

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AMENAGEMENT
DU LITTORAL



MEMOIRE de MAGISTER

Option : Surveillance et Gestion de l'Environnement Marin et Littoral

Présentée par : AL SID CHIKH SAFA

THEME :

ETUDE DE PROTECTION DE LA PLAGE DE PALM BEACH-AZUR
CONTRE L'EROSION
RECOURS A LA MODELISATION NUMERIQUE ET PHYSIQUE

Soutenu le 14/07/2011 devant le jury composé de :

Pr. BOULAHIDID Mostefa	Professeur - ENSSMAL	: Président
Dr. BELKESSA Rabah	MC. A - ENSSMAL	: Promoteur
Dr. MATOUGUI Rachid	MC. A - FST/USTHB	: Examineur
Dr. HOUMA BACHARI Fouzia	MC. A - ENSSMAL	: Examinatrice
Dr. MIHOUBI Kamel	MC. A - E.N.S.H	: Examineur
Mr. MATOUK Zine Eddine	Directeur Technique -LEM	: Invité

2010/2011

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements :

À mon promoteur, **M. Belkessa Rabah** pour avoir accepté de diriger ce travail et pour ses directives et conseils.

À **M. Boulahdid M**, Professeur - ENSSMAL, pour avoir bien voulu présider le jury, et aussi pour ses encouragements et ses conseils tout au long de ces années.

À **M. Matougui R**, M.C.A - FST/USTHB, pour avoir bien voulu participer au jury et juger mon travail.

À **Mme. Houma-Bachari F**, M.C.A – ENSSMAL, pour avoir bien voulu examiner mon travail, ainsi que pour son aide, son enthousiasme et ses précieux conseils au cours de ces années.

À **M. Mihoubi K**, M.C.A – E.N.S.H, pour avoir bien voulu prendre le temps de lire mon travail et faire parti du jury.

À **M. Matouk Z E**, Directeur technique - LEM, pour m'avoir bien accueilli au sein du laboratoire d'études maritimes LEM et m'avoir accepté dans ce projet.

À Mme. **Fissah A**, ingénieur chef de projet au LEM et Ex- Professeur à l'Ecole Polytechnique d'Alger, pour m'avoir beaucoup appris sur l'ingénierie côtière et avoir mis à ma disposition toute sa documentation et pour son encouragement et son amitié.

À M. **Soufari SA**, ingénieur chef de projet du LEM, pour m'avoir bien imprégné dans le projet, m'avoir fait confiance, et pour avoir gentiment répondu à mes nombreuses requêtes.

À Mme. **Bakri L**, ingénieur chef de projet du LEM, qui absente ou présente, a bien voulu me confier son bureau, et aussi pour ses appuis et son sens de la vie.

À Mme **Boudouma Z**, ingénieur chef de projet du LEM pour m'avoir accordé de son temps et pour ses enseignements sur le projet et ses explications.

À Mme. **Belkessa M** et **M Belkessa H**, du LEM qui m'ont généreusement aidé.

À M. **Ben Aissa Z**, Chef de département du Centre d'Essais sur Modèles du LEM pour ses services et son suivi du projet.

À M. **De-Crouette Lagroy Eric**, de SOGREAH France, pour les informations et les orientations donnés lors de ses missions.

À toutes les **personnes du groupement SOGREAH-LEM** qui ont travaillé sur le projet.

Aux **Professeurs** qui m'ont encadré durant ma première année de Post-graduation.

Aux **directeurs techniques** de quelques carrières-sablières sur les wilayas de Tipaza, Alger et Boumerdes.

Aux personnes qui m'ont aidé dans les centres de documentation et les bibliothèques d'Alger.

À toutes les personnes qui gravitent autour du LEM et de l'ENSSMAL pour leur collaboration et amitié.

Au soutien sans faille de mes proches, amis et famille, présents tout au long de ce travail.

Aux oubliés de cette liste qui voudront bien me pardonner!

Finalement, je suis sincèrement reconnaissante envers l'Etat Algérien qui depuis des années dans son école républicaine, me donne les moyens d'apprendre, d'étudier et surtout de développer mon esprit et mes expériences.

Acronymes

BL	Brise-lames
CM	Cote-mer
CERC	<u>Coastal Engineering Research Center</u>
Enr	Enrochement
FF	Fond fixe
FM	Fond mobile
GPS	Global Positioning System
HIPOCAS	Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe
Hs	Hauteur significative de la houle
KNMI	Institut Météorologique Royal Néerlandais
LCHF	<i>Laboratoire</i> Central d'Hydraulique de France
LEM	Laboratoire d'Etudes Maritimes
ml	Mètre linéaire
NGA	Nivellement Général Algérien
Niv.	Niveau
ONM	Office Nationale de Météorologie
SGH	Sogreah
SSMO	Summary of Synoptic Meteorological Observations
SWAN	Simulating Waves Nearshore
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (France)
TN	Terrain naturel
Tp	Période de pointe
T/t	Tonne
TVC	Tout Venant de Carrière

Sommaire

Introduction	01
Plan d'étude	02
Chapitre I. La zone d'étude	03
I.1. Situation géographique	03
I.2. Caractéristiques géomorphologiques	03
I.3. Caractéristiques géologiques.....	04
I.4. Caractéristiques hydrologiques	05
I.5. Conditions météorologiques	05
I.5.1. Précipitations.....	05
I.5.2. Températures.....	06
I.5.3. Vents	06
I.6. Conditions océanographiques	08
I.6.1. La marée et les variations du niveau d'eau	08
I.6.2. Les courants	09
I.6.3. Les houles du large	10
I.7. Visite du site et reportage photographique.....	13
Chapitre II. Campagne océanographique et étude bathy-sédimentologique	18
II.1. Travaux de la campagne océanographique.....	18
II.1.1. Levé topographique	18
II.1.2. Levé bathymétrique	18
II.1.3. Méthodologie d'échantillonnage	18
II.2. Etude bathymétrique.....	19
II.3. Analyse sédimentologique.....	20
II.3.1. Classification des dépôts superficiels	21
II.3.2. Résultats de l'analyse granulométrique	21
Chapitre III. Etude des vents et des houles	29
III.1. Etude des vents du large	29
III.1.1. Point Simar issu du projet européen Hipocas	29
III.1.2. Régime moyen des vents	29
III.1.3. Régime extrême des vents	33
III.2. Etude des houles au large	35
III.2.1. Prévision de la houle	35
III.2.2. Données Simar issu du projet européen Hipocas.....	40
III.2.3. Régime moyen des houles au large	40
III.2.4. Régime extrême des houles au large	46
III.3. Etude des houles à la côte du site d'étude	48
III.3.1. Propagation de la houle entre le large et la côte	48
III.3.2. Modélisation de la houle	48
III.3.3. Application sur le modèle Swan	49
III.3.4. Principe de calcul de la réfraction de la houle	52

III.3.5. Données de base pour la réfraction Swan.....	52
III.3.6. Résultats de la réfraction Swan	53
Chapitre IV. Etude hydrosédimentaire.....	59
IV.1. Recueil des données antérieures sur le site	60
IV.1.1. Données bathymétriques	60
IV.1.2. Caractéristiques sédimentologiques des dépôts superficiels	61
IV.1.3. Dynamique littorale.....	63
IV.2. Dynamique sédimentaire.....	63
IV.2.1. Nature et répartition des sédiments	63
IV.2.2. Facteurs intervenants dans la dynamique sédimentaire.....	64
IV.2.3. Modélisation numérique.....	69
IV.3. Evolution des fonds.....	80
IV.3.1. Levés topo-bathymétriques disponibles	80
IV.3.2. Différentiel bathymétrique	82
IV.3.3. Calculs de cubature	84
IV.3.4. Etude de l'évolution passée du trait de côte	87
IV.4. Synthèse de la dynamique sédimentaire de Palm Beach-Azur : problème d'érosion	96
Chapitre V. Etude d'aménagement de la plage de Palm Beach-Azur.....	98
V.1. Nécessité d'une étude d'aménagement.....	98
V.2. Les principes d'aménagement adoptés	99
V.3. Les ouvrages de protection envisageables.....	99
V.3.1. Plaques minces horizontales	99
V.3.2. Le recul stratégique	100
V.3.3. Les ouvrages transversaux : les épis.....	100
V.3.4. Les ouvrages longitudinaux.....	102
V.3.5. L'engraissement artificiel (apport de sables).....	104
V.3.6. La reconstitution et protection du cordon dunaire	105
V.3.7. Le système Ecoplage	105
V.4. Procédés et critères de dimensionnement.....	106
V.4.1. Évaluation de la houle de projet	106
V.4.2. Les niveaux d'eau et surcotes.....	107
V.4.3. Les sédiments en place	107
V.4.4. Les modélisations et formulations utilisées.....	107
V.5. Propositions des variantes	109
V.5.1. Variante n°1 : protection longitudinale de haut de plage.....	109
V.5.2. Variante n°2 : batterie de 5 brise-lames hauts et apport de sable	109
V.5.3. Variante n°3 : batterie de 5 brise-lames bas et apport de sable	110
V.5.4. Variante n°4 : protection longitudinale de haut de plage en enrochements accompagnée d'une batterie de 5 brise-lames bas et d'un apport de sable.....	111
V.5.5. Variante n°5 : protection longitudinale de haut de plage en enrochements accompagnée d'une batterie de boudins géotextile immergés.....	111
V.5.6. Variante n°6 : système Ecoplage	112
V.6. Etude des variantes	112
V.6.1. Confortement de l'espace dunaire en zone n°2	112
V.6.2. Variante n°1 : protection longitudinale de haut de plage.....	113
V.6.3. Variante n°2 : batterie de 5 brise-lames hauts et apport de sable	115
V.6.4. Variante n°3 : batterie de 5 brise-lames bas et apport de sable	118
V.6.5. Variante n°4 : protection longitudinale de haut de plage en enrochements accompagnée d'une batterie de 5 brise-lames bas et d'un apport de sable.....	120

V.6.6. Variante n°5 : protection longitudinale de haut de plage accompagnée d'une batterie de boudins géotextile immergés	120
V.6.7. Variante n°6 : système Ecoplage	121
V.7. Modélisation numérique des variantes proposées	122
V.7.1. Modèle numérique Mopla : courants de déferlement et agitation à la côte	122
V.7.2. Modèle numérique Genesis : évolution du trait de côte	124
V.8. Analyse comparative des variantes de protection.....	128
V.9. Synthèse des résultats et recommandations.....	129
Chapitre VI. Modélisation physique.....	131
VI.1. Nécessité de la modélisation	131
VI.2. Objectifs et types de modèles.....	131
VI.3. Fondement des modèles réduits physiques	132
VI.4. La simulation physique	132
VI.4.1. Rappel général sur les lois de similitude	132
VI.5. Types d'étude sur les modèles réduits physiques.....	133
VI.5.1. Etude à deux dimensions.....	133
VI.5.2. Étude à trois dimensions	134
VI.5.3. Étude des évolutions des fonds : modèles sédimentologiques	134
VI.6. Modélisation physique de la variante retenue pour la protection de Palm Beach-Azur.....	135
VI.6.1. Modélisation à deux dimensions en canal à houle	137
VI.6.2. Modélisation à trois dimensions en bassin à houle : fonds fixes.....	168
VI.6.3. Modélisation à trois dimensions en bassin à houle : fonds mobiles	193
VI.7. Exigences et possibilités d'approvisionnement.....	218
VI.8. Etudes similaires	219
VI.9. Visite de prospection.....	220
VII. Dispositions préventives de la protection de Palm Beach.....	222
VIII. Recommandations et perspectives.....	223
Conclusion générale	224
Références bibliographiques
<i>Liste des figures</i>
<i>Liste des tableaux</i>
<i>Annexes</i>
<i>Annexes-Plans</i>

Introduction

Le milieu marin est particulièrement inhospitalier pour l'homme, non seulement parce qu'il ne peut y vivre normalement, mais aussi parce que les mers et les océans sont soumis à de très nombreux mouvements dont la violence rend très délicat tout travail à partir de la surface.

L'espace littoral fait l'objet de nombreuses convoitises et ce d'autant plus que les migrations de populations vers les littoraux sont de plus en plus importantes. L'homme se trouve dans l'obligation de construire des ouvrages et d'aménager son littoral.

Or, cet espace d'interface mer-terre est fragile, il est le siège d'un équilibre souvent précaire entre différents facteurs naturels ou humains, alors il est nécessaire qu'il soit protégé avec respect.

La plage de Palm Beach-Azur, de la commune de Zéralda à l'Ouest d'Alger, constituant un tronçon de la partie Est de la baie de Bou-Ismaïl, est soumise à l'érosion.

Ce phénomène est lié aux facteurs naturels régissant la dynamique littorale de cette plage, à l'urbanisation proche de la mer et à la fréquentation excessive des hauts de plages. La somme de tous ces facteurs s'est soldée par l'altération de l'équilibre naturel du littoral.

La recherche sur ces phénomènes d'érosion prend de plus en plus d'importance dans la communauté scientifique d'Alger. En effet l'érosion marine concerne la majorité des côtes de la baie de Bou-Ismaïl. L'évolution morphodynamique dans ces zones est due majoritairement aux effets du vent, des vagues, des courants, du niveau de l'eau, du type de sédiments et de l'action humaine.

Ces effets combinés ont fortement modifié l'environnement. L'ingénierie côtière devient alors nécessaire pour la protection et la stabilisation de ces côtes, particulièrement les plages sableuses, dont la plage de Palm Beach-Azur.

Il est à noter que l'étude de l'érosion côtière est complexe car le système considéré présente une variété d'échelles spatio-temporelles et de nombreuses interactions entre ses composantes. Ainsi, l'aménagement d'un ouvrage maritime crée des perturbations dans l'équilibre naturel du transport sédimentaire. Les fonds proches et le rivage vont évoluer de manière à retrouver un nouvel état d'équilibre.

C'est pour cette raison qu'il est indispensable de construire des outils permettant de bien prévoir les effets induits de cet ouvrage et de prédire les évolutions morpho-dynamiques qui en résultent, d'où le recours à la modélisation numérique et physique.

Le choix d'un ouvrage, sur un site balnéaire tel que Palm Beach-Azur, nécessite une étude préalable approfondie. De ce fait, la Direction des Travaux Publics de la wilaya d'Alger a confié au Groupement SOGREAHA (SGH) Algérie / Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) l'étude de protection de cette plage.

Sogreah Algérie, avec l'assistance technique de sa maison mère Sogreah Consultants France, et le LEM apporteront leur connaissance du site et leurs expériences pour les études de terrain, ainsi que de la modélisation physique. Sogreah Consultants France apportera ses compétences et son expertise dans le traitement de problèmes analogues sur la côte méditerranéenne française. Cette recherche sera donc le fruit de notre collaboration avec ce groupement.

Plan d'étude

L'objectif est de présenter une approche d'aménagement du littoral incluant, une série d'expériences, de perceptions et de connaissances pour mettre en avant les avantages potentiels de la modélisation. Afin de cheminer vers cet objectif, on propose de passer successivement par les volets suivants :

Le premier volet consiste en le recueil des données sur le site et la synthèse des facteurs géomorphologiques, météorologiques, océanographiques et hydrodynamiques qui ont une influence sur la dynamique du littoral et qui peuvent influencer l'évolution de la plage. Ainsi, la bonne connaissance des phénomènes, tirée de la phase d'observation et de diagnostic sur terrain, va permettre de ne retenir que les paramètres fondamentaux pour la suite de l'étude.

Pour le second, une campagne océanographique se fait charger des prélèvements d'échantillons et des levés topo-bathymétriques, aboutissant à la compréhension de la morphologie actuelle du site à travers une étude sédimentologique et bathymétrique approfondie.

Indispensablement pour la suite de l'étude, une analyse du climat des vents et des houles au large et à la côte, à partir de données récentes recueillies d'un point d'enregistrement au large d'Alger, constitue le troisième volet.

Le 4^{ème} volet est l'expertise hydrosédimentaire incluant une recherche dans l'historique disponible de la topographie sous-marine et de la sédimentologie de la plage, qui offre la possibilité d'une modélisation numérique de l'évolution des fonds et une étude des profils.

Le volet suivant consiste en l'étude d'aménagement, on propose alors divers scénarios s'appuyant sur des solutions techniques adaptées aux différents secteurs et particularités du site de Palm Beach-Azur. Bien entendu, on pourra à ce stade de l'étude définir plusieurs variantes et on s'attachera à tester chacune d'elles par différents modèles numériques de façon à vérifier et à comparer l'efficacité des diverses solutions proposées. A l'aide d'une analyse multicritère, on accordera une préférence aux solutions de nature mixte et on déterminera la variante dont l'impact sur l'écosystème est le plus facilement accepté.

Pour la suite, au terme des études techniques en modélisation, il va falloir retenir un parti d'aménagement et le réaliser. Pour ce faire, on a redoublé d'ingéniosité pour faciliter l'expérimentation sur les modèles physiques bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D à fonds fixe et mobile) dans le but de tester l'efficacité et la durabilité dans le temps de la protection retenue et pour, enfin, aboutir à un profil de l'ouvrage qui soit adéquat et satisfaisant et qui remplit bien son rôle, à savoir contrecarrer l'action érosive et reconstituer la côte de Palm Beach-Azur.

Enfin, on ne manquera pas de susciter l'intérêt qu'apporte aujourd'hui la modélisation physique et numérique, surtout lorsqu'elles sont réalisées par des spécialistes ayant derrière eux une longue tradition expérimentale. Ainsi, des recommandations et perspectives seront abordées pour toute la côte algérienne.

Chapitre I :

La zone d'étude

Chapitre I. La zone d'étude

I.1. Situation géographique

La zone d'étude se trouve dans la partie Est de la baie de Bou-Ismaïl (allant d'Ouest en Est de Chenoua à Sidi Fredj). La plage de Palm Beach-Azur se situe à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest d'Alger dans la commune de Zéralda, aux niveaux :

Latitudes : $36^{\circ}43'44''$ à $36^{\circ}44'48''$ et de longitudes : $2^{\circ}50'12''$ à $2^{\circ}50'44''$

Le site d'étude s'étend sur un linéaire côtier de 2000 m, délimité au Nord par le port présidentiel, et au Sud par l'épi transversal et les brise-lames du complexe touristique de Zéralda.



Figure I.1: Localisation géographique de la Plage de Palm Beach Azur.

On note que la proximité de la capitale 'Alger' et l'ouverture sur la Méditerranée ont fait de la plage de Zéralda un objet de convoitise et un point d'attrait touristique.

I.2. Caractéristiques géomorphologiques

Les plages de la baie de Bou-Ismaïl se répartissent en trois types :

- Côtes basses et sableuses (Zéralda).
- Côtes basses et rocheuses à bord non abruptes présentant des entablements sous-marins envahis par les herbiers (Région de Bousmail).
- Plages à cotes rocheuses déchiquetées à forte pente (Baie de Chenoua).

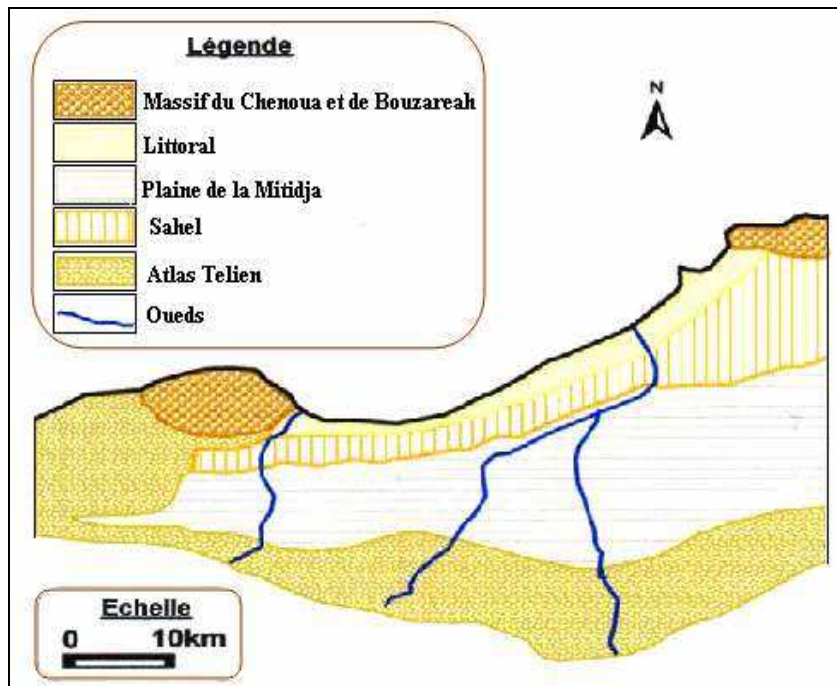


Figure I.2: Carte géomorphologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM, 1999).

La côte de Zéralda fait partie du littoral du Sahel occidental d'Alger et correspond à une étroite plaine côtière. Les côtes sont en général basses et surtout sableuses à l'Est de l'oued Mazafran. Devant ce dernier, le plateau continental retrouve son individualité et prend une extension maximale pour la baie de Bou-Ismaïl, soit 11 Km de large (Leclair, 1972).

I.3. Caractéristiques géologiques

Le littoral de Zéralda est caractérisé par une importante accumulation de dunes récentes, d'alluvions, de sables et de graviers. Le faciès du Quaternaire marin est largement représenté tout le long du littoral, et présente une succession de couches qui commence par des calcaires coquilliers (lumachelles), ensuite des grès, des dépôts de plage (atteignant 10 m d'épaisseur) et enfin les dépôts dunaires qui forment les terrasses les plus récentes avec une trentaine de mètres d'épaisseur (Dagorne, 1970).

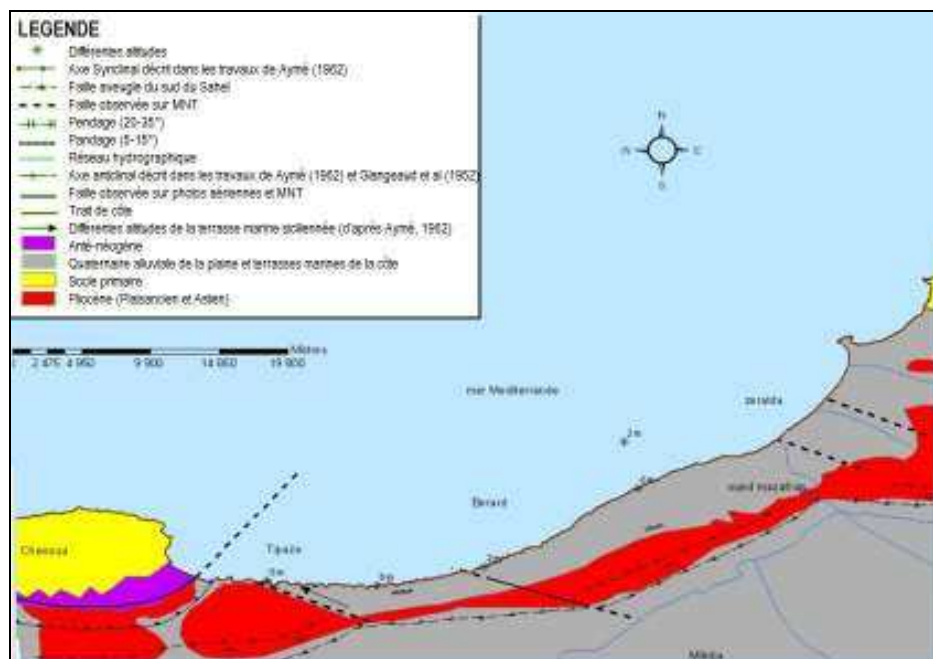


Figure I.3 : Carte géologique de la baie de Bou-Ismaïl. (Carte géologique d'Algérie)

I.4. Caractéristiques hydrologiques

Les oueds du Sahel prennent leurs sources de l'Atlas tellien puis traversent la plaine de la Mitidja avant de déverser en mer. Ce sont des torrents à débits irréguliers perpendiculaires à la côte. En été, les lits des oueds sont quasiment à sec ou presque, mais pendant les saisons d'hiver, ils connaissent des crues très violentes.

L'oued Mazafran est le plus important de la région, il influence la dynamique littorale de la plage de Palm Beach-Azur. Son bassin versant, où il est enregistré une pluviométrie moyenne de 720mm/an, est de 1850km² (dont 1100km² en montagne) constitué en grande partie par des formations érodables de schistes, de marnes et de calcaire. On note la présence d'autres formations plus résistantes telles que les marnes bleues du miocène inférieur et du pliocène, grès et poudingues du miocène inférieur et les roches éruptives (en particulier andésites, doreïtes et rhyolites de la région d'El- Affroun).

L'oued Mazafran se caractérise par un long étiage de six mois et des crues d'hiver et de printemps soudaines, fortes et rapides. Il prend sa source dans les gorges de la Chiffa. Les apports en suspension de l'oued varient dans le temps de quelques mg/l à plus de 15g/l en période de crue. A titre d'exemple, lors d'une crue le 10 octobre 1984, il a été enregistré, une concentration de 24mg/l. Les suspensions d'hiver, presque entièrement minérales et très abondantes pendant les crues, fournissent l'essentiel des apports à la mer. Les suspensions d'été, presque exclusivement organiques, sont assez abondantes (LEM, 2002).

Le débit solide de l'oued est évalué à 5,4 millions de m³/an.

I.5. Conditions météorologiques

Les éléments fondamentaux du climat des pays du Sahel sont l'irrégularité du régime et l'alternance de deux saisons nettement différentes. La proximité et l'effet modérateur de la mer confèrent à ces régions un climat remarquablement tempéré. Le climat dans la zone d'Alger et de Zéralda est de type méditerranéen, caractérisé par un hiver humide et froid et un été sec et chaud.

I.5.1. Précipitations

Les précipitations annuelles dans la région de Zéralda varient de 600 à 800mm. On y distingue deux saisons :

- Une saison pluvieuse d'octobre à avril : les mois les plus pluvieux sont novembre et décembre, les pluies hivernales sont souvent courtes et intenses, affectant le débit des oueds. les précipitations mensuelles sont comprises entre 60 et 110mm.
- Une saison sèche du mois de mai au mois de septembre.

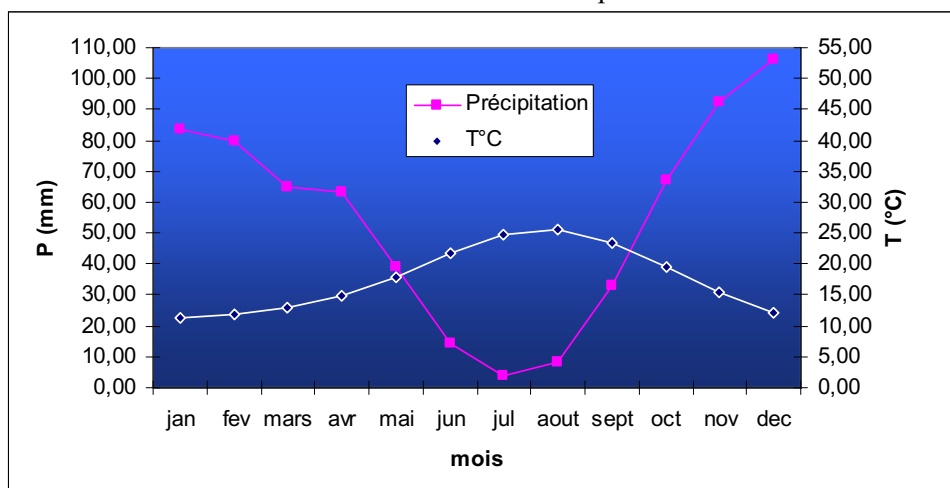


Figure I.4 : Statistiques du climat dans la zone de Zéralda. (LEM, 2009)

Les données pluviométriques enregistrées au niveau de la station de Bouharoun sur trois ans seulement (1993-1996), ne permettent pas d'établir des statistiques pluviométriques mais elles révèlent la nette séparation entre les saisons pluvieuse et sèche.

Tableau I.1 : Précipitations enregistrées à la station de Bouharoun dans la région de Zéralda sur la période 1993-1996.

Année	Mois	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Précipitations (mm)	1993	10,1	84,1	14,2	62,9	34,7	0	0,5	2,1	25,3	22,7	70,2	17,0
	1994	78,6	34,1	1,1	43,3	3,7	0	0	0	108,9	30,8	40,8	54,3
	1995	94,8	45,7	57,8	15,9	0	13,0	0	40,0	24,3	11,9	74,1	48,5
	1996	73,2	85,6	39,2	154,3	/	/	/	/	/	/	/	/

I.5.2. Températures

La répartition des valeurs de températures permet de différencier une saison hivernale de novembre à avril (température moyenne entre 11 et 15°C, le minimum pendant le mois de janvier, 11°C) et une autre période estivale de mai à octobre (température moyenne entre 18 et 26°C, le maximum pendant le mois d'août, 26°C). Les données de températures fournies par l'Office Nationale de Météorologie ONM d'Alger au niveau de la zone d'étude entre 1976-2005 et qui correspondent avec la *figure I.4*, sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.2 : Températures enregistrées sur la période 1976-2005 dans la région de Zéralda (ONM).

Mois		jan.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
T°C	Min	5,5	5,9	7,1	8,8	12,3	16,1	18,9	19,8	17,6	14,2	9,8	7,2
	Max	16,7	17,4	19,2	20,9	23,9	28,2	31,2	32,2	29,6	25,9	20,8	17,9

I.5.3. Vents

Le vent est à l'origine des houles, des clapots et des courants superficiels (*Bonnefille, 1994*). L'analyse du régime des vents est effectuée à partir de 3 sources de données météorologiques :

- Les données du Summary of Synoptic Meteorological Observations (S.S.M.O) de 1914 à 1970.
- Les données de la station de Dar El Beida de 1975 à 1984.
- Les données de Medatlas de 1999 à 2004.

I.5.3.1. Données du Summary of Synoptic Meteorological Observations 1914 à 1970

Les données sont reprises des documents du "Summary of Synoptic Meteorological Observations" de l'US Naval Weather Service (*S.S.M.O Tome 2, zone Algiers*).

Les résultats des observations du vent, effectuées au large des côtes algériennes, sont rapportés sous forme de roses de vents (*LEM, 1999*) pour chaque trimestre et pour toute l'année (*figure I.5*).

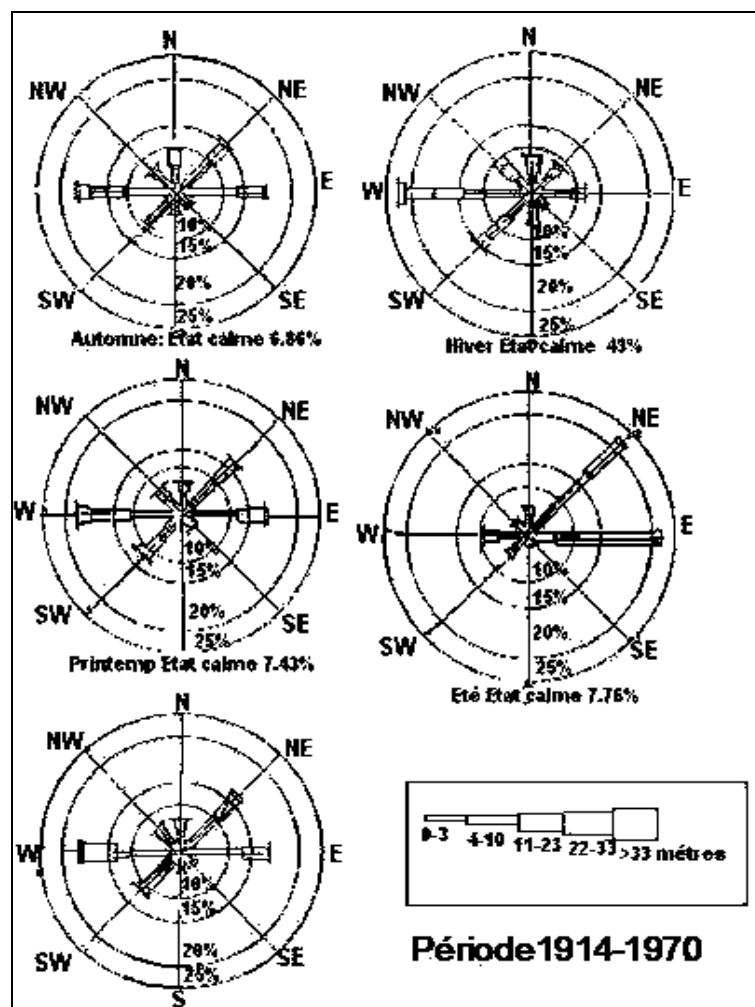


Figure I.5 : Roses de vents, données du S.s.m.o au large d'Alger (1914-1970). (LEM, 1999)

Ces roses montrent, que pendant l'hiver (octobre à mars), les vents des secteurs Ouest et Sud- Ouest sont dominants et que la majorité de ces vents présente une vitesse supérieure à 16 nœuds (8m/s).

Les vents d'Est et Nord-Est dominant au cours de l'été et une grande partie de ceux-ci présente des vitesses inférieures à 16 nœuds.

Les vents des secteurs Nord-Est et Est se distinguent beaucoup plus par leur fréquence que par leur vitesse. Par contre, les vents du secteur Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest sont appréciables par leur force mais non par leur fréquence.

Selon les données du S.s.m.o pour la période allant de 1963-1970, les fréquences d'apparition du vent par vitesse et par direction sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau I.3 : Fréquences d'apparition du vent par vitesse et par direction au large d'Alger (LEM, 1999).

Vitesses (m/s)	Directions				
	W	NW	N	NE	E
0,5 – 1,5	1,0 %	0,7 %	1,1%	1,0 %	1,4 %
2,0 – 5,1	10,4 %	6,1 %	4,8 %	6,5 %	9,1 %
5,6 – 10,7	13,2 %	6,1 %	2,4 %	2,8 %	5,6 %
11,2 – 17,1	5,3 %	2,7 %	0,6 %	0,5 %	0,5 %
17,3 – 24,0	1,1 %	0,8 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %
> 25,0	0,0 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %	0,0 %
TOTAL	31,0 %	16,5 %	9,0 %	10,9 %	16,7 %

A partir des données du tableau, on note la prédominance de deux secteurs :

- Le secteur Ouest à Nord-Ouest avec 47,5%.
- Le secteur Est avec 16,7%.

Les vents qui proviennent du Nord-Ouest sont les plus susceptibles d'engendrer les houles les plus violentes.

I.5.3.2. Données de la station de Dar El Beida 1975 à 1984

Les enregistrements de la station de Dar El Beida sur la période 1975 à 1984 (*LEM, 2009*) présentent les résultats suivants :

- Les vents de direction N360° (fréquence 12%) présentent une répartition constante durant toute l'année.
- Les vents Nord-Est de direction N45° (fréquence 10%) sont dominants en période estivale s'étalant de mai à septembre.
- Les vents Sud-Ouest de direction N225° (fréquence 14,5%) et d'Ouest de direction N270° (fréquence 11,5%) sont dominants en période hivernale qui s'étale d'octobre à avril.

I.5.3.3. Données de Medatlas de 1999 à 2004

La reconstitution du climat de vents a été établie à partir des données de Medatlas (1999-2004) en modèle numérique d'un point situé en Méditerranée à une profondeur dépassant 2500m selon les coordonnées géographiques (3°00' E, 37°00'N) (*LEM, 2006*).

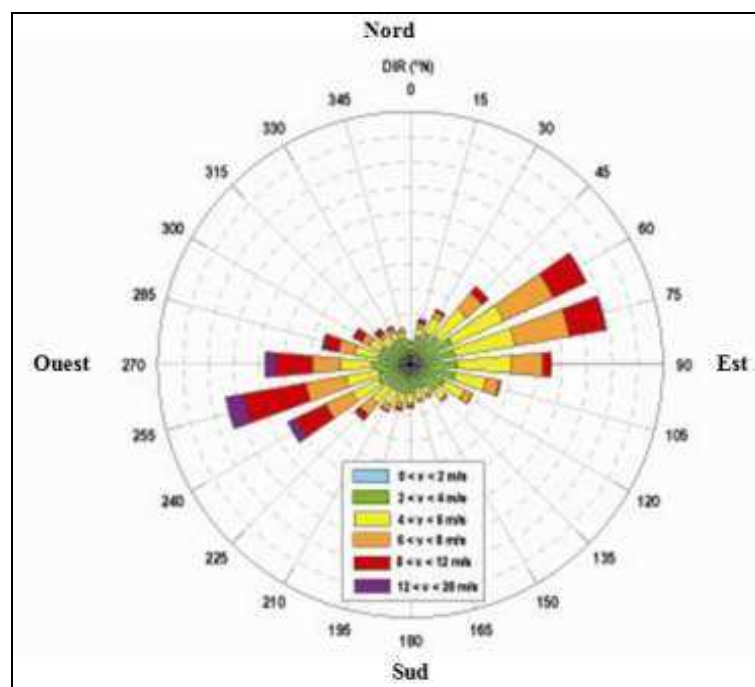


Figure I.6 : Rose des vents des données de Medatlas, au point 3°00' E et 37°00'N en Méditerranée (1999-2004). (LEM, 2006)

Les résultats de cette étude mettent en évidence une prédominance des vents provenant des directions Est-Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest, avec des vitesses maximales qui atteignent 20m/s pour les directions comprises entre 240° et 270°N.

Aussi pour les directions comprises entre 45° et 90°N, on observe des vitesses de vent qui atteignent 16m/s.

I.6. Conditions océanographiques

I.6.1. La marée et les variations du niveau d'eau

Les variations du niveau de la mer résultent de la combinaison de l'effet de plusieurs phénomènes (*Bonnefille, 1994*) :

- La marée astronomique due aux effets de l'attraction de la lune et du soleil sur les particules liquides.
- Les perturbations d'origine météorologique liées aux variations de la pression atmosphérique ou à l'action du vent.

La marée astronomique est de type semi-diurne avec inégalité diurne, son amplitude est faible et reste inférieure à 40cm sur la façade algérienne. Elle présente d'importants écarts suivant l'époque lunaire et est le plus souvent masquée par la surélévation ou l'abaissement du niveau de l'eau engendré par des variations de conditions climatologiques (*SGH, 2010*).

En moyenne, la marée de pleine lune est de 25 à 30cm (marée de vives-eaux) et celle de la nouvelle lune de 5 à 15cm (marée de mortes eaux).

D'autres phénomènes peuvent se superposer à cet effet astronomique tels que la pression atmosphérique, les seiches,

Les effets ponctuels liés à un coup de vent persistant (gonflement du plan d'eau au niveau du rivage) ou à un passage dépressionnaire peuvent engendrer des fluctuations bien supérieures à la marée astronomique. Dans notre cas, ils peuvent provoquer des dénivellations qui peuvent atteindre 1m et masquer l'effet des marées (*SGH, 2010*).

A cela, il convient de considérer également la montée du niveau moyen des mers. Par exemple, les enregistrements de niveaux à Oran sur une soixantaine d'années montrent une tendance à la surélévation de l'ordre de 1,5 mm/an (*LEM, 2009*).

Le Nivellement Général Algérien (niveau NGA) se trouve à +0,34 m par rapport au Zéro Hydrographique (Zéro Carte Marine). Les données altimétriques sont homogénéisées dans un système unique prenant comme référence le Zéro NGA.

I.6.2. Les courants

Bien que, en environnement maritime, l'action maximale soit généralement imputable à la houle, il ne faut pas négliger les courants lors du dimensionnement des ouvrages de protection. Selon qu'un ouvrage est conçu pour un environnement marin, fluvial ou estuarien, les courants ont des origines, des forces, des échelles temporelles et des caractéristiques statistiques différentes (*Bonnefille, 1994*). Le long de la côte et dans les estuaires, la plupart des courants sont liés à la marée, tandis que dans les cours d'eau, le facteur dominant est le débit. Pour le dimensionnement en milieu marin, toutefois, il faut parfois tenir compte des courants induits par le vent (*Caminade, 1995*).

Le dimensionnement structurel (stabilité des enrochements), la construction et le transport (ancrage nécessaire, vitesse des navires) sont des exemples de situations qui exigent une connaissance des courants. De manière plus indirecte, les courants sont susceptibles d'affecter un ouvrage à cause de l'érosion des fonds meubles (*Caminade, 1995*). Les courants recensés dans la zone d'étude sont les suivants :

I.6.2.1. Courants de circulation générale

Le courant Atlantique (pénétration des eaux par le détroit de Gibraltar) longe, d'Ouest en Est, les côtes d'Afrique du Nord, sa vitesse est de l'ordre de 1,5 à 2 nœuds. Ce courant s'étale sur plusieurs milles nautiques et son action se fait sentir jusqu'à une profondeur de 200m. Il est encore très sensible au large d'Alger (vitesse = 0,7 nœud, soit 0,3 à 0,4m/s) (*Millot, 1989*).

Ce courant de surface est compensé en profondeur par un contre courant qui longe les côtes espagnoles. La vitesse de ces courants peut augmenter par régime de vent d'Ouest pour atteindre 2,5 à 3 nœuds (*Millot, 1989*).

I.6.2.2. Courants dus à la marée ou induits par le vent

Les courants de marée, du fait du faible marnage des marées, sont négligeables voire même inexistants.

Du fait de l'intensité plutôt faible des courants généraux et des courants de marée, l'influence des vents est sensible. On admet généralement que le vent crée un courant de dérive dont l'intensité en surface est voisine de 3% de la vitesse du vent (*SGH, 2010*).

Au regard des vents sévissant sur le site, pendant la saison froide, les vents dominants, venant du secteur Ouest, vont donc renforcer la dérive vers l'Est, alors que pendant la saison chaude, les vents dominants venant du secteur Est à ENE vont donc avoir tendance à réduire ou annuler la dérive vers l'Est.

I.6.2.3. Courants de houle

Les transferts côtiers sont surtout conditionnés par les différentes dérives littorales engendrées par la houle, pendant l'hiver ils ont une direction Ouest-Est du fait de la houle dominante du NW, le reste de l'année les courants ont plutôt une direction Est-Ouest.

Les courants de houle sont localisés dans la zone comprise entre le déferlement et la côte, lorsque la houle se présente avec une certaine obliquité par rapport au rivage. Lorsque la houle est frontale, des échanges importants peuvent se faire entre la côte et le large par des courants, orientés vers le large, ces courants traversent la zone de déferlement et peuvent être importants et dépasser 1 m/s, soit 2 nœuds.

I.6.3. Les houles du large

La houle se produit par l'action du vent à la surface de l'eau et subit des modifications en s'approchant de la côte sous l'effet de la variation de la bathymétrie. La connaissance des caractéristiques de la houle : direction, amplitude, réfraction, etc. permet de comprendre les déplacements sédimentaires dans la zone de déferlement, le volume et les sens de transit littoral en fonction de leur incidence à la côte. Ces caractéristiques conditionnent le dimensionnement de l'ouvrage de protection de la côte ainsi que son implantation (*Vigier, 1992*).

Les données de houles existantes sont celles issues :

- Des données du **S.s.m.o** sur la période 1963 à 1970.
- Des observations de navires de l'Institut Météorologique Royal Néerlandais (KNMI) de 1961 à 1980.

Ces données étant assez anciennes, Sogreah avait pour cette étude fait l'acquisition des données de reconstitution numérique des états de mer sur une période de 44 ans à un pas tri-horaire. Ces données, appelées **SIMAR-44**, sont issues du projet européen **Hipocas** et fournies pour le littoral méditerranéen par l'entité espagnole de « Puertos del Estado ».

Le projet **Hipocas** (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe, de 1958 à 2001) avait pour objectif d'obtenir une rétrospective des 44 ans du climat en terme de vents, de vagues, de courants et du niveau des mers pour les eaux européennes et côtières, le but est de reproduire toutes les données atmosphériques servant aux applications de trois modèles régionaux, de vagues et de circulation océanique.

Ces données, en particulier sur les côtes méditerranéennes, présentent un biais par rapport aux mesures nature et nécessitent donc une opération de calibration pour pouvoir être utilisées de manière pratique. Dans notre cas les houles issues des observations de navires (Synopships, 1973-1986) ont été considérées pour la comparaison avec les houles du point **Simar-44**, ces valeurs recalées ont alors été exploitées dans l'optique de déterminer le régime sédimentaire (*SGH, 2010*). L'analyse statistique de ces données ainsi que le transfert des séries temporelles de houles du large à la côte sont présentés dans les sections suivantes.

I.6.3.1. Observations du S.s.m.o

Les données de la houle au large sont données dans les documents du "Summary of Synoptic Meteorological Observations" (*S.s.m.o Tome 2, zone Algiers*), sur une période de 8 ans de 1963 à 1970, secteur d'observation : Centre entre 37,4 ° N et 3,9° E (*S.s.m.o, 1970*).

Une analyse statistique de ces données de base permet de définir les secteurs de la houle prédominants et leurs amplitudes respectives. Des roses de houles au large d'Alger sont établies trimestriellement et annuellement.

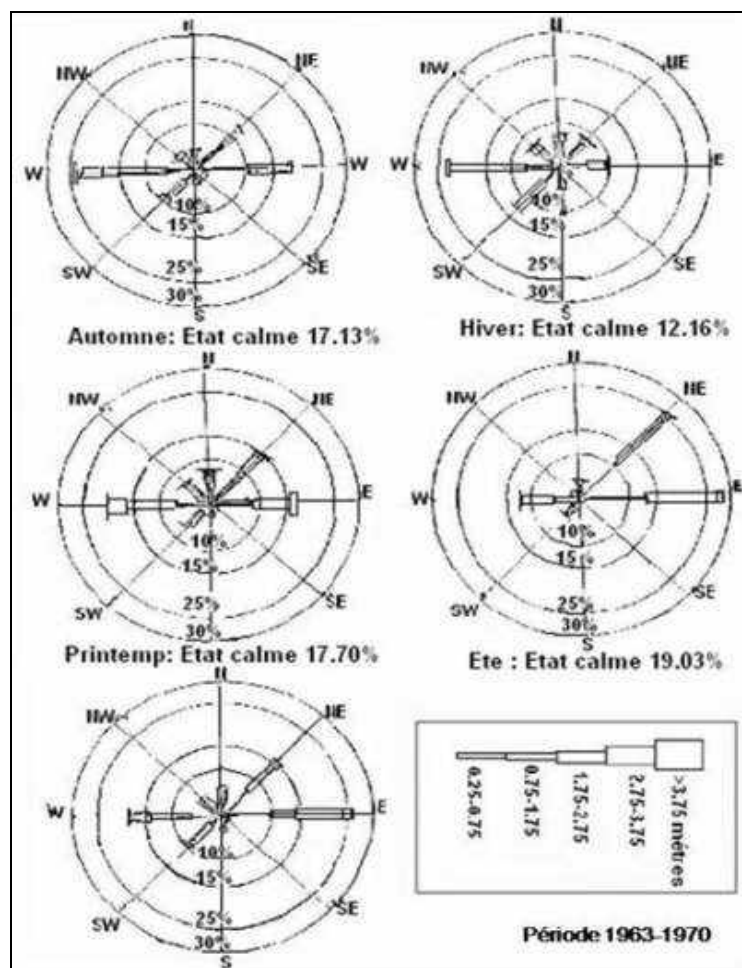


Figure I.7 : Roses de houles, données du S.s.m.o au large d'Alger (1963-1970). (LEM, 1999)

I.6.3.1.1. Fréquences mensuelles de la houle

Les fréquences mensuelles de la houle au large d'Alger par direction sont données dans le tableau ci-après.

Tableau I.4 : Fréquences mensuelles % de la houle au large d'Alger par direction (LEM, 1999).

Mois	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
janvier	8,1	12,9	18,2	5,0	6,5	13,2	28,8	7,3
février	8,8	10,3	12,6	4,0	6,1	16,9	35,6	5,8
mars	11,3	12,6	15,8	3,6	4,5	12,3	30,5	9,2
avril	11,7	15,4	16,0	2,0	4,4	13,7	26,7	10,2
mai	8,2	26,3	31,9	3,0	3,3	7,2	13,9	6,2
juin	9,2	29,1	29,8	1,8	1,4	8,2	16,4	4,2
juillet	5,9	32,5	35,1	1,4	1,0	5,9	16,3	2,0
août	8,8	27,7	37,3	1,9	1,1	5,0	13,4	4,9
septembre	6,7	26,4	40,5	2,2	2,3	4,6	14,8	2,5
octobre	7,8	14,1	20,3	3,2	4,2	14,8	28,8	6,8
novembre	5,5	5,8	10,0	5,1	8,0	15,9	40,4	9,4
décembre	10,2	6,2	9,4	4,6	7,5	15,0	37,1	10,0
moyenne	8,5	18,3	23,1	3,2	4,2	11,1	25,2	6,5

Les houles d'Ouest, d'Est et de Nord-Est sont les plus fréquemment observées. Les fréquences d'observations sur l'année des houles d'Est et d'Ouest sont sensiblement identiques avec toutefois une légère prédominance du secteur Est. Les houles de tempête proviennent essentiellement du secteur Ouest. Les fréquences d'apparition sont plus faibles pour le secteur Nord et Nord-Ouest.

Le secteur Nord a une répartition assez régulière durant l'année.

I.6.3.1.2. Relation période-amplitude de la houle au large

La répartition des périodes de la houle est donnée par état de mer dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.5 : Répartition des états de mers par période au large d'Alger (LEM, 1999).

Etat de la Mer	Amplitude (m)	Période de la houle (s)
Calme (<0)	< 0,25	5,3
0	0,25-0,75	23,1
1	0,75-1,75	41,1
2	1,75-2,75	12,2
3	2,75-3,75	3,3
4	> 3,75	1,5
Indéterminée	-	13,5

Les houles observées ont pour la majorité une période courte (pour 75% des cas, la période est inférieure ou égale à 7s), 3% des houles ont une période comprise entre 10 et 13s (SGH, 2010).

I.6.3.1.3. Les houles extrêmes du large

Les caractéristiques des houles extrêmes sont, par secteur de provenance et pour toutes directions confondues, les suivantes :

Tableau I.6 : Hauteurs des houles extrêmes (m) par secteur de provenance au large d'Alger (LEM, 1999).

