

















Etude des conditions de vagues sur la Côte Basque

Rapport final

BRGM/RP-57173-FR juillet 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2009 09LITA01

R. Pedreros Avec la collaboration de S. Lecacheux, D. Idier









Vérificateur :

Nom : Cyril Mallet

Date : 15/07/2009

Talle

Approbateur :

Nom : Philippe Dutartre

Date : 23/07/2009

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.





Mots clés : climats de houle, SWAN, Wavewatch3, Côte Basque

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

R. Pedreros en collaboration avec Lecacheux S. et Idier D. (2009) : Etude des conditions de vagues sur le littoral de la Côte Basque. Rapport final BRGM/RP-57173-FR. 51 p, 30 illus, 3 Tab.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

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.

Cette étude vient compléter celle réalisée en 2005 sur la modélisation de la marée et des courants associés sur la Côte Basque. Les objectifs principaux étant d'analyser le rôle des facteurs océanographiques (marée et houle) sur les instabilités de la Côte Basque. Ce rapport présente les premiers résultats exhaustifs concernant les climats de houle de la Côte Basque.

Une première étape, menée par le laboratoire EPOC de l'université Bordeaux 1 et le LASAGEC de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, a permis de mieux connaître les conditions de vagues au large dans le sud du Golfe de Gascogne. Une étude statistique sur les résultats du modèle NWW3 (NOAA) pour le point 44°N/2,5°W a été effectuée pour obtenir les conditions de vagues moyennes, extrêmes et les différentes classes caractéristiques de la région.

Ces caractéristiques (saisonnières, moyennes et extrêmes) ont été transposées sur la Côte Basque par le BRGM en utilisant le modèle de vagues SWAN. La phase de validation du modèle, grâce à une campagne de mesures menée en mars 2003 sur la plage d'Anglet, a permis de déterminer l'incertitude liée à la méthodologie utilisée, ainsi :

- pour des conditions calmes (hauteur significative des vagues (Hs) < 2m) : l'erreur maximale du modèle atteint 32% pour la hauteur des vagues, 5% pour la direction et 11% pour la période et cela pour des profondeurs proches de 10m. A des profondeurs plus grandes (aux environs de 50m), l'erreur est moindre, notamment pour Hs où elle n'est que de 22%. Les tests de sensibilité montrent également que l'utilisation d'une bathymétrie et d'un forçage plus précis (respectivement mailles de 50m et spectres directionnels mesurés) peuvent faire chuter l'erreur de Hs à 15-17% ;
- pour des conditions de tempête (Hs > 3m) : les résultats sont de meilleure qualité. A 50m de profondeur, les erreurs sur Hs sont de 7% et 19% pour des hauteurs de vague de 4,5m et 3m respectivement ;
- **le domaine de validité** de la modélisation s'arrête à environ 8m de profondeur (par rapport au zéro hydrographique). La précision des données bathymétriques utilisées ne permet pas le calcul pour des fonds plus faibles.

Les résultats de la modélisation montrent que pour :

- les 12 classes de climat houle : il existe deux classes au large qui n'ont pas de sens physique sur la Côte Basque (valeurs quasi nulles). Elles correspondent à des vagues provenant du nord-est et du plein sud. Parmi les autres classes, on remarque que les valeurs de Hs sur la côte sont plus faibles que les valeurs du large alors que les périodes varient peu (légèrement inférieures). D'autre part, les vagues tendent à s'orienter perpendiculairement à la côte (effet de la réfraction) si bien que les directions peuvent être très différentes en fonction du secteur auquel on s'intéresse. Il existe également des variations importantes de la hauteur des vagues le long de la côte. Par exemple, pour la classe de tempêtes (n°11) la valeur de Hs vaut 5,5m au large, 4,6m sur les secteurs les plus exposés (par exemple, en face de la plage d'Erromardie) et seulement 1,1m sur les secteurs les plus abrités (par exemple à l'ouest de la baie du Figuier) ;
- les conditions moyennes annuelles (1,8m de Hs au large) : les hauteurs varient le long de la côte entre 0,4m et 1,3m en fonction de son exposition ;
- les trois périodes de retour considérées : la hauteur des vagues varie peu.
 De 7m à 7,6m pour les secteurs les plus exposés et de 2m à 2,2m pour les secteurs les plus protégés.

C'est la première fois qu'une connaissance exhaustive des paramètres des vagues (conditions saisonnières, moyennes et extrêmes) sur l'ensemble du littoral Basque est connue avec cette précision. Cette étude permet de caractériser l'exposition de cette côte aux vagues.

Désormais, il sera possible d'établir quelle est la part de l'action des houles dans le recul des côtes à falaise par exemple.

Les résultats de cette étude pourront également servir comme paramètres d'entrée à des simulations plus détaillées sur des zones à enjeux (en fonction de la disponibilité de données bathymétriques haute résolution), ou à l'étude de la qualité de l'eau (pollution, panache,...) ou bien encore pour l'évaluation des transports sédimentaires proches de la côte.

Enfin, des améliorations peuvent être apportées notamment sur : i) la prise en compte de séries temporelles plus longues pour la détermination des climats de houle et des valeurs extrêmes ; ii) le calcul de la houle de période de retour centennale, utile dans certains cas d'aménagement du littoral ; iii) et l'amélioration du maillage proche de la côte à partir d'un MNT de meilleure résolution.

