

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER**

**Sujet :**

Etat de l'art sur l'utilisation du modèle SWAN  
(Stimulating WAVes Neashore) dans un  
environnement microtidal

Présenté par:

- **BELLOULOU Bilal**

Soutenu le 0/0 /2012 devant le jury suivant :

<b>Mr O.SEFIANE</b>	Maîtres de Conférence B(ENSSMAL)	<b>Président</b>
<b>Mr Y.HEMDANE</b>	Maîtres de Conférence B (ENSSMAL)	<b>Promoteur</b>
<b>Mr M.HELLEL</b>	Maître-Assistant A(ENSSMAL)	<b>Examineur</b>
<b>Mr F.BOUAICHA</b>	Maître-Assistant A(ENSSMAL)	<b>Examineur</b>

**Promotion : (2012)**

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à ceux qui, à divers titres, ont collaboré à la réalisation de ce travail. Nous les devons à de nombreuses personnes que nous avons le plaisir et l'honneur de citer ci-après.*

*Mr, HEMDANE Yacine avoir dirigé ce travail et lui avoir accordé un intérêt tout au long de son élaboration.*

*Nous tenons à remercier :*

*Mr, Soufiane Omar d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.*

*Mr, Hellel Mustapha nous avoir honoré de sa présence, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Mr, Bouaicha Farid on le remercie d'avoir accepté examiner notre travail.*

*Enfin nos vifs remerciements, à toutes les personnes qui nous ont aidé du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de Master.*

**BELLOULOU Bilal**

# Sommaire

## **Chapitre I : généralité**

Introduction générale.....	1
I.1. Introduction a la modélisation : .....	2
I.2. Le principe de la modélisation numérique :.....	2
I.3. La modélisation numérique des vagues : .....	3
I.3.1. Applications possibles : .....	3
I.4. Les modèles spectraux d'état de mer : .....	4
I.4.1. Modèles de 1 <sup>ere</sup> et 2 <sup>eme</sup> génération : .....	4
I.4.2. Modèles de 3 <sup>eme</sup> génération :.....	4

## **Chapitre II :Modèle swan**

II.1.Modélisations numériques des vagues : comment prévoir (Représentations mathématiques) .....	6
II.1.2. Paramétrisation des termes sources .....	7
II.1.3. Discrétisation et schémas numériques .....	9
II.2. Le modèle SWAN : .....	11
II.2.1. Caractéristiques techniques de modèle swan : .....	13
II.2.2. Limite de modèle swan :.....	14
II.2.3. Principales variables utilisées :.....	15
II.2.4. Descriptif des fichiers d'entrée (Input Grid) :.....	16

## **Chapitre III: des exemples sur modèle swan**

III.1. Etude de la réfraction de la houle par logiciel SWAN dans la zone de HADJET ENNOUS :.....	17
III.1.1. Principe : .....	17
III.1.2. Données d'entrées : .....	17
III.1.3. Les données bathymétriques : .....	17
III.1.4. Les données de houle au large :.....	18
III.1.5. Choix des directions : .....	18
III.1.6. Étapes de la modélisation :.....	19
III.1.6.1. Résultats de la propagation de la houle du large vers la côte pour les périodes de retour annuelle et vingtennale : .....	21
a. la direction Nord Ouest : .....	21

## Sommaire

---

b.	La direction Nord .....	22
c.	La direction Est : .....	23
d.	La direction Ouest : .....	24
III.1.6.2.	Conclusion sur l'étude de la réfraction de la houle : .....	24
III.2.	Deuxième exemples sur l'application de swan : .....	25
III.2.1.	Méthodologie générale : .....	25
III.2.2.	Implémentation du modèle : .....	25
III.2.2.1.	Données utilisées : .....	25
III.2.2.1.1.	Topo-Bathymétrie-Construction des MNT : .....	25
III.2.2.2.	Paramétrages de la modélisation : .....	27
III.2.3.	Tests de sensibilité : .....	28
III.2.3.1.	Pour des conditions calmes du 18/03/03 au 24/03/03 : .....	29
III.2.3.1.1.	Tests sur la résolution et le type de forçage : .....	29
III.2.3.2.	Pour les conditions de tempête de mai et novembre 2002 : .....	35
III.2.3.3.	Domaine de validité du modèle a proximité de la cote : .....	37
III.2.3.3.1.	Pour des fonds d'environ 50m : .....	37
III.2.3.3.2.	Pour les petits fonds (< à 10m) : .....	38
	Conclusion générale : .....	40
	Annexes	
	Références bibliographiques	

# **Les listes**

Figure 1 : croissance des vagues a partir de la cote (vent de 36km /h).....	8
Figure 2 : croissance des vagues vers le large.....	9
Figure 3 : graphique spaghetti.....	10
Figure 4 : Exemple de résultat de modèle SWAN .....	10
Figure 5 : Calculé tendance significative la hauteur des vagues et direction moyenne de transport de l'énergie (notée avec des vecteurs) dans le Haringvliet (une branche de l'estuaire du Rhin dans le sud-ouest des Pays-Bas). .....	12
Figure 6 : Des spectres de vagues calculées à 23.00 UTC et les observations (éparpillés autour de 23,00 UTC) le 12 Octobre 1982, à trois stations (1, 5 et 8). Notez les différences d'échelle densité d'énergie dans les panneaux. ....	12
Figure 7 : la zone de HADJRET-EN-NOUS .....	19
Figure 8: Réfraction de la houle pour une direction N°315 et une période de 11,16s BELLOULOU et GANA,(2012).....	21
Figure 9: Réfraction de la houle pour une direction N°360 et une période de 12,17s. BELLOULOU et GANA, (2012).....	22
Figure 10: Réfraction de la houle pour une direction N°45 et une période de 11,8s. BELLOULOU et GANA, (2012).....	23
Figure 11: Réfraction de la houle pour une direction N°270 et une période de 14,44s. BELLOULOU et GANA, (2012).....	24
Figure 12 : MNT grande emprise (250mx250m) : B1 .....	26
Figure 13 : Haut : Zone d'étude. Bas : Comparaison des MNT de la petite emprise. Gauche : à 50m de résolution (B2). Droite : à 50m de résolution (B3) .....	27
Figure 14 : Résultats pour la « simulation optimale » le 23/03/03 à 00h.....	30
Figure 15 : Résultat pour la simulation « Spectre Jonswap » le 23/03/03 à 00h .....	30
Figure 16 : Résultats pour la simulation « Bathy 250m » le 23/03/03 à 00h.....	31
Figure 17 : Résultats pour la simulation « conditions normales » le 23/03/03 à 00h. ....	31
Figure 18 : Comparaison des hauteurs significatives calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4.....	32
Figure 19 : Comparaison des directions pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4. ....	33
Figure 20 : Comparaison des périodes pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4.....	34
Figure 21 : Comparaison de la période des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell. ....	35
Figure 22 : Comparaison de la hauteur significative des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell. ....	36
Figure 23 : Comparaison de la direction des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrée par la bouée Triaxys. ....	37
Figure 24 : Régression linéaire entre les données de la bouée Triaxys et les résultats de simulation de SWAN au même endroit sur les périodes d'étude de mars 2003 et mai 2002 ..	37
Figure 25 : Points d'extraction des résultats de part et d'autre de l'embouchure de l'Adour sur l'isobathe des 3m et celle des 8m.....	38
Figure 26 : Variations de la hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m le long des plages d'Anglet avec les simulations « optimale » et « conditions normales » pour trois dates de la campagne de 2003. ....	39

## Listes des tableaux

---

Tableau 1 : Conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude .....	21
Tableau 2 :Tableau récapitulatif des erreurs entre mesures et simulations aux 3 points de comparaison. ....	46

## Notations

$a$  amplitude des vagues / de la houle (m)  
 $a_n$  coefficients de Fourier dans la décomposition en série de Fourier de  $D(f, \theta)$

$b_n$  coefficients de Fourier dans la décomposition en série de Fourier de  $D(f, \theta)$

$C_{ph}$  vitesse de phase des vagues ( $m s^{-1}$ )

$C_D$  coefficient de traînée

$C_{ph}/U_{10}$  âge des vagues

$C_g$  vitesse de groupe intrinsèque (ou relative) des vagues ( $m s^{-1}$ )

$C_p$  vitesse de phase au pic ( $m s^{-1}$ )

$D(f, \theta)$  fonction de répartition angulaire ( $rad^{-1}$ )

$d$  profondeur d'eau (m)

$E$  énergie totale déterminée à partir du spectre de variance ( $m^2$ )

$E$  énergie totale adimensionnelle

$E(f, \theta)$  densité spectroangulaire d'énergie (spectre directionnel d'énergie) ( $kg s^{-2} Hz^{-1} rad^{-1}$ )

$E_{tot}$  énergie totale des vagues par unité de surface ( $kg s^{-2}$ )

$F(f, \theta)$  densité spectro-angulaire de variance (spectre directionnel de variance) ( $m^2 Hz^{-1} rad^{-1}$ )

$E(f)$  densité spectrale de variance (spectre fréquentiel de variance) ( $m^2 Hz^{-1}$ )

$f$  fréquence des vagues (Hz)

$f_1$  première fréquence de discrétisation (Hz)

$f_{max}$  dernière fréquence de discrétisation (Hz)

$f_p$  fréquence de pic des vagues (Hz)

$f_p$  M fréquence de pic de Pierson-Moskowitz (Hz)

$f_{*PM}$  fréquence de pic de Pierson-Moskowitz adimensionnelle

$f_p$  fréquence pic adimensionnelle

$g$  accélération de la pesanteur ( $g \approx 9.81$ ) ( $m s^{-2}$ )

$H_{m0}$  hauteur significative spectrale (m)

$k$  nombre d'onde des vagues ( $rad m^{-1}$ )

$F(f, \theta)$  densité spectro-angulaire de variance (spectre directionnel de variance) ( $m^2 Hz^{-1} rad^{-1}$ )

$m_n$  moment du spectre de variance d'ordre  $n$  ( $m^2 Hz^n$ )

$N(f, \theta)$  densité spectro-angulaire d'action (spectre directionnel d'action) ( $m^2 Hz^{-2} rad^{-1}$ )

$S_{der}(f, \theta)$  terme source dérivé (par rapport à  $F$ ) (Hz)

$S_{diss}(f, \theta)$  terme de dissipation d'énergie par moutonnement ( $m^2 rad^{-1}$ )

$S_i(f, \theta)$  terme source ( $m^2 rad^{-1}$ )

$S_{in}(f, \theta)$  terme de génération des vagues par le vent ( $m^2 rad^{-1}$ )

$S_{nl}(f, \theta)$  terme de transfert non-linéaire vague-vague ( $m^2 rad^{-1}$ )

$S_{tot}(f, \theta)$  terme source total ( $m^2 rad^{-1}$ )

$T$  période des vagues (s)

$T_{m01}$  période et fréquence moyenne calculées à partir des moments d'ordre 0 et 1 (s)

$T_{m02}$  période et fréquence moyenne calculées à partir des moments d'ordre 0 et 2 (s)

$T_p$  période de pic des vagues (s)

$U_{10}$  vitesse du vent à 10 mètres ( $m s^{-1}$ )

$U_c$  vitesse du courant ( $m s^{-1}$ )

$u^*$  vitesse de frottement ( $m s^{-1}$ )

## Notations

X fetch (m)

### Lettres grecques

$\alpha$  (f,  $\theta$ ) terme de croissance linéaire ( $\text{m}^2\text{rad}^{-1}$ )

$\alpha_p$  la constante de Phillips

$\beta$  taux de croissance adimensionnel

$\Delta t$  pas de temps (s)

$\Delta x$  discrétisation spatiale (m)

$\varepsilon$  cambrure

$\eta$  élévation de la surface libre (m)

$\gamma$  facteur d'amplification du pic pour un spectre de type JONSWAP

$\theta$  direction de propagation des vagues (rad)

$\theta_m$  direction moyenne des vagues (rad)

$\theta_u$  direction du vent (rad)

$\lambda$  longueur d'onde des vagues (m)

$\rho_a$  masse volumique de l'air ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\rho_w$  masse volumique de l'eau ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\sigma$  étalement angulaire (rad)

$\tau$  durée adimensionnelle

$\phi$  phase des vagues (rad)

$\chi$  fetch adimensionnel

$\omega$  pulsation intrinsèque (relative) des vagues ( $\text{rad s}^{-1}$ )

$\omega_p$  pulsation au pic ( $\text{rad s}^{-1}$ )

$\omega_p$  pulsation au pic adimensionnelle

## Liste d'acronyme

<b>CREST</b>	Coupled Rays with Eulerian Source Terms
<b>DIA</b>	Discrete Interaction Approximation
<b>GQM</b>	Gaussian Quadrature Method
<b>JONSWAP</b>	Joint North Sea Wave Project
<b>MDIA</b>	Multiple DIA
<b>SWAMP</b>	Sea WAve Modeling Project
<b>SWAN</b>	Simulating WAves in the Nearshore
<b>TOMAWAC</b>	TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation
<b>WAM</b>	WAve Modeling
<b>WAMDI</b>	Group WAve Model Development and Implementation Group

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les vagues jouent un rôle fondamental pour de nombreuses problématiques en océanographie physique et disciplines connexes : gestion des zones côtières et des opérations en mer, conception et dimensionnement de structures marines et portuaires telles qu'une digue ou une plateforme pétrolière, étude de la morphodynamiques côtière et de l'évolution du littoral, récupération de l'énergie des vagues, etc. De plus, par leurs effets sur les flux entre l'océan et l'atmosphère, les vagues ont aussi des effets directs ou indirects sur les dynamiques de circulation océaniques et atmosphériques. La connaissance précise et la prévision de la climatologie des états de mer (valeurs moyennes et extrêmes) représentent donc des enjeux importants pour de nombreuses applications (**E.Gagnaire-Renou**).

La connaissance des états de mer en zone littorale est fondamentale pour de nombreuses applications en génie maritime telles que le dimensionnement des ouvrages de protection vis-à-vis de l'action des vagues, la quantification des flux sédimentaires littoraux ou la vulnérabilité du trait de cote.

De nombreuses applications numériques basées sur le couplage de modèles de circulation et de propagation de houle ont ainsi été mises en œuvre pour améliorer la compréhension et la prédiction des houles en zones littorale et estuarienne.

Depuis les travaux de **Sverdrup & Munk (1947)** et les premiers modèles de prévision des vagues dans les années 1950 et 1960 (**Gelci et al., 1957**), de nombreuses études théoriques et observations ont permis le développement de modèles de description et de prévision des états de mer de plus en plus sophistiqués.

L'objectif de cette étude est de présenter un model très utilisé dans le domaine maritimes et très spécifiquement dans les zones à faible profondeur c'est le model numérique **SWAN** (Simulating WAVes Nearshore), le premier chapitre c'est une introduction à la modélisation avec quelques notions de base et le rôle de la modélisation des vagues dans les faibles profondeurs, Le deuxième chapitre décrire le fonctionnement de Swan (les différents processus, les données d'entrée, les conditions au limites...etc); et le dernier chapitre montre des exemples sur l'application de SWAN et on termine par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

# **Généralité**

## I.1. Introduction a la modélisation :

L'étude du mouvement d'un fluide a toujours été un sujet de recherche très actif. Il y a quelques années, seule la description mathématique du mouvement était possible. Aujourd'hui, avec la puissance croissante des ordinateurs, il est possible d'approcher numériquement la solution de ces équations mathématiques et donc de simuler le mouvement d'un fluide qui demande beaucoup de calculs.

La modélisation consiste à construire et à utiliser un modèle qui est une représentation simplifiée de la réalité pour montrer les aspects importants du système étudié (**OQLF (*Office québécois de la langue française*), 2005**).

La modélisation est une représentation virtuelle de phénomènes réels à partir d'algorithmes et de modèles mathématiques.

Les progrès de l'informatique permettent aujourd'hui de simuler par le calcul le comportement des fluides, que ce soit pour des ouvrages simples ou complexes.

## I.2. Le principe de la modélisation numérique :

Très sommairement, le modèle numérique consiste en une description simplifiée de la réalité qui permet, par une mise en équations, d'en approcher le fonctionnement par le calcul.

Cette simplification s'effectue à différents niveaux :

- sur les mécanismes (ceux qui ne sont pas jugés essentiels, ou trop compliqués à reproduire, ne sont pas simulés) ;
- par la représentation discrète de phénomènes continus dans le temps et dans l'espace ;
- sur la variabilité des paramètres (exemple : caractéristiques des sédiments) et des facteurs en Jeux (exemple : climat de houle) ;
- sur la chronologie des événements subis.

D'autre part, le modèle ne reproduit généralement qu'une portion isolée du milieu naturel ; l'action de l'extérieur du domaine est appliquée par l'intermédiaire de conditions que l'on impose aux limites de la zone simulée.

### À quoi sert la modélisation ?

Schématiquement, la modélisation peut avoir trois objectifs :

- décrire (résumer) les données
- prédire (simuler), c'est à dire faire des inférences
- expliquer (comprendre) c'est à dire avoir des objectifs mécanistiques.

Selon que l'on souhaite parvenir à l'un ou l'autre de ces objectifs, la modélisation sera réalisée selon des modalités différentes.

Particulièrement utilisée dans les différents métiers de l'environnement, la modélisation permet de :

- prédire les performances des ouvrages avant construction ou réhabilitation,
- réduire le nombre, la durée et les coûts des essais expérimentaux,
- réduire les coûts de construction et d'exploitation des procédés.

L'avantage principal de la modélisation est qu'elle permet de tester différents scénarios sans contrainte d'échelles (pilote, prototype, ouvrage industriel) et de faisabilité.

### **I.3. La modélisation numérique des vagues :**

Les principales forces qui entrent en jeu lors du dimensionnement d'un ouvrage maritime sont celles causées par les vagues, les glaces, les pressions des sols et les forces d'impact.

Les conditions de vagues aux larges sont soit issues d'observations ou déduites des mesures de vent disponibles. Lorsque ces ondes se propagent vers la côte elles sont sujettes à une atténuation suite à des effets de profondeur et de frottement ainsi qu'aux phénomènes de réfraction, de diffraction et de réflexion. De plus, lors du dimensionnement d'une structure, il faut considérer la condition limite donnée par le déferlement des vagues. Établir une évaluation scientifique de l'énergie (force), de l'intensité et de la fréquence d'occurrence des vagues à un site donné est un aspect critique dans la majorité des projets.

Sans négliger pour autant la pertinence des enregistrements de houle et des méthodes d'analyse et de prédiction, la modélisation mathématique représente un excellent moyen de limiter le nombre d'observations et de réduire le coût des études d'impact environnementales. Les modèles mathématiques permettent de reproduire le vent et les processus de génération des vagues en un site donné. La dynamique des vagues est complexe et fortement variable de telle sorte qu'il faut avoir recours à une série de modèles sophistiqués pour aborder les nombreux problèmes que cela implique. Ces modèles ont été validés avec des données de laboratoire et de terrain, ils nécessitent peu de données de terrain pour leur mise en route.

#### **I.3.1. Applications possibles :**

- analyse de houles
- prédiction du régime de vent-vagues
- analyses statistiques
  - Analyse statistique des vents
  - Analyse statistique des vagues
- génération, propagation et transformation des ondes
- réfraction, diffraction et réflexion des ondes dans un port
- remontée, franchissement et transmission des vagues
- oscillations portuaires
- interaction des vagues avec les structures

- stabilité des brise-lames
- forces exercées par les vagues sur les murs et les piles
- évaluation des risques environnementaux
- gonflement et déferlement

#### I.4. Les modèles spectraux d'état de mer :

Les modèles spectraux d'état de mer, qui résolvent l'équation d'évolution du spectre d'énergie des vagues (1), sont couramment utilisés pour la prédiction des états de mer car ils permettent de s'affranchir des détails du mouvement des vagues.

$$\frac{\partial N(K)}{\partial t} + \nabla_{x,y} \left( (C_g + U_c) N(K) \right) + \frac{\partial C_\theta N(K)}{\partial \theta} + \frac{\partial C_\omega N(K)}{\partial \omega} = \sum \frac{S_i(K)}{\omega} \dots\dots(1)$$

Trois générations de modèles de vagues se sont succédé, s'appuyant sur des connaissances physiques de plus en plus importantes et sur l'accroissement des capacités informatiques.

##### I.4.1. Modèles de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> génération :

Les premiers modèles spectraux d'état de mer ont été élaborés dans les années 1950 – 1960 (Gelci et al., 1957). Ils s'appuient sur les théories de Miles (1957) et Phillips (1957) pour la génération des vagues par le vent et sur le concept de saturation universelle de Pierson & Moskowitz (1964). Les interactions non-linéaires sont traitées comme un phénomène secondaire et négligées ou paramétrisées très sommairement. Ces modèles sont appelés « modèles de 1<sup>ère</sup> génération » (1G) (cf. SWAMP Group, 1985).

Dans les années 1970, des mesures plus précises, avec notamment le projet JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), ont permis une meilleure connaissance de la physique des vagues et ont montré l'importance des transferts non-linéaires dans la modélisation des états de mer.

