

Mise en place d'outils pour l'étude du forçage des agents dynamiques sur le littoral aquitain

Rapport d'avancement

BRGM/RP-56715-FR
novembre 2008



Mise en place d'outils pour l'étude du forçage des agents dynamiques sur le littoral aquitain

Rapport d'avancement

BRGM/RP-56715-FR
novembre 2008

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM 06LITA01

Mallet C., Falleau N., Pedreros R., Lecacheux S.

Vérificateur :

Nom : S. Aubié

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Ph. Dutartre

Date :

Signature :

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 : Aquitaine, littoral, houle, modèle de propagation, Noaa WaveWatch3, SWAN, hauteur significative, période pic, direction pic.

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

MALLET C., FALLEAU N., PEDREROS R., LECACHEUX S. (2008) – Mise en place d'outils pour l'étude du forçage des agents dynamiques sur le littoral aquitain. Rap. BRGM/RP-56715-FR, 47 p., 23 Fig., 2 tab.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Réalisée dans le cadre de la convention de l'Observatoire de la Côte Aquitaine 2005-2007, cette étude expose la mise en place d'outils pour l'étude de la houle au large et près de la côte aquitaine. Elle s'inscrit dans un projet visant une meilleure compréhension du transport sédimentaire par l'étude et la caractérisation des agents de forçage dynamiques.

Dix années de données (1997 à 2007) issues du modèle WaveWatch 3 de la NOAA ont été analysées pour un point géographique situé dans le Golfe de Gascogne et correspondant à l'un des nœuds du modèle, ses coordonnées sont : 45°N / 5°W. Une analyse statistique des paramètres de houle a permis de cibler les caractéristiques principales de la houle au large de la côte aquitaine. Il a été établi que :

- 70% des houles viennent d'WNW, 40 % ont une hauteur comprise entre 1 et 2 m, et 60 % des périodes sont comprises entre 8 s et 13 s.
- Les moyennes sur toute la période étudiée pour la hauteur significative, la période pic et la direction pic sont respectivement de 2,34 m, 9.6 s et 313.35°.
- Quatre années caractérisées par des houles fortes ont été identifiées : 1999, 2000, 2002 et 2007. Les années 1997, 2003, 2004 et 2005 sont au contraire marquées par de faibles houles en moyenne annuelle.

Le modèle SWAN a été implanté sur la côte aquitaine. Cet outil permet de simuler les paramètres des vagues en zone côtière à partir de données de houle au large. Il est désormais possible de mieux connaître la houle près de la côte lors d'évènements érosifs extrêmes (tempêtes) et d'envisager une étude plus poussée sur les climats de houle côtiers pour mieux comprendre le fonctionnement de la dérive littorale.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Le littoral aquitain	11
2.1. GENERALITES	12
2.1.1. <i>Géologie</i>	12
2.1.2. <i>Géomorphologie</i>	12
1.1.2.1. <i>Le plateau continental</i>	12
1.1.2.2. <i>La plage</i>	12
2.1.3. <i>La cellule sédimentaire</i>	14
2.1.4. <i>Climat</i>	15
2.2. LES FACTEURS D'EVOLUTION DU LITTORAL.....	15
2.2.1. <i>La marée</i>	15
2.2.2. <i>Le vent</i>	15
2.2.3. <i>La houle</i>	16
2.2.4. <i>La dérive littorale</i>	17
2.2.5. <i>Les tempêtes</i>	18
2.2.6. <i>Elévation du niveau de la mer</i>	18
2.2.7. <i>Mouvements de masse</i>	19
2.3. DYNAMIQUE DES PLAGES	19
3. Houle au large	23
3.1. LE MODELE GLOBAL WAVEWATCH 3 DE LA NOAA	23
3.2. ANALYSE DES DONNEES	23
3.2.1. <i>Analyse sur la période de 1997 à 2007</i>	24
3.2.2. <i>Variabilité interannuelle</i>	27
3.2.3. <i>Variabilité saisonnière</i>	30
3.3. VARIABILITE LIEE A L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE	31
4. Houle proche de la côte	33
4.1. IMPLANTATION DE LA MODELISATION	33
4.1.1. <i>Méthodologie</i>	33
4.1.2. <i>Données utilisées</i>	33

4.1.3. Le modèle SWAN.....	34
4.2. RESULTATS	35
4.2.1. Cartes des simulations	35
5. Conclusions.....	45
6. Bibliographie	47

Liste des Illustrations

Illustration 1- Côte aquitaine française, la dérive littorale est représentée par des flèches rouges.....	11
Illustration 2 - Schéma généralisé d'un profil de plage	14
Illustration 3 - Courants induits par la houle au-dessus d'une plage à barre, en présence d'une houle d'incidence faiblement oblique (d'après (Komar, 1998)	16
Illustration 4 - Facteurs naturels d'érosion côtière (Komar, 1998)	19
Illustration 5 - Evolution spatiale des morphologies de plage en Aquitaine. La carte à droite montre la latitude de chaque profil type par rapport à la côte ((Le Nindre et al., 2001).	20
Illustration 6 : Données issues du modèle NWW3, de 1997 à 2007 (M : mai ; S : septembre) au point 45°N/5°W.	24
Illustration 7 - Classification des hauteurs significatives, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.	25
Illustration 8 - Classification des périodes de pic, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.	25
Illustration 9 - Classification des directions de pic, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.	26
Illustration 10 - Ecarts-significatifs des hauteurs significatives moyennes annuelles, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W	28
Illustration 11- Ecarts-significatifs des directions pic moyennes annuelles, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.....	28
Illustration 12 - Ecarts-significatifs des périodes pic moyennes annuelles, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.....	29
Illustration 13 – Répartition des hauteurs significatives, pour l'année 1999 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.	30
Illustration 14 - Emprise du modèle SWAN (entre les deux traits horizontaux : Gironde + Landes). L'isobathe à 20 m est marquée par le contour rouge et le trait de côte par le contour en gras noir. Les croix indiquent les positions des points de la grille NWW3 utilisés.	34
Illustration 15 – Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches) du large à la côte lors de la tempête du 27/12/1999 à 18h. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.	36
Illustration 16 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte lors de la tempête du 27/12/1999 à 18h. Les flèches blanches indiquent le vent. Les conditions initiales au bord ouest sont issues de NWW3 et le vent de COAMPS.	37
Illustration 17 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 23/10/99 à 12h . La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.....	38

Illustration 18- Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 10/10/2004 à 12h. Les flèches blanches indiquent le vent. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.....	39
Illustration 19 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 10/10/2004 à 12h. Les flèches blanches indiquent le vent Les conditions initiales au bord ouest sont issues de NWW3 et le vent de Seawinds	40
Illustration 20 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 06/06/1997 à 6h. Les flèches blanches indiquent le vent . La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.....	41
Illustration 21 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 06/06/1997 à 6h. Les flèches blanches indiquent le vent. Les conditions initiales au bord ouest sont issues de NWW3 et le vent de Seawinds.	42
Illustration 22 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 01/07/1997 à 18h. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.	43
Illustration 23 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 21/12/1999 à 00h. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.	44

Liste des tableaux

Tableau 1 – Répartition des paramètres de houle, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.....	27
Tableau 2 – Grille de calcul de SWAN en coordonnées sphériques.	35

1. Introduction

Le littoral aquitain est constitué de deux types de côte : une côte sableuse et une côte rocheuse. La côte sableuse s'étend sur plus de 230 km (de l'embouchure de la Gironde à l'embouchure de l'Adour) tandis que la côte rocheuse s'étend sur près de 40 km (de l'embouchure de l'Adour à la frontière espagnole). Soumis à des influences naturelles et anthropiques fortes, c'est un milieu fragile dont la protection est difficile et l'entretien coûteux.

Ce rapport d'avancement s'inscrit dans les travaux de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (convention 2005-2007) mené par l'Etat, la Région Aquitaine, le BRGM, et l'ONF. L'objectif est de mieux caractériser et d'anticiper l'évolution du littoral à l'échelle régionale ; ceci passe par une meilleure compréhension des différents facteurs de la dynamique côtière. Les vagues, notamment, jouent un rôle fondamental car elles sont à l'origine de courants côtiers capables de déplacer de grandes quantités de sédiments et de modifier la morphologie du fond et du trait de côte. Ce rapport présente une première approche des méthodes statistiques et numériques mises en place pour améliorer la connaissance :

- des houles au large de la côte aquitaine. Pour cela, les données de vent et de vagues (hauteur, direction, période) du modèle mondial WaveWatch3 de la NOAA ont été analysées ;
- de la houle côtière. Le modèle SWAN a été implanté sur la côte atlantique française sud et plusieurs cas de houles types ont été choisis et propagés vers la côte au niveau des différentes cellules sédimentaires.

Les résultats pourront être utilisés dans les diverses études sur l'érosion de la côte aquitaine afin de déterminer le rôle des vagues dans le transport sédimentaire.

2. Le littoral aquitain

La côte aquitaine est caractérisée par un climat, une morphologie et des paramètres océanographiques variables, qui lui confèrent une évolution différente du nord au sud. Ce linéaire de 270 km (*Illustration 1*) est soumis quotidiennement à des houles d'amplitude plus ou moins forte, que nous tenterons de quantifier en 2^{ème} partie.

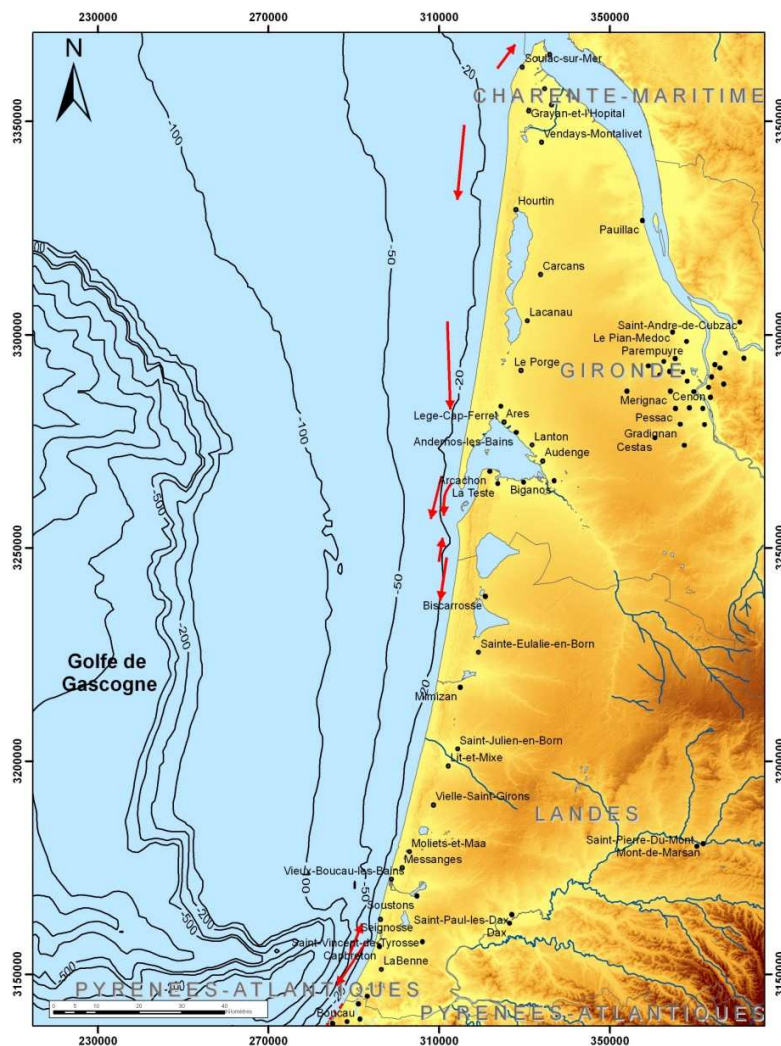


Illustration 1- Côte aquitaine française, la dérive littorale est représentée par des flèches rouges

2.1. GENERALITES

2.1.1. Géologie

La zone côtière du bassin aquitain est constituée de formations géologiques récentes tertiaires et quaternaires. De très nombreux travaux, menés principalement dans le cadre des explorations pétrolières, ont permis d'acquérir une bonne connaissance de la subsurface. Les formations affleurantes correspondent à une couverture de terrains en grande partie continentaux, d'âge plio-quaternaire, reposant sur un substratum marin, d'âge oligocène (34-23.5 Ma) à miocène (23.5-5.3 Ma).