Direction des houles	Est	Nord Est	Nord	Nord Ouest	Ouest	Toutes directions
Biennale	4,12	4,93	4,90	4,16	7,36	7,44
Quinquennale	4,70	5,67	5,75	4,87	8,43	8,34
Décennale	5,14	6,23	6,38	5,40	9,22	9,02
Vingtennale	5,59	6,79	7,02	5,94	10,02	9,70
Cinquantennale	6,17	7,53	7,87	6,65	11,08	10,60
Centennale	6,62	8,08	8,50	7,18	11,88	11,27

I.6.3.1.4. Conclusion

En hiver les houles prédominantes sont de secteur Ouest-Nord-Ouest avec une période moyenne de 8 à 9s, des périodes supérieures à 10s sont relevées lors des tempêtes (LEM, 2009), elles peuvent atteindre 13s.

L'amplitude moyenne la plus fréquente est de 2 à 3m, des houles pouvant atteindre des amplitudes maximales de 4 à 6m.

La longueur d'onde des houles d'hiver les plus fréquentes est de 150 à 170m avec une célérité de 14 m/s. Par "gros temps" les valeurs sont plus élevées : longueur d'onde de 200m et célérité de 17m/s. Dans ces conditions, la profondeur de déferlement peut-être estimée entre 5 et 8m (SGH, 2010).

I.6.3.2. Observations de l'Institut Météorologique Royal Néerlandais (KNMI)

Ces données sont constituées de 20 000 observations visuelles faites à bord de navires sur une période de 20ans. Elles proviennent du K.N.M.I, chargé de rassembler et de compiler les données de ce genre pour la Méditerranée (SGH, 2010).

Les observations portent sur une zone s'étendant entre 2° et 4° de longitude Est et 37° et 38° de latitude Nord, sur les périodes 1961-1980.

Les observations sont regroupées par secteurs de 10 degrés entre les directions extrêmes N275° et N85°. Il a été distingué 4 catégories sectorielles (LEM, 1999):

- Secteur N275°-305°
 - Occurrence moyenne.
 - Fréquence d'apparition de fortes amplitudes : élevée.
- Secteur N305°-N355°
 - Occurrence faible.
 - Fréquence d'apparition de fortes amplitudes : moyenne.
- Secteur N355°-N45°
 - Occurrence moyenne.
 - Fréquence d'apparition de fortes amplitudes : moyenne.

- Secteur N45°-N85°
Occurrence forte.
Fréquence d'apparition de fortes amplitudes : faible.

Pour chaque direction, le graphique **I.8** précise la valeur des périodes de houle apportant le plus d'énergie.

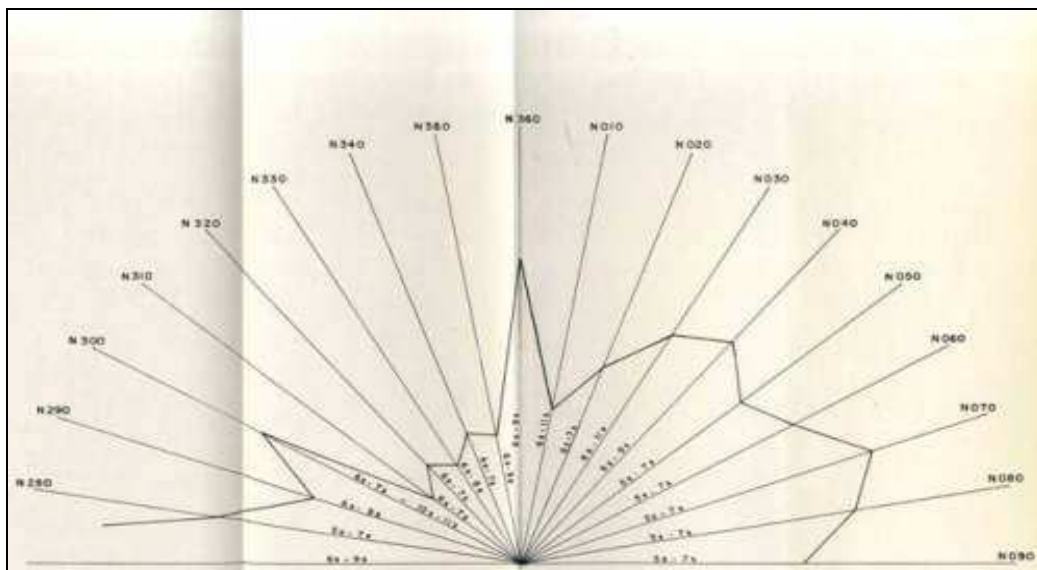


Figure I.8 : Répartition de l'énergie de l'ensemble des houles en fonction de la direction pour les périodes les plus courantes, Méditerranée entre 2°- 4° longitude Est et 37°- 38° latitude Nord.
(Données du KNMI 1961-1980. LEM, 1999)

En effet, on peut diviser le secteur marin N275°-N85° en trois zones :

- Une zone N275°-N305° : l'énergie apportée est relativement importante, les périodes principales étant comprises entre 6 et 11s.
- Une zone N305°-N355° : l'énergie apportée est relativement faible, les périodes principales sont comprises entre 6 et 9s.
- Une zone N355°-N85° : l'énergie apportée est relativement importante, les périodes principales de 5 à 10s sont plus faibles que dans la zone N270°-N305°. A l'intérieur de cette zone, deux pics, N40° et N70°.

I.7. Visite du site et reportage photographique

Une première visite de la plage de Palm Beach-Azur s'était organisée le 17 mars 2009. La visite avait pour objectif la reconnaissance du site et l'examen des dégâts survenus au cours de l'hiver 2008/2009 (érosion et éboulement). Des solutions d'urgence peuvent éventuellement être préconisées en attendant les solutions de protection qui seront proposées dans les conclusions définitives de cette étude.

La visite s'est déroulée comme suit :

- Visite du site et inspection visuelle de la zone d'étude.
- Entretien avec les riverains.
- Prise de photos.

D'après les observations sur le site, la plage de Palm Beach-Azur est sujette à un phénomène d'érosion devenu préoccupant ces derniers temps. Deux zones sont particulièrement touchées. Il s'agit des zones A et B indiquées sur la photo présentée sur la **figure I.9**.



Figure I.9 : Indexation du site de Palm Beach pour le reportage photographique.

Des éboulements récents sont survenus, emportant une partie de la falaise en zone B (surplombée par une route et des habitations) et une partie de l'esplanade (promenade) en zone A. Les dégâts observés sont illustrés par le reportage photographique présenté sur les photos 1 à 18.



Photo 1: Vue vers le port présidentiel à l'Est.



Photo 2 : Epi/émissaire à l'Est de Palm Beach.



Photo 3 : Débouché de l'Oued.



Photo 4 : Vue vers l'Ouest depuis l'épi/émissaire.



Photo 5 : Vue vers l'épi/émissaire.



Photo 6 : Erosion et dégâts sur la plage, vue vers l'Ouest.



Photo 7 : Erosion de la falaise et éboulements.





Photo 8 : Présence de bancs de sable proches de la côte : le sable revient vers la plage après la tempête. Vue vers l'Est.



Photo 9 : Importants dégâts causés par la tempête : érosion et destruction des escaliers menant à la plage.



Photo 10 : Large plage de sable avec une hauteur de berme importante. Pas de submersion de l'arrière-plage en période de tempêtes.

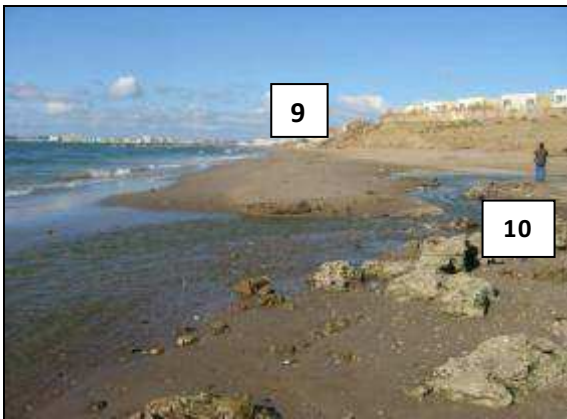


Photo 11 : Erosion et rupture de la pente de la falaise.







Photo 12 : Débouché de l'Oued – limite Ouest de la zone d'étude.



Photo 13 : Mur de clôture érigé par le complexe militaire.



Photo 14 : Plage dépourvue de sable.

	
<p>Photo 15 : Vue vers l'Est de la zone d'étude.</p>	<p>Photo 16 : Mur de clôture érigé par le complexe des Sables d'or, pied dans l'eau.</p>
	
<p>Photo 17 : Vue vers l'Est depuis l'épi, Complexe des Sables d'or.</p>	<p>Photo 18 : Épi à l'Ouest de la zone et série de trois brise-lames construits en 2005.</p>

A partir des constats visuels de l'état physique de la zone, il en ressort ce qui suit :

- La présence de rejets urbains à l'Est, à l'Ouest et au centre de la zone d'étude sans aucun traitement préalable des eaux.
- Les talus en haut d'estran sont dans un état d'instabilité avancée surtout la partie centrale où on a remarqué des affouillements intenses et des basculements de pans de terrains.
- Le talus central un peu surélevé supporte une route bordière et des habitations, par contre, les plages de part et d'autre sont libres en haut de l'estran mais leurs dunes nourricières sont en disparition suite à l'occupation aléatoire de ces espaces.
- Les plages aériennes et le trait de cote sont très influencés par ce manque de sédiments issus des dunes (recul, dégraissement, rupture du profil d'équilibre naturel de la plage).

Les facteurs relevés, associés aux perturbations atmosphériques très violentes de ses dernières années, contribuent à plusieurs dégradations de la plage de Palm Beach Azur, la plus importante étant l'érosion de ses talus, de ses chemins d'accès et de ses dunes bordières.

Chapitre II :

Campagne océanographique et étude bathy-sédimentologique

Chapitre II. Campagne océanographique et étude bathy-sédimentologique

Une campagne de reconnaissance comprenant des levés topo bathymétriques et les prélèvements d'échantillons de sédiments a été réalisée sur le site par l'équipe du LEM entre le 27 Septembre et le 03 Novembre 2009.

II.1. Travaux de la campagne océanographique

Les travaux ont consisté en :

- Un levé topographique sur un linéaire côtier d'environ 2km ainsi que sur une partie aérienne du site, allant jusqu'à des cotes +9m et couvrant une zone en topographie de 17ha
- Un levé bathymétrique sur une longueur de côte totale d'environ 2000m avec des profils atteignant les isobathes de -20m. La superficie de ce levé est de 323ha environ.
- Des prélèvements de 50 échantillons de sédiments superficiels dont 40 répartis sur 9 radiales espacées de 200m dans la zone d'étude suivant les profondeurs de -2, -5, -7, -10 et -15m NGA et 10 échantillons prélevés au niveau de la plage aérienne (estran et haut de plage).

Les moyens matériels utilisés sont : récepteurs GPS 5700 avec accessoires, GPS de poche **Garmin 76C**, radio modem **Pacific Crest**, échosondeur **Odom Echotrac**, accessoires informatiques, une embarcation pneumatique, un moteur hors bord, des équipements de plongée et une benne « Van-Veen », en plus des moyens humains que sont des ingénieurs topographes, ingénieurs d'études, techniciens supérieurs, plongeurs, marinières... (*LEM, 2009*).

Conformément à l'arrêté du 25 février 2003 publié sur le journal officiel du 30 avril 2003 fixant les systèmes de coordonnées en Algérie, le système de référence géodésique WGS84 approprié au GPS est le système officiel en Algérie.

Les côtes des levés (topographique et bathymétrique) sont rattachées en altimétrie au Nivellement Général Algérien (NGA).

II.1.1. Levé topographique

Le récepteur GPS mobile, porté par le topographe au moment du levé, fournit instantanément la position tridimensionnelle du point à une précision inférieure à cinq centimètres (< 5cm).

Le transfert et le traitement de données sont réalisés sur logiciel TGO (Trimble Geomatic Office) (*LEM, 2009*). La visualisation de ces données permet de déceler les éventuelles anomalies et de détecter les zones non couvertes.

II.1.2. Levé bathymétrique

Le levé bathymétrique consiste à déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin dans le système géodésique WGS84 à l'aide d'un récepteur GPS et d'un échosondeur.

Le récepteur GPS permet de mesurer un point à quelques centimètres près. Cette précision verticale permet de déterminer les corrections du niveau de l'eau (corrections des marées).

Ce dispositif est interfacé par un micro ordinateur et le logiciel de navigation, d'acquisition et de traitement des données brutes « HYPACK » (*LEM, 2009*). Celui-ci permet de générer un modèle numérique du terrain MNT des données traitées grâce auquel sont visualisées les isobathes qui permettent de vérifier les données sur la base de la forme des courbes générées.

II.1.3. Méthodologie d'échantillonnage

Le positionnement sur les stations de prélèvements d'échantillons est réalisé à l'aide du GPS de poche **Garmin**, suivant des coordonnées prédéfinies. Les échantillons sont prélevés par des plongeurs puis

stockés dans de petits sacs en plastique, étiquetés et numérotés. 50 échantillons de sédiments superficiels ont été prélevés, leurs localisations sont représentées sur la *figure II.1*.

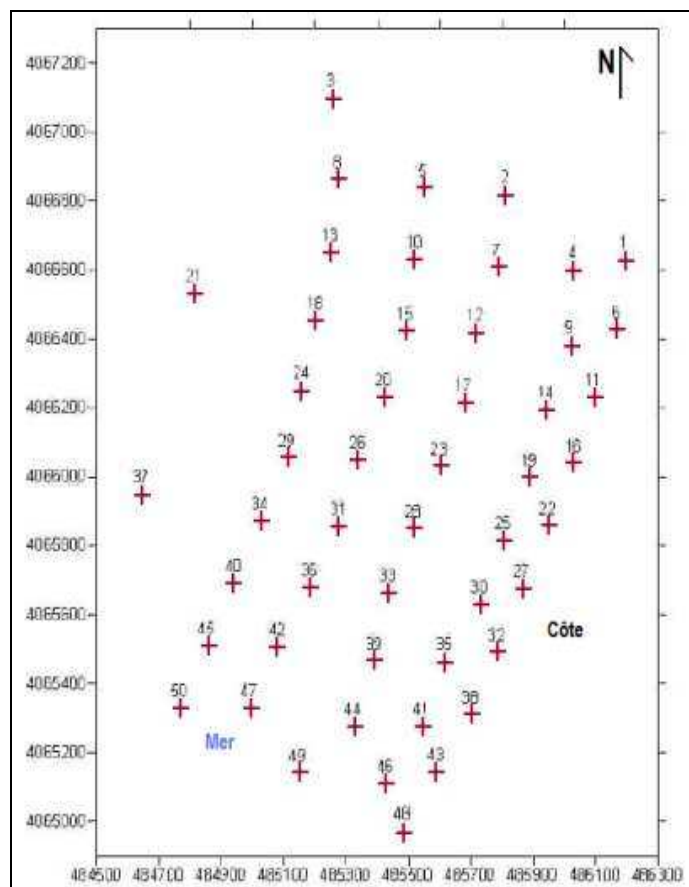


Figure II.1 : Positionnement des 50 points de prélèvement sur Palm Beach-Azur (LEM, 2009).

Les coordonnées géographiques des stations de prélèvements et la nature des échantillons prélevés sont données dans le *tableau 1 en Annexe I*.

II.2. Etude bathymétrique

12 profils ont été réalisés le long de la zone levée. Les profils sont équidistants entre eux, couvrent une partie de la haute-plage et atteignent une profondeur maximale de 20m en mer. Ceci a permis d'établir une esquisse bathymétrique et de réaliser une bathymétrie reflétant la morphologie sous-marine de la zone d'étude.

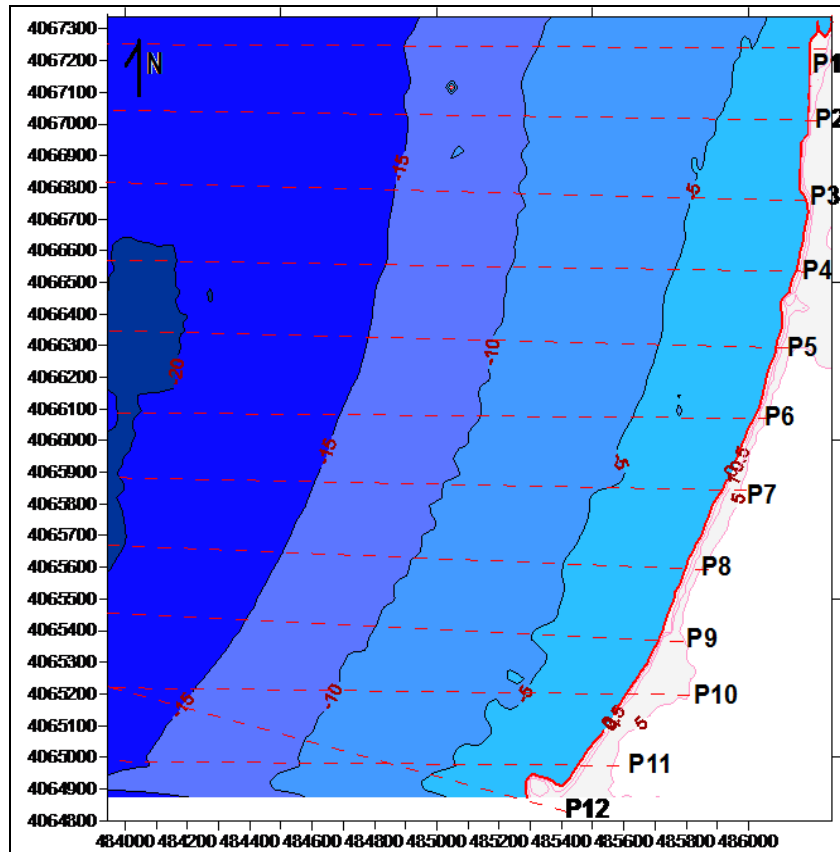


Figure II.2: Plan et profils topo-bathymétriques réalisés sur Palm Beach-Azur.

Les profils réalisés depuis la côte vers le large sont reportés en *Annexe I, figure 1*. Le levé topo-bathymétrique est donné en *Annexes-Plans*.

En effet, la morphologie sous-marine semble irrégulière d'Ouest en Est avec des pentes abruptes à l'extrême Est du site de l'ordre de 6,5% sur une distance de 50m à partir du trait de côte. La pente s'adoucit vers l'ouest pour atteindre une pente de 1% sur une distance à la côte de 150m à 200m. Ainsi, on note la présence d'une dune hydraulique à une distance de 300m de la côte dans la partie centrale du site et elle disparaît en allant vers l'épi.

Les isobathes jusqu'à -20m sont parallèles à la côte et présentent une pente moyenne de l'ordre de 1% sur l'ensemble du site.

II.3. Analyse sédimentologique

L'objectif d'une étude sédimentologique est la caractérisation des sédiments en mer, leur répartition spatiale et par conséquent leur modalité de mise en place. L'utilisation de l'analyse statistique des particules d'un sédiment meuble est maintenant pratique courante, les échantillons font l'objet d'une analyse granulométrique in vitro. Les résultats de cette analyse permettent d'établir la carte de répartition spatiale des sédiments.

Le principe consiste à faire passer un échantillon de sédiments par une série de tamis de diamètre décroissant et de calculer ensuite le poids partiel pour chaque tamis. La granulométrie donne les diverses classes de matériaux formant un même échantillon, et ceci indépendamment de sa nature chimique.

L'analyse consiste également à séparer la fraction sédimentaire fine de la fraction grossière par voie humide par tamisage à travers une maille de 50 μ m. Le sédiment brut est séché, pesé puis lavé au tamis à 50 μ m. Le refus récupéré est séché. La différence de poids entre l'échantillon brut et le refus permet de connaître le poids des pélites et donc calculer le pourcentage.

Les échantillons sans pélites sont à leur tour séchés puis tamisés sur une série de tamis de maille AFNOR emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas par unités de microns (... , 2000, 1800, 1600, 1400, 1000, 800, 630, 500, 400, 315, 250, 200, 180, 160, 140, 100, 80, 63...). Le protocole de l'essai granulométrique est donné ci-dessous.

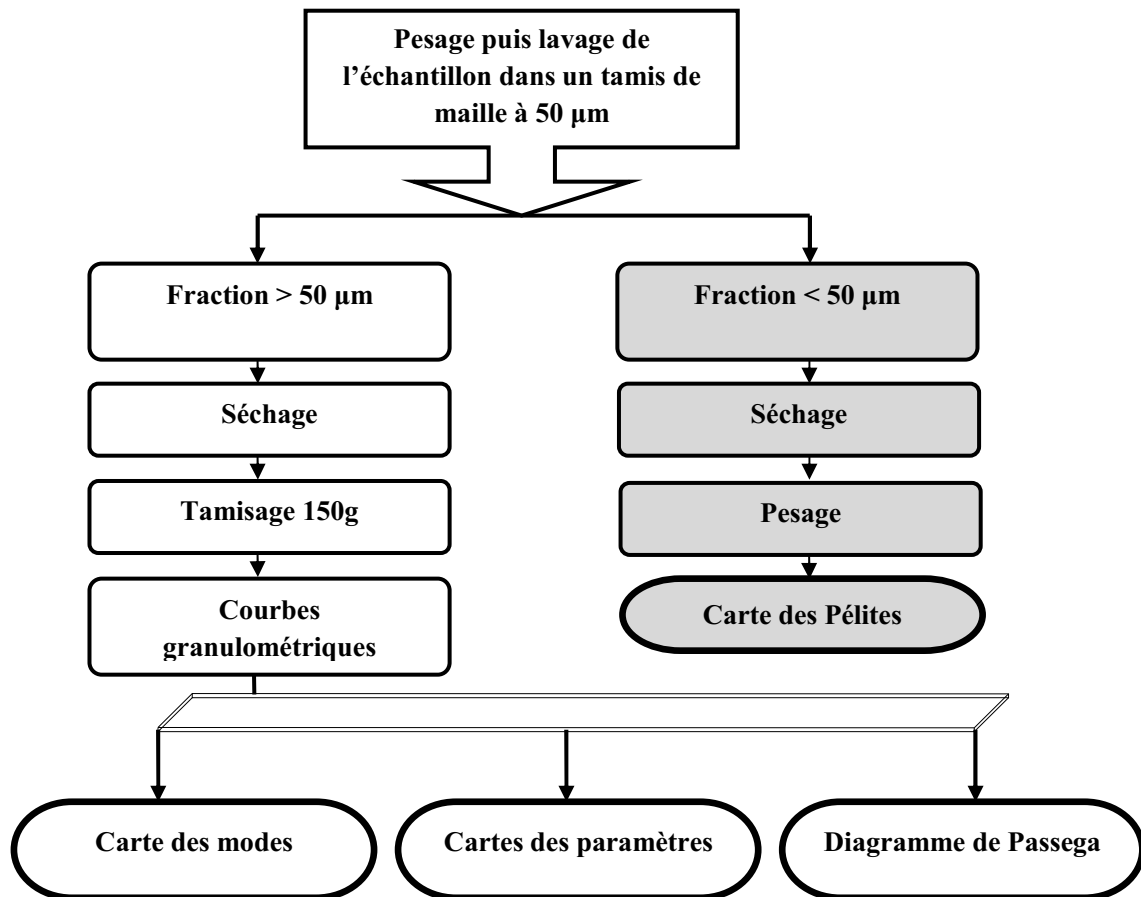


Figure II.3: Protocole de l'essai granulométrique.

Les poids recueillis sur chaque tamis convertis en pourcentage pondéraux des sédiments permettent d'établir les courbes granulométriques cumulatives pour chaque échantillon (Augris *et al.*, 1984).

Ces courbes sont tracées sur un graphe semi-logarithmique en portant en ordonnées le pourcentage cumulé des refus et en abscisse le diamètre des grains. L'examen de ces courbes permet de distinguer la présence des différents stocks de sédiment (Riviere, 1977). Une courbe uni-modale représente un échantillon de sable composé d'un seul stock sédimentaire alors qu'une courbe bimodale à plurimodale représente un échantillon composé de deux ou plusieurs stocks sédimentaires (Al Sid Chikh *et al.*, 2008).

II.3.1. Classification des dépôts superficiels

Chaque type de dépôt peut être caractérisé par sa teneur en pélites et en fraction grossière. L'analyse de la fraction grossière distingue les proportions granulométriques qui permettent de comprendre la répartition spatiale des sédiments. Selon Folk (1966), les groupes sédimentaires sont séparés comme suit :

Tableau II.1: Classification granulométrique des sédiments selon Folk, 1966 (Riviere, 1977).

Classes	Diamètre (µm)
Sables très grossiers	> 2000
Sables grossiers	500 - 1000
Sables moyens	250 - 500
Sables fins	40 - 250

II.3.2. Résultats de l'analyse granulométrique

II.3.2.1. Répartition spatiale de la fraction fine

Les résultats des pourcentages en pélites dans chaque échantillon sont donnés dans le *tableau 2* en *Annexe I*. La carte (*figure II.4*) est établie à partir du pourcentage en pélites calculé pour chaque échantillon.

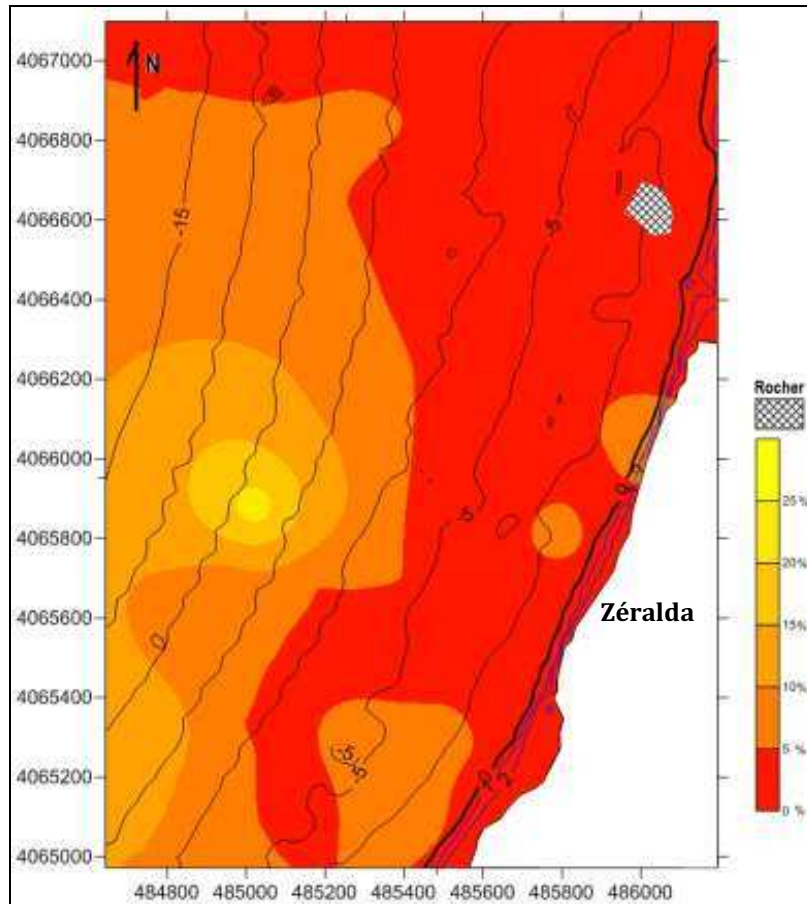


Figure II.4 : Répartition spatiale des pélites dans la plage de Palm Beach Azur.

Cette carte montre que les échantillons situés à moins de 6m de fond présentent des teneurs en pélites inférieures ou égales à 10%. Au-delà, les teneurs augmentent progressivement jusqu'à dépasser les 25 % à -20m de fond. Les sédiments dont la teneur est inférieure à 5 % tapissent la zone Est du site sur la totalité de l'emprise des levés jusqu'à des profondeurs de -20m. Cette distribution résulte probablement de l'ouverture du site à l'Ouest et à une zone abritée à l'Est par la mise en place de l'épi.

II.3.2.2. Résultats de la fraction grossière

II.3.2.2.1. Courbes granulométriques

Les courbes granulométriques cumulatives pour chaque échantillon sont présentées en *Annexe I, figure 2*. Il est à noter que parmi les 50 échantillons, 1 seul échantillon s'est révélé de nature rocheuse.

Les courbes cumulatives représentant le site d'étude sont presque toutes du même type, à savoir uni modal. Elles indiquent donc la présence d'un seul stock sédimentaire. On présente ci-dessous des courbes de quelques échantillons, regroupées par localisation et représentatives de l'ensemble. Ce type de courbes, largement répandu sur le site d'étude, ceci traduit une homogénéité des sédiments et donc la présence d'un même stock sédimentaire qui décroît de la côte vers le large.

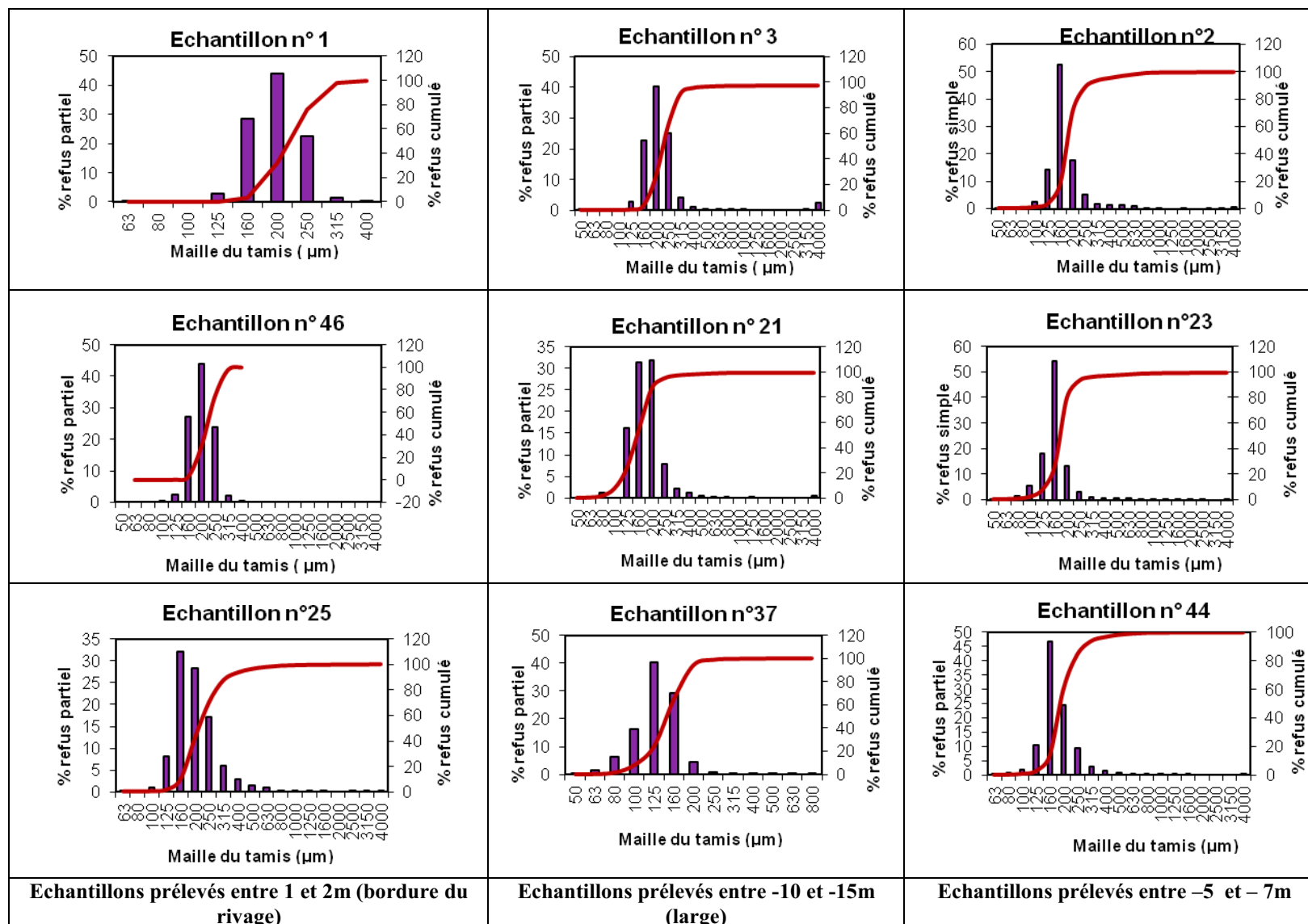


Figure II.5 : Courbes granulométriques représentatives de trois groupes d'échantillons identifiés sur Palm Beach-Azur.

II.3.2.2.2. Répartition spatiale de la médiane D_{50}

Ce paramètre correspond au diamètre du grain moyen dont l'ordonnée est à 50% du poids total du sédiment (in Augris et al., 1984).

La carte suivante est établie à partir des médianes tirées des courbes cumulatives, les valeurs obtenues sont données dans le **tableau 3, Annexe I**. La carte montre la répartition spatiale du D_{50} dans le secteur d'étude.

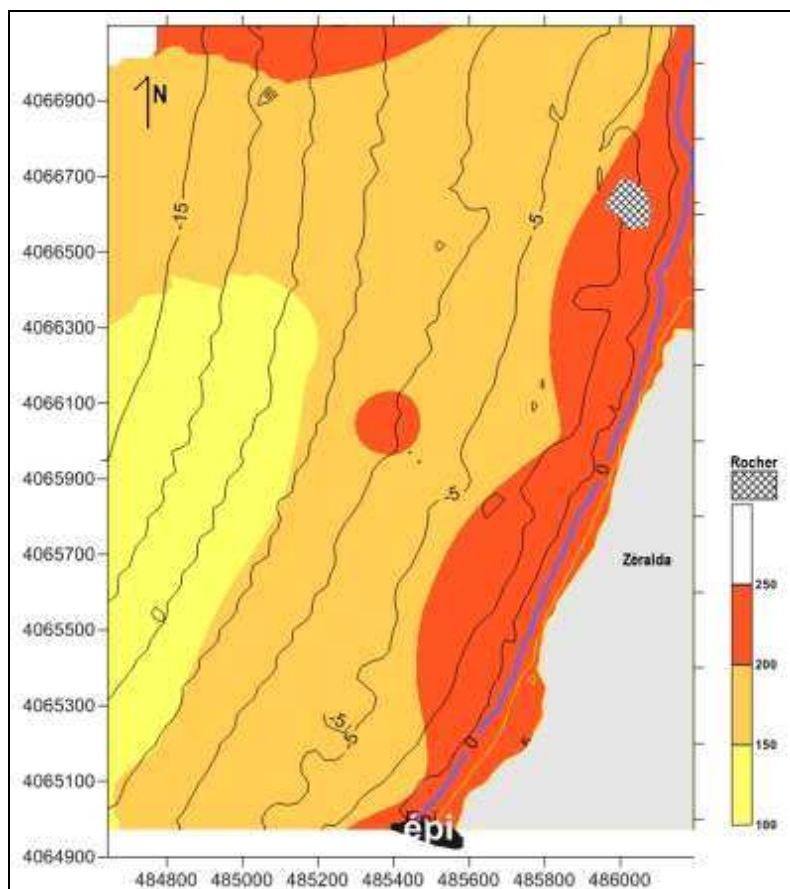


Figure II.6 : Répartition spatiale du diamètre D_{50} (μm) dans la plage de Palm Beach-Azur.

La carte décrit un zonage granulométrique décroissant de la côte vers le large, les particules grossières ($D_{50} \geq 200\mu\text{m}$) se localisent sur la côte et ce jusqu'à une profondeur de -2,5m.

Au delà de cette profondeur, les particules diminuent pour avoir un diamètre médian compris entre 200 et $100\mu\text{m}$. Les sables les plus fins sont localisés vers le Sud-Ouest au delà de -10m de profondeur.

Cette répartition répond au schéma classique de la répartition des sédiments en mer, à savoir une diminution graduelle de la taille des particules de la côte vers le large.

II.3.2.2.3. Répartition spatiale du décile supérieur D_{90}

Le D_{90} correspond au diamètre dont l'ordonnée est à 90% du poids total du sédiment (Augris et al., 1984). Les valeurs obtenues sont données dans le **tableau 3, Annexe I**. La carte ci-après montre la répartition spatiale des D_{90} dans le secteur d'étude.

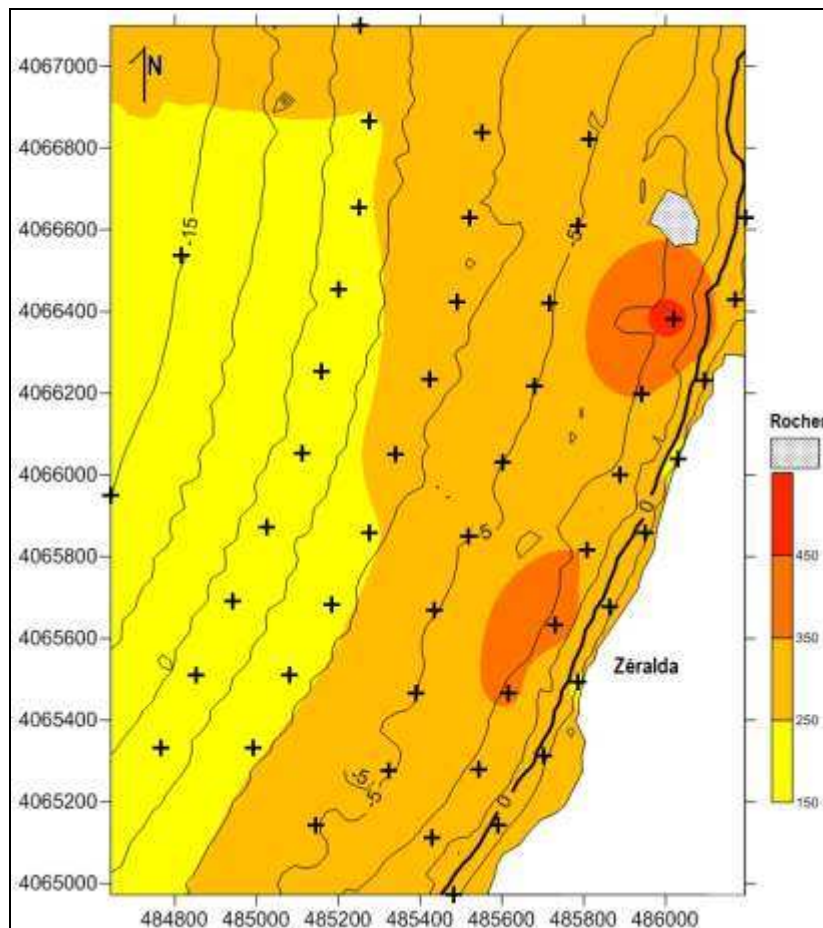


Figure II.7 : Répartition spatiale du diamètre D_{90} (μm) dans la plage de Palm Beach-Azur.

Les particules les plus grossières dont le diamètre du grain est supérieur à $350\mu\text{m}$ s'étalent à l'Est de la côte jusqu'à -15m de profondeur et même au-delà et rétrécit vers l'Ouest se limitant à la profondeur de -9m .

II.3.2.2.4. Analyse modale

Le mode granulométrique correspond au point d'inflexion de la courbe cumulative, il représente la dimension la plus significative de la distribution granulométrique (Augris *et al.*, 1984).

D'après l'histogramme de fréquence des répartitions dimensionnelles des modes (figure II.8), les modes les plus fréquents sont en ordre décroissant : M1 de $200\mu\text{m}$, M2 de $160\mu\text{m}$ et M3 de $125\mu\text{m}$.

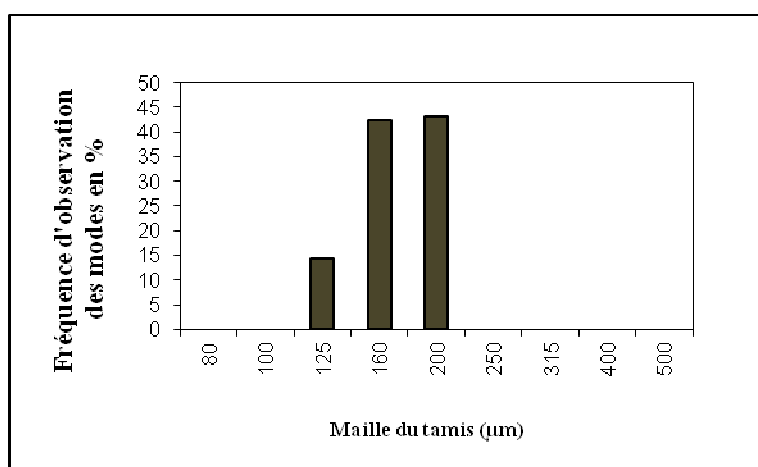


Figure II.8 : Fréquence des modes les plus représentatifs dans la plage de Palm Beach-Azur.

Les échantillons sont constitués de 0 à 80% d'éléments dont le diamètre est compris entre 125 et $250\mu\text{m}$ avec un mode dominant à $200\mu\text{m}$ et qui sont répartis sur la presque totalité du site (figure II.9). Les 20% des éléments restants se concentrent sur deux zones localisées au centre du site entre -3m et -9m .

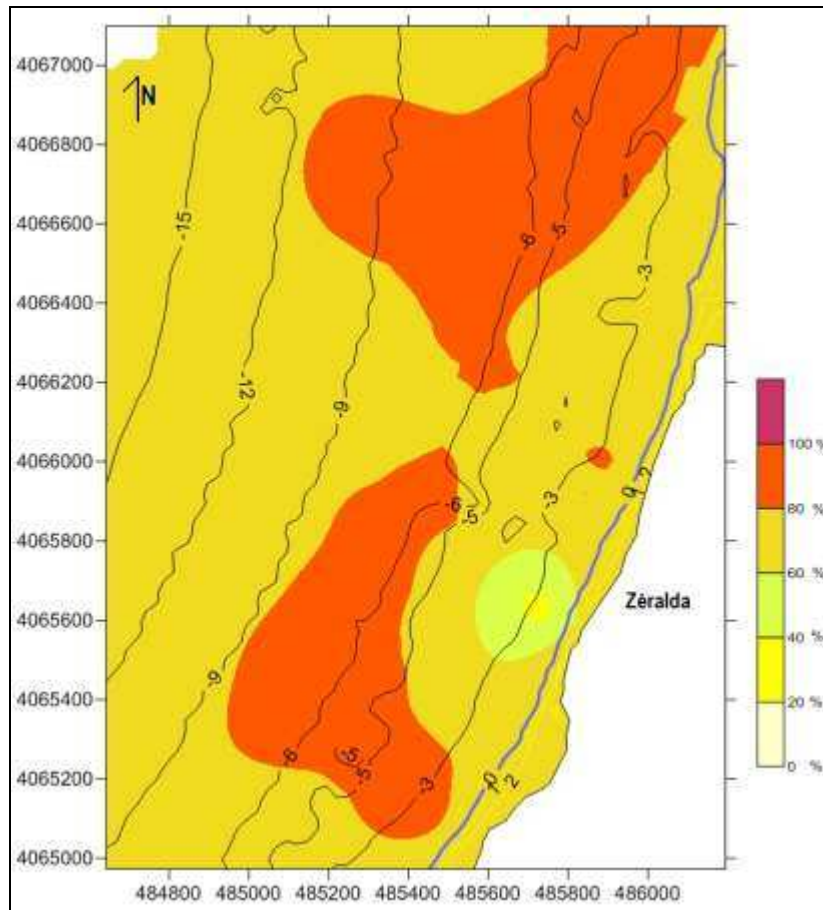


Figure II.9 : Répartition spatiale du mode M1 (200 µm) dans la plage de Palm Beach-Azur.

II.3.2.2.5. Indice de classement de Trask S₀

Appelé également « Sorting de Trask » et noté S₀, cet indice représente la dispersion des tailles de part et d'autre de la médiane, entre le D₇₅ et D₂₅ (Rivière, 1977). Il est calculé comme suit :

$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}}$$

Cet indice permet de faire un tri du sédiment selon les coupures adaptées par Trask en 1930. Il est possible de classer les sédiments parmi différentes catégories selon les valeurs de S₀ comme le montre le tableau suivant :

Tableau II.2 : Classement des sédiments selon l'indice de Trask S₀ (Al Sid Chikh et al., 2008).

Valeur de l'indice	Signification
$S_0 \leq 1$	Sédiment très bien classé
$1 < S_0 \leq 2,5$	Sédiment bien classé
$2,5 < S_0 \leq 3$	Sédiment normalement classé
$3 < S_0 \leq 4$	Sédiment mal classé

Les valeurs obtenues de cet indice sont données dans le **tableau 3, Annexe I**. Elles montrent que la majorité des échantillons est constituée par un sédiment très bien classé ($1 < S_0 < 2,5$) selon la classification de Folk (1966), **figure II.10**.

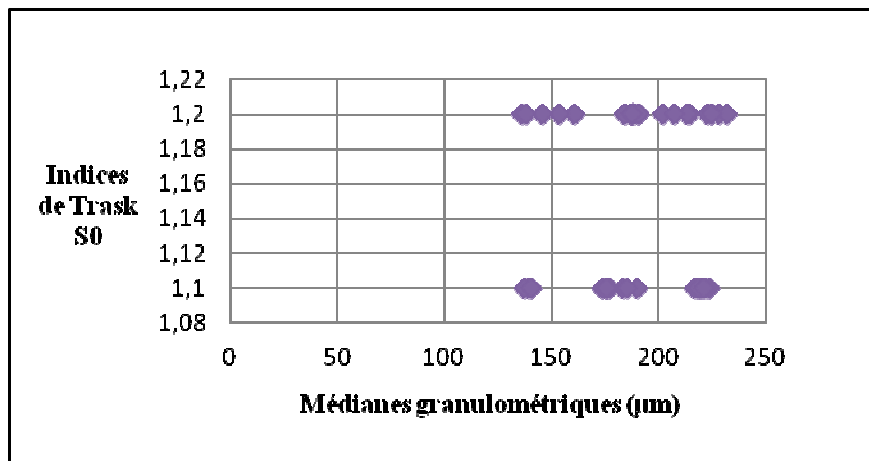


Figure II.10 : Résultats de l'indice de classement S0 dans la Plage de Palm Beach-Azur.

II.3.2.2.6. Indice d'asymétrie de Skewness Sk

Cet indice indique le tri d'un sédiment par rapport à la médiane, il informe sur l'homogénéité et l'évolution du sédiment (Augris *et al.*, 1984). Il est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$Sk = \frac{D75 * D25}{D50^2}$$

- Si $Sk > 1$, le tri est maximum dans la fraction grossière (Prédominance des grains de diamètre supérieur à la médiane).
- Si $Sk = 1$, le tri est régulier, désigne une symétrie de la courbe par rapport à la médiane, la fraction fine est aussi bien représentée que la fraction grossière.
- Si $Sk < 1$, la courbe est dissymétrique avec un décalage et un tri maximum du côté de la fraction fine (Prédominance des grains de diamètre inférieur à la médiane).

Le calcul de l'indice d'asymétrie définit pour la plupart des échantillons des valeurs voisines du 1 (figure II.11). Les sédiments présentent un même classement aussi bien du côté fin que du côté grossier donc une répartition symétrique qui correspond à un bon classement (selon Folk, 1966).

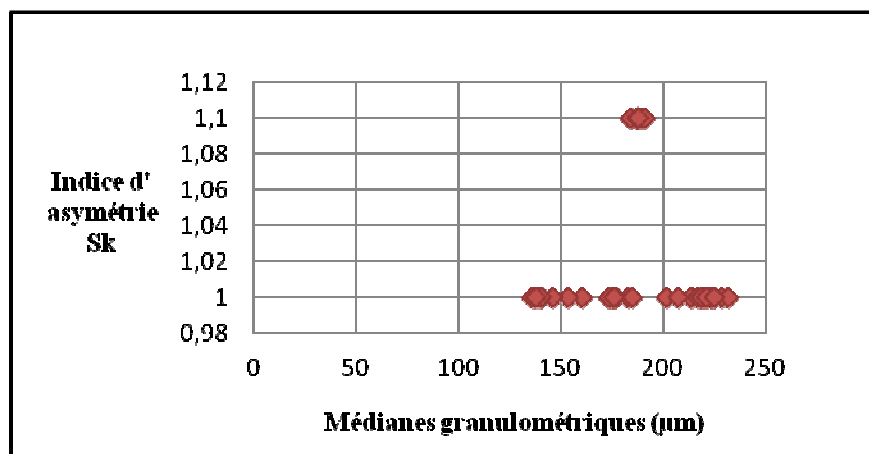


Figure II.11 : Résultats de l'indice d'asymétrie Sk dans la Plage de Palm Beach-Azur.

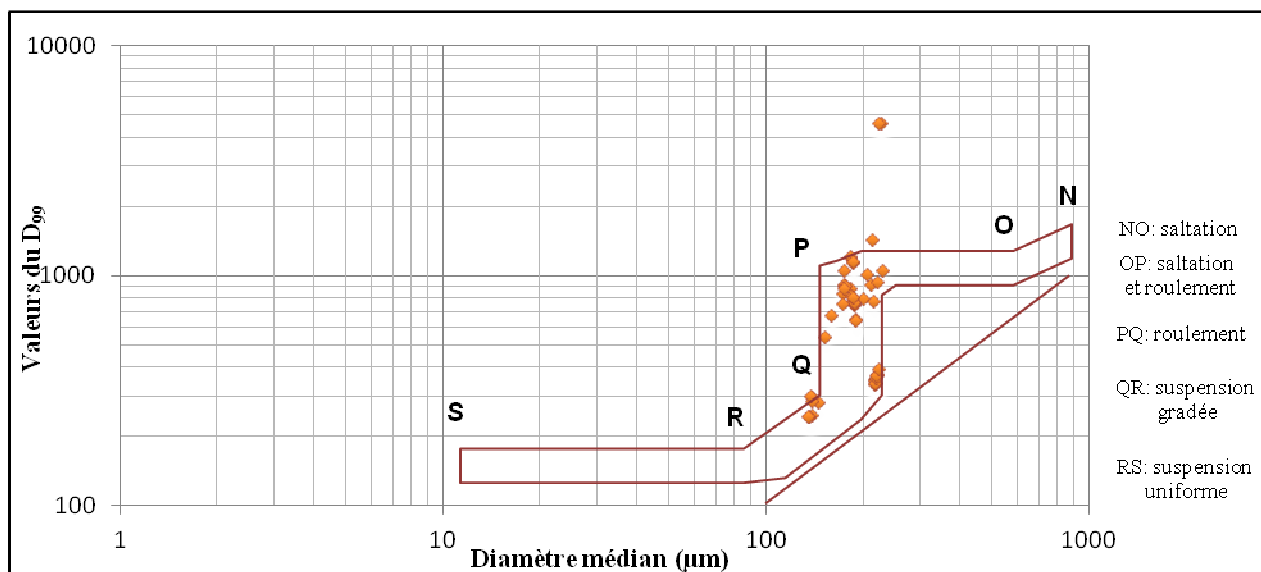
II.3.2.2.7. Diagramme de PASSEGA

Afin de définir le mode de mise en place du sédiment, R. Passega (1967) a proposé d'extraire deux paramètres des courbes granulométriques : le centile supérieur (D_{99}) et la médiane (D_{50}). Les valeurs de ceux-ci sont données dans le *tableau 3, Annexe I*.

