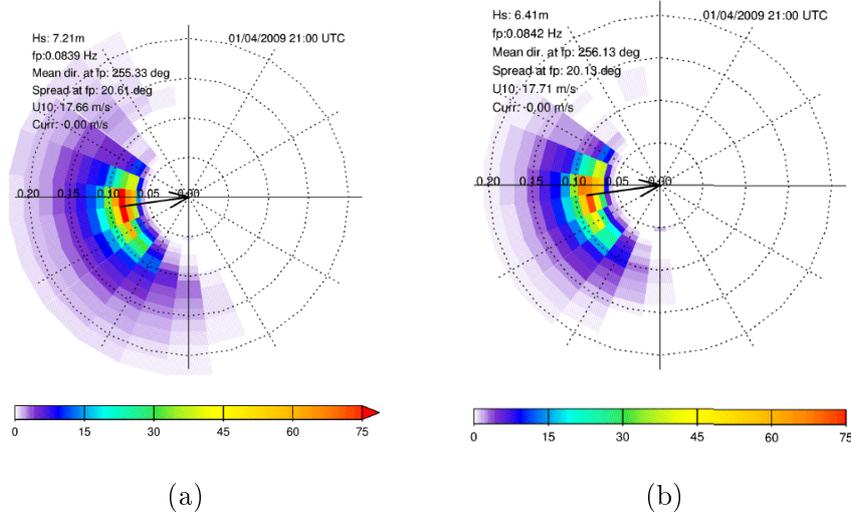


FIGURE 3.1 – Spectre directionnel du modèle WW3 (a) Configuration NL1 (b) Configuration NL3 (provenant de Arduin)

### 3.2 Obtention des champs de houle WAVEWATCH III

Pour chaque point de la grille (distance, direction, temps) du champ de houle synthétique et pour chaque partition  $n$  du modèle WW3, on calcule la distance  $D^n$  qui caractérise la différence entre la période de pic et la direction de pic du champ de houle synthétique ( $T_p^{syn}$  et  $\theta_p^{syn}$ ) et les périodes de pic et directions de pic des différentes partitions du modèle WW3 ( $T_p^n$  et  $\theta_p^n$ ). La partition  $m$  pour laquelle cette distance est minimale est alors choisie pour déterminer la hauteur significative du champ de houle WW3 ( $H_S^m$ ). Après avoir sélectionné une partition pour chaque point de la grille (distance, direction, temps) et avoir reconstruit la hauteur significative pour chacun de ces points on peut reconstruire les hauteurs significatives des champs de houle WW3. En retournant en arrière, on pourra également reconstruire les périodes de pic et directions de pic des champs de houle WW3 qui seront bien évidemment très proches de ceux des champs de houle synthétiques puisqu'elles ont été sélectionnées par rapport à celles-ci [Delpey et al, 2010].

$$D^n = T_p^n [ (f_p^n \cos \theta_p^n - f_p^{syn} \cos \theta_p^{syn})^2 + (f_p^n \sin \theta_p^n - f_p^{syn} \sin \theta_p^{syn})^2 ] \quad (3.2)$$

On remarque que dans cette expression le même poids a été donné pour la période et la direction de pic. Cela peut poser problème si on a une très bonne direction de pic qui compense une très mauvaise période de pic. Pour éviter cela, on peut modifier la formulation de  $D^n$  en séparant l'effet de la période et de la direction de pic et en introduisant des coefficients permettant de donner plus de poids soit à la période de pic soit à la direction de pic en fonction de la situation. De cette manière, si la différence dans la période de pic est supérieure à 0,2 on peut alourdir l'effet de la période de pic.

Cependant, si la différence de direction de pic devient trop élevée et que l'on obtient une direction de pic supérieure à  $90^\circ$  il faudra effectuer le processus inverse en donnant plus de poids à la direction de pic.

$$\begin{aligned}
D^n = & C_t \frac{(T_p^{syn} - T_p^n)^2}{T_p^{syn2}} \\
& + C_d (\cos \theta_p^{syn} - \cos \theta_p^n)^2 \\
& + C_d (\sin \theta_p^{syn} - \sin \theta_p^n)^2
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Si la différence dans la période de pic est supérieure à 0,2 on donne plus de poids à la période de pic :

- coefficient de période de pic :  $C_t = 1$
- coefficient de direction de pic :  $C_d = 0,01$

Si la différence de direction de pic est supérieure à  $90^\circ$  on donne plus de poids à la direction de pic :

- coefficient de période de pic :  $C_t = 0,5$
- coefficient de direction de pic :  $C_d = 1$

Données	Champ de houle synthétique $T_p^{syn}$ $\theta_p^{syn}$
	Champs de houle WW3 $T_p^0 \quad T_p^1 \quad T_p^2 \quad T_p^3 \quad T_p^4 \quad T_p^5$ $\theta_p^0 \quad \theta_p^1 \quad \theta_p^2 \quad \theta_p^3 \quad \theta_p^4 \quad \theta_p^5$ $H_S^0 \quad H_S^1 \quad H_S^2 \quad H_S^3 \quad H_S^4 \quad H_S^5$
Choix de la partition	$D^0 = C_t \frac{(T_p^{syn} - T_p^0)^2}{T_p^2} + C_d (\cos \theta_p^{syn} - \cos \theta_p^0)^2 + C_d (\sin \theta_p^{syn} - \sin \theta_p^0)^2$ $D^1 = \dots$ $D^m = \min(D^0, D^1, D^2, D^3, D^4, D^5)$ partition choisie : m
Reconstitution du champ de houle WW3	$H_S^m$

TABLE 3.2 – Construction du champ de houle WW3

### 3.3 Visualisation des champs de houle WAVEWATCH III

On peut maintenant reprendre l'exemple de la tempête du 3 avril 2009 et visualiser l'évolution au cours du temps des périodes de pic et directions de pic des champs de houle WW3 NL1 et NL3 afin de les comparer à ceux du champ de houle synthétique et vérifier

si le modèle WW3 est bien paramétré (figure 3.2 et 3.3). Finalement, on pourra également s'intéresser à l'évolution au cours du temps des hauteurs significatives des champs de houle WW3 NL1 et NL3 et les comparer à ceux du champ de houle synthétique (figure 3.4).

Les périodes de pic observées pour la tempête du 3 avril 2009 vont de 0 à 16 secondes, la valeur extrême des périodes de pic d'un champ de houle étant d'environ 30 secondes. Dans le cas de la tempête du 3 avril 2009, on peut également suivre l'évolution de ces périodes de pic en fonction du temps et observer le caractère dispersif des champs de houle. On voit en effet que pour un point d'observation fixe, on observera en premier lieu des périodes de pic élevées puis des périodes de pic plus faibles. En comparant les périodes de pic obtenues pour le champ de houle synthétique et WW3 NL1 et NL3 on observe également que les périodes de pic sont très proches pour les trois champs de houle et que les champs de houle WW3 prennent donc bien en compte la période de pic dans le modèle.

Les directions de pic observées pour la tempête du 3 avril 2009 vont elles de  $-50^\circ$  à  $100^\circ$ . En comparant les directions de pic des différents champs de houle on observe alors que les directions de pic du champ de houle synthétique sont très proches de celles du champ de houle WW3 NL1 alors que celles du champ de houle WW3 NL3 sont très différentes et nécessitent une nouvelle graduation. Cela confirme alors ce que l'on a observé dans les spectres directionnels où l'on a déjà vu que les directions de pic modélisées par la configuration NL3 étaient beaucoup plus étroites que celles du champ de houle synthétique et celles modélisées par la configuration NL1. On peut ainsi dire que la configuration NL1 du modèle WW3 prend bien en compte les directions de pic alors que la configuration NL3 ne prend elle pas en compte ces directions de pic car elles sont beaucoup plus étroites. Cela va alors avoir un impact sur les hauteurs significatives qui nous intéressent tout particulièrement.

Les hauteurs significatives obtenues pour la tempête du 3 avril 2009 s'étendent alors de 0 à 3 mètres ce qui est relativement faible par rapport à d'autres champs de houle où elles peuvent atteindre 20 mètres. En comparant les champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 on observe que les champs de houle provenant du modèle WW3 estiment des hauteurs significatives beaucoup plus élevées que celles du champ de houle synthétique et que cela est d'autant plus important que l'on est proche de la tempête. L'effet des directions de pic est également visible dans le cas du champ de houle WW3 NL3 où l'on voit que les hauteurs significatives sont plus élevées à l'ouest alors que celles des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 sont plus élevées à l'est. L'énergie a donc été envoyée dans une autre direction ce qui rend la configuration NL3 du modèle WW3 moins robuste par rapport à la configuration NL1.

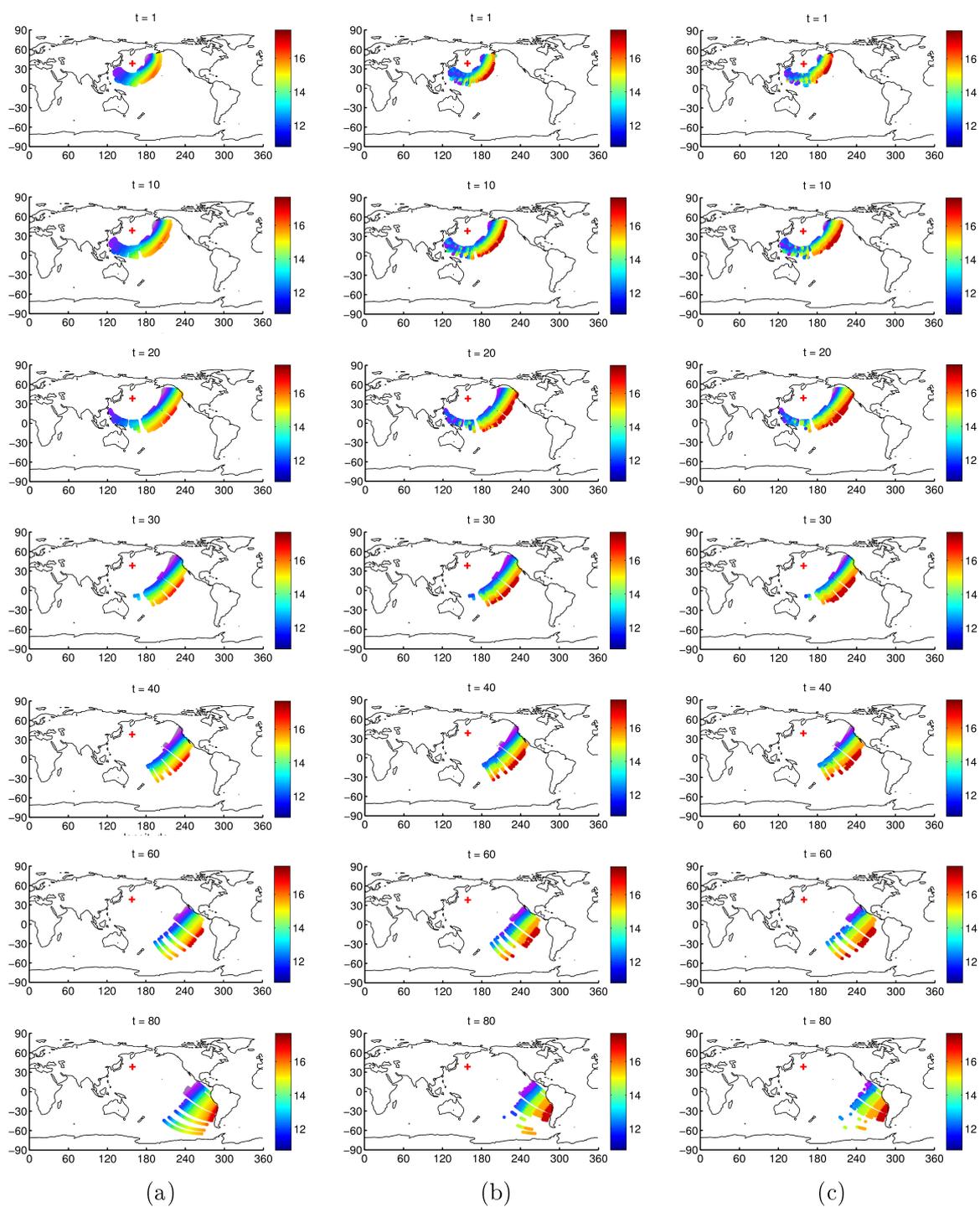


FIGURE 3.2 – Périodes de pic pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