2.1.2. Géomorphologie

1.1.2.1. Le plateau continental

Le golfe de Gascogne est une baie océanique semi-fermée largement ouverte sur l'Océan Atlantique. Le plateau continental s'étend de la côte jusqu'à 200 m de profondeur. Sa largeur est maximale au large de la Bretagne, de l'ordre de 300 km ; elle se réduit vers le sud jusqu'à environ 30 km au large du Pays-Basque et des côtes espagnoles. Dans le sud du Golfe, le plateau se rétrécit considérablement et laisse la place au Gouf de Capbreton. Le talus continental entaille alors profondément le plateau continental en séparant la plaque aquitaine, au nord, de la plaque Cantabrique, au sud.

D'une longueur totale de quelques 250 km, le Gouf prend naissance devant Hossegor et Capbreton (Landes) à moins de 250 mètres du trait de côte et rejoint le canyon de Santander pour déboucher sur la grande plaine abyssale du Golfe de Gascogne vers 3500 mètres de profondeur.

La pente continentale représente la transition entre le plateau continental et la plaine abyssale, sa largeur n'excède pas quelques dizaines de km. Le centre du golfe est une zone dont les profondeurs atteignent 4000 m. La pente du plateau est douce autour du 45ème parallèle et plus forte au sud, ce qui rend la côte plus exposée à l'action de la houle.

1.1.2.2. La plage

Le profil de plage présente généralement une forme concave depuis la dune vers le large. Il peut présenter des morphologies comme des barres sableuses sur l'ensemble du profil, ainsi que des croissants de plage, formes plus rares et éphémères au niveau de la berme en haut de plage. Dans les environnements tidaux, la zone littorale est compartimentée en plusieurs zones morphologiquement distinctes en fonction des niveaux de marée atteints :

- Le domaine subtidal est le domaine situé sous le niveau des basses mers, il comprend le large et l'avant-côte.

- Le domaine intertidal est situé dans la zone de battement des marées, et comprend l'avant plage. La largeur de cette zone est directement fonction de l'amplitude du marnage et de la pente de la plage. Le domaine intertidal est très dynamique en raison du balayage de l'estran par la marée.
- Le domaine supratidal est le domaine supérieur du profil de plage, l'arrière-plage. C'est sur cette zone que se développe le cordon dunaire, sous l'effet des apports éoliens en provenance de la zone intertidale et de leur interaction avec la végétation.

Il existe plusieurs types de côtes à plages, mais toutes sont façonnées par les mêmes agents (marée, courants, vents, houle) et leurs formes dépendent étroitement du bilan sédimentaire. Dans chaque plage, on peut distinguer plusieurs zones caractérisées par une dynamique et une morphologie propres.

Nous distinguerons par la suite la côte sableuse de la côte rocheuse.

La côte sableuse

Le littoral sableux aquitain s'étend sur 230 km limités au nord par l'embouchure de la Gironde et au sud par l'embouchure de l'Adour. Essentiellement naturel, il est composé d'un système de plages de sable, d'un système dunaire et d'une forêt bordière.

La côte aquitaine est en voie de régularisation, processus qui se déroule depuis plusieurs millénaires. Sur une grande partie de son tracé, elle apparaît rectiligne mais, à l'échelle déca-kilométrique, son orientation varie suffisamment pour que ceci puisse avoir des conséquences notables sur le transport sédimentaires.

A l'échelle kilométrique, elle comprend un système de barres et sillons globalement parallèles à la côte dont la disposition périodique est due à la formation de cellules de transport à la fois parallèles et perpendiculaires au littoral. Les seules interruptions de cordon dunaire correspondent aux embouchures (Gironde, Arcachon, courants landais, Adour) qui ont résistés aux processus de régularisation. L'illustration 2 synthétise la nomenclature utilisée pour décrire les principales entités morphologiques de plage, du nord au sud du littoral Aquitain.

Les plages d'Aquitaine sont constituées de différents corps sédimentaires plus ou moins parallèles au rivage, sur lesquels les vagues de tempête ont une influence (*Illustration 2*). Du large vers la côte, on distingue les paléo-rivages, les barres d'avant-côte, les barres et baïnes de bas-estran, la berme, la haute-plage avec banquette ou microfalaie, le versant dunaire au vent (ouest), le replat dunaire au sommet, le versant dunaire sous le vent (est), et la pente d'éboulement ou le talus d'envahissement. L'ensemble du système « barres-plage-dune » est mobile.

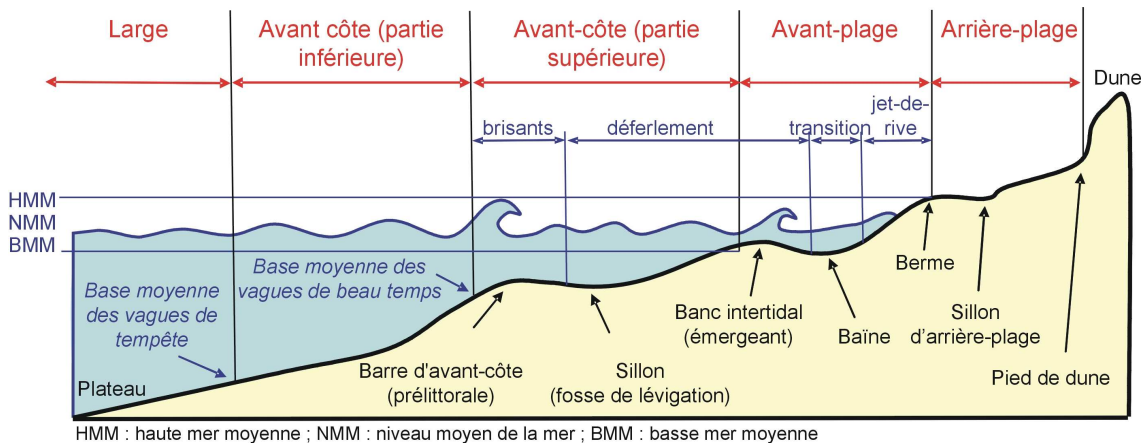


Illustration 2 - Schéma généralisé d'un profil de plage

Tous ces corps sont interdépendants, liés par un bilan sédimentaire : les gains ou déficits de sable constatés sur la plage sont liés au stockage et déstockage de sable dans les autres corps sédimentaires.

La côte rocheuse

Située dans les Pyrénées-Atlantiques, la côte basque française s'étend sur 42 km. Elle est délimitée, au nord, par l'embouchure de l'Adour et au sud par la frontière espagnole, matérialisée par le fleuve côtier la Bidassoa.

La Côte Basque se situe à la jonction de la côte sableuse aquitaine et du littoral espagnol. De ce fait, l'orientation du trait de côte est irrégulière : au nord, il est orienté vers le NNE, puis, à partir de Guéthary il s'oriente vers l'ENE. La morphologie de la côte est constituée d'une succession de falaises rocheuses (marnes, marno-calcaires, flyschs) et de plages sableuses en fond de baies.

2.1.3. La cellule sédimentaire

Le concept de « cellule sédimentaire côtière » permet de définir des limites géographiques de tronçons littoraux dans le cadre d'études portant sur l'érosion. Une cellule sédimentaire côtière peut être définie comme une portion de trait de côte et de zones côtières associées à l'intérieur de laquelle le mouvement des sédiments est en grande partie confiné. Dans la pratique, cela signifie que les mesures prises dans une cellule sédimentaire spécifique pourront avoir un impact sur d'autres secteurs de la même cellule, mais qu'elles n'affecteront pas les cellules adjacentes. En Aquitaine, des cellules sédimentaires ont été définies sur la côte sableuse (atlas de l'aléa érosion côtière en cours) et sur la côte rocheuse par (Genna *et al.*, 2004).

2.1.4. Climat

Le climat de Gironde et des Landes est de type océanique, marqué par des hivers doux et des températures estivales plutôt chaudes. Les pluies sont réparties en toutes saisons, rarement violentes, mais plus importantes en automne et en hiver. Les températures deviennent de plus en plus chaudes et humides à mesure que l'on se déplace vers le sud, mais un certain contraste existe entre la frange littorale très douce, l'arrière pays tempéré et les zones forestières aux amplitudes thermiques quotidiennes plus marquées.

Le département des Pyrénées Atlantiques est un des plus méridionaux de France, ce qui le met à l'abri des zones les plus actives des perturbations océaniques. Au sud du département, le massif des Pyrénées constitue une barrière sur laquelle butent les courants atmosphériques du NW, au printemps (abondantes précipitations). La présence de l'océan engendre des étés secs et une faible amplitude thermique (frange littorale). Le climat des Pyrénées Atlantiques est océanique atténué, caractérisé par des hivers doux et des printemps pluvieux.

2.2. LES FACTEURS D'EVOLUTION DU LITTORAL

Le littoral sableux aquitain est très mobile. Il est influencé par trois principaux agents dynamiques : la houle, la marée et le vent. Ces aléas sont les facteurs d'évolution du littoral, et entraînent soit un recul, soit une avancée du domaine côtier.

2.2.1. La marée

La marée est de type semi-diurne, et peut entraîner une variation du niveau marin de l'ordre de 4,3 m (embouchure de l'Adour) à 5,5 m (embouchure de la Gironde). Elle influe sur la position de la zone de déferlement, à l'origine de la mise en mouvement d'une grande quantité de sédiments. De plus, la dissipation de l'énergie des vagues par frottement sur le fond entraîne une variabilité tidale des hauteurs significatives.

2.2.2. Le vent

Le vent, à l'origine des houles formées au large, peut également recréer des vagues dans la zone côtière. De plus, les phénomènes côtiers d'*upwelling* et de *downwelling*, occasionnés par les vents et la force de Coriolis, peuvent être à l'origine d'importants mouvements de sable entre le fond et la couche de surface océanique. Les débits solides éoliens sont estimés à 1 million de m³ en moyenne sur l'estran (zone intertidale), c'est-à-dire un transit de 3.6 à 13.7 m³/m linéaire/an de sable qui avance vers l'intérieur des terres (Pedreros, 2000). Ce sont des apports non négligeables mais qui ne transitent pas obligatoirement sur la dune, une grande partie étant reprise par la mer. Au niveau du littoral aquitain, les vents les plus violents viennent du WSW au NNW. Leur vitesse peut atteindre 16 m/s à l'embouchure de la Gironde (SOGREAH and LARAG, 1995).

2.2.3. La houle

Phénomène ondulatoire, la houle entraîne un mouvement orbital des particules d'eau. La houle se comporte généralement comme un agent de remise en suspension des sédiments qui sont ensuite transportés par des courants. Dans la zone de déferlement (surf zone), le transport est généralement dominé par les houles, à travers leur déferlement et les courants transversaux (courants de retour, jet de rive) et longitudinaux (dérive littorale) qu'elles induisent.

L'incidence de la houle par rapport à la côte étant majoritairement d'WNW, elle génère un courant longitudinal, ou *longshore*, la dérive littorale. Ceci entraîne la migration vers le sud d'importants stocks sédimentaires. Cependant, la houle en Aquitaine génère également un transport de sable perpendiculaire à la côte, ou *cross-shore*. Les principaux transports sédimentaires dus à la houle, selon le profil transversal de plage, sont résumés ci-dessous (*Illustration 3*).

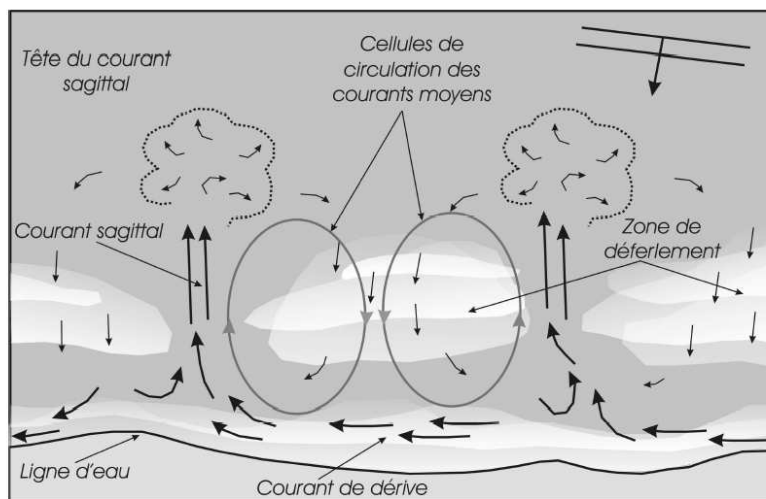


Illustration 3 - Courants induits par la houle au-dessus d'une plage à barre, en présence d'une houle d'incidence faiblement oblique (d'après (Komar, 1998))

La côte aquitaine est une zone très exposée aux grandes houles générées par les dépressions au large du golfe de Gascogne.