Les modèles de 2<sup>ème</sup> génération (2G) apparaissent alors, prenant en compte les premières paramétrisations des interactions non-linéaires vague-vague (e.g. Barnett, 1968; Ewing, 1971; Hasselmann et al., 1976) et comprenant un couplage entre les différentes composantes spectrales. Ces paramétrisations souffrent de certaines limitations ; en particulier elles sont conçues pour des cas idéalisés et ne permettent pas de reproduire les observations dans des situations complexes.

##### I.4.2. Modèles de 3<sup>ème</sup> génération :

Le développement de la méthode de calcul des interactions non-linéaires DIA (Hasselmann et al., 1985) a marqué le début des modèles de 3<sup>ème</sup> génération. Dans ces modèles, chaque composante spectro-angulaire du spectre de variance évolue « librement » sous l'action combinée des différents processus physiques pris en compte. Le terme de transfert non-linéaire  $S_{nl}$  n'est plus paramétrisé, mais calculé à partir de l'expression (2) de manière plus ou moins approchée.

$$S_{nl}[N_k] = \int_{K_1} \int_{K_2} \int_{K_3} G(K, K_1, K_2, K_3) \{N_2 N_3 (N + N_1) - N N_1 (N_2 + N_3)\} \times \delta(K + K_1 - K_2 - K_3) \delta(\omega + \omega_1 - \omega_2 - \omega_3) dK_1 dK_2 dK_3 \dots\dots\dots(2)$$

Le premier modèle de 3ème génération (3G) est le modèle WAM (WAMDI Group, 1988; **Komen et al., 1994**), qui a été implémenté pour des applications dans le domaine océanique ou les mers continentales. A la suite de WAM, d'autres modèles comme WAVEWATCH III (Tolman, 1991, 2002), SWAN (**Booij et al., 1999**) ou TOMAWAC (**Benoit et al., 1996**), puis plus récemment le modèle CREST (**Ardhuin et al., 2001**) ont été développés.

Certains modèles de recherche incluent aujourd'hui des méthodes de calcul quasi-exactes du terme  $S_{nl}$ , comme la méthode WRT (Webb-Resio-Tracy) (Webb, 1978; Resio & Perrie, 1991), ou la méthode GQM (Gaussian Quadrature Method) (**Lavrenov, 2001**).

Les temps de calcul de ces méthodes sont encore trop importants pour des applications pratiques à grande échelle. Néanmoins, grâce aux améliorations de ces méthodes et aux outils informatiques de plus en plus puissants, on peut espérer un calcul quasi-exact des interactions non-linéaires dans un avenir proche.

Le modèle SWAN (**Ris, 1997; Booij et al., 1999**) est le premier modèle de 3ème génération conçu spécialement pour les applications côtières, incluant les effets de déferlement bathymétrique et les interactions non-linéaires entre triplets de fréquences.

Depuis les travaux de **Sverdrup & Munk (1947)** et les premiers modèles de prévision des vagues dans les années 1950 et 1960 (**Gelci et al., 1957**), de nombreuses études théoriques et observations ont permis le développement de modèles de description et de prévision des états de mer de plus en plus sophistiqués. Les modèles spectraux permettent de représenter l'évolution spatio-temporelle du spectre directionnel d'énergie (ou d'action) des vagues sous l'effet de forçages météorologiques instationnaires, éventuellement dans des conditions hydrodynamiques (niveau moyen de mer et courants ambiants) instationnaires. Le spectre directionnel d'énergie fournit une information détaillée sur la répartition de l'énergie des vagues, à la fois en fréquences et en directions. On peut aussi en déduire des paramètres intégrés caractéristiques de l'état de mer, comme la hauteur significative spectrale, les périodes moyennes ou de pic, la direction moyenne de propagation, l'étalement angulaire moyen, etc.

Le modèle spectral de propagation des états de mer **SWAN** (acronyme de " Simulating WAVes Nearshore ") est développé au sein de **Delft** (University of Technology), Il s'agit d'un modèle numérique permettant le calcul des paramètres des vagues, dans les régions côtières, les lacs et les estuaires, à partir d'informations fournies sur la bathymétrie, les courants et le vent. Il résout l'équation de transport de l'énergie (ou de l'action d'onde, en présence de courants). Pour cela, le spectre est discrétisé en un certain nombre de fréquences et de directions et l'équation est résolue sur une grille en " différence finie ".

Donc SWAN est un modèle de " **troisième génération** ", avec la possibilité de le faire fonctionner en mode première ou seconde génération ; cela permet, en fonction des besoins, des gains en ressources informatiques.

# **Chapitre II**

## **Modèle swan**

**II.1. Modélisations numériques des vagues : comment prévoir (Représentations mathématiques)**

De nombreux types de modèles numériques existent qui permettent de décrire le mouvement des vagues à diverses échelles. Pour la prévision on utilise plutôt des modèles qui représentent l'évolution du spectre car ils permettent de s'affranchir des détails du mouvement des vagues. La prévision consiste donc à intégrer dans le temps l'équation d'évolution des densités spectro-angulaires  $E(f,q)$ , avec  $f=1/T$  la fréquence et  $q$  la direction d'où viennent les vagues :

$$dE / dt + [\text{div}_x (C_g E) + \text{div} (C_q E) ] = S \dots\dots\dots(3)$$

En clair cette équation s'écrit : évolution dans le temps +[transport d'énergie dans l'espace + changement de direction ] = sources - puits

C'est donc une "équation de transport" qui décrit le transport de chaque composante. La vitesse  $C_g$  est la vitesse de groupe des vagues, vitesse à laquelle l'énergie des vagues est transportée, il s'agit d'un vecteur, orienté dans la direction de propagation des vagues. La vitesse  $C_q$  représente la vitesse du changement de direction des vagues, causé par les variations de profondeur, ou bien la courbure de la Terre (si le fond est plat et sur une "Terre plate",  $C_q = 0$  ). La quantité  $(C_g E)$  est le flux d'énergie des vagues. Il peut atteindre facilement 100 kW / m. Si on pouvait utiliser facilement cette énergie, en la transformant en électricité par exemple, on pourrait produire assez d'électricité pour 1 million d'habitants avec 10 km de côtes assez bien exposées (voir liens). Ci dessous l'énergie  $E$  représentera souvent la variance de l'élévation de surface en mètres carrés (on a alors  $E = 4 H_s^2$ ) l'énergie étant alors  $rgE$ , avec  $r$  la masse volumique de l'eau.

En regroupant le transport et l'évolution on obtient l'équation (3) sous forme Lagrangienne :

$$dE / dt = S \dots\dots\dots(4)$$

Le terme  $S$  est la somme de plusieurs termes de "sources et puits" d'énergie : sources quand ils sont positifs et puits quand ils sont négatifs. En pratique certains phénomènes peuvent donner de l'énergie aux vagues ou leur en prendre, si bien qu'on les appelle tous "termes sources" pour simplifier, la source pouvant être négative.

Pour la prévision des vagues au large, telle qu'elle est réalisée par Météo-France et le Centre Européen de Prévision, on utilise 3 termes sources :

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \dots\dots\dots(5)$$

$S_{in}$  représente l'énergie donnée aux vagues par le vent  $S_{nl}$  représente l'énergie échangée par les différentes composantes des vagues, entre elles. En effet, ces effet sont très faibles pour la houle qui se propage comme si les composantes étaient indépendantes les unes des autres (les

vagues sont alors "linéaires" parce que le mouvement associé à l'ensemble des composantes est la somme du mouvement de chaque composante, d'où l'intérêt de la décomposition spectrale). Par contre lorsque le vent souffle assez fort ces échanges dits "non-linéaires" sont très importants.  $S_{ds}$  représente la dissipation de l'énergie des vagues par formation de moutons en surface.

Ce phénomène est d'autant plus important que le vent souffle fort.

Ces trois termes sont des vitesses d'évolution de l'énergie de chaque composante du spectre. Leur combinaison permet de représenter l'évolution du champ de vague par des conditions de vent variables.

Près des côtes le fond influence les vagues par les variations de profondeur à des échelles supérieures à la longueur d'onde, représentées dans les équations (3) et (4). Les plus petites échelles sont importantes par faible profondeur ("faible" dépend de la longueur d'onde et de la hauteur des vagues, et cela peut être à partir de 30 m pour des vagues moyennes de 2 m de hauteur et période 15 secondes, mais beaucoup plus, disons 100 m pour de grosses vagues de 6 m). Ainsi la rugosité du fond à l'échelle de 10 cm à 10 m modifie le frottement sur le fond et la dissipation de l'énergie des vagues (on ajoute un terme source  $S_{bf}$  de dissipation de l'énergie des vagues par friction sur le fond). La nature du fond peut aussi provoquer la dissipation d'énergie à l'intérieur des sédiments (vases ou sables grossiers et graviers), et certains distinguent cet effet de la friction avec un terme additionnel de dissipation  $S_{bds}$ .

Enfin la topographie à l'échelle de la longueur d'onde influence elle aussi l'évolution des vagues et n'est pas représentée dans l'équation (5), on peut la représenter sous la forme d'un terme de réflexion et diffusion  $S_{bscat}$  qui est actuellement l'objet de recherches au SHOM. Au total on ajoute alors trois termes sources :

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} + S_{bds} + S_{bscat} \dots\dots\dots (6)$$

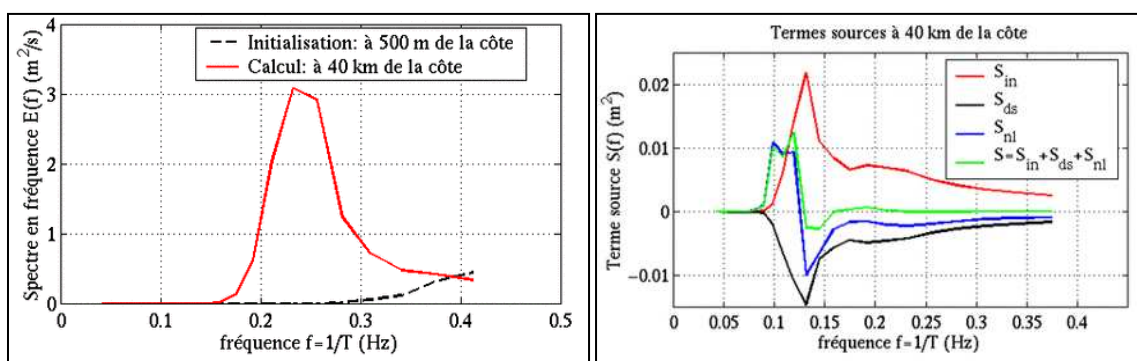
**II.1.2. Paramétrisation des termes sources**

L'approche décrite ici est celle des modèles de prévision des vagues de "3ème génération", qui diffère de la "deuxième génération" par la manière de calculer le terme d'échanges non-linéaires  $S_{nl}$ . Au large, où  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$  la représentation numérique du terme  $S_{nl}$  est actuellement un facteur limitant. En effet la théorie des interactions non linéaires (développée par Klaus **Hasselmann** et **Vladimir Zakharov** dans les années 1960) dit que  $S_{nl}$  est une fonction assez compliquée du spectre  $E(f,q)$  qui est très longue à calculer. Une approximation, dite des "interactions discrètes" (DIA) a donc été développée par Klaus et Suzanne **Hasselmann** dans les années 1980, et elle est toujours au coeur de l'ensemble des modèles de vagues opérationnel, avec peut-être une exception. Le SHOM, à la suite de l'ONR (Etats-Unis) et du Rijkwaterstaat (Pays-Bas), co-finance le développement de méthode de calcul rapide et aussi exactes que possibles de ce terme  $S_{nl}$ , afin de remplacer le DIA.

En utilisant le DIA, les autres termes sont ajustés aux observations de croissance des vagues,

en particulier les cas où le vent souffle de la côte et la hauteur des vagues augmente vers le large. Comme il y a 3 termes, il existe de nombreuses manières de faire cet ajustement. En pratique on a d'assez bonnes théories sur le terme  $S_{in}$  de génération par le vent et donc on n'a plus qu'à ajuster la dissipation  $S_{ds}$  pour laquelle les théories ne sont pas très bonnes. Il existe essentiellement deux écoles pour le  $S_{in}$ . La première utilise des mesures, très difficiles à réaliser, de flux de quantité de mouvements turbulents au dessus des vagues (en particulier les mesures de la campagne du "Bight of Abaco" aux Bahamas, réalisées par Snyder, Dobson, Elliot et Long). L'autre approche consiste à utiliser des résultats de simulation numériques à très haute résolution de l'écoulement du vent au dessus des vagues, c'est l'approche suivie par **Makin et Chalikov**. A l'arrivée les valeurs de  $S_{in}$  diffèrent d'un facteur 3 et sa forme spectrale est aussi assez différente. On peut espérer que les mesures de pression turbulente au dessus des vagues et sa corrélation avec la pente des vagues, réalisées par l'équipe de Mark Donelan, permettront de réduire cet écart. Un des problèmes vient du fait que dans les deux cas on extrapole des observations ou des résultats obtenus pour des vents faibles à des conditions très différentes. On se rend compte en particulier que la présence de houle peut largement modifier la croissance de la mer du vent, et la houle elle-même peut être atténuée par le vent. Ces effets sont l'objet de recherches actives.

En utilisant donc le DIA pour le terme  $S_{nl}$ , les paramètres de **Komen, K. et S. Hasselmann** pour  $S_{in}$  et  $S_{ds}$  (qui utilisent les observation du "bight of Abaco") on obtient les croissances des vagues ci-dessous. Le calcul a été réalisé avec le modèle CREST, développé au SHOM, avec un vent de terre soufflant vers le large :



**Figure 1** : croissance des vagues a partir de la cote (vent de 36km /h)

La hauteur et la période moyenne des vagues augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte, d'autant plus vite que le vent est fort. Dans l'exemple ci-dessus, le terme total  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$  est toujours positif à 40 km de la côte (en vert), en particulier aux basses fréquences (grandes périodes). Ce terme étant positif, cela veut dire que de l'énergie est ajoutée au champ de vagues qui se propage vers le large, donc la hauteur des vagues augmente vers le large.  $S$  est positif pour les fréquences au dessous du pic ( $f = 0,25$  Hz sur le graphique du haut) et négatif pour les fréquences au-dessus. Le résultat est donc une "migration" du pic vers les basses fréquences : la période moyenne des vagues augmente. On voit que ce phénomène est essentiellement le résultat des interactions non-linéaires représentées par  $S_{nl}$  (figure 2).

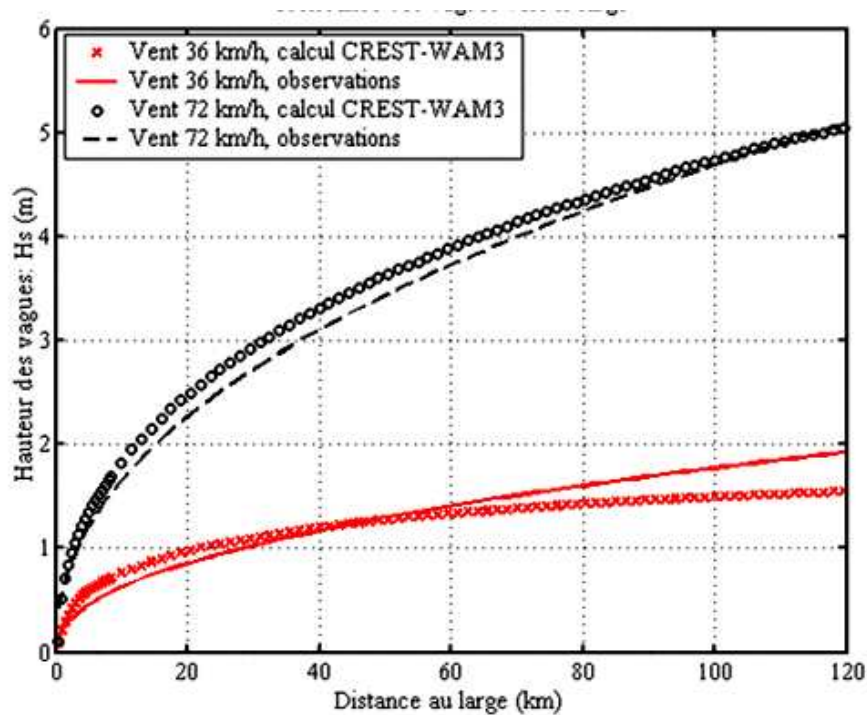


Figure 2 : croissance des vagues vers le large

### II.1.3. Discrétisation et schémas numériques

Il existe de nombreuses manières de représenter numériquement l'équation d'évolution des vagues. Historiquement les premiers calculs de propagation ont utilisé la méthode des rayons pour la transformation des vagues près de la côte. Dans ce cas les trajectoires des vagues sont calculées à partir de la profondeur depuis le large vers la côte (calcul direct), en prenant des directions de rayons parallèles au large. Le problème est que ce calcul n'est valable que pour une fréquence et une direction au large. Or les rayons calculés peuvent se croiser (ce croisement est appelé "caustique"), et dans le cadre de cette théorie cela correspond à une hauteur de vagues infinie au point de croisement... ce qui est assez gênant. En fait ce problème est évité lorsqu'on considère un grand nombre de fréquences et de directions car pour chaque composante les caustiques ne seront pas au même endroit et donc la hauteur des vagues reste finie. Ce calcul est tout de même assez coûteux. Une autre solution adoptée pour le modèle développé au SHOM est le calcul inverse : à partir d'un point où on veut connaître les vagues, on calcule les trajectoires suivies par les vagues pour y arriver.

Ci-dessous un exemple de "graphique spaghetti" : les traits qui change de couleur sont des trajectoires pour des vagues de très basses fréquence, tracées depuis un point de profondeur 8 m, vers le large. La limite du plateau continental (profondeur 100 m) est indiquée en pointillés. Les traits changent de couleur toutes les 10 minutes pour donner une idée du temps de propagation des vagues. On voit donc que la direction des vagues a tendance à devenir perpendiculaire à la côte lorsqu'on s'en approche.

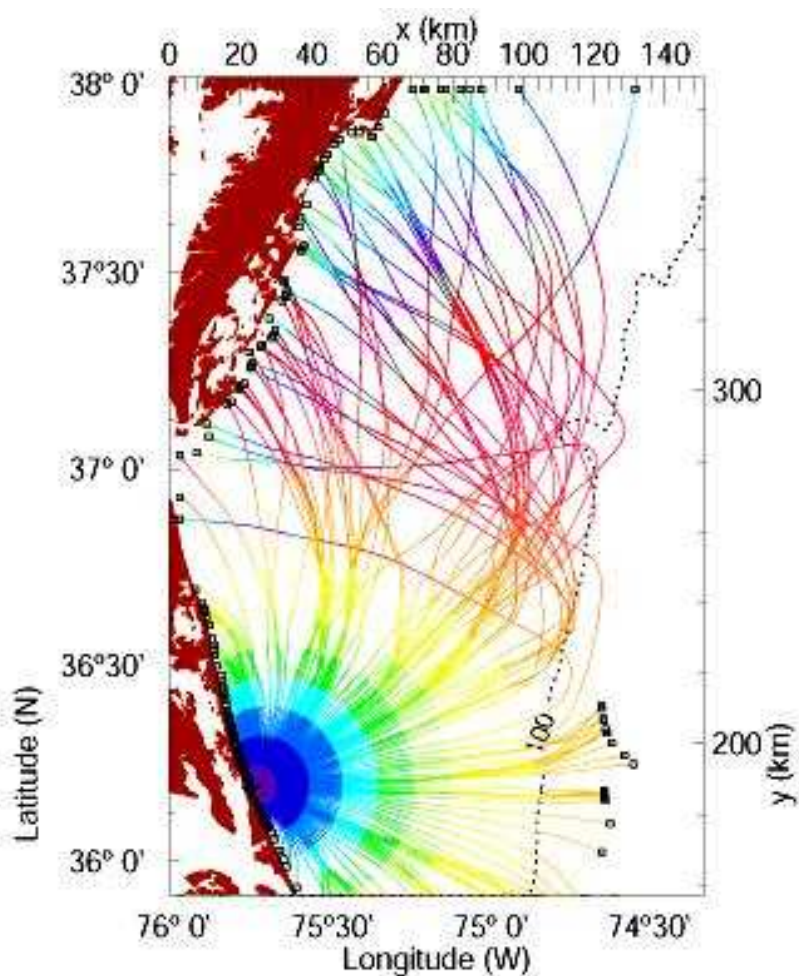


Figure 3 : graphique spaghetti

La plupart des autres modèles (SWAN, WAM, Wavewatch III ...) utilisent une représentation Eulérienne, avec des "différences finies".