Sommaire

1.	INT	RODU	CTION	9
	1.1.	CADRI	E DE L'ETUDE	9
	1.2.	OBJET	DE L'ETUDE	9
2.	MET	THOD	OLOGIE GENERALE	11
3.	IMP	LEME	NTATION DU MODELE	13
3	3.1.	DONN	EES UTILISEES	13
	3.1.	1. 7	Opo-Bathymétrie-Construction des MNT	13
	3.1.2	2. <u> </u>	Données de vagues pour le forçage et la validation	14
	3.2.	LE MC		15
	5.3.	PARAM	METRAGES DE LA MODELISATION	17
4.	TES	TS DE	E SENSIBILITE	19
2	1.1.	POUF	R DES CONDITIONS CALMES DU 18/03/03 AU 24/03/03 : TESTS SUR L	A
F	RESOL	UTION	ET LE TYPE DE FORCAGE	19
2	1.2.	Pour	LES CONDITIONS DE TEMPETE DE MAI ET NOVEMBRE 2002	28
4	1.3.	DOMA	INE DE VALIDITE DU MODELE A PROXIMITE DE LA COTE	31
	4.3.	1. F	Pour des fonds d'environ 50m	31
	4.3.	2. F	our les petits fonds (< a 10m)	31
5.	DET	ERMI	NATION DU CLIMAT DE HOULE SUR LA COTE BASQUE	35
Ę	5.1.	CLIMA	TS ET STATISTIQUES DE HOULE AU LARGE	35
Ę	5.2.	PROP	AGATION DES VAGUES SUR LA COTE BASQUE	36
	5.2.	1. C	Classes de vagues	37
	5.2.2	2. C	Conditions de houle moyennes	41
	5.2.	3. V	/aleurs extrêmes	45
6.	CON	NCLU	SION	49
7.	BIB	LIOGF	RAPHIE	51

Liste des illustrations

Illustration 1. MNT grande emprise (250mx250m) : B1	13
Illustration 2. Haut : Zone d'étude. Bas : Comparaison des MNT de la petite emprise. Gauche : à 50m de résolution (B2). Droite : à 50m de résolution (B3)	14
Illustration 3. Résultats pour la « simulation optimale » le 23/03/03 à 00h	20
Illustration 4. Résultat pour la simulation « Spectre Jonswap » le 23/03/03 à 00h	20

Illustration 5. Résultats pour la simulation « Bathy 250m » le 23/03/03 à 00h	21
Illustration 6. Résultats pour la simulation « conditions normales » le 23/03/03 à 00h	21
Illustration 7. Comparaison des hauteurs significatives calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4	22
Illustration 8. Comparaison des directions pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4.	23
Illustration 9. Comparaison des périodes pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4	24
Illustration 10. Tableau récapitulatif des erreurs entre mesures et simulations aux 3 points de comparaison	26
Illustration 11. Comparaison des 3 paramètres de vague calculés par SWAN et enregistrés par la bouée Triaxys pour la simulation « conditions normales »	27
Illustration 12. Comparaison de la période des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell	28
Illustration 13. Comparaison de la hauteur significative des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell.	29
Illustration 14. Comparaison de la direction des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrée par la bouée Triaxys	30
Illustration 15. Tableau des erreurs des résultats de simulations avec les données de bouée Triaxys et Datawell pour les périodes d'étude de mars 2003 et mai 2002	30
Illustration 16. 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.	31
Illustration 17. 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.	32
Illustration 18. 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.	33
Illustration 19. Point du modèle NWW3 utilisé pour la classification et direction de provenance moyenne des vagues (~302°N), fond GoogleEarth 2009	35
Illustration 20. Résultats de la classification des états de mer au point NWW3 (44°N/2,5°W)	36
Illustration 21. Moyenne et périodes de retour de 1, 5 et 10 ans des trois paramètres	36
Illustration 22. Zone de présentation des résultats encadrée en rouge sur l'Illustration 19 (source Géoportail).	37
Illustration 23. Carte des 12 classes. Entete : triplet (Hs, Tp, Dp) et occurrence	39
Illustration 24. Hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m pour les 12 classes et les 2 conditions de marée	40
Illustration 25. Conditions de houle moyennes pour une marée nulle.	42
Illustration 26. Conditions de houle moyennes pour une marée de +2,5m	42
Illustration 27. Conditions de houle moyennes pour une marée de +5m	43

Illustration 28. Hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m pour les conditions moyennes de houle et une marée moyenne.	.44
Illustration 29. Propagation des valeurs extrêmes (haut : annuel, milieu : 5 ans, bas : dix ans)	.46
Illustration 30. Hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m pour les conditions moyennes et extrêmes de houle et une marée haute.	.47

1. Introduction

1.1. CADRE DE L'ETUDE

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. Ce rapport complète celui réalisé en 2005 (Idier D. et Pedreros R., 2005) sur la modélisation de la marée et des courants associés sur la Côte Basque. 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.

1.2. OBJET DE L'ETUDE

La connaissance des conditions de houle sur le littoral basque est un élément majeur dans la compréhension des phénomènes côtiers.