Par rapport aux plages landaises, celles de Gironde sont plus larges et de plus faibles pentes (Le Nindre *et al.*, 2001). Elles sont donc plus dissipatives (l'énergie de la houle est dissipée par la faible pente de la zone intertidale), contrairement aux plages landaises, plus réfléchissantes.

Les trois paramètres principaux permettant de caractériser une houle sont la hauteur, la période pic et la direction pic :

- La hauteur significative (H_s) d'une houle est la moyenne du tiers supérieur des vagues mesurées pendant une période de 20 minutes. La hauteur significative

va jouer un rôle important sur le transport sédimentaire car elle conditionne l'intensité du déferlement des vagues dans la zone de surf.

- La période pic (T_{PIC}) correspond au train d'onde principal.
- La direction pic (D_{PIC}) est la direction du train d'onde principal. Quand la houle arrive près de la côte, les crêtes tendent à s'aligner aux lignes bathymétriques par le phénomène de réfraction géométrique. Ceci implique une dissipation de l'énergie et une diminution de la hauteur des vagues si l'angle d'incidence de la houle n'est pas droit.

L'énergie de la houle varie linéairement par rapport à la longueur d'onde et comme le carré de la hauteur significative.

Tous ces paramètres de houle peuvent être obtenus en mouillant une bouée à un emplacement choisi, ou en utilisant un modèle de propagation de la houle comme SWAN, dont il sera question plus loin.

Propriétés physiques, dissipation de l'énergie

Quand une vague se propage, l'eau est perturbée en surface et en profondeur ; les particules d'eau décrivent des cercles, qui deviennent de plus en plus petit en s'approchant du fond. Quand la profondeur (d) devient supérieure à la moitié de la longueur d'onde (λ), la contribution du fond sur le mouvement des particules d'eau est négligeable. Le lien entre profondeur et longueur d'onde permet d'identifier trois zones :

- les eaux profondes $d > \lambda/2$
- les eaux intermédiaires $\lambda/25 < d < \lambda/2$
- les eaux peu profondes $d < \lambda/25$

Chacune de ces zones est caractérisée par de la dissipation d'énergie, dont les causes peuvent être différentes : le moutonnement (« whitecapping »), le frottement avec le fond, et le déferlement sont les principales causes de dissipation d'énergie. Cette dissipation d'énergie se traduit par une diminution de hauteur significative des vagues.

En eaux profondes, la perte de hauteur est due principalement au moutonnement (déferlement non bathymétrique). Quand la houle arrive à l'approche des côtes (eaux intermédiaires), elle commence à être perturbée par le changement de bathymétrie (frottement, réfraction, gonflement, déferlement).

2.2.4. La dérive littorale

Les houles obliques, les courants de marée et le déferlement interfèrent pour déplacer en masse les sédiments côtiers. C'est la dérive littorale.

2.2.5. Les tempêtes

Lors de conditions de beau temps, les houles sont de faibles amplitudes et de périodes longues. La tranche d'eau mobilisée par le vent est de faible épaisseur. L'avant-plage inférieure n'est pas affectée par les houles, et les sédiments fins se déposent. Dans l'avant-plage supérieure, sous l'action des courants induits par les houles, associés aux bancs et aux zones de brisants et de déferlement, les sédiments sont transportés vers la côte, provoquant une accrétion.

En conditions de tempête, des houles de plus grande amplitude approfondissent le « niveau de base ». La zone de dissipation d'énergie des vagues concerne l'ensemble de l'avant-plage inférieure et s'élargit parfois même jusqu'à la plate-forme. L'avant-plage supérieure est alors fortement érodée et les sédiments sont redistribués sur l'avant-plage inférieure en « couches de tempêtes » et quelquefois vers l'intérieur des terres par les processus de débordement des dunes.

Le profil de tempête d'une plage est caractérisé par une falaise vive en limite de haut de plage, où se concentrent des minéraux lourds, et un amaigrissement du bas de plage, avec formation des dépôts résiduels. Par contre, en avant-plage, se produit une accumulation de sédiments, sous la forme de bancs immergés. L'avant-plage supérieure s'érode pendant les fortes tempêtes, tandis que l'avant-plage inférieure s'aggrade (Komar, 1998).

Après le passage de la tempête, la plage pourra se reconstituer grâce au transport de sédiment par les vagues depuis les bancs immergés. En revanche, une falaise dunaire ne peut pas directement compenser le recul subi. Mais, dans certaines conditions, des banquettes et des nebkas peuvent se développer en avant de la falaise dont le profil tend naturellement à s'adoucir.

2.2.6. Elévation du niveau de la mer

De nombreux phénomènes contribuent à faire varier le niveau marin. On distingue le niveau marin mondial des variations régionales.

- Le niveau marin mondial est déterminé par des effets dits stériques (expansion thermique des océans) et des effets dits non stériques (conservation de la masse d'eau totale dans le système climatique).
- Les variations régionales ou anomalies locales résiduelles s'expliquent par le forçage du vent, la marée, les variations locales de salinité, les apports ou retraits de masses d'eau douce à l'océan et finalement les erreurs dans l'estimation de la hauteur stérique.

Le profil des côtes sédimentaires peut être modélisé comme une fonction parabolique de la taille des sédiments, du niveau de la mer, de la hauteur et de la périodicité des vagues, ainsi que de l'amplitude de marée. Quand le niveau de la mer monte, la parabole entière doit monter avec elle, ce qui signifie qu'il faut une quantité supplémentaire de sédiments pour construire le profil. Ces sédiments proviennent de la

côte. Ce phénomène est reconnu comme facteur significatif de l'érosion côtière dans toutes les mers régionales.

2.2.7. Mouvements de masse

Le terme « mouvements de masse » englobe une vaste gamme d'interactions terre-mer, qui peuvent avoir comme conséquences le déplacement de pans entiers de falaises (éboulements ou glissements). Ces mouvements de masse sont dus, d'une part, à des processus terrestres, comme les précipitations engendrant des circulations d'eau au sein des terrains et du ruissellement en surface, les alternances gel-dégel, et d'autre part, à la sape du pied des falaises par l'action des vagues.

2.3. DYNAMIQUE DES PLAGES

La formation des plages et des dunes littorales, en particulier en Aquitaine, date de l'Holocène, période d'apports en masse de sables et galets. Depuis les stocks sédimentaires côtiers diminuent ce qui constitue le facteur essentiel naturel de l'érosion côtière à l'échelle du globe. L'ensemble de ces processus d'évolution géologique et géomorphologique peut être résumé dans un graphique temps-espace (*Illustration 4*). On notera que la distance et le temps reflètent dans quelle mesure le facteur se produit et cause l'érosion.

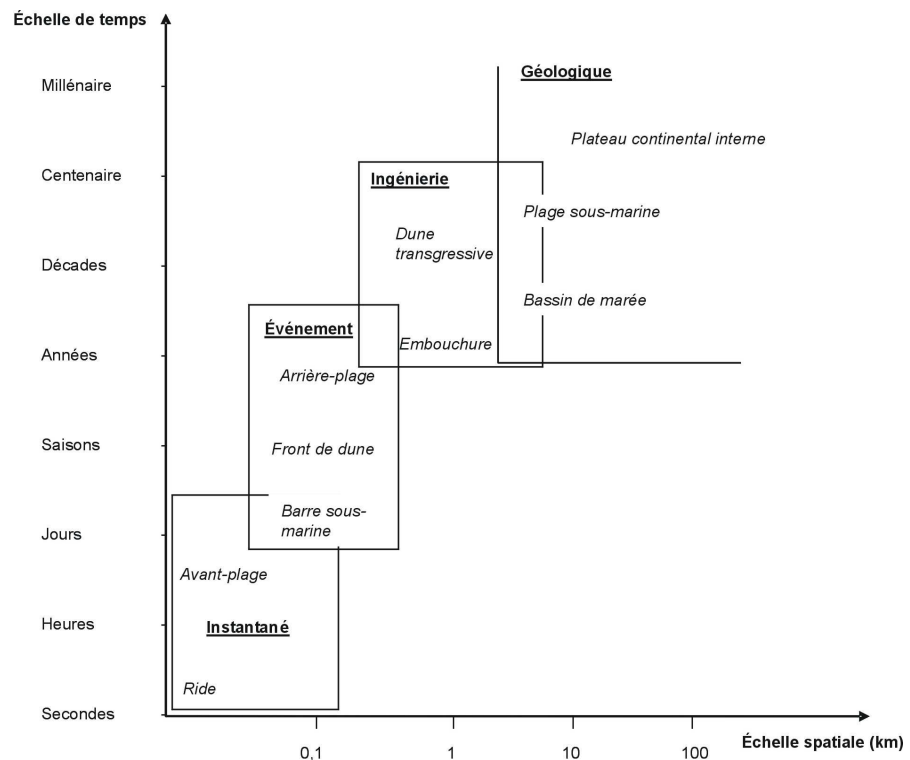


Illustration 4 - Facteurs naturels d'érosion côtière (Komar, 1998)

La combinaison des agents de forçage qui viennent d'être décrits façonne différentes morphologies de plage sur la côte sableuse aquitaine, dont il a été établi une typologie, et une répartition spatiale. Ces morphologies ont été mises en évidence et classifiées (Illustration 5).

En ce qui concerne la plage émergée, la typologie des avant-dunes est liée au fonctionnement de la plage. Les avant-dunes ont un fort caractère indicateur sur les tendances évolutives des côtes meubles.

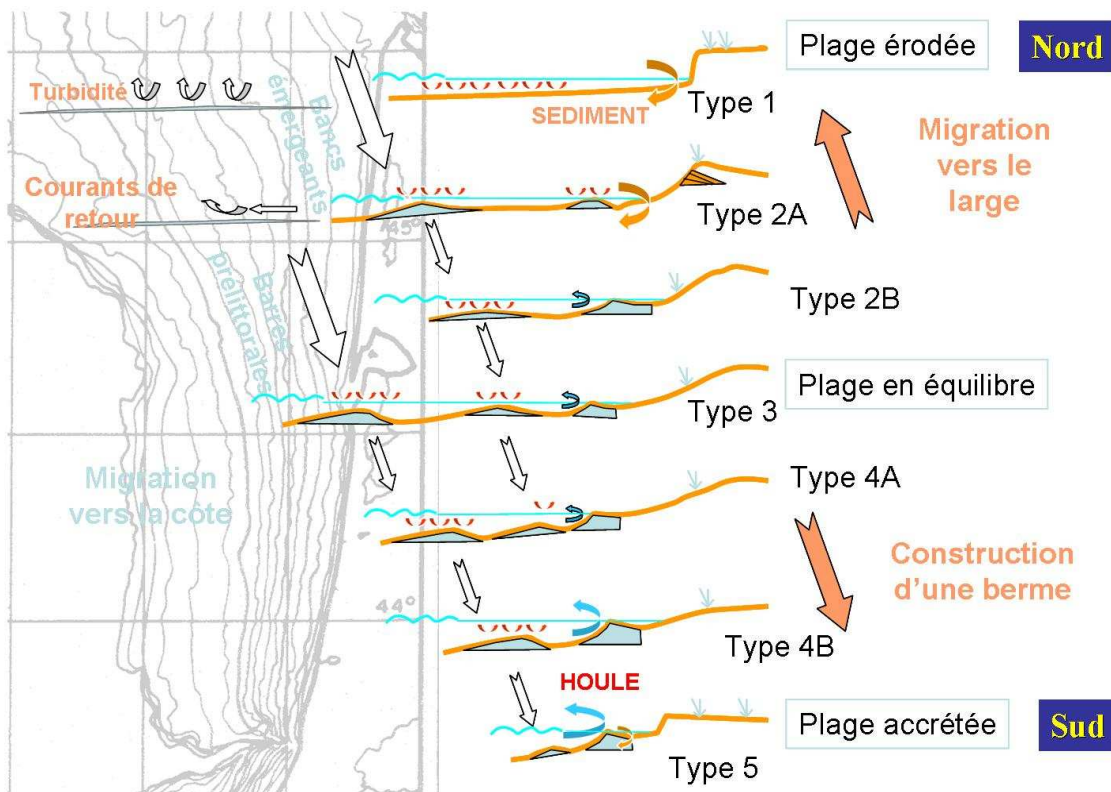


Illustration 5 - Evolution spatiale des morphologies de plage en Aquitaine. La carte à droite montre la latitude de chaque profil type par rapport à la côte ((Le Nindre et al., 2001).