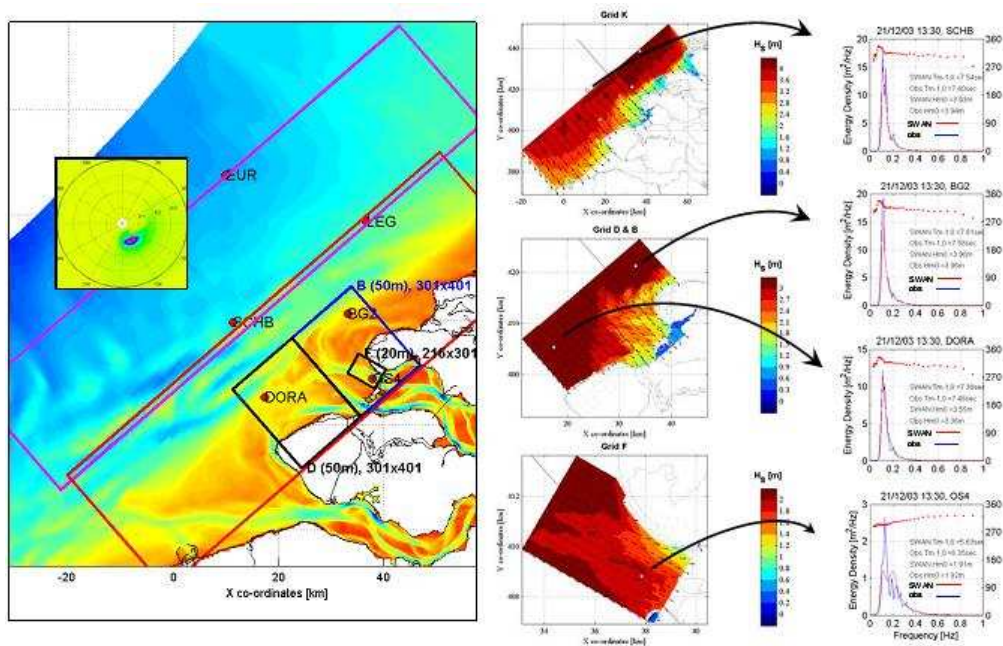


Figure 4 : Exemple de résultat de modèle SWAN

**II.2. Le modèle SWAN :**

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore, Booij et al. 2004), permet de calculer de façon réaliste les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires, à partir de données de vent, de bathymétrie et de courants. SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies (équation 7).

SWAN peut fonctionner en mode stationnaire ou transitoire. Il est formulé en coordonnées cartésiennes (domaines de faible emprise) ou sphériques (pour les petites et grandes échelles), le maillage pouvant être rectangulaire ou curviligne.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = S / \sigma \dots\dots\dots (7)$$

Avec:  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$

- $N(\sigma\theta)$  : Spectre de densité de l'action de la houle
- $\sigma$  : Fréquence relative
- $\theta$  : Direction de la houle
- $S_{in}$  : Action du vent
- $S_{nl}$  : Interaction houle-houle non linéaire
- $S_{wc}$  : Dissipation liée au moutonnement
- $S_{bf}$  : Dissipation liée au frottement au fond
- $S_{dib}$  : Dissipation liée au déferlement bathymétrique

$c_x$  et  $c_y$  correspondent aux vitesses de propagation de la houle.

Les principales caractéristiques de SWAN sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

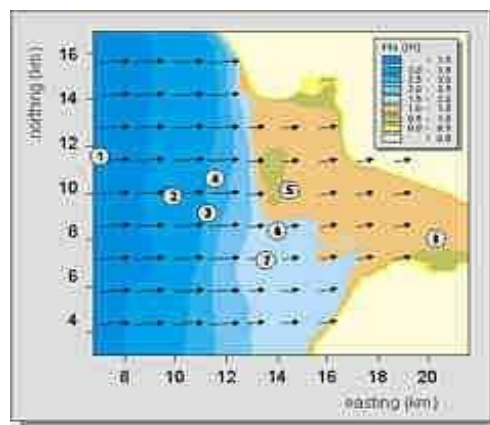
**Tableau 1 :** Principales caractéristiques de SWAN

Propriétés des modèles	SWAN
Base des formulations	Conservation de l'action de la houle
Domaine de propagation	360°
Théorie de la houle	Linéaire
Stationnaire ou transitoire	Stationnaire/Transitoire
Caractéristiques maillage	Différences finies, cartésien, sphérique, rectangulaire, curviligne
Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	Faible
Réfraction	Oui
Diffraction	Oui
Réflexion	Non
Gonflement	Oui
Déferlement	Battjes et Janssen (1978)

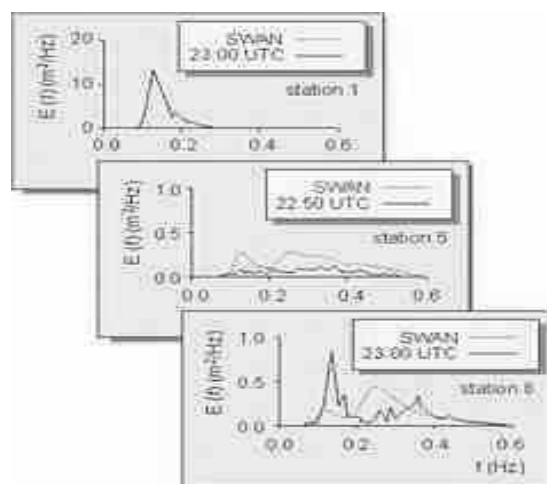
Interaction houle-courant	Oui
Interactions vague-vague	Triplet, quadruplet
génération de la houle (Vent)	Modèles de Phillips, Miles/champs de vent homogènes ou hétérogènes
Dissipation énergie par frottements au fond	Modèle de Hasselman et al. (1973), Collins (1972), Madsen et al. (1988)
Dissipation énergie par moutonnement	Oui
Calcul de la surcote (set-up)	Oui (profil et zone)
Prise en compte d'obstacles	Modèle de Seelig

**SWAN peut être appliquée à:**

- La modélisation des vagues littorales pour le port et la conception d'installation au large des côtes.
- L'aménagement du littoral et de la gestion.
- Simulation rétrospective des Vagues.



**Figure 5 :** la hauteur significative des vagues et direction moyenne de transport de l'énergie (notée avec des vecteurs) dans le Haringvliet (une branche de l'estuaire du Rhin dans le sud-ouest des Pays-Bas).



**Figure 6 :** Des spectres de vagues calculées à 23.00 UTC et les observations (éparpillés autour de 23,00 UTC) le 12 Octobre 1982, à trois stations (1, 5 et 8). Notez les différences d'échelle densité d'énergie dans les panneaux.

### II.2.1. Caractéristiques techniques de modèle swan :

SWAN est un modèle non-stationnaire d'ondes de troisième génération et est le successeur de l'arrêt de deuxième génération Hiswa modèle (Holthuijsen et al., 1989). Le modèle HISWA est actuellement largement utilisé, mais il a quelques inconvénients:

- La propagation des ondes est limitée à un secteur directionnel de moins de  $120^\circ$  (donc forte réfraction ne peut être installée)
- La grille de calcul doit être orientée dans la direction de la vague moyenne, ce qui est peu pratique sur le plan opérationnel
- Il est paramétrique de la fréquence de telle sorte que les champs d'ondes multimodal ne peut pas être simulé et ;
- La modification et l'ajout de processus physiques est assez difficile à cause des formulations hautement paramétrables qui sont utilisés. Ces limitations sont dans une large mesure à surmonter par le nouveau modèle SWAN.

Le modèle non stationnaire SWAN est basé sur l'équation discrète action spectrale équilibre et est entièrement spectrale (dans la plage totale de fréquences d'ondes et sur l'ensemble de  $360^\circ$ ). Celle-ci implique que de courte crête champs de vagues aléatoires propageant simultanément dans des directions très différentes peuvent être accueillie. La propagation des ondes est basée sur la théorie des ondes linéaires (y compris l'effet des courants). Les processus de production d'énergie éolienne, la dissipation et non linéaires vague-vague interactions sont représentées explicitement avec l'état de l'art de formulations de modèle de troisième génération. (Il est à noter que pour des raisons d'économie, plus simples formulations de première et de la deuxième génération sont également disponibles en option.) Le modèle SWAN peut également être utilisé comme un modèle stationnaire (mode fixe). Ceci est considéré comme acceptable pour la plupart des applications côtières parce que le temps de parcours des ondes de la limite au large de la côte est relativement faible par rapport à l'échelle de temps des variations du champ d'onde entrant, le vent ou la marée.

Pour éviter un temps de calcul excessif et d'obtenir un modèle robuste dans les applications pratiques, les régimes de propagation totalement implicites (dans le temps et dans l'espace) ont été mises en œuvre. Les calculs SWAN peut être faite sur une base régulière et une grille curviligne dans un système de coordonnées cartésienne. Pistes imbriquées peuvent être faites avec l'option grille régulière.

SWAN fournit de nombreuses grandeurs de sortie, y compris deux dimensions spectres, hauteur significative des vagues et de la période moyenne des vagues, la direction moyenne des vagues et étalement directionnel, racine carrée moyenne de l'orbitale près du fond mouvement induit par les vagues et la force (basé sur le rayonnement de stress gradient).

Le modèle SWAN a bien été validé et vérifié en laboratoire et plusieurs cas de terrain (complexe) (voir exemple).

Le modèle SWAN a été développé à l'Université de Delft, (Pays-Bas) et où il subit de nouvelles améliorations. Il est précisé que le nouveau standard pour la modélisation des

vagues près des côtes et des études de protection du littoral. Deltares a intégré le modèle SWAN en plusieurs modèles et applique SWAN dans ses projets de conseil.

### II.2.2. Limite de modèle swan :

Le rapprochement DIA pour le quadruplet interactions vague-vague dépend de la largeur de la distribution directionnelle de la gamme d'ondes. Il semble fonctionner raisonnablement dans de nombreux cas, mais c'est une mauvaise approximation pour de longue crête des vagues (distribution directionnelle). Elle dépend également de la résolution en fréquence. Il semble fonctionner raisonnablement dans de nombreux cas, mais c'est une mauvaise approximation des résolutions avec des ratios de fréquence très différente de 10%. Il s'agit d'un problème fondamental que les actions SWAN avec d'autres modèles de vagues de troisième génération tels que WAM et WaveWatch III.

Le rapprochement LTA pour les triades interactions vague-vague dépend de la largeur de la distribution directionnelle du spectre d'ondes. L'accord présent dans SWAN (les paramètres par défaut) semble fonctionner raisonnablement dans de nombreux cas, mais elle a été obtenue à partir d'observations dans un étroit canal à houle (longue crête des vagues).

En option SWAN calcule induit par les vagues de configuration. Dans le cas de 1D les calculs sont basés sur les équations exactes. Dans le cas 2D, les calculs sont basés sur approximatives équations. Cette approximation dans le SWAN peut seulement être appliquée à la côte ouverte (illimité fournir d'eau à l'extérieur du domaine, par exemple les côtes littorales et les estuaires) contrairement à bassin fermé, par exemple, lacs, où cette option ne doit pas être utilisée. Les effets de l'onde de courants induits sont toujours ignorés.

Dans les zones où les variations de la hauteur des vagues sont grandes dans une échelle horizontale de quelques longueurs d'onde, la diffraction devrait être utilisée. Cependant, le calcul de la diffraction dans des conditions arbitraires géophysiques est assez compliqué et nécessite un effort de calcul considérable. Pour éviter cela, une approche progressive est employée dans découplé SWAN sorte que même comportement qualitatif de la redistribution spatiale et les changements dans la direction des vagues est obtenue. Cette approche, cependant, ne gère pas correctement la diffraction dans les ports ou en face de refléter les obstacles.

Néanmoins, ces installations ne sont pas destinées à soutenir l'utilisation de SWAN sur des échelles océaniques parce que SWAN est moins efficace sur des échelles océaniques que WaveWatch III et probablement aussi moins efficace que WAM.

### SWAN permet de modéliser les phénomènes suivants :

- Processus de génération et de dissipation des vagues :
  - génération par le vent
  - dissipation par les frictions sur le fond marin
  - dissipation par l'écume (white-capping)
  - dissipation par le déferlement des vagues (dû à la bathymétrie)
  - interactions entre vagues (interactions triples en zone côtière et quadruples au large)

- Processus de propagation des vagues :
  - propagation des vagues dans l'espace
  - réfraction et 'shoaling' dus aux variations spatiales des courants et du fond marin
  - blocage et réflexion par des courants opposés
  - transmission, réfraction et arrêt sur des obstacles
- Repère de coordonnées :  
La modélisation peut s'effectuer en coordonnées cartésiennes (utilisation la plus fréquente) ou sphériques dans le cas d'étude sur une grande échelle.

### II.2.3. Principales variables utilisées :

- Les variables que l'on souhaite connaître dans l'étude des vagues sont :
  - la hauteur d'eau.
  - la période des vagues.
  - leur direction.
  - leur énergie.
- SWAN propose différentes formules pour chacune de ces variables, il convient de choisir les plus judicieuses selon les particularités du cas traité.  
Pour simplifier, on peut distinguer deux grandes familles de formules :
  - a) Celles ne prenant pas en compte la présence des courants :  
Dans ce cas, on connaîtra par exemple la période des vagues telle qu'elle est mesurée en un point fixe du domaine. Cette période ressentie correspond à la période propre de la vague à laquelle s'ajoute un Effet Doppler induit par le courant.
  - b) Celles prenant en compte la présence des courants:  
Ici on connaîtra à l'inverse la période des vagues "globalement" et indépendamment des courants.

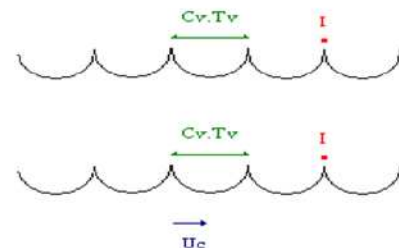
- Pour illustrer cette différence d'approche, considérons l'exemple suivant :

La période de l'onde est  $T_v$ , sa célérité  $C_v$ .

La distance sur une période est donc  $C_v.T_v$ .

Si on rajoute un courant de vitesse  $U_c$ , qui transporte

l'onde dans son ensemble, la période mesurée au point I devient  $T_v' = C_v.T_v / (C_v + U_c)$ .



1. *HSIGN*: hauteur des vagues (m)

2. *HSWELL*: hauteur des vagues dûe aux seules basses fréquences (mouvements de très grandes amplitudes)

## 3. Variables corrigeant l'effet Doppler:

1. *TM01*: période moyenne "absolue" des vagues (s)
2. *TM02*: période en moyenne quadratique "absolue" des vagues
3. *TDIR*: direction du transport d'énergie

## 4. Variables ne corrigeant pas l'effet Doppler

1. *RTM01*: période moyenne "relative" des vagues
2. *RTM02*: période moyenne quadratique "relative"
3. *DIR*: direction des vagues

En l'absence de courants,  $RTM01=TM01$ ,  $RTM02=TM02$ ,  $DIR=TDIR$ .

5. *DISSIP*: Dissipation d'énergie totale par unité de temps6. *WLEN*: Longueur de la vague (m) – WAVELENGTH7. *STEEPNESS*: =  $HSIGN/WLEN$ 8. *TRANSP*: transport d'énergie (composantes selon x et y)9. *VEL*: vitesse du courant (composantes selon x et y)10. *WIND*: vitesse du vent (composantes selon x et y)**II.2.4. Descriptif des fichiers d'entrée (Input Grid) :**

- Programme principal fichier .sw :

en dehors de ce programme principal, des fichiers d'entrée (Input Grids) peuvent être ajoutés pour définir les champs des grandeurs variables (bathymétrie, courants, niveau de l'eau, frottements sur le fond marin, vent).

Ces fichiers doivent donner en chaque point du domaine étudié la valeur de la grandeur variable.

En dehors de ce domaine, SWAN considère que toutes les variables sont constantes et égales aux valeurs des variables sur les bords du domaine.

- Fichier .loc :

Le fichier .loc contient les coordonnées des points de mesure.

- Fichier .bnd :

Contient les conditions limites exprimées en fréquences.

- Fichier .bot :

Contient la bathymétrie

**Note :**

Ils ont créé pour chaque type de fichier des "canevas" permettant de créer une simulation. Ces fichiers contiennent les principales fonctionnalités utilisées par SWAN, selon la syntaxe utilisée par les développeurs du logiciel.

Toutes les options pouvant être utilisées ne figurent pas dans ces canevas. Ils ont souhaité créer un support facilitant la rédaction d'une première simulation. Pour une étude plus précise, il est possible d'utiliser d'autres fonctionnalités (cf. manuel d'utilisation).

# **Chapitre III**

**Des applications sur  
modèles swan**

### III.1. Etude de la réfraction de la houle par logiciel SWAN dans la zone de HADJET ENNOUS :

Étude de réfraction de la houle c'est une étude de la propagation de la houle entre le large et la cote elle pour objet l'exploitation des caractéristiques de la houle équivalente au large pour définir les caractéristiques de la houle a la cote qui serviront comme d'entrée au calcul du transit sédimentaire

#### III.1.1. Principe :

Connaissant la climatologie au large, il est possible d'établir une statistique de la houle au large. Cette statistique est ensuite propagée vers la côte en utilisant des fonctions de transfert calculées suivant la bathymétrie représentée suffisamment au large, dans les fonds où les houles ne sont pas réfractées. Le coefficient de réfraction est défini de la manière suivante :

$$k_r = \frac{H_{local}}{H_{large}} \dots\dots\dots(8)$$

Les calculs de la réfraction de la houle entre le large et la côte ont été effectués par le modèle mathématique SWAN pour différentes conditions de houle au large (hauteur, période et direction).

Le logiciel est modéliser la propagation de la houle en prenant notamment en compte les phénomènes de :

- Réfraction, sur les fonds et autour des ouvrages,
- Déferlement,

Et est donc parfaitement adopté à la problématique du littoral Ouest algérien. Le coefficient de réfraction est calculé par Swan.

Les résultats sont alors exploités sous deux formes :

- Les épures de réfraction qui montrent qualitativement comment hauteur de houle et direction changent au cours de la propagation de la houle.
- La détermination quantitative des conditions de la houle en quelques points situés sur l'isobathe -10 m, qui permet l'établissement de la statistique locale de la houle à cette profondeur qui sera utilisée pour l'estimation de la capacité de transport par la suite.

#### III.1.2. Données d'entrées :

Dans cette étude on a utilise des données statistiques de houle au large et des données bathymétriques, donné par Laboratoire d'Études Maritimes (LEM)

#### III.1.3. Les données bathymétriques :

La bathymétrie utilisée pour cette étude est celle issue de la digitalisation de la carte élaborée par l'INC (d'après les levés de 1867-1868 et 1924-1925) intitulée « Mer Méditerranée cote d'Algérie de Kef el Souari à Tipaza -échelle : 1/120000 (Lat 36°37') », ainsi que celle issue

de la campagne de reconnaissances sur site réalisée en 2010 par le LEM dans le cadre de l'étude de protection de protection du site de HADJRET ENNOUSS.

#### III.1.4. Les données de houle au large :

Elles sont prises du document de l'U.S. Naval Weather Command intitulé « Summary of Synoptic Meteorological Observations » (S.S.M.O tome II, Zone Algiers (1963-1970)). Elles sont traitées pour obtenir un tableau contenant : les amplitudes de houle par secteur et par périodicité d'apparition ; en portant les fréquences d'apparition et les hauteurs de houle (en mètre) sur un graphe semi-logarithmique et en utilisant les droites de régression de type :

$$y = a \ln(x) + b$$

$$x = \text{périodicité d'apparition est égale à : } x = P_n = \frac{1}{3 \times 365 \times n}$$

Ou et n= période de retour (annuelle n=1, n=2 bianuelle ....

y = hauteur de houle recherchée.

On obtient les résultats récapitulés dans l'annexe 1.

Pour conclure on obtient un tableau donnant les hauteurs de houle par période et ceci pour chaque direction (annexe 1), c'est un tableau récapitulatif qui sera utilisé lors du remplissage des fichiers de calculs de logiciel SWAN.

#### III.1.5. Choix des directions :

Les directions traitées sont choisies (Figure 4) en fonction de la configuration physique du site et des fréquences d'apparition (SSMO), les directions retenues sont :

- Le Nord (N360) : Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale ;
- Le Nord-Ouest (N315), le Nord-Est (N45) et Ouest (N270) qui sont des houles à incidence oblique.



**Figure 7 :** la zone de HADJRET-EN-NOUS

Lorsqu'on termine ces étapes on passe à l'étape de l'utilisation de logiciel informatique elle se base sur l'utilisation de deux logiciels et de deux outils informatiques à savoir :

- Logiciels : SWAN et MapInfo 8
- Outils : Vertical Mapper et la moulinette Sogreah

Concernant la moulinette Sogreah est une sorte de convertisseur développé par SOGREAH permettant la création de fichiers reconnaissables par Swan et des autres applications.