Or, très proche du rivage, les conditions de vagues sont très différentes du large car celles-ci subissent de nombreuses transformations quand elles entrent en interaction avec le fond. Les modèles opérationnels globaux actuels n'ont pas une résolution suffisamment fine et ne prennent pas en compte ces phénomènes côtiers. Actuellement, la connaissance des conditions de vagues à la côte reste partielle et nécessite l'utilisation d'outils supplémentaires.

Ce rapport expose le développement, la validation et l'application d'outils adaptés à l'étude des conditions de vague à la côte. Il aboutit à un atlas qui regroupe les différentes configurations des vagues (climats de houle, valeurs moyennes et extrêmes) présentes sur la Côte Basque.

Tout d'abord, le modèle SWAN a été implanté sur la Côte Basque. Plusieurs configurations ont été testées pour étudier la sensibilité du modèle à différents paramètres comme la résolution spatiale et les données de forçage. Le but est d'estimer l'erreur et le domaine de validité près de la côte pour la configuration la plus classique dite « conditions normales » : une grille de 250 m de résolution dont le bord ouest peut-être forcé par les données du modèle NWW3 à 2,5°W.

Les conditions de houle au large établies par le laboratoire EPOC de l'université Bordeaux 1 et le laboratoire LASAGEC de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (climats de vague, valeurs moyennes annuelles et extrêmes) sont ensuite propagées jusqu'à la Côte Basque avec SWAN pour la configuration classique afin d'établir les conditions de vagues correspondantes à proximité du rivage.

Après un bref rappel de la méthodologie, le paragraphe 2 décrit le modèle, son implantation et les sources de données in-situ disponibles (pour le forçage ou la validation). Puis, les tests de sensibilité sont explicités dans le paragraphe 3. Enfin, le paragraphe 4 reprend l'application de la modélisation conduisant à l'établissement d'un atlas de vague pour la Côte Basque.

2. 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 3 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 (univ. 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.

Ainsi, les classes de vagues, moyennes et extrêmes, calculées avec les données du modèle NWW3, ont été propagées afin de définir les configurations correspondantes sur les côtes du Pays Basque.

3. Implémentation du modèle

3.1. DONNEES UTILISEES

3.1.1. 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°W43.27°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 (cf. paragraphe 5). Les données bathymétriques exploitées proviennent essentiellement de GEBCO et du SHOM (contrat n°E042/2003) 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 (cf. 3.1.2) 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.



Illustration 1. MNT grande emprise (250mx250m) : B1



Illustration 2. Haut : Zone d'étude. Bas : Comparaison des MNT de la petite emprise. Gauche : à 50m de résolution (**B2**). Droite : à 50m de résolution (**B3**)

3.1.2. Données de vagues pour le forçage et la validation

Les données du modèles Wavewatch 3 (NOAA) correspondant au point 44°N/2,5°W ont été utilisées pour établir les statistiques et les climats de houle (cf. paragraphe 5).

Les paramètres du point 44°N/2,5°W servent également de forçage pour B1 aux dates de la campagne de mesures.

La campagne de mesures a été mise en place du lundi 17 au dimanche 23 mars 2003 sur les plages d'Anglet (Brière, 2005). L'objectif étant la caractérisation des régimes hydrodynamiques représentatifs du site. Les mesures ont eu lieu pendant les marées d'équinoxe pour des coefficients compris entre 85 et 114.

Les données de vagues exploitées ici ont été enregistrées par deux courantomètres électromagnétiques S4 (paramètres Hs, Tp, Dp). Le premier a été positionné au nord du musoir de la digue principale de l'Adour (à 10,48m de fond, du 18/03 à 7h au 24/03 à 17h). Le deuxième a d'abord été mouillé au large du Cap Saint-Martin (à 9,52m de fond du 18/03 à 7h au 21/03 à 12h30) puis au droit de la plage de l'Océan (à 8,3m de fond du 21/03 à 15h au 24/03 à 17h). Ces trois positions sont indiquées sur l'Illustration 2. Ces données sont utilisées pour valider les calculs effectués avec les bathymétries B1 et B2 sur les dates de la campagne.

De plus, la bouée permanente de mesure directionnelle de houle Triaxys (mouillée à 49m de fond) a fait des mesures au large d'Anglet. Elles fournie le spectre directionnel dont on peut aussi déduire les paramètres Hs, Tp et Dp. Cette bouée est située sur le bord ouest de la bathymétrie B2. Ces données sont utilisées soit pour valider les calculs effectués avec B1, soit pour forcer la grille B2.

Les données des bouées Triaxys et Datawell ont également été récupérées pour deux périodes de tempête en 2002 : du 22 au 24 mai (Triaxys) et du 23 au 25 novembre (Datawell).

L'ensemble des données in-situ ont été collectées selon leur format d'origine et ont été traitées par le BRGM.

3.2. LE MODELE SWAN

Le modèle SWAN (Simulating WAves Nearshore, Booij et al. 2004), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), 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 1).

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.

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = S/\sigma$$
(1)

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

 $N(\sigma\theta)$: Spectre de densité de l'action de la houle

- σ : Fréquence relative
- θ : Direction de la houle
- Sin : 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 cidessous :

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

Tableau 1 : Principales caractéristiques de SWAN (version 40.41)

Processus pris en compte

SWAN peut modéliser les processus de propagation suivants :

- propagation à travers un espace géographique ;
- gonflement de la houle ;
- réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion à cause de ces obstacles ;
- diffraction.