La morphologie des plages évolue dans le temps. Il en résulte une variation du stock sédimentaire. Si le bilan est négatif, il y a érosion ; si le bilan est positif, il y a accrétion ; les situations stables sont rares. Ces modifications dépendent de plusieurs variables, météorologiques, océanographiques, morphologiques, sédimentaires, lithologiques et structurales. Les variables fondamentales sont l'orientation de la côte par rapport à la direction des houles dominantes (les plages transversales, orientées perpendiculairement à la direction d'approche des houles, sont construites par le déferlement et les plages obliques ou longitudinales sont construites par la dérive), la position des plages par rapport aux vents dominants et au passage des dépressions, la nature et l'intensité des tempêtes, le type de vagues, la morphologie de l'avant-plage, la texture des sédiments.

Les principaux cycles d'érosion sont souvent associés aux tempêtes (Hayes *et al.*, 1972). Le cycle saisonnier est également dominant, il dépend des variations de l'énergie des houles liées aux conditions météorologiques.

Les tempêtes (dépressions aux latitudes moyennes, ouragans tropicaux) ont, malgré leur courte durée (parfois quelques heures à peine), des effets beaucoup plus marqués que les processus qui fonctionnent pendant toute l'année. Sur une côte à falaises sableuses, le recul peut atteindre plusieurs dizaines de mètres en une seule tempête. Deux tempêtes, entrecoupées d'une période de répit durant laquelle le stock sédimentaire se reconstitue, auront un effet érosif moindre qu'une série d'épisodes de tempêtes successifs.

3. Houle au large

3.1. LE MODELE GLOBAL WAVEWATCH 3 DE LA NOAA

Le premier objectif de cette étude est de disposer de données de houle régulières au large de la côte Aquitaine afin :

- d'effectuer une analyse statistique des paramètres de houle de 1997 à 2007 et ainsi mieux caractériser la houle au large,
- avoir à disposition des données pour forcer le modèle SWAN sur une plus petite emprise bordant la côte aquitaine pour étudier la houle côtière.

Pour cela, les données mises à disposition par la NOAA (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration) ont été rapatriées et exportées à partir du site (<http://polar.ncep.noaa.gov>). Il s'agit des sorties du modèle WaveWatch 3 (NWW3) : il couvre un large domaine réparti sur toutes les longitudes entre 78°S et 78°N. La résolution spatiale est de 1° en latitude par 1,25° en longitude. Les paramètres qui nous concernent sont la hauteur significative (h_s), la période pic (T_p), la direction pic (direction de provenance de la houle, D_p), et le vent (u, v).

3.2. ANALYSE DES DONNEES

Pour l'analyse de la houle au large, les données du modèle WaveWatch 3 ont été utilisées au point de grille le plus proche de la bouée Gascogne (45°N/5°W) pour la période allant de 1997 à 2007 (Illustration 6). Ce point est situé suffisamment au large pour que la houle ne soit pas encore soumise aux effets locaux (gonflement et réfraction).

L'examen rapide de l'illustration 6 met en évidence la variabilité interannuelle des hauteurs significatives et des périodes pic. Pendant les mois d'été, ces deux paramètres ont des valeurs plus faibles que lors des mois d'hiver. Les directions des vagues les plus fréquentes sont observées autour de 300°. Néanmoins, il existe une deuxième direction préférentielle de provenance des vagues aux alentours de 60°.

Un examen plus approfondi de ces valeurs a été effectué grâce à trois types d'analyses. Tout d'abord, l'étude sur toute la période considérée a fourni des statistiques représentatives des paramètres de la houle au large. Puis, l'analyse de la variabilité interannuelle a permis de mettre en évidence les années remarquables. Enfin, par une analyse de la variabilité saisonnière, les mois les plus énergétiques ont été ciblés.

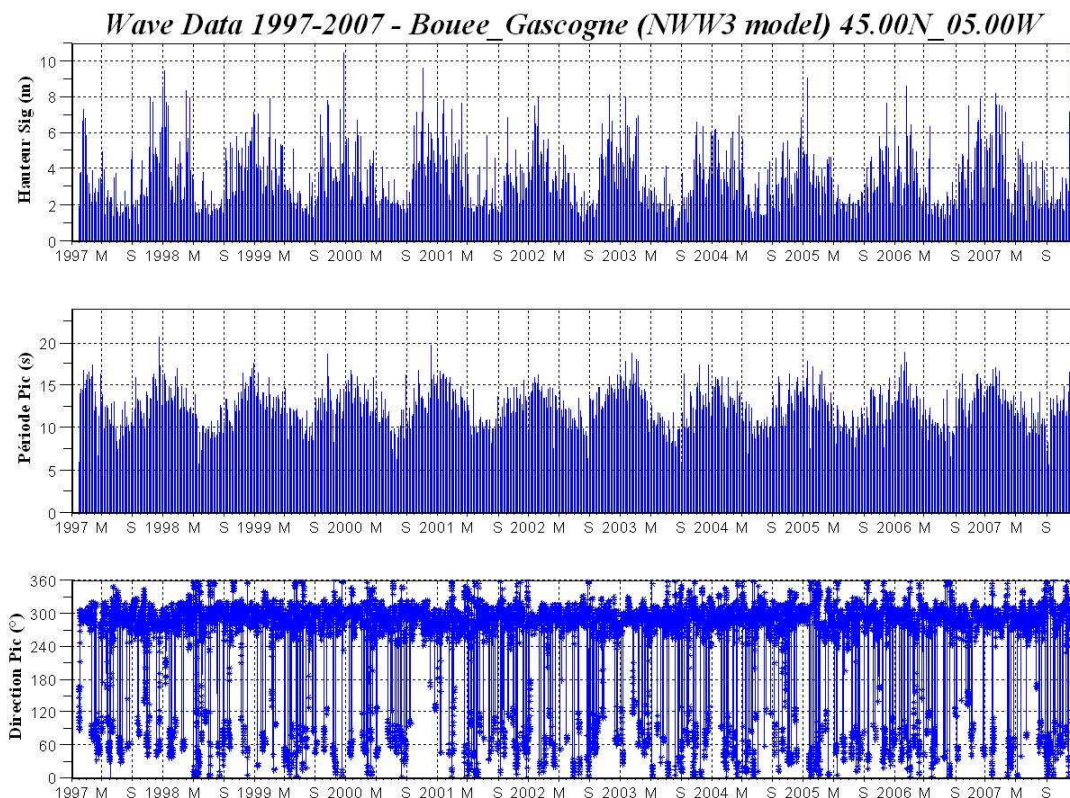


Illustration 6 : Données issues du modèle NWW3, de 1997 à 2007 (M : mai ; S : septembre) au point 45°N/5°W.

3.2.1. Analyse sur la période de 1997 à 2007

Moyenne

Sur toute la période considérée, la hauteur significative moyenne est égale à 2.34 m, la période pic moyenne est de 9.6 s, et la direction pic moyenne est de 313.35° (WNW). Lors de travaux similaires antérieurs, effectués avec des données du modèle WaveWatch3 de 1997 à 2003 sur le point (45°N/2,5°W), les moyennes de la hauteur significative, de la période pic et de la direction pic ont été évaluées respectivement à 1,57 m, 9,59 s et 301,9° (Abadie *et al.*, 2005). Les différences en termes de hauteur et de direction avec nos valeurs s'expliquent par une exposition plus importante de notre point aux vagues du large.

Classification des paramètres de houle

La classification des hauteurs significatives, des périodes de pic et des directions, permet de cibler les valeurs qui reviennent le plus fréquemment. Les histogrammes présentés ci-dessous présentent la distribution en pourcentage de ces paramètres sur toute la période disponible (1997-2007).

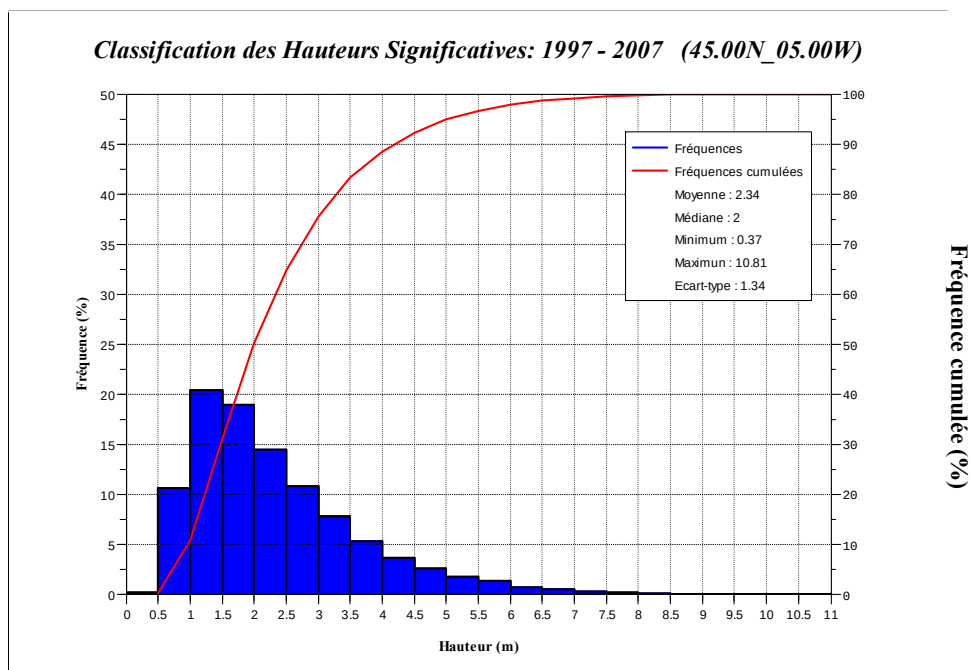


Illustration 7 - Classification des hauteurs significatives, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

Les hauteurs significatives (Illustration 7) sont comprises entre 0.37 m et 10.81 m, et près de 40 % sont comprises entre 1 m et 2 m.

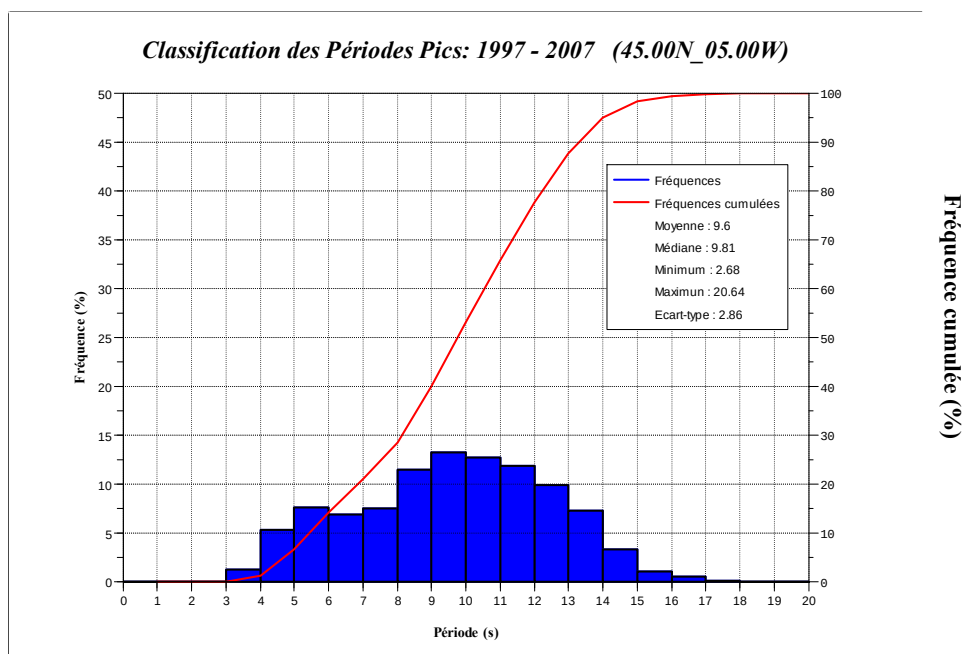


Illustration 8 - Classification des périodes de pic, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

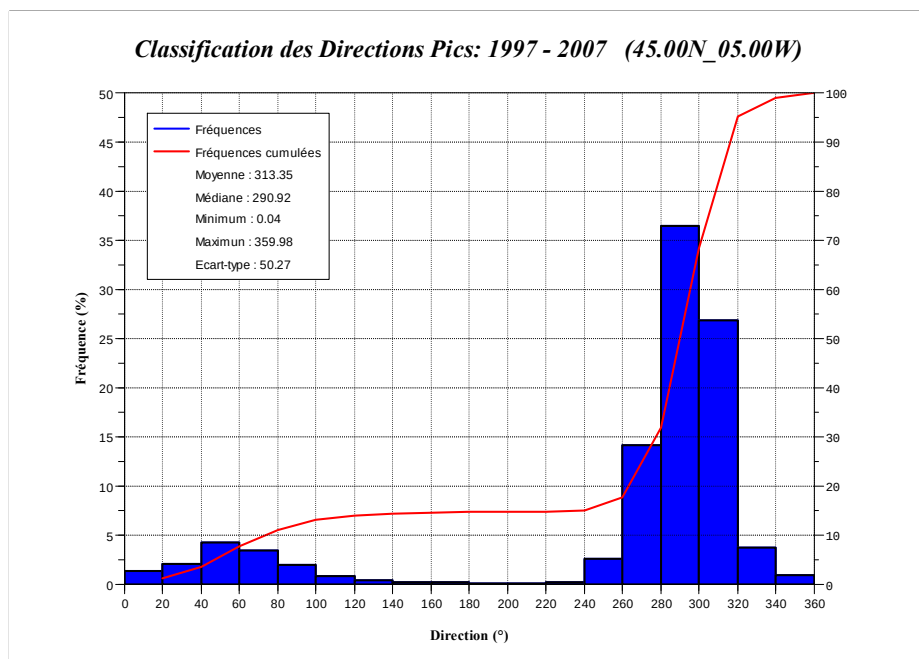


Illustration 9 - Classification des directions de pic, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

Les périodes pic (Illustration 8) se situent entre 2.68 s et 20.64 s. Près de 60 % sont comprises entre 8 s et 12 s.