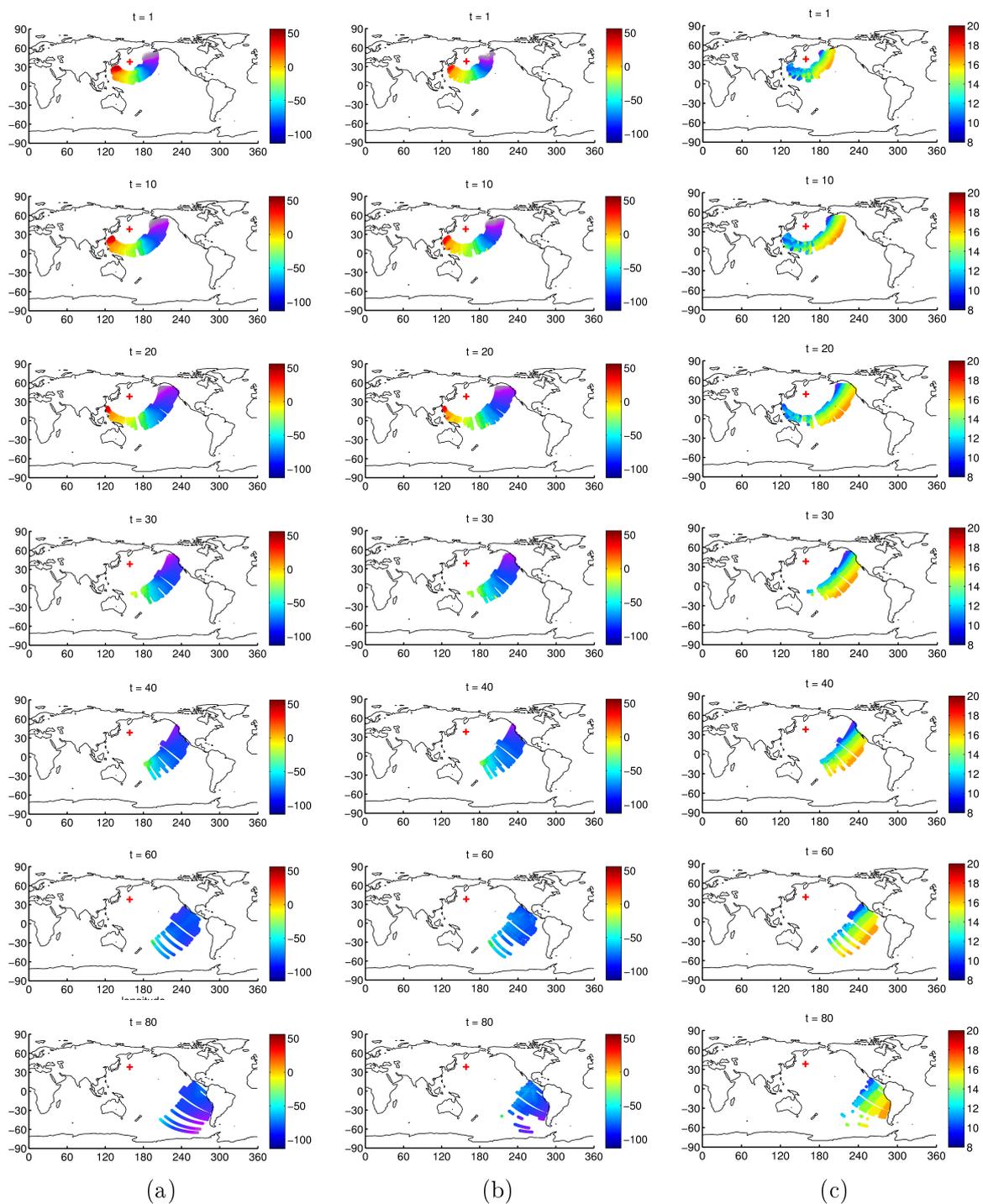


FIGURE 3.3 – Directions de pic pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

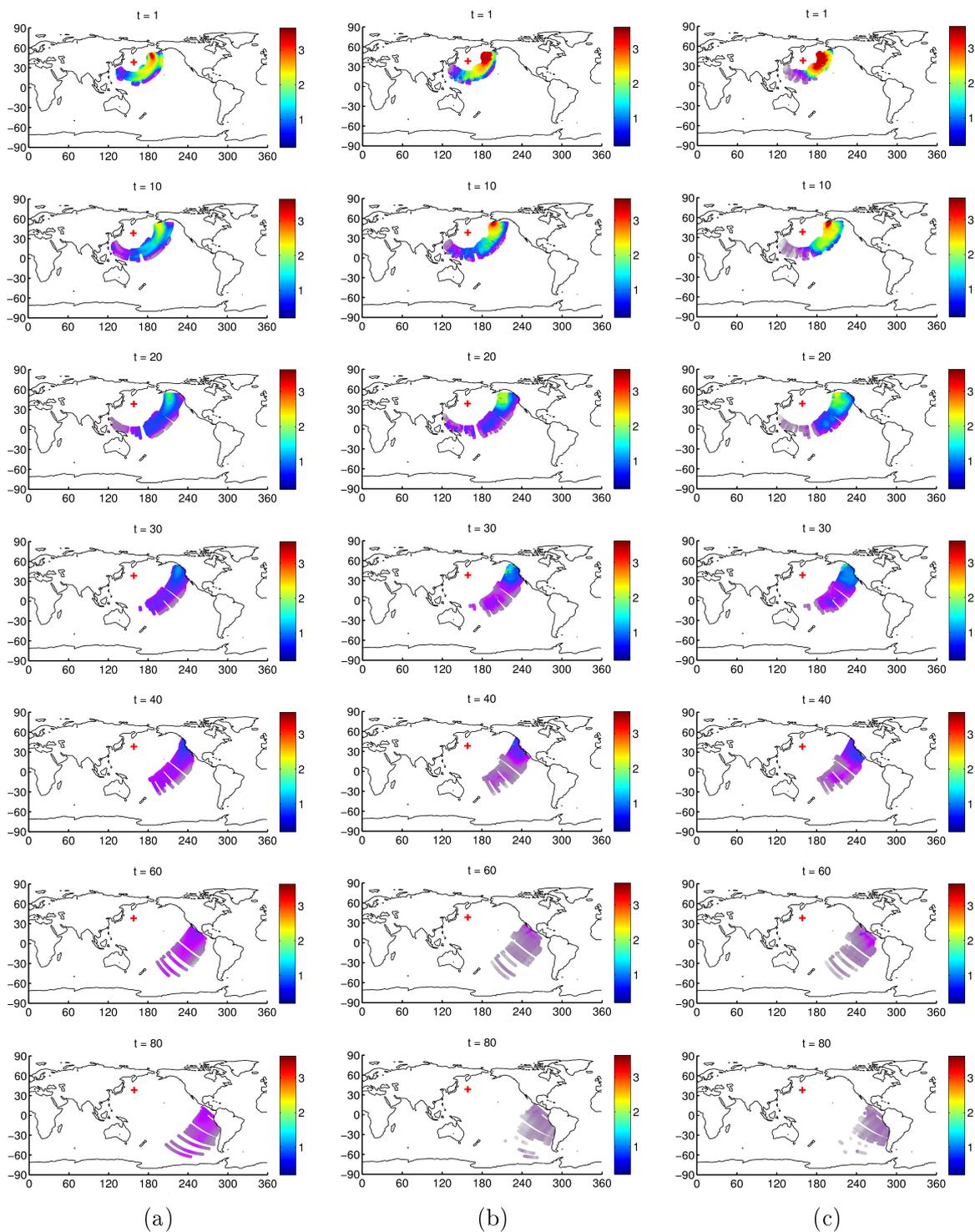


FIGURE 3.4 – Hauteurs significatives pour la tempête du 3 avril 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

En regardant de plus près on observe alors que sur la grille (distance,direction,temps) les observations des champs de houle WW3 sont affectées par des bourrelets qui ne sont pas visibles sur les observations du champ de houle synthétique. Ces bourrelets, espacés toutes les 5 directions environ, sont probablement dus à un artefact du modèle numérique qui représente l'énergie en fonction de la fréquence et de la direction en induisant un déplacement en distance de la composante spectrale et en amenant ainsi l'énergie ailleurs avec un maximum d'énergie tous les 20°. Pour voir cet artefact, on peut reprendre l'exemple de la tempête vue plus haut et cela dans le cas de la visualisation de la période de pic pour le champ de houle synthétique et WW3 NL1 (figure 3.5 et 3.6).

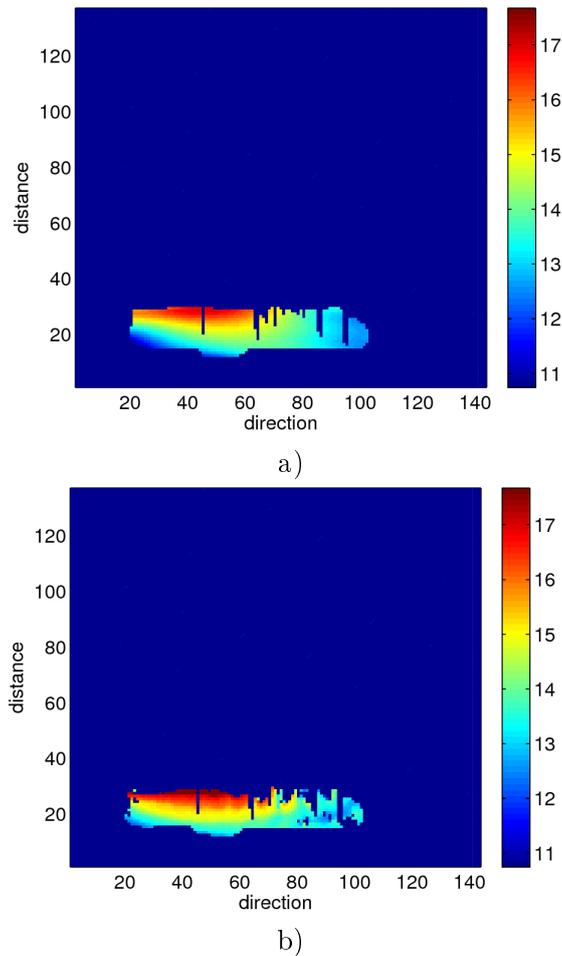


FIGURE 3.5 – Période de pic pour la tempête du 3 avril 2009 au temps  $t = 1$  a) Champ de houle synthétique b) Champ de houle WW3 NL1

## Deuxième partie

# Caractérisation des champs de houle

## Chapitre 4

# Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction et de la distance

### 4.1 Gestion de la dimension du temps

Pour représenter l'évolution de la hauteur significative en fonction de la direction et de la distance il a fallu supprimer la dimension du temps en passant d'une grille (distance,direction,temps) de trois dimensions à une grille (distance,direction) de deux dimensions. Deux méthodes distinctes ont alors été mise au point.

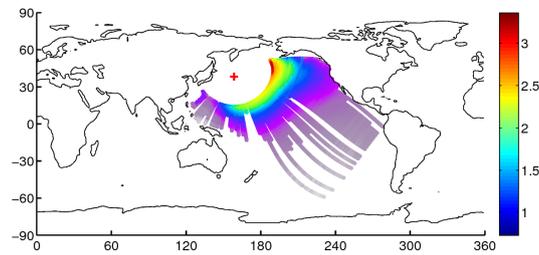
**Méthode 1** Dans la première méthode, on décide de prendre pour chaque point de la grille (distance,direction) la hauteur significative moyennée sur le temps. Pour éviter de prendre en compte des valeurs de hauteur significative peu pertinentes, on choisira de ne conserver que les hauteurs significatives moyennes pour lesquelles il y a au moins 5 valeurs de hauteur significative au cours du temps.

**Méthode 2** La deuxième méthode prend en compte le caractère dispersif de la houle et résout le problème de la dimension du temps en sélectionnant un temps pour chaque point de la grille (distance,direction) en appliquant la théorie d'Airy dans le cas d'une eau profonde et avec une période de pic dominante  $T_p^{dominant}$  correspondant à la moyenne de la période sur toute la grille (distance,direction,temps). On obtient ainsi le temps qui nous intéresse, celui ci dépendant de la distance sphérique  $\alpha$  qui prend donc en compte les coordonnées de la source et du récepteur, le récepteur étant l'ensemble des points de la grille (distance,direction). Par la suite seule cette méthode sera utilisée car elle présente l'avantage de prendre en compte le caractère dispersif de la houle.

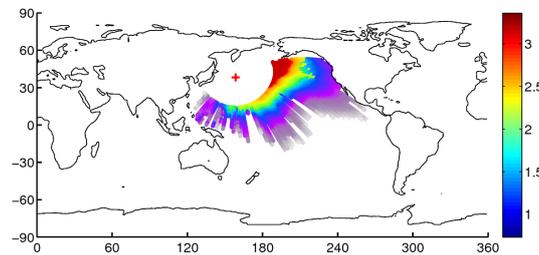
$$C_{groupe} = \frac{R\alpha}{t_R - t_S} = \frac{g}{4\pi f} \quad (4.1)$$

$$t_R = \frac{4\pi R\alpha}{g T_p^{dominant}} + t_S \quad (4.2)$$

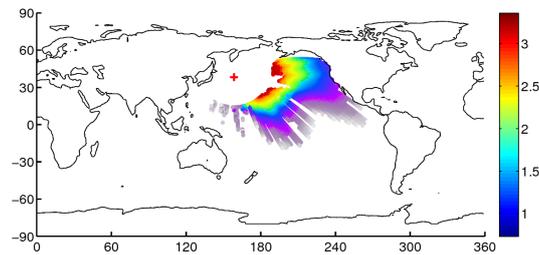
En reprenant l'exemple de la tempête du 3 avril 2009 on obtient ainsi, suite à l'application de la méthode 2, les hauteurs significatives des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 après avoir supprimé la dimension du temps (figure 4.1). On observe les mêmes choses que ce que l'on a observé lorsque l'on a suivi l'évolution des hauteurs significatives au cours du temps c'est à dire des hauteurs significatives beaucoup plus élevées dans le cas des champs de houle WW3 surtout pour des localisations proches de la source de la tempête et une répartition des hauteurs significatives pour le champ de houle WW3 NL3 bien différente de celle des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 avec une répartition des hauteurs significatives plus centré et dirigée vers l'ouest. Ces dernières remarques sont d'autant plus visibles dans le cas de la tempête du 3 février 2009 présenté en annexe A.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.1 – Hauteurs significatives pour la tempête du 3 avril 2009 (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

## 4.2 Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction

L'objectif est ici de suivre l'évolution de la hauteur significative des champs de houle synthétiques et WW3 dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de ces champs de houle, en suivant donc un géodésique. Dans le cas de la grille (distance,direction) il faut donc fixer la distance et faire varier la direction. De cette manière, on pourra représenter l'évolution des hauteurs significatives des champs de houle synthétiques et WW3 en fonction de la direction et cela pour toutes les distances pour lesquelles il y a plus de  $n$  points de mesure,  $n$  pouvant être modifié en fonction du nombre de distance que l'on souhaite visualiser. Cela devrait alors permettre de caractériser la largeur des champs de houle (figure 4.2).

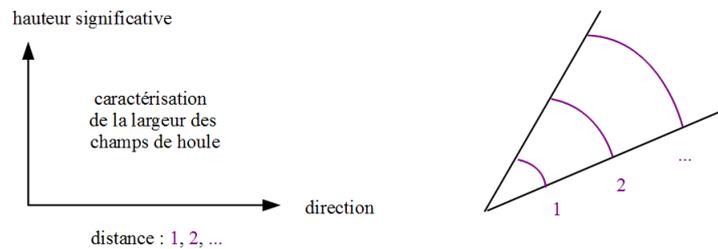


FIGURE 4.2 – Evolution de la hauteur significative le long d'une direction

Dans le cas de la tempête du 3 avril 2009, les résultats sont présentés dans la figure 4.3 avec en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3. On y observe que les hauteurs significatives du champ de houle WW3 NL3 sont supérieures à celles du champ de houle WW3 NL1 qui sont elles mêmes supérieures à celles du champ de houle synthétique et que ces différences dans les hauteurs significatives diminuent lorsque les distances augmentent. En plus de cela, on observe que les hauteurs significatives du champ de houle synthétique et WW3 NL1 suivent une même tendance en diminuant tout au long de la direction alors que le champ de houle WW3 NL3 suit lui une croissance puis une décroissance. Toutes ces observations confirment alors les observations faites sur les champs de houle établis en appliquant la méthode 2 qui suppriment la dimension du temps. L'exemple de la tempête du 3 février vu en annexe A met alors en avant ces remarques de manière encore plus nette.