Le D_{50} est porté en abscisse et le D_{99} en ordonnée sur un diagramme logarithmique de telle manière qu'un échantillon est figuré par un point. 20 à 30 points correspondant à la gamme des sédiments mis en place

par un agent de transport, forment un nuage ou un modèle D_{50} - D_{99} d'un dépôt et suffisent à caractériser son 'image granulométrique' (Bravard, 1983).

Passega a défini pour chaque segment du diagramme un type de transport comme détaillé ci-dessous. D'après la *figure II.12*, les prélèvements occupent les branches PQ et QR.



Les sédiments occupant la branche QR correspondent à un transport en suspension gradée. Ce sont des dépôts qui se déposent quand la charge dépasse la capacité du transport. Le dépôt se fait dans des zones relativement calmes permettant la décantation des particules fines.

Quant aux sédiments de la branche PQ, ils sont transportés par roulement à la surface de la suspension gradée. Ce type se fait dans des zones de haute énergie où les sédiments sont en perpétuel remaniement.

II.3.2.3. Conclusion

La répartition spatiale des sédiments révèle une distribution conforme au schéma classique de la répartition des sédiments en mer à savoir une diminution graduelle de la taille des particules de la côte vers le large.

L'étude de la fraction sableuse a conduit à définir sa répartition et ses différentes caractéristiques sédimentologiques avec une diminution du D_{50} et du D_{90} de la côte vers le large.

La répartition de la médiane granulométrique indique la dominance des sables fins (100 et 200 μm). Cette répartition est confirmée par l'analyse modale montrant la prédominance du stock sédimentaire appartenant au mode M1.

Les teneurs en pélites sont comprises entre 0 et 10% depuis la côte jusqu'à l'isobathe de -6m, ceci s'explique par l'hydrodynamisme de haute énergie. Au-delà, ces teneurs augmentent pour atteindre 25% à 20m de profondeur.

Selon la classification de Folk, 1966, les sédiments sont bien classés, le tri est régulier par rapport à la médiane ($Sk = 1$) et les matériaux sédimentaires présentent un mode de dépôt combiné : par suspension et par roulement selon le diagramme de Passega.

Chapitre III :

Etude des vents et des houles

Chapitre III. Etude des vents et des houles

III.1. Etude des vents du large

Le vent est à l'origine des houles formées au large, mais il peut aussi créer des vagues dans la zone littorale. Il agit directement dans la formation de la mer du vent qui peut modifier la houle près des côtes (*Desmazes, 2001*).

III.1.1. Point Simar issu du projet européen Hipocas

Comme évoqué précédemment, les données de vent du large sont issues de la base de données **Simar-44**. Les données s'établissent du 01 janvier 1958 au 31 décembre 2001 avec des résultats toutes les 3 heures. Les paramètres fournis sont les suivants (*SGH, 2010*):

- Niveau de la mer.
- Vitesse moyenne du vent.
- Direction moyenne de provenance du vent.

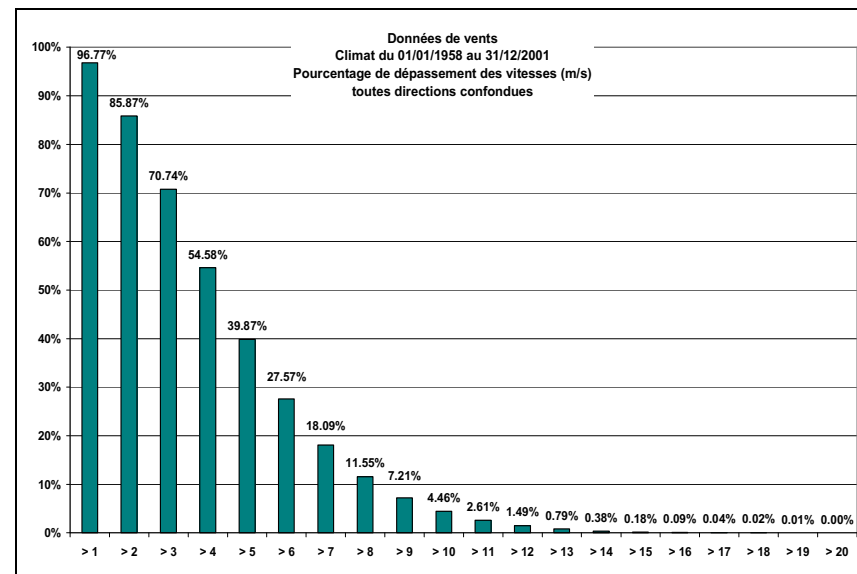
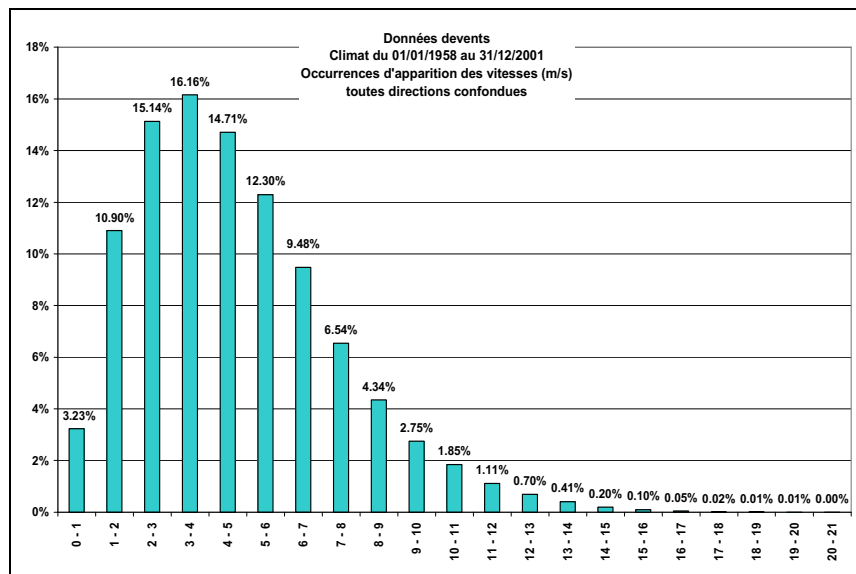
Le point **Simar-44** acquis dans le cadre de cette étude est le suivant : **N°2070015**. Il est situé au large de Zéralda et de Sidi Fredj sur les coordonnées $X=2,75^\circ$ et $Y=36,875^\circ$.



Figure III.1 : Localisation du Point Simar N°2070015 au large d'Alger.

III.1.2. Régime moyen des vents

La distribution des vitesses de vent fournies par Sogreah est présentée graphiquement sur la *figure III.2*.



**Figure III.2 : Distribution statistique des vents moyens au large d'Alger (m/s).
Données du Point Simar-2070015 sur la période 1958-2001 (SGH, 2010)**

L'analyse des deux graphiques de distribution des vitesses montre que :

- La vitesse (V) de vent la plus fréquente est comprise entre 3 et 4 m/s avec 16,2 % des cas et viennent ensuite :
 - $2 \text{ m/s} < V < 3 \text{ m/s} \rightarrow 15,1 \%$.
 - $4 \text{ m/s} < V < 5 \text{ m/s} \rightarrow 14,7 \%$.
 - $5 \text{ m/s} < V < 6 \text{ m/s} \rightarrow 12,3 \%$.
 - $1 \text{ m/s} < V < 2 \text{ m/s} \rightarrow 10,9 \%$.
- 82 % des vents devant le site d'étude sont inférieurs à $V=7 \text{ m/s}$.
- 11,6 % des vents sont supérieurs à $V=8 \text{ m/s}$ contre 4,5 % pour $V>10 \text{ m/s}$, 1,5 % pour $V>12,0 \text{ m/s}$ et seulement 0,4 % pour $V>14,0 \text{ m/s}$.
- Sur la période d'enregistrement des données 1958-2001, les plus forts vents relevés sont de l'ordre de $V=20 \text{ m/s}$.

Sur les roses de vents moyens (*figure III.3*), on remarque que les vents proviennent essentiellement de deux secteurs directionnels :

- Secteur ENE de $N30^\circ$ à $N100^\circ$ (35 % des vents).
- Secteur SW à NW de $N220^\circ$ à $N300^\circ$ (35 % des vents).

Les 30 % restants se répartissent équitablement entre le secteur $N100^\circ$ à $N220^\circ$ et le secteur $N300^\circ$ à $N30^\circ$. Nous verrons par la suite avec l'étude des houles du large que les vents et les houles proviennent préférentiellement des mêmes secteurs SW à NW et NE.

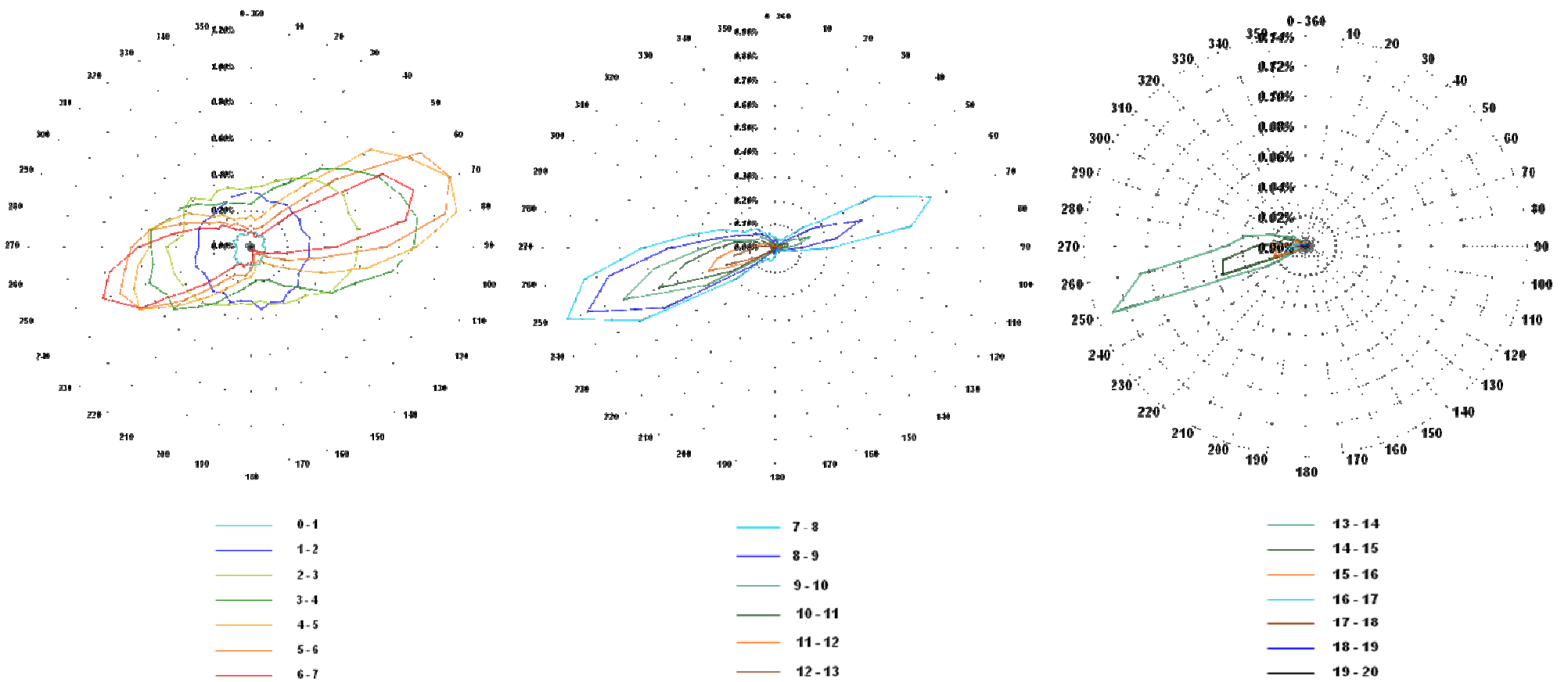


Figure III.3 : Roses des vents moyens des données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001.
 Occurrences d'apparition au large d'Alger par secteur et par classe de vitesse (m/s)
 (SGH, 2010)

III.1.3. Régime extrême des vents

L'analyse des tempêtes de la série temporelle de 1958 à 2001 permet de définir la vitesse des vents (V) pour différentes périodes de retour. L'analyse des vents extrêmes a été réalisée par secteurs différenciés, secteur WNW N220°-N300° et secteur ENE N30°-N110°, mais également pour tous les secteurs confondus.

III.1.3.1. Régime extrême pour tout secteur confondu

L'état de tempête, tout secteur confondu, a été défini pour le seuil de $V=12$ m/s. Sur la période d'enregistrement, 532 tempêtes ont été recensées, soit 12 tempêtes par an en moyenne (*figure 1, Annexe II*). La *figure 2 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les vitesses des vents extrêmes obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.1 : Vents extrêmes (m/s) du point Simar au large d'Alger par période de retour tout secteur confondu, (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence	Vitesse (m/s)
1	0,0808	16,25
5	0,0162	18,78
10	0,0081	19,84
20	0,0040	20,90
50	0,0016	22,28
100	0,0008	23,32

III.1.3.2. Régime extrême pour le secteur WNW – N220° à N300°

L'état de tempête, pour le secteur WNW, a été défini pour le seuil de $V=12$ m/s. Sur la période d'enregistrement, 365 tempêtes ont été recensées, soit 9 tempêtes par an en moyenne (*figure 3, Annexe II*). La *figure 4 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau III.2, soit les vitesses des vents extrêmes du secteur WNW – N220° à N300° obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.2 : Vents extrêmes (m/s) du point Simar au large d'Alger par période de retour (Secteur WNW – N220° à N300°). (SGH, 2010)

T (ans)	Fréquence	Vitesse (m/s)
1	0,1178	16,07
5	0,0236	18,56
10	0,0118	19,57
20	0,0059	20,55
50	0,0024	21,83
100	0,0012	22,77

III.1.3.3. Régime extrême pour le secteur ENE – N30° à N110°

L'état de tempête, pour le secteur ENE, a été défini pour le seuil de $V=8$ m/s. Sur la période d'enregistrement, 681 tempêtes ont été recensées, soit 16 tempêtes par an en moyenne (*figure 5, Annexe II*). La *figure 6 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau III.3, soit les vitesses des vents extrêmes du secteur ENE – N30° à N110° obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III. 3 : Vents extrêmes (m/s) du point Simar au large d'Alger par période de retour (Secteur ENE – N30° à N110°). (SGH, 2010)

T (ans)	Fréquence	Vitesse (m/s)
---------	-----------	---------------

1	0,0631	11,39
5	0,0126	13,77
10	0,0063	14,83
20	0,0032	15,92
50	0,0013	17,39
100	0,0006	18,53

III.1.3.4. Analyse

Le tableau suivant présente les valeurs extrêmes des vents pour les périodes de retour de 1, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour les secteurs directionnels considérés :

Tableau III.4 : Vents extrêmes (m/s) par direction et par période de retour au point Simar au large d'Alger.

Vitesse du vent par période de retour :	Direction		
	Tous secteurs	N220° à N300°	N30° à N110 °
Annuelle	16,25 m/s	16,07 m/s	11,39 m/s
Quinquennale	18,78 m/s	18,56 m/s	13,77 m/s
Décennale	19,84 m/s	19,57 m/s	14,83 m/s
Vingtennale	20,90 m/s	20,55 m/s	15,92 m/s
Cinquantennale	22,28 m/s	21,83 m/s	17,39 m/s
Centennale	23,32 m/s	22,77 m/s	18,53 m/s

D'après les valeurs présentées ci-dessus, on constate que les vents extrêmes les plus forts proviennent du secteur Sud-Ouest à Nord-Ouest. Ainsi, les vents provenant du secteur Est à Nord-Est, bien que fréquents, sont plus faibles en intensité que les vents d'Ouest.

Les vents provenant du secteur compris entre N220° et N300° présentent globalement le même régime extrême que les vents provenant de tous secteurs confondus.

Les vents du secteur Sud-Ouest à Nord-Ouest sont les vents les plus forts au large du site d'étude avec :

- un vent annuel de l'ordre de 16 m/s.
- un vent décennal de l'ordre de 20 m/s.
- un vent cinquantennal de l'ordre de 22 m/s.
- un vent centennal de l'ordre de 23 à 24 m/s.

Par contre, les vents provenant du secteur Est à Nord-Est du site d'étude, N30° à N100°, sont plus faibles avec :

- un vent annuel de l'ordre de 11 à 12 m/s.
- un vent décennal de l'ordre de 15 m/s.
- un vent cinquantennal de l'ordre de 17 à 18 m/s.
- un vent centennal de l'ordre de 18 à 19 m/s.

Ainsi, les tempêtes ne sont pas très fortes ni fréquentes dans cette région car les vents moyennés sur 10 minutes dépassent rarement 25 m/s.

Ces données du large sont cohérentes avec les données des études antérieures, on retiendra :

- Des directions de vents, en corrélation avec celles des houles, provenant essentiellement de deux secteurs SW à NW (N220° à N300° : 35 % des vents) et E à NE (N30° à N100° : 35 % des vents). Les 30 % restants se répartissent équitablement entre le secteur N100°-N220° et le secteur N300° à N30°.
- Des vents relativement faibles : 82 % des vents devant le site d'étude sont inférieurs à 7 m/s et moins de 1 % sont supérieurs à 13 m/s et des vents extrêmes maximum au large de :
 - V=16 à 17 m/s pour un vent annuel.
 - V=19 à 20 m/s pour un vent décennal.
 - V=23 à 24 m/s pour un vent centennal.
- Sur la période des données 1958-2001, les plus forts vents relevés sont de l'ordre de 21 m/s.

III.2. Etude des houles du large

III.2.1. Prévision de la houle

Le mouvement de l'air au-dessus de la surface de l'eau provoque par frottement la formation d'ondes dont la vitesse de propagation est plus faible que celle du vent et dont l'amplitude est faible (*Dennis, 2001*).

Du fait du caractère irrégulier du vent, les rides se propagent dans toutes les directions ; lorsque le vent devient plus violent, une direction privilégiée apparaît. Les rides plus nombreuses et plus escarpées se composent en des ondulations plus importantes donnant plus de prise au vent et s'accroissant de plus en plus. En définitive, les rides dues au vent s'organisent en ondulations rectilignes de longueur limitée (*Bonnefille, 1994*).

Quand le vent cesse, les vagues diminuent progressivement par viscosité, mais leur inertie est cependant suffisante pour les faire subsister pendant des milliers de kilomètres. Elles s'éteignent d'autant mieux qu'elles sont plus courtes ; de ce fait, l'agitation s'organise autour des ondulations les plus longues, les ondulations de période voisine s'associent pour former des trains d'onde réguliers.

La houle est d'autant plus longue et plus haute qu'il existe une plus grande étendue de mer libre dans la direction d'où elle provient ; cette distance D s'appelle le Fetch. La hauteur maximale de la houle dépend aussi de la vitesse du vent, du temps pendant lequel il souffle, et de la distance sur laquelle il agit. Diverses formules empiriques ont été proposées et des graphiques établis, donnant la hauteur et la période en fonction de la vitesse du vent et de sa durée d'action, puis de l'amortissement de cette hauteur en fonction de la distance parcourue par la houle à partir de la zone de génération (*Benoit et al., 2009*).

III.2.1.1. Utilisation de l'abaque de Bretschneider

L'abaque de la *figure III.10* donne les valeurs de la hauteur significative H et de la période T de la houle en fonction du fetch D , de la durée et de la vitesse W du vent.

On appelle hauteur significative la valeur moyenne des hauteurs des grandes vagues d'un train de houle irrégulière. Plus précisément, il s'agit de la valeur moyenne du 1/3 supérieur des vagues (par exemple, les 10 grandes vagues d'un train de 30 vagues) (*Bonnefille, 1994*).

Connaissant la vitesse du vent, on suit l'ordonnée horizontale correspondante jusqu'à ce que l'on rencontre soit la ligne de durée donnée, soit la verticale correspondant au fetch donné, H et T sont lus par interpolation. Rencontrer d'abord la ligne de durée signifie que le vent souffle seulement sur une partie de l'océan de grande étendue, c'est-à-dire loin des côtes. Dans l'autre cas il s'agit d'un vent soufflant sur une partie d'océan proche des côtes, les vagues croissent à partir de la côte et leurs caractéristiques ne dépendent que du fetch et de la vitesse du vent.

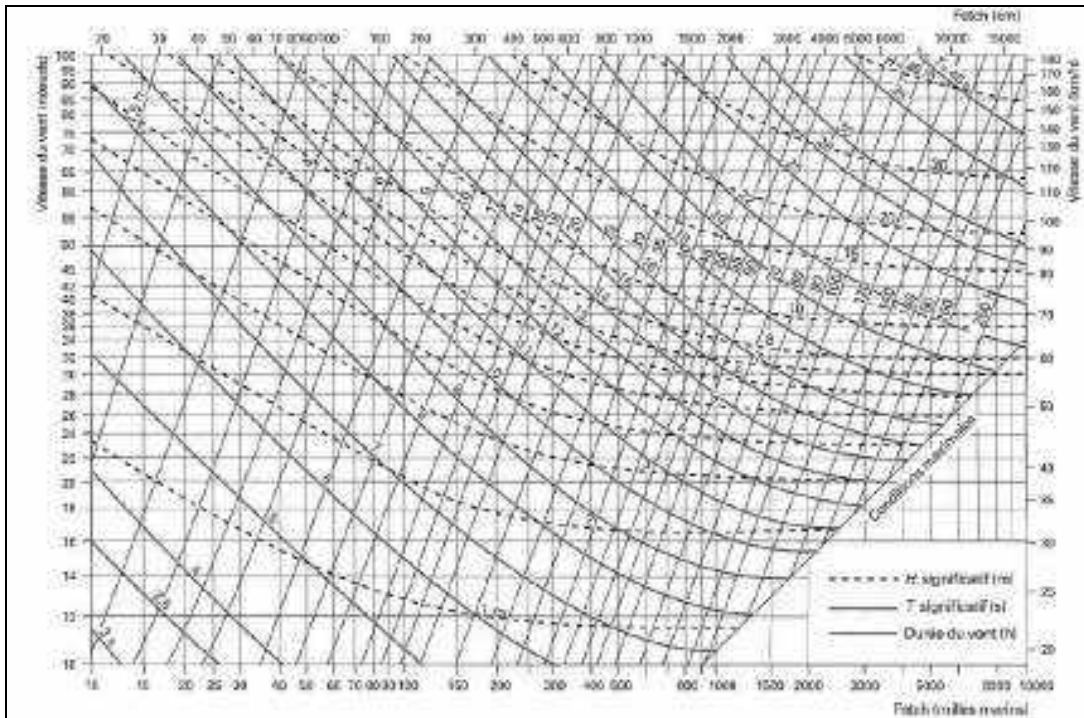


Figure III.4 : Abaque de Bretschneider. Hauteurs et périodes significatives de la houle en fonction de la longueur du fetch, de la durée et de la vitesse du vent (Bonnefille, 1994).

III.2.1.2. Utilisation des spectres d'énergie

Les mesures des spectres d'énergie de la houle à la surface des océans par les méthodes satellitaires ont conduit à mieux connaître les relations entre la houle du large et les conditions météorologiques océaniques. Il est donc devenu possible de simuler les tempêtes du large à partir des séquences d'événements météorologiques constatés, en utilisant des programmes de calcul préalablement sérieusement étalonnés. Le transfert de la houle du large à la côte s'effectue ensuite en utilisant les lois de la réfraction.

III.2.1.3. Théorie statistique

Les fondements de la théorie statistique de la houle consistent à supposer l'agitation de la mer, en dehors de la zone de génération de la houle, comme résultant de la superposition d'ondes de hauteurs, périodes, phases et directions aléatoires. On en déduit les résultats pratiques suivants.

III.2.1.3.1. Hauteur de houle significative

La densité de probabilité du niveau de la mer à la cote z est exprimée par (Bonnefille, 1994):

$$P(z) = (1 / 2 \pi m_0) \cdot \exp(-z^2 / 2m_0)$$

Le moment d'ordre zéro m_0 étant relié à l'énergie totale E_s de la houle aléatoire considérée, par unité de surface de la mer, par :

$$m_0 = E_s / \rho g$$

La densité de probabilité des points singuliers de la surface de la mer, par exemple les cotes des crêtes et des creux, s'exprime alors en fonction de m_0 et du paramètre ε , appelé largeur du spectre d'énergie. Ce paramètre traduit l'amplitude des périodes de la houle d'un train de vagues :

$\varepsilon = 0$ si la houle a une seule période (spectre étroit).

$\varepsilon \approx 1$ si beaucoup de périodes sont présentes (spectre large).

Il s'exprime simplement en fonction du nombre N_{max} de maximums et du nombre N_0 de passages par le niveau moyen d'oscillation:

$$\varepsilon^2 = 1 - (N_0 / 2 N_{max})^2$$

Lorsque $\varepsilon = 0$ (et pratiquement tant que $\varepsilon < 0,2$), la densité de probabilité des hauteurs H est :

$$P(H) = (H / 4m_0) \cdot \exp(-H^2/8 m_0)$$

Ce qui permet d'exprimer quelques hauteurs caractéristiques d'un train de houle, de N vagues ($N > 100$) :

- Hauteur moyenne : $H_m = (2 \pi m_0)^{1/2}$
- Hauteur significative : $H_s = 1,6 H_m$
- Hauteur 1/10 : $H_{1/10} = 2,0 H_m$
- Hauteur maximale : $H_{max} = 0,80 [(2 \ln N)^{1/2} + 0,577 / (2 \ln N)^{1/2}] H_m$

Cette dernière relation permet d'exprimer H_m (moyenne des hauteurs d'un enregistrement) à partir de la mesure directe de H_{max} et du nombre N de vagues bien formées sur l'enregistrement (**figure III.5**). La hauteur significative H_s représente la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues de l'enregistrement considéré, par exemple, la valeur moyenne des hauteurs des 40 plus grandes vagues d'un enregistrement de 120 vagues. La hauteur $H_{1/10}$ est la valeur moyenne du décile supérieur des hauteurs (**Bonnefille, 1994**).

L'intérêt de la hauteur significative est d'être une mesure des grandes vagues d'une séquence de houle, significative du point de vue de l'attaque de la houle sur les structures souples, telles que les digues à talus, car elle conduit sensiblement aux mêmes dégâts qu'une houle de même hauteur H_s constante et de période constante. La hauteur $H_{1/10}$ peut être utilisée dans le même but, avec un pessimisme accru, puisqu'elle est de 25 % supérieure à H_s , cela conduit à doubler le poids des éléments des carapaces des ouvrages de défense à talus (**Wilson, 1965**).

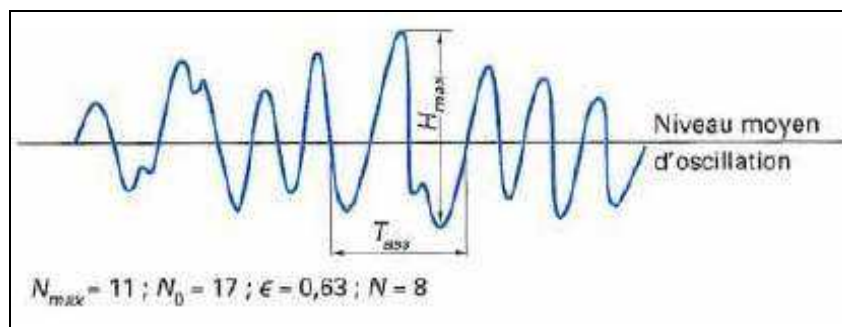


Figure III.5 : Exemple d'un schéma d'enregistrement de houle (*in Bonnefille, 1994*).

III.2.1.3.2. Détermination des hauteurs de houle extrêmes

Chaque enregistrement de houle étant caractérisé par une valeur d'une hauteur (généralement H_{max} ou H_s), la suite de ces valeurs constitue une série chronologique de houle. On choisit une valeur H_i dépassant un seuil H_0 donné par tempête, déterminée de façon que chaque tempête puisse être considérée comme un événement indépendant des tempêtes qui l'encadrent, pour raison de validité des raisonnements statistiques. Chaque valeur H_i (**figure III.6**) est la valeur maximale des hauteurs H_{max} ou H_s de chaque tempête indépendante.

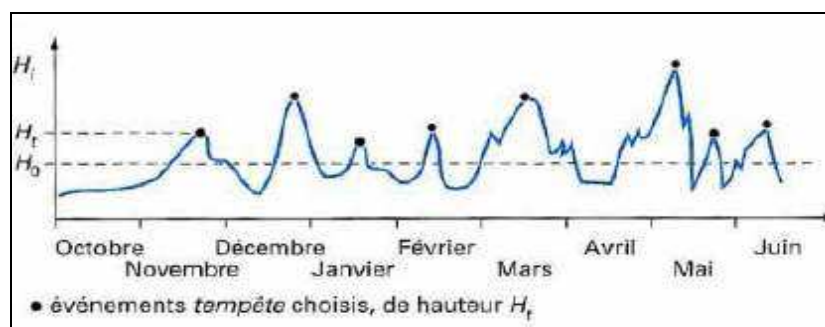


Figure III.6 : Exemple de série chronologique de houle H (*Bonnefille, 1994*).

La série de hauteur $H_i > H_0$ peut alors être utilisée pour approcher la fonction $F(H_i)$ de probabilité qu'une hauteur maximale de tempête H_i , supérieure à H_0 , ne dépasse pas une valeur choisie à l'avance H_T . Les formes les plus usuelles de $F(H_i)$ sont les suivantes (**Wilson, 1965**)

- Loi exponentielle : $F(H_i) = 1 - \exp[-p(H_i - H_0)]$
- Loi de Pareto : $F(H_i) = 1 - \exp[-p(\log H_i - \log H_0)]$
- Loi en carré : $F(H_i) = 1 - \exp[-(p H_i^2 - H_0^2)]$
- Loi de Weibull : $F(H_i) = 1 - \exp[-p(H_i - H_0)^p]$

La loi $F(H_i)$ et le paramètre p sont choisis et définis par ajustement, graphiquement ou en utilisant un code de calcul, pour l'ensemble des seuils H_0 . L'utilisation d'un code de calcul permet en outre la détermination facile de l'intervalle de confiance de l'ajustement statistique. La **figure III.7** donne un exemple d'ajustement à partir des valeurs H_i déduites d'enregistrements disponibles s'étendant sur 6 ans (la hauteur maximale H_i correspond alors à la fréquence 1/6), il est facile de déduire de la loi ajustée les valeurs des hauteurs décennale, centennale, etc. (**Wilson, 1955**).

Dans le cas d'un ajustement graphique, on utilise la loi exponentielle, tracée comme droite des moindres carrés des points de coordonnées H_i et le logarithme de leur fréquence annuelle, en utilisant un papier graphique semi-logarithmique (**Bonnefille, 1994**).

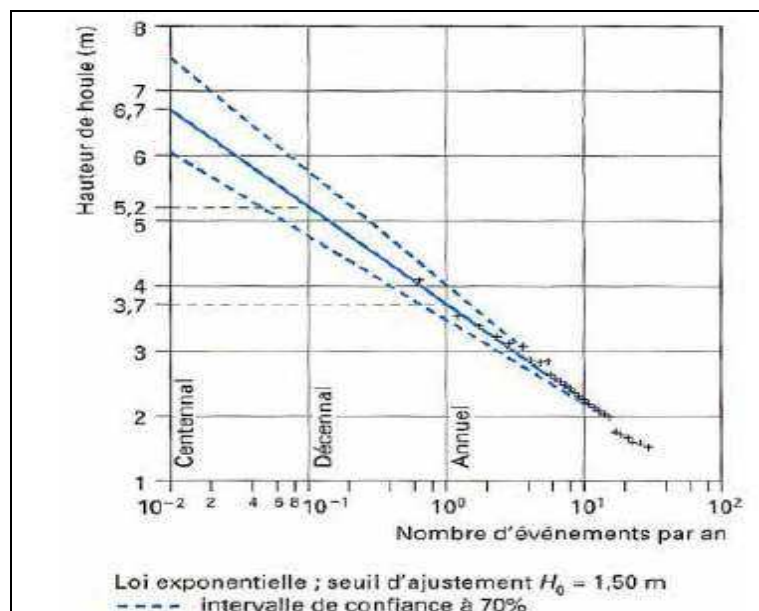


Figure III.7 : Exemple de l'estimation des houles annuelle, décennale et centennale (**Bonnefille, 1994**).

III.2.1.3.3. Durée de retour de houle

L'ajustement décrit ci-avant permet d'estimer la fréquence d'apparition d'événements correspondant à une hauteur de houle H_i , que l'on étudie (H_{max} , H_s ou $H_{1/10}$, etc.) maximale par tempête. Compte tenu des hypothèses faites :

- L'indépendance des réalisations successives de H_i pendant l'unité de temps (l'année).
- L'invariance, en fonction du temps, de la probabilité q que H_i soit supérieur à H_T choisi à l'avance.

La durée de retour T de l'événement H_T est simplement liée à $q(H_T)$ (**Bonnefille, 1994**) par :

$$T = 1/q(H_T)$$

En effet, la durée de retour T d'un événement est définie comme le nombre moyen d'années (l'année est une unité de temps significative du point de vue des événements houle) séparant deux occurrences successives de l'événement supérieur à H_T . Soit n le nombre d'unités de temps au bout duquel apparaît un nouvel événement $H \geq H_T$, la probabilité d'occurrence de la durée, n , est :

$$p(n) = q(1 - q)^{n-1}$$

La durée de retour T est, par définition, la valeur moyenne des durées n (**Bonnefille, 1994**) :

$$T = \sum_1^{\infty} n p^n = \sum_1^{\infty} n q (1-q)^{n-1} = \frac{1}{q}$$

III.2.1.4. Les spectres de houle

L'approche spectrale de la prévision consiste donc à intégrer dans le temps l'équation d'évolution des densités spectro-angulaires, la fréquence et la direction d'où viennent les houles.

On obtient une estimation du spectre de densité de l'énergie de la houle à partir d'un enregistrement des fluctuations de l'élévation de la surface de la mer par des transformées de Fourier en considérant la variance du déplacement instantané vertical ξ au dessus du niveau moyen de la mer (**Dennis, 2001**). On peut alors tracer un spectre d'une amplitude carrée de l'onde (m^2) par rapport à f (s^{-1}). L'énergie contenue dans une onde sinusoïdale est proportionnelle à a^2 multiplié par un facteur de $1/2$ (**Elmore and Heald, 1969**). La moyenne de l'énergie totale (E) de l'onde progressive par unité de surface en $J m^{-2}$ est :

$$E = 1/2 \rho g a^2$$

Où ρ est la densité en $Kg.m^{-3}$, $a = 1/2H$,

C'est donc une "équation de transport" qui décrit le transport de chaque composante ou la vitesse à laquelle l'énergie des houles est transportée, il s'agit d'un vecteur, orienté dans la direction de propagation.

Pour tracer le spectre de l'énergie des houles $S(f)$, $1/2 a^2$ est divisé par la surface comprise entre de la ligne des énergies et les fréquences. L'aire sous la courbe spectrale est l'énergie (S), on note (**Wilson, 1965**) :

$$E(f) = \rho g S(f)$$

Comme la vitesse du vent augmente, le spectre va se développer des basses énergies (hautes fréquences) aux fortes énergies (basses fréquences). Pour une vitesse, un Fetch et une durée donnés, il y'a un spectre unique. Il existe plusieurs modèles unidimensionnels des énergies spectrales en eau profonde. On cite ci-dessous deux types de spectres (**Wilson, 1965**) :

- Le spectre de Pierson-Moskowitz (PM, 1964) de l'énergie des vagues, $S_{PM}(f)$ en m^2s , a été développé à base des données de vagues et de vents (entre 10 et 20 m/s) dans l'océan Nord Atlantique :

$$S_{PM}(f) = [(\alpha_{PM} g^2) / (2\pi)^4 f^5] \exp(-1,25(f_P / f)^4)$$

Où $\alpha_{PM}=0,0081$, f (Hz), $f_P = 1/0,729W$, W est la vitesse moyenne du vent à une élévation de 19,5m.

- Le spectre, $S_J(f)$, de JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), a utilisé des mesures de vagues et de vents pour reproduire le spectre limité d'un Fetch en eau profonde. Autrement, le $S_J(f)$ n'est qu'une modification du $S_{PM}(f)$:

$$S_J(f) = S_{PM}(f) \gamma^a = [(\alpha_J \cdot g^2) / (2\pi)^4 f^5] \exp(-1,25(f_P/f)^4 \gamma^a)$$

Où γ est le facteur d'élancement du pic variant entre 1 et 7 avec une valeur moyenne de 3,3. Pour un Fetch limité:

$$\alpha_J = 0,0662(gF/W^2)^{-0,2}, \quad f_P = 2,84g/W \cdot [gF/W^2]^{-0,3}$$

Où F est la longueur du domaine du Fetch en m. Pour des durées limitées:

$$\alpha_J = 0,203(gt/W)^{-0,2857}, \quad f_P = 16,8g/W \cdot [gt/W^2]^{-0,4286}$$

Où t est en secondes. On introduit le facteur A :

$$A = \exp[-((f-f_P)^2 / (2\sigma^2 \cdot f_P^2))]]$$

Où $\sigma = 0,07$ lorsque $f \leq f_P$, et $\sigma = 0,09$ lorsque $f > f_P$.

Les mesures du Jonswap sont limitées à un Fetch maximal de 160km et un vent de 20m/s maximum. La hauteur des houles est plus difficile à modéliser (**Wilson, 1955**). Elle est principalement déterminée par la force du vent, le temps pendant lequel il souffle et la longueur du Fetch. Les hauteurs houle H suivent la loi de probabilité de Rayleigh dont la fonction de distribution est la suivante (**Dennis, 2001**) :

$$p(H) = H/4 \sigma_\xi^2 \exp(-H^2/8 \sigma_\xi^2) = 2H/H_{rms}^2 \exp[-(H^2/H_{rms}^2)]$$

Où $H_{rms}^2 = 1/M \sum_{j=1}^M H_j^2$ est la hauteur quadratique moyenne de la houle, M est le nombre d'ondes considérées (j= 1,..M) et σ_ζ^2 est la variance du déplacement ζ vertical de la surface d'eau.

Il existe plusieurs modèles numériques dotés d'une base de données contenant les paramètres physiques nécessaires à la modélisation des spectres. On montre ci-après un spectre Jonswap obtenu avec des données d'entrée mentionnées sur le graphe, accompagnée d'un spectre Pierson–Moskowitz (MP) donné pour comparaison.

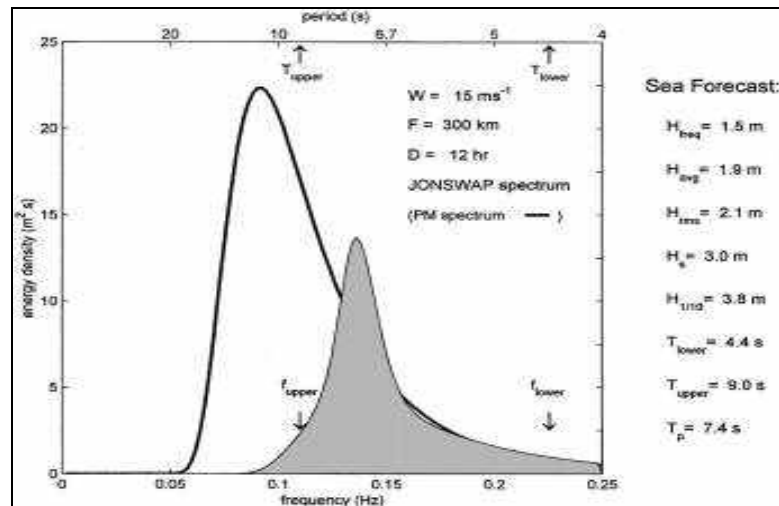


Figure III.8 : Spectre de Jonswap (Dennis et al., 2001).

III.2.2. Données Simar issu du projet européen Hipocas

Comme évoqué précédemment, les données de houle du large sont issues de la base de données du point **Simar-44**. Les paramètres fournis sont les suivants :

- Niveau de la mer, Surcote.
- Houle :
 - Hauteur significative spectrale H_s .
 - Période de pic spectral T_p .
 - Période moyenne spectrale.
 - Direction moyenne de provenance de la houle.
 - Hauteur, période moyenne et direction moyenne de la mer de vent.
 - Hauteur, période moyenne et direction moyenne de la houle.

Le point **Simar-44** acquis dans le cadre de cette étude permet d'avoir une bonne représentativité des états de mer pouvant atteindre le littoral. Sa localisation est suffisamment au large pour ne pas que les houles incidentes soient influencés par les caps rocheux.

III.2.3. Régime moyen des houles au large

L'analyse de la distribution des hauteurs fournies par Sogreah, **figures III.9**, montre que :

- Le secteur de houles le plus fréquent est H_m compris entre 0,5 et 1 m avec 47,7% des cas et viennent ensuite :
 - $1 \text{ m} < H_m < 1,5 \text{ m} = 26,9 \%$
 - $1,5 \text{ m} < H_m < 2 \text{ m} = 9,3 \%$
- 48 % des houles du large sont inférieures à $H_m = 1 \text{ m}$.
- 15,4% des houles sont supérieures à $H_m = 2 \text{ m}$ contre 5,2 % pour $H_m > 3 \text{ m}$ et seulement 1,2 % pour $H_m > 4 \text{ m}$.

- Sur la période d'enregistrement des données 1958-2001, les plus fortes houles sont de l'ordre de 8 à 9 m.

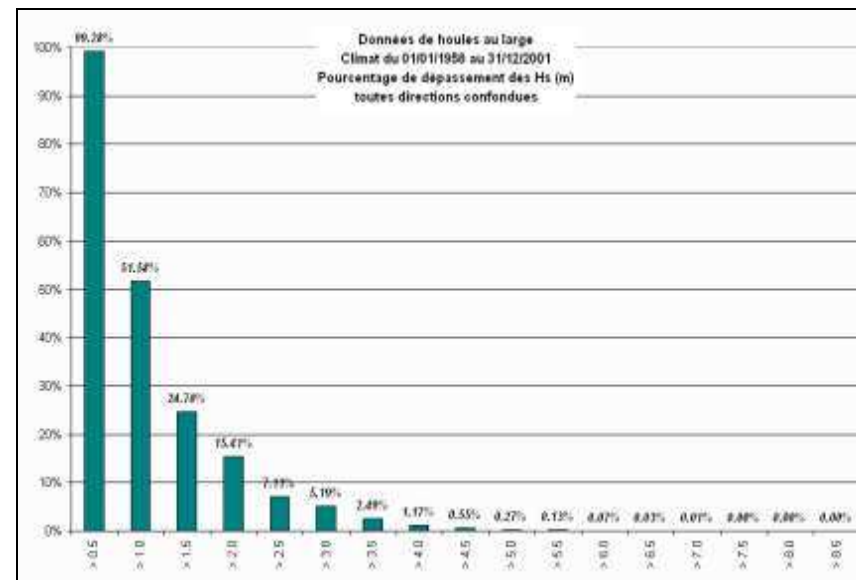
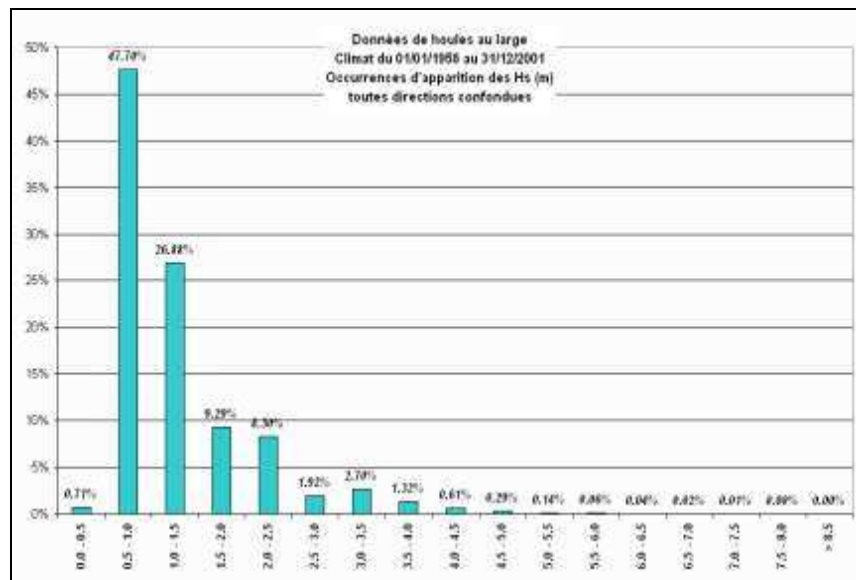


Figure III.9 : Distribution statistique des houles moyennes (H_m m/s) au large d'Alger.
Données du Point Simar-2070015 sur la période 1958-2001 (SGH, 2010)

L'analyse de la distribution des périodes fournies par Sogreah, **figure III.10**, montre que :

- La gamme des périodes de houle devant le site de Palm Beach s'étend de quelques secondes à 15s.
- Selon l'occurrence d'apparition des T_p (s), il y a un état de mer prépondérant au large de Zéralda : les mers de vent dont les périodes sont comprises entre 2 et 7s, représentent 82% du temps. Les houles longues du large dont les périodes sont comprises entre 10 et 15s, représentent seulement 3% des cas.
- Les périodes de houle les plus fréquentes sont :
 - 5-6 s : 22,1 %
 - 4-5 s : 20,9 %
 - 3-4 s : 18,4 %
 - 6-7 s : 18,1 %
 - 7-8 s : 6,7 %
- Sur la période d'enregistrement des données 1958-2001, les plus fortes périodes sont de l'ordre de 13 à 14s.

Les roses des houles (hauteur, période, direction) sont présentées sur les **figures III.11 et III.12**. On remarque que les houles du large proviennent du secteur N270° à N60°.

Les houles les plus faibles ($H_m < 1m$) proviennent essentiellement du secteur NE N20°-N60° et également, à moindre mesure, du secteur W N270°-N290°. A l'inverse, les houles les plus fortes sont majoritairement orientées Ouest N270°-N290°.

Globalement, on constate que les vents et les houles du large proviennent préférentiellement des mêmes secteurs d'étude SW à NW et NE présentés sur les **figures III.3**.