Les directions pic (cf. Illustration 9) recouvrent l'ensemble du cercle trigonométrique. Cependant, cette représentation par classification est bimodale ; 85% des houles ont des directions de provenance comprises entre 260° (WSW) et 320° (NW), et environ 10 % viennent du cadran nord-est. Les houles du sud sont extrêmement rares.

Résumé

La répartition des paramètres de houle sur la période 1997-2007 est résumée dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 1). Chaque paramètre est caractérisé par son minimum, son maximum, sa moyenne, son écart-type, et la fréquence d'occurrence de trois classes.

Variable	Source	Min	Max	Moy.	Ecart-type	< 2	2<<4	>4	Période
Hs (m)	NWW3	0.37	10.81	2.34	1.34	50%	38%	12%	1997-2007
Variable	source	Min	Max	Moy.	Ecart-type	< 8	8<<13	>13	Période
Tp (s)	NWW3	2.68	20.64	9.6	2.86	28%	59%	13%	1997-2007
Variable	source	Min	Max	Moy.	Ecart-type	180<<280	280<<360	0<180	Période
Dp (°)	NWW3	0	359.9	313.3	50.27	17%	68%	15%	1997-2007

Tableau 1 – Répartition des paramètres de houle, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

Les hauteurs significatives sont majoritairement inférieures à 2 m (50 %), les périodes comprises entre 8 et 13 s (59 %), et les directions de pic principalement WNW (68 %). Une telle direction préférentielle s'explique par la présence du continent, qui empêche la formation des grandes houles de SW. **Les houles très importantes et de grande longueur d'onde ($H_s > 4$ m et $T_p > 13$ s) à l'origine des modifications morphologiques du littoral, restent des phénomènes très ponctuels.**

En 2005, l'étude sur les climats de houle (Abadie *et al.*, 2005), a établi que 67 % des états de mer sont des houles océaniques d'énergie moyenne, 23 % sont des mers de vent d'énergie faible, et 7 % des climats de tempête très énergétiques qui jouent vraisemblablement un rôle important sur l'évolution des fonds en zone côtière. Même si ces valeurs correspondent à un point plus proche de la côte, la corrélation avec nos résultats est bonne.

3.2.2. Variabilité interannuelle

Pour chaque paramètre, les écarts significatifs (écart entre la moyenne annuelle et la moyenne sur la période étudiée) ont été calculés.

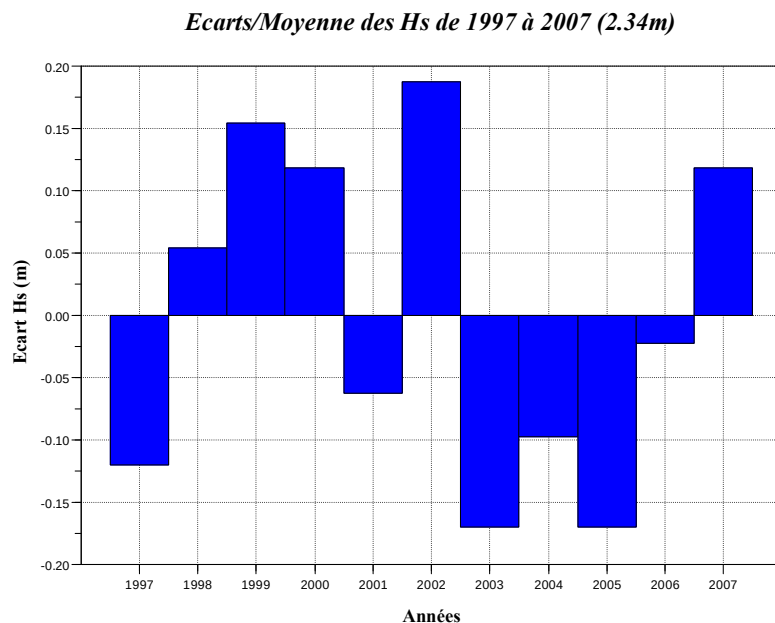


Illustration 10 - Ecart-significatifs des hauteurs significatives moyennes annuelles, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

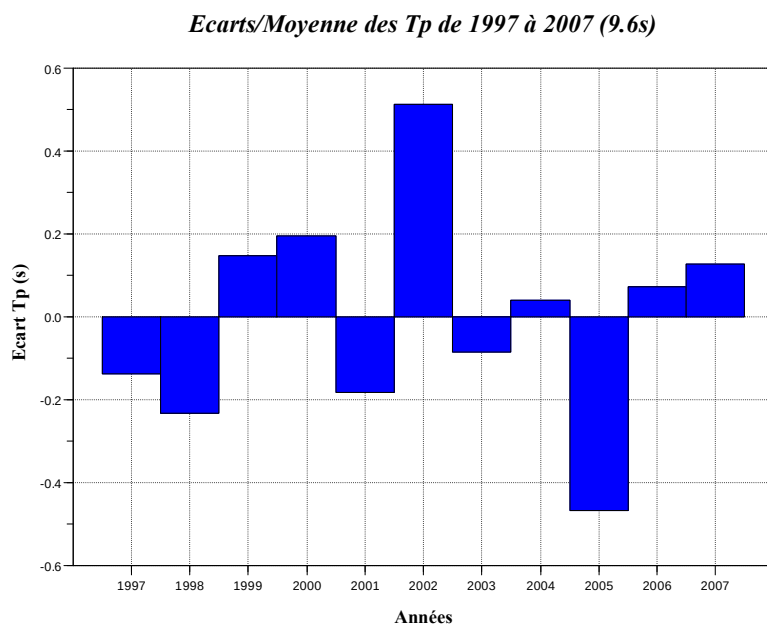


Illustration 11- Ecart-significatifs des directions pic moyennes annuelles, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

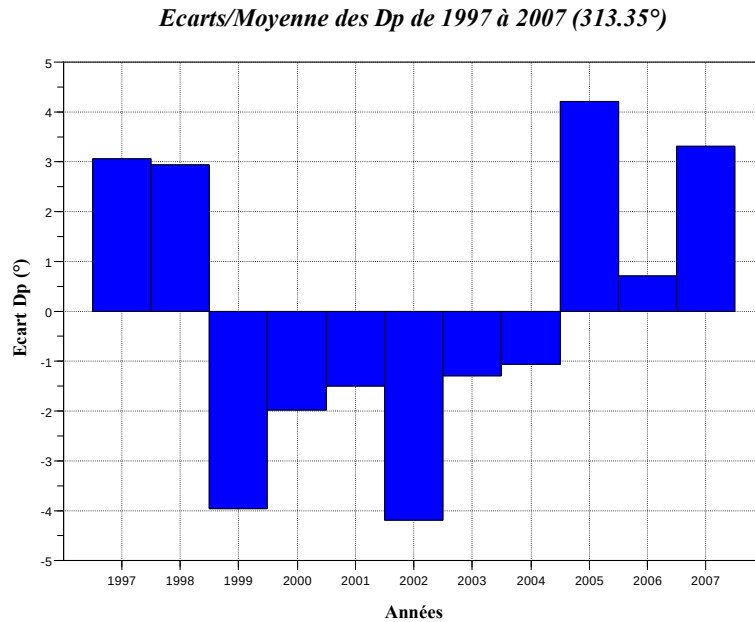


Illustration 12 - Ecarts-significatifs des périodes pic moyennes annuelles, de 1997 à 2007 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

Leur examen permet de mettre en évidence les années « particulières » pour lesquelles les paramètres de houle sont plus élevés que leur moyenne sur la période analysée (1997-2007).

Un écart significatif nul correspond à une égalité entre la moyenne annuelle du paramètre étudié et sa moyenne de 1997 à 2007. Rappelons que les moyennes annuelles sont respectivement de 2.34 m, 9.6 s et 313.35° pour Hs, Tp et Dp.

On peut constater que les écarts sont de faible amplitude, variant : entre +/- 0.18 m pour Hs (cf. Illustration 10), entre +/- 0.5 s pour Tp (cf. Illustration 11) et entre +/- 4.2° pour Dp (cf. Illustration 12).

Les années les plus calmes (écarts négatifs significatifs pour Hs) seraient 1997, 2003, 2004 et 2005. Les plus énergétiques 1999, 2000, 2002 et 2007. L'évolution des écarts de Tp suit celle des Hs sauf pour 2004 (légère augmentation de l'écart de Tp alors que l'écart de Hs augmente). L'évolution des écarts de Dp semble être indépendante des deux autres paramètres. Elle augmente en 1997 et 1998 (jusqu'à 3°), diminue entre 1999 et 2004 (jusqu'à 4°) et augmente enfin entre 2005 et 2007. La direction de provenance des vagues reste toutefois cantonnée au secteur WNW pendant toute la période étudiée (1997 à 2007).

Sur ces figures, l'année 2007 ne présente pas d'écarts-significatifs très élevés ; cependant, pendant l'hiver 2006/2007, le littoral a été marqué par une érosion intense et de nombreux épisodes de houles moyennes, sans répit entre eux. Cette érosion est donc due à la fréquence élevée d'épisodes de petites tempêtes, et non à des houles très fortes et exceptionnelles (comme par exemple la tempête de décembre 1999).

3.2.3. Variabilité saisonnière

L'analyse de la variabilité saisonnière des données permet de mettre en évidence des « mois types », caractérisés par des statistiques mensuelles exceptionnelles (plus faibles ou plus élevées).

Pendant les mois d'hiver, entre septembre et mai, la houle est assez énergétique : sa hauteur atteint régulièrement les 4 m et la période pic tourne autour de 12 s. En été, entre mai et septembre, la mer est généralement plus calme avec des houles de moins de 2 m dont la période se situe vers 8 s.

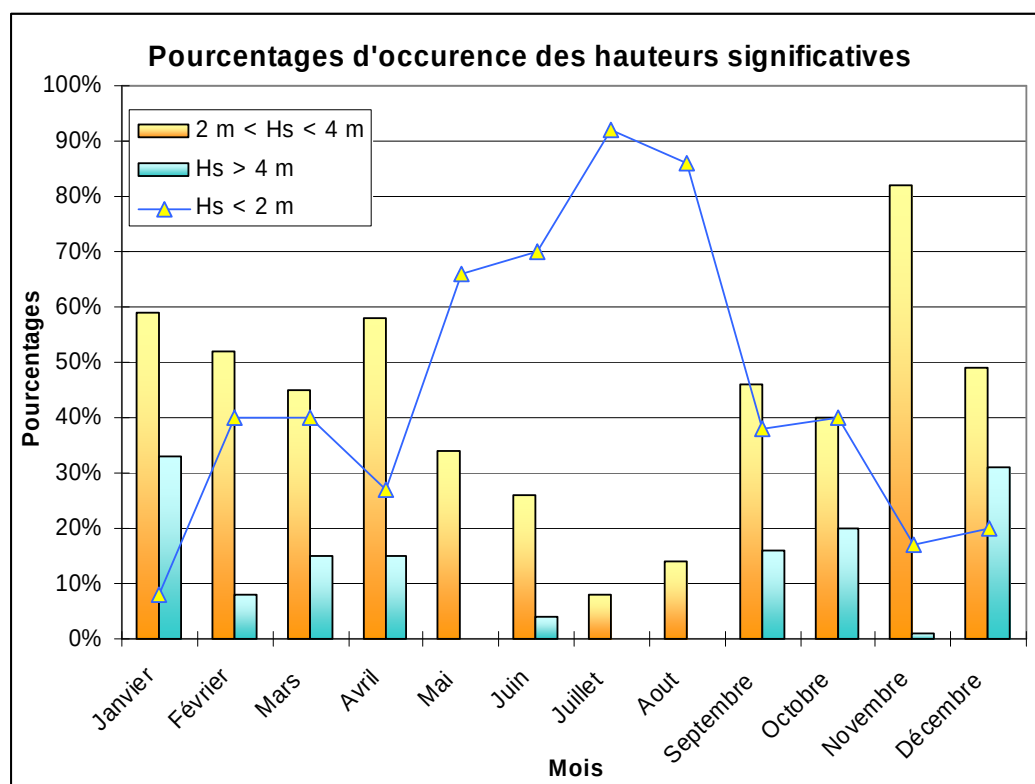


Illustration 13 – Répartition des hauteurs significatives, pour l'année 1999 avec les données NWW3 au point 45°N/5°W.