SWAN modélise également les processus suivants de **génération et de dissipation** dus à la houle :

- génération par le vent ;
- interactions houle houle (quadruplets et triplets) ;
- dissipation par moutonnement ;
- dissipation par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- dissipation par frottement au fond.

3.3. PARAMETRAGES DE LA MODELISATION

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 (Hs), période (Tp) et direction (Dp) 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, nous l'avons 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 insitu) mais plus rares faute de données disponibles.

4. 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 (Hs<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 » (explicitée dans le paragraphe 4.1) 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.

4.1. POUR DES CONDITIONS CALMES DU 18/03/03 AU 24/03/03 : TESTS SUR LA RESOLUTION ET LE TYPE DE FORCAGE

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 illustrations 3 à 6 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 (Illustration 5 et Illustration 6), 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 illustrations 7, 8 et 9 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).



Illustration 3. Résultats pour la « simulation optimale » le 23/03/03 à 00h.



Illustration 4. Résultat pour la simulation « Spectre Jonswap » le 23/03/03 à 00h.



Illustration 5. Résultats pour la simulation « Bathy 250m » le 23/03/03 à 00h.



Illustration 6. Résultats pour la simulation « conditions normales » le 23/03/03 à 00h.



Illustration 7. Comparaison des hauteurs significatives calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4.



Illustration 8. Comparaison des directions pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4.



Illustration 9. Comparaison des périodes pic des vagues calculées dans les 4 simulations avec les mesures aux 3 positions des capteurs S4.

L'Illustration 10 compare les performances des différentes configurations à l'aide du biais (différence entre la moyenne des valeurs mesurées et calculées) et du scatter index (Komen et al., 1994) qui traduit l'erreur moyenne des calculs. Le SI peut s'exprimer en pourcentages de 0% (parfait) à 100% (totalement faux).

- En terme de hauteur significative, si les résultats sont très comparables pour les 4 configurations, la simulation « conditions normales » est un peu moins fidèle aux enregistrements pour les 3 positions des S4. Cependant, elle reste de bonne qualité. Comme on pouvait le prévoir, la simulation qui restitue globalement le mieux Hs est la configuration « optimale ». Le Scatter Index confirme ces considérations visuelles : en « configuration optimale, SI~16%, alors que pour les « conditions normales », SI~25%. Les erreurs induites par les 4 configurations restent cependant du même ordre de grandeur. Elles ont toute tendance à surestimer la hauteur significative ;
- Pour la direction, la configuration « conditions normales » respecte bien les ordres de grandeur mais traduit moins bien les variations (surtout pour les points S4 Océan et Saint-Martin). Le calcul du SI (2 à 5%) et du biais (-5.4° à 11.6°) ne permet pas de distinguer une configuration comme étant la meilleure pour la direction ;
- Enfin, si on regarde le calcul des périodes, les résultats sont encore très comparables. La configuration « conditions normales » donne des résultats légèrement moins bon. Elle a tendance à sous estimer la période (maximum de 1.1s) alors que les autres configurations la surestime (maximum de 0.6s). Le SI est également le plus élevé (maximum de 11%).

Globalement, au niveau des capteurs S4, le SI se situe entre 15 et 32% pour toutes les variables. L'erreur maximum pour Hs est de 32%. Pour la direction elle ne dépasse pas 5% et pour la période le maximum est de 11%. Toutes les configurations se valent, même si les « conditions optimales » montrent la meilleure adéquation avec les mesures. Les résultats de la configuration « conditions normales » restent cependant satisfaisants pour cette profondeur (10m).

L'illustration 11 présente l'extraction des mêmes paramètres plus au large, au niveau de la bouée Triaxys, vers 50m de fond. Les variations des 3 paramètres ne sont pas aussi importantes que dans les enregistrements mais les ordres de grandeur sont bons. Une analyse plus détaillée au niveau de la bouée Triaxys est présentée au paragraphe suivant.

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

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

		S4 Digu	e Nord	ł		S4 O	cean		S4 Cap St. Martin				
Тр	Moy	Erreur	SI	Biais	Moy	Erreur	SI	Biais	Moy.	Erreur	SI	Biais	
. 6	(s)	rms (s)	(%)	(s)	(°)	rms (s)	(%)	(s)	(s)	rms (s)	(%)	(s)	
Mesures	12.9				13.0				13.3				
S. Optimale	13.5	1.1	9	0.6	13.3	1.1	8	0.3	13.7	1.3	10	0.4	
S. Bathy.													
250x250m	13.5	1.1	9	0.6	13.3	1.1	8	0.3	13.7	1.3	10	0.4	
S. Spectre													
Jonswap	13.5	0.9	7	0.6	13.2	0.9	7	0.2	13.9	1.4	10	0.6	
S. Cond.													
normales	12.1	1.2	9	-0.8	11.9	1.4	11	-1.1	12.5	1.4	11	-0.8	

Illustration 10. Tableau récapitulatif des erreurs entre mesures et simulations aux 3 points de comparaison.



Illustration 11. Comparaison des 3 paramètres de vague calculés par SWAN et enregistrés par la bouée Triaxys pour la simulation « conditions normales ».