### III.1.6. Étapes de la modélisation :

- 1- Calage de la carte marine de la Wilaya de Tipaza dans la projection Universal Transverse Mercator (WGS 84), UTM Zone 31, Northern Hemisphere => Sur MapInfo
- 2- Digitalisation des points et des lignes => Sur MapInfo
- 3- Extraction des points à partir des lignes digitalisées => Par Vertical Mapper.
- 4- Extraction des coordonnées des points existants => Par MapInfo.
- 5- Création de la table BathyTerrain => Par MapInfo.
- 6- Création de la table des Fonds => Par MapInfo.
- 7- Création de la grille d'interpolation => Par Vertical Mapper.
- 8- Choix de l'emprise du modèle :
  - Modèle de Détail
  - Modèle d'Ensemble
 } => Sur MapInfo.
- 9- Construction des grilles régulières des points :

- La grille du modèle d'ensemble.
  - La grille du modèle de détail.
- 10- Interpolation sur la grille régulière des points du MNT : les grilles régulières des points seront interpolées sur le MNT, pour en extraire les valeurs des profondeurs en chaque point de la grille créée => Vertical Mapper.  
En utilisant la fonction : Show Grid Manager => Analysis => Point Inspection. Puis on construit ainsi les fichiers grid :
- Grid\_mod\_ens.tab
  - Grid\_mod\_det.tab
- 11- Exportation des fichiers fonds par la moulinette Sogreah. Pour créer les fichiers Hiswa :
- |  |   |   |  |
|--|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grid_mod_ens</li> <li>- Grid_mod_det</li> </ul> | } | → | <p>Exporter la table via la moulinette Sogreah, pour créer les fichiers d'extension .HIW</p> |
|--|---|---|--|
- 12- Création des fichiers .BOT en renommant les fichiers Hiswa en fichiers .
- 13- Création des points sur la carte bathymétrique selon les besoins de projet (de manière générale en choisissant 20 points entre la profondeur 3 et 10m) puis l'extraction des coordonnées de ces points à l'aide du logiciel Vertical Mapper
- 14- Création d'un fichier .dat à l'aide du logiciel surfer ce fichier contient les profondeurs de 20 points extraits
- 15- Regroupement des fichiers nécessaires au calcul final :
- ens.SWN (annexe 2)
  - det.SWN (annexe 2)
  - goswan
  - SWAN\_411.EXE
  - SWAN\_411.BOT
  - ens.BOT (modèle d'ensemble)
  - det.BOT (modèle de détail)
  - point.dat
- 16- lancement du calcul en double clic sur goswan, on aura les fichiers résultats suivants :
- ens.PRT
  - det.PRT
- } => Il donne le compte rendu du calcul et affiche les erreurs
- ens.SWA
  - det.SWA
- } => Ce sont les fichiers résultats en chaque nœud de la grille du calcul
- ens.NST
  - det.NST
- } => Donne des résultats sous forme de graphe
- ens.RES
  - det.RES
- } => Donne des résultats sous forme de tableau

**III.1.6.1. Résultats de la propagation de la houle du large vers la côte pour les périodes de retour annuelle et vingtennale :**

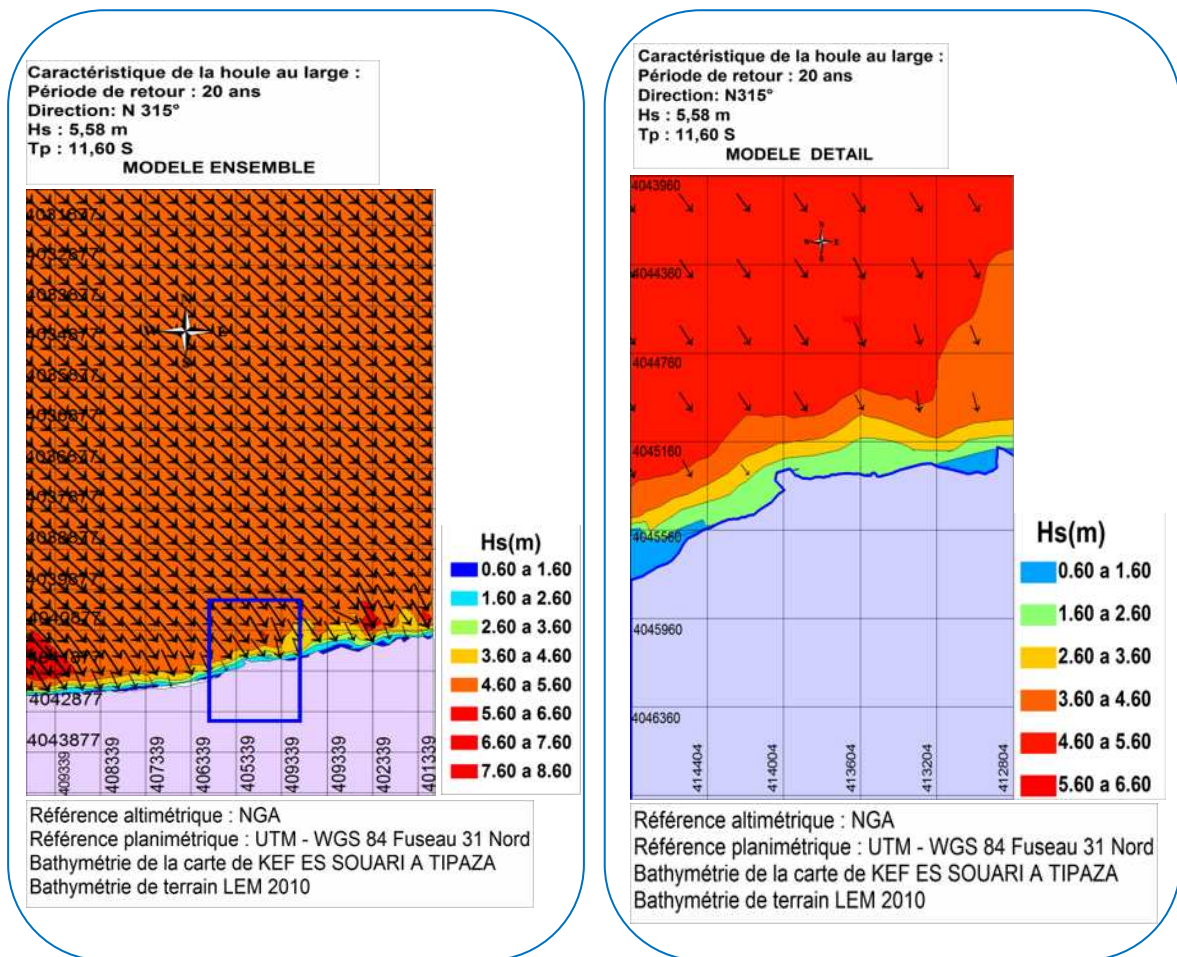
Pour les houles annuelles traitées et destinées au calcul du transit sédimentaire, les résultats sont donnés par le tableau 1 suivant :

**Tableau 1 : Conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude**

Période	Direction de la houle au large			
	N 270°	N 315°	N 360°	N 45°
6s	Hs =1,19m	Hs =1,10m	Hs =1,00m	Hs =1,09m
8s	Hs =2,67m	Hs =2,64m	Hs =2,67m	Hs =2,56m
10s	Hs =5,54m	Hs =4,53m	Hs =4,92m	Hs =5,05m

Pour les houles vingtennales les résultats sont présentés sous forme des épures comme suit :

**a. la direction Nord Ouest :**

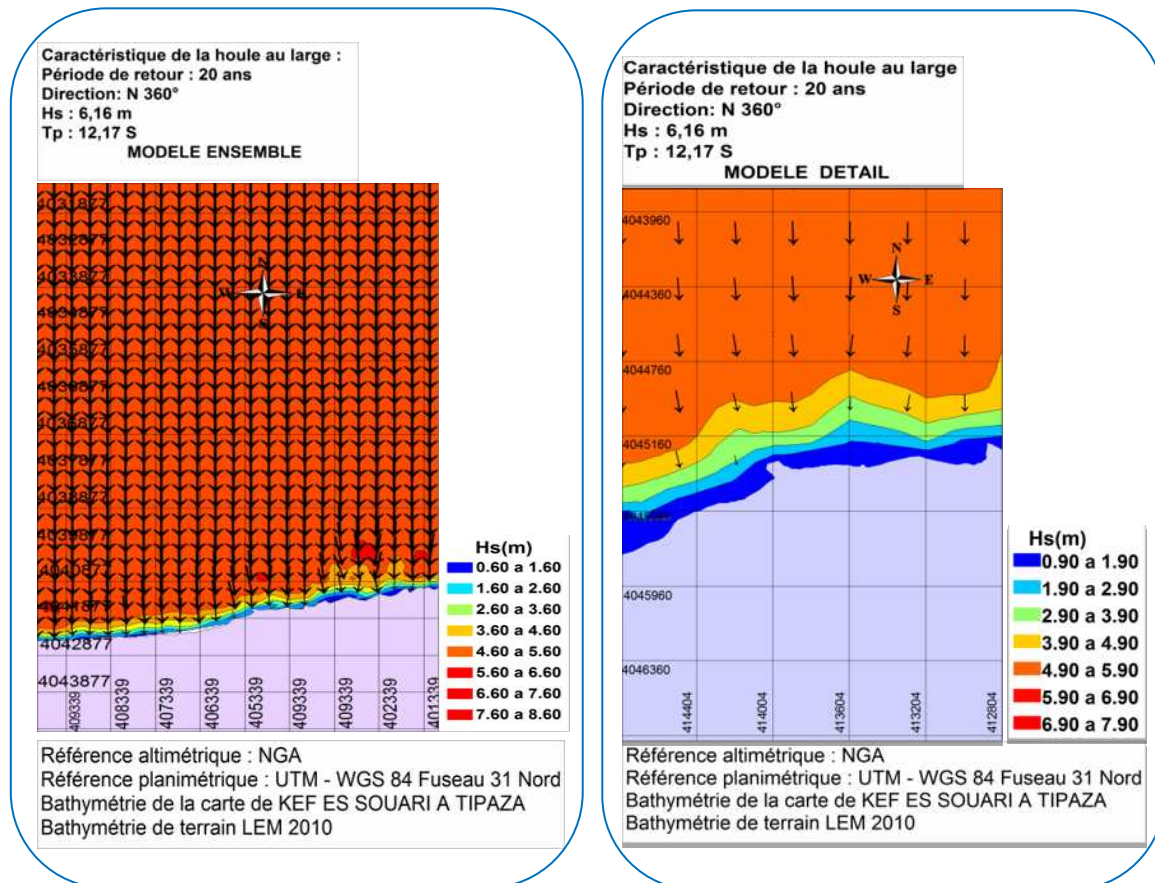


**Figure 8:** Réfraction de la houle pour une direction N°315 et une période de 11,16s BELLOULOU et GANA,(2012)

Commentaire

Les houles de direction Nord-Ouest sont les plus énergétiques et peuvent atteindre la zone de HADJRET-EN-NOUS, le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0,72 à 10 m de profondeur (annexe 1). Elles perdent que peu de leur énergie du large à l'approche de la côte.

**b. La direction Nord**

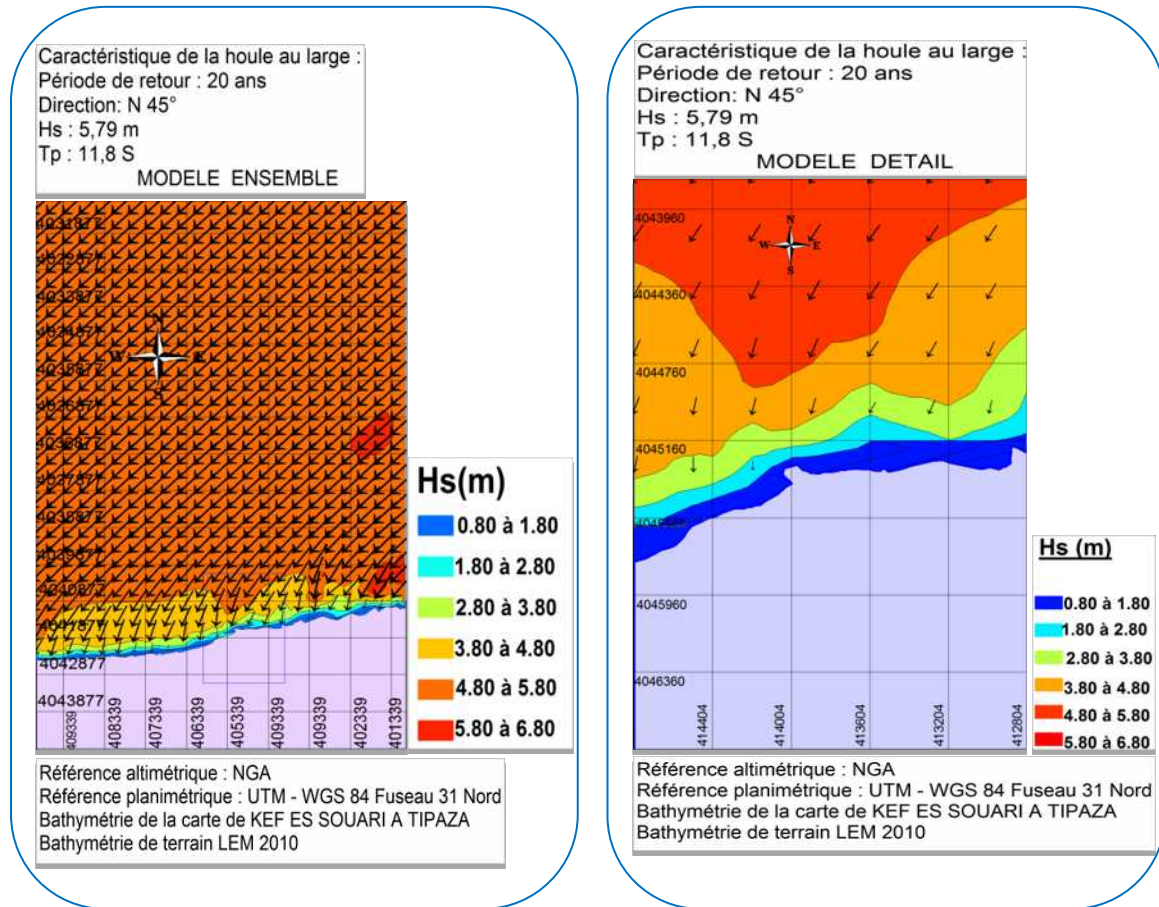


**Figure 9:** Réfraction de la houle pour une direction N°360 et une période de 12,17s. BELLOULOU et GANA, (2012)

Commentaire

La figure N°15 présentant les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord et une période de 12,17 secondes, la propagation se fait de façon frontale, le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.63 à 10 m de profondeur, donc les houles ne perdent que 27% de leur énergie. Les orthogonales atteindront la côte avec un angle d'arrivée en moyenne égal à 360°.

c. La direction Est :



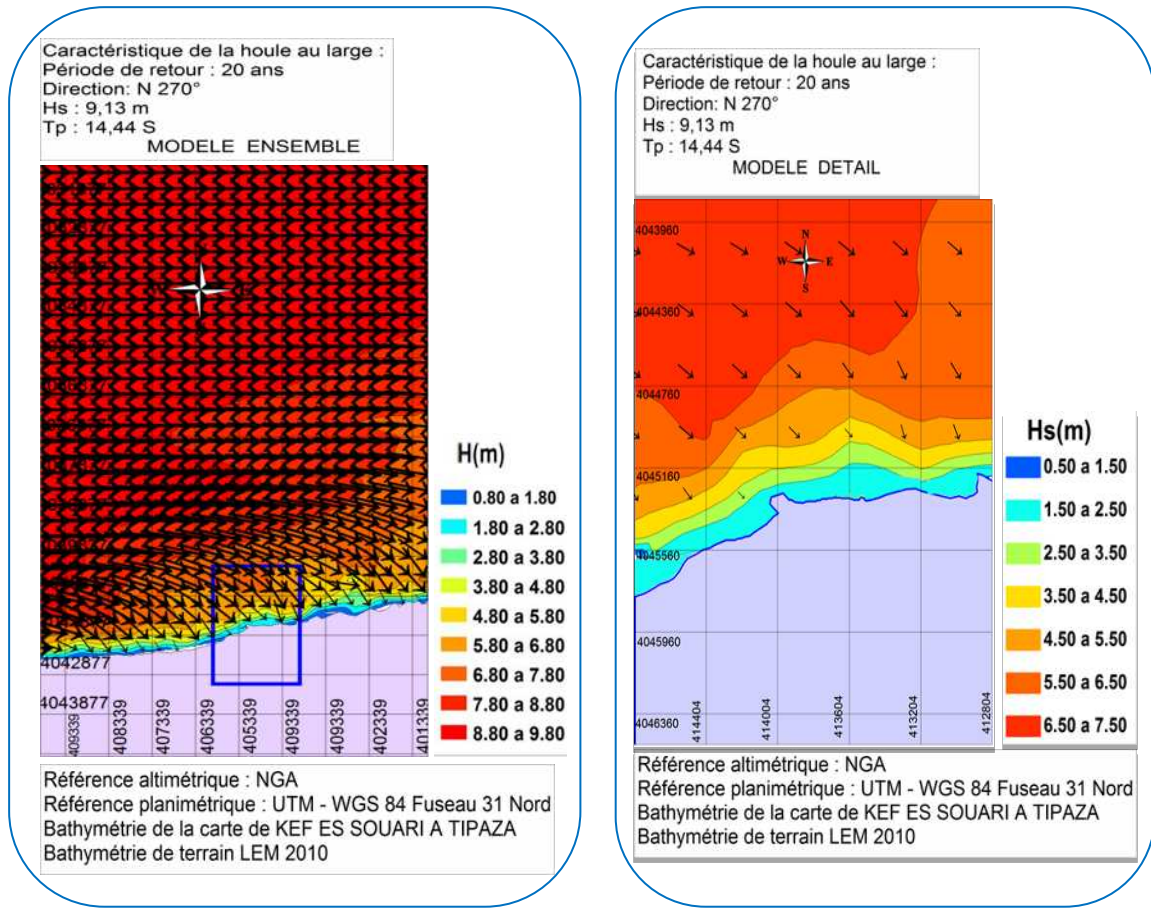
**Figure 10:** Réfraction de la houle pour une direction N°45 et une période de 11,8s.  
 BELLOULOU et GANA, (2012)

**Commentaire :**

L'étude de la réfraction sur ce cas démontre que pour une houle de secteur Est et de période de 11,8 secondes, la réfraction s'opère sur cette dernière de façon à diminuer son énergie au fur et à mesure de son évolution vers la côte, avec un coefficient de réfraction en moyenne égal à 0,57 à 10m de profondeur. Donc elles ne conservent que la moitié de leur énergie du large.

La dissipation de l'énergie se présente par un pivotement des orthogonales en direction Nord – Est à sud avec un angle d'arrivée en moyen égal à 46°

d. La direction Ouest :



**Figure 11:** Réfraction de la houle pour une direction N°270 et une période de 14,44s. BELLOULOU et GANA, (2012)

**Commentaire :**

Les houles de direction Ouest sont les moins énergétiques par rapport aux autres directions (tableau n°2), en atteignant la zone d'étude, le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0,46 à 10 m de profondeur. Elles perdent la moitié de leur énergie du large qui s'opère sur cette figure de façon à diminuer leur énergie au fur et à mesure de leur évolution vers la côte. La dissipation de l'énergie se présente par un pivotement des orthogonales en direction Nord-Ouest à Nord et donc un angle moyen de 22°.

**III.1.6.2. Conclusion sur l'étude de la réfraction de la houle :**

Les houles les plus énergétiques et qui peuvent influencer sur la zone de HADJRET-EN-NOUS sont les houles de Nord Ouest, c'est celles qui vont être prises en considération dans le dimensionnement des ouvrages de protection car elles conservent leur énergie de départ et arrivent avec une incidence frontale sur le site d'étude.

## III.2. Deuxième exemples sur l'application de swan :

La présente étude a été réalisée dans le cadre des missions de service public qui ont été confiées au Service Géologique Régional Aquitaine du BRGM. Elle est cofinancée par l'Europe, l'Etat, la Région Aquitaine, le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques et le BRGM. Ces travaux entrent dans le cadre de la convention de partenariat de l'Observatoire de la Côte Aquitaine s'inscrivant dans le CPER 2007-2013.

Le contenu de cette étude a été réalisé en 2004/2005 mais n'a pu être publié qu'en 2009. Les objectifs principaux étant d'analyser le rôle des facteurs océanographiques (marée et houle) sur les instabilités de la Côte Basque. Les résultats de cette étude pourront également servir à l'étude de la qualité des eaux ou bien à l'évaluation des transports sédimentaires proches de la côte.

### III.2.1. Méthodologie générale :

La première étape consiste à caractériser les conditions de vague du large qui atteignent la côte aquitaine sud. Pour cela, les données au large du modèle Wavewatch III de la NOAA (NWW3) sont tout d'abord exploitées et traitées. Un outil de classification des états de mer saisonniers et annuels a été développé par le laboratoire EPOC de l'Université de Bordeaux 1. En traitant une série temporelle de paramètres de vagues d'une durée de 7 ans en un point de NWW3 à 1000 m de fond, 12 classes de vagues sont établies. Elles représentent les configurations les plus récurrentes dans le sud du Golfe de Gascogne. Deux classes représentent les houles de tempête très énergétiques, 5 autres, les houles moyennes et fortes et les 5 dernières classes regroupent des états de mer intermédiaires entre houle et mer de vent. Les moyennes annuelles et les valeurs extrêmes de 3 périodes de retour différentes (1, 5 et 10 ans) sont également calculées avec le même jeu de données.

Dans un deuxième temps, ces conditions sont propagées jusqu'à la côte avec un modèle adapté, SWAN (université. Delft), qui a été implanté sur une partie du Golfe de Gascogne et sur la Côte Basque. Il s'agit d'un modèle côtier qui prend en compte les processus de transformation des vagues depuis le large jusqu'à la côte. De nombreux tests de sensibilité ont été effectués avec les données d'une campagne de mesures (menée conjointement par les laboratoires de Lasagec, EPOC et le BRGM) sur la plage d'Anglet en 2002 et avec les enregistrements des bouées Triaxys et Datawell plus au large. Ces tests ont permis de mieux connaître la sensibilité du modèle au type de forçage et à la résolution utilisée et de cerner les zones de validité des résultats à proximité du trait de côte.