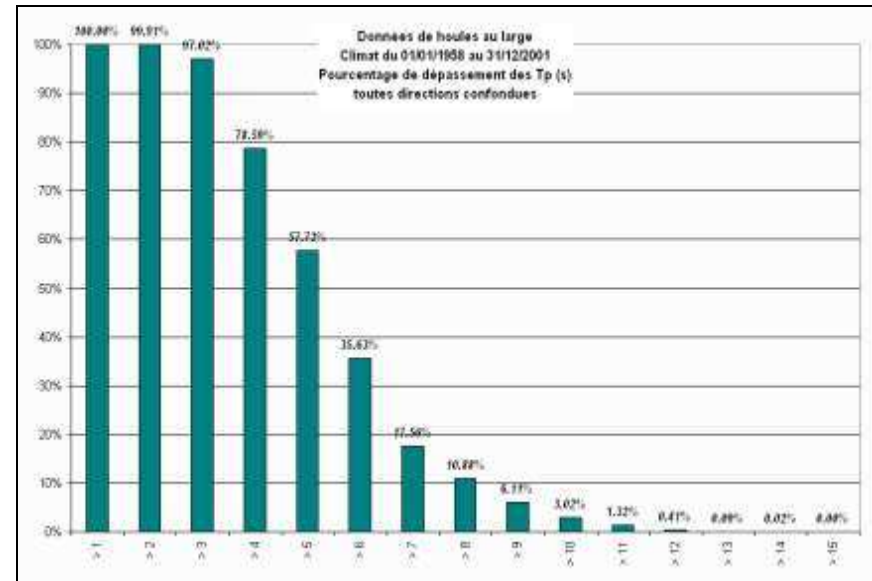
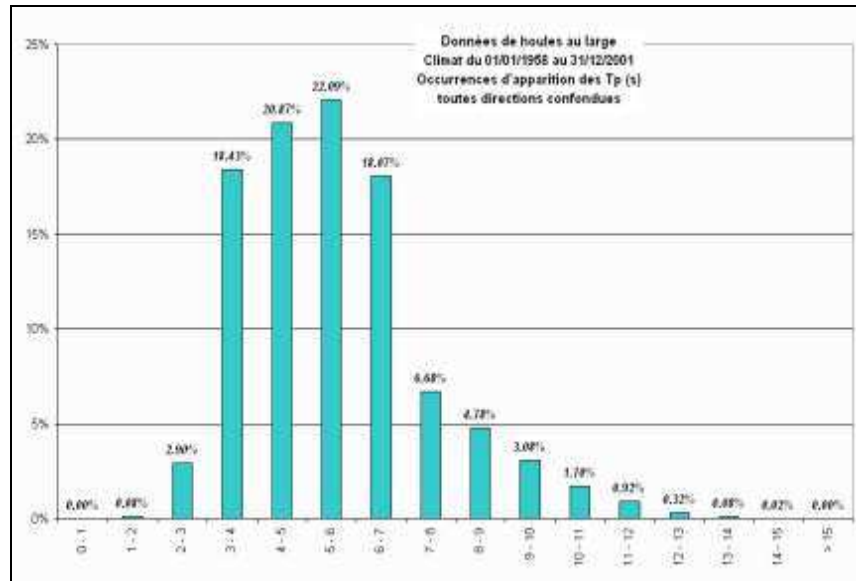


Figure III.10 : Distribution statistique des périodes Tp (s) des houles moyennes au large d'Alger.
Données du Point Simar-2070015 sur la période 1958-2001 (SGH, 2010)

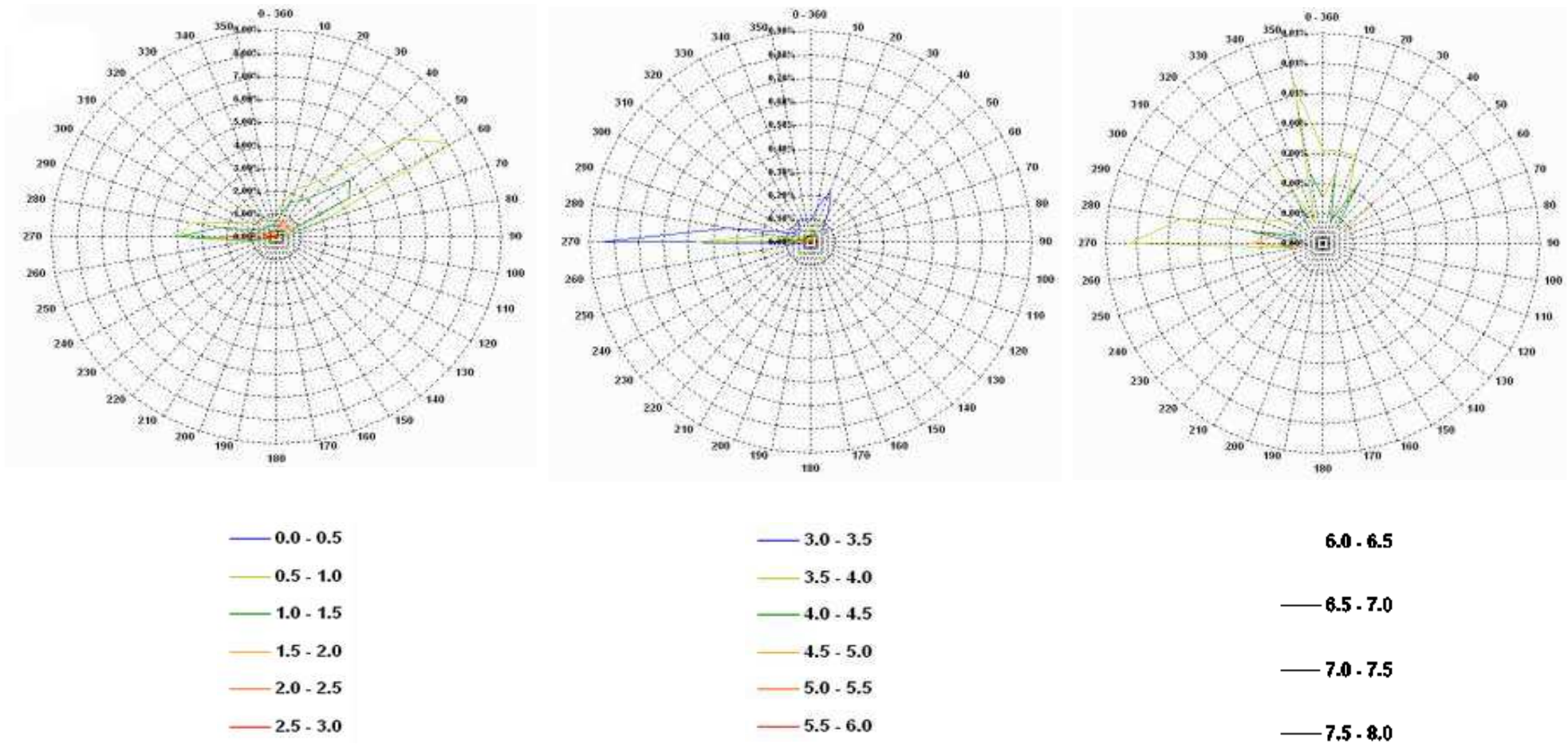


Figure III.11 : Roses des houles des données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001.
 Occurrences d'apparition au large d'Alger par secteur et par classe de H_m (m/s) moyennes.
 (SGH, 2010)

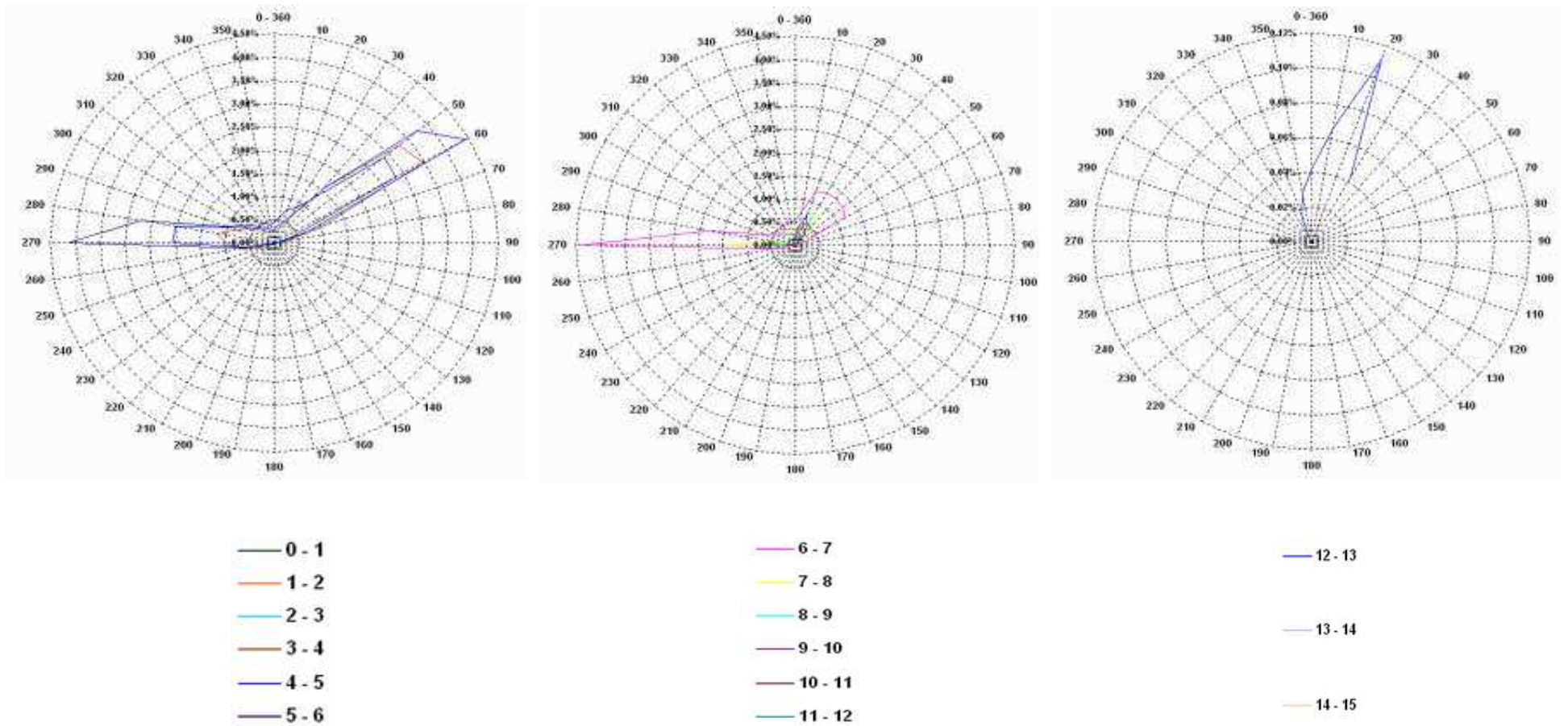


Figure III.12 : Roses des houles moyennes des données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001.
 Occurrences d'apparition au large d'Alger par secteur et par classe de période.
 (SGH, 2010)

III.2.4. Régime extrême des houles au large

L'analyse des houles extrêmes permet de définir la hauteur des houles pour différentes périodes de retour. Selon Sogreah, les calculs de la houle extrême au large ont été effectués par secteurs directionnels selon la méthode POT (Peak-Over-Threshold) qui consiste à utiliser l'ensemble des valeurs supérieures à un seuil choisi pour estimer les valeurs extrêmes.

Cette analyse des tempêtes (houles extrêmes) de la série temporelle de 1958 à 2001 a été réalisée par secteurs différenciés: secteur WNW N240°-N300°, secteur NNW N300°-N360°, secteur NNE N0°-N60°, mais également pour tous les secteurs confondus.

III.2.4.1. Régime extrême pour tout secteur confondu

L'état de tempête pour tous les secteurs confondus a été défini pour le seuil de Hs =4 m. Sur la période d'enregistrement, 382 tempêtes ont été recensées, soit 9 tempêtes par an en moyenne (*figure 7, Annexe II*). La *figure 8 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soit les hauteurs significatives Hs des houles extrêmes obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.5 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger, tous secteurs confondus (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence	Hs (m)
1	0,1126	5,70
5	0,0225	7,11
10	0,0113	7,73
20	0,0056	8,36
50	0,0023	9,20
100	0,0011	9,85

III.2.4.2. Régime extrême pour le secteur WNW – N240° à N300°

L'état de tempête pour le secteur WNW a été défini pour le seuil de Hs =4 m. Sur la période d'enregistrement, 235 tempêtes ont été recensées, soit 6 tempêtes par an en moyenne (*figure 9, Annexe II*). La *figure 10 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les hauteurs significatives Hs des houles extrêmes obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.6 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger. Secteur WNW – N240° à N300° (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence	Hs (m)
1	0.1830	5.15
5	0.0366	6.30
10	0.0183	6.80
20	0.0091	7.31
50	0.0037	7.97
100	0.0018	8.47

III.2.4.3. Régime extrême pour le secteur NNW – N300° à N360°

L'état de tempête pour le secteur NNW a été défini pour le seuil de Hs = 4m. Sur la période d'enregistrement, 108 tempêtes ont été recensées, soit 3 tempêtes par an en moyenne (*figure 11, Annexe II*). La *figure 12 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les hauteurs significatives Hs des houles extrêmes obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.7 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger. Secteur NNW – N300° à N360° (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence	Hs (m)
1	0,3981	4,81
5	0,0796	6,34
10	0,0398	7,01
20	0,0199	7,68
50	0,0080	8,57
100	0,0040	9,25

III.2.4.4. Régime extrême pour le secteur NNE – N0° à N60°

L'état de tempête pour le secteur NNE a été défini pour le seuil de Hs =4 m. Sur la période d'enregistrement, 118 tempêtes ont été recensées, soit 3 tempêtes par an en moyenne (*figure 13, Annexe II*). La *figure 14 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les hauteurs significatives Hs des houles extrêmes obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.8 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger. Secteur NNE – N0° à N60° (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence	Hs (m)
1	0,3644	4,76
5	0,0729	6,27
10	0,0364	6,95
20	0,0182	7,65
50	0,0073	8,60
100	0,0036	9,32

III.2.4.5. Analyse

Le tableau suivant présente les valeurs extrêmes des houles pour les périodes de retour de 1, 5, 10, 20, 50 et 100ans pour les secteurs directionnels considérés :

Tableau III.9 : Houles extrêmes au point Simar au large d'Alger par direction et par période de retour.

Hauteur de houle par période de retour :	Direction			
	Tous secteurs	N240° à N300°	N300° à N360°	N 0° à N60°
Annuelle	5,7 m	5,2 m	4,8 m	4,8 m
Quinquennale	7,1 m	6,3 m	6,3 m	6,3 m
Décennale	7,7 m	6,8 m	7,0 m	7,0 m
Vingtennale	8,4 m	7,3 m	7,7 m	7,7 m
Cinquantennale	9,2 m	8 m	8,6 m	8,6 m
Centennale	9,9 m	8,5 m	9,3 m	9,3 m

On remarque que les houles extrêmes les plus fortes (décennale, cinquantennale et centennale) proviennent des secteurs Nord à Nord-Est. Par contre, pour la houle annuelle, ce sont les houles en provenance du secteur Nord-Ouest qui sont les plus fortes.

Les houles extrêmes sont les suivantes :

- une houle annuelle de 4,8 à 5,7 m.
- une houle décennale de 6,8 à 7,7 m.
- une houle cinquantennale de 8 à 9,2 m.
- une houle centennale de 8,5 à 9,9 m.

Les données du large sont cohérentes avec les données issues des études antérieures (au large ou devant Palm Beach). Ainsi, on retiendra :

- Des directions de provenance essentiellement comprises dans le quadrant Ouest à Nord-Est au large (N270° à N60°), avec deux directions de provenance préférentielle : le Nord-Nord-Est de N20° à N60° (43 % du temps) et l'Ouest-Nord-Ouest de N270° à N290° (26 % du temps).
- Les houles les plus faibles ($H_s < 1\text{m}$) proviennent essentiellement du secteur Nord-Est N20°-N60° et également, à moindre mesure, du secteur Ouest N270°-N290°. A l'inverse, les houles les plus fortes sont majoritairement orientées Ouest N270°-N290°.
- Une gamme de périodes de houles étalée de quelques secondes jusqu'à 15s. Les mers de vent sont majoritaires avec 82 % des périodes comprises entre 3 et 7s.
- Des hauteurs relativement faibles : 60 % des houles sont inférieures à $H_s = 1\text{m}$ et moins de 5 % sont supérieures à $H_s = 2,5\text{m}$ et des houles extrêmes maximales au large de :
 - $H_s = 5$ à 6m pour la houle annuelle.
 - $H_s = 7$ à 8m pour la houle décennale.
 - $H_s = 9$ à 10m pour la houle centennale.

On note que ce sont ces houles du large qui seront transférées devant le site de Palm Beach pour l'étude de réfraction.

III.3. Etude des houles à la côte du site d'étude

III.3.1. Propagation de la houle entre le large et la côte

Au cours de sa propagation entre le large et la côte, la houle subit des déformations du fait de sa réfraction sur les fonds et des effets de diffraction latérale. Ces déformations dépendent des caractéristiques de la houle au large (période, hauteur et direction de provenance) et du relief des fonds (*Viguié, 1992*).

La direction de provenance peut être considérablement modifiée ainsi que la distribution des hauteurs le long du littoral, avec des zones où celles-ci sont augmentées (zones de concentration d'énergie) ou au contraire diminuées (zones d'atténuation de l'énergie).

La réfraction consiste en une inflexion de la direction de propagation de l'onde sous l'effet de la non-homogénéité du milieu qui est le siège de la propagation. Dans le cas de la houle, la perturbation transportée est une hauteur d'eau et "l'indice de réfraction" dépend de la profondeur du milieu.

La mise au point de tout aménagement côtier nécessite de connaître le régime des houles à la côte et donc d'y transposer le régime des houles au large, qui est généralement connu à partir d'observations de navires, de bouées, etc. (*Paskoff, 2003*).

Cette transposition s'effectue à l'aide de modèles mathématiques de réfraction. Les premiers modèles apparus il y a plus de 20 ans étaient basés sur la théorie linéaire de la houle au premier ordre. Les modèles actuels utilisent des théories non linéaires (houles au 3e ordre) permettant la prise en compte de l'effet de cambrure de la houle et des effets de diffraction latérale (*Viguié, 1992*). De ce fait, ils rendent compte des phénomènes de réfraction dans des cas où le relief est complexe (présence de hauts-fonds, chenaux, etc.). Les résultats se présentent soit sous la forme de plans de vagues (tracé des crêtes de vagues et des orthogonales), soit sous la forme de cartes donnant les iso-hauteurs des vagues (*Young, 1999*).

III.3.2. Modélisation de la houle

On peut entreprendre une modélisation numérique de la houle dans plusieurs buts (*Benoît et al., 2009*) parmi lesquels :

- Obtenir des données sur le climat de la houle au large de l'ouvrage à dimensionner. Ces données peuvent être utilisées en association avec les mesures de la houle ou en tant que source indépendante afin d'obtenir des informations sur le climat à court terme ou fréquent de la houle au large. A partir de ces données, une analyse de la houle extrême peut être réalisée, si la durée des simulations des états de mer dont on dispose est suffisante.

- Modéliser la transformation de la houle du large au site où l'ouvrage doit être construit. Le climat de houle au large est transposé au voisinage de l'ouvrage et les processus spécifiques à l'eau peu profonde doivent alors être pris en compte, comme la réfraction, le déferlement, la diffraction, etc.

Il est important de distinguer deux types principaux de modèles de houle :

- **Les modèles de houle à phases moyennées** : également appelés modèles spectraux de la houle, ils font l'hypothèse que l'échelle de longueur de variation des propriétés de la houle est assez grande par rapport à la longueur d'onde. Les processus physiques dominants inclus sont les données liées au vent, la dissipation due au frottement de fond, la réfraction ainsi que le déferlement induit par la profondeur. Les processus à petite échelle, comme la diffraction ou la réflexion, ne sont pas pris en compte par de tels modèles. Pour ce faire, on peut utiliser un modèle spectral de la houle de troisième génération, comme WAM (*Groupe WAMDI, 1988*), SWAN (*Booij et al., 1999 ; Ris et al., 1999*), WAVEWATCH (*Tolman, 1991*), etc. Ces modèles fournissent un spectre directionnel complet de la houle ainsi que des paramètres synthétisés comme la hauteur significative de la houle calculée à partir du spectre H_{m0} (ou H_s), et diverses périodes spectrales moyennes calculées à partir des moments du spectre (*Benoit et al., 2009*).
- **Les modèles de houle avec résolution de phases** : ils résolvent classiquement les équations de conservation de masse et d'inertie par discrétisation de 10 à 50 points par longueur d'onde et par période de la houle. Ils sont créés pour déterminer précisément l'évolution de chaque vague individuelle d'un train de vagues. Ainsi, ils sont particulièrement recommandés lorsque la houle évolue rapidement. La diffraction et la réflexion sont bien traitées par ces modèles, en plus de la réfraction, du frottement de fond et du déferlement induit par la profondeur (*Benoit et al., 2009*).

Si l'on considère les deux objectifs que se fixe la modélisation de la houle, tels que définis au début de cette section, les applications de ces types de modèles sont les suivantes :

- Pour obtenir des données sur le climat de la houle au large, seuls les modèles à phases moyennées peuvent être utilisés. Ces modèles sont déterminés par les champs de vent qui figurent sur un maillage couvrant la zone étudiée et comprenant une longueur de fetch suffisante pour modéliser correctement toutes les conditions météorologiques et les directions incidentes de la houle (*Dennis, 2001*). On peut obtenir les informations sur les vents à partir de la réanalyse météorologique ou de mesures satellitaires (*Benoit et al., 2009*).
- Pour transférer les données de houle du large au pied de l'ouvrage, les deux types de modèles peuvent s'appliquer, en fonction de la taille du domaine de calcul et du processus dominant à modéliser (*Wilson, 1965*). Si la diffraction et la réflexion sont significatives, il faudra utiliser les modèles avec résolution de phases (*Benoit et al., 2009*). Dans les autres cas, les modèles à phases moyennées (comme le modèle **Swan** utilisé dans notre étude) peuvent être utilisés à un échelon régional ou local, ce qui constitue la situation la plus fréquente. Dans ce cas, ils sont déterminés par les conditions de la houle imposées à la limite au large du modèle.

III.3.3. Application sur le modèle SWAN

A l'aide du modèle numérique **Swan** (Simulating Waves Nearshore, développé par l'université de DELFT, Pays-Bas), Sogreah a réalisé l'étude de propagation de la houle du large vers la côte en se basant sur les données bathymétriques issues des cartes nautiques du **SHOM** et du levé bathymétrique de cette étude. Le domaine de calcul est discrétisé par une seule ou plusieurs grilles.

L'emprise du modèle s'étend sur l'ensemble de la baie de Bou-Ismaïl de Chenoua à l'Ouest jusqu'à Ain Benian à l'Est (*figure III.13*). Ce modèle permet de propager l'ensemble des directions de houle du large susceptibles d'atteindre la plage de Palm Beach-Azur.

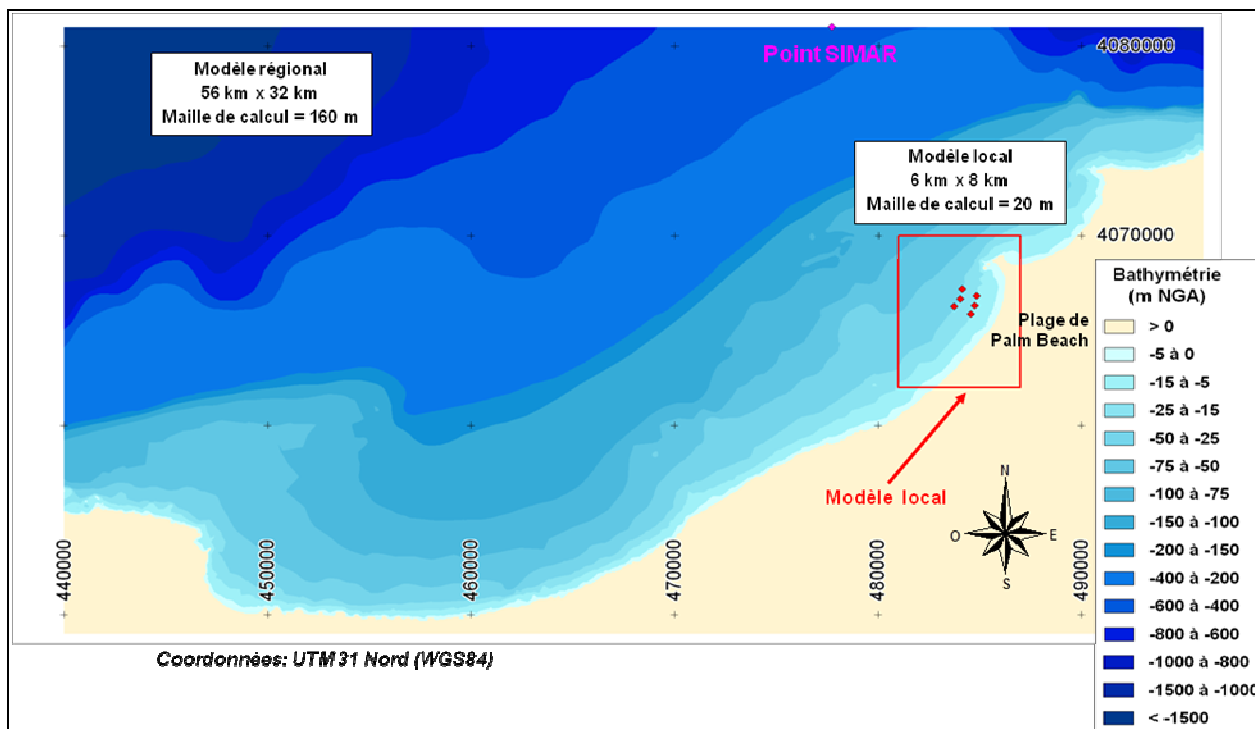


Figure III.13 : Emprise et bathymétrie du modèle de propagation Swan sur Palm Beach. (SGH, 2010)

L'emprise du modèle de propagation devra être suffisamment large pour prendre en considération les houles du large. Sur cette emprise, le modèle régional couvre une superficie de 56Km x 32Km et atteint des profondeurs de l'ordre de 1500m, et un maillage de calcul de 160m.

La bathymétrie utilisée pour la création des fonds sur ce modèle régional est extraite de la carte Shom N°3030 (figure III.14).

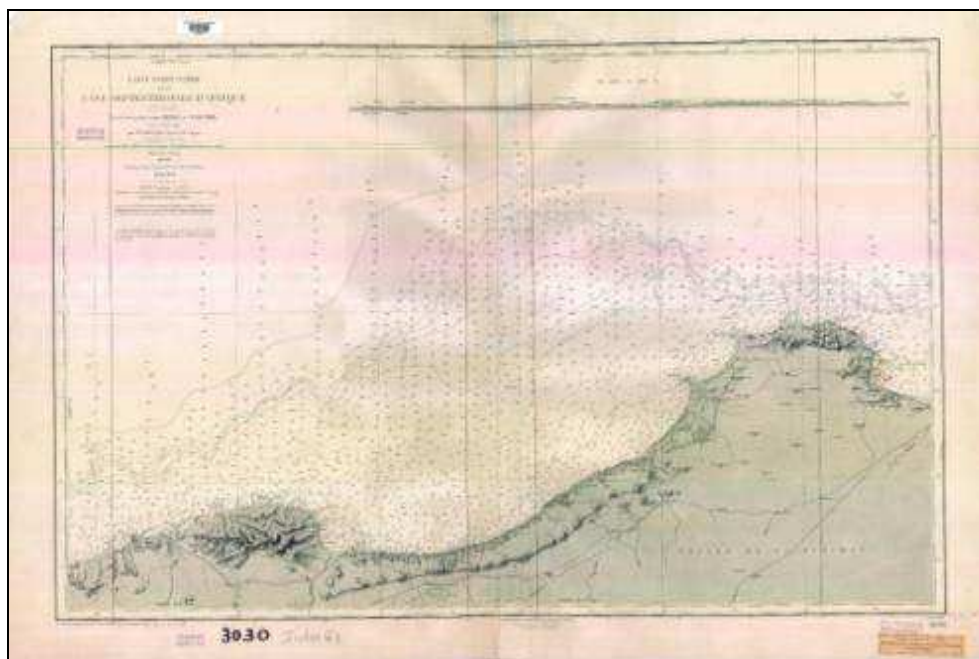


Figure III.14: Carte Shom N°3030.
(Carte particulière de la côte septentrionale d'Afrique, 6^{ème} feuille).

Un deuxième modèle emboîté, dit modèle « local », a été créé afin d'avoir une meilleure précision sur la propagation des houles dans la zone côtière. L'emprise de ce modèle local est présentée de manière générale sur la figure III.13 et de manière zoomée sur la figure III.15.

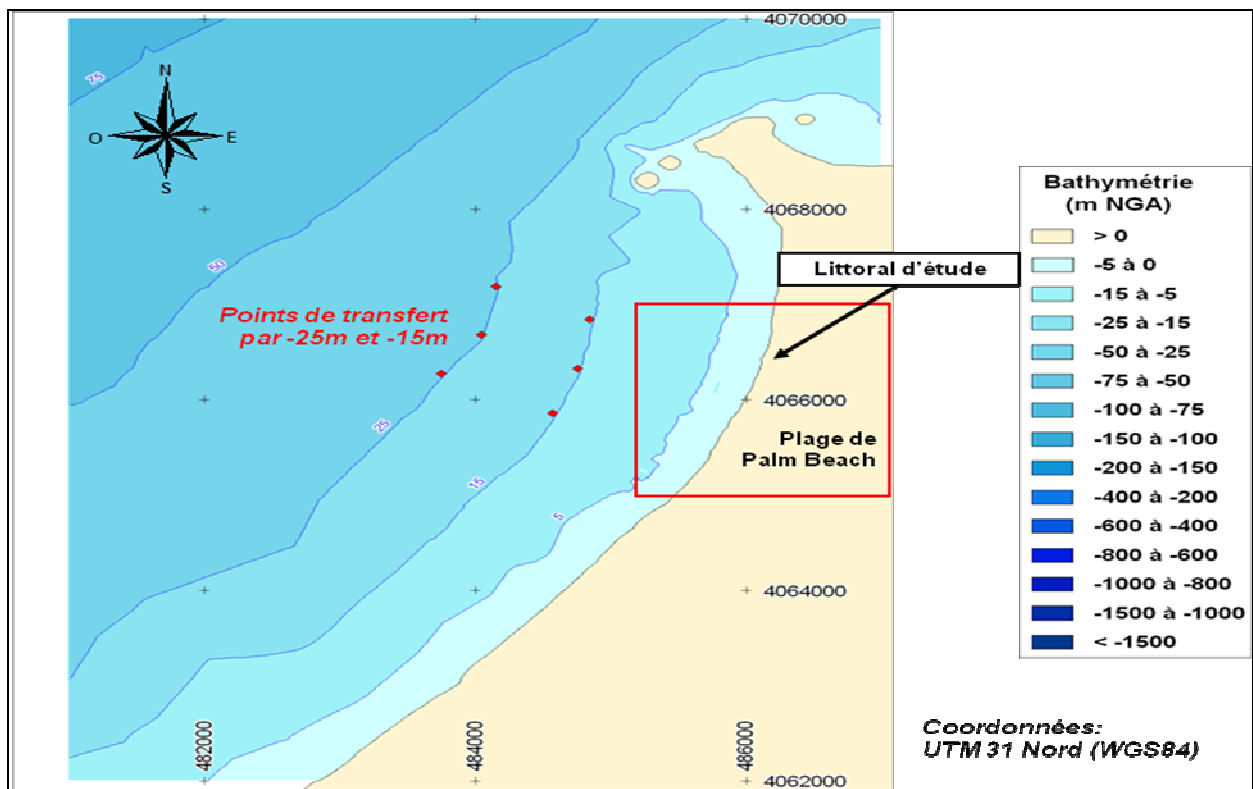


Figure III.15 : Emprise et bathymétrie du modèle local de propagation Swan sur Palm Beach. (SGH, 2010)

Ce modèle couvre une superficie de 6 Km x 8 Km et atteint des profondeurs de l'ordre de 75m sur sa frontière du large. Il est plus précis que le modèle régional puisqu'il présente un maillage de calcul de 20m et intègre, sur une zone devant le site d'étude jusqu'à -20m, le levé bathymétrique réalisé dans le cadre de cette étude (figure III.16).

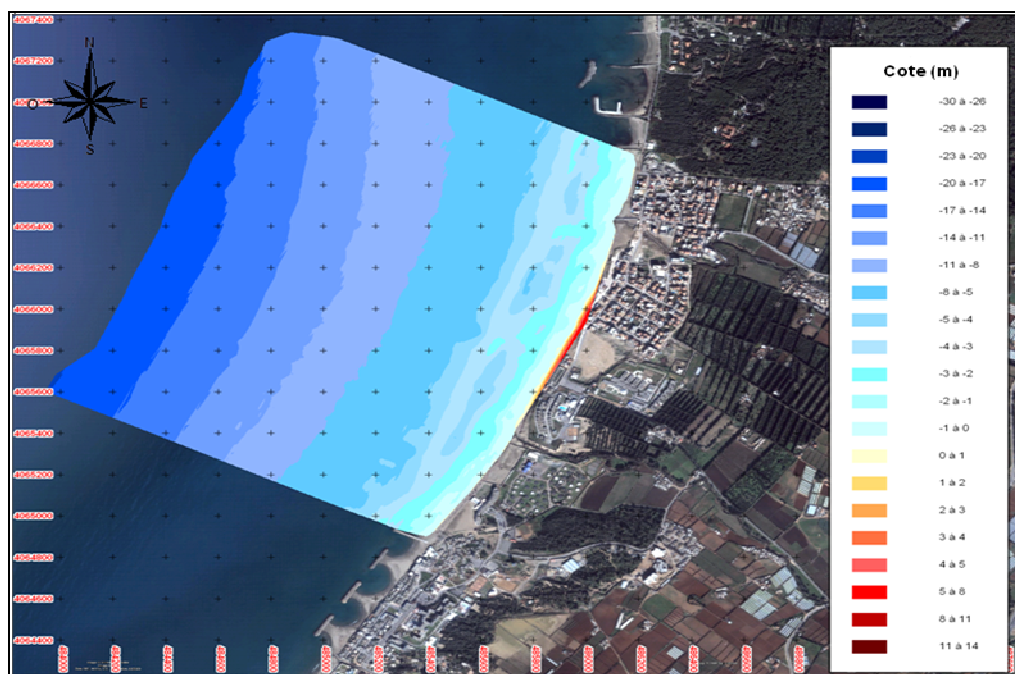


Figure III.16 : Levé bathymétrique de la côte de Palm Beach, 2009. (Image Google Earth de Septembre 2009. SGH, 2010)

III.3.4. Principe de calcul de la réfraction de la houle

La variation correspondante de la hauteur de la houle (par rapport à la hauteur de la houle au large, H_s), due à la redistribution de l'énergie le long des crêtes, est habituellement exprimée par le coefficient de réfraction K_r .

En appliquant la théorie de la houle linéaire à une houle régulière avec un nombre d'onde k , et une direction, α_0 , au large, on déduit la direction locale, α , de la houle (à la côte) à la hauteur d'eau, H , suivant l'équation (**Benoit et al., 2009**) :

$$\alpha = \arcsin[(\sin \alpha_0 * \tanh(k * H))]^2$$

Le coefficient de réfraction correspondant, Kr est donc calculé comme suit :

$$Kr = \sqrt{\frac{\sin \alpha_0}{\cos \alpha}}$$

Autrement :

$$Kr = \frac{Hs \text{ local}}{Hs \text{ au large}}$$

On dispose des statistiques des houles au large du site d'étude où les houles ne sont pas réfractées. Ces mêmes valeurs sont propagées vers la côte à l'aide de fonctions de transfert calculées suivant la bathymétrie (**SGH, 2010**).

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

Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant en compte les phénomènes de réfraction sur les fonds et autour des ouvrages, de frottement sur le fond et de déferlement.

Les paramètres significatifs de la houle, pour tous les états de mer modélisés, sont représentés avec un spectre bidimensionnel de type Jonswap (formule de **Wilson, 1965**). Le coefficient de réfraction est calculé par **Swan** et les résultats sont alors exploités sous deux formes :

- Epures de réfraction montrant qualitativement comment les hauteurs de houle et directions changent au cours de la propagation.
- La détermination quantitative des conditions de la houle en quelques points situés sur l'isobathe -10m et -15m, qui permet l'établissement de la statistique locale de la houle à cette profondeur qui sera utilisée pour l'estimation de la capacité de transport par la suite et lors des études de modélisation.

III.3.5. Données de base pour la réfraction Swan

III.3.5.1. Données bathymétriques

La bathymétrie utilisée pour cette étude de réfraction est celle issue de la digitalisation de la carte **Shom** N°3030 intitulée « Carte particulière de la côte septentrionale d'Afrique (6^{ème} feuille) » (**figure III.23**) ainsi que celle issue de la campagne de reconnaissances sur site réalisée au mois d'octobre 2009 par le LEM dans le cadre de l'étude de protection de la plage de Palm Beach (**figure III.25**).

III.3.5.2. Données de houles au large

Les données de houle du large sont issues de la base de données **Simar-44** (1958 - 2001). Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période, ainsi que la détermination de la probabilité de retour des houles annuelles à cinquanteennes. Afin d'optimiser les calculs sur le modèle **Swan**, nous avons procédé au calcul d'une houle équivalente par période et par direction. Celle-ci correspond à la moyenne des amplitudes significatives pour une période donnée. Ainsi, un calcul de houle équivalente en fonction de la période a été effectué pour déterminer les conditions de la houle au large pour le secteur affectant la zone d'étude.

III.3.5.3. Choix des secteurs directionnels

Trois directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large et aussi de l'exposition du site : une direction ou un secteur approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale, soit Ouest Nord-Ouest de 240 à 300°N, et deux directions de part et d'autre de cette perpendiculaire à la côte, soit le secteur Nord Nord-Ouest de 300 à 360°N et le secteur Nord Nord-Est de 0 à 60°N.

III.3.5.4. Choix des périodes

Les différentes épures de réfraction réalisées avec le modèle ont été définies afin de pouvoir établir les fonctions de transfert linéaire des états de mer du large à la côte.

60 simulations ont été réalisées et menées en houle unitaire (c'est-à-dire avec $H_s = 1\text{m}$), pour 10 directions (N240, N260, N280, N300, N320, N340, N360, N20, N40 et N60) et pour 6 périodes annuelles (4s, 6s, 8s, 10s, 12s et 14s) caractéristiques des états de mer du large susceptibles d'atteindre les plages du littoral d'étude. Le niveau d'eau choisi pour ces simulations correspond au niveau moyen de la mer (+0,34 m CM, soit 0,0 m NGA). Les résultats de ces 60 calculs seront utilisés pour la détermination de la capacité de transport (SGH, 2010).

Ainsi, les conditions de tempêtes correspondant à des périodes de retour de 10 ans et 50 ans ont été aussi modélisées numériquement pour les trois secteurs de provenance 240-300°N/300-360°N/0-60°N. Les calculs relatifs à la houle cinquantennale seront utilisés pour dimensionner les ouvrages de protection. Ces cas de calculs ont été définis suite à l'étude des tempêtes enregistrées entre janvier 1958 et décembre 2001. Ils sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.10 : Données pour la réfraction Swan des houles extrêmes du large d'Alger (SGH, 2010).

Période de retour	Secteur 0° - 60°N			Secteur 240° - 300°N			Secteur 300° - 360°N		
	Hs	Tp	Direction	Hs	Tp	Direction	Hs	Tp	Direction
10 ans	7 m	12s	30°N	6,8 m	10s	280°N	7 m	12s	340°N
50 ans	8,6 m	12s	30°N	8 m	11s	270°N	8 m	13s	350°N

III.3.6. Résultats de la réfraction Swan

A titre indicatif, Sogreah fournit les épures de propagation pour les cas de houle unitaire ($H_s = 1\text{m}$) suivants : 300°N et 360°N associés aux périodes 6 et 14s pour pouvoir comparer l'influence de la période sur la propagation de la houle (Annexe III, figures 13 à 14). Dans ce cas, les houles de la direction 300°N parviennent au site avec une hauteur globale de 0,8 à 0,9m pour les périodes de 6 et de 14s. Par contre pour la direction 360°N, les houles de 6s s'amortissent à des valeurs de 0,3 à 0,5m sur le site et les houles de 14s sont de 0,8 à 0,9m sauf au Nord Est où elles sont réfractées jusqu'à 0,4m localement.

Les épures de propagation des houles extrêmes depuis le large, fournies par Sogreah, sont présentées en Annexe III sur les figures 1 à 12. Les conditions de houles à la profondeur -15m et -10m obtenues par le Swan permettent l'établissement des caractéristiques locales des houles, nécessaires pour l'étude de modélisation.

III.3.6.1. Houles moyennes à l'isobathe -15m NGA

La présentation graphique des résultats, fournis par Sogreah, de distribution des hauteurs H_m et des périodes T_p à l'isobathe -15m par les histogrammes des occurrences d'apparition et des pourcentages de dépassement est présentée sur la figure III.17.

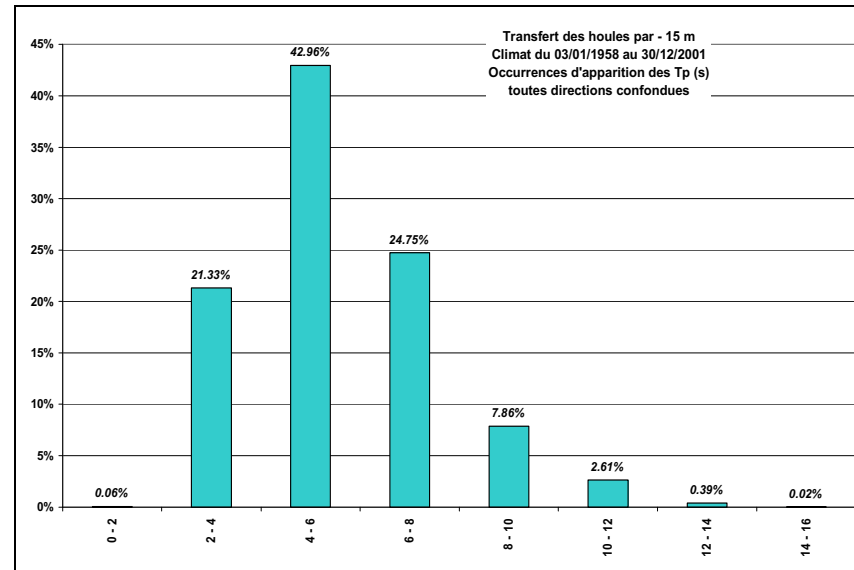
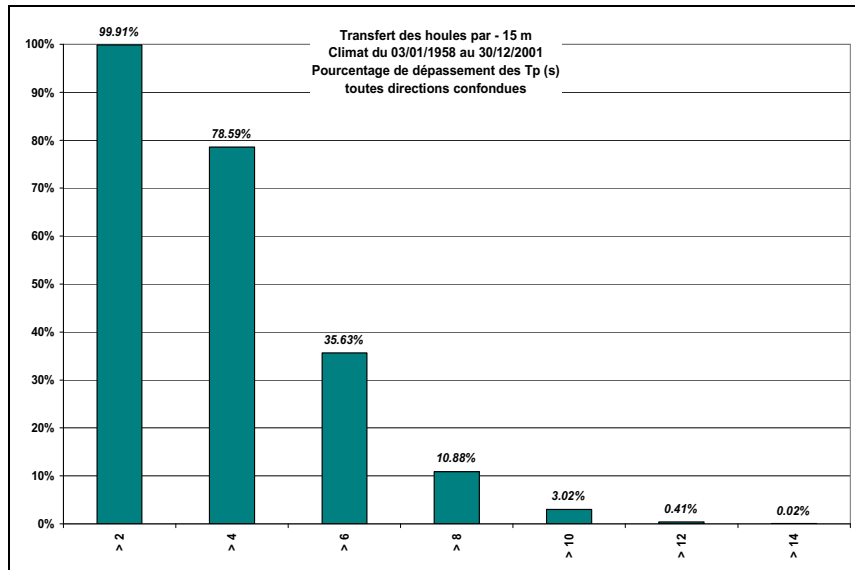
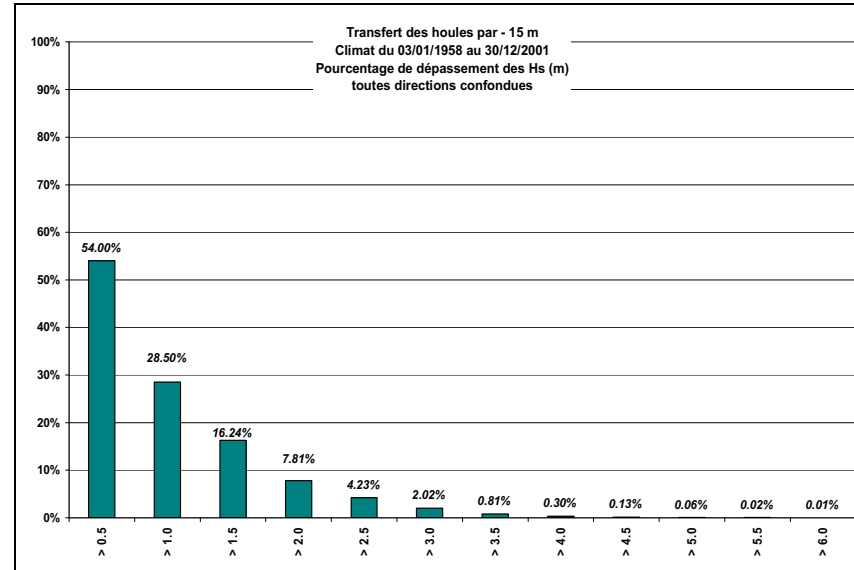
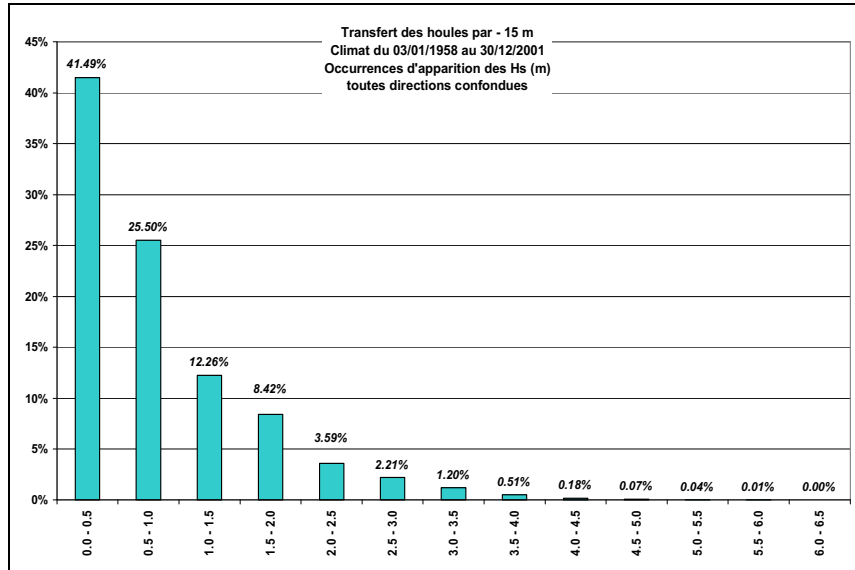


Figure III.17 : Distribution statistique des houles H_m (m) moyennes réfractées et des périodes T_p (s) à -15 m de Palm Beach. Résultats de réfraction Swan des houles du point Simar 2070015, 1958-2001 (SGH, 2010)

L'analyse de la distribution des hauteurs montre que :

- Le secteur de houles le plus fréquent est H_m compris entre 0 et 0,5 m avec 41,5% des cas et viennent ensuite :
 - $0,5 \text{ m} < H_m < 1 \text{ m} = 25,5 \%$
 - $1 \text{ m} < H_m < 1,5 \text{ m} = 12,3 \%$
 - $1,5 \text{ m} < H_m < 2 \text{ m} = 8,4 \%$
- 72 % des houles du large sont inférieures à $H_m = 1 \text{ m}$.
- 7,8 % des houles sont supérieures à $H_m = 2 \text{ m}$ contre 2 % pour $H_m > 3 \text{ m}$ et seulement 0,1 % pour $H_m > 4 \text{ m}$.
- Sur la période d'enregistrement des données 1958-2001, les plus fortes houles sont de l'ordre de 6 à 7 m.

L'analyse de la distribution des périodes montre que :

- La gamme des périodes de houle devant le site de Palm Beach s'étend de quelques secondes à 15 s.
- On constate dans l'analyse du graphique d'occurrences des T_p (s) qu'il y a au large du site un état de mer prépondérant : les mers de vent dont les périodes comprises entre 2 et 8 s, représentent 89 % du temps. Les houles longues du large, de périodes comprises entre 10 et 15 s, représentent seulement 3 % des cas.
- Les périodes de houle les plus fréquentes sont :
 - 4 à 6 s = 43,0 %
 - 6 à 8 s = 24,8 %
 - 2 à 4 s = 21,3 %
- Sur la période d'enregistrement des données 1958-2001, les plus fortes périodes sont de l'ordre de 13 à 14 s.

Lors de leur propagation du large vers la côte, les houles se réfractent en tournant progressivement d'Est en Ouest. Le secteur de provenance des houles à la côte se situe entre $N230^\circ$ à $N60^\circ$ (*figures III.18 et III.19*). Les houles les plus faibles (H_m de 0 à 2 m) proviennent essentiellement de deux secteurs : secteur WNW de $N270^\circ$ à $N290^\circ$ et NNE de $N340^\circ$ à $N20^\circ$. A noter que 30 % des houles à la côte sont comprises entre $N0^\circ$ et $N20^\circ$ et sont inférieures à $H_m = 0,5 \text{ m}$.

Par contre, les houles les plus fortes ($H_m > 3 \text{ m}$) sont exclusivement comprises dans un secteur restreint compris entre $N270^\circ$ et $N340^\circ$.