4.2. POUR LES CONDITIONS DE TEMPETE 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 illustrations 12 à 14 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.



Illustration 12. Comparaison de la période des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell.



Illustration 13. Comparaison de la hauteur significative des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrés par les bouées Triaxys et Datawell.



Illustration 14. Comparaison de la direction des vagues calculée par SWAN pour la simulation « conditions normales » et enregistrée par la bouée Triaxys.

		Triaxys	2002			Datawell 2002				Triaxys 2003			
		Erreur				Erreur				Erreur			
Hs	Moy	rms	SI	Biais	Moy	rms	SI	Biais	Moy.	rms	SI	Biais	
	(m)	(m)	(%)	(m)	(m)	(m)	(%)	(m)	(m)	(m)	(%)	(m)	
Mesures	3.46				4.40				1.10				
S. Cond.													
normales	2.94	0.67	19	-0.52	4.50	0.30	7	0.10	1.24	0.24	22	0.15	

	Triaxys 2002					Datawe	ell 200	2	Triaxys 2003				
Dir	Moy	Erreur	SI	Biais	Moy	Erreur	SI	Biais	Moy.	Erreur	SI	Biais	
	(°)	rms (°)	(%)	(°)	(°)	rms (°)	(%)	(°)	(°)	rms (°)	(%)	(°)	
Mesures	293.0								304.6				
S. Cond.													
normales	290.7	4.2	1	-2.3					295.4	12.8	4	-9.2	

		Triaxys	2002			Datawe	ell 200	2	Triaxys 2003			
Tn	Moy	Erreur	SI	Biais	Moy	Erreur	SI	Biais	Moy.	Erreur	SI	Biais
. 6	(s)	rms (s)	(%)	(s)	(s)	rms (s)	(%)	(s)	(s)	rms (s)	(%)	(s)
Mesures	12.4				13.8				13.3			
S. Cond.												
normales	12.2	1.4	11	-0.2	14.7	1.3	9	1.0	12.0	1.5	12	-1.3

Illustration 15. Tableau des erreurs des résultats de simulations avec les données de bouée Triaxys et Datawell pour les périodes d'étude de mars 2003 et mai 2002. L'illustration 15 montre que pour des conditions de tempête, l'erreur induite par la modélisation est moins importante que pour les conditions de temps calme. Plus les conditions sont énergétiques avec une hauteur significative élevée, meilleur est le SI : 7% (Hs~4,5m), 19% (Hs~3m) et 22% (Hs~1,25m). Pour la direction, la différence est également nette mais pas pour la période.

4.3. DOMAINE DE VALIDITE DU MODELE A PROXIMITE 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.



4.3.1. Pour des fonds d'environ 50m

Illustration 16. 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.

La régression linéaire entre la hauteur significative des vagues calculée par SWAN et mesurée au niveau de la bouée Triaxys montre une bonne adéquation (Illustration 16). Le coefficient de détermination R² 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.

4.3.2. 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 celle des 3m (cf. Illustration 17 et Illustration 18) 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.

Illustration 17. 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.



Variation Hs (isobathe 3m/CM)

Illustration 18. 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.

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.

A 3m, la résolution de la configuration normale est nettement insuffisante dès que les vagues dépassent 1,2m. Celles-ci sont alors fortement sous-estimées.

5. Détermination du climat de houle sur la Côte Basque

5.1. CLIMATS ET STATISTIQUES DE HOULE AU LARGE

Une étude statistique et une classification des états de mer ont été effectuées par le laboratoire EPOC de l'université Bordeaux 1 et le laboratoire LASAGEC de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour à partir de 7 ans (du 01/01/1997 au 30/09/2003) de données extraites du modèle Wavewatch 3 (NWW3) développé par la NOAA (*Tolman et al.*, 2002). Le point est localisé à 44°N et 2,5°W à une profondeur d'environ 1000m de telle sorte que la direction moyenne des vagues se dirige vers la Côte Basque (Illustration 19). Les trois paramètres utilisés sont Hs, la hauteur significative, Tp, la période pic et Dp, la direction pic. La méthodologie et l'analyse des données sont détaillées dans Abadie et al (2006).



Illustration 19. Point du modèle NWW3 utilisé pour la classification et direction de provenance moyenne des vagues (~302°N), fond GoogleEarth 2009.

Les résultats de la classification sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (Illustration 20). Les cinq premières classes (en vert), qui représentent en tout 66% des états de mer, sont des houles d'énergie moyenne à élevée d'une incidence proche de 300°. Les classes 6, 7, 8, 10 et 12 (en bleu) correspondent à des mers de vent peu formées. Elles ont un poids total de 27%. Enfin, les classes 9 et 11 (en rouge) constituent les houles de tempête avec un poids statistique de 7,5%. Leur forte énergie leur confère un rôle important sur l'évolution des fonds en zone côtière.