### III.2.2. Implémentation du modèle :

#### III.2.2.1. Données utilisées :

##### III.2.2.1.1. Topo-Bathymétrie-Construction des MNT :

Trois grilles MNT (Modèle Numérique de Terrain) topo-bathymétriques sont construites. La première (B1), de grande emprise, s'étend de 2.46°W/43.27°N à 1.4°W/ 44°N avec une résolution de 250m. Son coin en haut à gauche correspond au nœud de forçage WW3 qui a

servit à la classification. Les données bathymétriques exploitées proviennent essentiellement de GEBCO et du SHOM et les données topographiques du MNT IGN. La deuxième (B2), plus fine, et centrée sur la plage d'Anglet, s'étend de 1.6°W/43.43°N à 1,5°W/43,56°N avec une résolution de 50m. Les données bathymétriques ont été collectées lors d'une campagne de mesures et le MNT IGN (résolution 25m) a été réutilisé pour la topographie. Les ouvrages de défense ont également été pris en compte. La dernière (B3) est l'extraction de la grille B1 sur la même emprise que la grille B2.

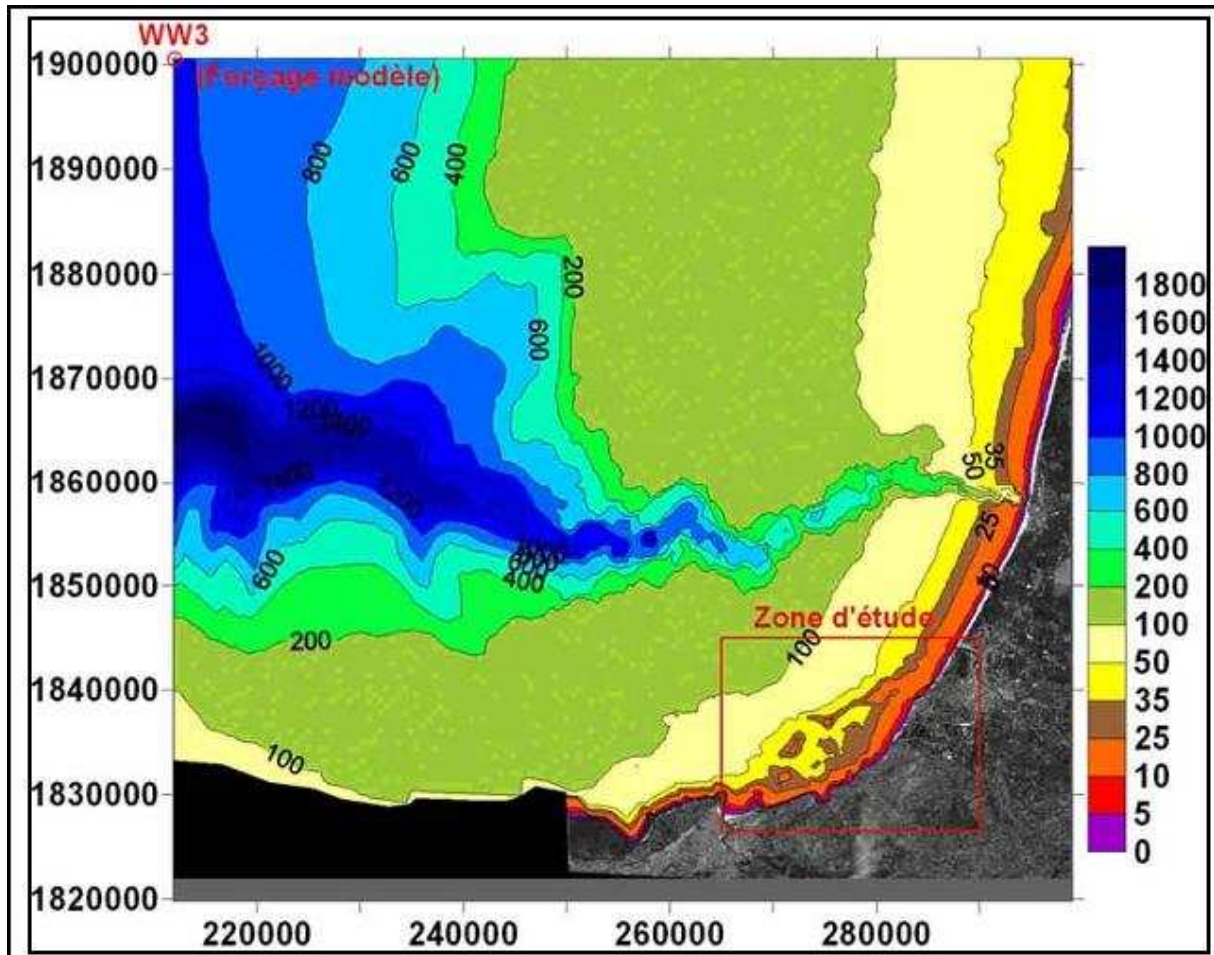
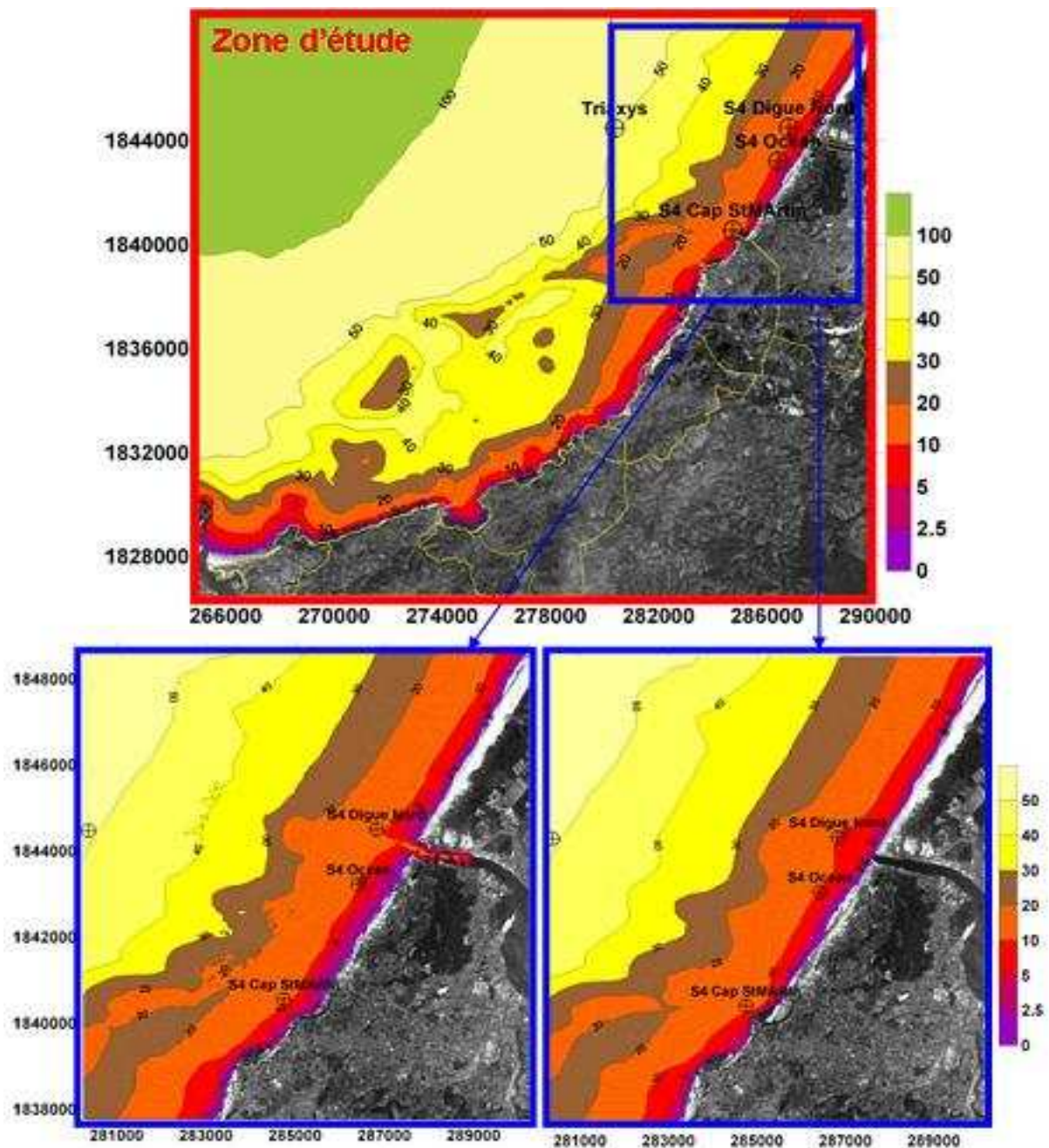


Figure 12 : MNT grande emprise (250mx250m) : B1



**Figure 13 :** Haut : Zone d'étude. Bas : Comparaison des MNT de la petite emprise. Gauche : à 50m de résolution (B2). Droite : à 50m de résolution (B3)

### III.2.2.2. Paramétrages de la modélisation :

En lui fournissant la bathymétrie, le vent et les caractéristiques de la houle au large (hauteur, période et direction), SWAN est capable de déterminer la transformation de la houle lors de sa propagation jusqu'au rivage en termes de hauteur, direction, période, surcote induite par les vagues, etc. Pour cela SWAN utilise un spectre directionnel d'énergie représentatif de l'état de mer (correspondant en général à la superposition de plusieurs trains d'ondes) qui est modifié par les différents processus côtiers (réfraction, diffraction, dissipation, etc.).

Pour construire le spectre initial, SWAN utilise les valeurs de hauteur ( $H_s$ ), période ( $T_p$ ) et direction ( $D_p$ ) de houle indiquées au départ mais aussi des paramètres définissant la forme ou

le type de spectre. Les paramètres choisis pour cette étude correspondent au spectre de type « JONSWAP » qui est le plus utilisé. Il est également nécessaire de préciser l'étalement directionnel qui tient compte de la variation des directions des trains d'ondes composant le spectre par rapport à la direction moyenne. Par exemple, pour une mer bien formée (semblable à la propagation d'une onde monochromatique), l'étalement directionnel atteint seulement quelques degrés alors que pour une mer désordonnée, il peut atteindre 30 à 50°. Pour décrire ce spectre, ils ont décomposé en 30 fréquences allant de 0.04 à 0.5 hz (de 2 à 25 secondes) et en 36 secteurs de 10° chacun.

Les autres processus activés dans SWAN, indispensables lors de l'étude de la propagation de la houle jusqu'au rivage, sont : la réfraction, la diffraction, les interactions houle-houle (triplets), le déferlement de la houle et le frottement au fond.

Pour ce dernier processus, c'est la formulation de Madsen qui a été choisie car c'est la plus communément utilisée.

Enfin, le mode stationnaire a été utilisé. Il considère que le forçage est suffisamment long pour atteindre un état de mer stationnaire.

Afin de tester les capacités de SWAN, des tests de sensibilité sont effectués dans le paragraphe suivant. Ils concernent aussi bien le type de forçage imposé (paramètres ou spectres, données de modèles ou mesurées) que les limites de validité du modèle, notamment en profondeur (en fonction de la résolution de la bathymétrie et de la grille de calcul). Deux séries de tests permettent de tester des conditions plus ou moins énergétiques de vagues. L'objectif est d'estimer l'incertitude introduite par l'utilisation de la configuration la plus classique du modèle (résolution lâche de 250m et forçage avec les résultats de modèles globaux sous forme de paramètres) par rapport à des configurations plus complètes (haute résolution de 50m et spectres directionnels in-situ) mais plus rares faute de données disponibles.

### III.2.3. Tests de sensibilité :

Deux types de tests sont effectués. Le premier, lors de la campagne de mesure, du 18/03 à 12h au 24/03 à 12h, correspond à des conditions de faible énergie ( $H_s < 2m$ ).

De nombreuses données de forçage au large et de validation à la côte étant disponibles, plusieurs configurations de simulations ont été testées et comparées pour évaluer l'importance de la résolution spatiale de la bathymétrie utilisée et de la précision du forçage.

Le deuxième, pour 2 périodes de tempête en 2002 (mai et novembre) est une validation de la configuration dite « conditions normales » avec des mesures in-situ à environ 49m de profondeur.

L'analyse des résultats s'appuie sur le triplet hauteur, période et direction, au niveau de l'ensemble du domaine et en se focalisant sur la ligne de rivage. Ainsi, la limite de validité des résultats très proches du rivage est estimée.

**III.2.3.1. Pour des conditions calmes du 18/03/03 au 24/03/03 :****III.2.3.1.1. Tests sur la résolution et le type de forçage :**

Quatre types de simulation sont testés :

- Optimale: Grille B2, forcée au bord ouest et au nord-ouest par spectre directionnel de la bouée Triaxys.
- Spectre Jonswap: Grille B2, forcée sur tout le bord ouest et au nord-ouest avec les paramètres de la bouée Triaxys (Hs, Tp, Dp).
- Bathy 250m: Grille B3, forcé par spectre directionnel Triaxys sur le bord ouest et au nord-ouest.
- Conditions normales: Grille B1, forcée avec les paramètres NWW3 sur tout le bord ouest et au nord-ouest et les conditions de vent de NWW3 uniformément sur la grille.

Les figures 11 à 14 présentent des exemples de cartes obtenus pour les quatre types de configuration le 23/03/03 à 00h. Ces résultats sont extraits de l'emprise de la grille B2. Quelque soit la configuration, les mêmes structures spatiales et les mêmes ordres de grandeur sont retrouvés.

La résolution la plus lâche, à 250m (figure 13 et figure 14), ne permet pas d'avoir autant de détails que celle à 50m (notamment l'influence des ouvrages) surtout pour les petits fonds. Plus au large, le résultat reste satisfaisant pour les 2 résolutions.

On note très peu de différences pour les configurations « optimale » et « spectre Jonswap » d'une part et « Bathy 250m » et « conditions normales » d'autre part, ce qui montre une bonne restitution des conditions aux limites avec le triplet (Hs, Tp, Dp) issu de NWW3. Les figures 15, 16 et 17 présentent l'extraction des séries temporelles pour les 3 paramètres de vagues (Hs, Tp et Dp) au niveau des 3 capteurs S4 sur toute la période de calcul (18 au 23 mars).

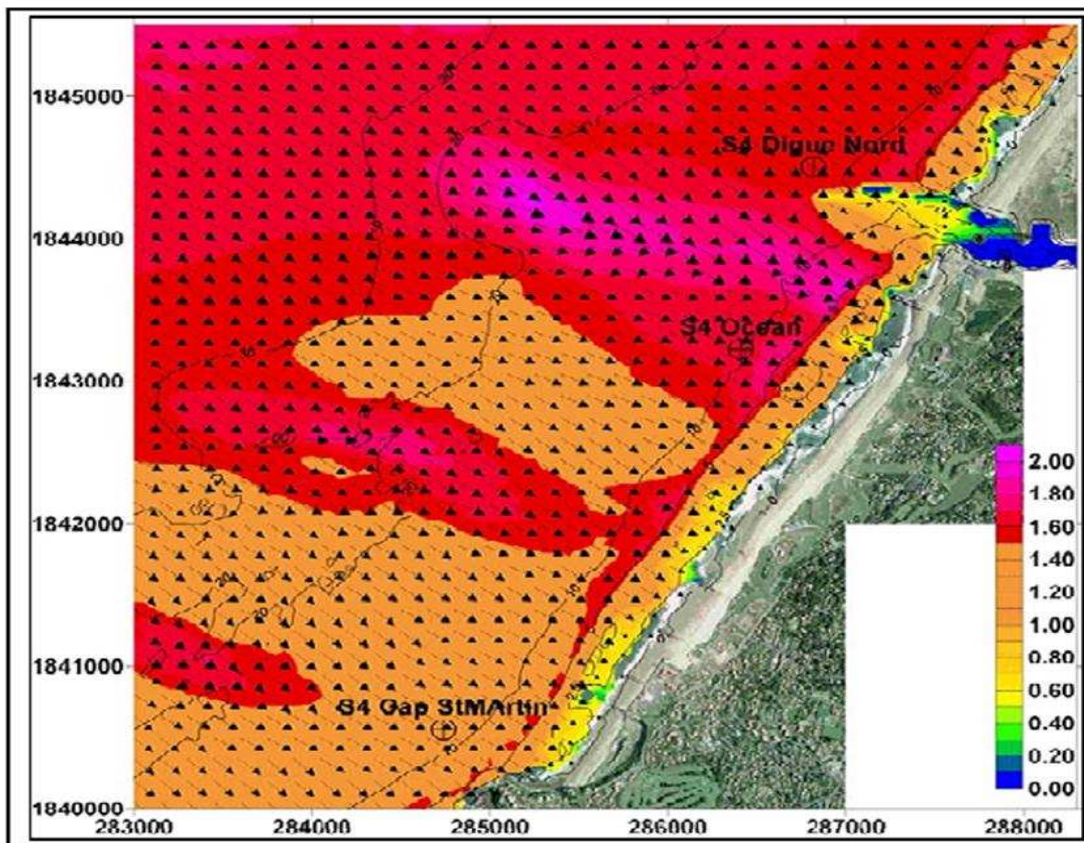


Figure 14 : Résultats pour la « simulation optimale » le 23/03/03 à 00h  
(BRGM/RP-57173-FR juillet 2009)

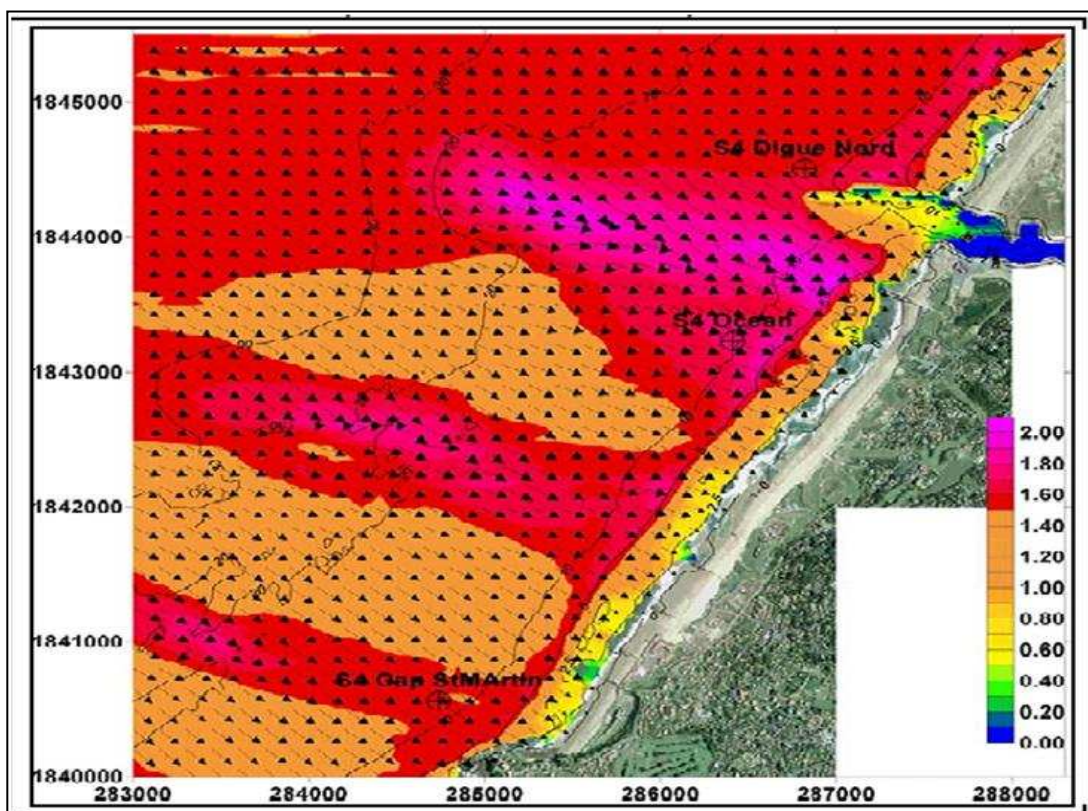


Figure 15 : Résultat pour la simulation « Spectre Jonswap » le 23/03/03 à 00h  
(BRGM/RP-57173-FR juillet 2009)