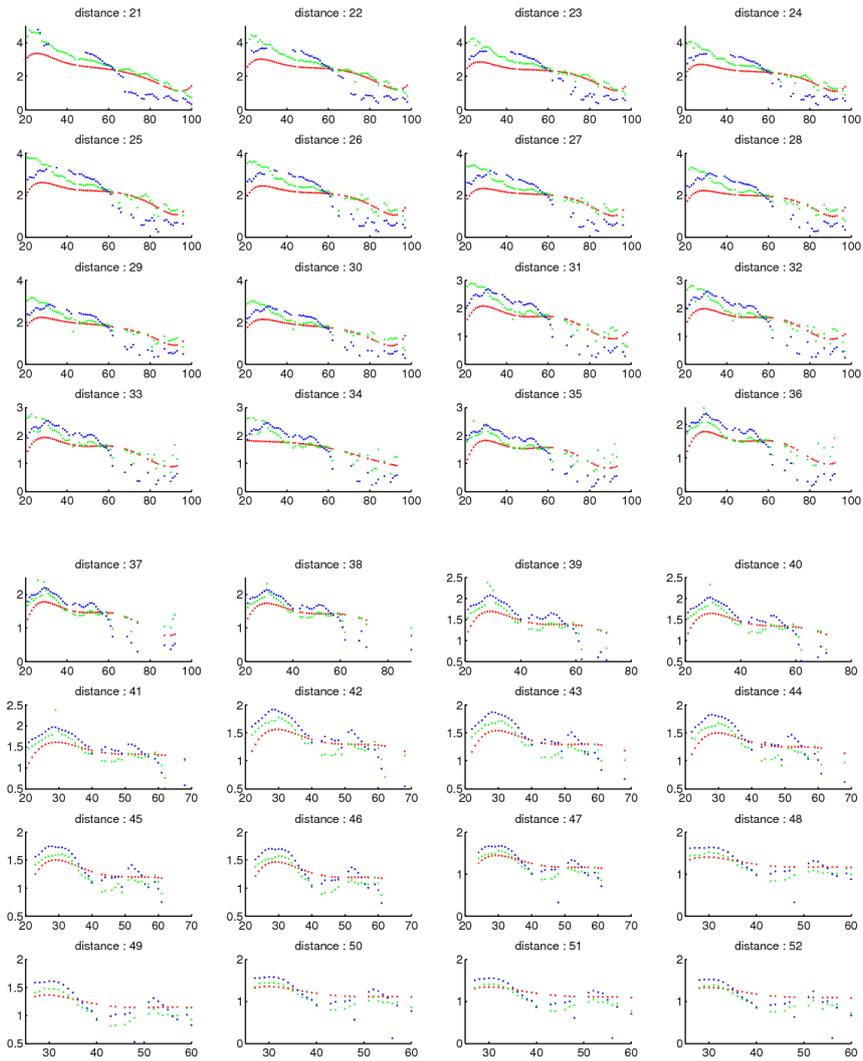


FIGURE 4.3 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction pour la tempête du 3 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3)

### 4.3 Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance

Après avoir suivi l'évolution de la hauteur significative des champs de houle synthétiques et WW3 dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation on veut maintenant suivre leur évolution dans la direction de propagation. Pour cela, il faudra donc cette fois ci fixer la direction et faire varier la distance dans le cas de la grille (dis-

tance,direction). Comme dans le cas précédent, on pourra alors représenter l'évolution des hauteurs significatives des champs de houle synthétiques et WW3 en fonction de la distance et cela pour toutes les directions pour lesquelles il y a plus de n points de mesure. Cela devrait alors permettre de caractériser la dissipation des champs de houle en comparant la décroissance de la hauteur significative des champs de houle synthétiques et WW3 avec celle obtenue dans l'hypothèse de la conservation de l'énergie qui considère une absence de dissipation avec une énergie de la houle qui décroît asymptotiquement comme  $1/\alpha \sin \alpha$ . Dans le cas précis de l'absence de dissipation, la diminution de la hauteur significative avec la distance à la source s'explique alors uniquement par la combinaison de la dispersion (étalement dans la direction de propagation de la houle) et de l'étalement angulaire (étalement dans la direction orthogonale à la direction de propagation de la houle) (figure 4.3) [Ardhuin et al,2009].



FIGURE 4.4 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance

Dans le cas de la tempête du 3 avril 2009, les résultats sont présentés dans la figure 4.4 et on y trouve, comme dans le cas de la représentation de la hauteur significative en fonction de la direction, en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3 à quoi s'ajoute alors en jaune le champ de houle sans dissipation. En suivant l'évolution des hauteurs significatives en fonction de la distance on remarque alors que pour des distances faibles les hauteurs significatives du champ de houle WW3 NL3 sont supérieures à celles du champ de houle WW3 NL1 elles mêmes supérieures à celles du champ de houle synthétique et que cela s'inverse pour des distances élevées. La distance pour laquelle les hauteurs significatives des trois champs de houle sont égales varie alors de 40 à 60. On remarque également que ces observations ne sont vrais que pour des directions élevées, les directions faibles présentent elles des différences de hauteurs significatives beaucoup trop élevées pour se recouper.

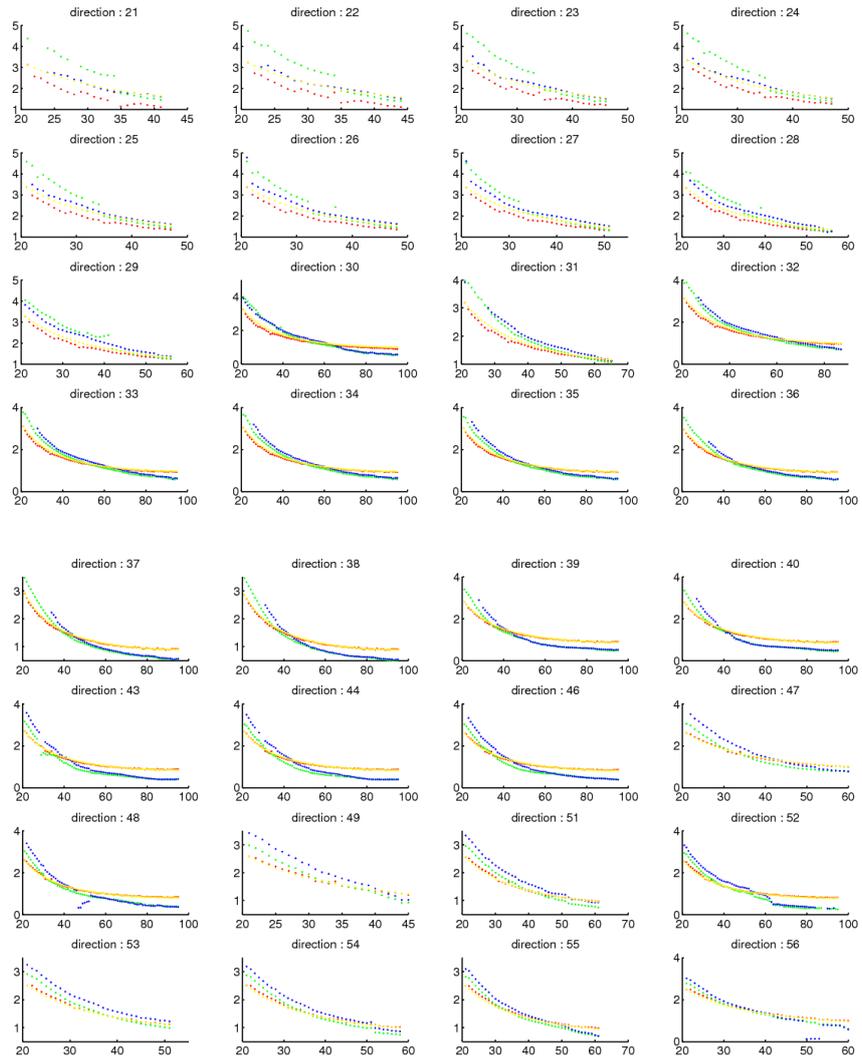


FIGURE 4.5 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance pour la tempête du 3 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1, en bleu le champ de houle WW3 NL3 et en jaune le champ de houle sans dissipation)

# Chapitre 5

## Validation par les bouées

### 5.1 Principe des bouées

Les bouées fournissent des données in-situ robustes permettant de connaître la hauteur significative d'un champ de houle en un point donné de l'océan et de valider de manière ponctuelle l'évolution des hauteurs significatives des champs de houle synthétiques et WW3 représentée en fonction de la direction et de la distance. Les deux conditions nécessaires à l'utilisation des données d'une bouée :

- la bouée doit être localisée dans la zone où le champ de houle se propage
- la bouée doit être en état de fonctionnement au moment même où le champ de houle se propage au niveau de la bouée

associées au faible nombre de bouées localisées loin des côtes ont alors tendance à réduire le nombre de bouées disponibles pour valider l'évolution des champs de houle synthétiques et WW3.

Le principe des bouées se base sur l'enregistrement des déplacements à partir d'un accéléromètre placé sur la bouée :

- les déplacements verticaux donnent une information sur l'élévation de la surface et permettent d'aboutir au spectre en fréquence
- les déplacements horizontaux donnent une information sur la direction des vagues et permettent d'aboutir au spectre directionnel

Les enregistrements sont alors transmis par radio pour qu'ils puissent être consultés en temps réel.

Les bouées utilisées pour les champs de houle se propageant dans l'Océan Pacifique sont les bouées 46013 et 46050 appartenant toutes les deux au NDBC (National Data Buoy Center) et se situant également toutes les deux sur la côte ouest des Etats-Unis. Dans le cas de la tempête du 3 avril 2009, seule la bouée 46050 nous intéresse, sa localisation précise sur la côte de l'Oregon ainsi que sa photo sont alors présentées dans la figure 5.1.

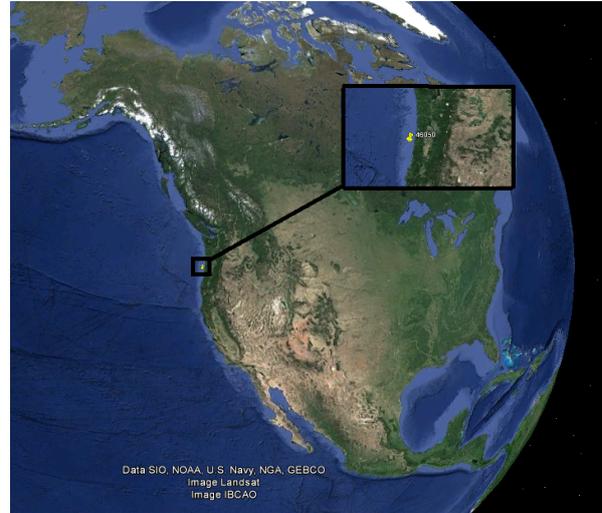


FIGURE 5.1 – Bouée 46050 (provenant du NDBC : [www.ndbc.noaa.gov/](http://www.ndbc.noaa.gov/))

## 5.2 Obtention des hauteurs significatives

Pour obtenir la hauteur significative à partir des données d'une bouée, cinq étapes sont nécessaires :

Etape 1 : Sélection du point le plus proche de la bouée et concerné par le champ de houle synthétique

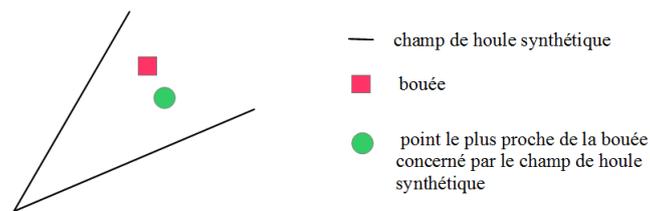


FIGURE 5.2 – Etape 1 : bouée

Etape 2 : Calcul du temps  $t_{synthetique}$  correspondant au point sélectionné et cela à partir de la méthode 2 vue dans le chapitre concernant la gestion de la dimension du temps

Etape 3 : Calcul de la fréquence minimale  $f_{min}$  et maximale  $f_{max}$  à partir du point sélectionné sur le champ de houle synthétique

Etape 4 : Représentation de la densité spectrale  $Ef$  de la bouée en fonction de la fréquence  $f$  pour le temps  $t_{bouee}$  au plus proche du temps  $t_{synthetique}$ , le spectre en fréquence de l'observation étant en bleu et celui du modèle étant en rouge

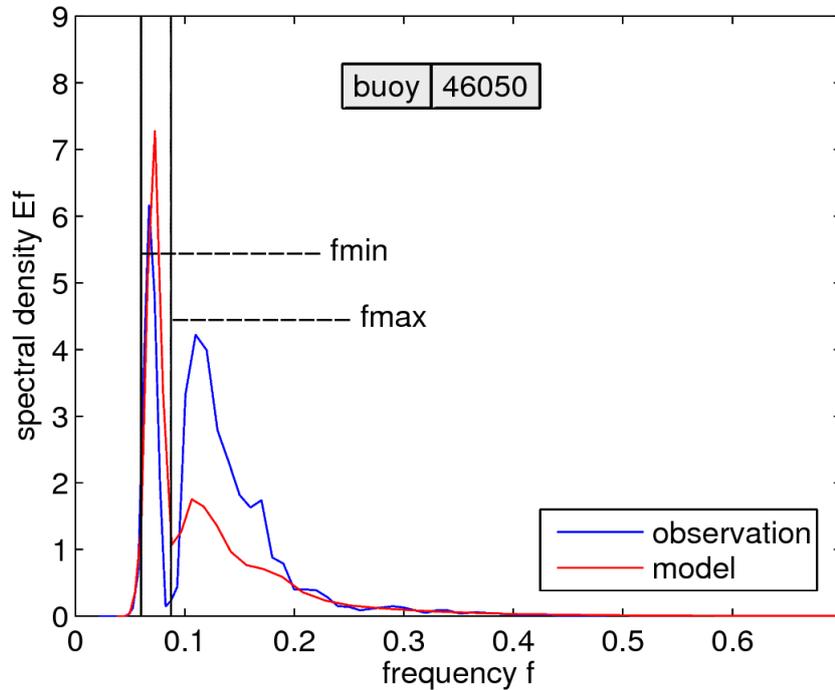


FIGURE 5.3 – Etape 4 : bouée (tempête du 3 avril 2009)

Etape 5 : Calcul de la hauteur significative  $H_S$  à partir de la déviation standard  $Z$  obtenue en intégrant la densité spectrale  $Ef$  de la bouée de  $f_{min}$  à  $f_{max}$

$$H_S = 4 Z \quad (5.1)$$

$$= 4 \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} Ef(f) df} \quad (5.2)$$

Résultats :

- observation :  $H_S = 1,14$  m
- modèle :  $H_S = 1,36$  m

On peut également déterminer la fréquence minimale  $f_{min}$  et maximale  $f_{max}$  à partir des spectres en fréquence d'observation et de modèle en sélectionnant manuellement les bornes du pic correspondant au système de vagues du champ de houle observé.