N°					
Classe	%	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Description
1	17.85	1.29	10.2	299.7	Houle, printemps et automne
2	15.46	0.85	8.5	297.2	Houle, été
3	12.74	2.10	11.0	299.0	Houle, automne hiver printemps
4	9.96	2.85	13.0	296.6	Houle, hiver
5	9.60	1.43	12.9	289.3	Houle, hiver
6	8.11	1.37	5.4	297.8	Mer du vent, été
7	6.90	1.18	5.2	2.7	Mer du vent, été, NORD
8	6.64	3.14	8.4	301.4	Mer du vent, annuel
9	5.11	4.06	13.9	295.9	Houle, hiver, fortes tempêtes
10	3.16	0.81	4.2	57.2	Mer du vent, été, NORD-EST
					Houle, hiver, très fortes
11	2.38	5.54	12.5	297.0	tempêtes
					Mer du vent, automne hiver
12	2.10	1.08	4.2	182.8	printemps, SUD

Illustration 20. Résultats de la classification des états de mer au point NWW3 (44°N/2,5°W).

Les valeurs moyennes des trois paramètres (Hs, Tp, Dp) sont également calculées (cf. Illustration 21). Le climat de houle moyen est caractérisé par une hauteur significative de 1,83m, une période pic de 9,6s et une direction pic de 301,9°. Les valeurs extrêmes pour trois périodes de retour (un, cinq et dix ans) sont déterminées pour chacune des variables. La hauteur significative des vagues peut atteindre presque 12 m tous les 10 ans avec une période pic qui s'étend jusqu'à 15s. La direction de ces vagues est de 297° pour toutes les périodes de retour.

	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Moyenne annuelle	1.83	9.6	301.9
Période de retour de 1 an	9.70	14.0	297.0
Période de retour de 5 ans	11.20	14.5	297.0
Période de retour de 10 ans	11.90	15.0	297.0

Illustration 21. Moyenne et périodes de retour de 1, 5 et 10 ans des trois paramètres.

Ces valeurs (classes, moyennes et extrêmes) servent de forçage pour SWAN dans la configuration « conditions normales » afin de déterminer les conditions de houle proches de la Côte Basque.

5.2. PROPAGATION DES VAGUES SUR LA COTE BASQUE

Toutes les simulations de cette section sont effectuées avec la configuration « conditions normales » sur la grille B1 à 250m forcée aux bords ouest et nord-ouest par les conditions de vagues explicitées ci-dessus. Les résultats sont présentés sur la Côte Basque uniquement, entre Hendaye et Anglet (cf. Illustration 22).



Illustration 22. Zone de présentation des résultats encadrée en rouge sur l'Illustration 19 (source Géoportail).

5.2.1. Classes de vagues

L'Illustration 23 reprend les cartes de résultats pour les 12 classes en considérant un niveau de marée moyen (2,5m).

Deux classes (10 et 12) présentent des directions provenant du nord-est et du plein sud. La propagation sur la grille B1 n'a alors pas de sens physique. Comme ces classes représentent des mers de vent locales, leur impact près de la côte est négligeable. Pour les autres classes, la direction est peu modifiée jusqu'à la côte, elle est d'environ 300°.

Afin de mieux visualiser les variations de la hauteur des vagues associées aux 12 classes, les résultats sont extraits sur une série de points situés sur l'isobathe des 8m le long de l'ensemble de la Côte Basque (cf. Illustration 24).

Pour les houles les plus importantes (Hs > 4m), la marée joue un rôle important. A marée basse (profondeur de 8m), les vagues se situent dans la zone de déferlement (perte de leur hauteur), alors qu'à marée haute (13m de profondeur) elles se situent dans la zone de gonflement (augmentation de leur hauteur). Des différences allant jusqu'à 0,5m peuvent être constatées.

Ce phénomène est visible pour les 2 classes de tempête (9 et 11).

Dans les zones protégées comme les baies (ex. points 2, 3 et 4) les vagues sont plus petites qu'au niveau des zones exposées telles que les pointes (ex. points 6, 7, 22).



C7 : Hs=1.18m/Tp=5.2s/Dp=2.7°/6,9%

C8 : Hs=3.14m/Tp=8.4s/Dp=301.4°/6,6%



Illustration 23. Carte des 12 classes. Entete : triplet (Hs, Tp, Dp) et occurrence.



Illustration 24. Hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m pour les 12 classes et les 2 conditions de marée.

C'est ce qui ressort également du Tableau 2 qui compare les valeurs des 12 classes du climat de houle au large et au niveau de la Côte Basque (zones exposées et protégées). Ainsi pour la classe 11 par exemple, Hs vaut 5,54m au large, 4.6m au point n°22 (en face de la plage d'Erromardie) et 1,1m au point n°2 (ouest de la baie de Figuier). Globalement, les valeurs de Hs sur la côte sont plus faibles que les valeurs du large (en moyenne de 25% et 78% respectivement pour les secteurs les plus exposés et les plus protégés). Les périodes quant à elles varient peu (légèrement inférieures). Les vagues tendent à s'orienter perpendiculairement à la côte (effet de la réfraction), si bien que les directions peuvent être très différentes en fonction du secteur auquel on s'intéresse (par exemple en moyenne 26° d'écart entre les 2 portions côtières présentées Tableau 2).