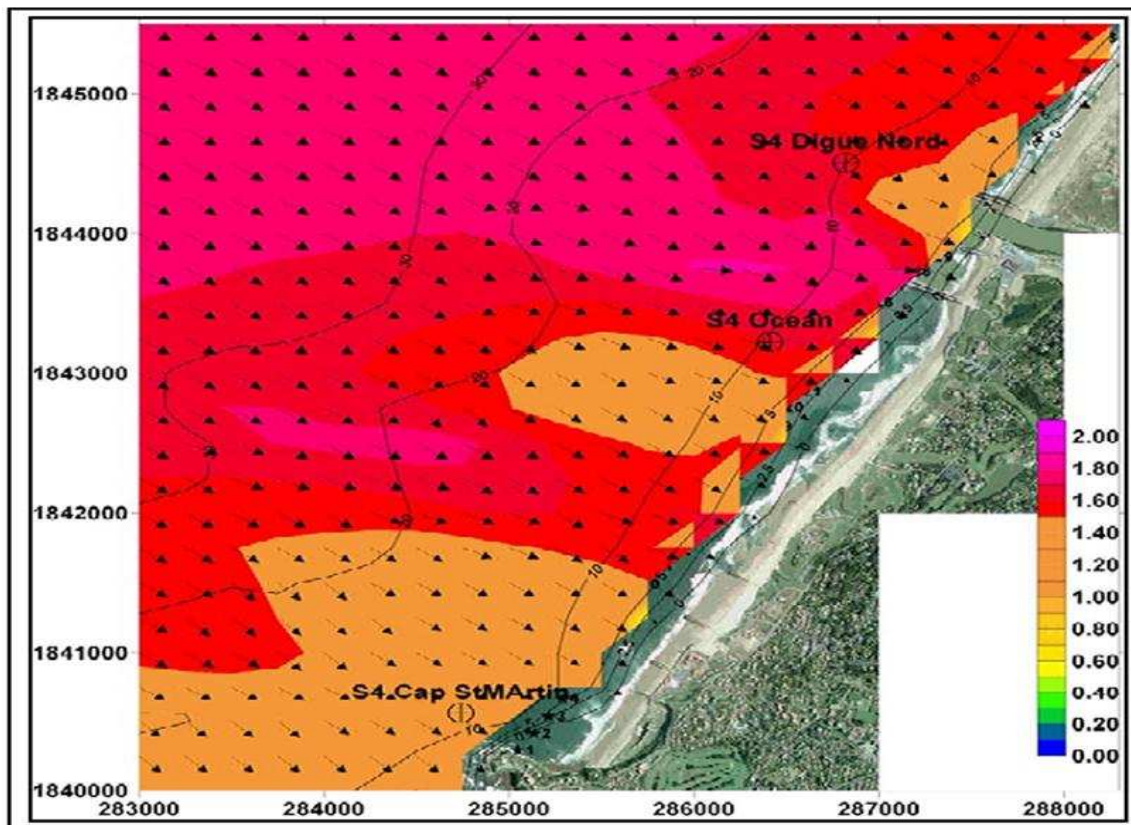


Figure 16 : Résultats pour la simulation « Bathy 250m » le 23/03/03 à 00h

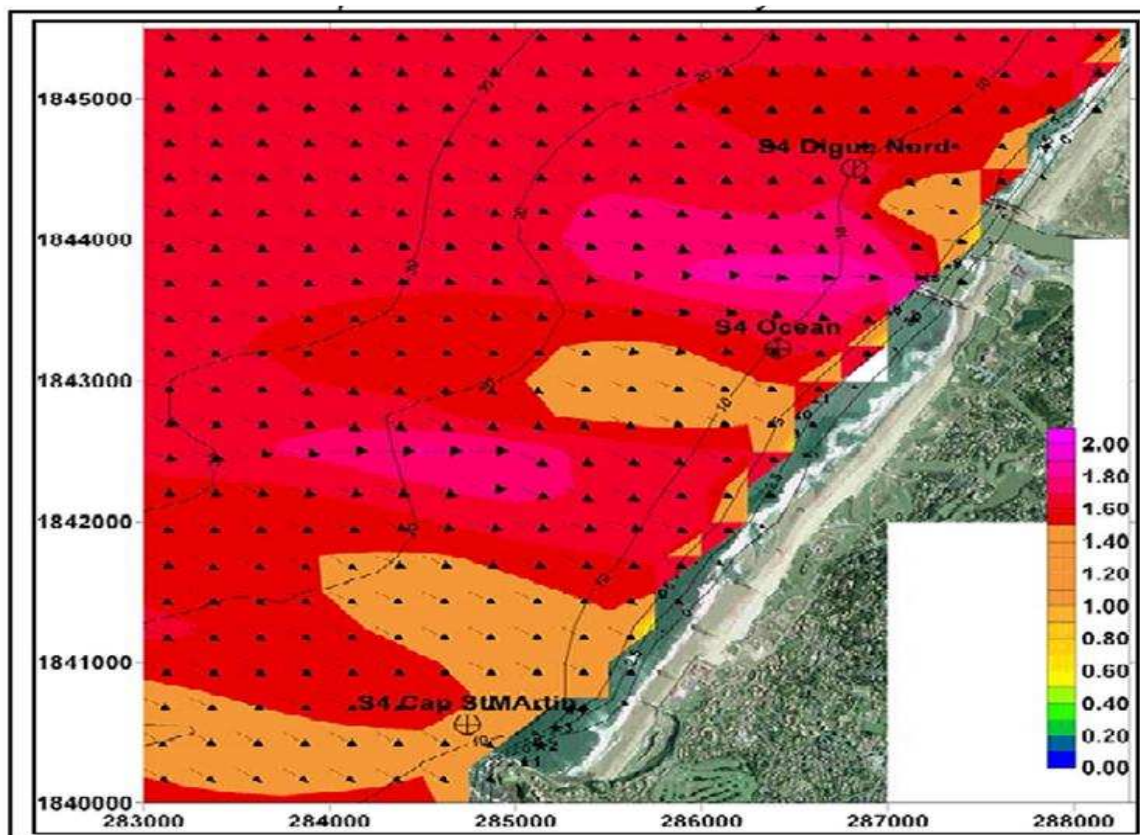
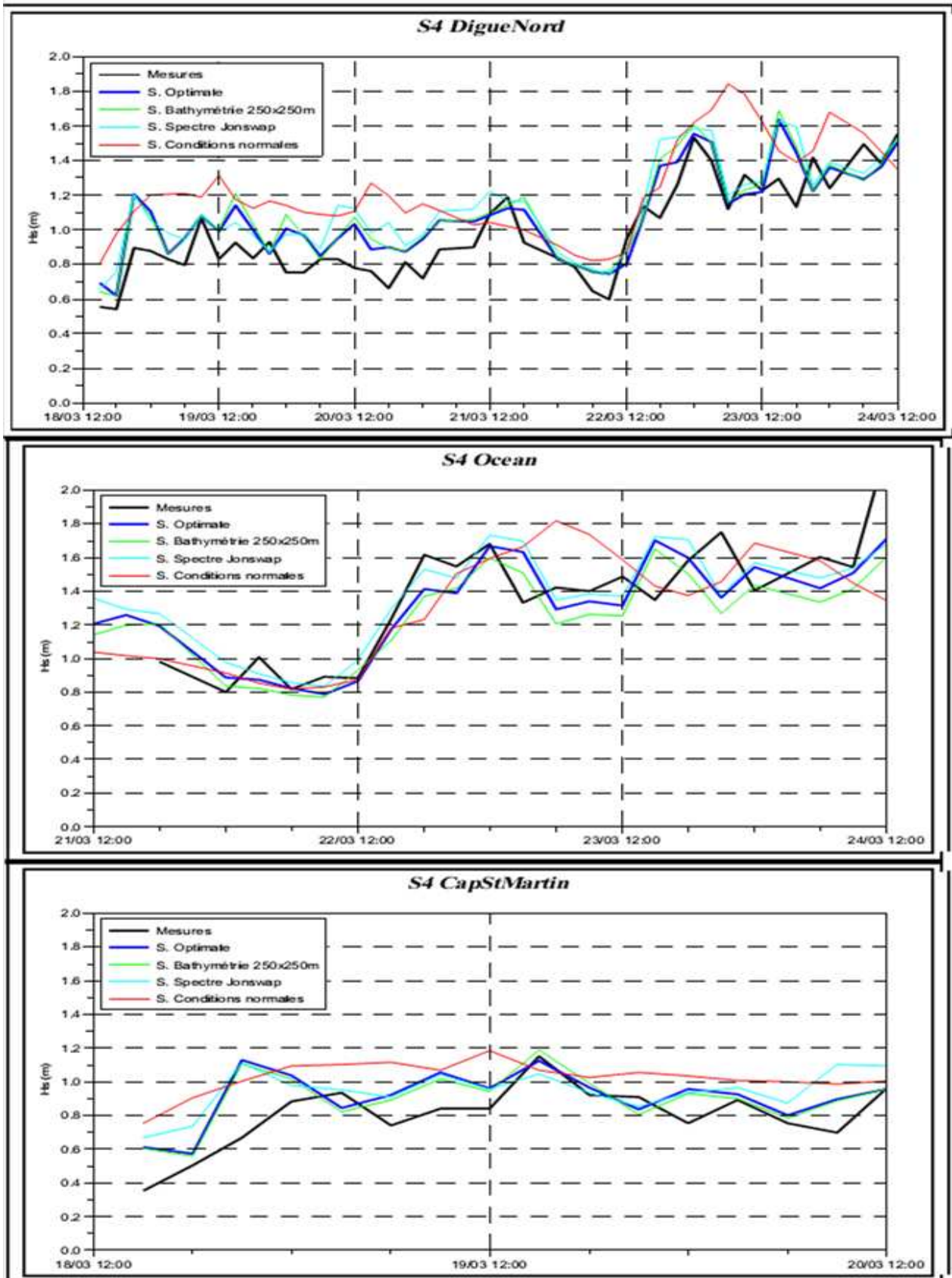


Figure 17 : Résultats pour la simulation « conditions normales » le 23/03/03 à 00h  
(BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).



**Figure 18 :** Comparaison des hauteurs significatives calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4 (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).

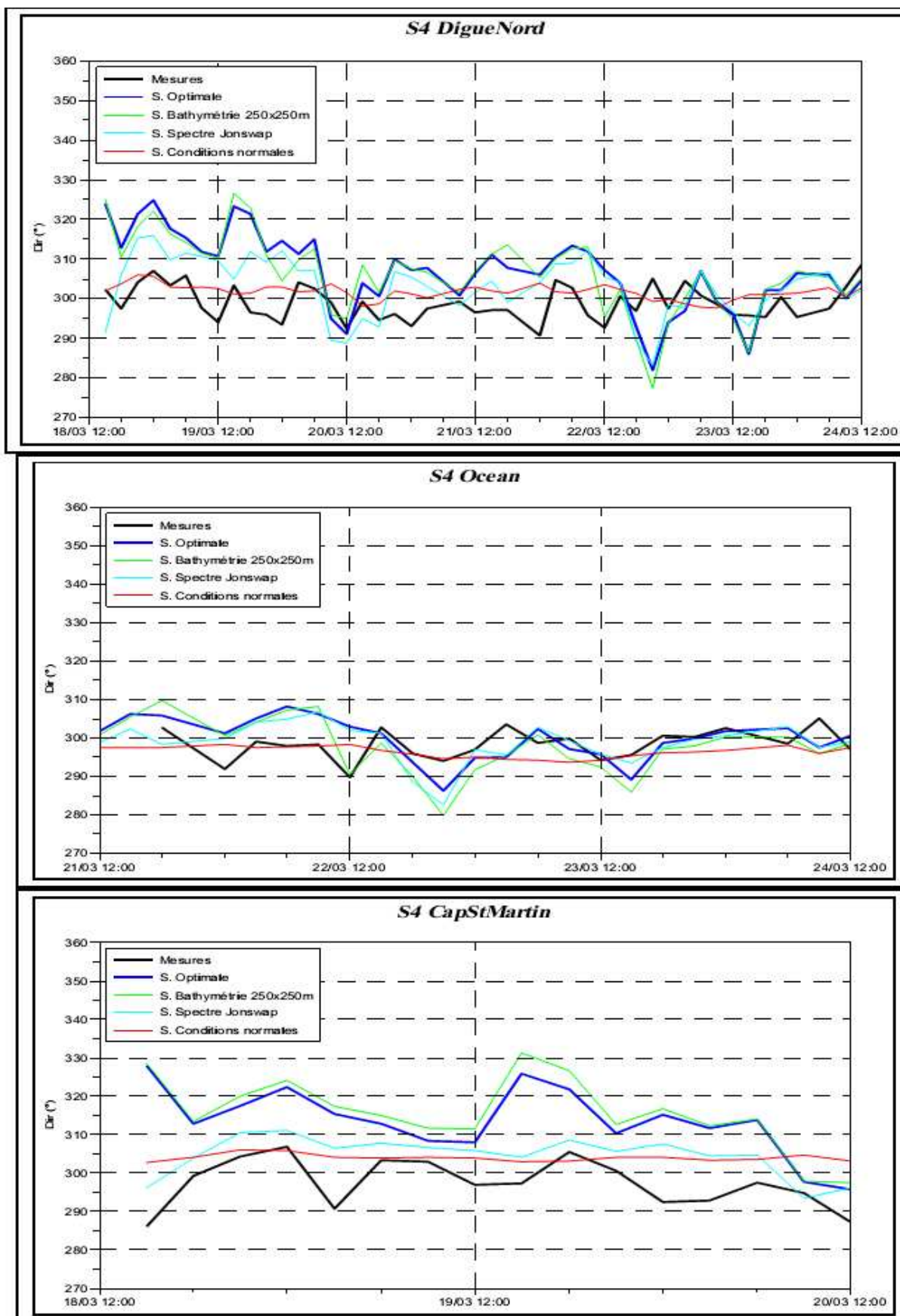


Figure 19 : Comparaison des directions pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4 (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).

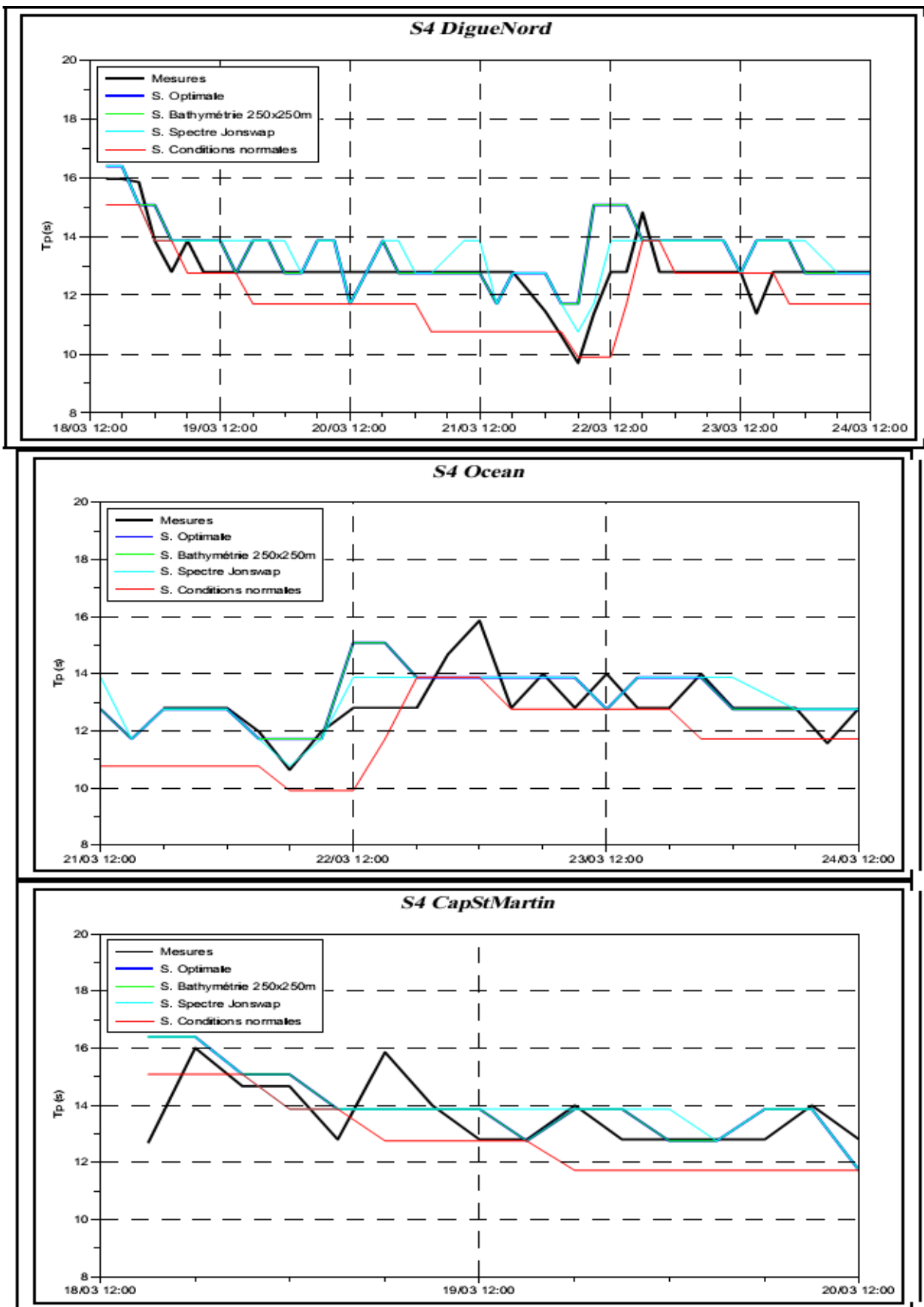
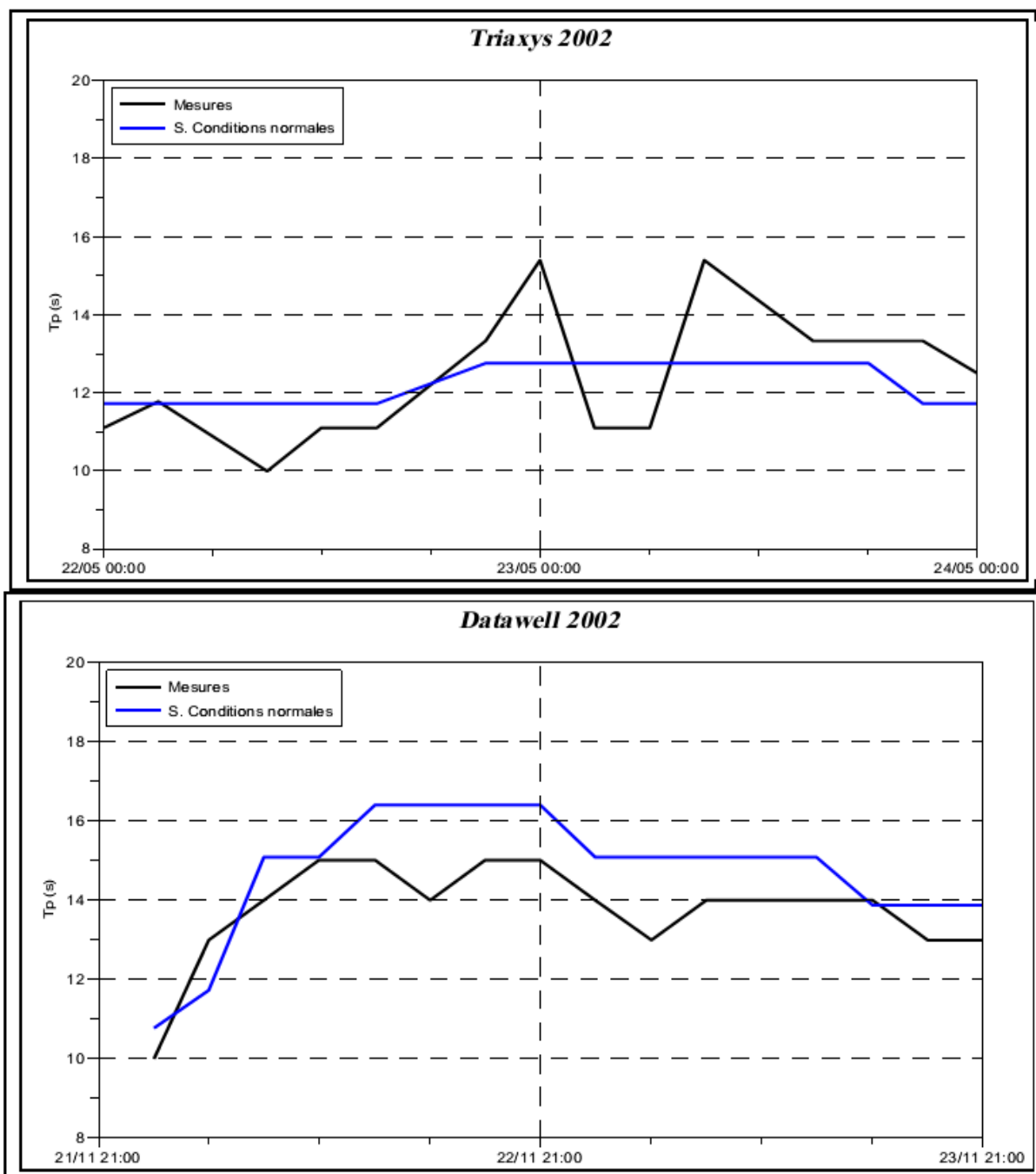