L'illustration 13 donne un exemple pour l'année 1999 : La saison douce (mai à août) est clairement caractérisée par des houles de hauteur faible, inférieures à 2 m. Décembre et janvier sont marqués par les plus fortes houles, supérieures à 4 m.

3.3. VARIABILITE LIEE A L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE

La présente étude s'est également penchée sur l'Oscillation Nord Atlantique (NAO). On note une corrélation entre l'indice NAO et les variations des paramètres de houle. Globalement, une augmentation de NAO s'accompagne d'une augmentation de la hauteur significative.

Dans une étude récente, (Dupuis *et al.*, 2006) ont cherché à évaluer une tendance d'évolution du climat de houle sur le littoral aquitain, en utilisant les données de la bouée de Biscarrosse de 1980 à 2000. L'analyse effectuée tend à montrer que sur cet échantillon de 20 ans, aucune tendance à l'augmentation de la houle n'est observée. On observe plutôt une légère décroissance de la hauteur significative annuelle (-1.5 cm/an). En revanche, une forte variation interannuelle de la cambrure des vagues est observée. La cambrure des vagues est fonction de la hauteur divisée par la longueur d'onde. Une cambrure faible sera synonyme de houle bien formée (fetch long), alors qu'une cambrure forte traduira plutôt une mer de vent. Cette variabilité du climat de houle semble être étroitement associée au phénomène NAO qui se traduit par une variabilité géographique des fronts dépressionnaires. Lorsque les fronts sont situés plus au nord (NAO+), le fetch correspondant est plus important. Les vagues résultantes sur le littoral aquitain seraient mieux formées (cambrure plus faible).

L'évolution du climat de houle sur le littoral aquitain semble être lié à la NAO et donc à ses variations.

4. Houle proche de la côte

Ce chapitre présente l'implantation du logiciel SWAN sur la côte aquitaine ainsi que quelques cas tests effectués pour des houles caractéristiques.

4.1. IMPLANTATION DE LA MODELISATION

4.1.1. Méthodologie

La modélisation de la houle sur le littoral aquitain a été effectuée grâce au modèle SWAN. Une première étape de préparation a consisté à choisir et obtenir les données en entrée au large (NWW3).

Six types de houle représentatifs ont été sélectionnés pour cette analyse. Ils sont classés grâce à deux critères, la hauteur significative et la direction de provenance. On distingue :

- Les houles très énergétiques ($H_s > 4$ m) et peu énergétiques ($H_s < 2$ m) ;
- Les trois directions de provenance principales déterminées dans le chapitre 3.2.1 : NW, W et SW.

Pour chaque type de houle, une date a été choisie pour extraire les données de houle de WaveWatch 3 correspondant aux critères.

4.1.2. Données utilisées

Tout d'abord, la bathymétrie de la zone a été réalisée grâce aux données du SHOM. La résolution est de 1 km en latitude par 1,5 km en longitude. Elle s'étend de 3.75°W à 0.5°W et de 43°N à 48°N (cf. Illustration 14).

Les conditions hydrodynamiques au bord W de la grille de calcul sont issues de NWW3 aux 6 dates considérées. Il s'agit des points de coordonnées : 3.75W/44N, 3.75W/45N, 3.75W/46N, 3.75W/47N. Les paramètres de forçage sont la hauteur significative, la direction pic et la période pic.

Le vent, également issu des sorties de WaveWatch 3, est appliqué sur tous les points de la grille NWW3 (cf. Illustration 14). Le fait que la grille de vent s'arrête à 44°N pose un problème car le fetch est assez long entre le large et la côte pour les latitudes inférieures à 44° (correspondant au sud des Landes et au Pays Basque). C'est pourquoi, pour certaines simulations, des tests ont été effectués avec le vent Seawinds (vents issus des données satellitales et produits par la NOAA) dont la grille a une résolution plus fine (0,25°X 0,25°) qui va jusqu'à 43,5°N. Pour la tempête du 27/12/99, c'est le vent COAMPS du Naval Research Laboratory qui a été retenu.

La marée a été prise en compte dans chaque simulation.

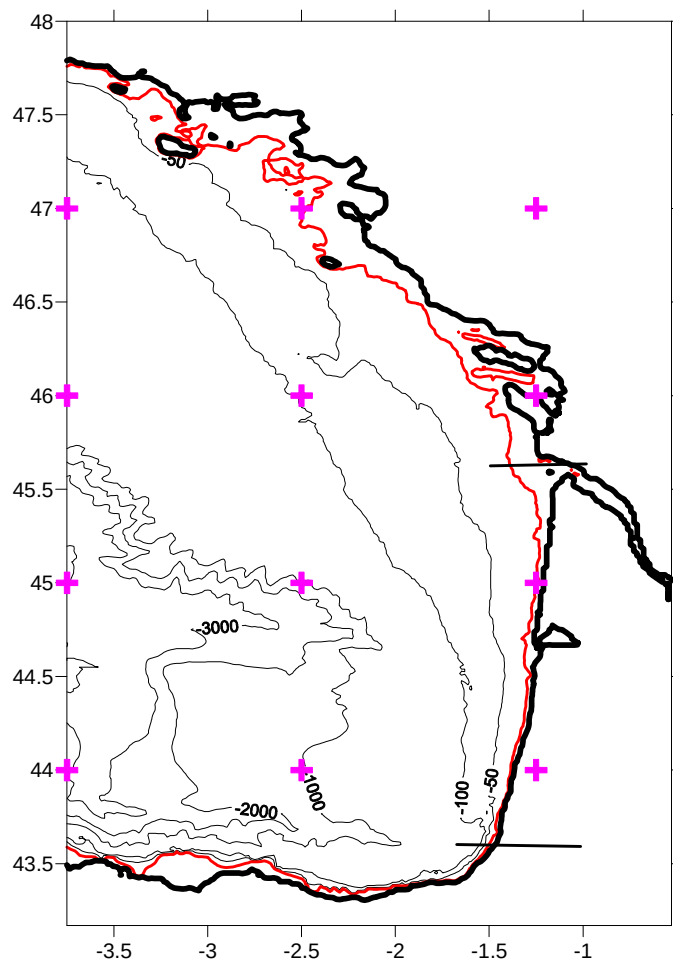


Illustration 14 - Emprise du modèle SWAN (entre les deux traits horizontaux : Gironde + Landes). L'isobathe à 20 m est marquée par le contour rouge et le trait de côte par le contour en gras noir. Les croix indiquent les positions des points de la grille NWW3 utilisés.

4.1.3. Le modèle SWAN

Généralités

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), 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. Une description détaillée du modèle est faite dans (Booij *et al.*, 2004). 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.

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 ;
- Diffraction ;
- Blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- Transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion à cause de ces obstacles.

SWAN modélise également certains processus de **génération et de dissipation** :

- 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.

SWAN ne doit pas être utilisé sur des domaines où les variations de hauteur d'eau sont importantes sur une échelle horizontale de quelques longueurs d'onde. C'est pourquoi les résultats de SWAN ne seront pas précis à proximité immédiate d'obstacles ou au niveau des ports.

Choix des paramètres pour l'étude

Dans cette analyse, le déferlement n'a pas été activé car la grille bathymétrique n'est pas assez fine. **Les résultats sont donc à considérer jusqu'à l'isobathe 20 m** car le déferlement n'a pas encore eu lieu à cette profondeur ; c'est sur cette isobathe que les coordonnées des points extraits pour chaque cellule sont situées.

Grille de Calcul en coordonnées sphériques						
Dimensions (°)	Coordonnées métriques UTM 20 nord				Nbre de noeuds	Taille mailles (°)
	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax		
3.25° X 5°	3.75W	0.5W	43N	48N	414 x 194	0.017° X 0.0 12°

Tableau 2 – Grille de calcul de SWAN en coordonnées sphériques.

4.2. RESULTATS

4.2.1. Cartes des simulations

La première carte (Illustration 15) présente l'intégralité de la grille de calcul alors que les suivantes sont centrées sur les cellules sédimentaires de la côte aquitaine. Les résultats sont classés par intensité de l'énergie de la houle au large.

Pour toutes les simulations, on note que le champ de vagues est très cisailé au sud de 44°N quand le vent de NWW3 est utilisé. Dans tous les cas, les résultats obtenus avec NWW3 sont présentés. Ils sont complétés par des simulations prenant en compte d'autres sources de vent.

Houles de forte énergie

27/12/1999

La houle au large (issue de NWW3) vient d'ouest nord ouest avec une hauteur d'une dizaine de mètres vers 45°N (cf. Illustration 15). Le vent, orienté plein est souffle à 28 m/s à cette même latitude et fait gonfler les vagues en direction de la côte. Celles-ci atteignent 12 m maximum et font environ 8 m de hauteur à proximité du littoral.

En dessous de 45°N, les vagues s'orientent de plus en plus vers le sud en se rapprochant de la côte. Au nord de la Gironde, en revanche, elles s'orientent perpendiculairement au trait de côte à partir de 50 m de fond, en direction du nord est.

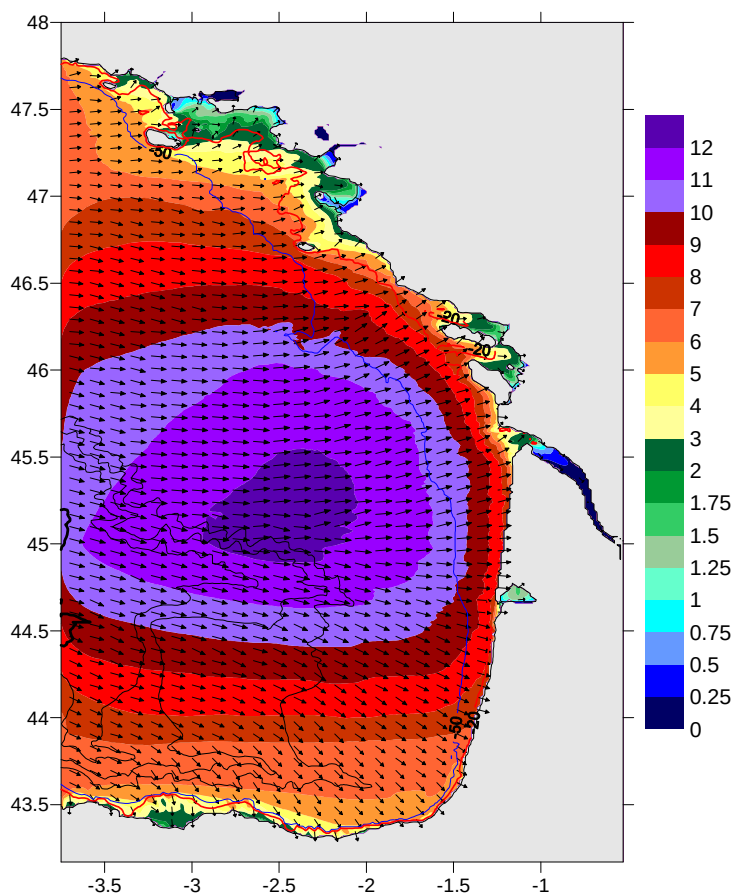


Illustration 15 – Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches) du large à la côte lors de la tempête du 27/12/1999 à 18h. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.

Une autre simulation a été effectuée avec le vent COAMPS (Coupled Ocean Atmosphere Mesoscale Prediction System) du Naval Research Laboratory. Avec une résolution de 0.2° et des valeurs sur terre, le champ de vent utilisé par SWAN est plus étendu et précis. Les résultats obtenus (Illustration 16) sont assez différents surtout dans la distribution spatiale du champ de vagues. Les vagues atteignent 10 m au maximum et la hauteur de la houle est plus homogène sur la côte aquitaine avec des valeurs allant de 6 à 7 m.