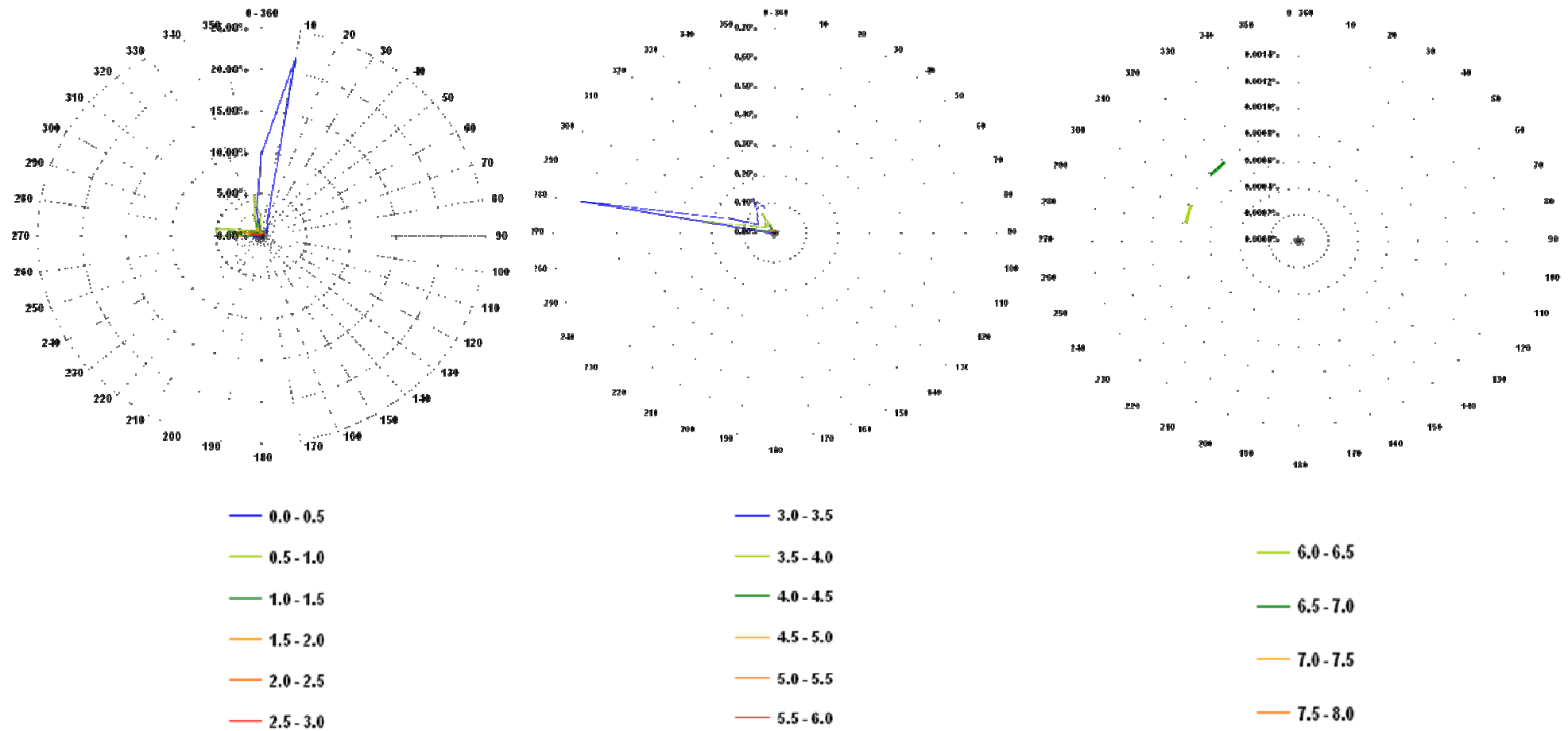


Figure III.18 : Roses des houles à la côte (-15m de Palm Beach).
 Occurrences d'apparition par secteur et par classe de H_m (m) moyennes réfractées obtenues par Swan (1958- 2001)
 (SGH, 2010)

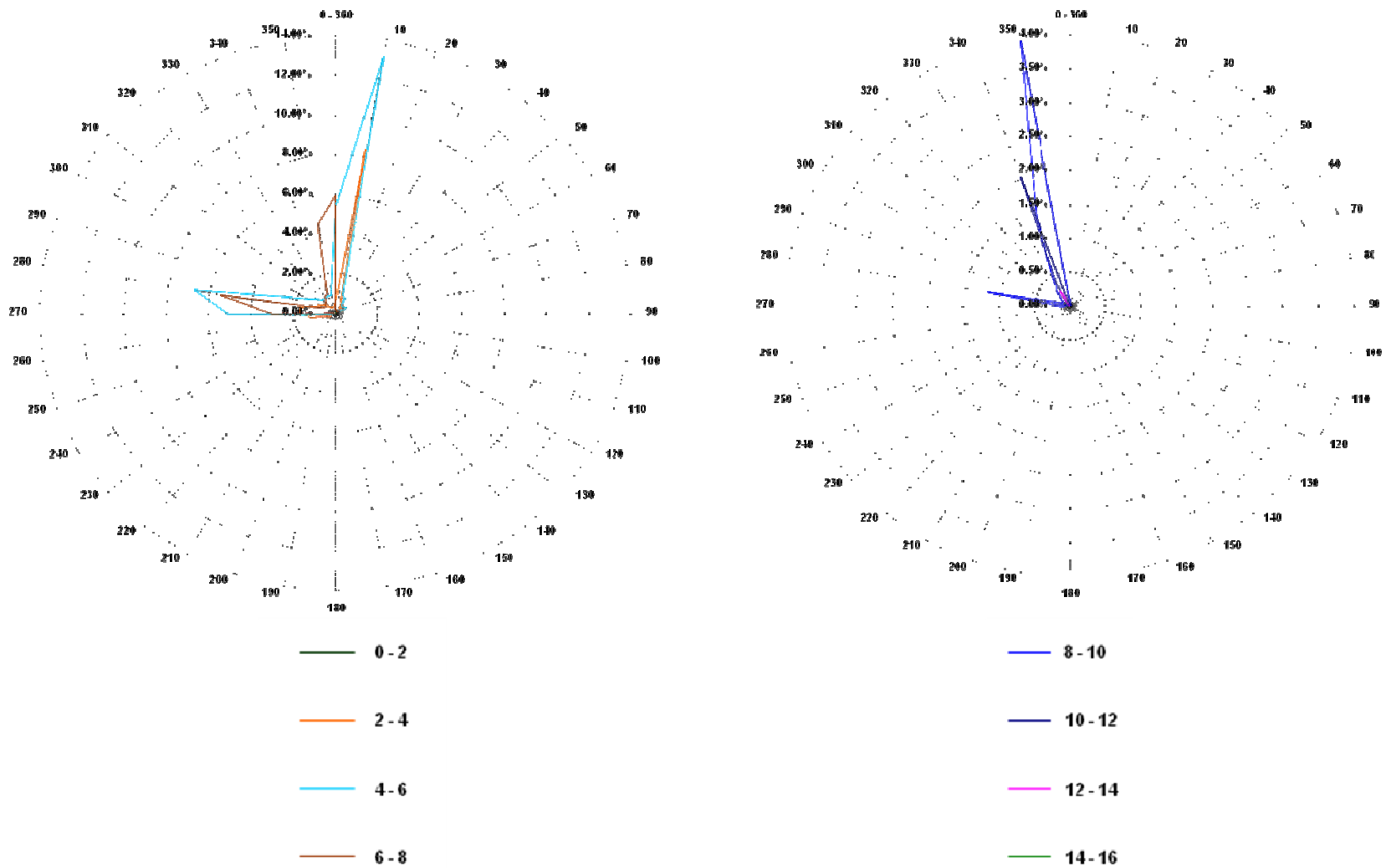


Figure III.19 : Roses des houles à la côte (-15m de Palm Beach). Occurrences d'apparition par secteur et par classe de période. Houles réfractées obtenues par Swan, 1958 – 2001. (SGH, 2010)

III.3.6.2. Houles extrêmes à l'isobathe -15 m NGA

L'analyse des houles extrêmes réfractées a été réalisée par secteurs différenciés, secteur WNW N240°-N300°, secteur NNW N300°-N360°, mais également pour tous les secteurs confondus.

III.3.6.2.1. Houles extrêmes pour tout secteur confondu

L'état de tempête, tout secteur confondu, a été défini pour le seuil de $H_s = 3,0$ m. Sur la période d'enregistrement, 484 tempêtes ont été recensées, soit 11 tempêtes par an en moyenne (*figure 15, Annexe II*). La *figure 16 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les hauteurs significatives H_s réfractées à -15m obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.11 : Houles extrêmes obtenues par le Swan à -15m NGA de Palm Beach, tout secteur confondu (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence à -15m	Hs réfractée à -15m
1	0,0888	4,58 m
5	0,0178	5,75 m
10	0,0089	6,27 m
20	0,0044	6,79 m
50	0,0018	7,49 m
100	0,0009	8,03 m

III.3.6.2.2. Régime extrême pour le secteur WNW – N240° à N300°

L'état de tempête pour le secteur WNW a été défini pour le seuil de $H_s = 3,0$ m. Sur la période d'enregistrement, 372 tempêtes ont été recensées, soit 9 tempêtes par an en moyenne (*figure 17, Annexe II*). La *figure 18 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les hauteurs significatives H_s réfractées à -15m obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.12 : Houles extrêmes obtenues par le Swan à -15m NGA de Palm Beach. Secteur WNW – N240° à N300° (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence à -15m	Hs réfractée à -15m
1	0,1156	4,30 m
5	0,0231	5,28 m
10	0,0116	5,70 m
20	0,0058	6,12 m
50	0,0023	6,68 m
100	0,0012	7,10 m

III.3.6.2.3. Régime extrême pour le secteur NNW – N300° à N360°

L'état de tempête pour le secteur NNW a été défini pour le seuil de $H_s = 3,0$ m. Sur la période d'enregistrement, 195 tempêtes ont été recensées, soit 5 tempêtes par an en moyenne (*figure 19, Annexe II*). La *figure 20 en Annexe II* présente graphiquement les chiffres du tableau ci-dessous, soient les hauteurs significatives H_s réfractées à -15m obtenues pour chaque période de retour par extrapolation, l'intervalle de confiance étant de 90 %.

Tableau III.13 : Houles extrêmes obtenues par le Swan à -15m NGA de Palm Beach. Secteur NNW – N300° à N360°, (SGH, 2010).

T (ans)	Fréquence à -15m	Hs réfractée à -15m
1	0,2205	4,06
5	0,0441	5,45
10	0,0221	6,09
20	0,0110	6,75
50	0,0044	7,64
100	0,0022	8,33

III.3.6.2.4. Synthèse

Le ci-dessous présente la synthèse entre les valeurs extrêmes des houles Hs au large et des Hs réfractées à -15 m pour les mêmes périodes de retour 1, 5, 10, 20, 50 et 100 ans et les secteurs directionnels considérés :

Tableau III.14 : Houles extrêmes au large (Simar) et à -15m NGA (Swan) de Palm Beach.

Hauteur de houle par période de retour :	Direction								
	Tous secteurs au large	Tous secteurs à -15m	Kr	N240° à N300° au large	N240° à N300° à -15 m	Kr	N300° à N360° au large	N300° à N360° à -15 m	Kr
Annuelle	5,7 m	4,58	0,8035	5,2 m	4,30	0,8269	4,8 m	4,06 m	0,8458
Quinquennale	7,1 m	5,75	0,8098	6,3 m	5,28	0,8380	6,3 m	5,45 m	0,8650
Décennale	7,7 m	6,27	0,8142	6,8 m	5,70	0,8382	7,0 m	6,09 m	0,87
Vingtennale	8,4 m	6,79	0,8083	7,3 m	6,12	0,8383	7,7 m	6,75 m	0,8766
Cinquantennale	9,2 m	7,49	0,8141	8 m	6,68	0,8350	8,6 m	7,64 m	0,8883
Centennale	9,9 m	8,03	0,8111	8,5 m	7,10	0,8352	9,3 m	8,33 m	0,8956

Les houles extrêmes à -15m les plus fortes (décennale, vingtennale, cinquantennale et centennale) proviennent du secteur Nord-Ouest à Nord. Par contre, pour la houle annuelle, ce sont les houles en provenance du secteur Ouest à Nord-Ouest qui sont les plus fortes.

On se rend compte toutefois que la séparation des régimes extrêmes en secteur de direction n'apporte pas de grandes modifications dans les statistiques des houles extrêmes puisque d'après l'étude réalisée, les houles extrêmes sont les suivantes :

- une houle annuelle de l'ordre de 4 à 4,6 m.
- une houle décennale de l'ordre de 5,7 à 6,3 m.
- une houle cinquantennale de l'ordre de 6,7 à 7,6 m.
- une houle centennale de l'ordre de 7,1 à 8,3 m.

Pour la réfraction, il ressort de ces résultats que les houles à cette profondeur sont peu réfractées (0,82 □ Kr □ 0,89), elles gardent la presque totalité de leur énergie initiale du large et leur énergie à la côte n'est donc que très peu atténuée.

III.3.6.3. Houles extrêmes à l'isobathe -8 à -10 m NGA

Les résultats extraits du **Swan** des hauteurs Hs obtenues entre les fonds de -8m à -10m pour différentes directions sont les suivants :

Tableau III.15 : Hauteurs de houles extrêmes obtenues par le Swan entre -8 à -10m NGA de Palm Beach.

	Direction au large (°N)												Tp
	240		270		300		330		360		30		
	Direction locale °N	Hs (m)	Direction locale °N	Hs (m)	Direction locale °N	Hs (m)	Direction locale °N	Hs (m)	Direction locale °N	Hs (m)	Direction locale °N	Hs (m)	
Hs = 1m	260-265	0,2	275	0,85	300	0,95	322	0,9	348	0,8	355	0,4	6-8 s
1 an	270-275	0,8	280	3,5	300	3,8	315	3,7	335	3,3	340	2	8-10 s
5 ans	270-275	1,1	280	4,2	300	4,2	315	4,3	330	3,8	340	2,8	10 - 12 s
10 ans	275	1,3	280	4,5	300	4,5	315	4,5	325	4	340	3,3	10 - 12 s
50 ans	275-280	1,8	280	4,8	300	4,8	320	4,8	325	4,5	330	4,1	12 - 13 s

Chapitre IV :

Etude hydrosédimentaire

Chapitre IV. Etude hydrosédimentaire

Afin de préciser le schéma actuel de la dynamique sédimentaire au niveau de la plage de Palm Beach Azur (transit littoral, mouvements dans le profil), on va procéder successivement :

- au recueil et à la synthèse des données des études antérieures.
- à l'analyse de l'évolution du littoral (trait de côte, plage et petits fonds marins).
- et à l'identification des mouvements sédimentaires et analyse des causes des différentes modifications bathymétriques constatées.

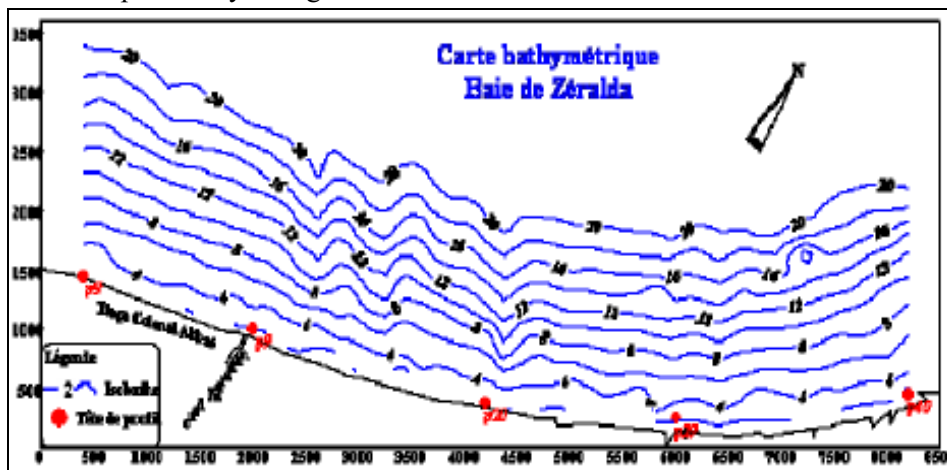
Une fois le régime du littoral d'étude précisé, des solutions de protection de la plage seront définies par expertise.

IV.1. Recueil des données antérieures sur le site

Toutes les informations antérieures, pouvant être utiles à l'étude hydrosédimentaire, sont récupérées dans le cadre de cette étude et présentées dans ce qui suit.

IV.1.1. Données bathymétriques

La carte bathymétrique de la région de Zéralda (*LEM, 1999*) montre des isobathes régulières espacées et parallèles à la côte. La pente moyenne générale des fonds est de l'ordre de 1 %.



Des profils perpendiculaires à la côte (P3, P9, P20, P29 et P40) présentés sur la **figure IV.2** montrent une topographie sous-marine monotone sans accidents topographiques majeurs. L'analyse des profils donne :

- Le profil n°3 est marqué par la présence de deux petites barres d'avant-côte culminant respectivement à -4 et -5 m de fond. Au delà de la seconde barre, il descend en pente douce vers le large.
- Le profil n°9 présente un palier sur 75 m de long puis une rupture de pente entre -2 et -5 m de fond, il descend en pente douce vers le large.
- Le profil n°20 montre une petite rupture de pente entre -7 et -10 m de fond. Par ailleurs, il ne présente aucune morphologie particulière.
- Le profil n°29 indique une rupture de pente entre 0 et -5 m de fond, puis une barre d'avant-côte culminant à -3 m. Ensuite il descend en pente douce vers le large.
- Le profil n°40 présente un palier sur 75 m de long entre 0 et -3 m de fond, puis une rupture de pente abrupte entre -3 et -5 m, et ensuite descend en pente douce vers le large.

D'une manière générale, le fond marin de la zone côtière de Zéralda se caractérise par un relief régulier et étagé par endroits. Les isobathes sont généralement parallèles à la côte. La pente générale est faible, de l'ordre de 1%.

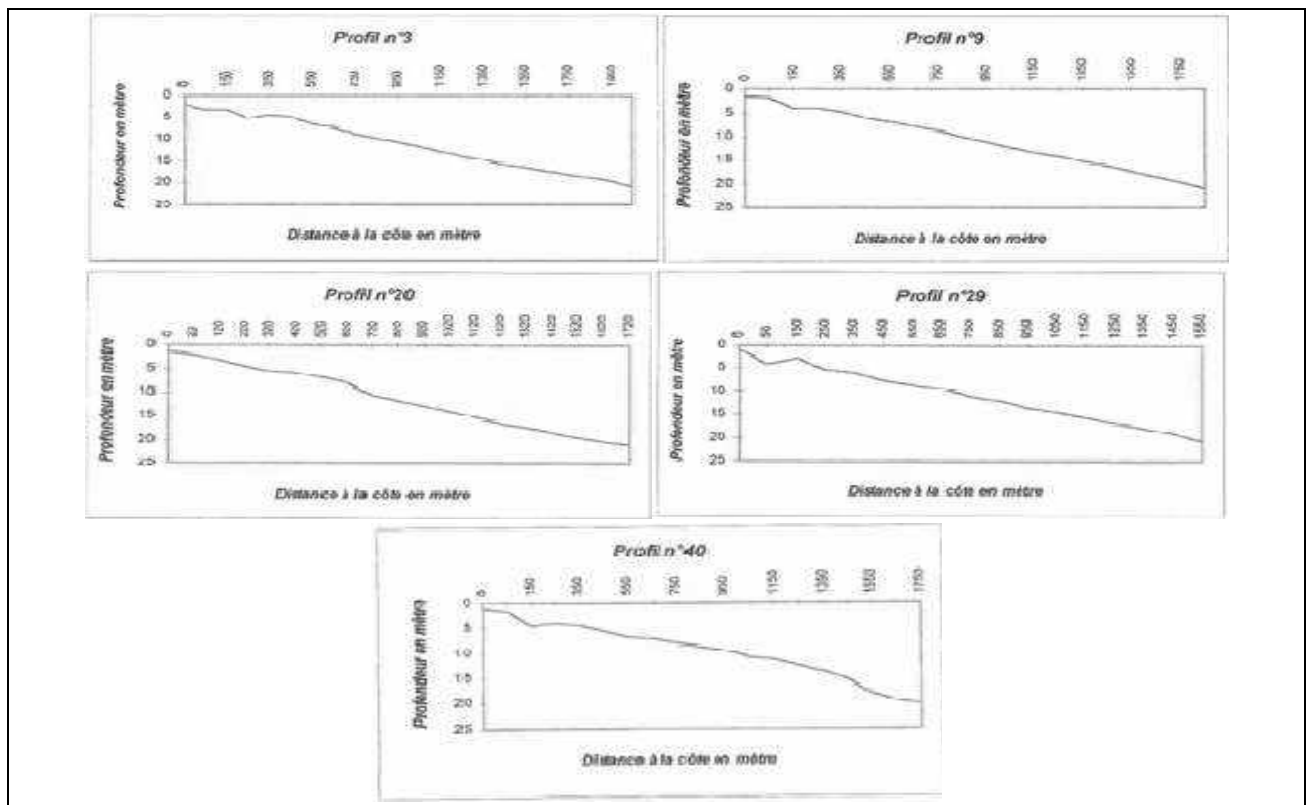


Figure IV.2 : Profils bathymétriques réalisés dans la zone côtière de Zéralda, 1999 (LEM, 1999).

IV.1.2. Caractéristiques sédimentologiques des dépôts superficiels

Le site d'étude de la partie Est de la baie de Bou-Ismaïl fait partie d'une côte sableuse, orientée en moyenne NNE-SSW. La façade littorale est constituée d'une plage sableuse soumise directement aux houles incidentes du large.

IV.1.2.1. Prélèvements d'échantillons de sédiments

Au niveau du site de Zéralda, 80 échantillons de sédiments superficiels ont été prélevés en mer aux profondeurs de 0, 5, 10 et 15 m dans le cadre de la carte sédimentaire du littoral algérien (LEM, 1999).



Figure IV.3 : Grille d'échantillonnage dans la zone côtière de Zéralda, 1999 (LEM, 1999).

IV.1.2.2. Répartition de la fraction fine

La figure ci-dessous représente la répartition spatiale à partir du pourcentage de la fraction fine caractéristique de chaque échantillon.

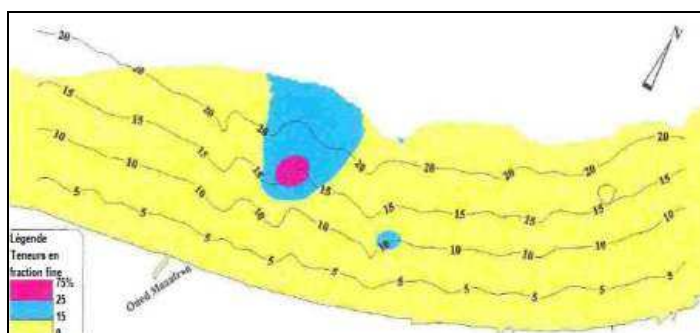


Figure IV.4 : Répartition spatiale de la fraction fine dans la zone côtière de Zéralda, 1999 (LEM, 1999).

La répartition de la fraction fine montre de faibles teneurs, variant entre 0 et 15 % sur l'ensemble du site. A partir de -15m au droit de l'embouchure du Mazafran, les teneurs évoluent pour atteindre des taux de 25 à 75 %. Cette carte, bien que moins détaillée, elle se rapproche des résultats de la campagne réalisée dans le cadre de la présente étude.

IV.1.2.3. Répartition de la fraction grossière

Sur les 80 échantillons prélevés, certains présentent des courbes cumulatives unimodales et d'autres bimodales ou encore plurimodales. Une courbe plurimodale rend compte de la présence de plusieurs stocks sédimentaires au sein d'une même population dynamique. Elle est surtout représentative des sédiments grossiers (LEM, 1999). Cette hétérogénéité serait due à la nature des sédiments grossiers, où le mode le plus grossier est représenté par des coquilles entières ou par des bioclastes ou bien encore par des petits galets.

Plusieurs modes granulométriques sont donc représentatifs du sédiment. L'histogramme de fréquence des répartitions dimensionnelles des modes permet de différencier trois modes majeurs.

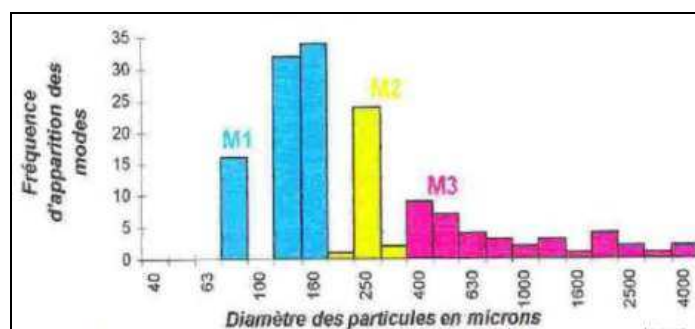


Figure IV.5 : Fréquence des modes granulométriques représentatifs de la zone côtière de Zéralda, 1999 (LEM, 1999).

Le mode M1 représente le stock des sédiments les plus fins. Les pourcentages les plus faibles de ce mode (< 25 %) sont localisés le long de la côte puis ils vont en augmentant en allant vers le large. Les plus grands pourcentages, compris entre 75 et 100 %, s'étalent face à l'embouchure du Mazafran, à partir de -15 m de fond (LEM, 1999).

La répartition spatiale du mode M2 montre que les concentrations les plus importantes sont comprises entre 75 et 100 %. Elles recouvrent la partie Est du site sous forme de panache irrégulier. Les teneurs inférieures à 75 % sont localisées à l'Ouest du site (LEM, 1999).

Pour le mode M3, les teneurs les plus importantes variant entre 25 et 100 % se localisent principalement le long de la côte de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Mazafran jusqu'à -5m de fond. Ces teneurs tendent à décroître sensiblement en direction du large (LEM, 1999).

La répartition spatiale des modes montre que les sables fins à moyens occupent la zone la plus au large, par contre les sables grossiers se localisent à partir de la côte jusqu'à -5 m de fond. Cette répartition est équivalente à celle donnée dans le cadre de cette étude.

IV.2.2.4. Médiane granulométrique et décile supérieur

Les éléments grossiers dont le diamètre est supérieur à 1000 μm se répartissent de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Mazafran jusqu'à -5 m de fond (*LEM, 1999*).

La fraction dont le D_{50} est compris entre 200 et 500 μm s'étale dans tout le site entre -5 et -10 m de fond. Au large, s'étale la fraction dont D_{50} est inférieur à 200 μm (*LEM, 1999*).

Quant au décile supérieur, ce paramètre montre une parfaite analogie avec celle de la médiane granulométrique. Les sédiments grossiers dont le D_{90} varie entre 1000 et 5000 μm sont sur la côte de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Mazafran jusqu'à l'isobathe -5 m. La taille des sédiments va en diminuant en allant vers le large (*LEM, 1999*).

IV.1.3. Dynamique littorale

Les sédiments du secteur du site d'étude peuvent provenir de plusieurs origines (*SGH, 1972*):

- L'oued Mazafran qui contribue en grande partie dans l'approvisionnement du secteur en sédiments.
- L'érosion du massif dunaire, situé à l'arrière de la zone littorale.
- L'érosion marine des zones avoisinantes.

La répartition des sédiments dans la baie de Zéralda est conditionnée par l'action des houles des secteurs Ouest, Nord-Ouest, Nord et Nord-Est (*LEM, 1999*).

Le volume résultant de sédiments déplacés d'Est en Ouest est évalué à environ 32 200 m^3/an (*LEM, 1999*). L'estimation du transit sédimentaire dans la baie de Zéralda montre qu'il y a prédominance du transport des sédiments vers l'Ouest ce qui est dû essentiellement à une forte fréquence des houles Nord-Est (*LEM, 1999*).

IV.2. Dynamique sédimentaire

IV.2.1. Nature et répartition des sédiments

La diversité morphologique et géologique du littoral conduit à une grande variété de sédiments :

- Fonds rocheux, l'action des houles et des courants est alors sans effets réels.
- Blocs de grosses tailles (éboulis de falaises), galets et graviers, ce type de matériaux n'est déplacé qu'en bordure du littoral (zone de déferlement) où dans les cours d'eau et leur débouché en mer en période de débits soutenus (*Blanc, 1996*).
- Sables plus ou moins grossiers que l'on peut trouver jusqu'à des fonds de -25 m en Méditerranée.
- Vases dans lesquelles on englobe les limons, boues, argiles que l'on trouve ici dans les fonds marins au large des zones sableuses.

La plage de Palm Beach est constituée de sédiments meubles, la répartition granulométrique est liée aux variations dans le profil de l'action de la houle. Les vagues exercent des actions qui varient le long du profil et les sédiments «se trient» pour s'adapter à ces conditions. Sur l'estran, la houle induit une dérive littorale et, dans les fonds inférieurs à une quinzaine de mètres, un mouvement saisonnier dans le profil par suspension graduée. D'une manière générale, les triages granulométriques dans le profil se font de telle sorte que :

- les matériaux les plus grossiers se trouvent au niveau de la ligne de déferlement.
- de cette ligne vers la terre, il y a d'abord diminution de la granulométrie puis augmentation jusqu'au haut de plage.
- au large du déferlement, le sédiment s'affine avec l'augmentation de la profondeur. Au-delà de 15 m de fond, l'énergie de la houle est généralement trop faible pour induire un transport du sable et la faible turbulence permet la décantation des vases en suspension.

Le triage parallèlement au rivage est lié au déplacement des sédiments le long de ce dernier. Lors de ces transports, il s'effectue une sélection des matériaux en fonction de leur taille, de leur forme et de leur densité. C'est ainsi, que classiquement :

- Les sédiments sont plus grossiers au centre des baies, là où l'énergie est plus forte, qu'aux extrémités généralement abritées (*Sanchez, 2000*).
- Dans une zone littorale en érosion comme c'est le cas de la plage de Palm Beach, du fait d'une sous alimentation en sédiments, ceux y restant sont plus gros, car moins mobiles, que ceux que l'on trouve plus loin.

IV.2.2. Facteurs intervenants dans la dynamique sédimentaire

Dans la zone côtière, la houle est le principal facteur susceptible de mettre les matériaux en mouvement. Lors du déferlement, l'énergie des vagues est dissipée et transformée principalement en turbulence qui remet en mouvements les sédiments qui sont transportés par les courants qu'elle engendre et/ou ceux dus aux marées et aux vents (*Bonnefille, 1994*).

Aussi, les vents sont générateur de mers de vents et clapots, de courants et de fluctuations du niveau de la mer (surcotes, décotes) et sont directement la cause du transport de sable sur la plage (transport éolien). Les autres facteurs influant directement sur la dynamique sont la réduction des apports terrigènes ainsi que l'élévation du niveau de la mer.

IV.2.2.1. Mouvements sédimentaires engendrés par la houle

Dans les processus littoraux, on distingue :

- Les transports de sédiments perpendiculaires à la côte Q_y : les mouvements dans le profil.
- Les transports de sédiments parallèles à la côte Q_x : le transit littoral.

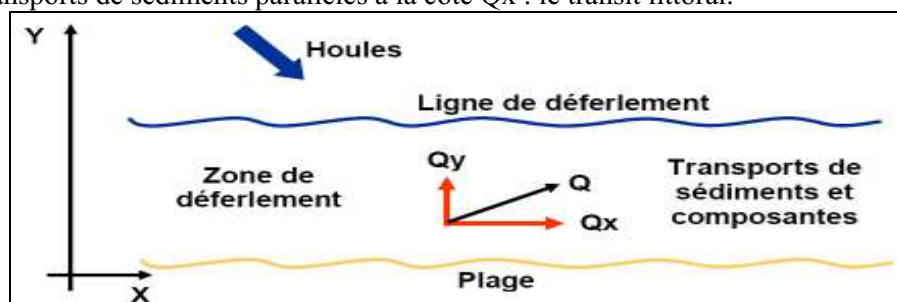


Figure IV.6 : Schéma explicatif des mouvements sédimentaires engendrés par la houle (*Viguié, 2001 modifié*).

Les évolutions à long terme les plus importantes sont généralement engendrées par le gradient (naturel et/ou artificiel) du transit littoral (*Viguié, 2001*). Les mouvements dans le profil entraînent des variations saisonnières importantes du niveau de la plage et du trait de côte, en général ils n'engendrent pas d'évolutions à long terme (*Caminade, 1995*).

IV.2.2.1.1. Profondeur limite d'action de la houle

La limite de mobilité du profil vertical correspond à la profondeur à partir de laquelle la plage sous-marine n'enregistre plus de changements significatifs. Elle est extrêmement variable en fonction des dynamiques et des processus morpho-sédimentaires, dont les impacts diffèrent suivant l'échelle de temps considérée (*De Vriend, 1991 in Suanez et al., 1998*).

Le transit littoral et les mouvements dans le profil s'effectuent entre la côte et la profondeur limite d'action des houles. A partir de mesures et d'observations sur différents sites, Hallermeier (*Hallermeier R.J, 1978 in Suanez et al., 1998*) a proposé, pour estimer la profondeur limite d'action des vagues, la formulation suivante :

$$d_l = 1,75 H_{s(12h)} - 57,9 (H_{s(12h)})^2 / g T_s^2$$

Où, d_l : profondeur limite d'action de la houle.
 $H_{s(12h)}$: hauteur significative dépassée 12 heures par an.
 T_s : période significative associée.

Le deuxième terme étant négligeable, en pratique on prend $d_l = 1,75 H_{s(12h)}$.

L'analyse statistique des houles à la côte conduit, sur le site de Palm Beach-Azur, à un H_s (12h) compris entre 4,6 et 4,8 m (*SGH, 2010*). Dans ces conditions, la profondeur limite d'action des houles calculée serait comprise entre -8 et -8,5 m NGA.

IV.2.2.1.2. Mouvements dans le profil

Lorsque l'action de la houle est frontale, le mouvement des matériaux dépend de la violence de l'attaque des lames, tout en restant dans le même profil : il n'y a pas ou peu de mouvements transversaux. (*Caminade, 1995*)

Dans le cas où la houle est faible (période de beau temps), on constate que les matériaux ont tendance à remonter le long de la plage qui, alors, s'engraisse. Les pentes deviennent plus fortes.

À l'inverse, pendant les tempêtes, les matériaux vont être transportés vers le bas de la plage. En tête de plage, la houle va attaquer le cordon littoral.

Si les matériaux sont entraînés trop loin et trop profondément, ils ne pourront plus être repris par les houles de beau temps dont l'action est plus faible que les houles de tempête. La disparition des matériaux entraîne alors l'appauvrissement du stock disponible (*Caminade, 1996*).

À long terme, l'usure des matériaux, qui rend ceux-ci plus mobiles, entraîne aussi une diminution inéluctable du stock. En l'absence d'apports, naturels ou artificiels, les plages sableuses ont une tendance naturelle à l'érosion.

Il n'existe pas de formulations analytiques pour quantifier les mouvements sédimentaires dans le profil. Des expérimentations par traceurs radioactifs permettent d'avoir une idée sur les mouvements ou plus précisément sur les volumes de sédiments sableux déplacés en fonction de la profondeur. On retiendra que :

- les masses de sédiments remaniées diminuent avec les profondeurs.
- des évolutions de plusieurs mètres sont observées sans que la tendance à long terme soit à l'érosion.

Les données disponibles ne permettent pas de préciser les évolutions saisonnières sur notre site d'étude. Néanmoins, au niveau de la plage, les observations sur le site à différentes périodes de l'année attestent d'une variation saisonnière :

- Profil d'hiver :

Dans notre région, l'hiver est la période pendant laquelle on observe de nombreuses tempêtes. La houle, en dégraissant la plage, va provoquer un raidissement du haut estran et un adoucissement de la partie basse. Ce phénomène est encore accentué si les houles ne sont pas frontales. On constate un basculement de la plage et un très fort dégarnissement de la partie la plus attaquée.

- Profil d'été

À la fin de l'hiver, les houles de beau temps vont reprendre les matériaux et modeler la plage. Les directions de ces houles n'étant pas les mêmes que celles d'hiver, le rivage n'a pas forcément la même direction. On estime que les différences de niveau été-hiver, dans certains endroits de la baie de Zéralda, peuvent être de 1 voire 2 m.

IV.2.2.1.3. Le courant littoral de houle

Lorsque la houle est inclinée par rapport au rivage, on constate l'apparition de courants de houle qui vont transporter les matériaux préalablement mis en mouvement (*Caminade, 1996*). Ce courant littoral, dirigé parallèlement à la côte, est confiné à l'intérieur de la zone de déferlement (*Villaret, 2004*).

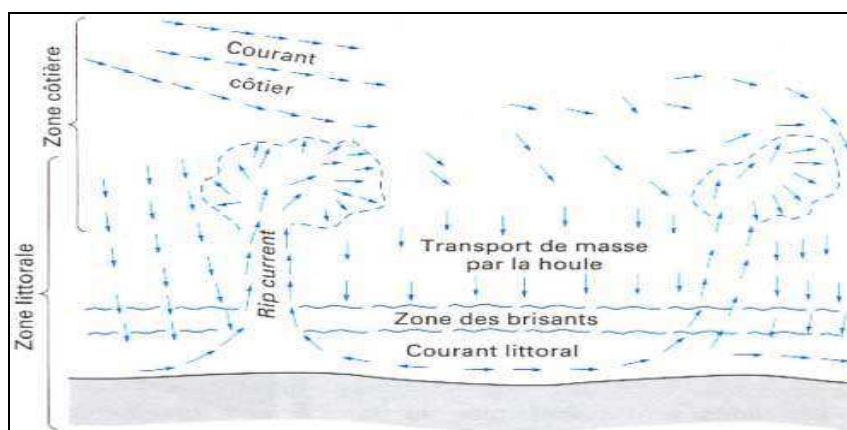


Figure IV.7 : Schéma général des courants près de la côte (*Sheperd et Inman, in Caminade, 1996*).

Le transport des matériaux se fait de façon inégale suivant la nature de la côte, l'existence ou non d'une barre et les conditions de houle. Il n'est donc pas possible de donner de formule générale sur le transport solide (*Caminade, 1996*). Toutefois, de nombreuses formules ont été proposées pour déterminer la vitesse du courant littoral. La formule de Longuet-Higgins (*Longuet-Higgins, 1970 in CECW-EH-D, 1992*) décrivant la vitesse du courant littoral est la suivante :

$$V = (k m/f_w) (g H_b)^{1/2} (\sin 2 \alpha_b)$$

Où : k : coefficient de proportionnalité sans dimension.

- m : pente moyenne des fonds.
- f_w : coefficient de frottement.
- H_b : hauteur significative de la houle au déferlement.
- α_b : incidence de la houle au déferlement.

Cette même formule, de Longuet-Higgins, modifiée par le **Cerc** « *Coastal Engineering Research Center de l'US Army* », est la plus communément utilisée. Elle donne la valeur maximale du courant :

$$V = 20,7 m (g H_b)^{1/2} (\sin 2 \alpha_d)$$

Pour le littoral de la plage Palm Beach-Azur, qui présente une pente moyenne de 1%, une houle se présentant au déferlement avec une incidence $\alpha_d = 10^\circ$ engendre :

- un courant de $V = 0,4$ m/s pour $H_b = 3$ m.
- un courant de $V = 0,5$ m/s pour $H_b = 5$ m.

Autres échanges importants peuvent se faire entre la côte et le large par des courants orientés vers le large appelés courants de retour ou « Rip currents » (**figure IV.7**), ces courants traversent la zone de déferlement. Les écoulements sont concentrés dans des zones étroites, sensiblement perpendiculaires à la côte et séparés de façon régulière. Ces courants peuvent être très importants et dépasser le m/s.

IV.2.2.1.4. Le transit littoral

La direction résultante et l'importance du transit littoral dépendent principalement de la hauteur, de la période et de la direction de la houle (**Migniot, 1989**).

L'existence d'un transit résultant peut être détectée par la morphologie de la côte : flèches sédimentaires, accumulations sur la face d'un épi, d'une jetée portuaire, etc.

Le transit littoral s'effectue principalement selon deux processus (**SGH, 1989**):

- L'effet des vagues sur la plage, la vague fait remonter le matériau suivant la direction de la houle, en se retirant le matériau redescend suivant la ligne de plus grande pente, le mouvement résultant est parallèle à la côte, c'est le transport par jet de rives.
- Le déferlement et le courant côtier, le matériau est remis en suspension par la houle et transporté par le courant littoral.

Les mesures du transit littoral en nature donnent des indications qualitatives très importantes (sens résultant, intensité) mais rarement des données quantitatives précises.

De nombreuses formules donnant le transit littoral, c'est-à-dire la quantité de sédiments transportés par la houle le long du littoral, ont été proposées par différents auteurs. Sogreah suggère d'appliquer la formule la plus fréquemment utilisée, celle du **Cerc**, en considérant un littoral rectiligne et en supposant qu'il n'y ait pas de gradient longitudinal des hauteurs de houle, la formule s'écrit (**SGH, 2010**):

$$Q (m^3/s) = (K_1/42) (H_s^2 C_g)_b \cdot \sin 2\alpha_{bs} \cdot t$$

Où :

- b : indice mentionnant qu'il faut prendre en compte les conditions de déferlement.
- C_g : vitesse de groupe.
- H_s : hauteur significative de la houle en m.
- α_{bs} : angle entre la crête des houles déferlantes et le trait de côte.
- t : temps d'action de la houle en secondes = $(365j \times 24 H \times 3600s) \cdot f (\%) / 100$, avec $f(\%)$ fréquence d'observation.
- K_1 : paramètre qui tient compte de la nature du sédiment et de la morphologie.
- $\tan \alpha$: pente moyenne des fonds entre le haut de plage et la zone de déferlement.

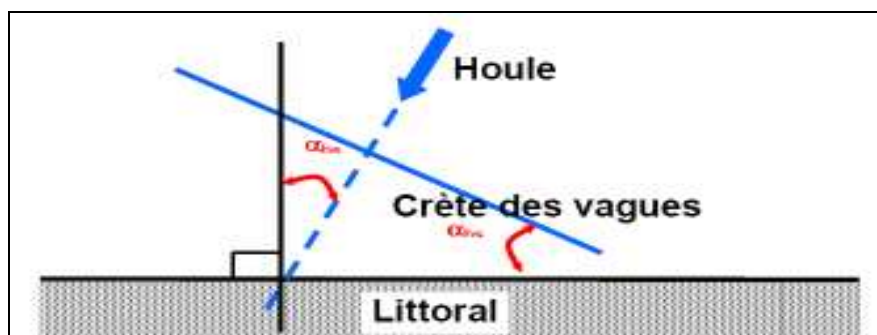


Figure IV.8 : Angle entre la crête des houles déferlantes et le trait de côte (Viguié, 2001).

La formule du Cerc, présentée ci-dessus, a été appliquée au site d'étude pour l'ensemble des conditions des houles à la côte (à -15m NGA) sur la période 1958-2001. Comme on l'a évoqué précédemment, les résultats des 60 calculs du climat annuel de houles (établis par Sogreah) sont utilisés pour la détermination de la capacité de transport, Sogreah fournit uniquement les transits potentiels (capacité de transport) moyens obtenus en considérant une orientation moyenne du rivage au N210°- N30° :

Tableau IV.1 : Transits potentiels devant la plage de Palm Beach-Azur (SGH, 2010).

Transit potentiel	Ordre de grandeur (m ³ /an)
NE vers SW	-30000
SW vers NE	35000 à 40000
Transit potentiel net résultant	5000 à 10000
Transit potentiel brut	65000 à 70000

Le transit potentiel résultant est orienté vers le Nord-Est et est estimé entre 5000 et 10000 m³/an. Selon Sogreah, on retiendra, que la faiblesse du stock sédimentaire nous conduit à dire que le transit littoral est inférieur au transport potentiel, il est plutôt inférieur à 5000m³ et peut « basculer » dans un sens ou dans un autre en fonction de la variabilité interannuelle des houles et de leur direction de provenance.

Le transit littoral varie au cours de l'année car il dépend du régime des houles. Ainsi, durant la période hivernale (novembre à avril), le transit littoral est orienté Sud-Ouest/Nord-Est, alors que durant la période estivale (mai à octobre), le transit littoral est inversé et orienté Nord-Est/Sud-Ouest.

Pendant la période estivale, les transits sont faibles car les houles sont faibles et les tempêtes quasi inexistantes. De plus, l'intensité de la capacité de transport des sédiments est très variable en fonction du climat de houle annuel. Le **tableau IV.2** présente les valeurs du transit potentiel pour chaque année comprise entre 1958 à 2001.

Tableau IV.2 : Transit potentiel (m³/an) devant la plage de Palm Beach-Azur par année de 1958 à 2001. (SGH, 2010)

Années	Transit potentiel	Transit potentiel	Transit potentiel	Transport global	Années	Transit potentiel	Transit potentiel	Transit potentiel	Transport global
--------	-------------------	-------------------	-------------------	------------------	--------	-------------------	-------------------	-------------------	------------------

	net (m ³ /an)	NE>SO (m ³ /an)	SO>NE (m ³ /an)	(m ³ /an)		net (m ³ /an)	NE>SO (m ³ /an)	SO>NE (m ³ /an)	(m ³ /an)
1958	- 7134	- 50433	43299	93732	1980	- 27685	- 58527	30843	89370
1959	- 4871	- 41150	36279	77429	1981	16841	- 26759	43600	70359
1960	5439	- 40343	45782	86124	1982	- 24131	- 46066	21934	68000
1961	11662	- 19115	30777	49893	1983	5828	- 23182	29011	52193
1962	- 29 675	- 55776	26101	81877	1984	4976	- 37146	42121	79267
1963	22027	-22768	44795	67563	1985	11473	- 20293	31766	52059
1964	9499	- 26227	35726	61953	1986	14358	- 27948	42306	70254
1965	13639	-24211	37851	62062	1987	2385	- 28314	30699	59013
1966	6542	- 33156	39698	72854	1988	- 2895	- 25523	22628	48151
1967	- 19440	- 41419	21979	63399	1989	12949	- 18157	31106	49264
1968	11319	- 26530	37849	64378	1990	7815	- 18218	26033	44251
1969	21402	-32704	54106	86811	1991	4087	- 18919	23006	41925
1970	12432	- 21049	33481	54529	1992	- 4457	- 33176	28719	61895
1971	31269	- 17761	49030	66791	1993	13675	- 17582	31257	48839
1972	13708	- 28905	42613	71518	1994	- 1699	- 27847	26148	53995
1973	- 10446	- 41100	30654	71754	1995	11131	- 24800	35930	60730
1974	- 8177	- 37384	29207	66592	1996	35982	- 62085	98068	160153
1975	6110	- 28754	34864	63617	1997	12888	- 25249	38137	63386
1976	25442	- 23551	48993	72544	1998	- 6809	- 34401	27593	61994
1977	28366	- 12399	40764	53163	1999	3549	- 32585	36134	68718
1978	12322	- 36456	48778	85234	2000	25444	- 16973	42417	59390
1979	20320	- 32210	52529	84739	2001	3641	- 31347	34988	66336
Moy	7807	- 31518	39325	70843	Moy	5425	- 29777	35202	64979
Min	- 29675	- 55776	21979	49893	Min	- 27685	- 62085	21934	41925
Max	31 269	- 12399	54 106	93732	Max	35982	- 16973	98068	160153

Il est observé une faible variabilité interannuelle au niveau du transit potentiel net. En effet, le transit potentiel Sud-Ouest/Nord-Est varie annuellement sur la période 1958-2001 entre 20000 et 100000 m³/an et celui orienté Nord-Est/Sud-Ouest varie annuellement sur cette même période entre 10000 et 60000 m³/an.

La valeur de la dérive littorale résultante est assez faible et on est proche d'un équilibre à la côte entre les transits Nord-Est / Sud-Ouest et Sud-Ouest / Nord-Est avec toutefois un transit littoral Sud-ouest/Nord-Est dominant.

IV.2.2.2. Action du vent sur les sédiments

Les vents sont susceptibles de transporter à grande distance d'importantes quantités de sable des hauts de plage (*Migniot, 1989*).

La mise en mouvement des particules sableuses se fait dès que la contrainte exercée par le vent sur les particules dépasse une valeur critique. Cette valeur dépend de la vitesse du vent, des caractéristiques du matériau (volume, forme, masse volumique, teneur en eau), du degré d'hygrométrie de l'air et de la nature de la végétation qui peut contrarier l'effet du vent (*Caminade, 1996*).

L'approche théorique pour estimer les transports éoliens est très difficile, seules des mesures peuvent donner des valeurs relativement précises des transports éoliens.

IV.2.2.3. Action du courant sur les sédiments

L'entraînement des sédiments aura lieu si la contrainte de cisaillement τ_c qui se développe sur le fonds est supérieure à une certaine valeur qui dépend en partie des caractéristiques du matériau (densité, granulométrie, ...) (*Oliveros, 1986*).

Au moment du début de l'entraînement, la contrainte tangentielle τ_c est suffisante pour vaincre les forces de frottements et de cohésion sur le fond. Le début d'entraînement des sédiments immergés non cohésifs, au fond de l'écoulement fluide a fait l'objet de nombreuses recherches (*Viguié, 2001*). Il est important de définir 2 paramètres adimensionnels : (*Migniot, 1989 in SGH, 1989*)

- Diamètre sédimentologique du matériau :

$$D^* = (\rho g / v^2)^{1/3} \cdot D$$

- Nombre de Reynolds de frottements

$$R^* = (u^* \cdot D / v)$$

Où D : diamètre du grain.

u* : vitesse critique de frottement (ou de cisaillement).

ρ : masse volumique du sédiment (2650 kg/m³ pour des sables quartzeux).

v : la viscosité cinématique (10⁻⁶ m²/s) à 20°C.

Ainsi, il est classique d'utiliser les formulations simplifiées (*Migniot, 1989 in SGH, 1989*) suivantes :

$$\tau_c (N/m^2) = 0,8 D (mm) \text{ Ou } \tau_c = u^{*2} \rho$$

Avec

$$u^*(cm/s) = 2,8 D^{1/2}$$

En considérant des écoulements permanents et uniformes, l'utilisation de la relation entre u* et la vitesse moyenne U :

$$u^* = 0,15 (D/d)^{1/6} U$$

permet d'évaluer la vitesse U qui occasionne le début d'entraînement en fonction de d et D, d étant la profondeur.

Le tableau **IV.3** donne des ordres de grandeur de u* et de la vitesse du courant U à 1 m du fond pour qu'il y ait entraînement d'un grain de diamètre D sur le littoral de Palm Beach.

Tableau IV.3 : Vitesse de début d'entraînement en fonction du diamètre du grain sur le littoral de Palm Beach.

D (mm)	u*(cm/s)	U (m/s) à 1 m du fond
0,1	0,9	0,20 à 0,25
0,2	1,3	0,30 à 0,35
0,5	2	0,4 à 0,5
1	2,8	0,6 à 0,7
2	4	0,9 à 1

IV.2.2.4. Bilan sédimentaire

Pour une zone littorale donnée, le bilan sédimentaire consiste à intégrer dans l'évolution entre deux états les apports et pertes naturelles et/ou artificielles afin de définir les valeurs de la dynamique sédimentaire (*Caminade, 1996*). Ce dernier est estimé dans les sections qui suivent à partir de l'analyse des bathymétries et des profils à la côte.

IV.2.3. Modélisation numérique

En zone côtière, la houle et les courants jouent des rôles complémentaires sur la dynamique sédimentaire : la houle a pour effet de favoriser la mise en suspension des sédiments qui sont ensuite transportés par les courants moyens. La variation spatiale des taux de transport entraîne des phénomènes d'érosion ou d'accrétion, avec des conséquences importantes pour la gestion du littoral (*Villaret, 2003*). Il est nécessaire de construire des outils de modélisation permettant de prédire précisément les taux de transport et les évolutions morpho-dynamiques qui en résultent (*Villaret, 2004*). Différents modèles ont été mis en œuvre par Sogreah dans la présente étude.

IV.2.3.1. Modélisation numérique avec MOPLA

La détermination de la houle devant la plage de Palm Beach-Azur nécessite la mise en place d'un modèle mathématique de propagation des houles entre le large et le littoral.

Le modèle **Mopla**, exploité par Sogreah, permet d'estimer la propagation de la houle en zone côtière et les courants littoraux qu'elle engendre.

IV.2.3.1.1. Principe

Le modèle numérique **Mopla** calcule la propagation des états de mer entre la zone côtière (fonds de -15m NGA environ) et la plage en prenant en compte les phénomènes locaux de réfraction/diffraction sur les fonds et les ouvrages littoraux mais aussi les phénomènes de déferlement des vagues (*SGH, 2010*).