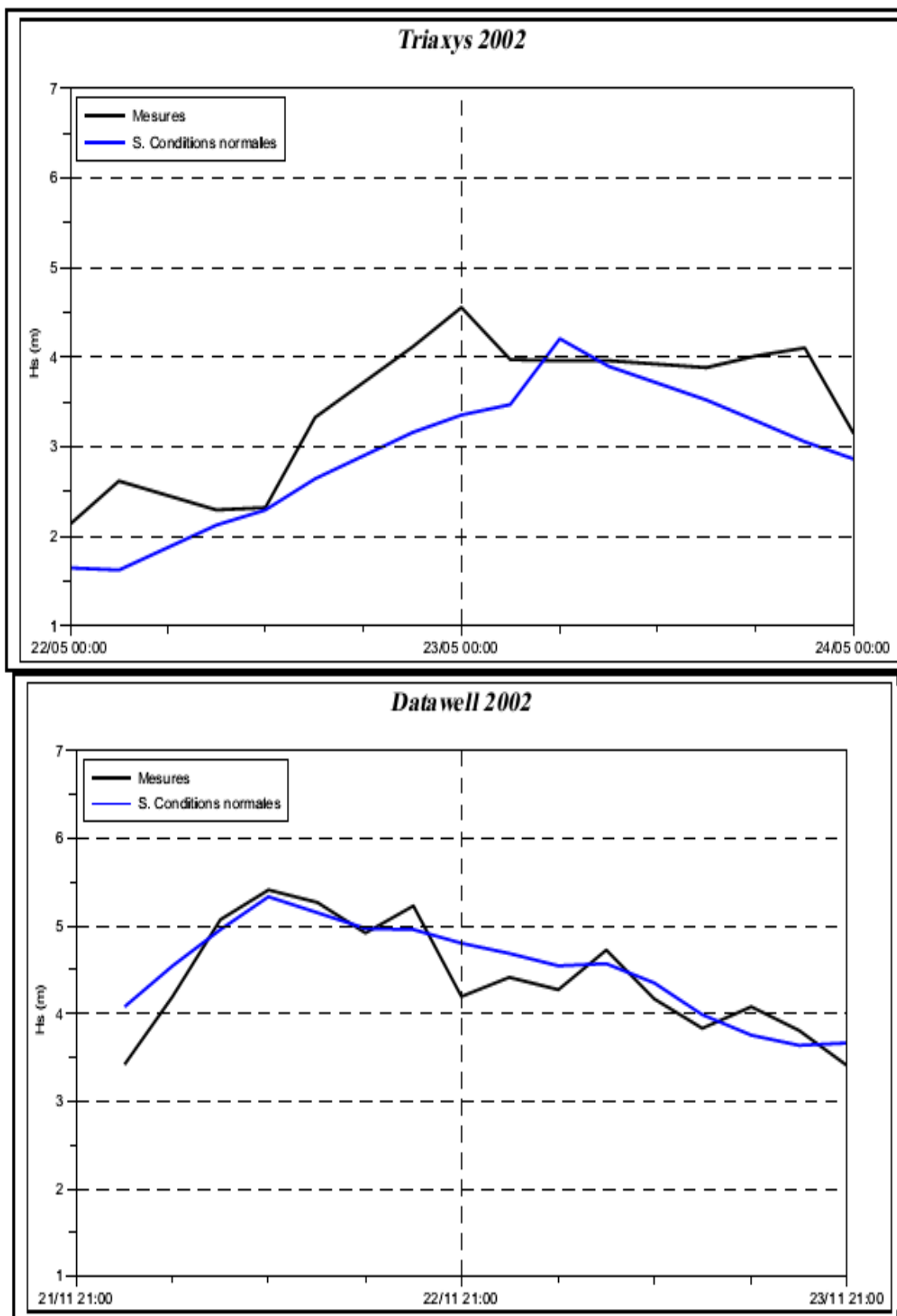
Figure 20 : Comparaison des périodes pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4 (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009)

**III.2.3.2. Pour les conditions de tempête de mai et novembre 2002 :**

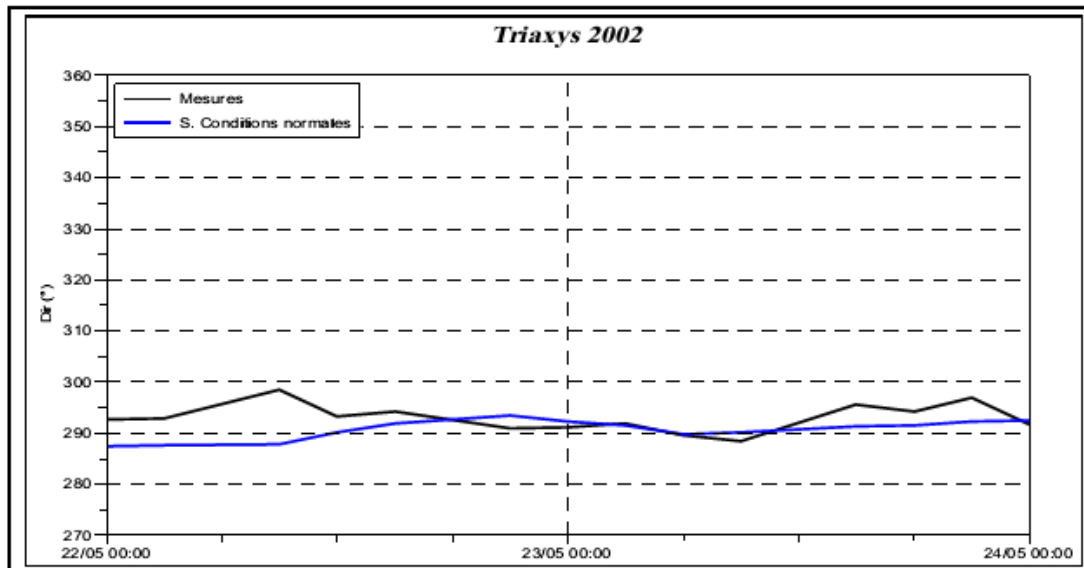
Une seule configuration de simulation est testée ici. Il s'agit de la simulation « Conditions normales » : Grille B1, forcée avec les paramètres NWW3 sur tout le bord ouest et au nord-ouest. Les figures 19 ; 21 comparent les enregistrements des bouées directionnelles Triaxys (pour mai 2002) et non directionnelles Datawell (pour novembre 2002) avec les résultats de SWAN pour les conditions normales. Comme pour la période calme, les résultats du calcul de SWAN ont un bon ordre de grandeur mais sont plus lissés.



**Figure 21 :** Comparaison de la période des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).



**Figure 22 :** Comparaison de la hauteur significative des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).

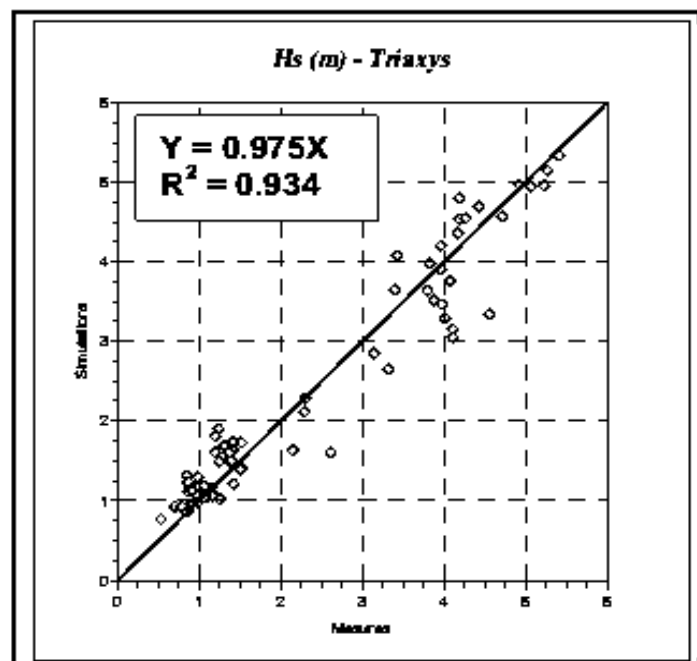


**Figure 23 :** Comparaison de la direction des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrée par la bouée Triaxys (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).

### III.2.3.3. Domaine de validité du modèle a proximité de la cote :

SWAN prend en compte les processus de transformation des vagues en eau peu profonde jusqu'à une certaine limite qui dépend de la résolution de la grille de calcul et de la bathymétrie.

#### III.2.3.3.1. Pour des fonds d'environ 50m :



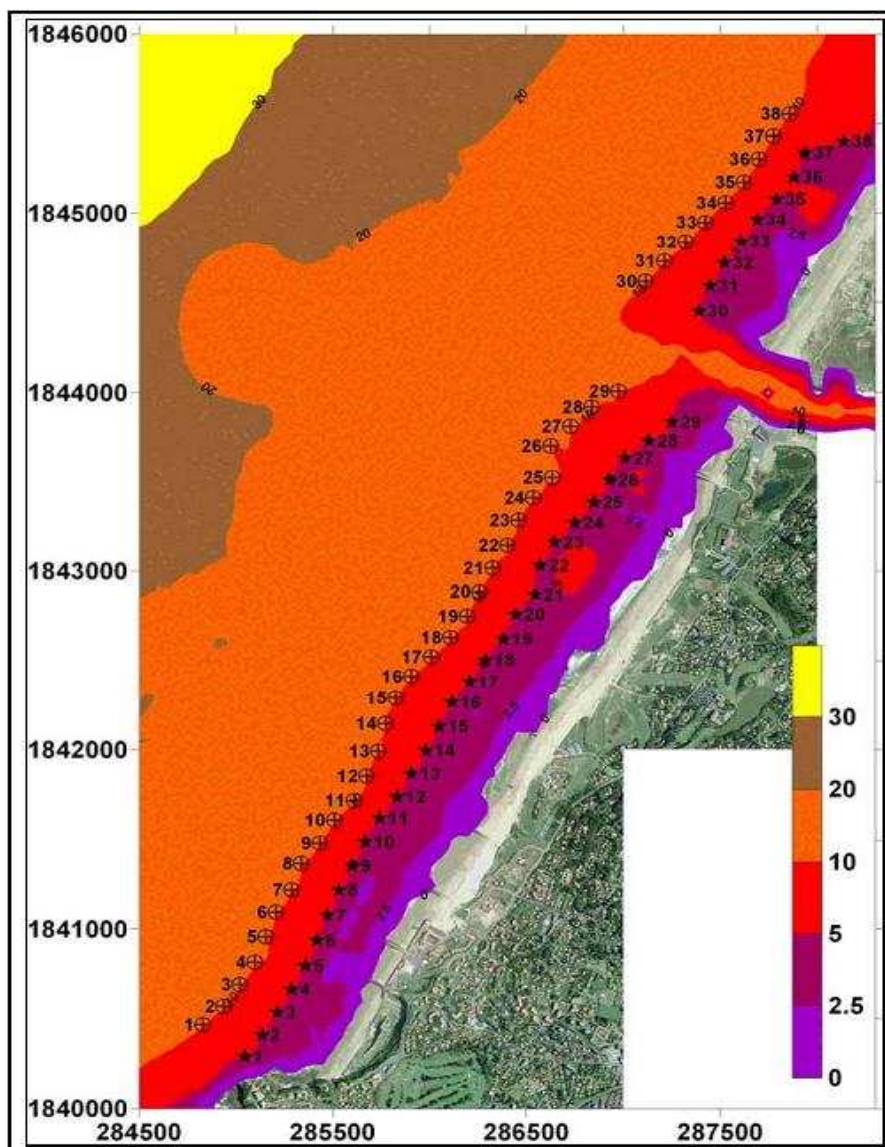
**Figure 24 :** Régression linéaire entre les données de la bouée Triaxys et les résultats de simulation de SWAN au même endroit sur les périodes d'étude de mars 2003 et mai 2002(BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).

La régression linéaire entre la hauteur significative des vagues calculée par SWAN et mesurée au niveau de la bouée Triaxys montre une bonne adéquation (figure 22).

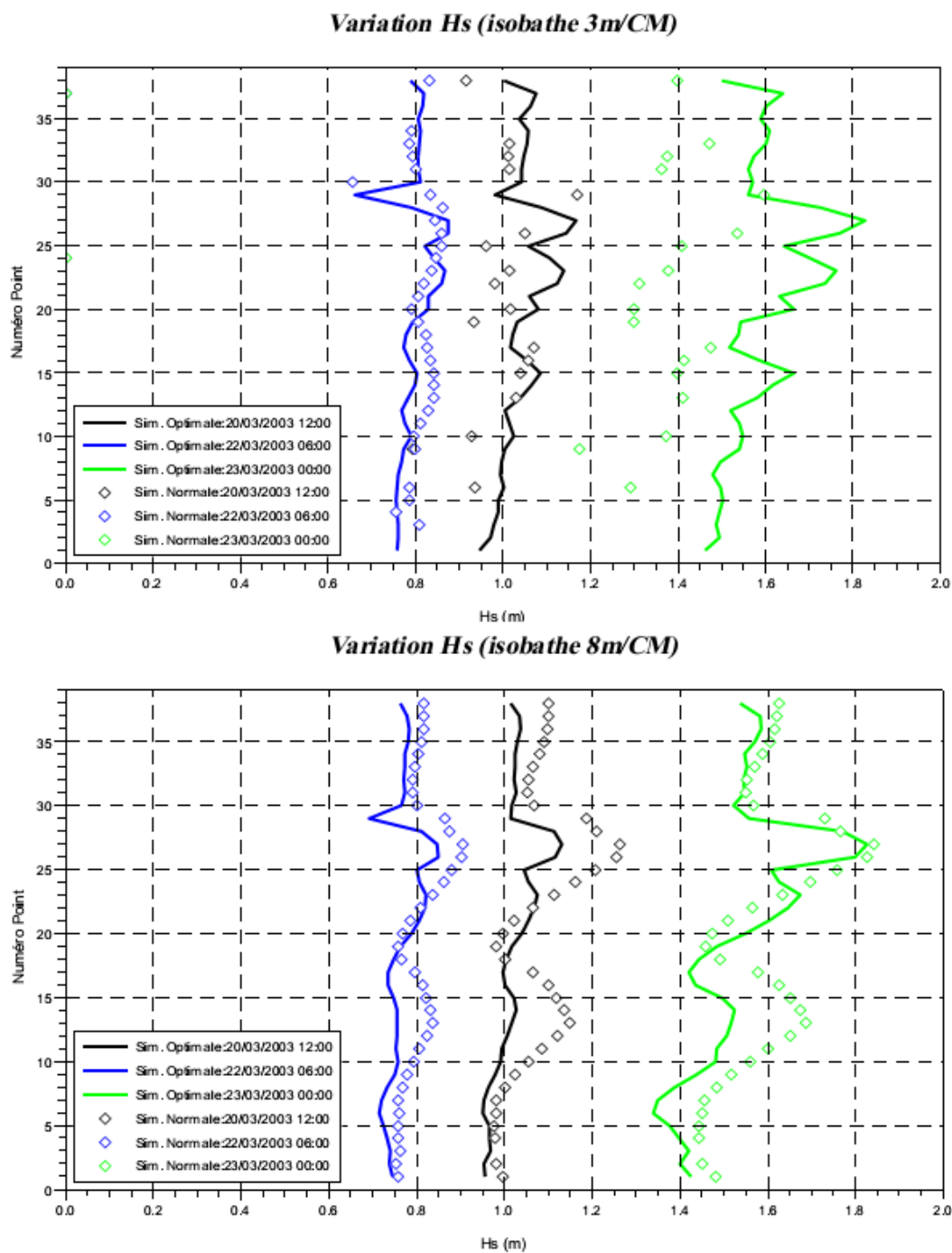
Le coefficient de détermination  $R^2$  est de 0,93 environ et la pente de 0,975 montre que SWAN (en configuration normale) reproduit très bien (bien qu'il a globalement tendance à sous-estimer) la hauteur des vagues vers 50m de fond.

### III.2.3.3.2. Pour les petits fonds (< à 10m) :

Très proche de la côte, les processus pris en compte sont plus nombreux et la résolution spatiale de la bathymétrie peut être une limite au calcul des interactions entre les vagues et le fond. Deux séries de point sont extraits sur l'isobathe des 8m et simulations normale (résolution 250m) et optimale (résolution 50m) pour 3 dates différentes qui correspondent à des hauteurs de houle croissantes. celle des 3m (cf. Illustration 16 et Illustration 17) afin de comparer les résultats des simulations normale (résolution 250m) et optimale (résolution 50m) pour 3 dates différentes qui correspondent à des hauteurs de houle croissantes.



**Figure 25 :** Points d'extraction des résultats de part et d'autre de l'embouchure de l'Adour sur l'isobathe des 3m et celle des 8m (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).



**Figure 26 :** Variations de la hauteur significative des vagues sur l’isobathe des 8m le long des plages d’Anglet avec les simulations « optimale » et « conditions normales » pour trois dates de la campagne de 2003 (BRGM/RP-57173-FR juillet 2009).

On constate qu’à 8m de profondeur, les résultats restent comparables pour les 2 résolutions (250 et 50m). La simulation normale montre cependant des variations de Hs plus marquées.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La modélisation numérique est devenue l'outil incontournable dans tous les métiers de l'environnement et de la mécanique des fluides. En effet pour tous ce qui touche a l'aménagement hydraulique, l'érosion côtière, les énergies renouvelables . . . etc, le numérique est indispensable.

La simulation numérique repose sur un modèle physique décrit par des équations mathématiques elle permet de résoudre des systèmes physiques qui étaient alors très difficiles à résoudre.

L'utilisation de modèles numériques a une grande importance dans l'étude de phénomènes physiques.

Le logiciel swan est un modèle numérique permettant le calcul des paramètres des vagues, dans les régions côtières.

Concernant notre travail la simulation des vagues sur la cote de de HADJRET-EN-NOUS montre que les houles les plus énergétiques et qui peuvent influencer sur la zone sont les houles de Nord Ouest, c'est celles qui vont être prises en considération dans le dimensionnement des ouvrages de protection car elles conservent leur énergie de départ et arrivent avec une incidence frontale sur le site d'étude.

# **Les annexes**

# Annexe1

## Statistique de la houle au large

Période	amplitude au fert	au mettre	rond	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
6	<1	<0,305	0	179	236	353	79	103	141	255	97	1443
	1_2	0,4575	0,5	263	615	818	132	164	301	546	182	3021
	3_4	1,0675	1	148	462	574	52	64	270	607	147	2324
	5_6	1,6775	1,5	77	197	226	10	29	157	363	81	1140
	7	2,135	2	41	69	49	3	6	55	224	41	488
	8_9	2,5925	2,5	25	25	25	1	3	29	107	19	234
8	10_11	3,2025	3	14	8	6	1	0	15	53	7	104
	12	3,66	3,5	3	5	1	0	0	5	31	5	50
	13_16	4,4225	4	5	5	0	0	0	3	24	3	40
	17_19	5,49	5	3	5	0	0	0	2	5	0	15
	20_22	6,405	6	0	0	1	0	0	0	6	0	7
	23_25	7,32	7	0	0	0	0	0	0	3	0	3
10	26_32	8,845	9							1		1
	33_40	9,6075	9,5							0		0
	41_48	13,5725	13,5									0
	49_60	16,6225	16,5									0
TOTAL				758	1627	2053	278	369	978	2225	582	8870
pourcentage				8,55%	18,34%	23,15%	3,13%	4,16%	11,03%	25,08%	6,56%	100,00%

Source SSMO 1963\_1970 (Région Centre Alger)

## Fréquence d'apparition au large

Période	Fréquence							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
0	0,02018	0,02661	0,03980	0,00891	0,01161	0,01590	0,02875	0,01094
0,5	0,02965	0,06933	0,09222	0,01488	0,01849	0,03393	0,06156	0,02052
1	0,01669	0,05209	0,06471	0,00586	0,00722	0,03044	0,06843	0,01657
1,5	0,00868	0,02221	0,02548	0,00113	0,00327	0,01770	0,04092	0,00913
2	0,00462	0,00778	0,00552	0,00034	0,00068	0,00620	0,02525	0,00462
2,5	0,00282	0,00282	0,00282	0,00011	0,00034	0,00327	0,01206	0,00214
3	0,00158	0,00090	0,00068	0,00011	0,00000	0,00169	0,00598	0,00079
3,5	0,00034	0,00056	0,00011	0,00000	0,00000	0,00056	0,00349	0,00056
4	0,00056	0,00056	0,00000	0,00000	0,00000	0,00034	0,00271	0,00034
5	0,00034	0,00056	0,00000	0,00000	0,00000	0,00023	0,00056	0,00000
6	0,00000	0,00000	0,00011	0,00000	0,00000	0,00000	0,00068	0,00000
7	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00034	0,00000
9	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00011	0,00000
9,5	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
13,5								
16,5								

Source SSMO 1963\_1970 (Région Centre Alger)

# Annexel

## Statistique de la houle à la cote

ondes	amplitude au large	nombre de cas				K coeficient de refraction				amplitude au voisinage de la cote			
		N 360	N 315	N 45	N 270	N360	N315	N45	N270	N360	N315	N45	N270
6	0	179	97	236	255	0,90	0,89	0,78	0,65	0	0	0	0
	0,5	263	182	615	546	0,90	0,89	0,78	0,65	0,45	0,45	0,39	0,33
	1	148	147	462	607	0,90	0,89	0,78	0,65	0,90	0,89	0,78	0,65
	1,5	77	81	197	363	0,90	0,89	0,78	0,65	1,36	1,34	1,17	0,98
	2	41	41	69	224	0,90	0,89	0,78	0,65	1,81	1,78	1,56	1,31
8	2,5	25	19	25	107	0,87	0,86	0,70	0,60	2,18	2,14	1,76	1,49
	3	14	7	8	53	0,87	0,86	0,70	0,60	2,62	2,57	2,11	1,79
	3,5	3	5	5	31	0,87	0,86	0,70	0,60	3,06	3,00	2,46	2,09
	4	5	3	5	24	0,87	0,86	0,70	0,60	3,50	3,43	2,82	2,39
10	5	3	0	5	5	0,85	0,84	0,67	0,58	4,27	4,20	3,35	2,91
	6	0	0	0	6	0,85	0,84	0,67	0,58	5,12	5,04	4,02	3,49
	7	0		0	3	0,85	0,84	0,67	0,58	5,98	5,88	4,69	4,07
	8				1	0,85	0,84	0,67	0,58	6,83	6,73	5,36	4,65
	9				0	0,85	0,84	0,67	0,58	7,68	7,57	6,03	5,23
TOTAL		758	582	1627	2225								