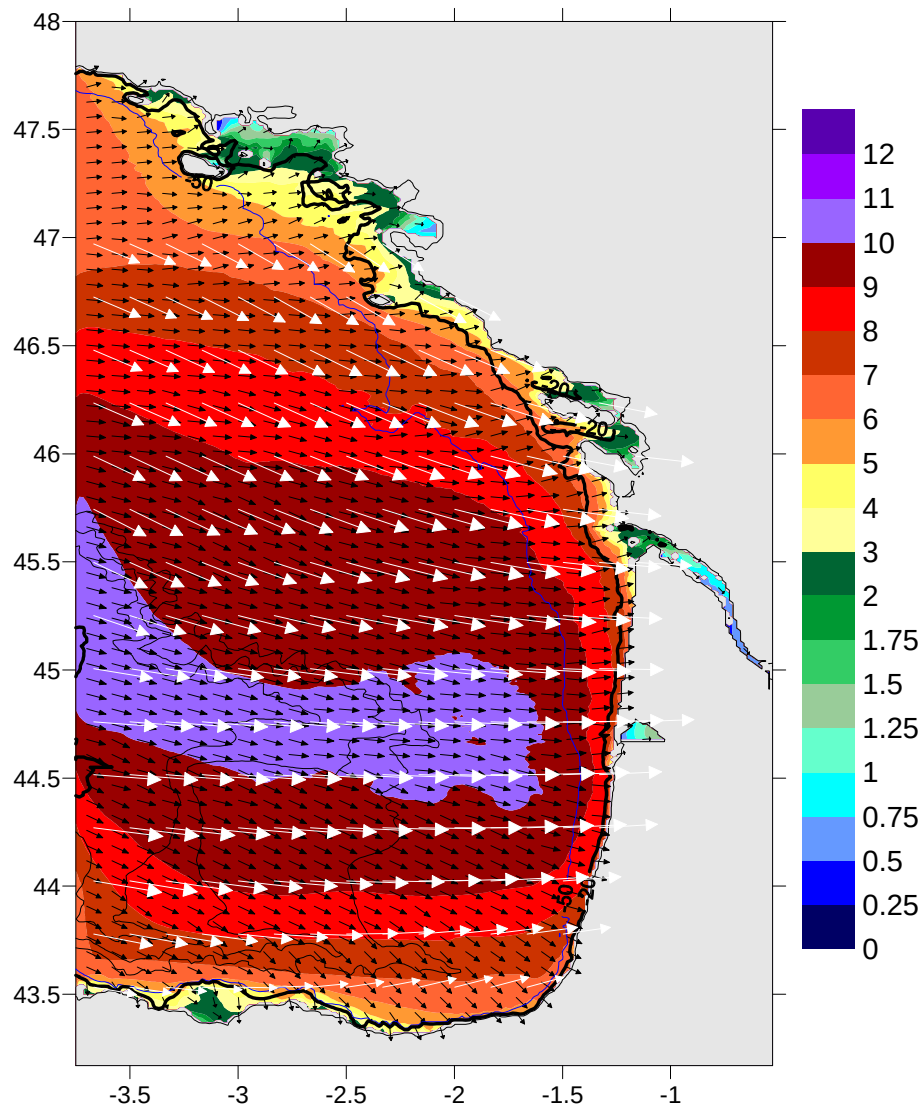


Illustration 16 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte lors de la tempête du 27/12/1999 à 18h. Les flèches blanches indiquent le vent. Les conditions initiales au bord ouest sont issues de NWW3 et le vent de COAMPS.

23/10/1999

Les vagues de 5 à 7 m au large viennent de l'ouest (cf. Illustration 17). Leur hauteur décroît de manière homogène en se rapprochant de la côte où elle atteint 4 m sur la côte aquitaine et 2 m sur la côte espagnole. Tout comme pour la simulation précédente, elles tendent à s'orienter vers le sud vers les plus basses latitudes (à partir de la cellule sédimentaire 5) en se rapprochant de la côte.

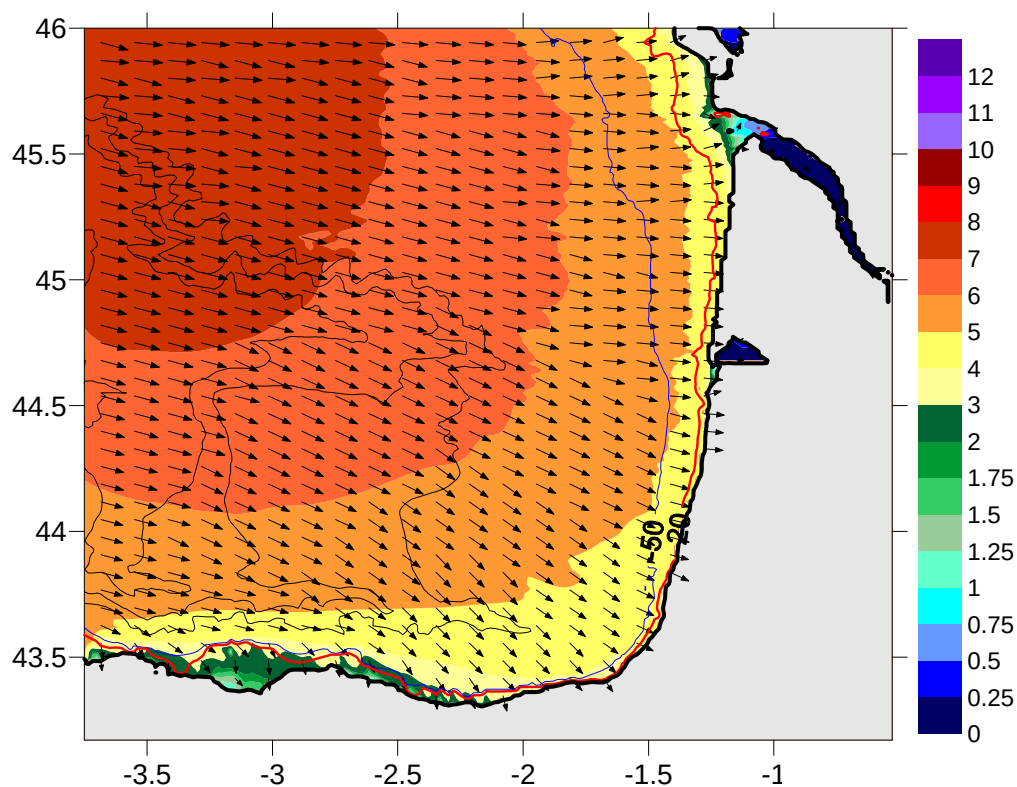


Illustration 17 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 23/10/99 à 12h . La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.

10/10/2004

Le 10/10/2004, des vagues d'une hauteur de 4 m maximum se propagent du sud-ouest vers la côte (cf. Illustration 18) poussées par un vent de sud ouest de 17 m/s. Elles sont de l'ordre de 2 à 3 m sur la côte aquitaine et 1,5 m sur la côte basque.

On note un cisaillement important du champ de vague sous 44°N à cause de l'absence de données de vent NWW3. L'Illustration 19 présente le résultat de la simulation effectuée avec le vent Seawinds dont la résolution est de 0,25° en latitude et en longitude ce qui permet d'avoir des valeurs de vent jusqu'à 43,5°N.

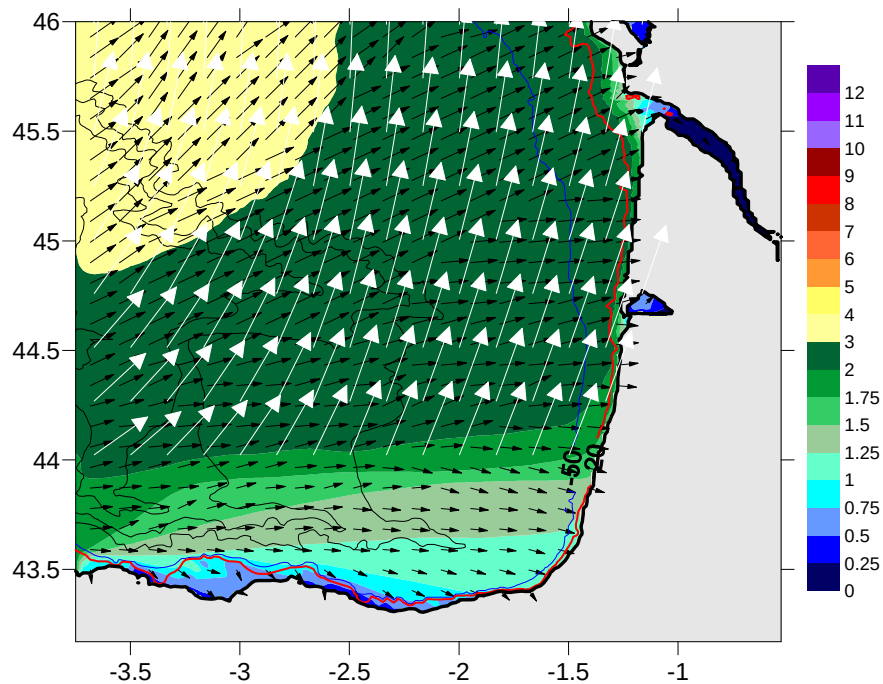


Illustration 18- Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 10/10/2004 à 12h. Les flèches blanches indiquent le vent. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.

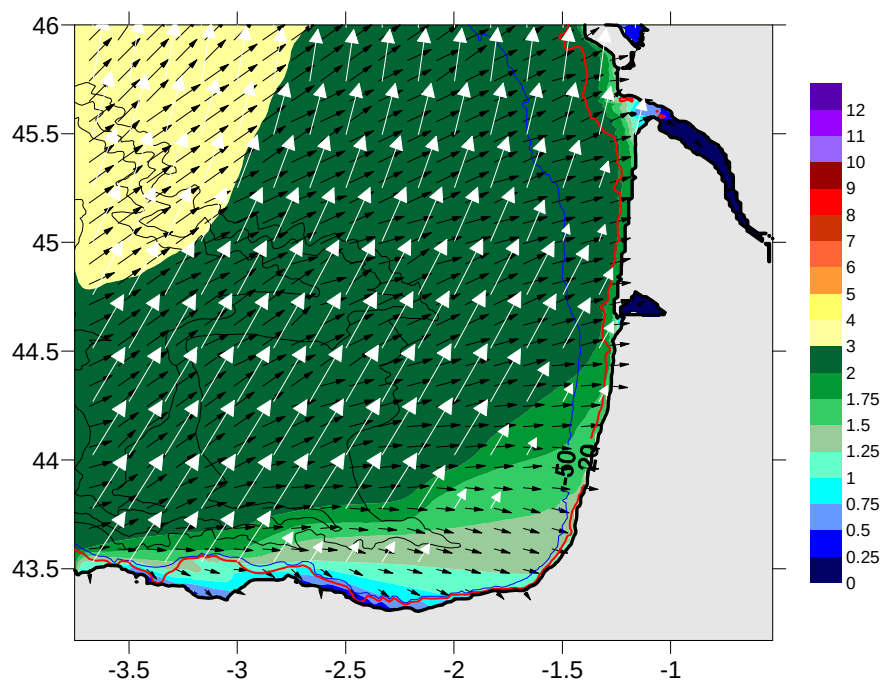


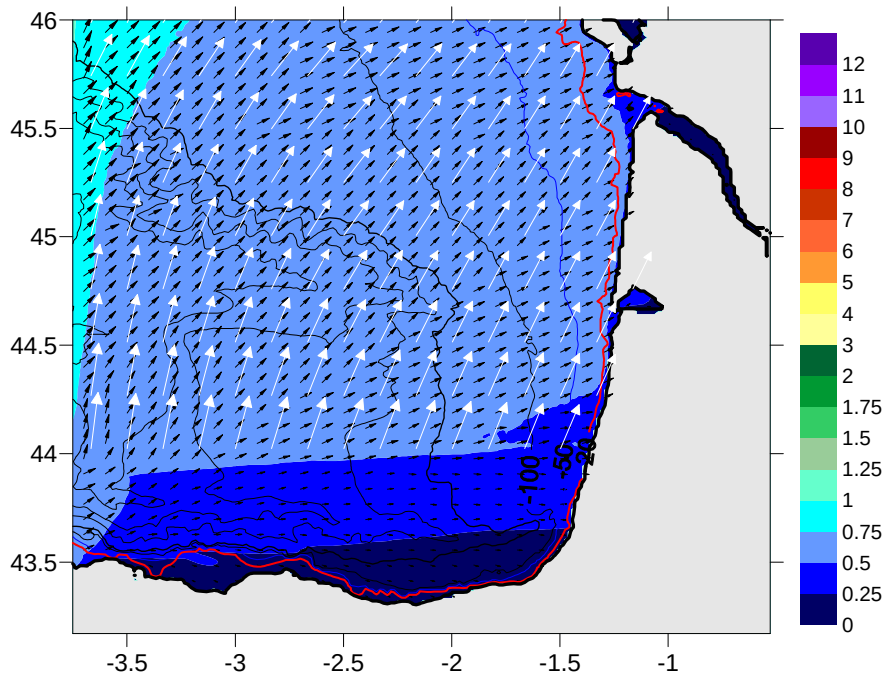
Illustration 19 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 10/10/2004 à 12h. Les flèches blanches indiquent le vent. Les conditions initiales au bord ouest sont issues de NWW3 et le vent de Seawinds

Houles de faible énergie

06/06/1997

Au bord ouest, les vagues sont inférieures à 1 m. Elles se propagent dans la même direction que le vent de sud ouest qui souffle à 10 m/s. A la côte, leur hauteur est de l'ordre de 0.5 m.