	%	Conditions au Large (44°N2.5°W)			Conditions Côte Basque						
N° Classe					Zone	s Expo	sées	Zones Protégées			
		Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Hs (m)	Tp(s)	Dp(°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	
1	17.85	1.29	10.2	299.7	1.0	9.9	308.2	0.3	9.9	340.0	
2	15.46	0.85	8.5	297.2	0.6	8.4	308.2	0.2	8.4	340.0	
3	12.74	2.1	11	299	1.6	10.8	314.5	0.4	10.8	340.0	
4	9.96	2.85	13	296.6	2.3	12.7	314.5	0.5	12.7	340.0	
5	9.6	1.43	12.9	289.3	1.1	12.7	314.5	0.3	12.7	340.0	
6	8.11	1.37	5.4	297.8	0.9	5.5	301.8	0.3	5.5	327.3	
7	6.9	1.18	5.2	2.7	0.8	5.0	5.0	0.7	5.0	5.0	
8	6.64	3.14	8.4	301.4	2.5	8.4	308.2	0.8	8.4	340.0	
9	5.11	4.06	13.9	295.9	3.8	13.9	314.5	0.9	13.9	340.0	
10	3.16	0.81	4.2	57.2	0.1	4.3	25.0	0.2	4.3	35.0	
11	2.38	5.54	12.5	297	4.6	12.7	314.5	1.1	11.7	340.0	
12	2.1	1.08	4.2	182.8	0.0	4.6	265.0	0.0	5.5	315.0	

Tableau 2 : Comparaison entre les valeurs des 12 classes au large (44°N,2.5°W) et au niveau de la Côte Basque (zones exposées : exemple point n°22 en face de la plage d'Erromardie, ; et protégées : exemple point n°2 à l'ouest de la baie du Figuier).

5.2.2. Conditions de houle moyennes

Ce paragraphe présente la propagation des conditions moyennes annuelles de houle jusqu'à la côte : Hs=1,83m, Dp=301,9 et Tp=9,6s. La configuration normale est utilisée avec la grille B1 mais les résultats présentés sont centrés sur le Pays Basque.

L'influence de la marée est également testée. Les niveaux de marée testés sont 0m (cf. Illustration 25), +2,5m (cf. Illustration 26), et +5m (cf. Illustration 27).

A marée basse, la zone de déferlement se situe plus au large. La zone de gonflement des vagues (shoaling) est très distincte (sur l'isobathe des 5m) avec des hauteurs

significatives allant jusqu'à 1,8m. Elle est directement suivie du déferlement après lequel les hauteurs sont inférieures à 0,5m.

Pour une marée moyenne, ce phénomène est moins net mais reste visible à quelques endroits de la côte.

Enfin, à marée haute, le déferlement a lieu au niveau du rivage. Le calcul des vagues avec une résolution de 250m reste un facteur limitant dès qu'on se rapproche du trait de côte.



Illustration 25. Conditions de houle moyennes pour une marée nulle.



Illustration 26. Conditions de houle moyennes pour une marée de +2,5m.



Illustration 27. Conditions de houle moyennes pour une marée de +5m.



Illustration 28. Hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m pour les conditions moyennes de houle et une marée moyenne.

L'Illustration 28 montre la variation de la hauteur significative des vagues le long de la côte à 8m de fond. En moyenne, la hauteur des vagues à 8m de fond est de 1m alors que dans certains endroits protégés elle n'excède pas 0,5m. Les valeurs les plus fortes se situent vers 1,2m.

5.2.3. Valeurs extrêmes

Pour l'étude des valeurs extrêmes, seule la marée haute a été considérée car c'est à ce moment que les vagues sont les plus importantes à proximité des côtes. Là encore, la simulation normale avec B1 a été utilisée et les résultats sont présentés uniquement sur le Pays Basque.

On distingue clairement l'influence des hauts fonds vers 20m de profondeur qui ont tendance à concentrer (par réfraction) l'énergie des vagues sur certains secteurs de la côte (traînées orangées Illustration 29). La profondeur de déferlement se situe environ à proximité de l'isobathe des 5m pour les 3 périodes de retour.

Pour les trois périodes de retour, la hauteur des vagues est à peu près la même à 8m de fond (cf. Illustration 30) : environ 7m au nord et entre 2m et 7m pour la zone sud partiellement protégée.

Les différences entre les zones les plus exposées et protégées sont illustrées Tableau 3, respectivement :

- Hs vaut 7,6m et 2,2m (période de retour décennale, Hs de 11,9m) ;
- Tp varie peu ;
- les vagues s'orientent perpendiculairement à la côte .



Illustration 29. Propagation des valeurs extrêmes (haut : annuel, milieu : 5 ans, bas : dix ans)



Illustration 30. Hauteur significative des vagues sur l'isobathe des 8m pour les conditions moyennes et extrêmes de houle et une marée haute.

	Conditi	ons au	Large	Conditions Côte Basque					
	(44°N, 2.5°W)			Zones Exposées			Zones Protégées		
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Moyenne annuelle	1.8	9.6	301.9	1.3	9.9	314.5	0.4	9.1	340.0
Periode de retour de 1 an	9.7	14.0	297.0	7.0	13.9	314.5	2.0	13.9	340.0
Periode de retour de 5 ans	11.2	14.5	297.0	7.4	15.1	314.5	2.2	13.9	340.0
Periode de retour de 10 ans	11.9	15.0	297.0	7.6	15.1	314.5	2.2	15.1	340.0

Tableau 3 : Comparaison entre les valeurs moyennes et extrêmes au large (44°N, 2.5°W) et au niveau de la Côte Basque (zones exposées : exemple point n°22 en face de la plage d'Erromardie, ; et protégées : exemple point n°2 à l'ouest de la baie du Figuier).