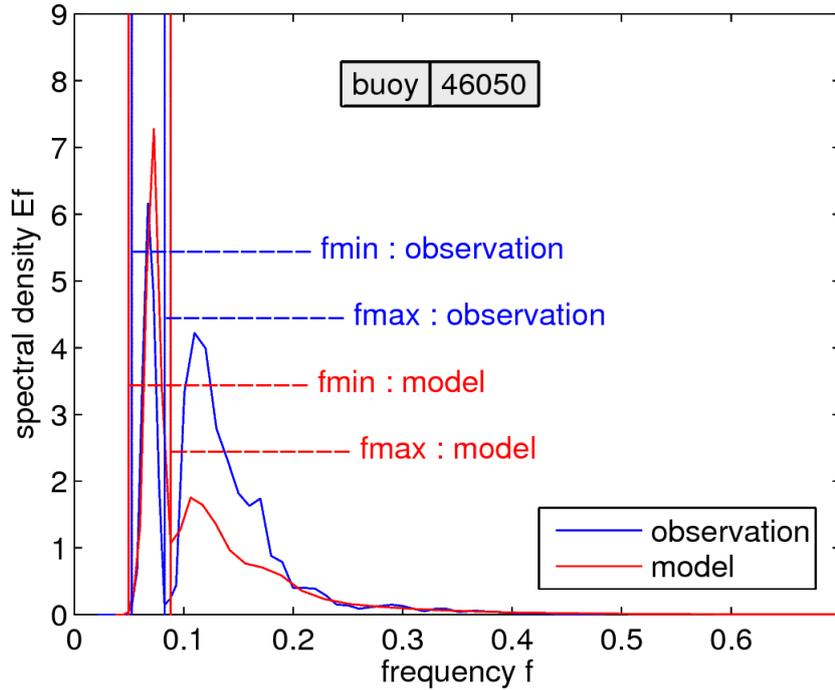


FIGURE 5.4 – Bouée avec sélection manuelle de  $f_{min}$  et  $f_{max}$  (tempête du 3 avril 2009)

Résultats :

- observation :  $H_S = 1,18$  m
- modèle :  $H_S = 1,40$  m

### 5.3 Précision des mesures

Deux types d'erreurs sont introduites par les mesures effectuées par les bouées. La première erreur est celle introduite par la physique de la mesure, elle est donc indépendante de la localisation et du moment où la mesure a été effectuée et son ordre de grandeur est fixe et ne représente que quelques pourcents. La deuxième erreur est elle liée à la statistique, elle est donc d'autant plus élevée que le nombre de vague mesuré durant les 20 minutes de temps de mesure est faible. Cette erreur varie donc en fonction de la localisation et du moment où la mesure a été effectuée et son ordre de grandeur se trouve généralement entre 5 et 10% dans le cas des champs de houle se propageant dans le Pacifique. La superposition de ces deux types d'erreurs donne alors une erreur liée aux mesures de la bouée de l'ordre de 10%. A cette erreur liée aux mesures effectuées par les bouées s'ajoute alors encore l'erreur due au calcul de la hauteur significative qui est en lien avec les valeurs  $f_{min}$  et  $f_{max}$  parfois difficile à déterminer car le système de vagues correspondant à la houle ne se présente pas toujours sous la forme de pic sur le spectre

en fréquence.

Résultats :

- détermination automatique de  $f_{min}$  et  $f_{max}$ 
  - observation :  $H_S = 1,14 \pm 0,1$  m
  - modèle :  $H_S = 1,36 \pm 0,1$  m
- détermination manuelle de  $f_{min}$  et  $f_{max}$ 
  - observation :  $H_S = 1,18 \pm 0,1$  m
  - modèle :  $H_S = 1,40 \pm 0,1$  m

# Chapitre 6

## Validation par les stations sismiques

### 6.1 Principe des stations sismiques

Les stations sismiques sont également de bons outils pour la validation des champs de houle synthétiques et WW3. On s'est en effet rendu compte que le bruit microsismique enregistré grâce aux sismographes large bandes était en lien avec l'activité océanique et que les déplacements verticaux de l'ordre du micromètre responsables de ce bruit étaient dus à des variations de pression provoquées par l'interaction de vagues de même période et se propageant dans des directions opposées[Husson et al,2012].

Une classification des mécanismes de production du bruit microsismique a alors été établie [Ardhuin et al,2011]. On y retrouve trois grandes classes de génération de bruit sismique correspondant chacune à un mécanisme de génération particulier (figure 6.1) :

- classe I : interaction de deux vagues de la mer du vent générées par une même tempête "turning winds"
- classe II : interaction de deux vagues de la houle générées par une même tempête avec une vague provenant du large et une vague réfléchiée par un obstacle (obstacle de type A pour les continents et les grandes îles, de type B pour les petites îles et de type C pour les icebergs)
- classe III : interaction d'une vague de la houle et d'une vague de la mer du vent ou de deux vagues de la houle
  - a) générées par une même tempête "turning winds"
  - b) générées par deux tempêtes distinctes

Dans le cas particulier des "turning winds" la limite entre la classe I et III a) devient minime car une vague de la mer du vent peut devenir une houle et interagir avec une nouvelle vague de la mer du vent provenant de la même tempête.

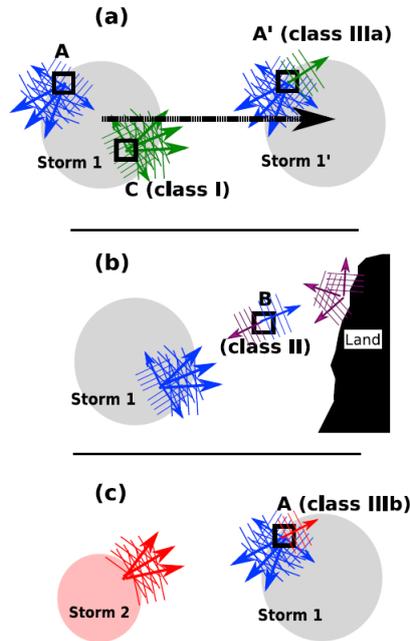


FIGURE 6.1 – Classification des mécanismes de production du bruit microsismique (figure provenant de [Arduin et al,2011])

Le mécanisme de classe I est souvent responsable du bruit microsismique primaire généré par des ondes de Rayleigh et caractérisé par une fréquence allant de 0.04 à 0.08 Hz égale à la fréquence de la vague ( $\text{fréquence}(\text{bruit sismique}) = \text{fréquence}(\text{vague})$ ). Ce bruit est généralement peu énergétique et se limite aux régions côtières où l'on retrouve une topographie pentue et peu profonde. Les mécanismes de classe II et III, plus énergétiques et présents sur tout l'océan, sont eux généralement responsable du bruit microsismique secondaire caractérisé par une fréquence allant de 0,08 à 0,35 Hz égale au double de la fréquence de la vague ( $\text{fréquence}(\text{bruit sismique}) = 2 \text{ fréquence}(\text{vague})$ ). Dans cette catégorie du bruit microsismique secondaire on peut alors distinguer les basses fréquences générées par des ondes de Rayleigh et correspondant au mécanisme de classe II des hautes fréquences générées par des ondes P et correspondant au mécanisme de classe III.

Une variation saisonnière dans la distribution des mécanismes de génération a ensuite été observée avec une prédominance de mécanisme de classe I en été et une prédominance de mécanisme de classe II en hiver. Les mécanismes de classe II étant principalement dus à la réflexion des vagues sur les côtes on peut alors expliquer leur faible présence en été par l'existence de vents d'été qui soufflent le long de la côte et qui créent donc des champs de houle se propageant également le long de la côte empêchant ainsi toute réflexion. Les vents d'hiver soufflant eux avec une différence de 20 à 30 ° par rapport aux vents d'été, on peut alors penser qu'il y aura plus de réflexion sur les côtes et donc plus de mécanisme

de classe II en hiver. Les mécanismes de classe III sont eux peu présents et cela quelque soit la période de l'année. Il est en effet très peu probable d'observer simultanément deux tempêtes correspondant aux critères des vagues que l'on a sélectionné, c'est à dire avec des périodes élevées correspondant à de fortes tempêtes. La sélection des vagues à période élevée a ici été réalisée afin de faciliter la discrimination des sources, chaque station sismique enregistrant beaucoup de sources [Ardhuin et al,2012].

Comme dans le cas des bouées, les stations sismiques doivent se situer à l'endroit même où le champ de houle se propage et enregistrer des données à la période où le champ de houle se propage au niveau de la station sismique. La nécessité d'associer à chaque station sismique une bouée proche permettant de calibrer la station sismique diminue alors encore un peu plus le nombre de stations sismiques disponibles pour valider l'évolution des champs de houle synthétiques et WW3.

Les stations sismiques qui nous intéressent dans le cas des tempêtes se propageant dans le Pacifique et plus particulièrement dans le cas de la tempête du 3 avril 2009 sont les stations BKS du BDSN (Berkeley Digital Seismic Network) et COR du GSN (Global Seismographic Network) se situant toutes les deux sur la côte ouest des Etats-Unis. Leurs localisations précises ainsi que leurs photos sont présentées dans les figures 6.2 et 6.3.

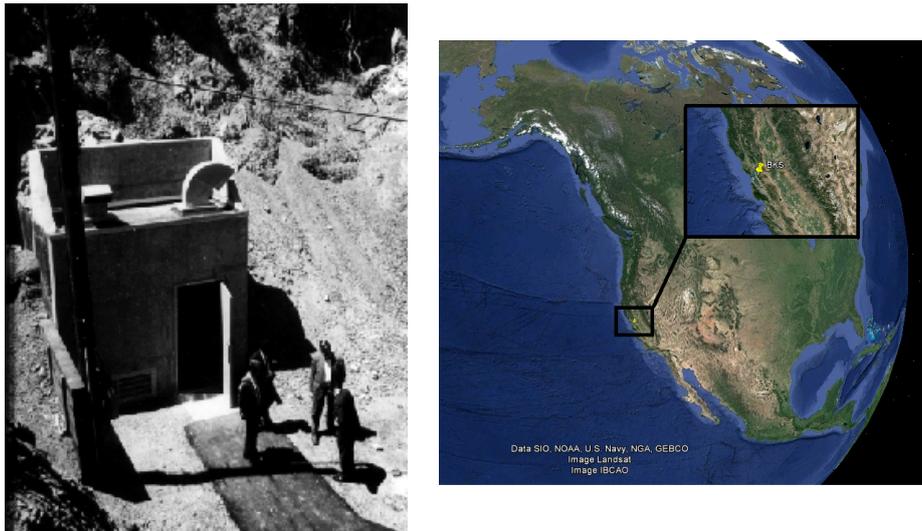


FIGURE 6.2 – Station sismique BKS (provenant du BDSN : <http://seismo.berkeley.edu/>)



FIGURE 6.3 – Station sismique COR (provenant du USGS : <http://earthquake.usgs.gov/>)

## 6.2 Obtention des hauteurs significatives

Pour obtenir la hauteur significative à partir des données d'une station sismique, sept étapes sont nécessaires.