Il prend en compte les phénomènes de réfraction dus à la profondeur, le frottement sur les fonds, le déferlement dû à la profondeur et à la cambrure et les flux sédimentaires.

Selon Sogreah, les calculs sont effectués sur une grille, en chaque point de cette dernière il est fourni :

- La hauteur significative et direction moyenne de la houle.
- Les vitesses et directions des courants engendrés par la houle.
- Le transport sédimentaire.

Cette modélisation permet de calculer également les courants de déferlement qui sont le moteur principal des évolutions des plages.

IV.2.3.1.2. Emprise du modèle

L'emprise du modèle (*figure IV.9*) s'étend du Sud vers le Nord et à une taille de 1,25km x 2,4km et permet de propager l'ensemble des houles d'incidence comprise entre N270° et N350° des fonds de -15m NGA jusqu'à la côte. La bathymétrie utilisée pour la création des fonds est issue du levé bathymétrique de 2009 ainsi que de la carte **Shom** n°3030.

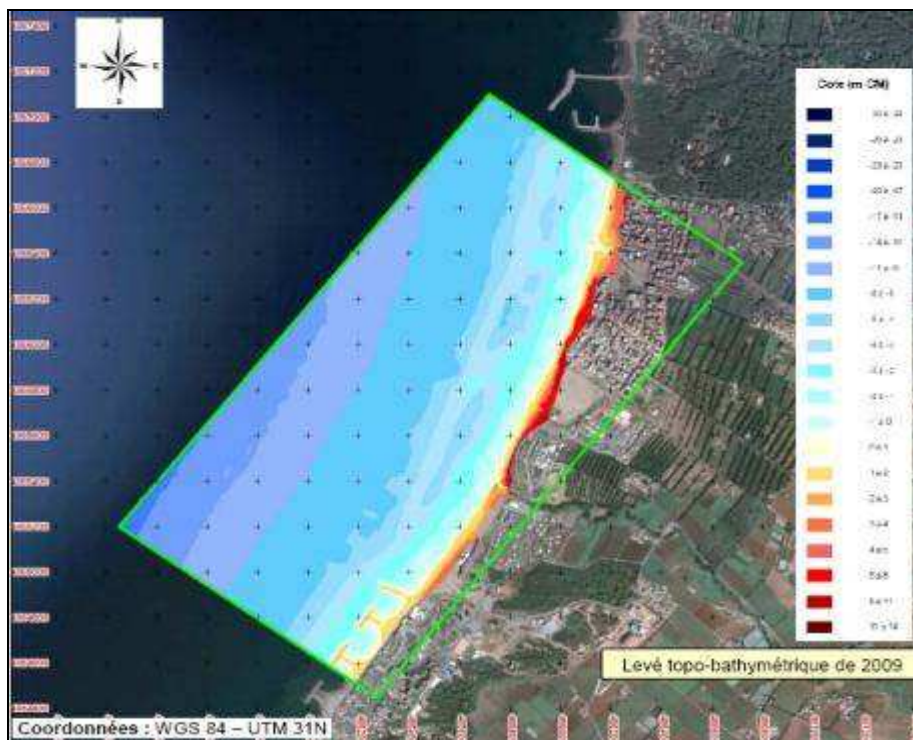


Figure IV.9 : Emprise du modèle Mopla sur Palm Beach (SGH, 2010).

IV.2.3.1.3. Calculs de transfert

Sogreah a réalisé cinq cas de calculs de propagation des états de mer de -15 m NGA à la côte par le modèle MOPLA. Ces cas sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.4 : Cas de houle appliqués pour le calcul de propagation avec le modèle Mopla.

	Cas de houle			
	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)
H1	270	1	6	0
H2	310	1	6	0
H3	350	1	6	0
T1	285	5,70	10	1
T2	320	5,70	12	1

Les houles de tempête T1 et T2 ont été déterminées à partir des conditions de tempêtes décennales au large les plus fréquentes. Ces houles du large ont été transférées à -15 m devant la plage de Palm Beach-Azur et ont permis d'établir les tempêtes T1 et T2 (SGH, 2010).

T1 au large : N280° Hs = 6,8 m Tp = 10s

T2 au large : N340° Hs = 7 m Tp = 12s

Les cas de houle H1 à H3 ont permis d'étudier l'effet des faibles houles fréquentes (usuelles) sur l'agitation et sur les courants de déferlement à la côte. L'ensemble des houles susceptibles d'atteindre la plage de Palm Beach-Azur a été étudié : N270° à N350°.

Chacun des états de mer a été modélisé à l'aide d'une représentation théorique de la distribution fréquentielle de l'énergie selon un spectre de type Jonswap (SGH, 2010).

IV.2.3.1.4. Analyse des résultats

L'ensemble des résultats issus des calculs avec le modèle Mopla, dans la configuration actuelle du site, est présenté sur les **figures IV.10 à IV.13**.

On note que :

- Du fait de la relative cylindricité des fonds devant le site et de la plage quasi rectiligne, on n'observe pas sur les **figures IV.11 et IV.12** des zones de forte concentration de la houle. En effet, la propagation de la houle en zone côtière se fait globalement de manière homogène et linéaire tout le long de la zone d'étude. Ainsi, les courants de déferlement engendrés par la houle sont monodirectionnels le long de la zone d'étude et relativement réguliers en intensité.
- Les houles en provenance du Sud-Ouest, entre N270° et N300° (calculs H1 et T1), engendrent des courants de déferlement et par conséquent un transit littoral orientés du Sud-Ouest vers le Nord-Est le long du littoral. On a vu précédemment que les houles les plus fréquentes proviennent majoritairement du Sud-Ouest comme les cas de calcul H1 et T1.
- Les houles en provenance du Nord-Est, entre N300° et N360° (calculs H2, H3 et T2), engendrent des courants de déferlement et un transit littoral orientés du Nord-Est vers le Sud-Ouest le long du littoral.
- Plus l'angle par rapport à la normale du trait de côte (N300°) est important et plus les courants engendrés par la houle sont faibles. Ainsi, les courants avec H2 sont inférieurs à ceux avec H3.
- Malgré la relative homogénéité de l'intensité des courants devant le littoral, on remarque que pour des houles de Sud-Ouest, les courants sont plus forts sur la partie Sud de la zone d'étude et c'est l'inverse pour les houles de Nord-Est.
- Les courants engendrés par les houles usuelles de $H_s=1$ m à -15m NGA sont de l'ordre de 0,05 à 0,1 m/s, localement ils peuvent atteindre un maximum de 0,15 à 0,2 m/s.
- En condition de tempêtes, les courants sont un peu plus forts avec une moyenne de l'ordre de 0,1 m/s mais ils ne dépassent rarement les 0,2 m/s.

Globalement, les résultats de la modélisation avec **Mopla** en condition de plage « actuelle » confirment les résultats obtenus avec l'étude du transit littoral et de la dynamique sédimentaire, à savoir des courants et un transit littoral plutôt faibles et majoritairement orientés vers le Nord-Est.

D'autres calculs avec les mêmes conditions de houle mais pour des aménagements de plage différents sont réalisés dans les sections qui suivent.

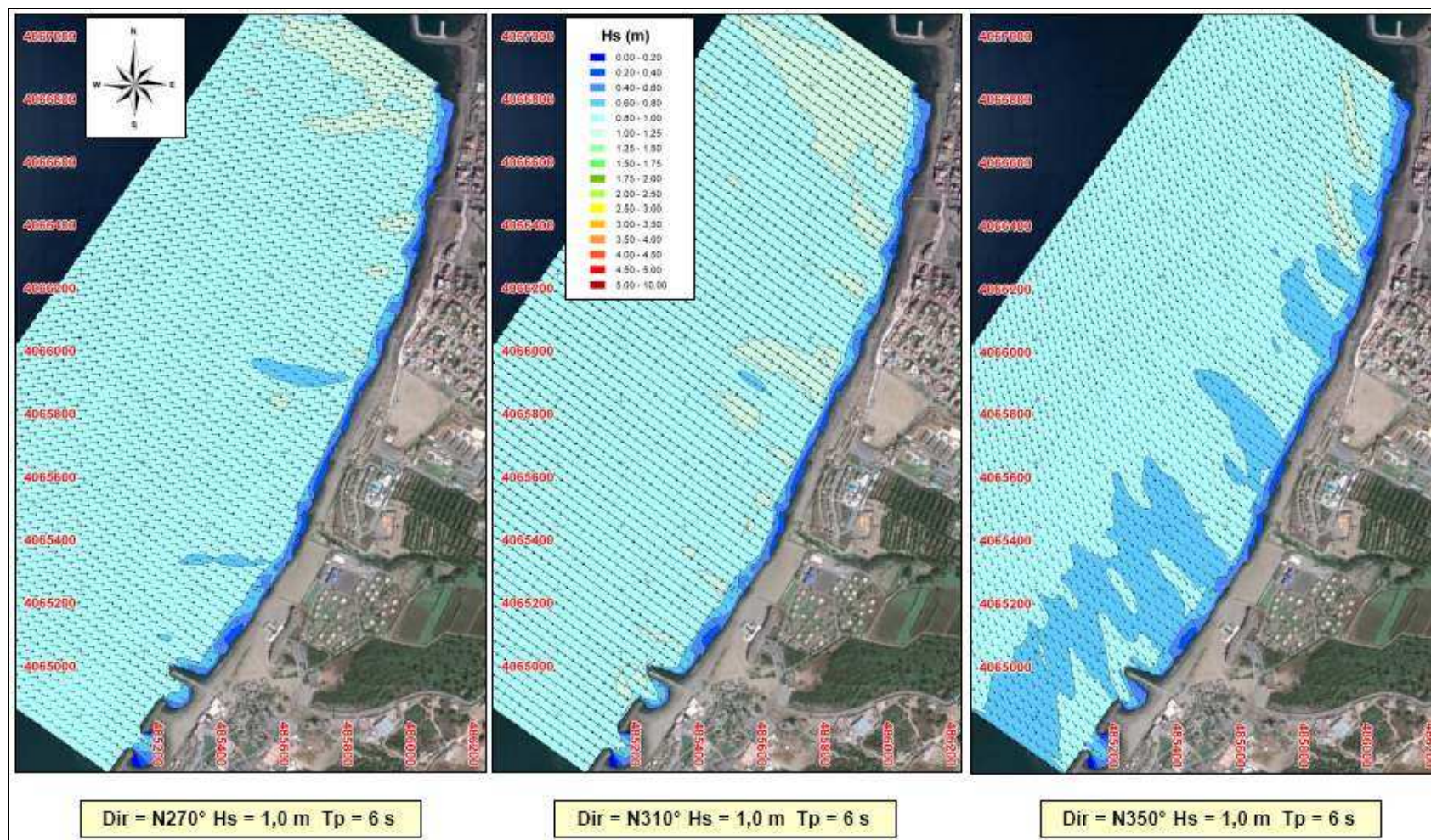


Figure IV.10 : Résultats de modélisation de la propagation de différentes houles entre -15m et la côte de Palm Beach avec modèle Mopla (SGH, 2010)

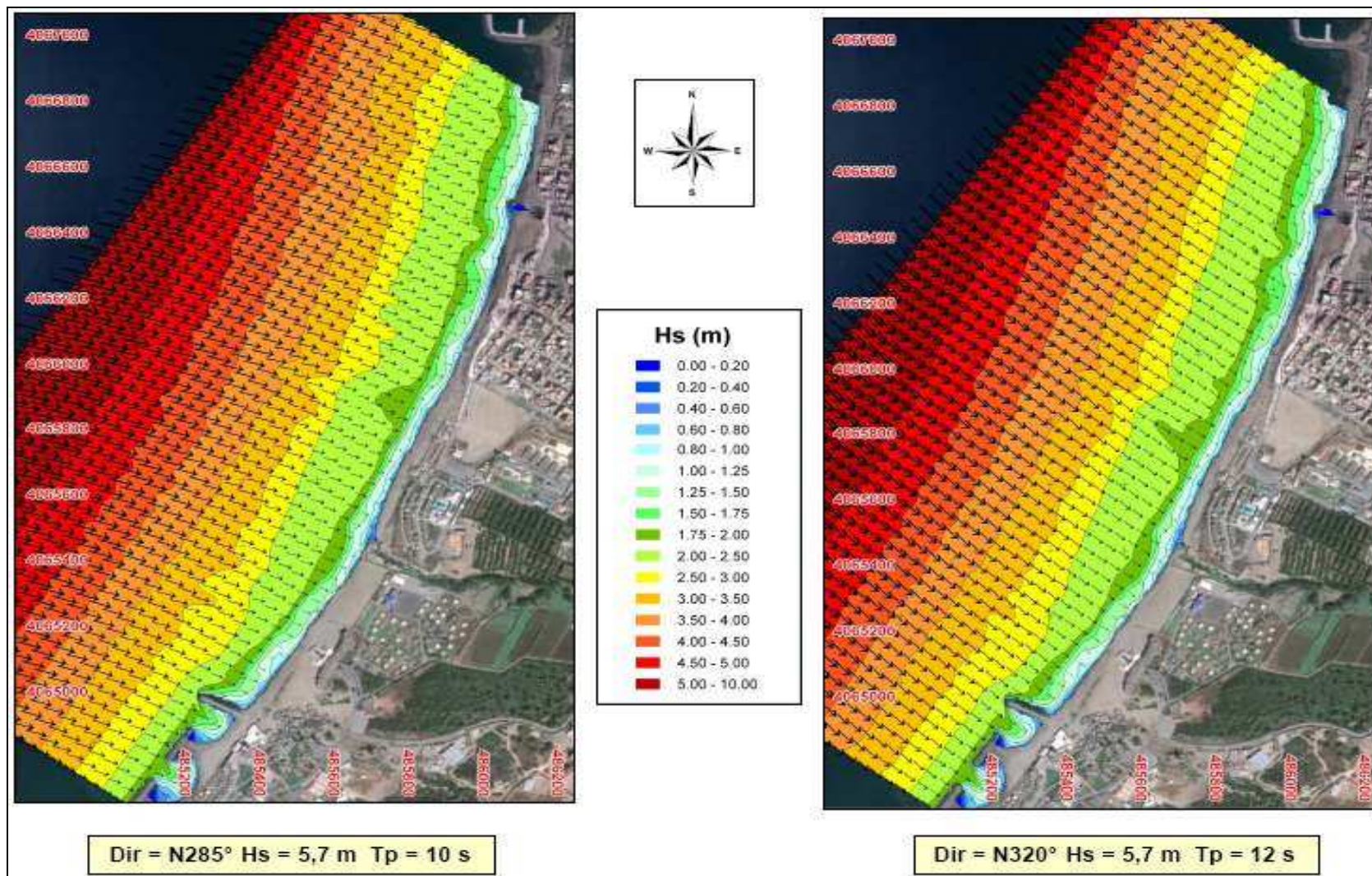


Figure IV.11 : Résultats de modélisation de la propagation de différentes houles entre -15m et la côte de Palm Beach-Azur avec modèle Mopla. (SGH, 2010)

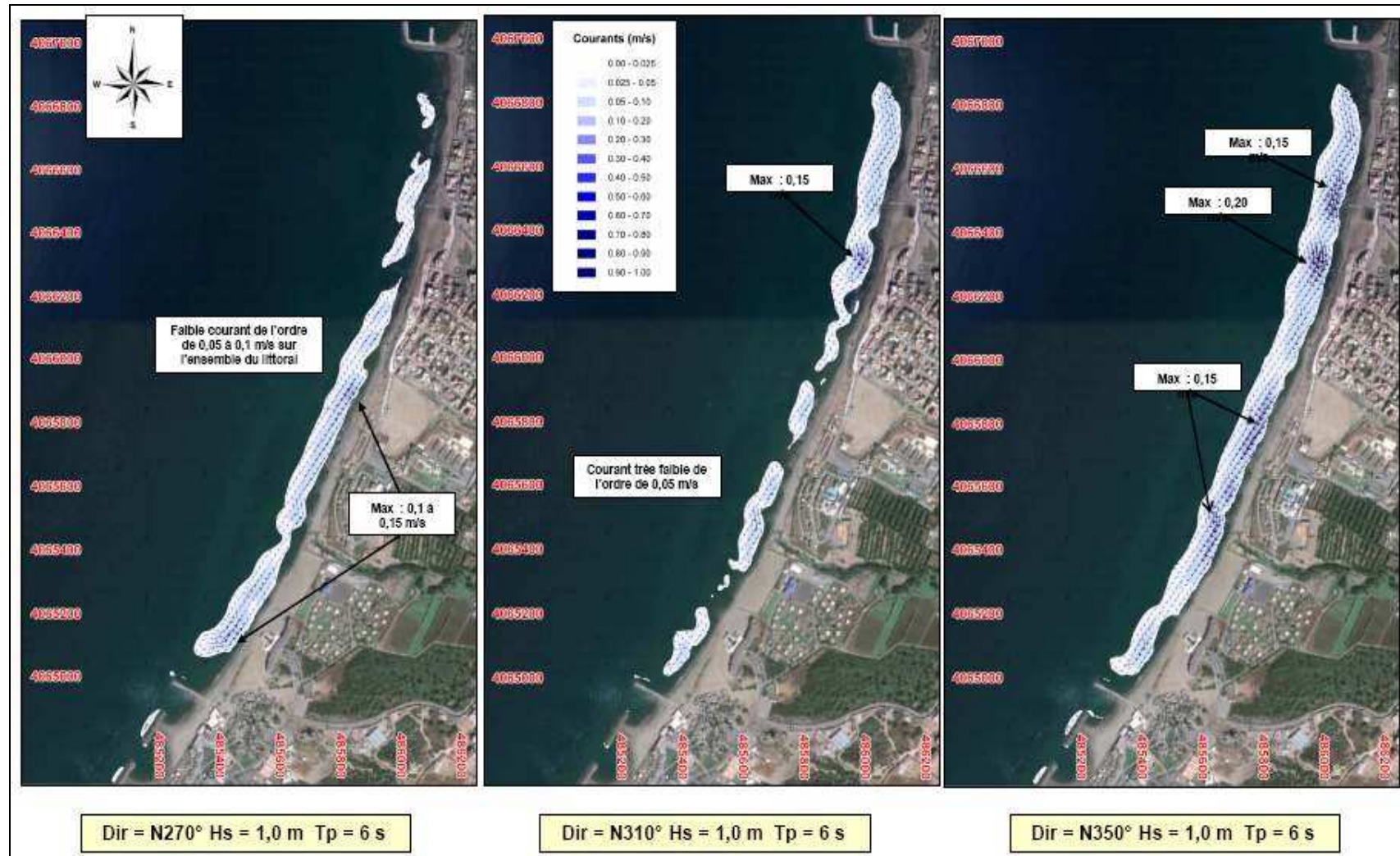


Figure IV.12 : Résultats de modélisation des courants côtiers selon différents cas de houles à Palm Beach-Azur avec modèle Mopla. (SGH, 2010)

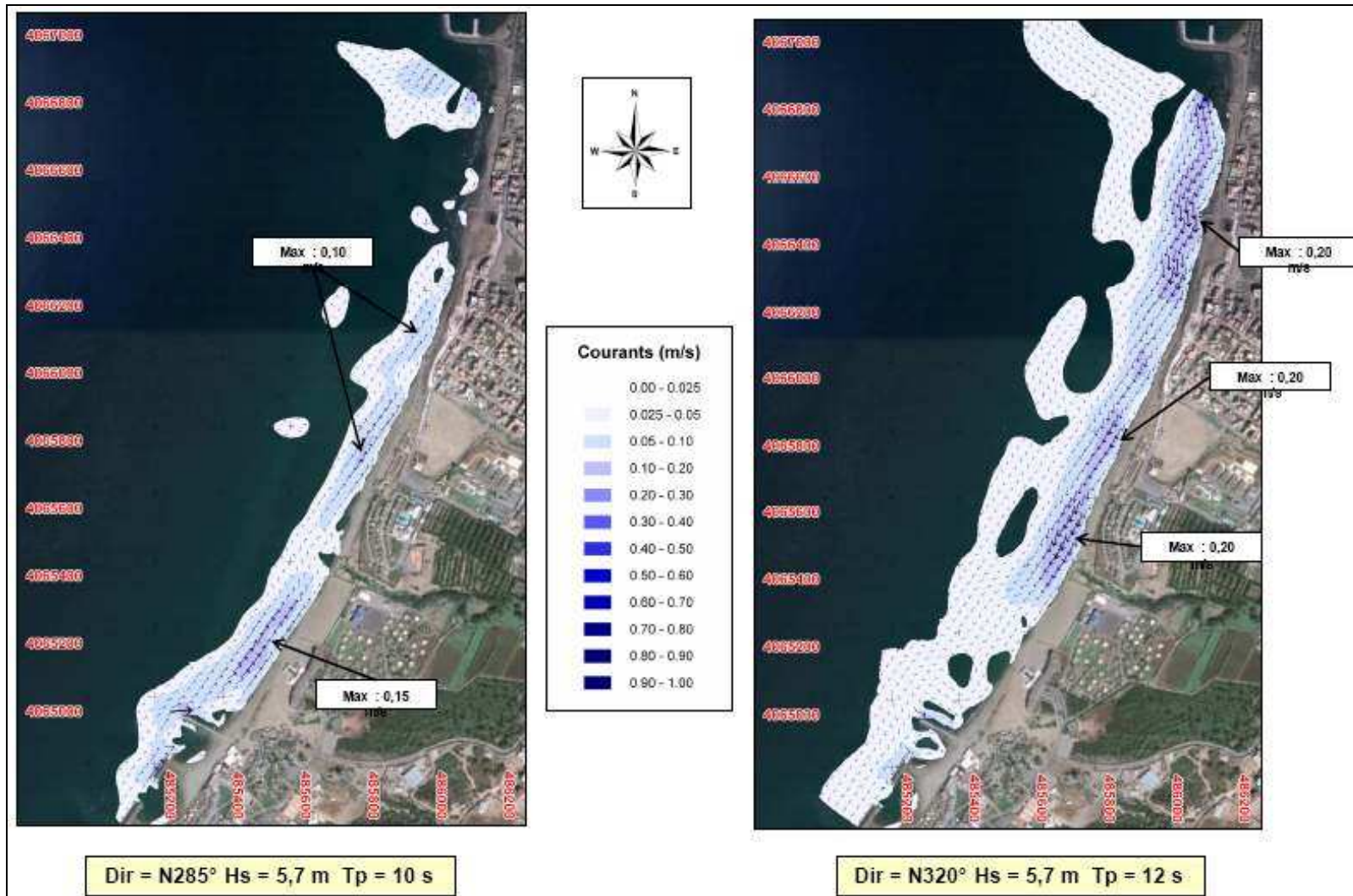


Figure IV.13 : Résultats de modélisation des courants côtiers selon différents cas de houles à Palm Beach-Azur avec modèle Mopla (SGH, 2010)

IV.2.3.2. Modélisation numérique avec modèle GENESIS

IV.2.3.2.1. Présentation du modèle

Genesis (Generalized model for Simulating Shoreline change) est un système de modélisation numérique de l'évolution du trait de côte développé grâce à la collaboration des institutions suivantes (d'après Sogreah) :

- **Cerc**, (Laboratoire d'expérimentation des voies navigables de l'armée américaine), Vicksburg, Mississippi, USA.
- Département de Recherche en Ressources en Eau (TVLR), Institut de Technologie de Lund, Université de Lund, Lund, Suède

Il présente les caractéristiques suivantes :

- Calcul de l'évolution du trait de côte engendrée par les gradients du transport sédimentaire littoral.
- La zone du littoral étudiée va de 1 à 100 km environ.
- Les durées étudiées vont de 1 à 20 ans.

Ses fonctions sont les suivantes :

- Nombres presque arbitraires d'épis, de brise-lames forains, de rechargements de plages et de digues.
- La plupart des combinaisons d'ouvrages et de rechargements de plages sont acceptées.
- Le contournement du sable au niveau des épis et des jetées saturées est simulé.
- Diffractions multiples derrière les ouvrages.
- Transmission de la houle à travers les brise-lames forains.

Les limites du modèle se résument comme suit :

- Pas de possibilité d'inclure les fluctuations du niveau de marée.
- Transport sédimentaire provoqué par l'action de la houle uniquement.
- Limites inhérentes à la théorie de modélisation de l'évolution du trait de côte.

IV.2.3.2.2. Principe

Le modèle **Genesis**, qui permet la simulation du changement de la ligne de rivage sur des périodes allant de quelques mois à des dizaines d'années et où les vagues sont le moteur essentiel des mouvements sédimentaires, est unidimensionnel : seul le trait de côte est utilisé pour représenter l'évolution de la plage. L'hypothèse de base est que, à terme, le profil se déplace par translation sans modification de sa forme (pente constante au cours des évolutions) selon les processus d'érosion ou de sédimentation (*SGH, 2010*).

Ainsi, l'évolution du trait de côte est calculée en fonction :

- De la distribution du transport solide le long du littoral dépendante des variations des conditions de houle (hauteur, période, direction).
- Des apports de matériaux éventuels, soit naturels (par les cours d'eau), soit artificiels (rechargements, extractions).
- De la présence d'ouvrages côtiers constituant des obstacles au transport sédimentaire (épis, fronts de mer, brise-lames,...).

Ce modèle, exploité par Sogreah, permet de simuler l'évolution du trait de côte en prenant en compte les changements spatio-temporels du transit littoral, les ouvrages (digues portuaires, épis, brise-lames), les apports et/ou prélèvements de sable.

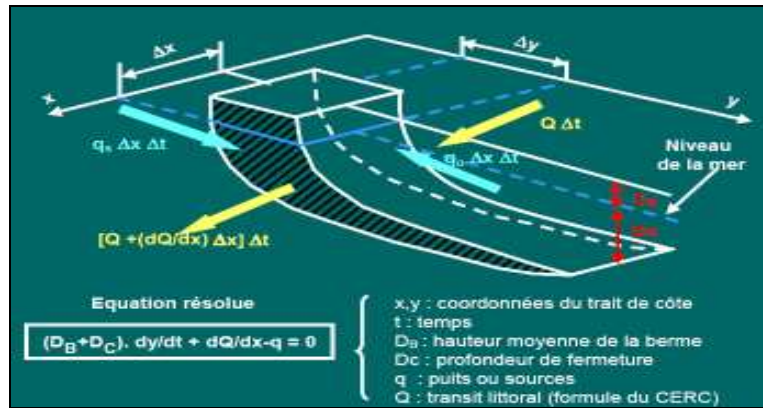


Figure IV.14 : Code du modèle Genesis (SGH, 2010).

IV.2.3.2.3. Emprise du modèle

Le modèle a été orienté dans un repère orthonormé. L'axe horizontal est orienté Ouest-Est et l'axe vertical orienté Sud-Nord.

Pour la présente étude, le modèle couvre le littoral de la plage de Palm Beach-Azur sur un linéaire de 1800 m x 1700m (figure IV.15). Le point d'origine de l'axe vertical du modèle est situé à X = 485 000 m et Y = 4 064 900 m en coordonnées WGS84, fuseau UTM 31 Nord. La zone est discrétisée par 91 cellules de 20 m. L'ensemble des ouvrages existants le long du littoral de l'étude est schématisé dans le modèle.

Le tableau ci-après donne les positions des zones caractéristiques du littoral pour ce modèle.

Tableau IV.5 : Séparation et indexation des zones caractéristiques du littoral de Palm Beach.

Secteurs	N° de cellules	Distance à l'origine
Zone A : Secteur entre l'épi Sud et l'Oued	1 à 26	0 à 500 m
Zone B : Secteur entre l'Oued et le remblai	26 à 50	500 à 980 m
Zone C : Secteur devant le remblai	50 à 72	980 à 1420 m
Zone D : Secteur au Nord du remblai	72 à 91	1 420 à 1800 m

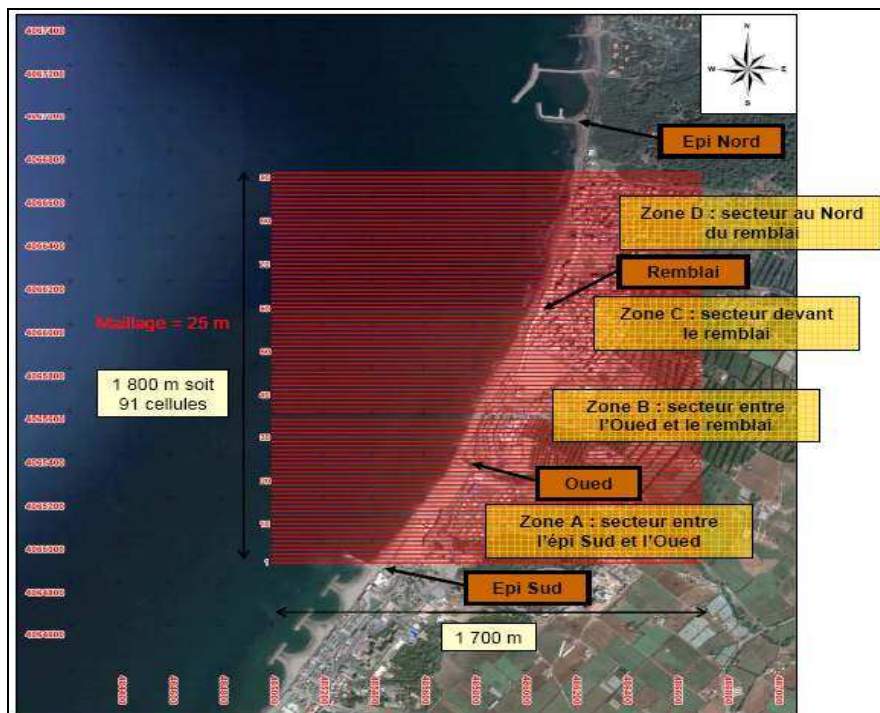


Figure IV.15 : Emprise du modèle Genesis sur Palm Beach-Azur, (SGH, 2010).

IV.2.3.2.4. Calage du modèle

Pour réaliser le calage du modèle sur la période 1999-2009, on y a introduit (en plus des données citées auparavant) le trait de côte de 1999 issu de la photo aérienne de l'Institut National de Cartographie (*in LEM, 1999*). En fonction de la configuration de la plage, le calage donne :

- L'évolution du trait de côte sur la période considérée, sur l'ensemble de la zone (les taux d'avancée / recul exprimés en m/an). Le résultat modèle étant superposé aux évolutions nature dans la *figure IV.16*.

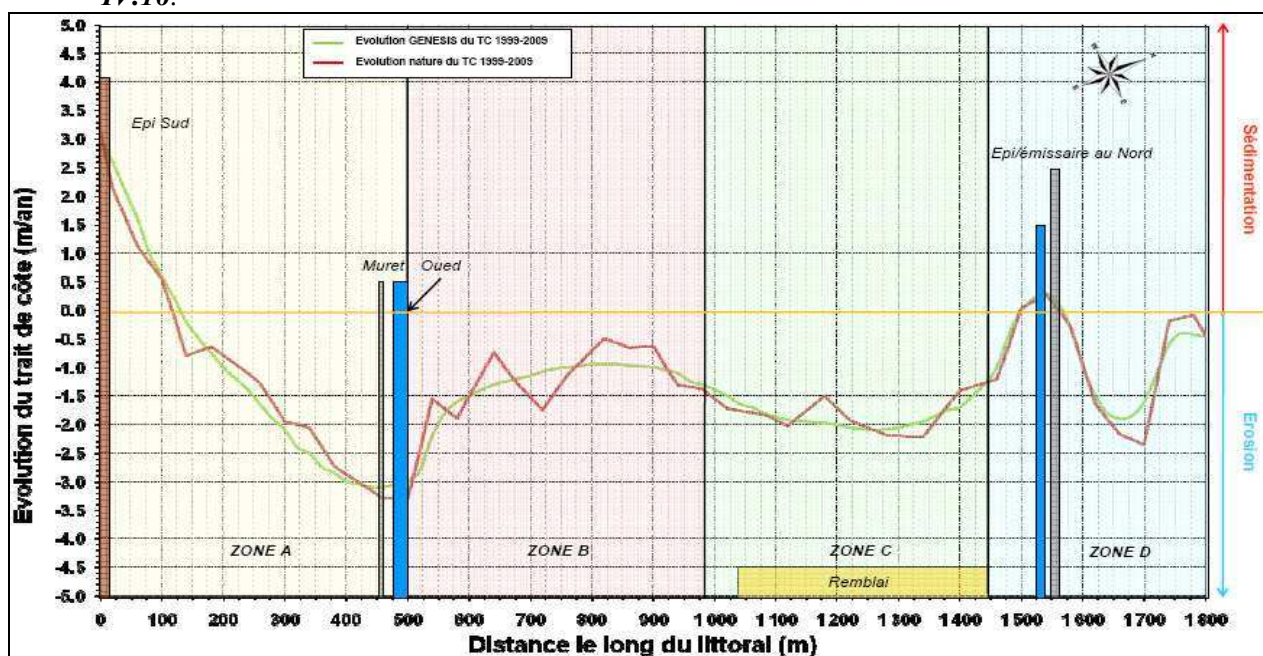


Figure IV.16 : Calage du modèle Genesis sur la période 1999-2009.
Evolution du trait de côte de Palm Beach en m/an (*SGH, 2010*).

- Les positions du trait de côte initial 1999 et du trait de côte 2009 « modèle » données par le modèle sont présentées sur l'image Google Earth de 2009 (*figure IV.18*).



Figure IV.17 : Traits de côte de 1999 (nature) et 2009 (modèle Genesis) de Palm Beach (*SGH, 2010*).

Globalement, le modèle reproduit correctement les tendances évolutives observées en nature :

- Sur la zone A, une érosion croissante du Sud vers le Nord avec toutefois une zone d'engraissement d'une centaine de mètres contre l'épi Sud.

- Sur les zones B et C, une érosion présente sur tout ce littoral avec un taux de recul important de l'ordre de -2 à -3 m/an dans le secteur de l'Oued au Sud et sur tout le littoral devant le remblai.
- Sur la zone D, l'émissaire permet au trait de côte de se stabiliser et d'avoir un point d'appui. De part et d'autre de celui-ci, la plage est en net recul.

L'évolution comparée par grands secteurs du trait de côte de Palm Beach-Azur est donné dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.6 : Evolution du trait de côte de Palm Beach entre nature et modèle de 1999 à 2009.

	Secteurs	Evolution nature	Evolution Genesis
A	Entre l'épi Sud et l'Oued	-1,10 m/an	-1,09 m/an
B	Entre l'Oued et le remblai	-1,20 m/an	-1,28 m/an
C	Devant le remblai	-1,84 m/an	-1,86 m/an
D	A l'Est du remblai	-0,86 m/an	-0,79 m/an

L'ensemble des résultats obtenus en phase du calage du modèle d'évolution du trait de côte représente fidèlement les tendances évolutives observées en nature sur l'emprise du modèle.

On peut donc considérer que le modèle est apte à simuler différentes conditions d'exploitation d'un point de vue de l'évolution du littoral.

Le premier calcul qui sera lancé consistera en la reproduction de l'évolution future du trait de côte dans la configuration actuelle de la plage, ce calcul constituera « l'essai de référence ». Il sera suivi par les réalisations des essais avec les différentes variantes d'aménagement qui seront proposées par la suite.

IV.2.3.2.5. Evolution future du trait de côte dans la configuration actuelle

Le calcul de l'évolution future du trait de côte (à moyen terme : 10 ans) dans la configuration actuelle (trait de côte 2009) a été réalisé sur la période 2009-2019. Les résultats sont présentés ci-dessous, de la même manière que pour le calage.

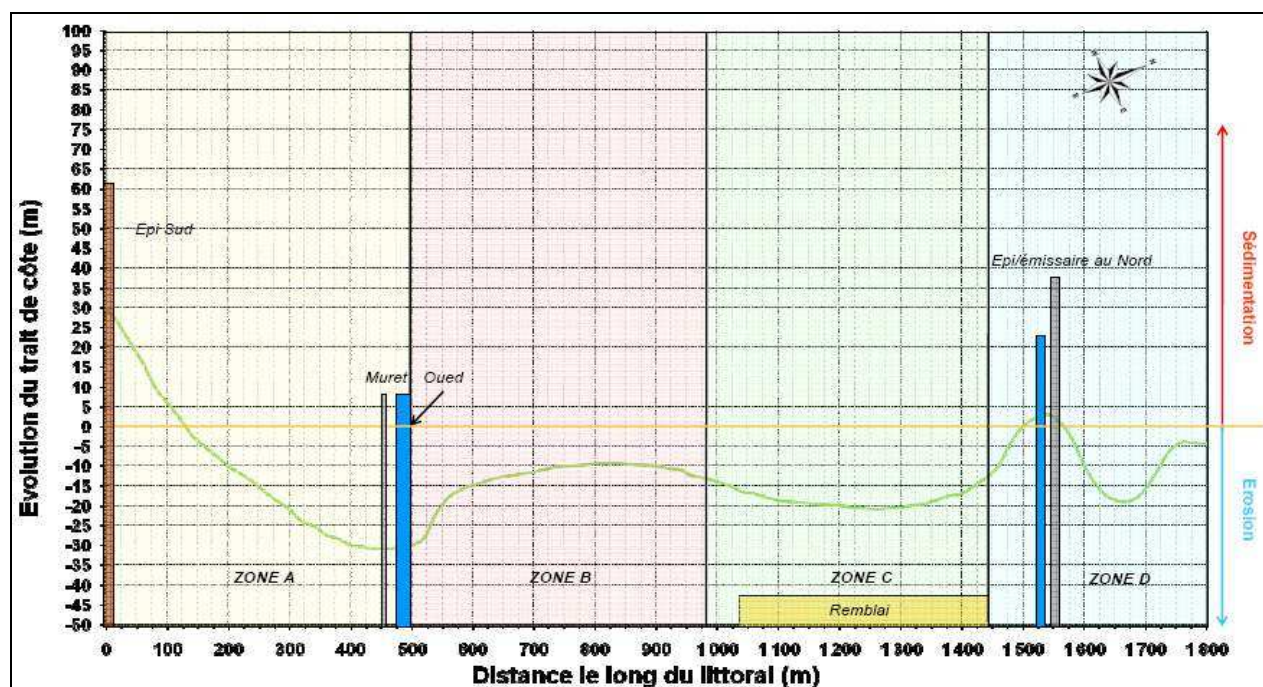


Figure IV.18 : Evolution future du trait de côte de Palm Beach en m/an sur 10 ans (2009 à 2019) calculée par Genesis. (SGH, 2010)

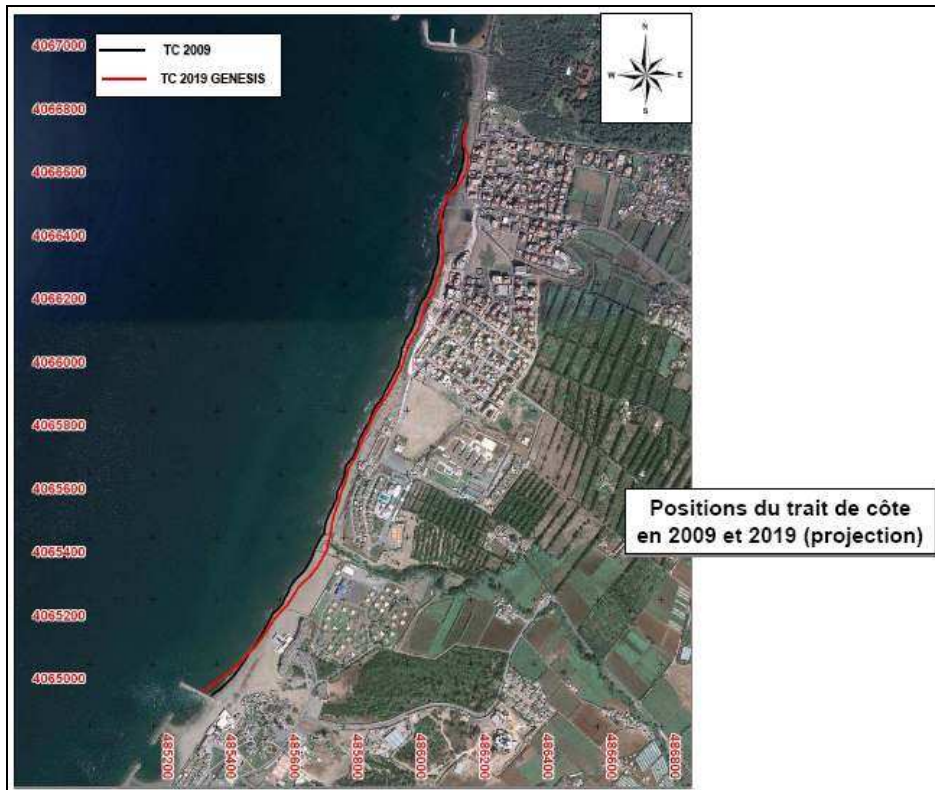


Figure IV.19 : Traits de côte de 2009 (nature) et de 2019 (modèle Genesis) de Palm Beach (SGH, 2010).

L'évolution calculée entre 2009 et 2019, par grands secteurs, du trait de côte de Palm Beach-Azur dans la configuration actuelle du littoral est donné dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.7 : Evolution du trait de côte de Palm Beach de 2009 à 2019 donnée par Genesis.

	Secteurs	Evolution Genesis 2009-2019 (m)
A	Entre l'épi Sud et l'Oued	-10,9 m
B	Entre l'Oued et le remblai	-12,8 m
C	Devant le remblai	-18,6 m
D	A l'Est du remblai	-7,9 m

Les résultats d'évolution du trait de côte par secteur sont une continuité de ceux obtenus par le calage. La tendance d'évolution dégagée sur la période 2009-2019 est à l'érosion de la plage sur l'ensemble de la zone d'étude, soit un recul moyen de l'ordre de 10 à 15 m.

IV.3. Evolution des fonds

L'évolution des fonds (avant côte et petits fonds marins jusqu'à -20 m CM) et du rivage (estran et trait de côte) est abordée sur le littoral au devant de la plage de Palm Beach.

IV.3.1. Levés topo-bathymétriques disponibles

Au cours de la phase de recueil de données, nous avons acquis les levés topo-bathymétriques suivants :

1. Le levé bathymétrique de la carte **Shom** n°3030 intitulée « Carte particulière de la côte septentrionale d'Afrique – Partie comprise entre Alger et Cherchell », levé bathymétrique effectué en 1867-1868. La bathymétrie, concernant notre site d'étude, issue de cette carte est présentée sur la **figure IV.20**.

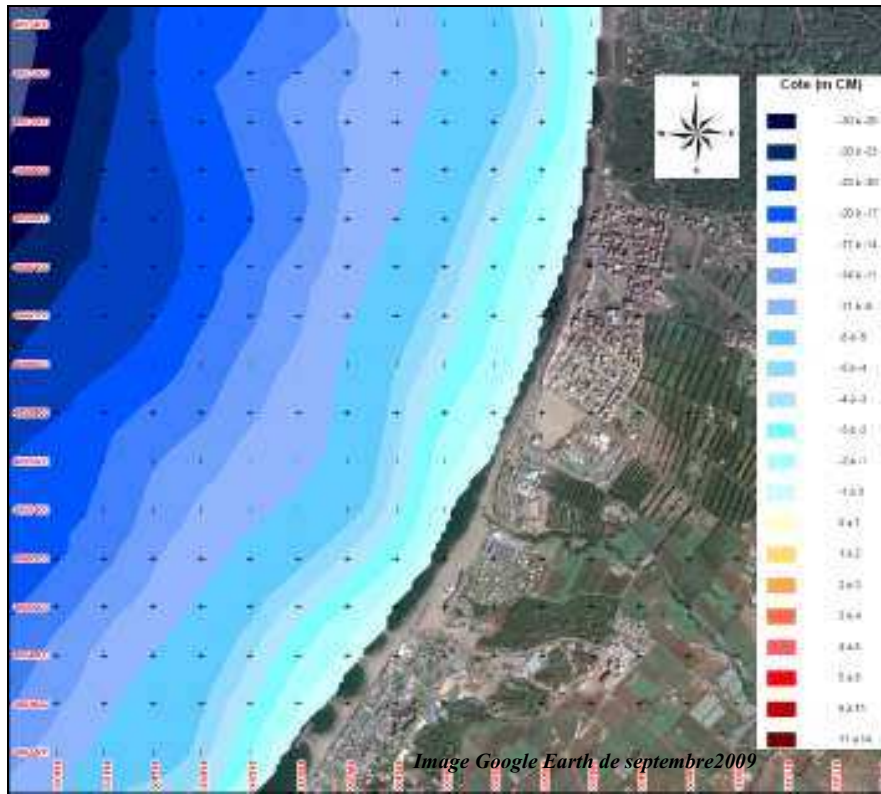


Figure IV.20 : Levé bathymétrique issu de la carte Shom n°3030 sur Palm Beach. (SGH, 2010)
(Repris sur image Google Earth 2009)

2. Le levé topo-bathymétrique effectué en 2007 pour l'étude sur le port de plaisance de Zéralda (LEM, 2007). Il comprend seulement la partie Nord de la zone d'étude.

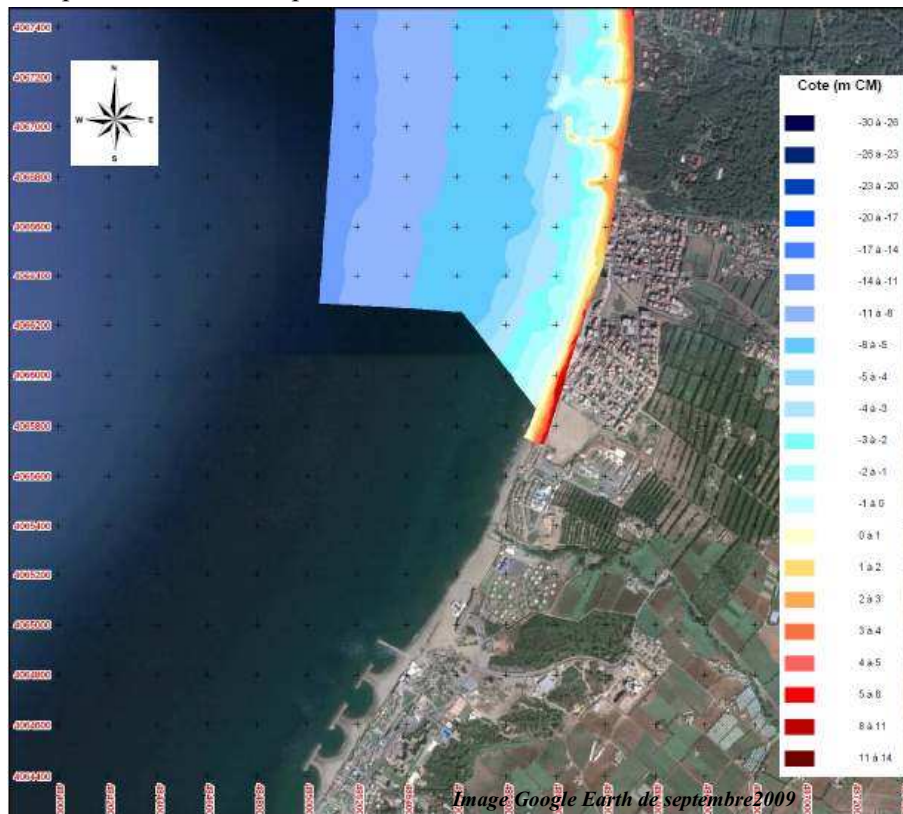


Figure IV.21 : Levé bathymétrique effectué en 2007 sur Palm Beach. (SGH, 2010)
(Étude sur le port de plaisance de Zéralda).

3. Le levé topographique de cette étude, s'étalant entre l'épi du complexe touristique de Zéralda et le port présidentiel de Palm Beach, sur un linéaire de côte d'environ 2000m et une bande de 50m de large.
4. Le levé bathymétrique réalisé dans cette étude.

IV.3.2. Différentiel bathymétrique

Un différentiel bathymétrique permet de faire la différence entre deux levés bathymétriques et donc de constater si les fonds se sont abaissés (phénomène d'érosion) ou se sont rehaussés (phénomène de sédimentation).

Compte tenu des levés disponibles, deux différentiels ont été réalisés :

Le différentiel entre les levés topo-bathymétriques de 2009 et 2007.

Le différentiel entre les levés bathymétriques de 2009 et de la carte **Shom** n°3030 (1867-1868).

On précise que les résultats de l'évolution des fonds entre le levé de la carte **Shom** n°3030 réalisé en 1867-1868 et le levé de 2009 doivent être considérés avec précaution. En effet :

- D'une part, la période entre les deux levés est très importante (142 ans), donc des aménagements et actions anthropiques ont pu être réalisés sur cette période pouvant de ce fait changer localement la dynamique sédimentaire du site d'étude. Il est toujours préférable de comparer deux levés bathymétriques pour la même configuration de littoral, ce que nous ne pouvons pas faire dans cette étude.
- D'autre part, la densité des points du levé de la carte **Shom** de 1867-1868 est très faible par rapport au levé de 2009.