6. Conclusion

Une classification des états de mer réalisée par le laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1 et le laboratoire LASAGEC de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour) à partir de résultats d'un modèle global (NWW3) donne les caractéristiques moyennes, extrêmes et saisonnières des vagues au large.

Ces caractéristiques (saisonnières, moyennes et extrêmes) ont été transposées sur la Côte Basque par le BRGM en utilisant le modèle de vagues SWAN. La phase de validation du modèle, grâce à une campagne de mesures menée en mars 2003 sur la plage d'Anglet, a permis de déterminer l'incertitude liée à la méthodologie utilisée. Ainsi :

- pour des conditions calmes (hauteur significative des vagues (Hs) < 2m) : l'erreur maximale du modèle atteint 32% pour la hauteur des vagues, 5% pour la direction et 11% pour la période et cela pour des profondeurs proches de 10m. A des profondeurs plus grandes (aux environs de 50m), l'erreur est moindre, notamment pour Hs où elle n'est que de 22%. Les tests de sensibilité montrent également que l'utilisation d'une bathymétrie et d'un forçage plus précis (respectivement mailles de 50m et spectres directionnels mesurés) peuvent faire chuter l'erreur de Hs à 15-17% ;
- **pour des conditions de tempête** (Hs > 3m) : les résultats sont de meilleure qualité. A 50m de profondeur, les erreurs sur Hs sont de 7% et 19% pour des hauteurs de vague de 4,5m et 3m respectivement ;
- **le domaine de validité** de cette modélisation s'arrête à environ 8m de profondeur (par rapport au zéro hydrographique). La précision des données bathymétriques utilisées ne permet pas le calcul pour des fonds plus faibles.

Les résultats de la modélisation montrent que pour :

- les 12 classes de climat houle : il existe deux classes au large (10 et 12) qui n'ont pas de sens physique sur la Côte Basque (valeurs quasi nulles). Elles correspondent à des vagues provenant du nord-est et du plein sud. Parmi les autres classes, on remarque que les valeurs de Hs sur la côte sont plus faibles que les valeurs du large alors que les périodes varient peu (légèrement inférieures). D'autre part, les vagues tendent à s'orienter perpendiculairement à la côte (effet de la réfraction), si bien que les directions peuvent être très différentes en fonction du secteur auquel on s'intéresse. Il existe également des variations importantes de la hauteur des vagues le long de la côte. Par exemple, pour la classe de tempêtes (n°11) la valeur de Hs vaut 5,54m au large, 4.6m sur les secteurs les plus exposés (par exemple, en face de la plage d'Erromardie) et

seulement 1,1m sur les secteurs les plus abrités (par exemple à l'ouest de la baie de Figuier) ;

- **les conditions moyennes annuelles (1,8m de Hs au large)** : les hauteurs varient le long de la côte entre 0,4m et 1,3m en fonction de son exposition ;
- les trois périodes de retour considérées : la hauteur des vagues varie peu.
 De 7m à 7,6m pour les secteurs les plus exposés et de 2m à 2,2m pour les secteurs les plus protégés.

C'est la première fois qu'une connaissance exhaustive des paramètres des vagues (conditions saisonnières, moyennes et extrêmes) sur l'ensemble du littoral Basque est réalisée. Cette étude permet de caractériser l'exposition de cette côte aux vagues.

Désormais, il sera possible d'établir quelle est la part de ce phénomène dans l'évolution du trait de côte comme par exemple, le recul des falaises.

Les résultats de cette étude pourront également servir comme paramètres d'entrée à des simulations plus détaillées sur des zones à enjeux (en fonction de la disponibilité de données bathymétriques haute résolution), ou à l'étude de la qualité de l'eau (pollution, panache,...) ou bien encore pour l'évaluation des transports sédimentaires proches de la côte.

Enfin, des améliorations peuvent être apportées notamment sur : i) la prise en compte de séries temporelles plus longues pour la détermination des climats de houle et des valeurs extrêmes ; ii) le calcul de la houle de période de retour centennale, utile dans certains cas d'aménagement du littoral ; iii) et l'amélioration du maillage proche de la côte à partir d'un MNT de meilleure résolution.

7. Bibliographie

Abadie, S., R. Butel, S. Mauriet, D. Morichon, H. Dupuis, 2006. *Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast*, Continental Shelf Research, Volume 26, Issue 16, Octobre 2006.

Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978. *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 569-587.

Booij, N., Haagsma IJ.G.; Holthuijsen L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van der Westhuysen A.J. and Zijlema M., 2004. Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115p.

Brière C., 2005. *Etude de l'hydraudynamique d'une zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet*. Thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Deutsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.

Idier D. et Pedreros R, 2005. Modélisation hydrodynamique de la Côte Basque. Partie 1 : marées, courants de marée et surcotes - BRGM/RP-53705-FR, 38 fig., 4 tab., 75 p.

Komen et al, 1994. Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge University Press, 532 p.

Madsen, O.S., Y.-K. Poon and H.C. Graber, 1988. *Spectral wave attenuation by bottom friction*: Theory, Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 492-504.

Tolman et al, 2002: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 133 pp.



Centre scientifique et technique Service RNSC/RIC 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34