Etape 1 : Sélection du point le plus proche de la station sismique et concerné par le champ de houle synthétique puis sélection de la bouée la plus proche de la station sismique, la bouée 46013 pour la station sismique BKS et la bouée 46050 pour la station sismique COR

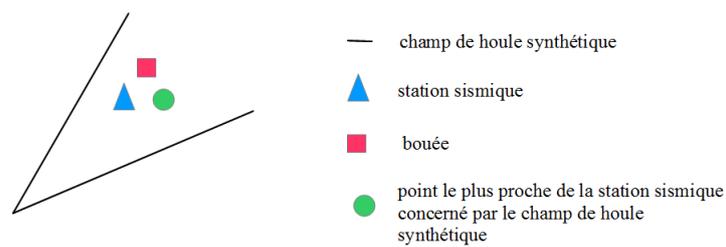


FIGURE 6.4 – Etape 1 : station sismique

Etape 2 : Calcul du temps  $t_{synthetique}$  correspondant au point sélectionné et cela à partir de la méthode 2 vue dans le chapitre concernant la gestion de la dimension du temps

Etape 3 : Calcul de la fréquence minimale  $f_{min}$  et maximale  $f_{max}$  à partir du point sélectionné sur le champ de houle synthétique

Etape 4 : Choix de l'intervalle de temps en fonction de la saison

- cas 1 : janvier - avril (hiver)
- cas 2 : mai - septembre (été)
- cas 3 : octobre - décembre (hiver)

Etape 5 : Choix de l'intervalle de fréquence

- bouée :  $f_{min} < f < f_{max}$
- station sismique :  $2f_{min} < f_s < 2f_{max}$
- $f_s = 2f$

Etape 6 : Représentation de la densité spectrale  $Ef$  de la bouée en fonction de la densité spectrale  $Efs$  de la station sismique pour les intervalles de temps et pour les fréquences vues dans les deux étapes précédentes afin de calculer les coefficients  $a$  et  $b$  correspondant à une puissance tel que  $a * Efs$  puissance  $b$  (les points correspondants aux séismes sont supprimés ainsi que les 10 ou 50 valeurs maximales de la densité spectrale  $Efs$  de la station sismique (cas où le coefficient de détermination est inférieur à 0,7 uniquement) et les 5 ou 15 valeurs maximales de la densité spectrale  $Ef$  de la bouée (toujours dans le cas d'un coefficient de détermination inférieur à 0,7))

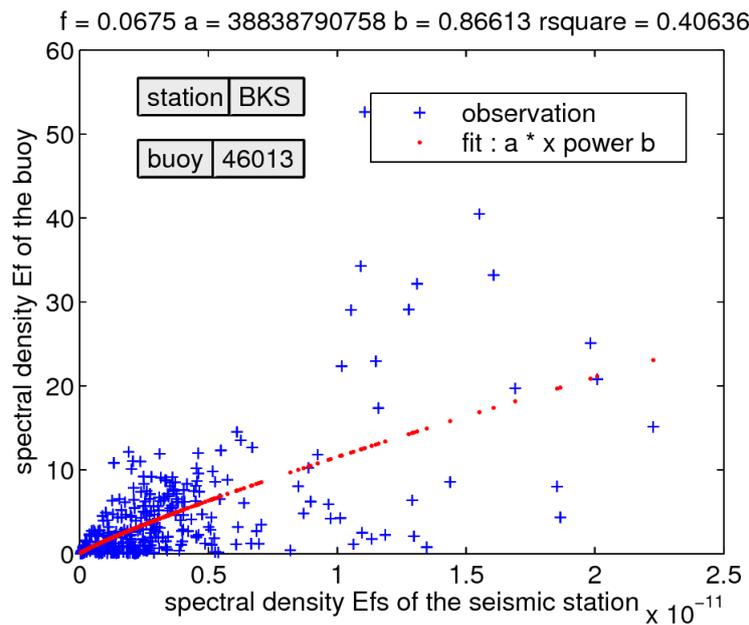


FIGURE 6.5 – Etape 6 : station sismique BKS (tempête du 3 avril 2009)

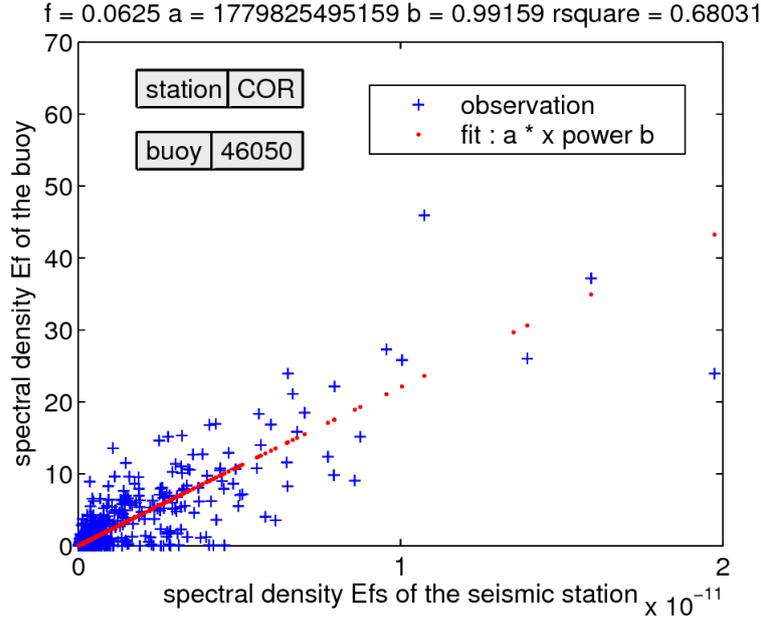


FIGURE 6.6 – Etape 6 : station sismique COR (tempête du 3 avril 2009)

Etape 7 : Calcul de la hauteur significative  $H_S$  à partir de la déviation standard  $Z$  obtenue en intégrant la densité spectrale de la station sismique  $Efs$  de  $f_{min}$  à  $f_{max}$  et en introduisant les coefficients  $a$  et  $b$ , tout cela pour le temps  $t_{station}$  au plus proche du temps  $t_{synthétique}$

$$H_S = 4 Z \quad (6.1)$$

$$= 4 \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} a(f) Efs(f_s)^{b(f)} df} \quad (6.2)$$

Résultats :

- BKS :  $H_S = 1,16$  m
- COR :  $H_S = 1,39$  m

### 6.3 Précision des mesures

L'erreur introduite par les mesures effectuées par les stations sismiques provient à la fois de la physique de la mesure et de la calibration de la station sismique par rapport à la bouée la plus proche. L'erreur introduite par la calibration est alors d'autant plus importante que la bouée avec laquelle on a effectué cette calibration est loin de la station sismique. Cela se ressent alors sur la valeur du coefficient de détermination rsquare qui, plus il sera proche de 1 plus il permettra de déterminer une équation de régression décrivant correctement les points obtenus par les données. On remarque alors que la station

sismique COR est beaucoup mieux calibré que la station sismique BKS car son coefficient de détermination est plus proche de 1. En plus de cette erreur introduite par les mesures effectuées par la station sismique on retrouve également, comme dans le cas de la bouée, l'erreur introduite par la définition de  $f_{min}$  et  $f_{max}$ . De cette manière, on pourra considérer que l'erreur sur les hauteurs significatives établies à partir d'une station sismique est de l'ordre de 10% comme dans le cas des bouées.

Résultats :

- BKS :  $H_S = 1,16 \pm 0,1$  m
- COR :  $H_S = 1.39 \pm 0,1$  m

## Chapitre 7

# Validation des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 par les bouées et les stations sismiques

On peut maintenant valider les champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 en plaçant les hauteurs significatives ponctuelles obtenues avec les bouées et les stations sismiques sur les représentations de l'évolution de la hauteur significative en fonction de la direction et de la distance. Dans le cas de la tempête du 3 avril 2009, la légende est alors présentée dans la figure 7.1 et les résultats dans la figure 7.2. On y observe que les hauteurs significatives fournies par les stations sismiques sont plus proches des hauteurs significatives observées avec le champ de houle synthétique que de celles observées avec les champs de houle WW3 NL1 et surtout NL3. L'exemple de la tempête du 12 avril 2009 présente dans l'annexe B confirme alors cette observation en montrant que la station sismique confirme la validité des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et discrédite le champ de houle WW3 NL3 qui possède des hauteurs significatives bien supérieures à celles des champs de houle synthétiques, WW3 NL1 et de la station sismique. Pour ce qui est des hauteurs significatives fournies par les bouées on observe qu'il n'y a pas une grande différence entre les hauteurs significatives obtenues avec les valeurs de  $f_{min}$  et  $f_{max}$  obtenues automatiquement à partir du champ de houle synthétique et celles obtenues manuellement sur le spectre en fréquence. Par contre, on observe que les hauteurs significatives des modèles sont bien supérieures à celles des observations avec un ordre de grandeur de 20% en plus dans le cas du modèle.

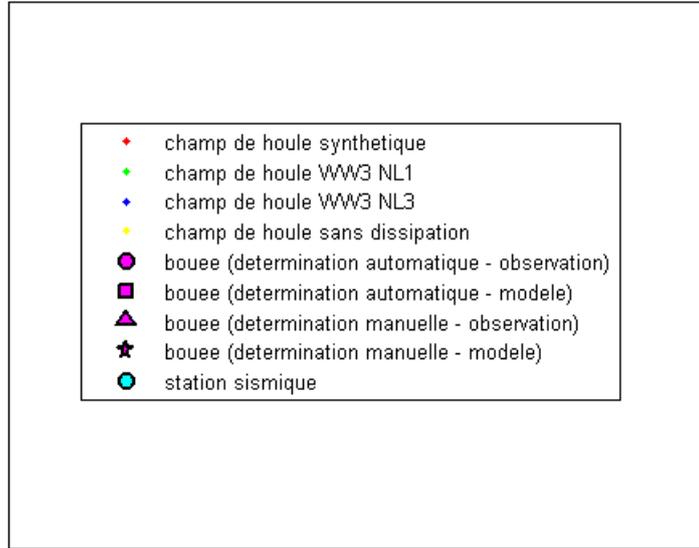


FIGURE 7.1 – Légende

Résultats 1 :

- station sismique BKS :  $H_S = 1,16 \pm 0,1$  m
- champ de houle synthétique :  $H_S = 1,31 \pm 0,2$  m
- champ de houle WW3 NL1 :  $H_S = 1,33 \pm 0,2$  m
- champ de houle WW3 NL3 :  $H_S = 1,50 \pm 0,2$  m
- champ de houle sans dissipation :  $H_S = 1,45 \pm 0,2$  m

Résultats 2 :

- bouée 46050
  - détermination automatique de  $f_{min}$  et  $f_{max}$
  - observation :  $H_S = 1,14 \pm 0,1$  m
  - modèle :  $H_S = 1,36 \pm 0,1$  m
  - détermination manuelle de  $f_{min}$  et  $f_{max}$
  - observation :  $H_S = 1,18 \pm 0,1$  m
  - modèle :  $H_S = 1,40 \pm 0,1$  m
- station sismique COR :  $H_S = 1,39 \pm 0,1$  m
- champ de houle synthétique :  $H_S = 1,26 \pm 0,2$  m
- champ de houle WW3 NL1 :  $H_S = 1,37 \pm 0,2$  m
- champ de houle WW3 NL3 :  $H_S = 1,52 \pm 0,2$  m
- champ de houle sans dissipation :  $H_S = 1,55 \pm 0,2$  m

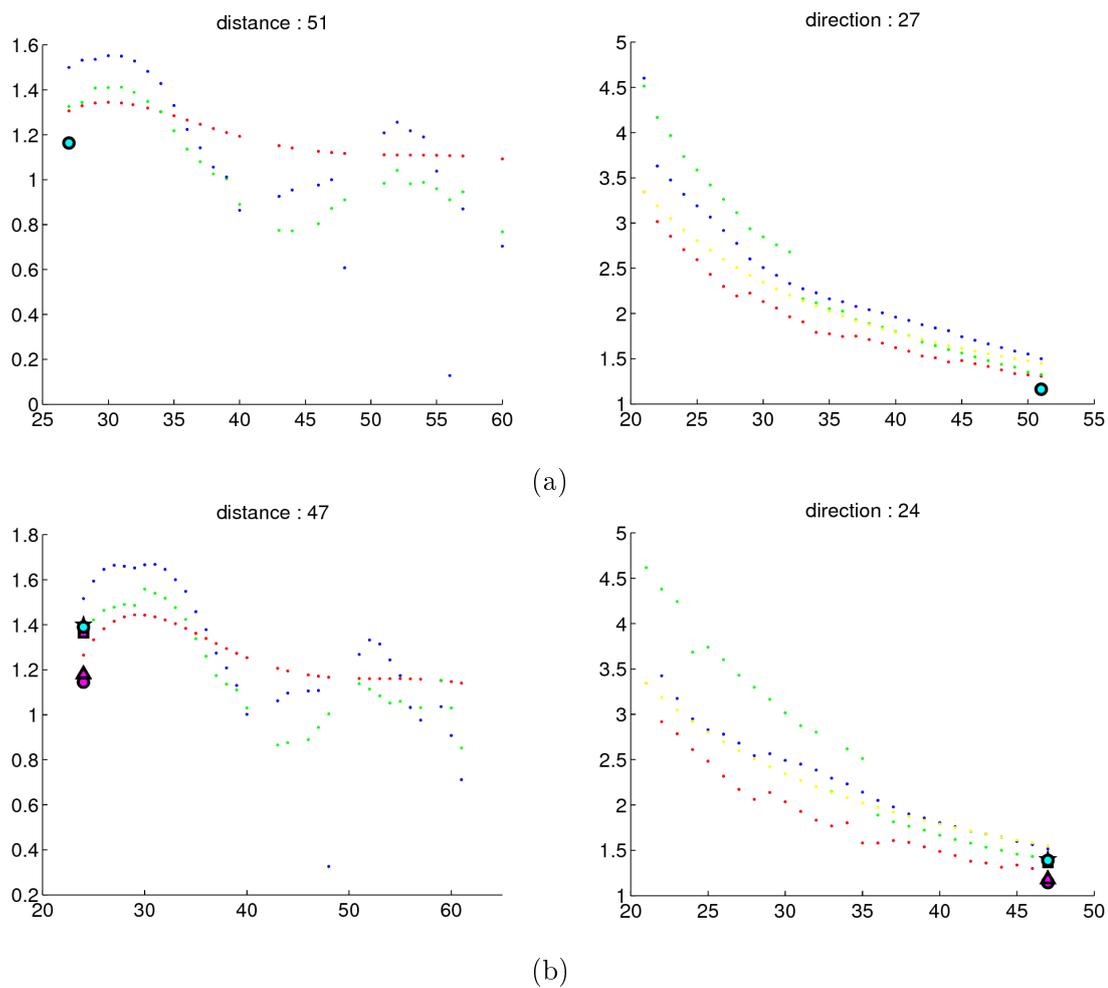


FIGURE 7.2 – Validation des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 par les bouées et les stations sismiques pour la tempête du 3 avril 2009 a) Station sismique BKS b) Bouée 46050 et station sismique COR avec à gauche la représentation en fonction de la direction et à droite la représentation en fonction de la distance

# Conclusion

Les champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 permettent d'avoir une vision globale sur la propagation des champs de houle et de caractériser ces champs de houle en fonction de leur direction et de leur distance. Les résultats montrent alors que la caractérisation des trois champs de houle en fonction de la direction présente plus d'hétérogénéité que celle en fonction de la distance et que les hauteurs significatives des champs de houle WW3 sont supérieures à celles des champs de houle synthétiques surtout pour des localisations proches de la tempête. En différenciant les deux configurations du modèle WW3 on peut également dire que la configuration NL1 donne des hauteurs significatives très proches de celles du champ de houle synthétique et qu'elles sont bien paramétrées grâce aux périodes et directions de pic alors que la configuration NL3 donne elle des hauteurs significatives bien paramétrées par les périodes de pic mais beaucoup moins bien paramétrées par les directions de pic qui sont beaucoup plus étroites que celles des champs de houle synthétiques et qui ont alors tendance à modifier les hauteurs significatives en envoyant l'énergie dans une autre direction et de manière plus étroite que pour les champs de houle synthétiques et WW3 NL1.