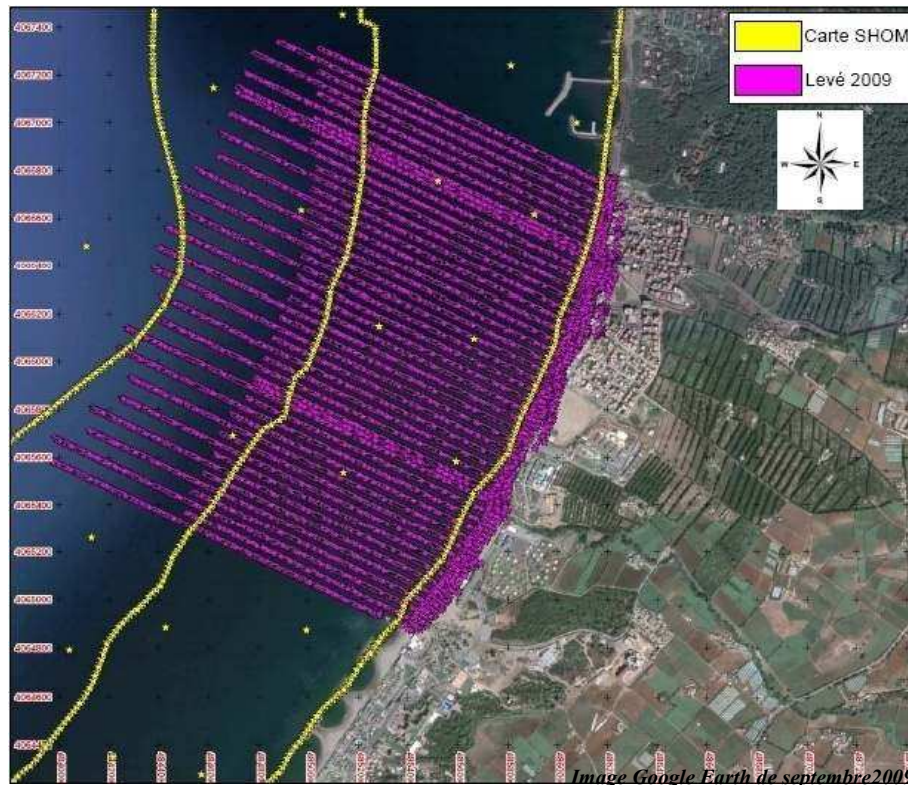


Figure IV.22 : Densité des points du levé 2009 et de la carte Shom N°3030 sur Palm Beach. (SGH, 2010)

Toutefois, on remarquera que les fonds du levé de 2009 et de celui de la carte **Shom** sont cylindriques et présentent une relative équidistance entre les isobathes pour les fonds compris entre -5 et -20m NGA. Ainsi, les résultats de ce différentiel vont simplement permettre de déterminer la tendance de l'évolution des fonds, érosion ou engraissement. Les résultats chiffrés seront donnés à titre indicatif mais devront donc être considérés avec précaution. Le calcul différentiel entre les levés de 2009 et de la carte **Shom** n°3030 est présenté ci-dessous.

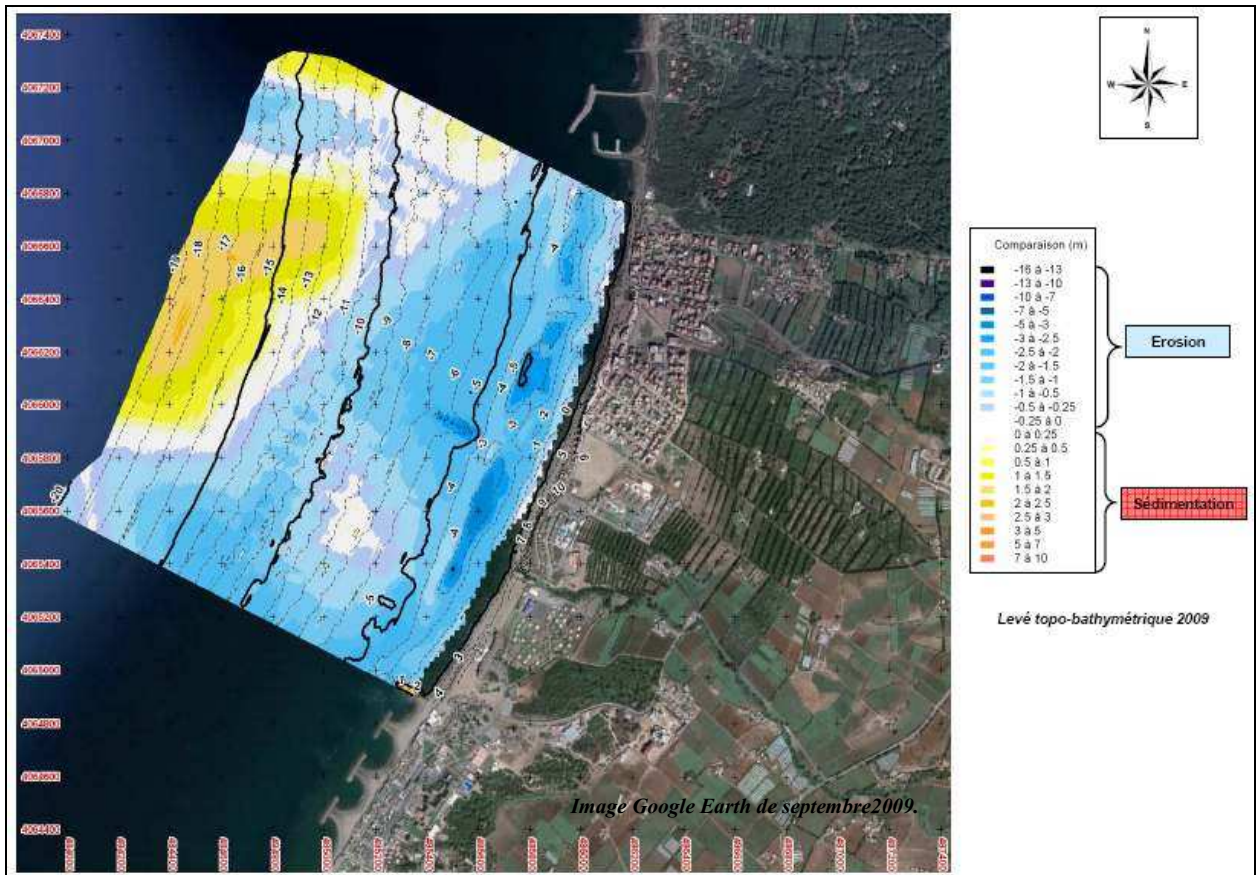


Figure IV.23 : Différentiel bathymétrique entre le levé 2009 et la carte Shom N°3030 sur Palm Beach. (SGH, 2010)

On constate clairement que la tendance sur cette période d'étude est à l'érosion avec un abaissement général des fonds. Par contre, sur la zone centrale au large du site d'étude, de -11 à -20m NGA, les fonds se sont rehaussés.

Par contre, les deux levés topo-bathymétriques 2009 et 2007 étant récents et la méthodologie mise en œuvre et la densité des levés étant quasiment identiques, on peut raisonnablement considérer que les résultats du différentiel et des cubatures qui en découlent sont fiables.

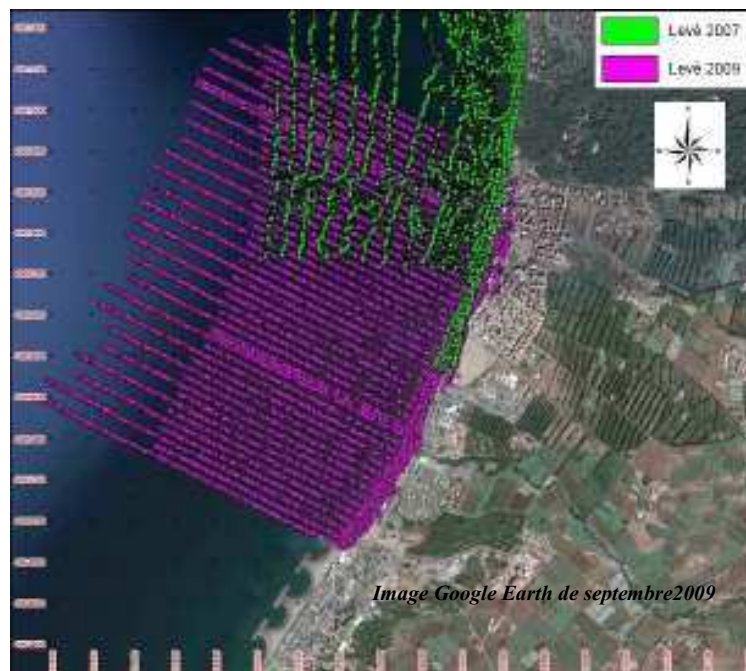


Figure IV.24 : Densité des points du levé 2007 et du levé 2009 sur Palm Beach. (SGH, 2010)

Selon le différentiel entre les levés de 2009 et 2007 (*figure IV.25*), seule la partie Nord de la zone d'étude a pu être comparée compte tenu de la localisation et de l'emprise du levé 2007. La tendance en cette période est à l'érosion avec un abaissement général des petits fonds allant du rivage jusqu'à - 3 et - 4m NGA. Au-delà, les fonds se sont rehaussés.

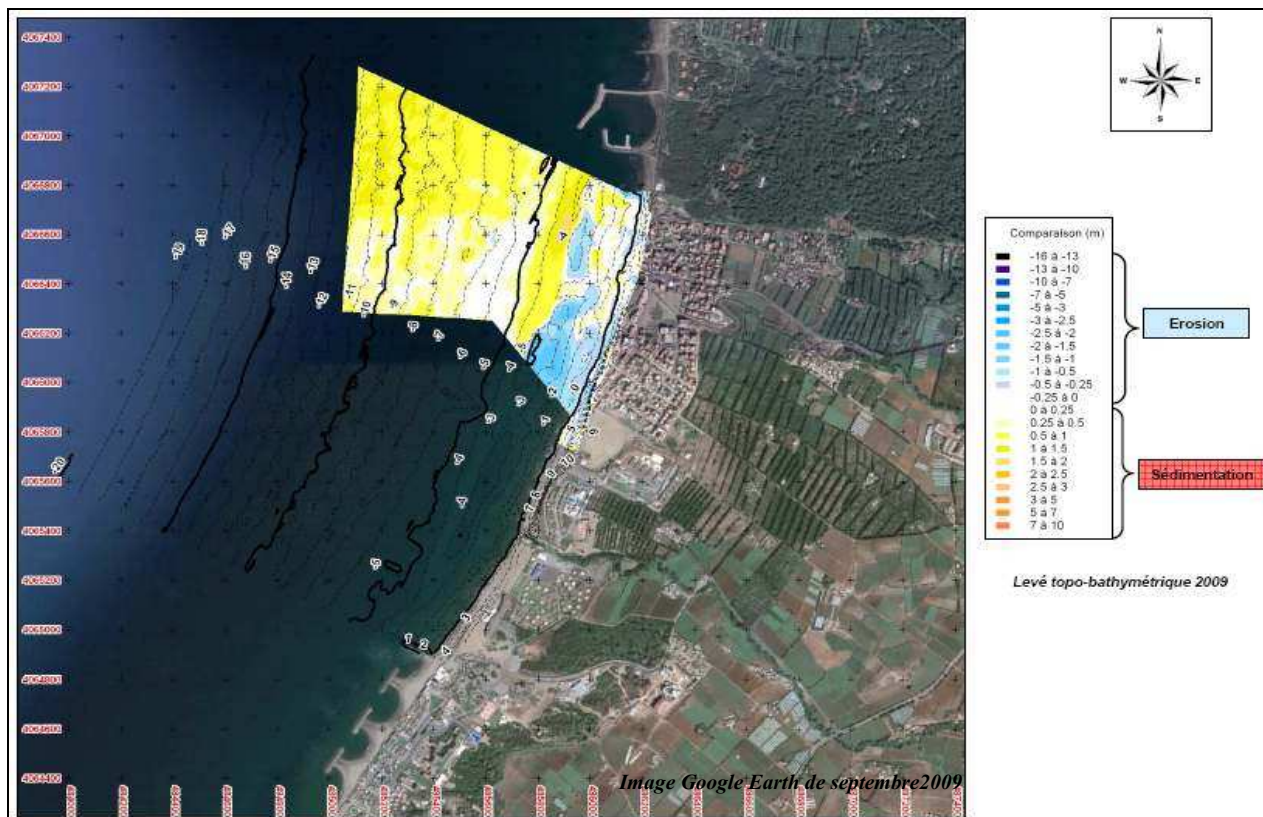


Figure IV.25 : Différentiel bathymétrique entre le levé 2009 et le levé 2007 sur Palm Beach. (SGH, 2010)

IV.3.3. Calculs de cubature

Une cubature est un bilan sédimentaire permettant de calculer la quantité (en m³) de matériaux déposés et/ou érodés et de faire le bilan entre les apports et les pertes (*Spielmann et al., 1998*).

IV.3.3.1. Cubature sur le différentiel du levé 2009 et de la carte Shom N°3030

On définit deux zones :

La zone n°1 allant de 0 m NGA à l'isobathe -5m NGA.

La zone n°2 allant de l'isobathe -5m NGA (limite où les fonds peuvent être considérés comme cylindriques) jusqu'à l'isobathe -20 m NGA (limite septentrionale du levé 2009).

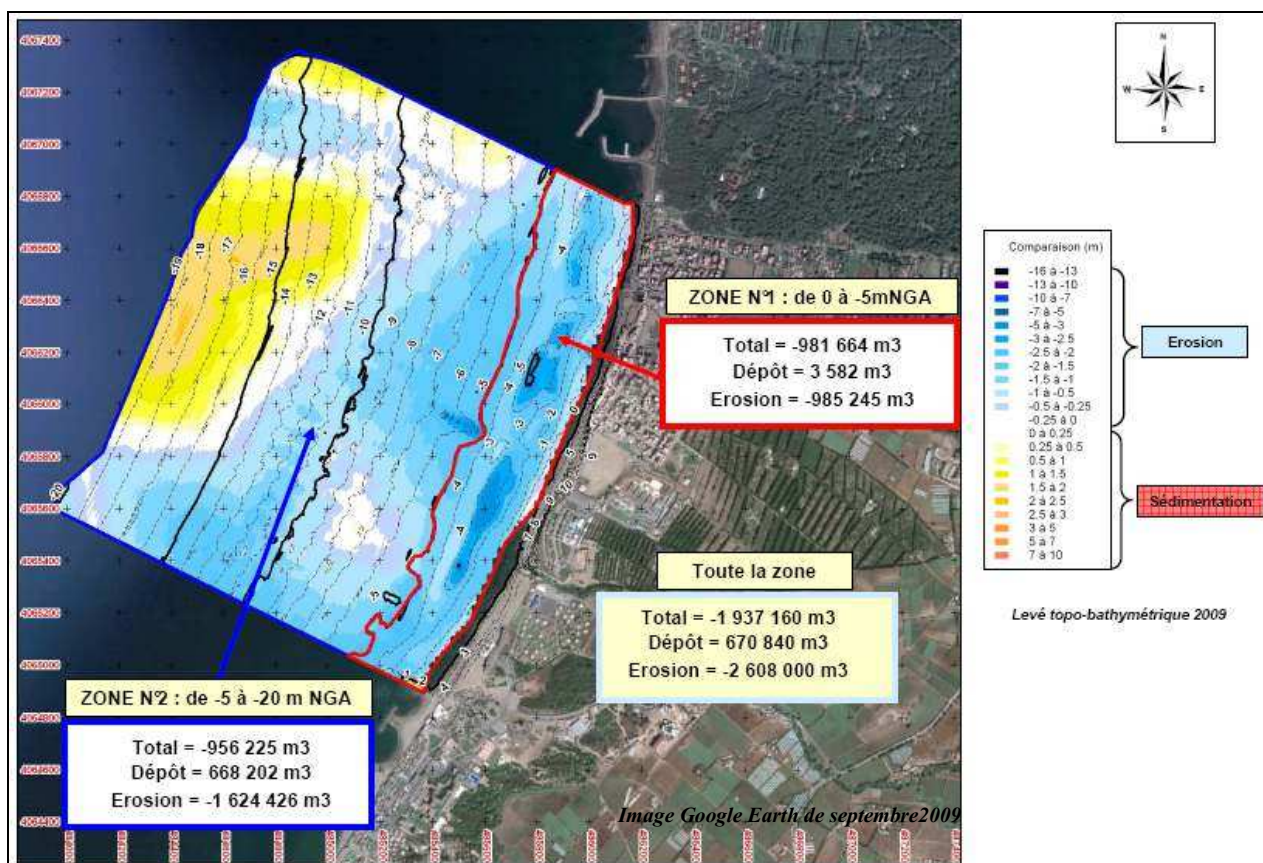


Figure IV.26 : Calcul de cubature sur le différentiel du levé 2009 et de la carte Shom n°3030 de Palm Beach. (SGH, 2010)

Les calculs de cubature ont été réalisés dans les deux zones définies ci-dessus et les résultats (valeurs arrondies) sont présentés ci-après :

Tableau IV.8 : Bilan sédimentaire (cubature) entre 2009 et 1867-1868 dans la côte de Palm Beach.

Zones de cubature	2009-1867/1868		
	Total	Dépôt	Erosion
1	- 980000 m ³	3500 m ³	- 983500 m ³
2	- 960000 m ³	670000 m ³	- 1630000 m ³

L'analyse des résultats montre que "globalement" la zone d'étude s'érode (bilan sédimentaire négatif). En effet, près de 2 000 000 m³ ont été perdus sur la période entre les deux levés, soit une perte annuelle d'environ 15 000 m³ sur l'ensemble de la zone d'étude.

IV.3.3.2. Cubature sur le différentiel des levés 2009 et 2007

Trois zones ont été définies :

- La zone n°1 représentant la zone topographique, plage sèche (fonds > 0 m NGA).
- La zone n°2 allant de 0 m NGA à l'isobathe -3/-4 m NGA (limite des zones en érosion et en sédimentation).
- La zone n°3 allant de l'isobathe -3/-4m NGA jusqu'à l'isobathe -11/-12 m NGA (limite septentrionale du levé 2007).

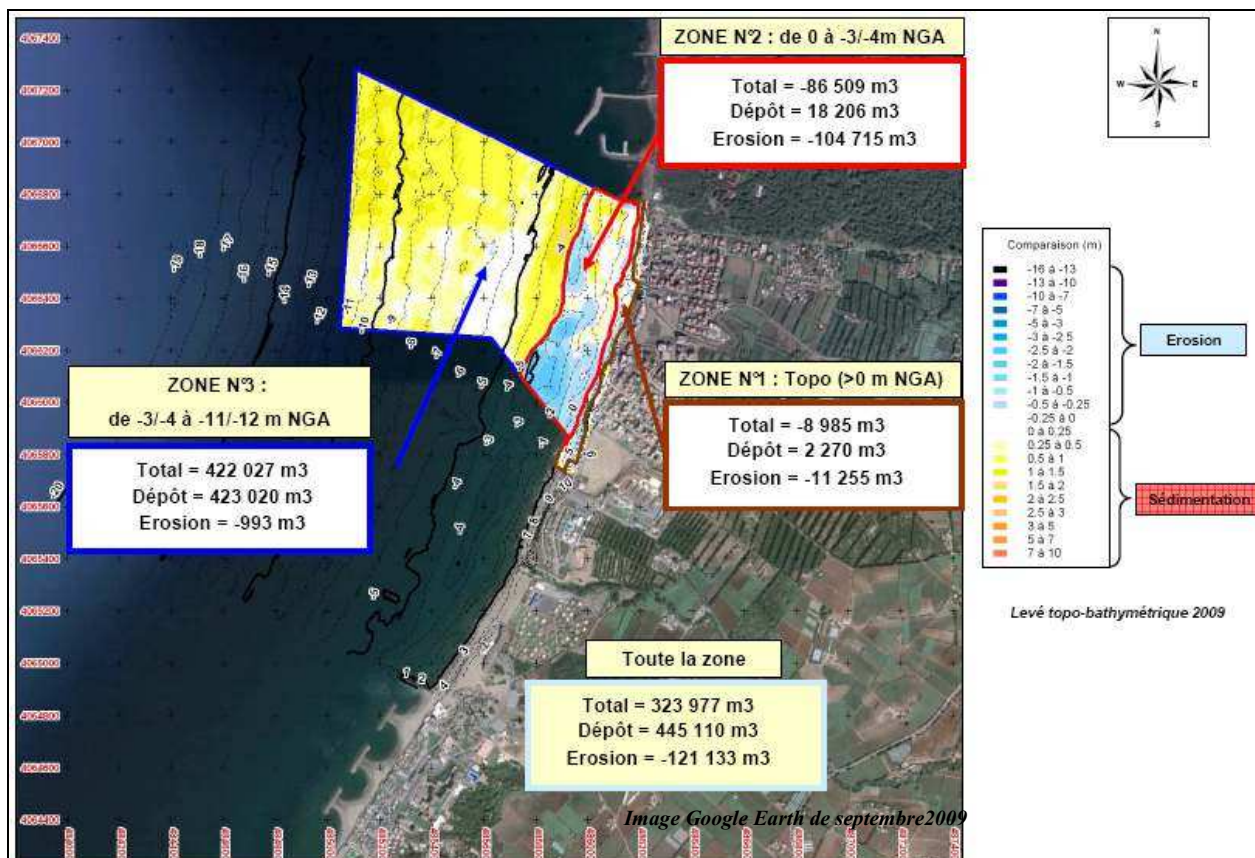


Figure IV.27 : Calcul de cubature sur le différentiel des levés 2009 et 2007 sur Palm Beach. (SGH, 2010)

Les calculs de cubature ont été réalisés dans les trois zones définies ci-dessus et les résultats (valeurs arrondies) sont présentés ci-après :

Tableau IV.9 : Bilan sédimentaire (cubature) entre 2009 et 2007 dans la côte de Palm Beach.

Zones de cubature	2009-2007			Moyenne annuelle		
	Total	Dépôt	Erosion	Total	Dépôt	Erosion
1	-9000	2000	-11000	-4500	1000	-5500
2	-85000	20000	-105000	-43000	10000	-53000
3	420000	419000	-1000	210000	210000	-500

L'analyse des résultats montre que "globalement" la zone d'étude s'engraisse (bilan sédimentaire positif) mais la zone qui nous intéresse plus directement pour l'étude hydrosédimentaire (zone de la plage sèche et zone comprise entre la côte et les petits fonds) s'érode nettement. En effet, environ 95 000 m³ ont été perdus sur la période entre les deux levés, soit une perte annuelle de l'ordre de 47 500 m³.

Le secteur regroupant les zones n°1 et n°2 perd ses matériaux les plus fins qui sont entraînés vers le large (et secondairement latéralement) par l'action de la houle qui crée des courants transversaux érodant ainsi les petits fonds côtiers. De plus, la tempête de février 2009 a causé une forte érosion de la plage de Palm Beach et de la dune au devant des terrasses.

La zone n°3 s'engraisse pour deux raisons :

- Les matériaux sont arrachés à la côte par l'action hydrodynamique de la houle sur les fonds qui crée des courants de retour responsables de l'érosion des petits fonds et par conséquent de l'engraissement des fonds plus au large.
- L'oued Mazafran présent à l'Ouest de la zone d'étude crée un important panache qui fournit en période de crue des sédiments fins qui ont tendance à se déposer ensuite dans la zone comprise entre -5 et -20 m NGA de part et d'autre de l'oued.

L'étude de l'évolution passée du trait de côte permettra de confirmer ou d'infirmer ces résultats et notamment l'érosion des petits fonds marins du littoral d'étude.

IV.3.4. Etude de l'évolution passée du trait de côte

Nous considérons pour l'étude que le trait de côte est la limite de séparation entre l'eau et la plage sèche, c'est donc la laisse de mer.

Les données nous permettant d'analyser l'évolution passée du trait de côte sont (*SGH, 2010*):

- Le trait de côte de 1999 issu de la photo aérienne de l'Institut National de Cartographie.
- Les traits de côte issus des photos Google Earth de 2002, 2008 et 2009.

Les photos aériennes de 1959 et 1972 existent mais elles n'ont pas été utilisées pour l'analyse de l'évolution du trait de côte pour les raisons suivantes (*LEM, 2009*):

- Photo aérienne de 1959 : photo d'assez bonne qualité mais littoral profondément différent du littoral des années 2000. Ainsi, on ne peut comparer ce trait de côte avec les autres traits de côte disponibles (1999 à 2009).
- Photo aérienne de 1972 : photo de mauvaise qualité, ne permet pas de différencier correctement la laisse de mer.

De plus, on a redressé et géo-référencé la photo Google Earth de 2004 mais on ne l'a pas prise en compte car elle aurait biaisé l'analyse de l'évolution du trait de côte. En effet, lors de cette photo, il y avait une forte houle qui a provoqué un recul conséquent de la laisse de mer. De ce fait, ce cliché ne se situe pas dans les mêmes conditions climatiques que les autres et ne peut donc pas être utilisé dans l'analyse.

Il est important de rappeler que le processus de numérisation, de redressement et de géo-référencement des photographies aériennes puis de digitalisation du trait de côte génère une marge d'erreur dont il faut tenir compte dans l'analyse. Cette marge d'erreur résulte de la conjonction de 4 erreurs principales :

- Erreur de repérage des amers sur les photographies, cette erreur est estimée à ± 2 m entre deux photos.
- Erreur de calcul des modèles polynomiaux par le logiciel de correction, cette erreur est évaluée à ± 2 m entre deux photos.
- Erreur de mesure sur les photos corrigées, cette erreur est d'environ ± 2 m entre deux photos.
- Erreur liée aux variations de la position du trait de côte sous l'influence des fluctuations marégraphiques et des conditions météorologiques. Cette erreur est la plus importante et provient du fait que les conditions météorologiques et marégraphiques, au moment des prises de vues aériennes, ne sont pas connues donc l'écart maximum de hauteur du plan d'eau est inconnu. L'erreur est évaluée à ± 4 m entre deux photos.

La somme des erreurs engendrées par cette méthode d'analyse est estimée à ± 10 m entre deux clichés successifs.

IV.3.4.1. Evolution du trait de côte entre 1999 et 2009

Afin de comparer la position des traits de côte, 52 profils perpendiculaires au trait de côte ont été tracés et numérotés d'Ouest en Est. La figure ci-dessous présente le positionnement des 52 profils d'étude sur l'ensemble du littoral ainsi que les différents traits de côte disponibles.

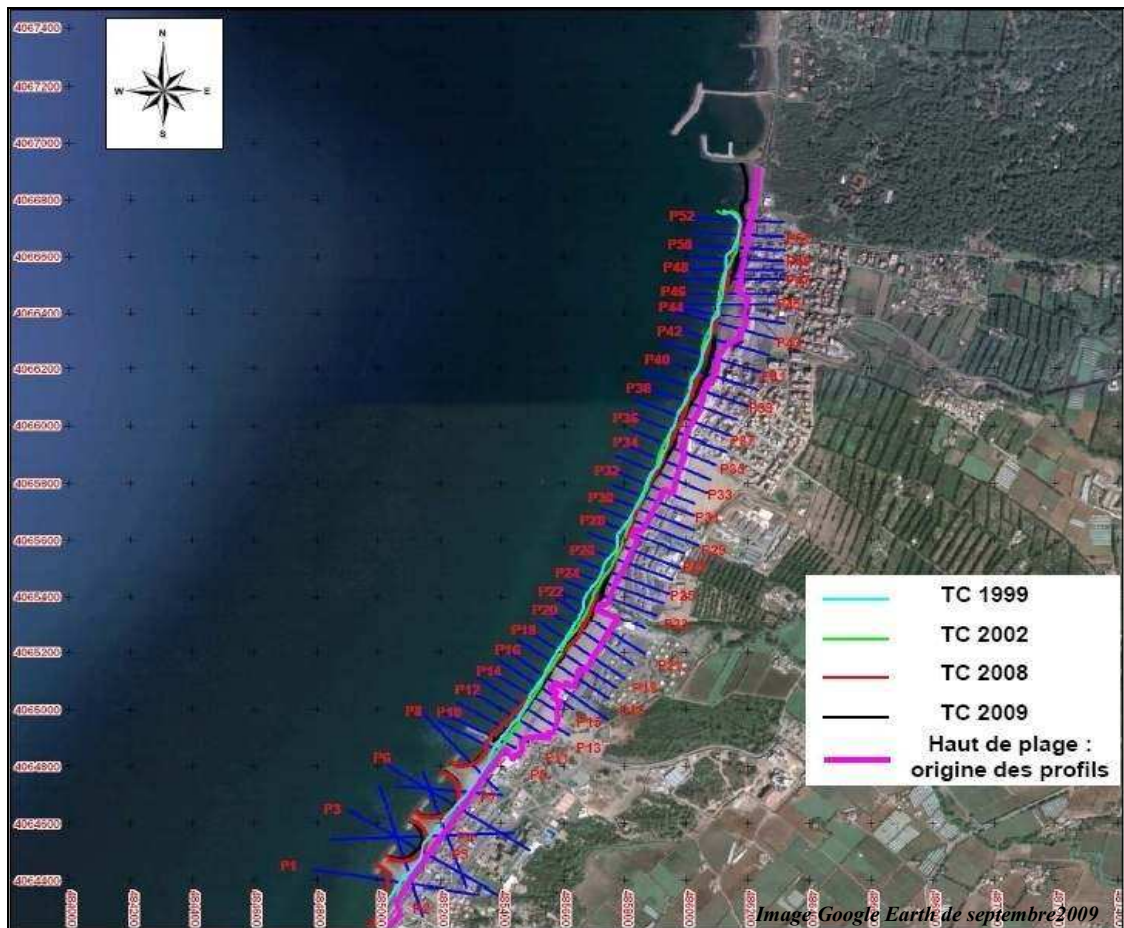


Figure IV.28 : Profils de suivi du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009. (SGH, 2010)

Pour les 52 profils, la position du trait de côte de chaque année a été repérée puis rapportée à une même origine qui correspond au haut de plage. La distance depuis l'origine est reportée sur le graphique suivant.

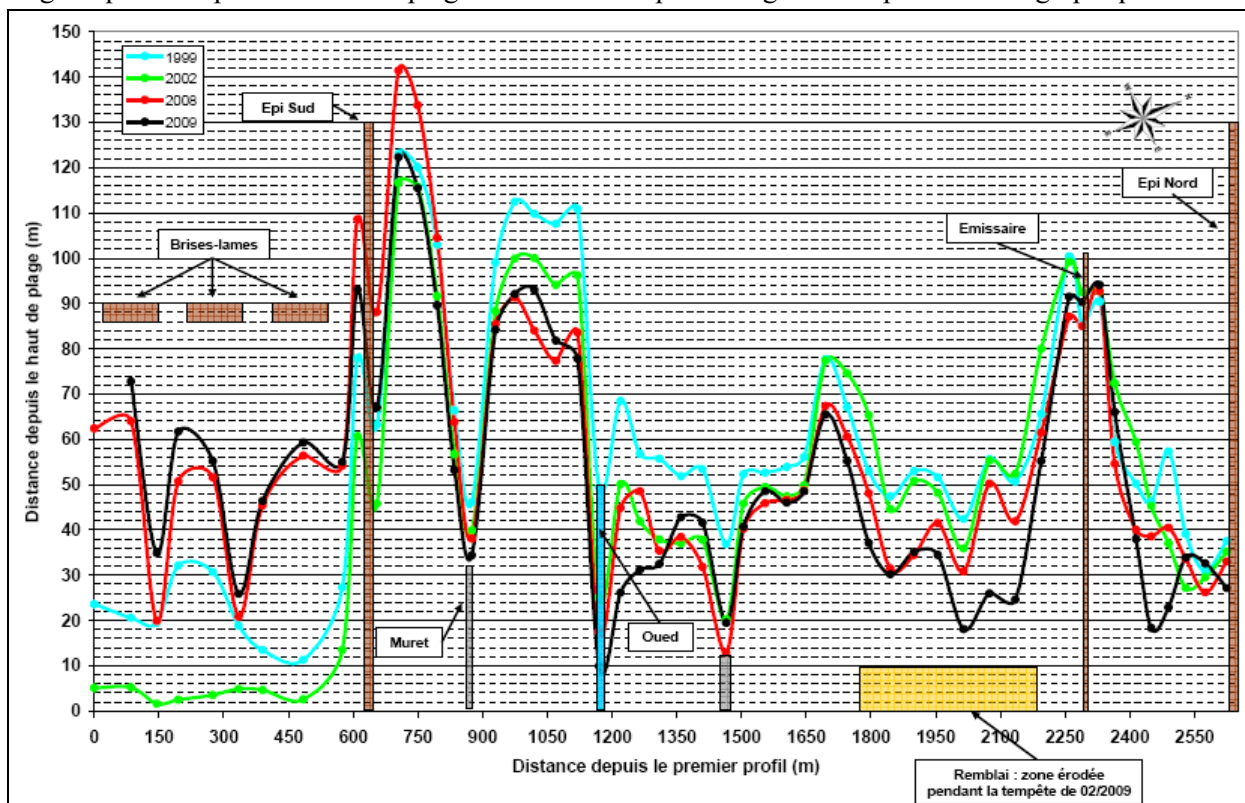


Figure IV.29 : Profils de l'évolution passée du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009. (SGH, 2010)

L'examen du positionnement du trait de côte de 1999, 2002, 2008 et de 2009 a permis de dégager grossièrement les principales évolutions du trait de côte par portion de littoral sur la période 1999-2009 :

- Profils n°1 à 9 : avant la construction des trois brise-lames en 2007, la plage était très étroite et ne cessait de s'éroder jusqu'à avoir quasiment disparu en 2002. Puis la mise en place des ouvrages a permis à la plage de se reformer en plages alvéolaires avec la création naturelle de tombolos à l'arrière des brise-lames. On constate que la plage s'élargit de manière régulière depuis 2005.
- Profils n°10 à 15 : l'épi au Sud a été construit en même temps que les trois brise-lames (en 2005), avant cela, la plage était en érosion avec un recul moyen de 5 à 10 m entre 1999 et 2002. Cet épi a ensuite permis de piéger le sable qui s'est accumulé contre son côté Est et la plage s'est engraisée progressivement. Entre 2002 et 2008, la plage a avancé de l'ordre de 20 à 40m sur la partie Ouest de ce secteur. Par contre, entre 2008 et 2009, le trait de côte a reculé de 20m environ sur ce même endroit. Cette érosion s'explique de plusieurs manières :
 - Lorsque l'épi Sud a été construit, la plage a fortement avancé car, d'une part, le transit a été bloqué et, d'autre part, c'était un nouvel ouvrage et la plage se remettait dans sa nouvelle forme à l'équilibre. Or, une fois la plage à l'équilibre, cette dernière a repris son processus d'érosion régulière avec un transit littoral quasiment équilibré mais majoritairement orienté vers le Nord-Est.
 - Entre les photos de 2008 et 2009 (septembre 2009) s'est produite une forte tempête en février 2009 qui a causé beaucoup de dommages et a érodé fortement le littoral. Ceci peut expliquer la forte érosion de l'ordre de 20 m.
- Profils n°16 à 22 : cette portion de plage n'a pas été aménagée entre 1999 et 2009. Le trait de côte a reculé de 20 à 30 m environ entre 1999 et 2009. Cette érosion est quasiment linéaire dans le temps.
- Profils n°23 à 28 : la plage a globalement reculé dans le temps de 10 à 20 m. Cependant, ces dernières années, elle alterne entre érosion et engraissement.
- Profils n°29 à 45 : sur tout ce secteur le phénomène érosif est très présent sur la période 1999-2009. Toutefois les secteurs de part et d'autre du remblai sont globalement stables, voire en légère érosion. Par contre, la plage située devant le remblai est en forte érosion puisqu'elle a reculé de 20 à 30 m sur ces dix dernières années. Notons que la tempête de février 2009 a été très néfaste pour cette plage car le remblai s'est fortement érodé et la majorité de la plage a disparu avec un déplacement des matériaux dans les petits fonds vers le large. Ainsi aujourd'hui, cette plage tend à se recréer progressivement avec le retour des matériaux qui s'étaient déposés dans les petits fonds, formant des bancs de sable. Ces bancs de sable sont orientés Sud-Ouest/Nord-Est, du fait du transit littoral orienté dans le même sens. Cette plage a donc reculé trop fortement entre 2008 et 2009 par rapport à son taux de recul normal.
- Profils n°46 à 52 : contre l'émissaire, la plage est relativement stable. Par contre, plus au Nord-Est elle a reculé de 10 à 20 m jusqu'à l'épi Nord. Ce recul est croissant d'Ouest en Est.

IV.3.4.2. Synthèse de la tendance évolutive passée du trait de côte

La tendance évolutive passée du trait de côte est déterminée à partir des évolutions du trait de côte relevées aux profils sur 10 années d'étude, entre 1999 et 2009. Pour chaque profil, les distances entre la position du trait de côte en 1999 et les années 2002, 2008 et 2009 ont été calculées, moyennées puis reportées sur le graphique suivant :

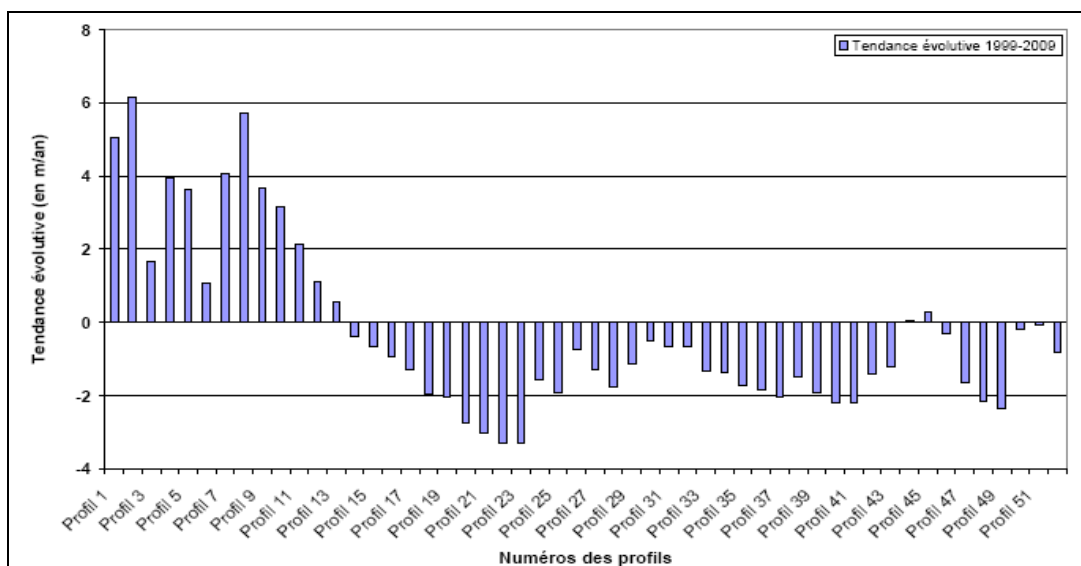


Figure IV.30 : Analyse de l'évolution moyenne et annuelle du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009.

Ces mêmes résultats sont synthétisés par zone dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.10 : Synthèse par zone de l'évolution du trait de côte de Palm Beach entre 1999 et 2009.

N° Zones	N° profils	Taux d'évolution en m/an	Tendance
Zone n°1 : Secteur des brise-lames	P 1 à 9	+2 à +6 m/an	Accrétion forte
Zone n°2 : Secteur entre l'épi Ouest et l'Oued	P 10 à 15	+3 à -1 m/an gradient d'Ouest en Est	Moyenne accrétion à une faible érosion
	P 16 à 22	-1 à -3 m/an : gradient d'Ouest en Est	Erosion moyenne
Zone n°3 : Secteur entre l'Oued et le terre-plein	P 23 à 28	-1 à -3 m/an	Erosion moyenne
	P 29 à 34	-0,5 à -1,5 m/an	Erosion faible
Zone n°4 : Secteur devant le terre-plein	P 35 à 42	-1,5 à -2,5 m/an	Erosion moyenne
Zone n°5 : Secteur à l'Est du terre-plein	P 43 à 45	Stable	Stabilité
	P 46 à 52	-0,5 à -2,5 m/an	Erosion faible

D'une manière globale, on constate que la plage de Palm Beach-Azur est en érosion sur le long terme de 1,0 à 1,5 m/an en moyenne.

La seule portion de la zone d'étude en accrétion est la zone à l'arrière des brise-lames ainsi que la partie Est de l'épi Sud. Ce secteur est en accrétion du fait de la mise en place des brise-lames en 2007 qui ont contribué à créer des tombolos, et de l'épi Sud qui a bloqué le transit littoral faisant ainsi avancer le trait de côte.

Toute la zone située à l'Est de l'hôtel des Sables d'Or est en érosion. Cependant, les secteurs les plus érodés se situent entre les profils P16 à P28, P35 à P42 et P46 à P52. Le secteur devant le remblai est celui qui pose le plus de problème car il se situe dans une zone touristique et la disparition de la plage accompagnée de l'érosion progressive, voire soudaine (tempête de février 2009), de la falaise où se situent les restaurants de plage, représentent des dommages économiques importants.

La figure ci-dessous présente schématiquement l'analyse de l'évolution du trait de côte entre 1999 et 2009.

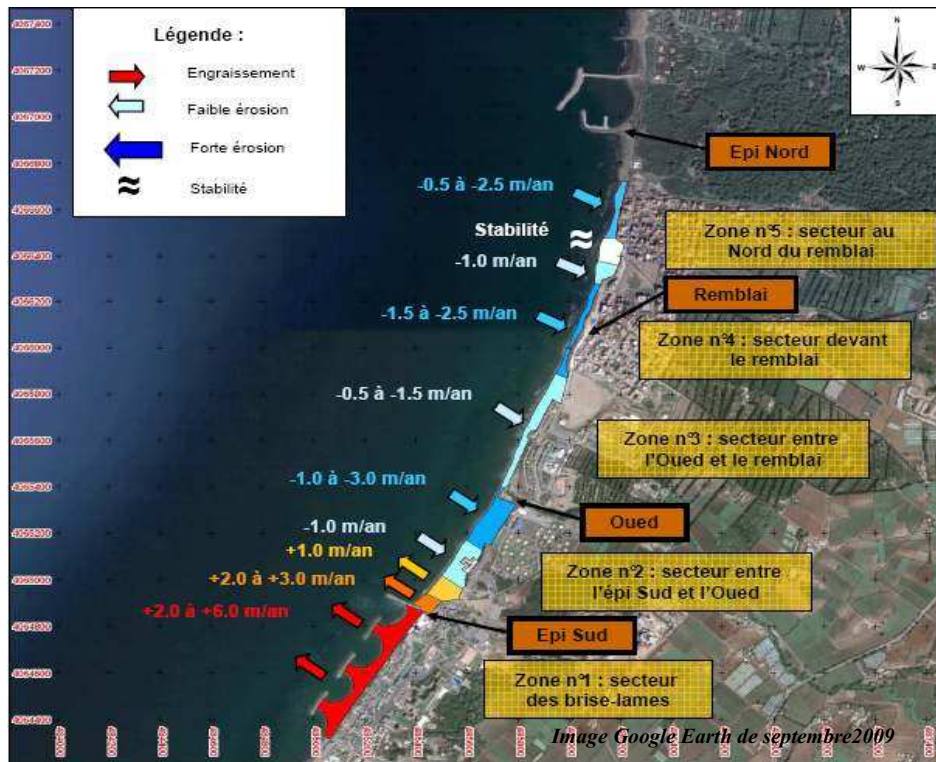


Figure IV.31 : Synthèse de l'évolution du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009. (SGH, 2010)

Les résultats de l'évolution passée du trait de côte confortent ceux obtenus dans l'étude de l'évolution des fonds, c'est-à-dire une tendance érosive du littoral.

En considérant une hauteur de berme à +2 m NGA (la hauteur de berme correspondant à l'altitude maximale au-delà de laquelle les mouvements sédimentaires sont négligeables), et une profondeur limite d'action de la houle à -8m NGA, la hauteur de la plage "active" serait de 10 m, un recul moyen annuel de -1,5 m/an du trait de côte correspondrait à un déficit de $1,5 * \text{la hauteur active}$ soit $15 \text{ m}^3/\text{ml}$, soit 30000 m^3 sur les 2000 m de linéaire allant de l'épi Nord à l'épi Sud.

On retrouve par cette approche un ordre de grandeur un peu inférieur à celui donné par la carte du différentiel des fonds entre les levés 2007 et 2009 ($-50 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{an}$). En effet, le recul en $\text{m}^3/\text{ml}/\text{an}$ est plus important entre 2007 et 2009 car la tempête de février 2009 a érodé plus fortement la plage que son taux d'érosion sur le long terme ($15 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{an}$ entre 1999 et 2009).

IV.3.4.3. Etude des profils

A partir des deux levés topo-bathymétriques disponibles : 2007 et 2009, on peut réaliser une étude des profils transversaux, 18 profils transversaux ont été considérés. La localisation de ces profils est présentée sur la *figure IV.32*.

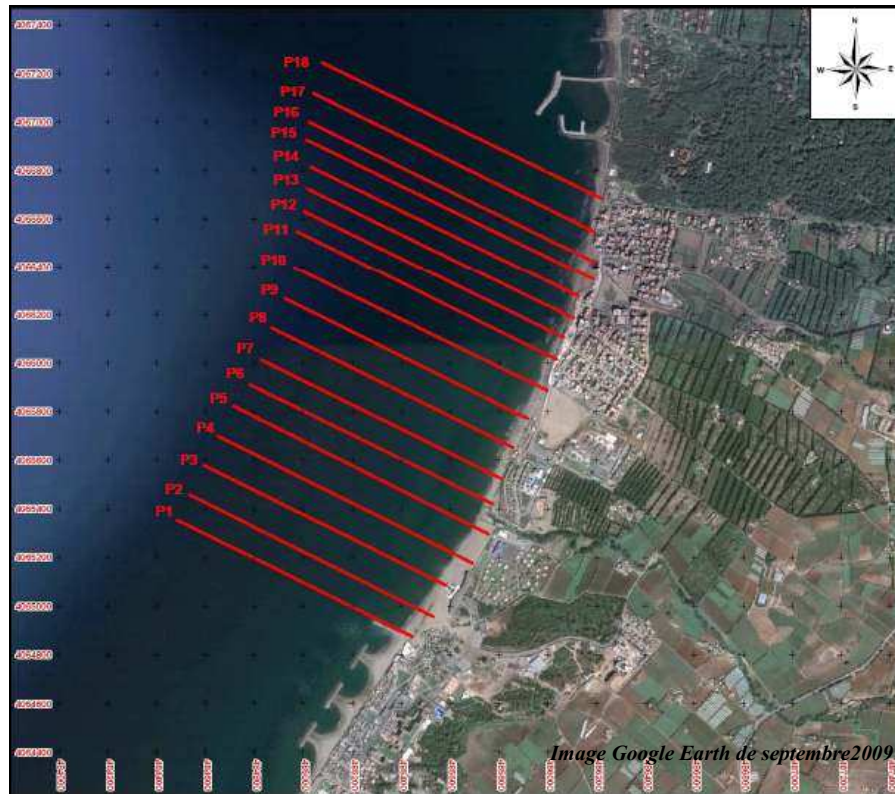


Figure IV.32 : Localisation des profils transversaux à étudier sur Palm Beach. (SGH, 2010)

Nous avons séparé la totalité des profils en deux groupes : les profils P1 à P8 (profils à l'Ouest du remblai qui s'est érodé lors de la tempête de février 2009 et profils seulement levés en 2009) et les profils P9 à P18 (profils au niveau du remblai et jusqu'à l'Est de la zone levée en 2007 et 2009).

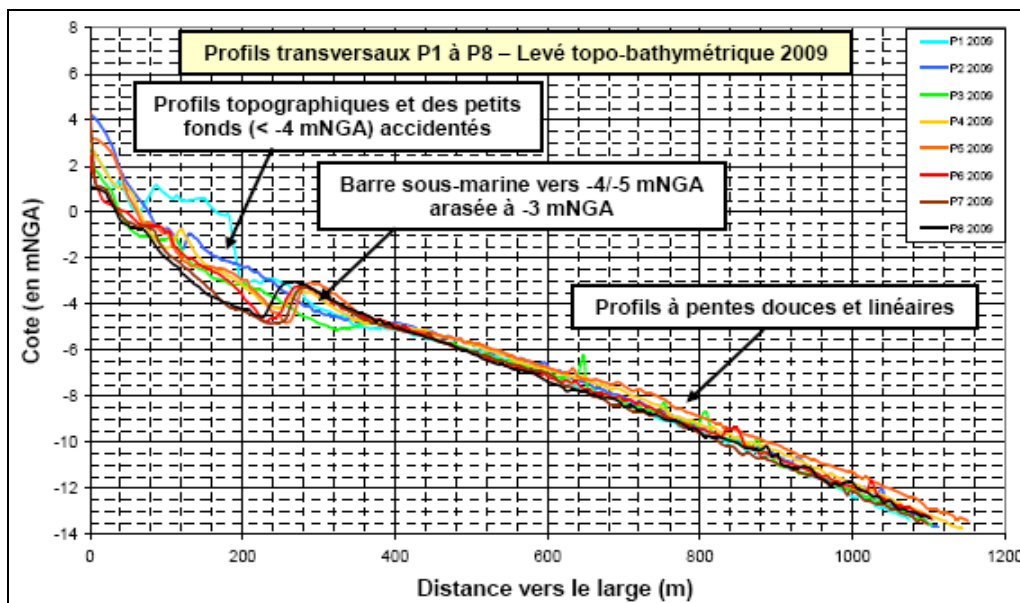


Figure IV.33 : Profils transversaux P1 à P8 sur la bathymétrie 2009 de Palm Beach. (SGH, 2010)

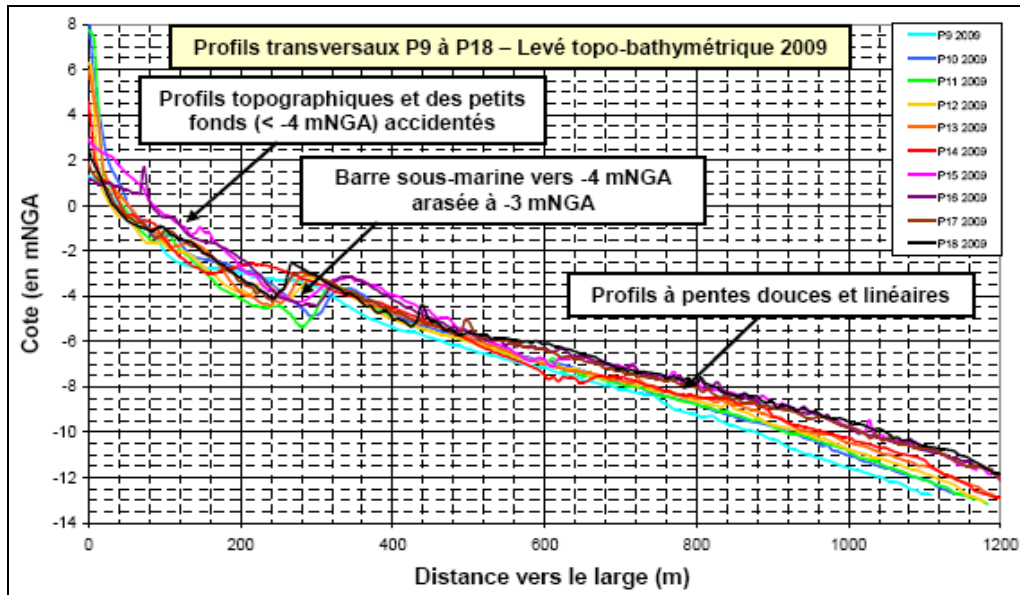


Figure IV.34 : Profils transversaux P9 à P18 sur la bathymétrie 2009 de Palm Beach. (SGH, 2010)

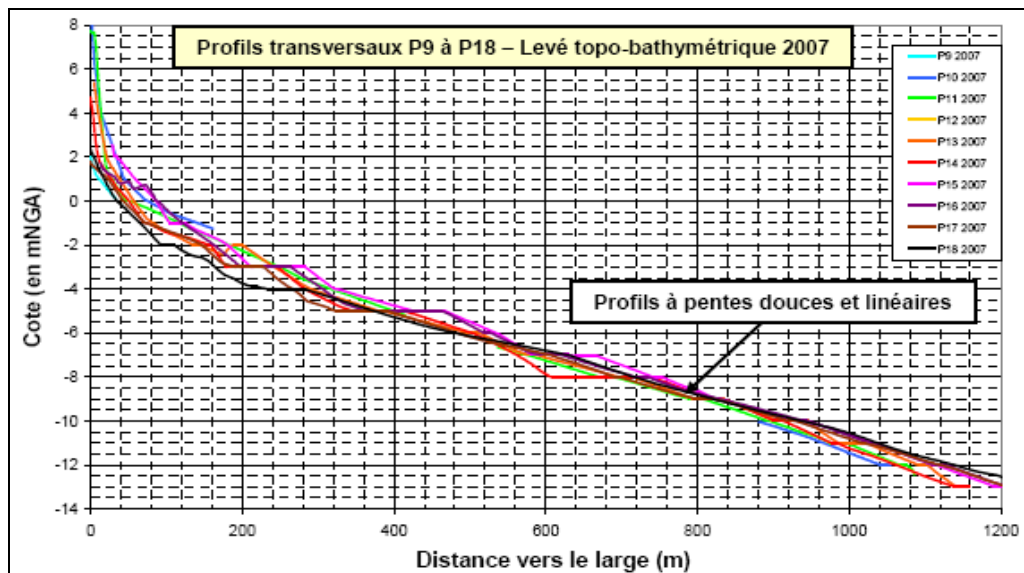


Figure IV.35 : Profils transversaux P9 à P18 de la bathymétrie 2007 de Palm Beach. (SGH, 2010)

On constate sur la plupart des profils du levé d'octobre 2009 une rupture de pente. En effet, de l'estran jusqu'à une profondeur de l'ordre de -4 m NGA, où se situe une barre sous-marine arasée à -3m NGA, la pente est de l'ordre de 2 à 3 %. Par contre au-delà de la barre sous-marine, la pente des fonds est douce et linéaire avec une pente de l'ordre de 1 %.