Source SSMO 1963\_1970

## La fréquence d'observation $f_{ri}$

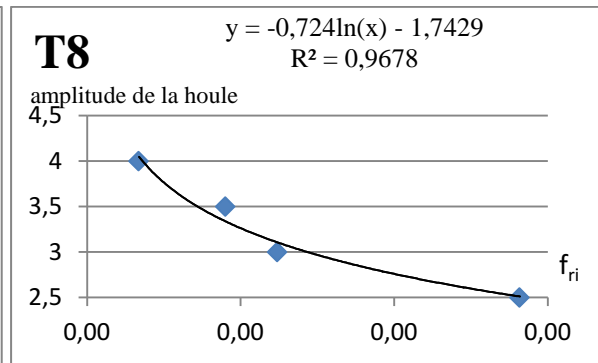
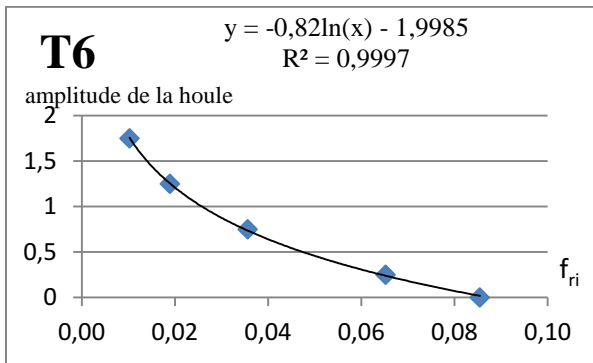
Hs observer	nombre d'observation >Hs				$f_{ri}$ -fréquence d'observation			
	N 360	N 315	N 45	N 270	N 360	N 315	N 45	N 270
0	758	582	1627	2225	0,0855	0,0656	0,1834	0,2508
0,25	579	485	1391	1424	0,0653	0,0547	0,1568	0,1605
0,75	316	303	314	817	0,0356	0,0342	0,0354	0,0921
1,25	168	156	117	230	0,0189	0,0176	0,0132	0,0259
1,75	91	75	23	70	0,0103	0,0085	0,0026	0,0079
2,25	25	15	15	39	0,0028	0,0017	0,0017	0,0044
2,75	11	8	10	15	0,0012	0,0009	0,0011	0,0017
3,25	8	3	5	10	0,0009	0,0003	0,0006	0,0011
3,75	3	0	0	4	0,0003	0,0000	0,0000	0,0005
4,25	0	0	0	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
4,75	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5,5	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6,5	0	0	0		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7,5	0	0	0		0	0	0	0
TOTAL							8870	

Source SSMO 1963\_1970

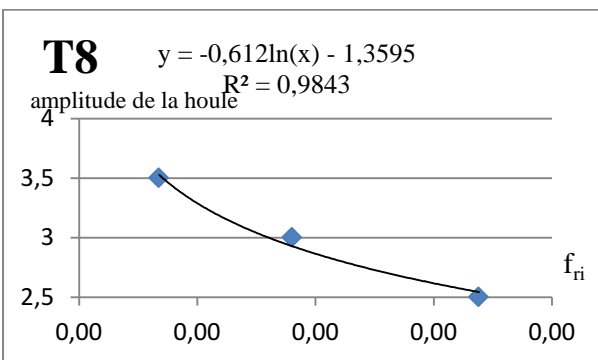
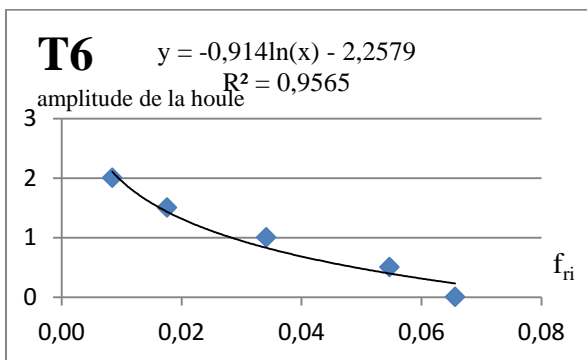
# Annexe1

Les droites de régression (houle à la cote):

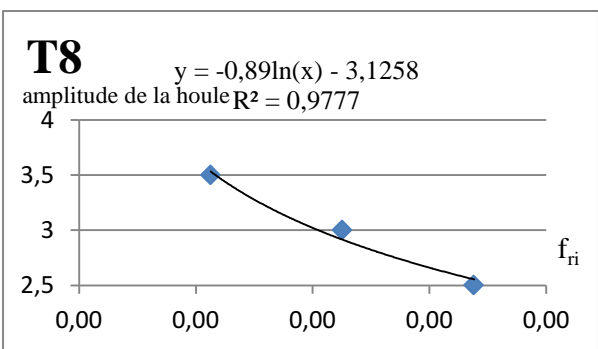
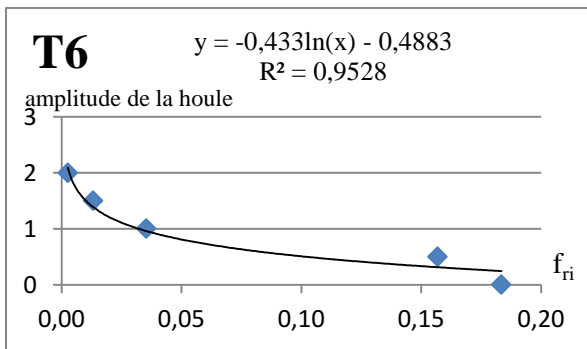
Pour N360 :



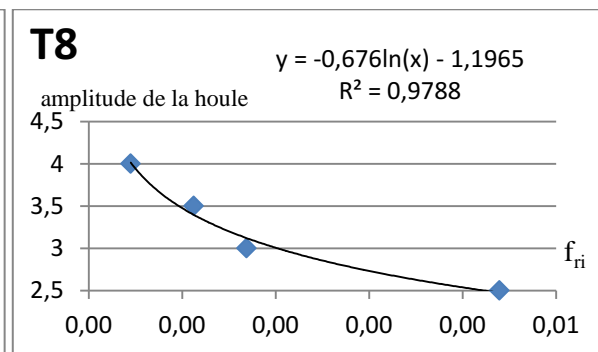
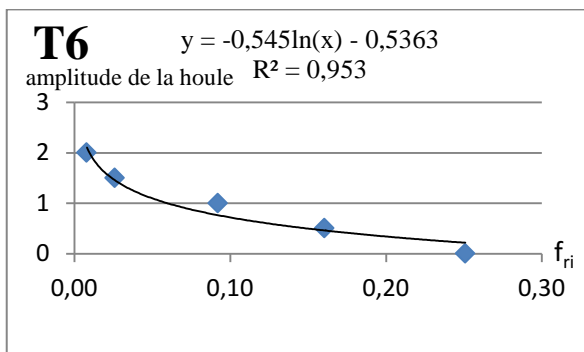
Pour N315 :



Pour N45 :



Pour N270



## Annexe2

Exemple des fichiers à remplir :

```
N45T6H109D - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
$
$***** HEADING *****
$
proj 'hadjretenous - MODELE DET ' '1'
    'Houle N45 - Tp = 6s - Hmo = 1.09m'
    'Surcote = +0.5m CM - dd = 12'
$
$***** MODEL INPUT *****
$
set level 0.5 maxerr 2
cgrid 4065. 1883. 0. 2000. 3000. 20 30 Circle 36 0.11 0.5 16
inpgrid bottom 4065. 1883. 0. 20 30 100. 100.
reading bottom 1.0 'DET.BOT' idla=3 free
boundnest1 nest 'N45T6H109D.nst'
gen2
breaking con 1.0 0.63
off quad
num accur 0.03 0.03 0.03 97 12
$
$***** OUTPUT REQUESTS *****
$
poin 'points' file 'pointss.dat'
table 'points' head 'N45T6H109D.res' xp yp hs dir per rtp dep
table 'COMPGRID' nohead 'N45T6H109D.swa' xp yp hs dir per dep vel for dspr diss qb ubot
$
compute
stop
$

N45T6H109L - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
$
$***** HEADING *****
$
proj 'hadjretenous- ENS' '1'
    'Houle N45 - Tp = 6s - Hmo = 1.09m'
    'Surcote = +0.5m CM - dd = 12'
$
$***** MODEL INPUT *****
$
set level 0.5 maxerr 2
cgrid 0. 0. 0. 9000. 15000. 90 150 Circle 36 0.11 0.5 16
inpgrid bottom 0. 0. 0. 90 150 100. 100.
reading bottom 1.0 'ENS.BOT' idla=3 free
boundpar2 side W con par 1.09 6 225. 12.
boundpar2 side N con par 1.09 6 225. 12.
boundpar2 side E con par 1.09 6 225. 12.
gen2
breaking con 1.0 0.63
off quad
num accur 0.03 0.03 0.03 97 12
$
$***** OUTPUT REQUESTS *****
$
table 'COMPGRID' nohead 'N45T6H109L.swa' xp yp hs dir per dep vel for dspr diss qb ubot
ngrid 'ngrid1' 4065. 1883. 0. 2000. 3000. 20 30
nestout 'ngrid1' 'N45T6H109D.nst'
$
compute
stop
$
```

## Annexe3

Tableau récapitulatif des erreurs entre mesures et simulations aux 3 points de comparaison.

Hs	S4 Digue Nord				S4 Ocean				S4 Cap St. Martin			
	Moy (m)	Erreur rms (m)	SI (%)	Biais (m)	Moy (m)	Erreur rms (m)	SI (%)	Biais (m)	Moy. (m)	Erreur rms (m)	SI (%)	Biais (m)
<b>Mesures</b>	<b>0.99</b>				<b>1.36</b>				<b>0.81</b>			
<b>S. Optimale</b>	1.08	0.16	17	0.09	1.31	0.21	15	-0.05	0.92	16	20	0.11
<b>S. Bathy. 250x250m</b>	1.10	0.18	18	0.11	1.25	0.24	17	-0.11	0.90	15	19	0.09
<b>S. Spectre Jonswap</b>	1.13	0.20	20	0.14	1.37	0.21	16	0.01	0.97	21	26	0.16
<b>S. Cond. normales</b>	1.22	0.30	31	0.24	1.33	0.28	20	-0.03	1.03	.26	32	0.23

Dir	S4 Digue Nord				S4 Ocean				S4 Cap St. Martin			
	Moy (°)	Erreur rms (°)	SI (%)	Biais (°)	Moy (°)	Erreur rms (°)	SI (%)	Biais (°)	Moy. (°)	Erreur rms (°)	SI (%)	Biais (°)
<b>Mesures</b>	<b>300.1</b>				<b>298.4</b>				<b>298.6</b>			
<b>S. Optimale</b>	307.0	8.3	3	6.9	296.0	6.8	2	-2.5	308.6	12.3	4	10.0
<b>S. Bathy. 250x250m</b>	308.1	9.9	3	8.0	296.0	6.8	2	-2.5	308.2	11.9	4	9.6
<b>S. Spectre Jonswap</b>	308.2	10.2	3	8.1	293.0	9.3	3	-5.4	310.2	12.9	4	11.6
<b>S. Cond. normales</b>	305.8	8.1	3	5.7	295.5	6.4	2	-3.0	305.6	9.2	3	7.0

Tp	S4 Digue Nord				S4 Ocean				S4 Cap St. Martin			
	Moy (s)	Erreur rms (s)	SI (%)	Biais (s)	Moy (°)	Erreur rms (s)	SI (%)	Biais (s)	Moy. (s)	Erreur rms (s)	SI (%)	Biais (s)
<b>Mesures</b>	<b>12.9</b>				<b>13.0</b>				<b>13.3</b>			
<b>S. Optimale</b>	13.5	1.1	9	0.6	13.3	1.1	8	0.3	13.7	1.3	10	0.4
<b>S. Bathy. 250x250m</b>	13.5	1.1	9	0.6	13.3	1.1	8	0.3	13.7	1.3	10	0.4
<b>S. Spectre Jonswap</b>	13.5	0.9	7	0.6	13.2	0.9	7	0.2	13.9	1.4	10	0.6
<b>S. Cond. normales</b>	12.1	1.2	9	-0.8	11.9	1.4	11	-1.1	12.5	1.4	11	-0.8

# **Référence**

# **Bibliographique**

## Référence bibliographie

---

**Beck A., Décuré N., Gaillard P., et al., 2005.** SWANS, un système auteur de synchronisation et d'annotation pour un apprentissage multimodal des phénomènes accentuels en langue vivante 2: Partie 1 : enjeux et positionnement théorique. *Edt Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Montpellier.* 13 P.

**Belloulou B., Gana A., 2012 .** Etude de protection du rivage du site de Hadjret En Enous. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, p17, 21.

**Benoit M., 2010.** Modélisation et simulation des vagues de l'échelle océanique à l'échelle d'une structure côtière. *Edt Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, Marseille.* 2P.

**Bruneau N., 2009.** Modélisation morphodynamique des plages sableuses. *Thèse Doctorat, Université BordeauxI, Ecole doctorale sciences et environnements.* P 5-12, 39-56.

**Castelle B., Bonneton P., 2006.** Modélisation du courant sagittal induit par les vagues au-dessus des systèmes barre/baine de la côte aquitaine (France). *Edt Sciences Direct C. R. Geoscience 338.* P 711–717.

**Cayocca F., Dumas., F ., Bassoullet P., et al., 2003.** Dynamique des sédiments fins en Baie du Mont Saint-Michel – simulation des turbidités sous l'action des marées et des vagues. *Edt INRFEMER.* 36P

**Chabot S., 2011.** La modélisation des vagues : pourquoi, comment ?. *Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne.* P13-27.

**Chaput B., Courtebras B., Dantal B., Girard J.-C., Henry M., Pichard J.-F., Thiénard J.-C., 2001.** Autour de la modélisation en probabilités. *Edt Presses universitaires de Franche-Comté.* 259 P.

**Dhellemmes F., 1989.** Un modèle de réfraction-détraction de la houle pour l'étude de la houle en zone côtière : Récifs. *Edt (revue), 2èmes journées de l'hydrodynamique.* P 345-360.

**Dugor J., Rihouey D., Ardhuin F., 2010.** Développement d'un modèle opérationnel de prévision de houle à petite échelle sur le littoral transfrontalier des Pyrénées Atlantiques – Gipuzkoa. *Edt Paralia XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d'Olonne.* P 79-86.

**Foerster E., 2012.** Quelles approches pour une évaluation quantitative des risques naturels ?. *Edt Géoscience pour une terre durable.* 31P.

**Gagnaire-Renou E., 2009.** Amélioration de la modélisation spectrale des états de mer par un calcul quasi-exact des interactions non-linéaires vague-vague. *Thèse de Doctorat, Université du sud Toulon Var.* P1-26.

**Guillou N., 2007.** Rôles de l'hétérogénéité des sédiments de fond et des interactions houle-courant sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire en zone subtidale –applications

## Référence bibliographie

---

en Manche orientale et a la pointe de la Bretagne. *Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale*. P113-182.

**Guilou N., Chapalain G., 2006.** Modélisation en suspension dans le détroit du Pas-de-calais sous l'influence des courants des marées et de la houle. *Edt Paralia, IXèmes Journées Nationales, Génie civile-Génie côtier, Brest*. P 231-238.

**Hamm L., Hajji H., Mazeiraud V., 2009.** Amélioration du calcul de la fraction des vagues déferlantes dans le logiciel SWAN. *Edt Paralia, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Hammamet, Tunisie*. P 37-40.

**Janssen P., 1995.** The wave model. *Edt European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. 61 P.

**Kang H., Zhang H., Qu X., 2009.** Numerical study of effect of wave around single break water with the swan model. *Edt Sciences Direct, Journal of Hydrodynamique 21(1)*. P 136-141.

**Lambert N., 2009.** Modélisation de la dissipation de l'énergie des vagues par la végétation de marais littoral. *Mémoire en Océanographie, Université du Québec*. P 9-45

**Le Hir P., Silva Jacinto R., 2001.** Courants, vagues et marée : les mouvements de l'eau. *Edt Cloitre, France*. 31 P.

**Lecacheux S., Muller H., Pedreros R., Thiebot J., Ouriqua J., Reveillere A., 2012.** Etude probabiliste des vagues cycloniques le long du littoral Guadeloupéen. *Edt Paralia XII èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg*. P 946-956.

**Lubin P., Abadie S., Vincent S., Caltagirone J.-P., 2002.** *Edt Paralia, VI/mes Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France*. P 85-92.

**Lupino P., 2007.** La gestion stratégique de la défense des littoraux pour un développement soutenable des zones côtières de la méditerranée. *Edt GIER Graphic Srl - Roma, Italia*. 143 P.

**Mai S., Ohle N., Zimmermann C., 1999.** Applicability of wave models in shallow coastal waters. *Edt COPEDEC Cape Town, South Africa*. P 170-179.

**Meftah K., Pons F., Gomi P., Sabatier F., Sergent P., 2004.** Chaîne d'outils intégrés permettant la modélisation de l'évolution d'un profil de plages sur le site du Rousty. *Edt Paralia, VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil– Génie Côtier, Compiègne*. P 411-418.

**Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et logements, 2011.** Modélisation des effets de la marée sur les hauteurs de la houle aux abords de Port 2000 au Havre. *Edt Centre d'études techniques maritimes et fluviales*. 49 P.

**Pantchichkine A., 2008.** Introduction aux systèmes dynamiques et à la modélisation. *Cours de Licence : Mathématiques pour les biologistes, Université Grenoble-1, France*. 190 P.

**Pedreros R., 2009.** Etude des conditions des vagues sur la cote Basque. *Edt Géoscience pour une terre durable*. 51P.

## Référence bibliographie

---

- Puy M., 2010.** Modélisation numérique des interactions entre vagues de shallow water et structures solides. *Rapport de stage, Université Joseph Fourier*. 22 P.
- Rimaud J., 2010.** Modélisation des vagues et de l'impact de l'hydrodynamique sur les sédiments du bassin de Thau. *Edt Centre d'océanologie de Marseille*. 10 P.
- Robin N., 2007.** Morphodynamiques des systèmes de flèches sableuses Etude comparative entre les embouchures tidales de l'Archipel de St Pierre et Miquelon et de la côte Ouest du Cotentin (Manche). *Edt Université de Caen, Rapport de synthèse*. 25 P.
- Saint-cast F., 2002.** Modélisation de la morphodynamiques des corps sableux en milieu littoral. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, France*. P11-34,77-133.
- Schleiss A., 2006.** Cours de Bases de dimensionnement des mesures de protection des rives lacustres Bemessungsgrundlagen für Massnahmen zum Schutz von Flachufern an Seen. *Edt Ecole polytechnique, Lausanne*. 166 P.
- Sénéchal N., 2003.** Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I*. P1-62.
- Shan-Hwei O., Jian-Ming L., Tai-Wen H., Shiaw-Yih T., 2002.** Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. *Edt Ocean Engineering* 29. P 947–971.
- Sverdrup H., Munk H., 1947.** Wind, sea, and swell : theory of relations for forecasting. *Edt Tech. Rep. 601, U. S. Hydrographic Office*.
- Toutain P.L., Bousquet-Mélou A., 2007.** Modèles et modélisation : Généralités. *Mémoire Pharmacocinétique, Université Toulouse*. P 1-14.
- Wood D. J., Muttray M., Oumerac H., 2001.** The SWAN model used to study wave evolution in a flume. *Edt Ocean Engineering* 28. P 805–823.
- Yves F., Ménanteau L., Kuneschal S., 2006.** Le Delta du canal du Dique (baie de Carthogène des Indes, Colombie). Modélisation géomorphologique et sédimentologique. *Edt Intérazions Nature-Société, Analyse et modèles, La Baule*. 7 P.
- Zaki W., Basbous T., Younes R., Raad S., 2006.** Modélisation de la houle au port de Beyrouth. *Edt Université Libanaise, Faculté de Génie, Beyrouth, Liban*. P 281-291.
- Zhang D., Liu H., Lin P., 2003.** The application of swan to the simulation of a storm surge. *Edt International Conference on Estuaries and Coasts, Hangzhou, China*. P 756-762.

## Référence bibliographie

---

Site d'internet

<http://www.swan.tudelft.nl/>

<http://www.actimar.fr/>

<http://swanmodel.sourceforge.net/>

<http://lpce.cnrs-orleans.fr/>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/fichiers/assets/seo/toc.html>

<http://www.afrimet.org/marinemet/index.php/fr/modelisation/modelisation-des-vagues-oceanique>

[http://lpce.cnrs-orleans.fr/www\\_experim/experim\\_log\\_swan\\_fr.php?PHPSESSID=iyijhjkbh](http://lpce.cnrs-orleans.fr/www_experim/experim_log_swan_fr.php?PHPSESSID=iyijhjkbh)

<http://swanmodel.sourceforge.net/>