Les données fournies par les bouées et les stations sismiques permettent alors de valider ponctuellement ces trois champs de houle et de confirmer le fait que les champs de houle synthétiques et WW3 NL1 sont plus satisfaisants que les champs de houle WW3 NL3, les hauteurs significatives obtenues par les bouées et les stations sismiques étant en effet plus proches de celles des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 que de celles des champs de houle WW3 NL3. Les bouées et les stations sismiques donnent ainsi des informations complémentaires à celles des champs de houle et présentent le grand avantage de provenir d'observations in-situ plus robustes que celles des champs de houle synthétiques qui se basent sur des données satellites complétées théoriquement et que de celles des champs de houle WW3 qui se basent sur un modèle nécessitant de bien connaître la tempête et de définir de manière précise les paramètres physiques de la propagation des champs de houle (configuration NL1 et NL3). Cela se ressent alors sur l'incertitude des mesures qui est de l'ordre de 10% pour les bouées et les stations sismiques et de 20% pour les champs de houle.

L'ensemble de ces données pourraient alors être utilisé pour améliorer le modèle WW3 afin d'avoir des configurations plus performantes que les deux configurations NL1

et NL3 et d'établir de façon plus précise les paramètres physiques intervenant dans la propagation des champs de houle. Elles pourraient également être utilisées pour contraindre les observations faites par les nouveaux satellites dans le but de supprimer les valeurs aberrantes et sur le long terme d'améliorer les prévisions météorologiques. Le lancement du satellite Sentinelle-1 prévu en février 2014 par l'ESA (European Space Agency) laisse par exemple entrevoir l'espoir d'obtenir des mesures de la vague plus précises et avec un meilleur échantillonnage grâce à un instrument SAR qui envoie des impulsions avec deux angles d'incidences différents permettant d'avoir deux traces de satellites au lieu d'une pour chaque passage du satellite.

# Bibliographie

- [Ardhuin,2012] Ardhuin, F. (2012), Les vagues : un compartiment important du système terre.
- [Ardhuin et al,2009] Ardhuin, F., B. Chapron, and F. Collard (2009), Observation of swell dissipation across oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L06607, doi :10.1029/2008GL037030.
- [Ardhuin et al,2011] Ardhuin, F., E. Stutzmann, M. Schimmel, and A. Mangeney (2011), Ocean wave sources of seismic noise, *J. Geophys. Res.*, 116, C09004, doi :10.1029/2011JC006952.
- [Ardhuin et al,2012] Ardhuin, F., A. Balanche, E. Stutzmann, and M. Obrebski (2012), From seismic noise to ocean wave parameters : General methods and validation, *J. Geophys. Res.*, 117, C05002, doi :10.1029/2011JC007449.
- [Collard et al,2009] Collard, F., F. Ardhuin, and B. Chapron (2009), Monitoring and analysis of ocean swell fields from space : New methods for routine observations, *J. Geophys. Res.*, 114, C07023, doi :10.1029/2008JC005215.
- [Delpy et al,2010] Delpy, M. T., F. Ardhuin, F. Collard, and B. Chapron (2010), Space-time structure of long ocean swell fields, *J. Geophys. Res.*, 115, C12037, doi :10.1029/2009JC005885.
- [Evans et al,2005] Evans, D. L., Alpers, W., Cazenave, A., Elachi, C., Farr, T., Glackin, D., Holt, B., Jones, L., Liu, W. T., McCandless, W., Menard, Y., Moore, R. and Njoku, E., 2005. Seasat - A 25-year legacy of success. *Remote Sensing of Environment*, 94(3) :384-404.
- [Gagnaire-Renou,2009] Gagnaire-Renou,E. (2009), Amélioration de la modélisation spectrale des états de mer par un calcul quasi-exact des interactions non-linéaires vague-vague, Université du Sud Toulon Var.
- [Husson,2012] Husson, R. (2012), Development and validation of a global observation-based swell model using wave mode operating Synthetic Aperture Radar, Université de Bretagne Occidentale.
- [Husson et al,2012] Husson, R., F.Ardhuin, F. Collard, B. Chapron, and A. Balanche (2012), Revealing forerunners on Envisat's wave mode ASAR using the Global Seismic Network, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L15609, doi :10.1029/2012GL052334.



# Annexe A

## Tempête du 3 février 2009

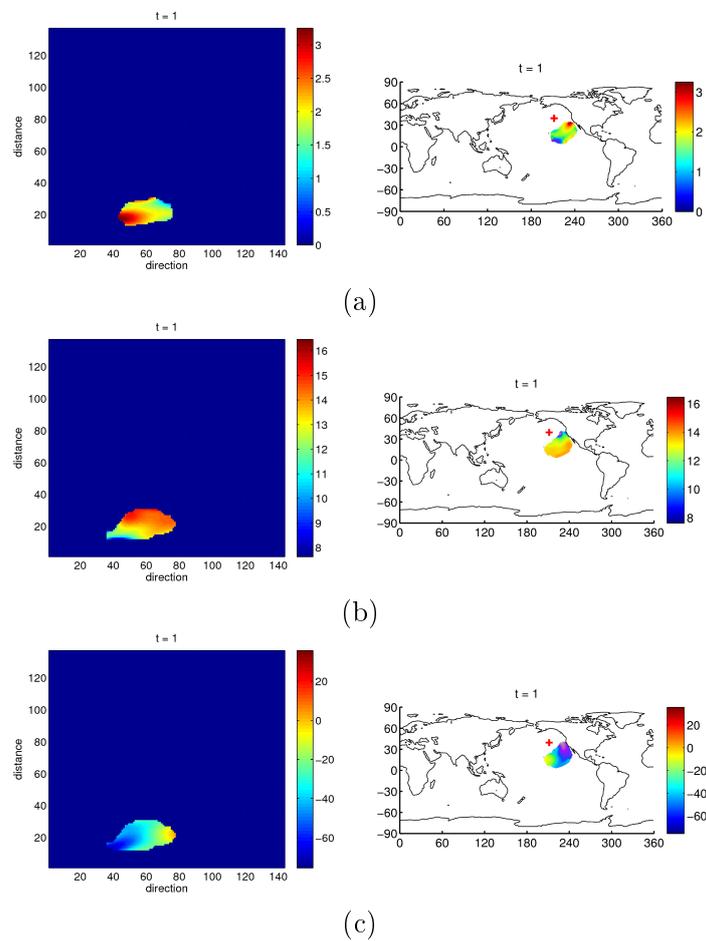


FIGURE A.1 – Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 février 2009 au temps  $t = 1$  (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic avec à gauche la représentation sur la grille (distance,direction,temps) et à droite la représentation sur la grille (latitude,longitude,temps)

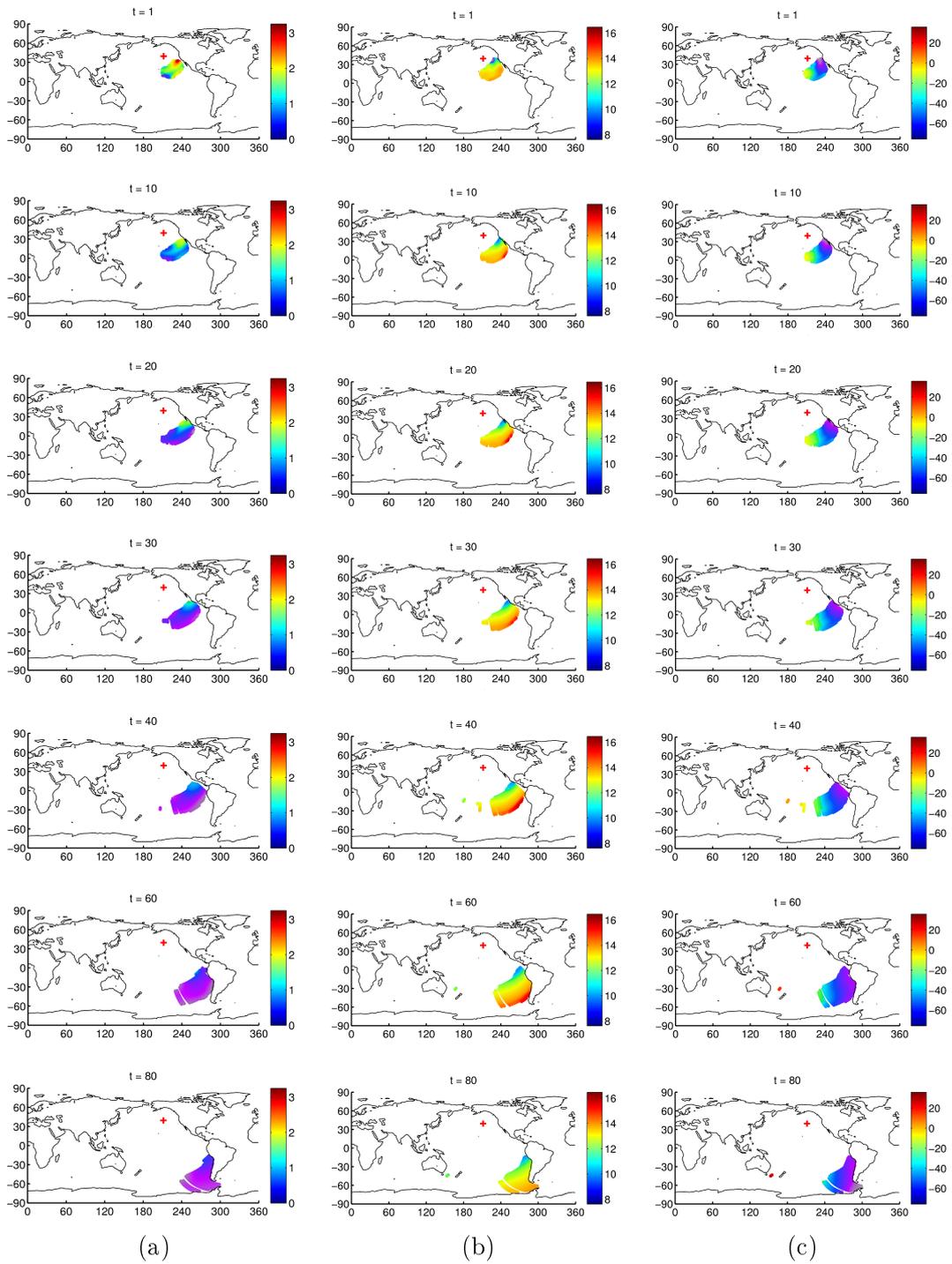


FIGURE A.2 – Champ de houle synthétique pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Hauteurs significatives (b) Périodes de pic (c) Directions de pic

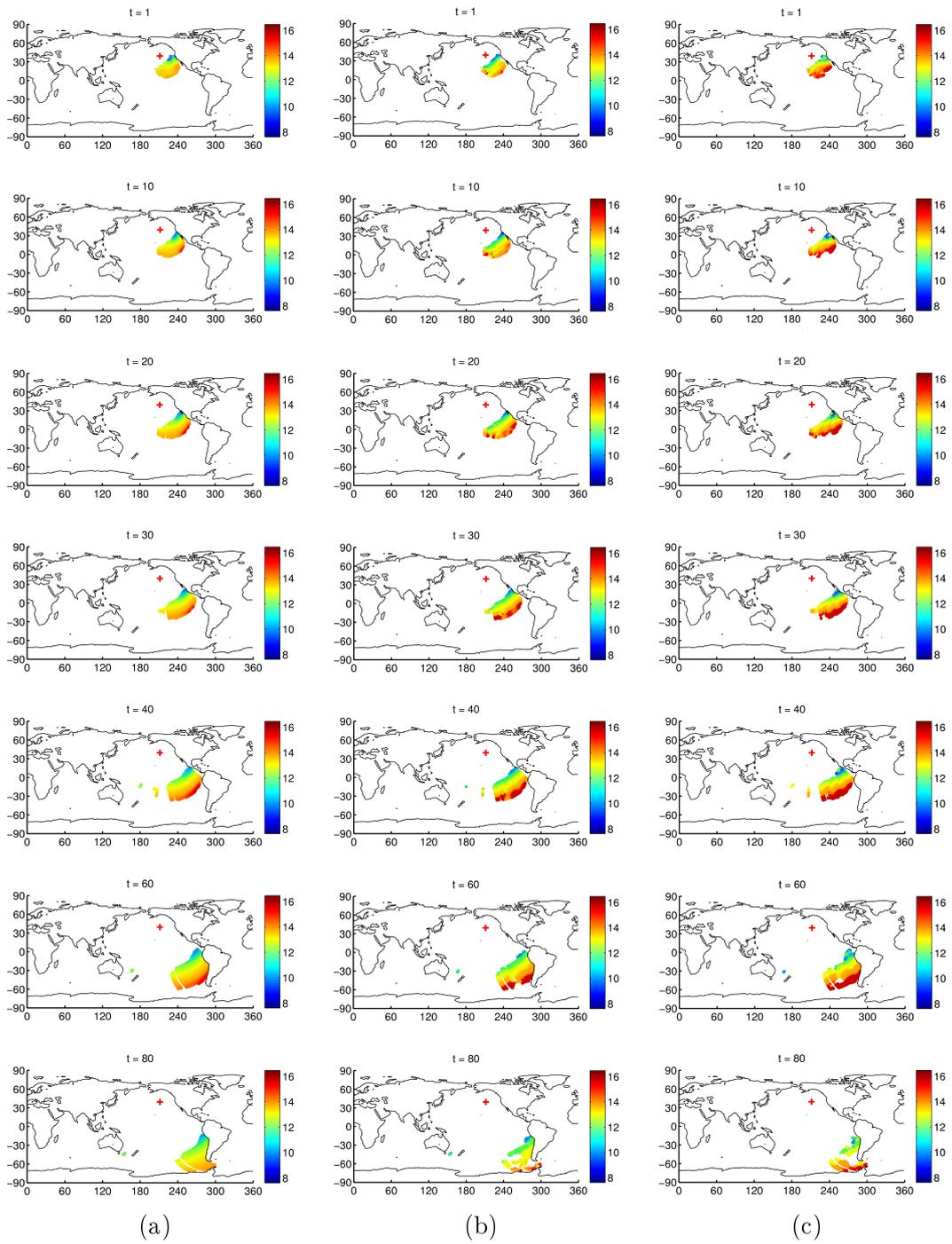


FIGURE A.3 – Périodes de pic pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