L'absence de vent aux latitudes inférieures à 44°N a des conséquences très visibles sur cette simulation. En effet, les vagues du large sont directement stoppées par l'absence de forçage. Une simulation a été effectuée avec le vent Seawinds. Le résultat obtenu est présenté sur l'illustration 21. Le champ de vagues obtenu est moins cisailé.



*Illustration 20 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 06/06/1997 à 6h. Les flèches blanches indiquent le vent .
La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.*

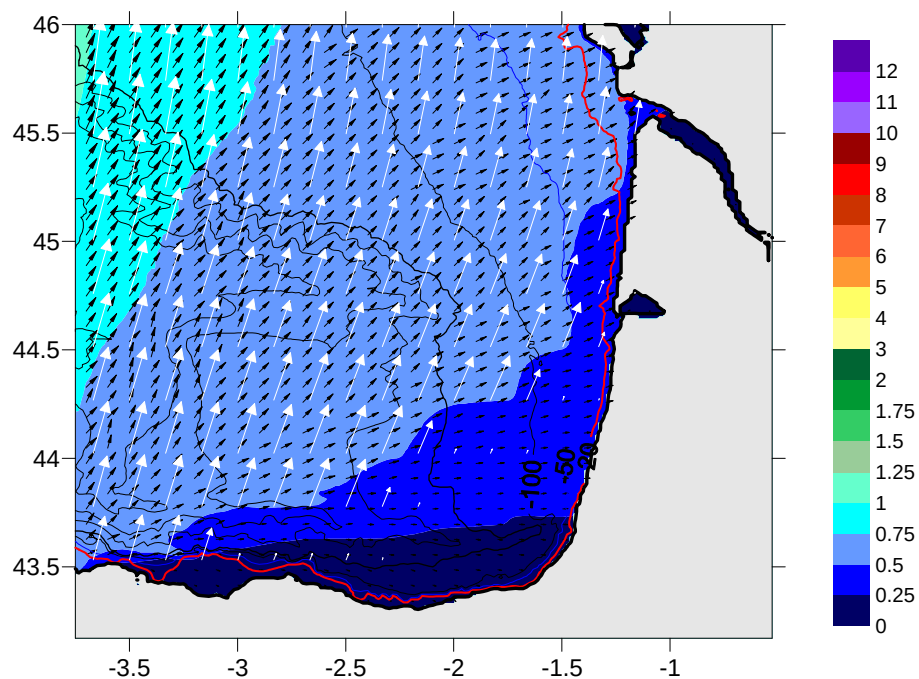


Illustration 21 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 06/06/1997 à 6h. Les flèches blanches indiquent le vent. Les conditions initiales au bord ouest sont issues de NWW3 et le vent de Seawinds.

01/07/1997

Une houle de 1 m arrive de nord ouest sous 45°N (cf . Illustration 22). Elle se propage jusqu'à la côte qu'elle atteint avec une hauteur de 0.5 m.

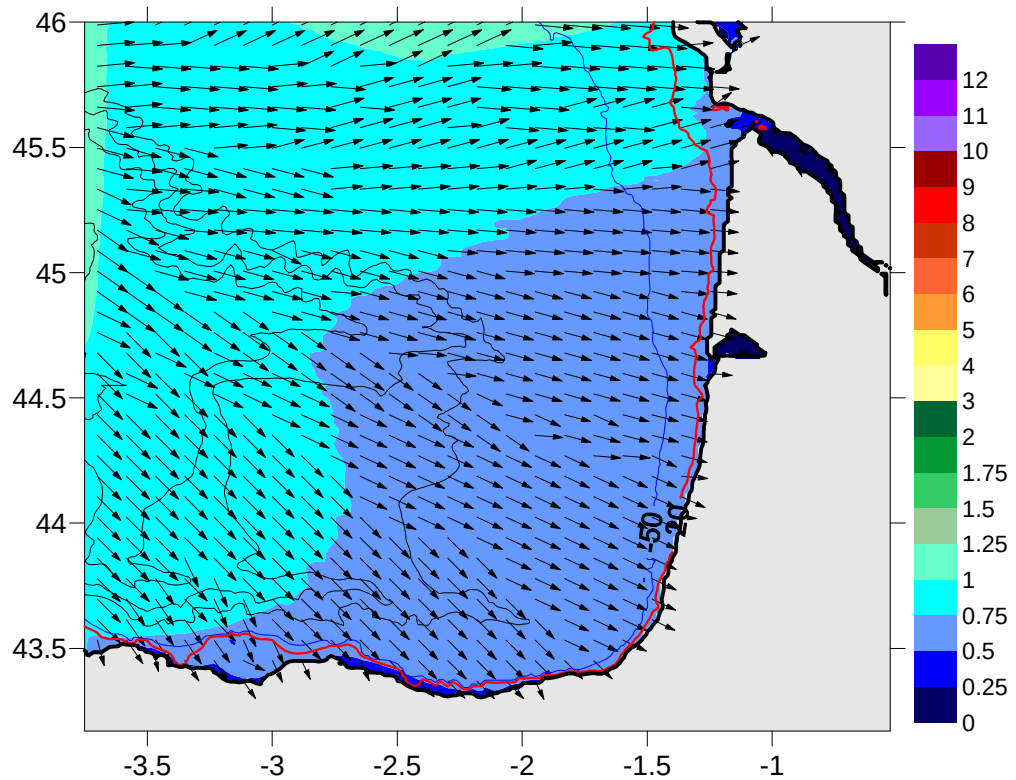


Illustration 22 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 01/07/1997 à 18h. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.

21/12/1999

Au large, la houle vient d'ouest et fait de 1 à 3 m. Le vent, orienté vers le nord ouest, souffle à 10 m/s maximum vers 46°N. A la côte, la houle a une hauteur de 1 m.

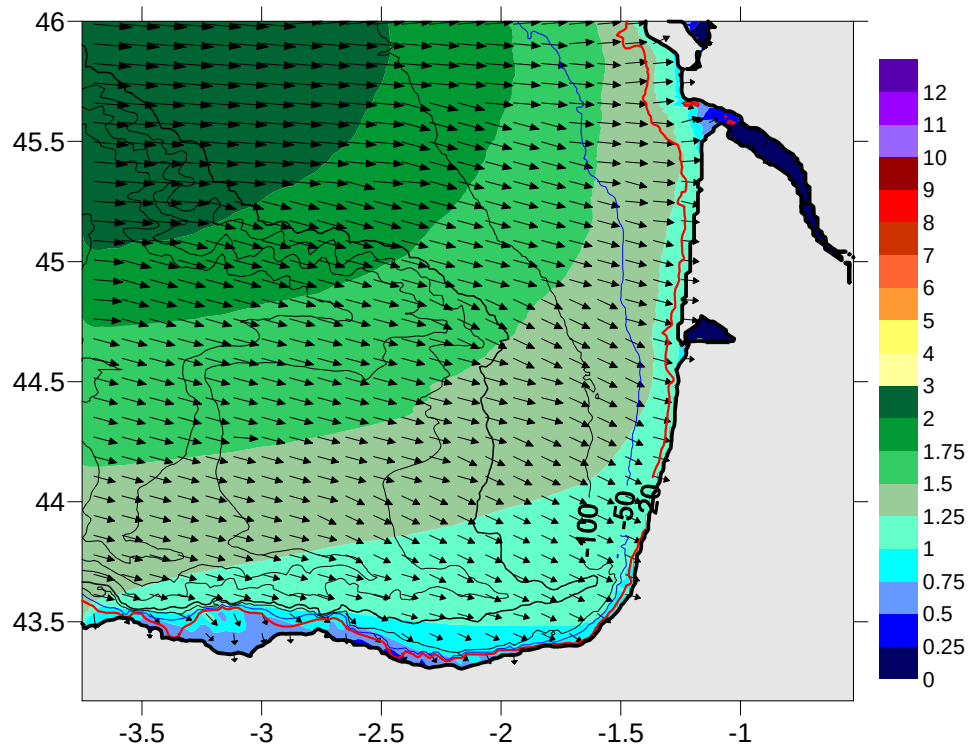


Illustration 23 - Evolution des hauteurs significatives (contours colorés, en mm) et des directions (flèches noires) du large à la côte le 21/12/1999 à 00h. La simulation a été effectuée avec les données de NWW3.

5. Conclusions

Dix ans de données (1997 à 2007) issues du modèle WaveWatch 3 de la NOAA ont été analysées pour le point de position (45°N/5°W). Une analyse statistique des paramètres de houle a permis de cibler les caractéristiques principales de la houle au large de la côte aquitaine. Il a été établi que :

- 70 % des houles viennent d'WNW, 40 % ont une hauteur comprise entre 1 et 2 m, et 60 % des périodes sont comprises entre 8 s et 13 s.
- Les moyennes sur toute la période étudiée pour la hauteur significative, la période pic et la direction pic sont respectivement de 2.4 m, 9.6 s et 313.35°.
- Trois années caractérisées par des houles fortes ont été identifiées : 1999, 2000 et 2002. Les années 1997, 2001 et 2005 sont au contraire marquées par de faibles houles en moyenne annuelle.

Le modèle SWAN a été implanté sur la côte aquitaine. Cet outil permet de simuler les paramètres des vagues en zone côtière à partir de données de houle au large. Il est désormais possible de mieux connaître la houle près de la côte lors d'événements érosifs extrêmes (tempêtes) et d'envisager une étude plus poussée sur les climats de houle côtiers pour mieux comprendre le fonctionnement de la dérive littorale.

Les données de houle de NWW3 et le modèle SWAN permettent de bien représenter la propagation de la houle vers la côte. Néanmoins, pour l'étude de l'ensemble de la côte aquitaine qui s'étend de 43,5°N à 46°N environ, le vent donné par NWW3 est insuffisant car il ne couvre pas l'intégralité de la zone étudiée au sud. D'autres sources de vent (Seawinds et COAMPS) ont été testées et montrent de meilleurs résultats. Il est préférable de les utiliser pour ce type d'étude.

Les caractéristiques de houles et de vagues ainsi définies permettront de caractériser la houle et les vagues en tant qu'agent d'érosion lors des études ultérieures, en particulier pour l'élaboration de l'atlas de l'aléa de l'érosion du littoral aquitain.

6. Bibliographie

Abadie, S., R. Butel, H. Dupuis et C. Briere (2005) - Paramètres statistiques de la houle au large de la côte sud-aquitaine. *Compte Rendu Géoscience*, 337, 769-776 p.

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

Dupuis, H., D. Michel et A. Sottolichio (2006) - Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. *Journal of marine systems*, (3-4), 105-114 p.

Genna, A., J. P. Capdeville, C. Mallet et L. Deshayes (2004) - Observatoire de la Côte Aquitaine, Etude géologique simplifiée de la Côte Basque. *Rapport BRGM/RP-53258-FR*, 42 p.

Hayes, M. H. B., M. Stacey et J. Standley (1972) - Studies on the fractionation of humification products of Ryegrass in sands columns. *Géoderma*, (7), 105-111 p.

Komar, P. D. (1998) - Beach processes and sedimentation. *Prentice Hall*, (2nd Edition), 544 p.

Le Nindre, Y. M., S. Benhammouda, O. Rouzeau, H. Haas et J. A. Quessette (2001) - Elaboration d'un outil de gestion prévisionnelle de la côte Aquitaine. Phase 3 : Diagnostic d'évolution et recommandations. *BRGM/P-0822-FR*, 115 p.

Pedrerros, R. (2000) - Quantification et modélisation du transport éolien au niveau des zones côtières, application au littoral girondin. *Thèse d'Université*, Université Bordeaux 1, 195 p.

SOGREAH et LARAG (1995) - Littoral de la Gironde, évolution prévisible *Rapport n°11456*.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70