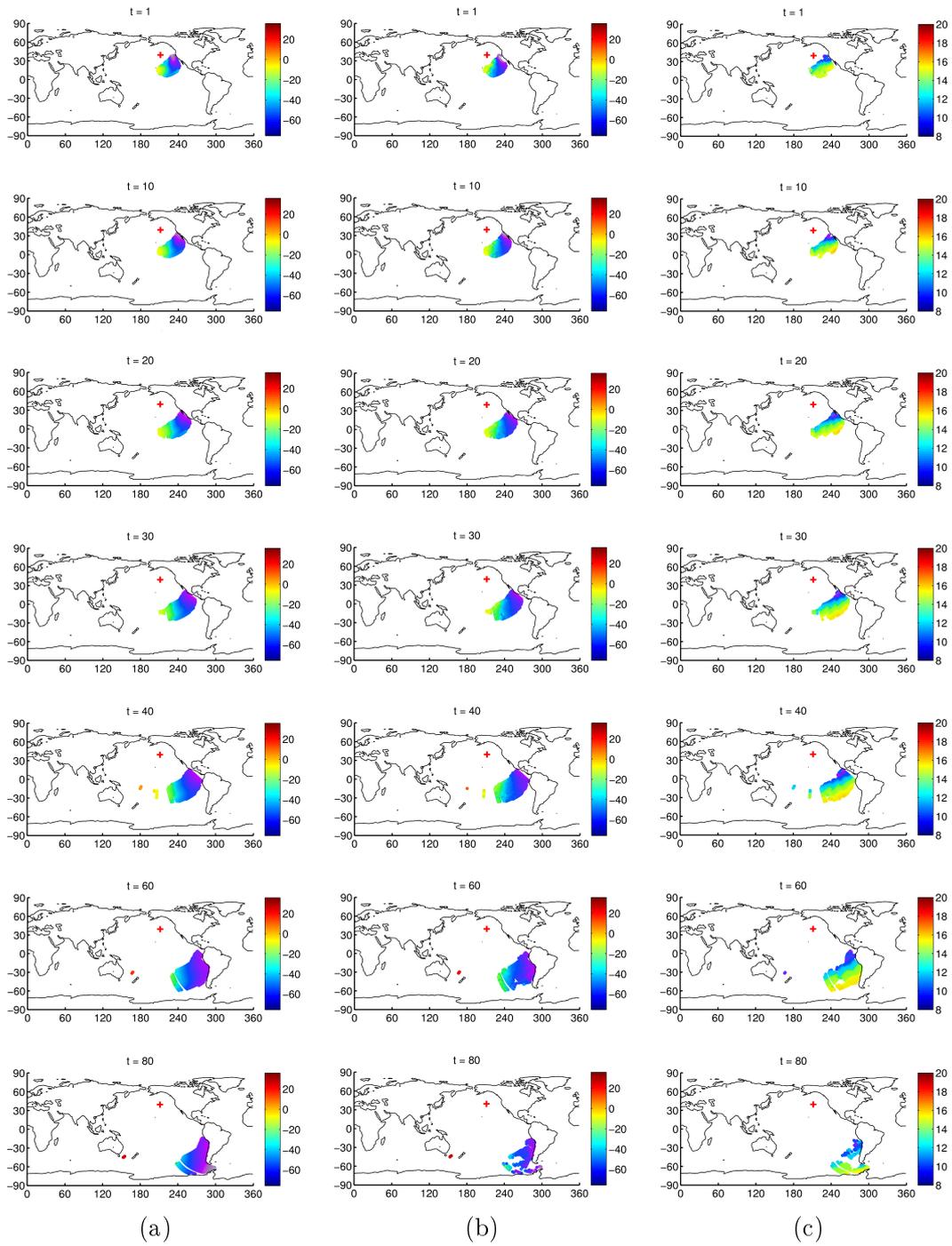


FIGURE A.4 – Directions de pic pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

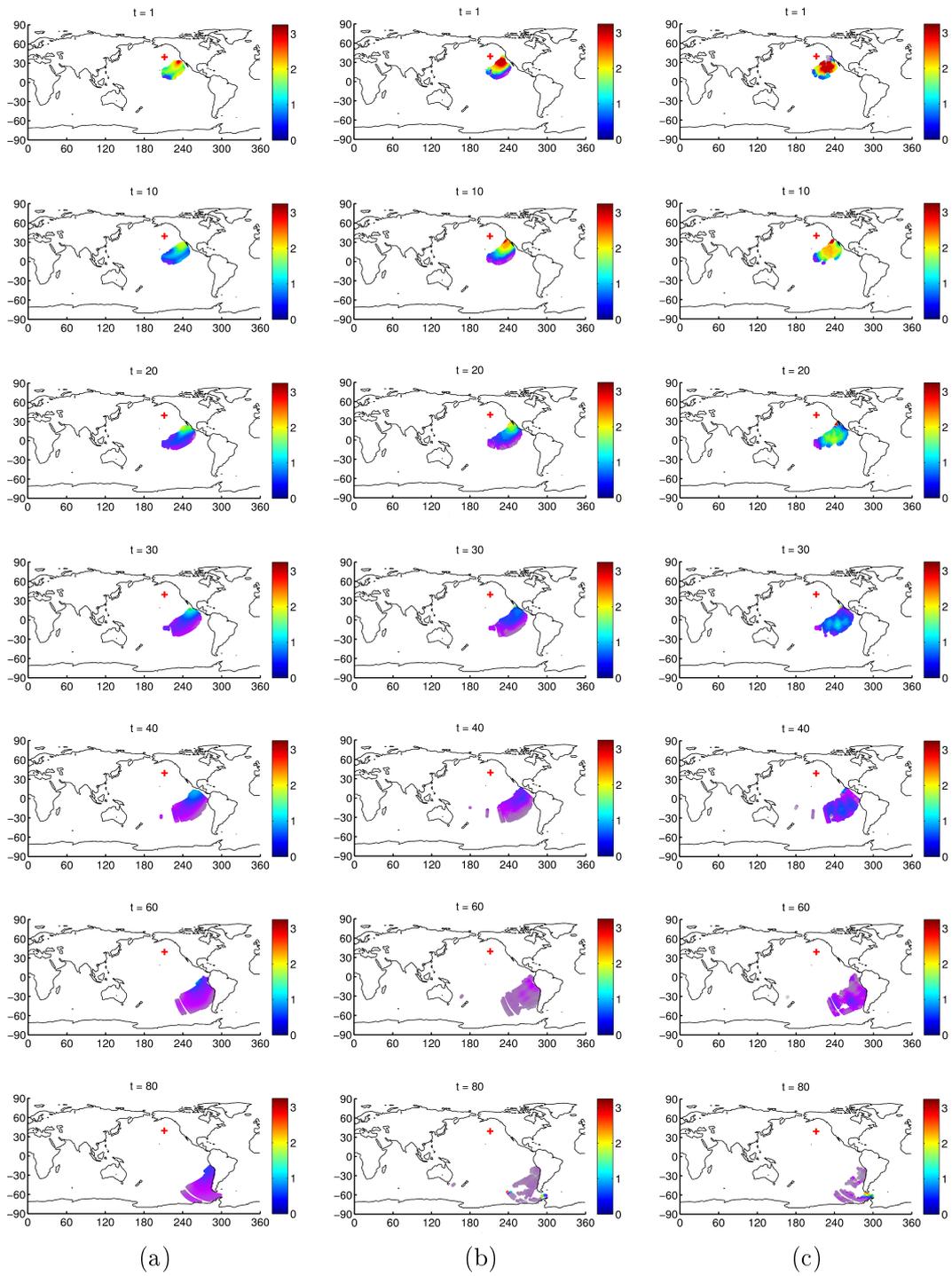
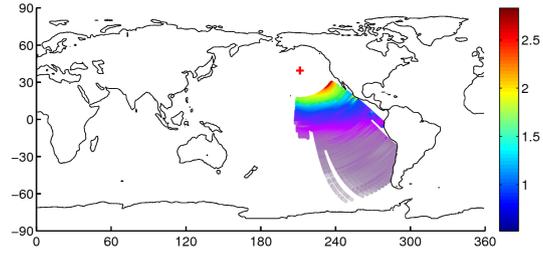
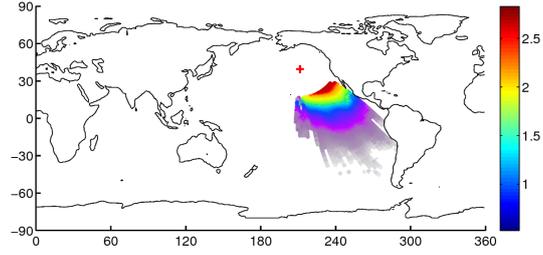


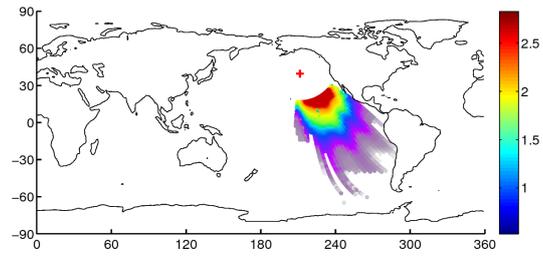
FIGURE A.5 – Hauteurs significatives pour la tempête du 3 février 2009 avec son évolution au cours du temps (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3



(a)



(b)



(c)

FIGURE A.6 – Hauteurs significatives pour la tempête du 3 février 2009 (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

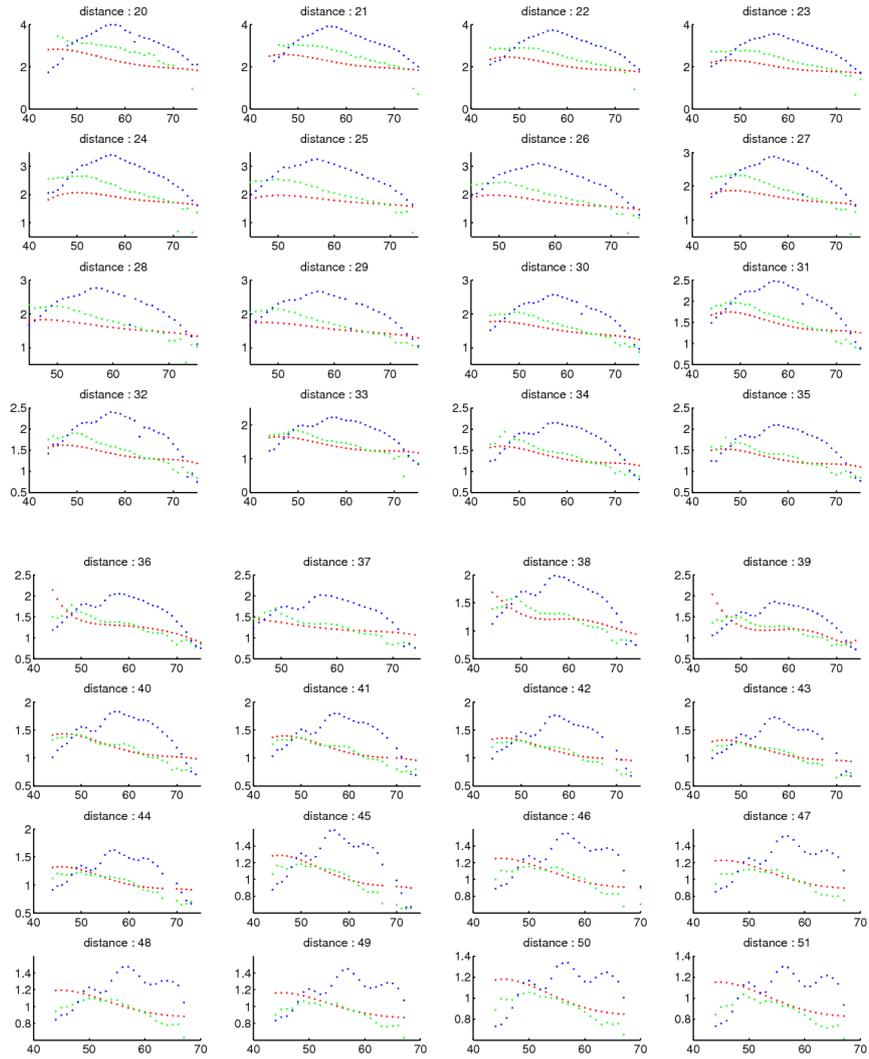


FIGURE A.7 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction pour la tempête du 3 février 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3)

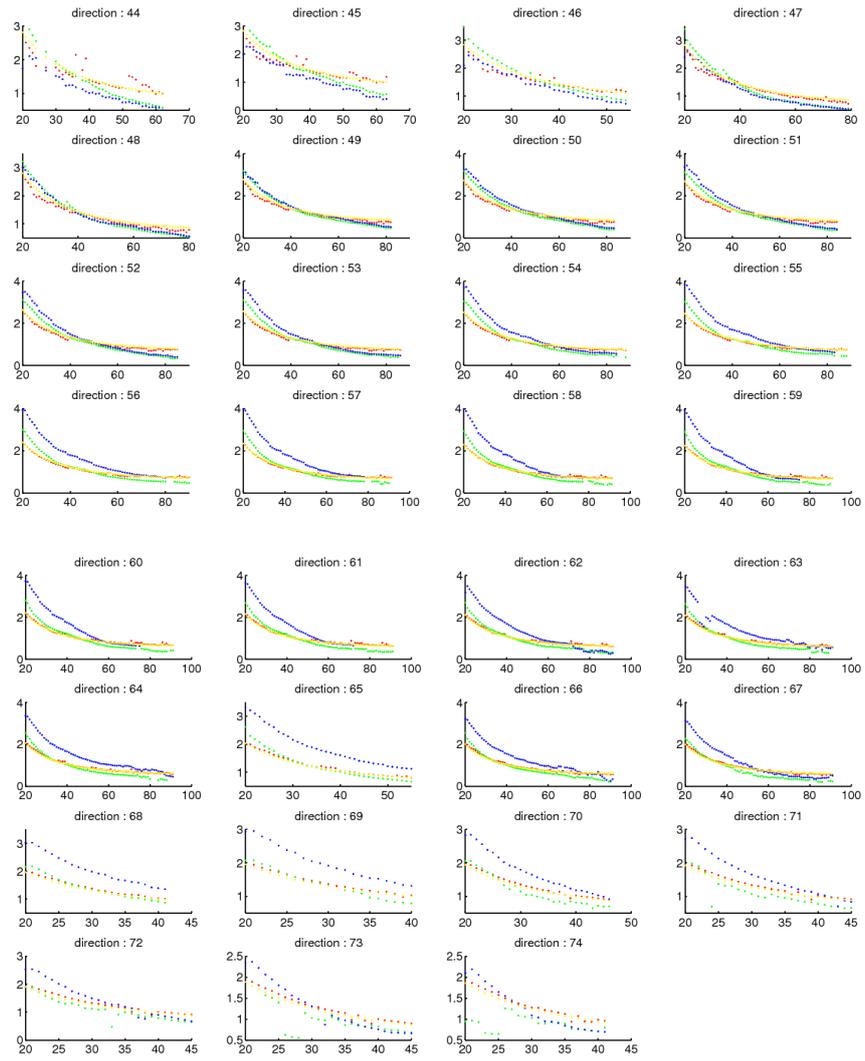
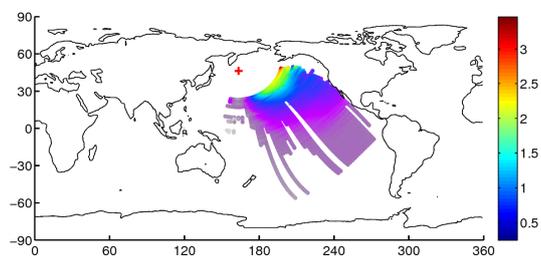


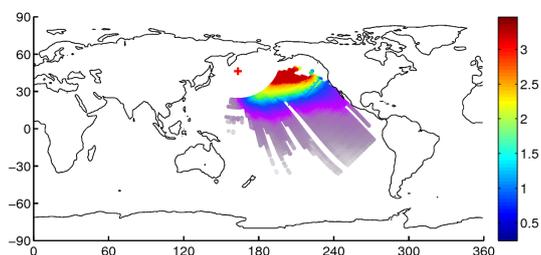
FIGURE A.8 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance pour la tempête du 3 février 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3 et en jaune le champ de houle sans dissipation)

## Annexe B

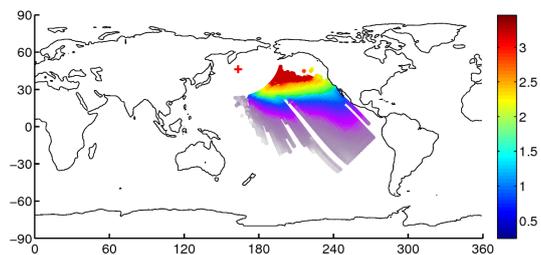
### Tempête du 12 avril 2009



(a)



(b)



(c)

FIGURE B.1 – Hauteurs significatives pour la tempête du 12 avril 2009 (a) Champ de houle synthétique (b) Champ de houle WW3 NL1 (c) Champ de houle WW3 NL3

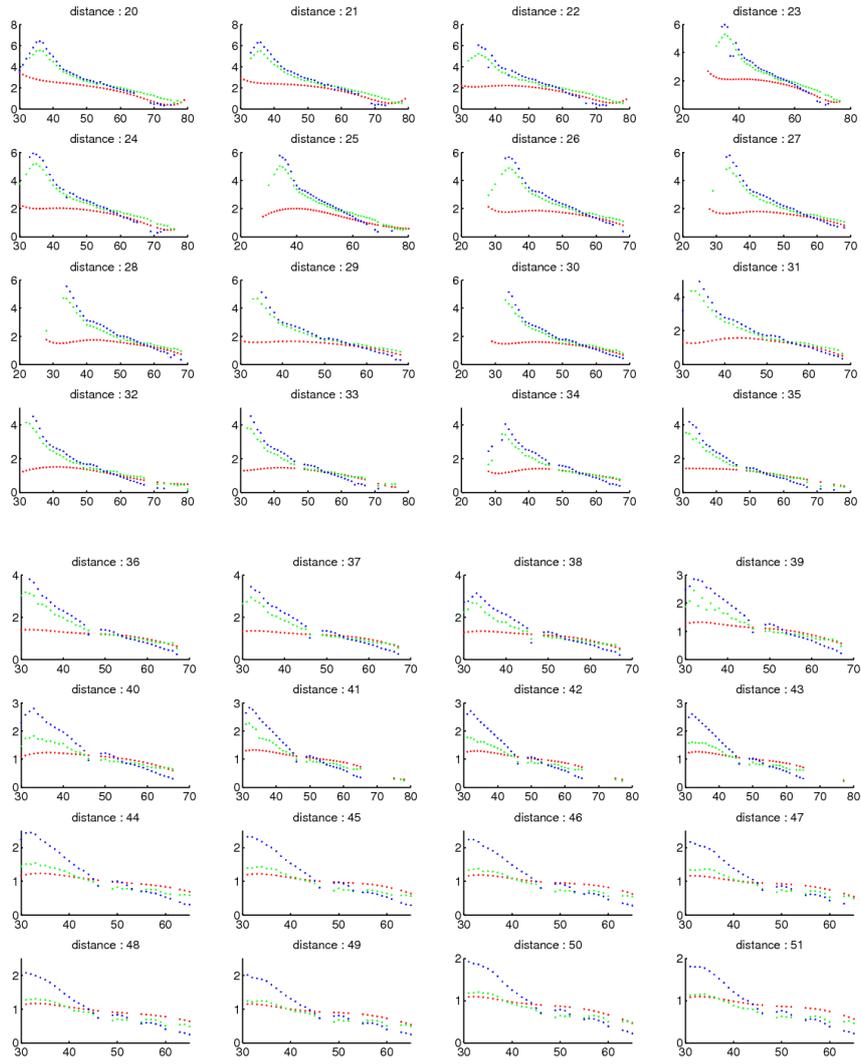


FIGURE B.2 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la direction pour la tempête du 12 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3)

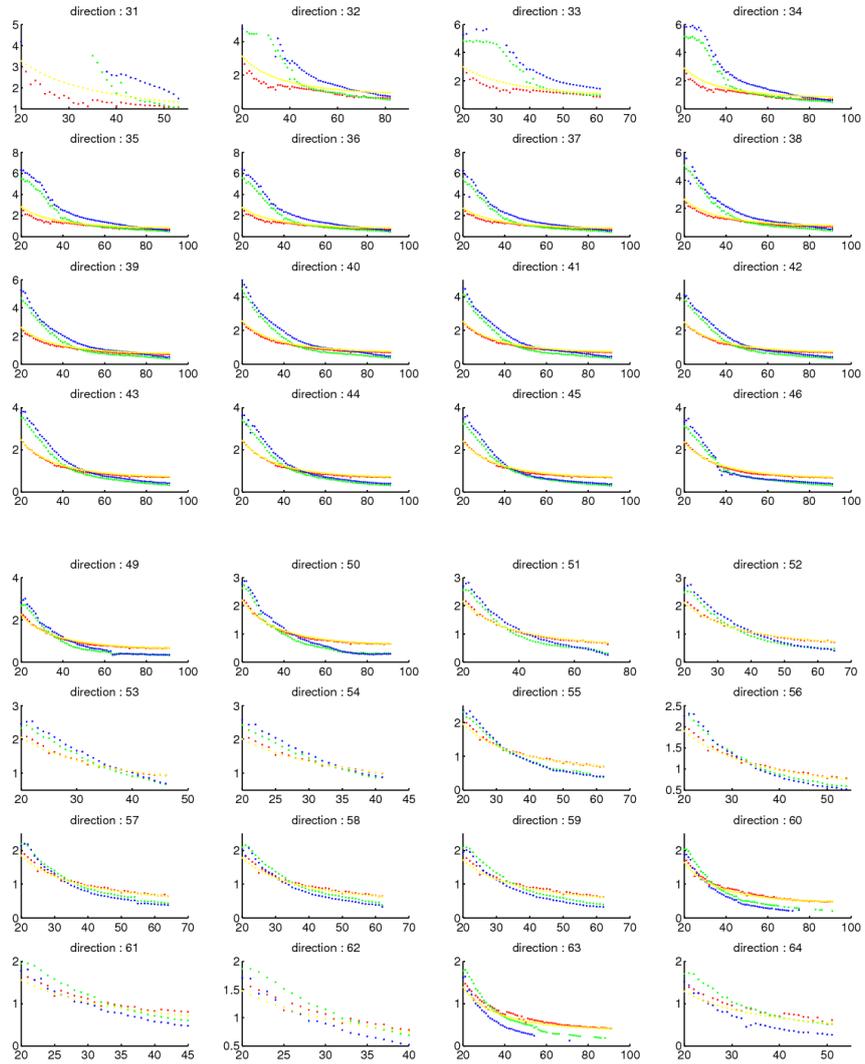


FIGURE B.3 – Evolution de la hauteur significative en fonction de la distance pour la tempête du 12 avril 2009 (en rouge le champ de houle synthétique, en vert le champ de houle WW3 NL1 et en bleu le champ de houle WW3 NL3 et en jaune le champ de houle sans dissipation)

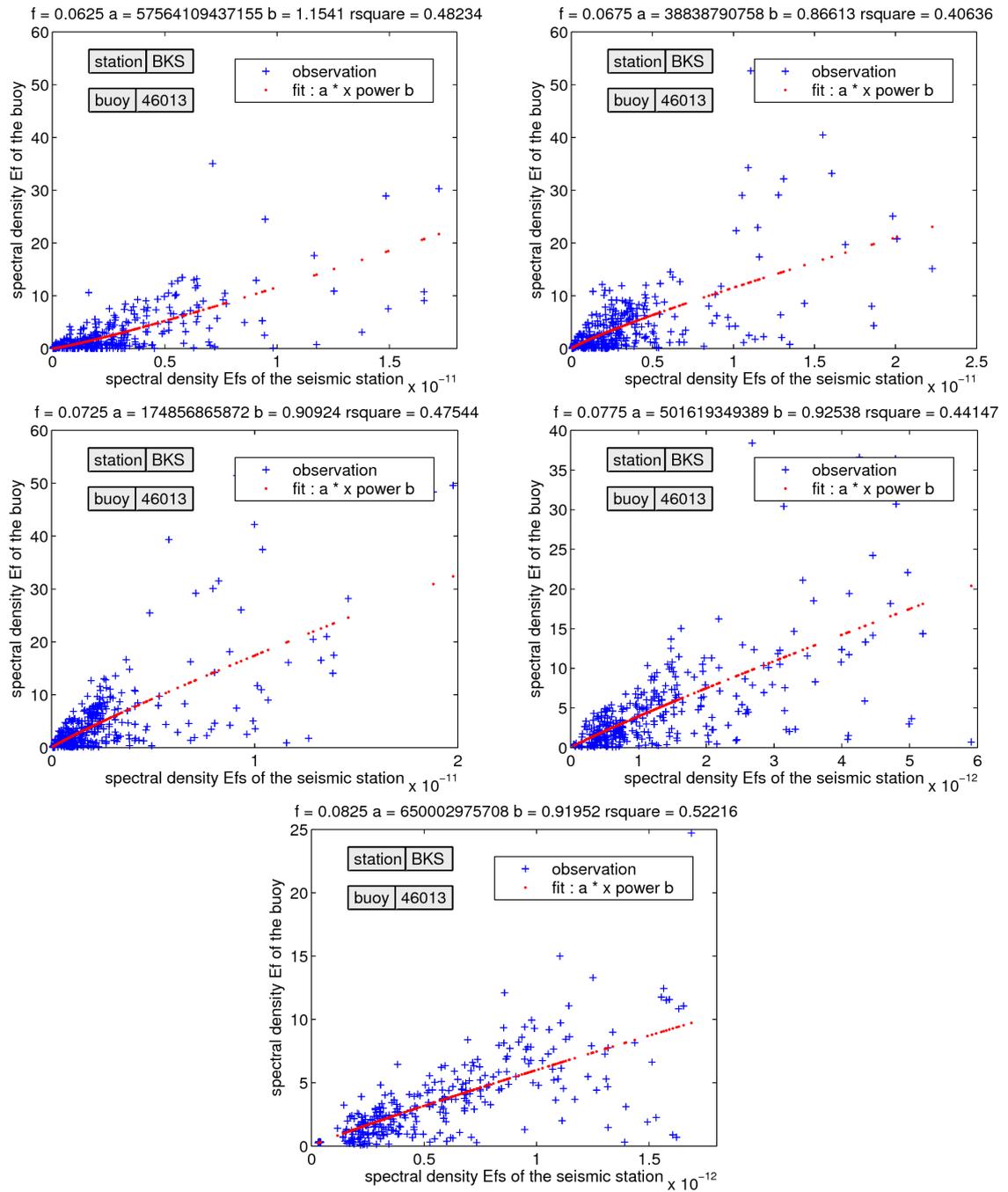


FIGURE B.4 – Etape 6 : station sismique BKS (tempête du 12 avril 2009)

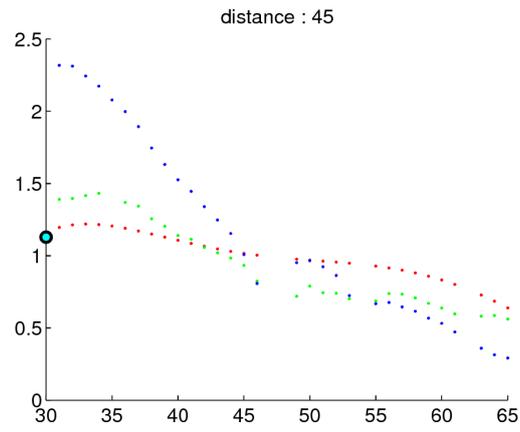


FIGURE B.5 – Validation des champs de houle synthétiques et WW3 NL1 et NL3 par la bouée BKS pour la tempête du 12 avril 2009 et avec la représentation en fonction de la direction