Les barres sous-marines qui se forment dans les petits fonds de la zone d'étude (profondeur < -5m NGA) résultent de l'action hydrodynamique des houles et matérialisent la zone de déferlement préférentielle. Ces barres sous-marines sont caractéristiques des profils en période hivernale soumis aux tempêtes. Lors de la période estivale, les barres sous-marines ont tendance à disparaître et les profils deviennent beaucoup plus lisses.

Les profils dans la zone (>-4 m NGA) sont plus accidentés pour le levé d'octobre 2009 que pour le levé 2007 du fait de la tempête de février 2009 qui a fortement remaniée les fonds avec des déplacements sédimentaires longitudinaux et transversaux vers le large.

IV.3.4.3.1. Comparaison et évolution des profils (P9 à P18) de 2007 à 2009

Pour étudier l'évolution des profils transversaux de 2007 à 2009, nous avons retenu les profils P11, P13, P15 et P17 représentatifs du littoral d'étude. Les comparaisons des profils sont présentées dans la *figure IV.36*.

L'étude de ces profils dégage les remarques suivantes :

- Pour les profils situés devant le remblai (zone particulièrement endommagée et érodée lors de la tempête de février 2009), les petits fonds allant de 0 à -4m NGA se sont abaissés de l'ordre de 1 à 2m sur la période 2007-2009. Cet abaissement des fonds traduit les effets de la tempête de février 2009 et montre une tendance érosive de la plage au cours du temps. Cependant, cette tendance érosive est moins marquée lors de l'absence de tempête exceptionnelle. La zone la plus érodée se situe devant le secteur Sud-Ouest du remblai (le profil P11).
- On constate qu'une barre sous-marine par -4m NGA s'est créée tout le long du littoral d'étude après la tempête, elle est arasée à -3m NGA. Au-delà de cette barre, les fonds se sont engraisés entre 2007 et 2009 à cause du déplacement des sédiments dans le profil vers le large.
- Dans le secteur à l'Est du remblai, les petits fonds jusqu'à -3m NGA sont globalement stables entre 2007 et 2009 même si on remarque une légère tendance à l'engraissement due à l'apport d'une partie des sédiments du remblai érodés lors de la tempête et déplacés vers le Nord-Est par le transit littoral. Notons également, que des matériaux ont également été déplacés vers l'Ouest.

Pour conclure, l'évolution des profils entre 2007 et 2009 est relativement importante et représente bien les tendances évolutives des fonds dans la zone d'étude, c'est-à-dire :

- Transport des matériaux d'Ouest en Est et vers le large.
- Erosion des petits fonds devant le remblai.
- Engraisement à l'Est et au-delà de -4m NGA.

Cependant, l'intensité de cette évolution n'est pas représentative de la tendance sur le long terme car elle est trop importante du fait de la tempête de février 2009 située entre les deux levés topo-bathymétriques.

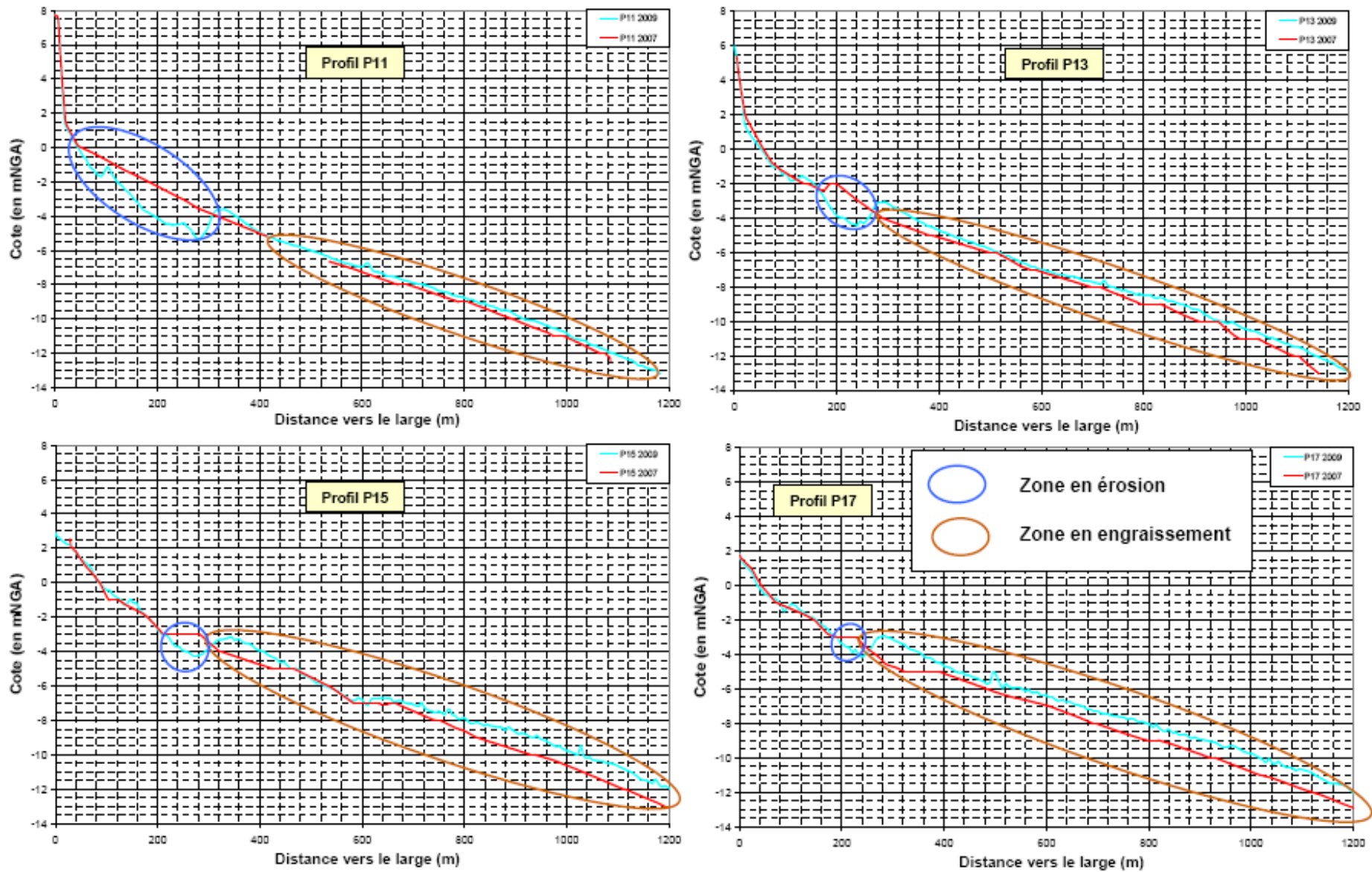


Figure IV.36 : Comparaisons des profils transversaux P11, P13, P15 et P17 des bathymétries 2007 et 2009 de Palm Beach. (SGH, 2010)

IV.4. Synthèse de la dynamique sédimentaire de Palm Beach-Azur : problème d'érosion

Les agents de la dynamique sédimentaire sont essentiellement les houles. Dans la présente étude, la houle se présente de façon dominante, surtout en période hivernale, avec une incidence d'Ouest qui génère un transit littoral faible d'Ouest en Est inférieur à 5000 m³/an.

Cependant, il existe également des déplacements transversaux des sédiments dans le profil. La houle se présente perpendiculairement au trait de côte entraînant ainsi une :

- Erosion sur les petits fonds entre 0 et -4m NGA.
- Et une sédimentation dans les fonds au-delà de -4 m NGA. Les sédiments partent vers le large à cause des houles de tempête.

Ces transferts transversaux et longitudinaux ont tendance à éroder la plage étroite située au devant du remblai. En effet, l'analyse de l'évolution des fonds sur la période 2007-2009 montre que la zone d'étude comprise entre le haut de plage (plage sèche) et les petits fonds jusqu'à -4 m NGA s'érode nettement. En effet, 95 000 m³ ont été perdus sur la période entre les deux levés, soit une perte annuelle de l'ordre de 47 500 m³. Ces valeurs ne concernent que le secteur ayant pu être comparé entre les deux levés.

D'une manière globale, la plage de Palm Beach-Azur est en érosion sur le long terme de 1 à 1,5 m/an en moyenne. Cette réalité, préoccupante, doit nous amener à nous poser la question sur l'origine de ce recul.

La dynamique de cette plage reste principalement sous l'influence de la houle. Pourtant de nos jours, les activités de l'homme ont fortement modifié la dynamique du littoral et tendent à supplanter les causes naturelles :

- La réduction des apports solides du Mazafran en quantité et en qualité causée par la domestication de celui-ci : construction de barrages destinés à l'irrigation et l'extraction de matériaux pour des fins de commercialisation dans le bâtiment. Les sédiments qui parviennent à la mer sont fins à cause du lessivage des terres.
- L'urbanisation accrue du littoral sous forme de constructions.
- La construction d'ouvrages portuaires et de défense responsables des modifications dans le transport côtier. Ceci est dû majoritairement aux obligations économiques et orientations de développement.
- La dégradation des herbiers de phanérogames marines (Posidonies), capables de freiner l'érosion de la côte, par leurs fonctions stabilisatrice des fonds et dissipatrice de l'énergie de la houle. Ce phénomène est dû à la pollution, à la turbidité de l'eau, à la pêche au chalut et aux mouillages sauvages.
- La sur-fréquentation détériore essentiellement les massifs dunaires de la plage.
- De plus, il faut désormais compter sur un autre facteur aggravant qui fait l'objet d'un consensus : le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer et leurs impacts sur les côtes.

Ci-dessous, des photographies illustrent mieux l'état des côtes de Zéralda entre 2002 et 2007



		
<p align="center">Partie Ouest après la construction des ouvrages de protection. Année 2007.</p>		<p align="center">Partie Ouest. Année 2009.</p>
		
<p align="center">Partie centrale année 2004-2007. Rupture de pente et glissements des talus.</p>		<p align="center">Partie Est. Ensablement du port présidentiel. Année 2004.</p>

Le problème de l'érosion représente ainsi, non seulement une menace pour le développement touristique de la plage, mais aussi une forte atteinte à la pérennité des infrastructures et habitations. Au vu du diagnostic du site réalisé jusqu'à maintenant, on propose dans la suite une étude approfondie de protection du littoral de Palm Beach.

Chapitre V :

Etude d'aménagement de la plage de Palm Beach-Azur

Chapitre V. Etude d'aménagement de la plage de Palm Beach-Azur

V.1. Nécessité d'une étude d'aménagement

Compte tenu de tout ce qui vient d'être démontré, une étude d'aménagement devra être conduite avec rigueur de façon à choisir la solution qui réalise la meilleure synthèse.

Les phénomènes d'évolution de la plage de Palm Beach-Azur sont très complexes. Dans ces conditions, mener une étude en intégrant tous les paramètres peut s'avérer une tâche difficile. La bonne connaissance des phénomènes, tirée de la phase d'observation et de diagnostic, va permettre de ne retenir que les paramètres fondamentaux pour la suite de l'étude.

La suite de l'étude consiste alors à proposer divers scénarios s'appuyant sur des solutions techniques adaptées aux différents secteurs et particularités du site de Palm Beach-Azur. Bien entendu, on pourra à ce stade de l'étude définir plusieurs variantes et on s'attachera à tester chacune d'elles par la modélisation numérique de façon à vérifier et à comparer l'efficacité des diverses solutions proposées.

Au terme des études techniques, il va falloir retenir un parti d'aménagement et le réaliser. Cela peut se faire à l'aide d'une analyse multicritère. On accordera une préférence aux solutions qui sont plus efficaces à long terme et leur impact sur l'écosystème est plus facilement accepté.

Du Sud vers le Nord de la plage de Palm Beach-Azur, On procède à un découpage du littoral en 5 zones :

- **Zone 1** : secteur au droit du complexe touristique des Sables d'Or et de Safir/Mazafran (linéaire d'environ 660 m).
- **Zone 2** : secteur compris entre l'épi Nord de l'aménagement des Sables d'Or et l'oued (linéaire d'environ 610 m).
- **Zone 3** : secteur de l'établissement hôtelier entre l'oued et le remblai (linéaire d'environ 560 m).
- **Zone 4** : secteur du remblai limité au Nord par l'émissaire (linéaire d'environ 580 m).
- **Zone 5** : secteur compris entre l'émissaire et la jetée Sud du port présidentiel (linéaire d'environ 490 m).

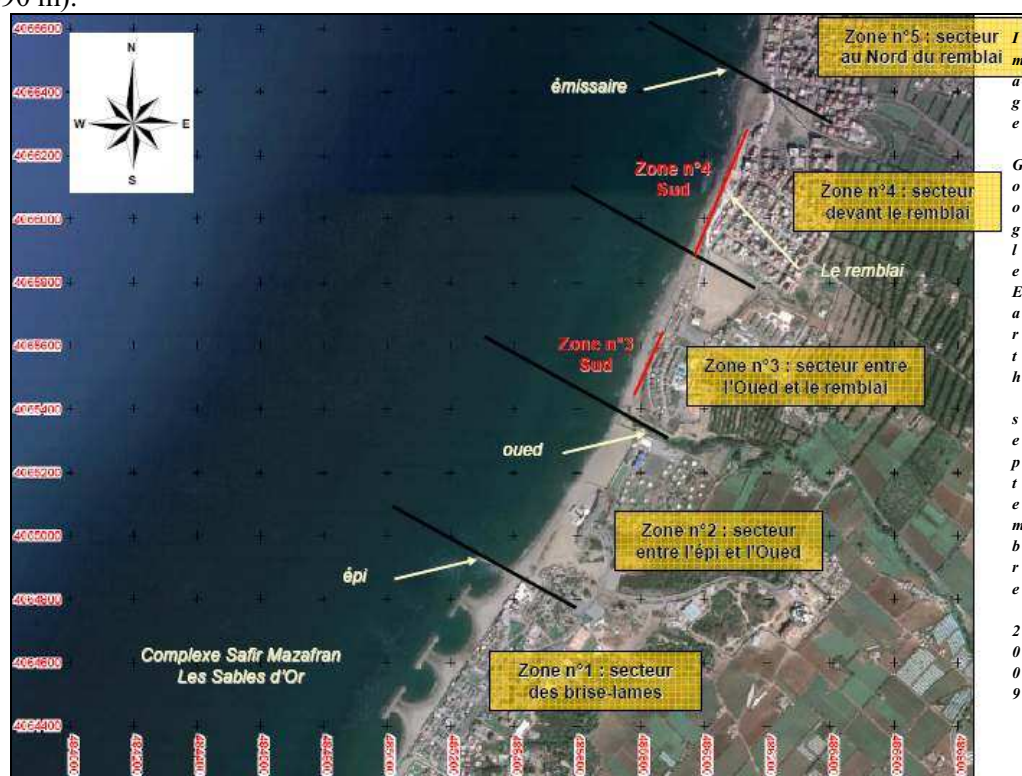


Figure V.1 : Découpage de la plage de Palm Beach-Azur en 5 zones d'aménagement. (SGH, 2010)

V.2. Les principes d'aménagement adoptés

Les principes d'aménagement du littoral peuvent être divisés en deux grandes familles (*selon Caminade, 1996*) :

- Les actions qui visent à lutter contre les causes.
- Les actions réparatrices ou de compensation.

Dans le premier cas, on agit sur les phénomènes naturels pour aller dans le sens souhaité :

- Diminuer l'érosion des falaises en aménageant la partie terrestre (drains, végétation...), mais aussi en bloquant les éboulis en pied de falaise pour obtenir une autoprotection.
- Diminuer l'action des houles de tempête en les faisant déferler au large et les transformer ainsi en houles de « beau temps » lorsqu'elles abordent les plages.
- Lutter contre la sédimentation en renforçant les courants de marée au lieu de les atténuer.

Dans le second cas, on se contente de réaliser des aménagements ou des ouvrages pour compenser l'effet des phénomènes naturels ou carrément pour s'y opposer :

- Recharger en sable une plage trop érodée.
- Protéger une route de bord de mer en construisant une digue de haut de plage, etc.

Dans le cas de Palm Beach-Azur, il faudra recourir simultanément aux deux types de mesures qui permettront d'avoir un effet immédiat (mesures de compensation) tout en favorisant les évolutions à long terme par des aménagements adéquats.

V.3. Les ouvrages de protection envisageables

La défense d'une côte consiste en l'établissement d'ouvrages capables de s'opposer à l'attaque de la mer et de protéger les hauts des plages (*Benoit et al., 2009*). Les aménagements envisageables pour lutter contre l'érosion de la plage de Palm Beach-Azur sont les suivants :

- Plaques minces horizontales.
- Le recul stratégique : le principe de cette solution est de laisser la nature faire.
- Les ouvrages transversaux : les épis.
- Les ouvrages longitudinaux :
 - Sur le front de mer (perré, etc.) accolés au rivage.
 - Détachés de la côte dans les petits fonds : brise-lames bas (cavaliers), semi-immergés, affleurants ou hauts.
- Les apports/rechargements de la plage avec du sable.
- La protection du cordon dunaire.
- Le système Ecoplage.

Il convient de rappeler qu'une solution de première urgence a été mise en place au cours de l'année 2009 suite aux dégâts engendrés sur la zone du remblai lors de la tempête de février 2009. Cette solution est constituée par du tout-venant en enrochements déversé sur la pente du remblai qui a été fortement érodé, dans le but de limiter les risques érosifs durant l'hiver 2009/2010 avant que ne soient réalisées les solutions d'aménagements définitives.

V.3.1. Plaques minces horizontales

Si l'on place sous la surface de l'eau une plaque mince horizontale, on constate un phénomène inverse de celui observé précédemment. Les vitesses verticales de la houle sont quasi laminées et seules subsistent les vitesses horizontales (*Caminade, 1995*).

Pour certaines configurations, on peut observer que l'oscillation de la masse d'eau sous la plaque est en opposition de phase avec la houle incidente et que la transmission de l'énergie de la houle est quasiment stoppée. La structure oppose alors à la houle un mur d'eau oscillant.

La réalisation de tels ouvrages n'est possible que dans de rares cas particuliers où l'utilisation d'autres techniques pose problème (*Caminade, 1995*).

Une solution de ce type se révélerait inefficace et inadaptée pour le site de Palm Beach-Azur car ces plaques sont efficaces seulement pour une période de houle donnée, alors que devant la plage le spectre de houle est très large. De plus, ces plaques coûtent excessivement cher.

V.3.2. Le recul stratégique

Le recul stratégique du littoral est une solution passive qui reste relativement intéressante économiquement à long terme tout en permettant de redonner un caractère plus naturel au site et donc un attrait touristique. De plus, c'est une solution qui, en général, est une réponse durable face au problème érosif (*Teisson, 1990*).

Cependant, cette solution n'est pas toujours fiable et réalisable suivant les sites d'étude. Cette solution est envisageable au devant des zones ne présentant aucun risque économique, c'est-à-dire pas d'infrastructure ni d'habitation à l'arrière-pays proche (*Paskoff, 2003*).

La plage de Palm Beach-Azur est une station balnéaire et sur plusieurs secteurs, notamment devant le remblai où sont installés les restaurants et les terrasses, il n'est pas envisageable de laisser la plage reculer naturellement sous peine de la faire disparaître et d'enlever ainsi à la commune sa zone touristique et économiquement attractive.

Ce principe sera donc considéré, mais de façon locale seulement et, de fait, combiné avec d'autres types d'aménagement.

V.3.3. Les ouvrages transversaux : les épis

Une des manières les plus classiques de réduire de façon notable le transit littoral est de lui opposer des obstacles. Ces obstacles peuvent être très importants comme les jetées d'un port ou être plus petits comme les épis. Les épis sont adaptés sur des littoraux soumis à un transit littoral important (*Miossec, 1998*).

Les matériaux tels que le sable, les graviers ou les galets vont se déposer à l'amont de l'épi. À l'aval de l'épi, la portion de littoral n'étant plus alimentée va s'éroder (*Caminade, 1996*).

V.3.3.1. Mode de fonctionnement des épis

Pour réaliser une protection constituée d'épis, on procédera par étapes en remontant vers la zone d'où proviennent les matériaux, les épis se rempliront alors naturellement (*figure V.2*).

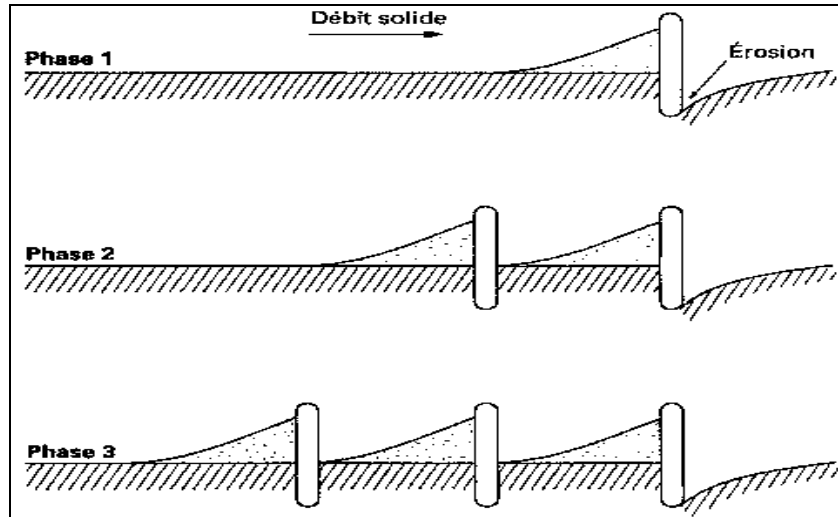


Figure V.2 : Mise en place des épis. (*Caminade, 1996*)

Les épis n'ont pas pour mission d'arrêter totalement le transport longitudinal, mais de retenir, qu'elles que soient les irrégularités de ce transport, un matelas de matériaux suffisant pour protéger la haute plage et éviter que les matériaux de la zone à protéger participent au transit littoral (*Chapon, 1978*).

Lorsqu'il existe un sens privilégié de transport littoral, c'est-à-dire une provenance prédominante des houles, les épis doivent être dirigés vers cette provenance (*figure V.3, a*).

Lorsqu'une côte est exposée à des houles de directions variées, sans qu'on puisse nettement dégager une provenance dominante, il n'y a pas d'autres solutions que d'établir les épis normalement à la côte (*figure V.3, b*).

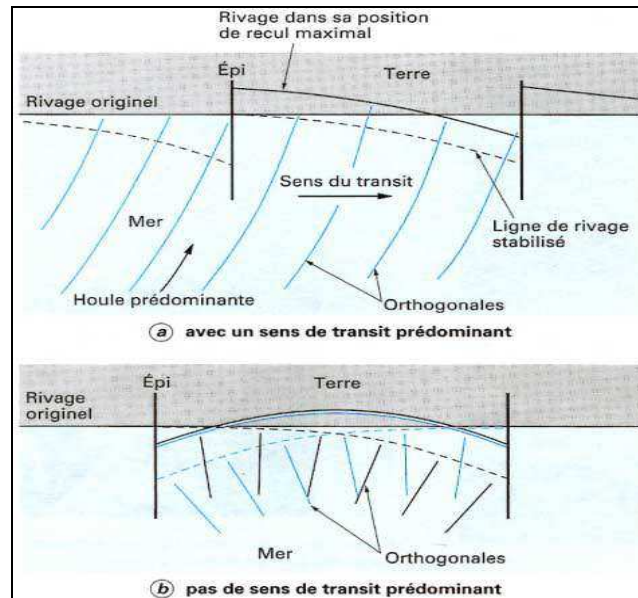


Figure V.3 : Mode de fonctionnement des épis. (Caminade, 1996)

V.3.3.2. Dispositions de construction

Les dispositions de construction des épis sont fonction du type de transport littoral et de la proportion de matériaux que l'on veut stopper.

Sur une plage de galets dont la pente est importante et où le transport s'effectue essentiellement par jet de rive, on pourra recourir à des épis courts dépassant largement au-dessus du terrain initial (Caminade, 1995).

Pour une plage de sable fin, où le transport se fait tout au long de l'estran, on aura recours à des épis plus longs dont la saillie ne doit guère dépasser le mètre. La longueur des épis est fonction du transit du bas de plage que l'on veut intercepter. Ainsi, plus l'épi est long et plus il bloquera le transit littoral augmentant ainsi l'accrétion à l'amont et l'érosion à l'aval (Chapon, 1978).

L'efficacité des épis dépend de la nature des matériaux, des caractéristiques de houles, de la pente des fonds, du transit littoral (importance, distribution transversale, sens prédominant), et de l'existence ou non de la marée.

Les épis peuvent être construits de manière extrêmement diverse en utilisant les matériaux disponibles :

- Rideau plan en maçonnerie, en béton, en bois, en palplanches.
- Rideau en zigzag permettant un raidissement en tête de l'épi.
- Mur massif en maçonnerie, en gabions remplis de béton ou d'enrochements.
- Epi en enrochements naturels ou artificiels.
- Epi maçonné.
- Rangées de pieux en bois, en métal.

On peut aussi utiliser des épis en forme de T qui favorisent la sédimentation en bas de plage (figure V.4). Bien entendu, il faudra veiller au bon état de ces ouvrages qu'il faut entretenir.

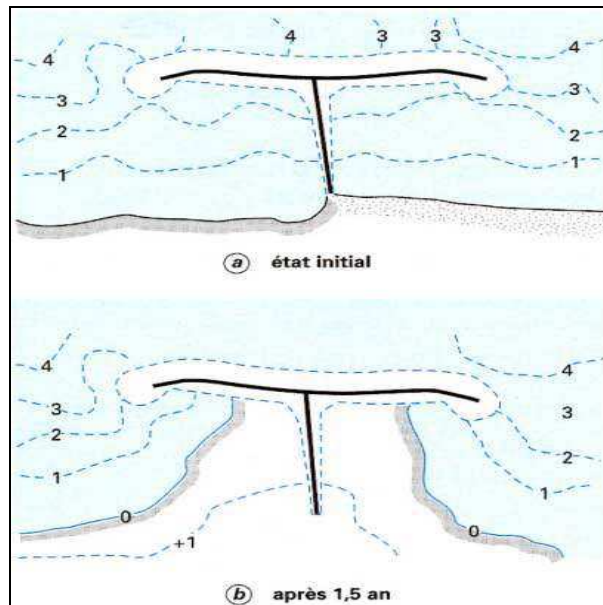


Figure V.4 : Schéma d'un épi en forme de T. (Caminade, 1996)

V.3.3.3. Applicabilité au site d'étude

Sur la plage de Palm Beach-Azur, le transit littoral n'est pas très important (résultante du transit potentiel à dominante Ouest-Est et de l'ordre de 5000 à 10000 m³/an) donc la mise en place d'un système d'épis n'est pas le type de solution le plus approprié. D'autre part, la préoccupation primordiale est de protéger les infrastructures de première ligne face aux tempêtes hivernales, ce que ne permettent pas les épis.

V.3.4. Les ouvrages longitudinaux

Ils sont réalisés en contact direct entre le haut de plage et les infrastructures situées immédiatement au-dessus. La construction d'une défense longitudinale de haut de plage peut s'imposer lorsque les transports longitudinaux sont insuffisants pour éviter que les violentes tempêtes vident la plage ou attaquent le haut de plage. Une défense longitudinale est également nécessaire pour résister à une houle frontale (Chapon, 1978).

Ce type d'ouvrage, bien qu'il assure une protection immédiate des infrastructures côtières, porte atteinte à la plage, par la présence d'une paroi quasi verticale qui augmente la réflexion de la houle.

V.3.4.1. Sur le front de mer

V.3.4.1.1. Définition et principe

Les fronts de mer, appelés aussi protection de haut de plage, ont pour but essentiel d'assurer le « blindage » (fixer) le trait de côte afin de mettre hors d'atteinte de la mer les habitations ou les terrains situés en arrière proche (Caminade, 1996).

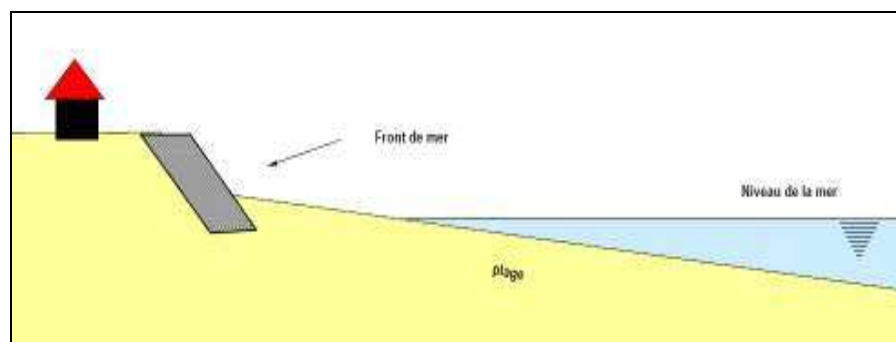


Figure V.5 : Schéma d'un front de mer.

Les fronts de mer sont des ouvrages qui n'ont pas de rôle actif sur le contrôle de la dynamique sédimentaire, si la plage est en érosion, le processus continuera (voire s'accélélera).

Dans le cas d'un front de mer mis en place pour protéger des terrains contre l'érosion marine, il y aura continuation :

- du processus d'érosion de part et d'autre de la protection.
- de l'abaissement de la plage devant l'ouvrage.

En effet, de tels ouvrages doivent (*Colas, 2007*) :

- Etre (si possible) peu réfléchissants.
- Résister à la poussée des terrains.
- Ne pas être imperméables (mise en charge du massif),
- Etre réalisés (si possible) au-delà du niveau atteint par les pleines mers.
- Etre munis de dispositifs anti-affouillement.
- Avoir une cote d'arase telle qu'ils ne soient pas (ou très peu) franchis, sinon prendre les mesures afin qu'ils ne mettent pas en cause la vie de l'ouvrage.

Du point de vue de leur dimensionnement, il est impératif de tenir compte de l'évolution future de la plage et des évolutions saisonnières (*Chapon, 1978*) : effet de la houle d'autant plus important que les fonds s'abaissent, risque de déchaussement des fondations, etc.

Ces ouvrages peuvent être édifiés de différentes manières : enrochements, gabions, perré maçonné ou ouvrages en géotextile.

V.3.4.1.2. Applicabilité au site d'étude

Les ouvrages de haut de plage sont adaptés à une seule problématique qui est, entre autres, de protéger les habitations proches de la ligne du rivage de Palm Beach-Azur.

V.3.4.2. Les brise-lames

V.3.4.2.1. Forme générale

Il s'agit d'ouvrages dont l'axe principal est orienté parallèlement, ou est peu incliné, par rapport à la côte. Ils ont pour but de provoquer une dissipation de l'énergie de la houle avant son déferlement sur la plage et de s'opposer à l'entraînement vers le large des matériaux (*Ramoge, 2002*). En effet, l'action des brise-lames se résume comme suit :

- Créer un gradient longitudinal des hauteurs des agitations.
- Les courants sont orientés de la zone agitée vers la zone abritée.
- Les sables sont transportés à l'arrière du brise-lames où ils s'accumulent pour former des tombolos.

L'efficacité d'un brise-lames sur la plage dépend de sa longueur, sa distance à la côte, sa cote d'arase et de l'espacement entre les brise-lames dans le cas d'une batterie de brise-lames.

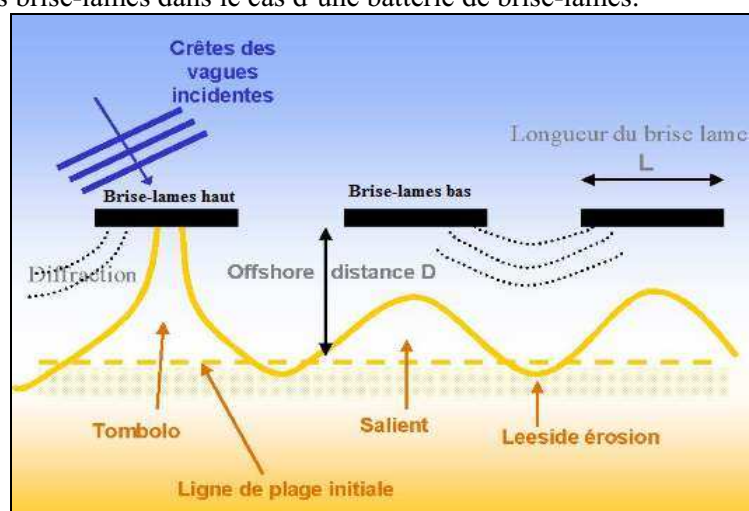


Figure V.6 : Schématisation de l'action des brise-lames (*Caminade, 1995 modifié*).

V.3.4.2.2. Type et nature des ouvrages

Il existe différents types de brise-lames en fonction de l'utilisation que l'on souhaite (*Caminade, 1996*) :

- Brise-lames immergés : faible impact visuel, efficacité limitée à atténuer la houle.
- Brise-lames bas ou affleurants : impact visuel moyen, les ouvrages bas sont franchis par la houle et une partie de l'énergie de la houle est dissipée par franchissement, les plages sont en forme de saillant, résultats satisfaisants dans des régions marquées par de faibles marées (ex. la Méditerranée).

- Brise-lames émergés « classiques » : détérioration évidente du paysage et coût de construction assez élevé, réduction substantielle de la houle, résultats satisfaisants, dans les diverses conditions de marée, contre l'érosion des plages les plages derrière de telles structures sont assez larges.

Les brise-lames sont généralement constitués en enrochements. Sur certains sites, des brise-lames en boudins géotextile peuvent être envisagés.

V.3.4.2.3. Applicabilité au site d'étude

Les ouvrages de type brise-lames sont bien adaptés au site car ils permettent d'atténuer la houle et donc de limiter les problèmes d'érosion rencontrés actuellement sur la plage de Palm Beach-Azur (petits fonds, estran et haut de plage).

V.3.5. L'engraisement artificiel (apport de sables)

V.3.5.1. Principe et provenance

Le déversement sur le rivage de quantités importantes de sédiments provenant de carrières de prélèvement situées en mer ou sur terre, ou de déblais de construction, permet de stabiliser ou d'agrandir une plage menacée d'érosion ou de créer une nouvelle plage (*Ramoge, 2002*). On compense ainsi par des apports extérieurs la réduction des apports naturels.

Afin de rendre plus stables les sédiments ajoutés artificiellement aux plages, la recherche et l'expérimentation se sont orientées vers (*Ramoge, 2002*):

- L'utilisation de sédiments à granulométrie assez grossière qui présentent une plus grande porosité que le sable et qui absorbent plus efficacement l'énergie de la houle. Le gravier permet en outre d'obtenir un profil plus pentu de la plage et d'avancer davantage qu'en utilisant la même quantité de sable.
- La protection de la zone faisant l'objet de l'engraisement par des ouvrages rigides. Plusieurs études de suivi sont actuellement en cours sur les interventions d'engraisement protégées afin d'évaluer leur réelle efficacité.

Dans le choix des carrières de prélèvement situées en mer ou sur terre, il faut tenir compte des caractéristiques pétrographiques et de la granulométrie du sédiment et, plus particulièrement, du pourcentage de sédiments fins.

Dans le cas de pourcentages élevés de sédiments fins, le matériau doit être préalablement lavé, afin d'éviter la dispersion des sédiments fins pouvant endommager les herbiers à Posidonie ou les biocénoses présentes sur les fonds. Outre l'évaluation de la compatibilité du sédiment d'un point de vue physique, il faut également évaluer les qualités chimiques et bactériologiques.

Il faut aussi considérer les modalités d'engraisement de la plage, notamment en ce qui concerne le nombre de points d'alimentation, leur localisation et la quantité appropriée des apports (*Chapon, 1978*).

Pour obtenir un engraisement rapide et uniforme sur toute l'étendue de la plage, il est préférable d'envisager plusieurs points d'alimentation.

V.3.5.2. Les contraintes

Tout en étant l'une des solutions les plus respectueuses de la dynamique du littoral, le rechargement présente certains inconvénients (*Paskoff, 2003*):

- difficulté de trouver le matériau approprié en grandes quantités et à un coût acceptable.
- nécessité d'une alimentation périodique.
- conséquences possibles sur l'environnement, en raison d'une éventuelle augmentation temporaire de la turbidité des eaux liée aux conditions saisonnières, à la houle ou aux concentrations de sédiments que l'on retrouve, par entraînement gravitaire, dans le sillon pré-littoral ou sur les herbiers à Posidonie.

V.3.5.3. Applicabilité au site d'étude

Le rechargement de plage est une solution adaptée au site d'étude, et ce, d'autant plus que le rechargement de plage est combiné à un autre aménagement de type ouvrage longitudinal en mer ou sur le front de mer pour en améliorer l'efficacité des ouvrages.

Du fait des difficultés d'approvisionnement pour un rechargement massif, les solutions reposant sur un simple rechargement ne seront pas développées par la suite. Des apports (sur des secteurs limités) seront par contre considérés, en association avec d'autres aménagements.

V.3.6. La reconstitution et protection du cordon dunaire

V.3.6.1. Principe

Le massif dunaire est un élément naturel essentiel pour la protection et la stabilisation d'un littoral sableux. Cette méthode consiste à rétablir, voire à créer, une nouvelle dune en haut de plage.

Il s'agit de rétablir une couverture végétale importante (par plantations d'oyats) et/ou de mettre en place des ganivelles, haies brise-vent en châtaignier, des filets coupe-vent ou des fascines à plat (ballots de foin, branchages, ...) qui vont arrêter une partie du transit sédimentaire éolien et donc stabiliser la réserve de sable qui se trouve en haut de plage (*Ramoge, 2002*).

Cette technique s'avère très efficace, pas coûteuse et beaucoup moins contraignante d'un point de vue paysager et environnemental que les ouvrages de protection "lourds" (digues, épis, enrochements,...), il est ensuite nécessaire de réglementer la circulation des véhicules et de canaliser la fréquentation de ce milieu.

V.3.6.2. Applicabilité au site d'étude

Il faut rappeler que les dispositifs cités plus haut de protection sont nécessaires pour la stabilisation d'un cordon dunaire mais ils ne peuvent à eux-seuls résoudre les problèmes d'érosion par l'attaque directe de la mer.

De plus, la dune est peu présente sur le site d'étude. Une dune bordière, légèrement en retrait du trait de côte, existe en zone 2 entre l'épi Nord de Zéralda et le cours d'eau. Cette dune mériterait d'être remodelée, végétalisée et protégée de la fréquentation surtout estivale par des dispositions appropriées.

V.3.7. Le système Ecoplage

V.3.7.1. Définition et principe

Il s'agit d'un système mécanique qui absorbe, à l'aide d'une pompe, l'énergie de la houle. Il draine ainsi l'eau par dépression dans une canalisation souterraine et permet l'engraissement de la plage par les sables en suspension portés par la houle. Il présente l'avantage d'être invisible car il est enterré sous la plage (*Ramoge, 2002*). Il constitue ainsi un frein au processus d'érosion et permet la reconstitution plus rapide de la plage après une tempête.

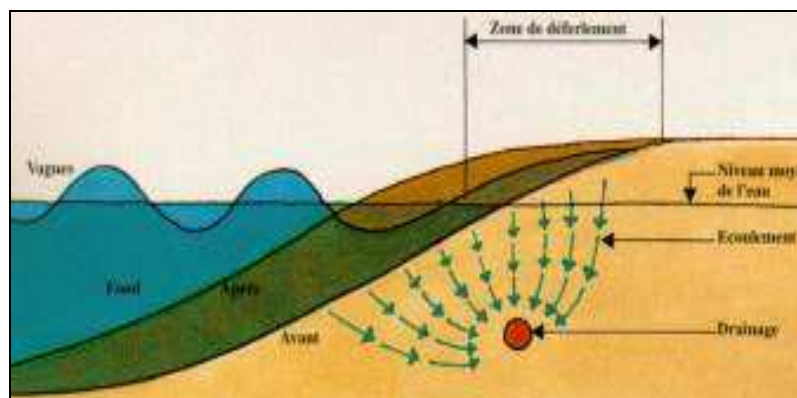


Figure V.7 : Principe de fonctionnement du système Ecoplage.

V.3.7.2. Applicabilité au site d'étude

Le système Ecoplage est adapté au site de Palm Beach-Azur et pourrait avantageusement venir compléter une défense de haut de plage qui permettrait de fixer le rivage aux endroits les plus menacés.

Ce système n'étant pas adapté à toutes les plages, il nécessite la réalisation d'études spécifiques menées par la Société Ecoplage pour évaluer l'interaction des nombreux paramètres, les contraintes du site et évaluer la faisabilité du système sur la zone d'étude.

V.4. Procédés et critères de dimensionnement

Afin de dimensionner les futurs aménagements sur la plage de Palm Beach-Azur, les critères de dimensionnement, les contraintes du site, et les méthodes et moyens employés doivent être précisés.

V.4.1. Évaluation de la houle de projet

La stabilité des ouvrages de protection contre la houle dépend essentiellement des caractéristiques de la houle susceptible de venir attaquer l'ouvrage pendant sa vie.

La détermination de la houle de projet est basée sur la bonne connaissance des houles du site, mais aussi sur d'autres critères parmi lesquels figurent en bonne place la durée de vie de l'ouvrage et le risque admissible.

Plus la durée de vie de l'ouvrage est importante, plus la probabilité d'avoir affaire à des tempêtes importantes est grande. Les formules suivantes (**Bonnefille, 1994**), traduisent cette quasi-évidence :

$$p_E = 1 - \exp(-L/T)$$
$$T = -L/\ln(1 - p_E)$$

Où :

T : durée de retour > 10ans.

L : durée de vie de l'ouvrage.

p_E : probabilité du dommage E (correspondant à un creux H de la houle d'une durée de retour T).

D'un point de vue pratique, pour un ouvrage déterminé dont la durée de vie est de l'ordre de 50 ans, on a (**Bonnefille, 1994**):

- une quasi-certitude d'être confronté au moins une fois à la houle décennale ($p_E = 99,5 \%$).
- pratiquement une chance sur deux d'être confronté à la houle centennale (39 %).
- une chance non négligeable (5 %) d'être confronté à la houle millénaire.

Si l'on désire se prémunir contre les risques à 99 %, il faudra adopter une houle de calcul dont la période de retour sera 100 fois la durée de vie de l'ouvrage, ce qui entraînera vraisemblablement un coût d'investissement prohibitif. Il est alors nécessaire d'accepter un risque plus important, mais raisonnable (**Caminade, 1995**).

Objectivement, cette notion de risque admissible n'est pas la même si l'on veut protéger des effets de la mer une centrale nucléaire ou un simple remblai non exploité.

On peut utiliser alors deux critères qui permettent de mieux quantifier le risque encouru :

- Le critère de non-dommages pour lequel la structure doit rester intacte et ne pas subir de mouvement important.
- Le critère de dommages réparables pour lequel on admet que la structure puisse être endommagée mais effectivement réparable ou non.

Pour le dimensionnement des ouvrages, la houle de projet à considérer dans cette étude est la houle cinquantennale (50 ans), dont les caractéristiques au large sont :

- N240° à N300° : $H_s=8$ m et $T_p=11$ s.
- N300° à N360° : $H_s=8,6$ m et $T_p=13$ s.
- N0° à N60° : $H_s=8,6$ m et $T_p=12$ s.

Le calcul de la propagation de ces houles vers la côte a donné sur les trois cas les résultats présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.1 : Résultats de propagation de la houle en fonction de la hauteur d'eau à Palm Beach (SGH, 2010).

Hauteur d'eau	Hauteur H_s
1 m	0,75 m
2 m	1,50 m
3 m	1,80 m
4 m	2,50 m
5 m	2,80 m
10 m	5,25 m
15 m	6,00 m

V.4.2. Les niveaux d'eau et surcotes

Comme on l'a déjà expliqué, pour la plage de Palm Beach-Azur, nous considérerons un niveau d'eau maximum à +1m NGA.

V.4.3. Les sédiments en place

Le schéma général décrit une zonation granulométrique décroissante de la côte vers le large. Les sables moyens (compris entre 200 et 250 μ m) se limitent à une aire très réduite comprise entre l'estran et les fonds de -2 m NGA. Ailleurs, le sable présente une granulométrie moyenne avec un D_{50} compris entre 150 et 200 μ m. Le sédiment est un peu plus fin au SW (avec des teneurs en particules de $D < 40\mu$ m de 10 à 20 %). On retrouve là une partie des sédiments fins charriés par l'oued Mazafran.

V.4.4. Les modélisations et formulations utilisées

Le dimensionnement des aménagements a été réalisé à l'aide de modélisations numériques et/ou de formules empiriques.

V.4.4.1. Le modèle SWAN

Le SWAN a permis de connaître la houle de projet au droit des structures à dimensionner.

V.4.4.2. Estimation des apports en sable

Le rechargement constitue une solution de protection douce du littoral. Son intérêt principal est de recharger la zone érodée pour élargir le haut estran afin de créer une plage "sèche", c'est à dire non recouverte par les pleines mers, plus étendue. Ceci dans le but de veiller à la sécurité des ouvrages de bordure de mer et de rendre à la plage son rôle de défense contre la mer.

La méthodologie, pour estimer les volumes de sables à recharger, est la suivante :

- Ajuster les profils de plage actuels selon des profils théoriques d'équilibre en tenant compte de la distribution granulométrique existante (Méthode de Dean). Cet ajustement permet de définir les valeurs des constantes du nombre de Dean Ω (*Sabatier et al., 2002*) qui permet de classer les plages en fonction de leur morphologie et des conditions de mer. Dean (1973) introduit le rapport suivant :

$$\Omega = H_b / (w_s \cdot T)$$

Où

- H_b : hauteur de la houle au déferlement.
- T : période de la houle.
- w_s : vitesse de chute du sédiment.

Pour un diamètre $0,1 < D < 2\text{mm}$, $w_s = 8,9 / D \cdot [(1 + 95((\rho_s - \rho) / \rho) \cdot D^3)^{1/2} - 1]$

ρ_s : masse volumique du sable (2650 kg/m³ pour des sables quartzeux).

ρ : masse volumique de l'eau de mer (1030 kg/m³).

L'érosion réelle correspond globalement à des nombres de Dean supérieur à 8.

Ainsi, **Dean** a montré qu'un profil de plage peut être approché par une loi du type :

$$h = B \cdot Y^{2/3} \cdot D^{1/3}$$

Où

- h et Y : hauteur et distance en mètre à partir d'une origine située en haut de plage.
- D : diamètre médian en mm.
- B : facteur dépendant de plusieurs variables (climat des houles, marée, courants..).
- Définir les caractéristiques granulométriques des sables d'apport (définition des diamètres caractéristiques, D_{50} , ...) pour le rechargement à partir des gisements potentiels.
- Définir les profils de plage rechargés en tenant compte de la granulométrie des sables d'apports et en s'appuyant sur les profils théoriques préalablement définis.
- Estimer plusieurs volumes à recharger (volumes nets) en considérant plusieurs élargissements de "plage sèche" (largeurs de berme).
- Définir les pertes annuelles liées au rechargement et estimer les volumes réels à mettre en place (détermination du volume théorique de sur-rechargement).

Dans le cadre de l'étude sédimentaire de Palm Beach-Azur, nous avons vu que les différents profils étudiés sont presque tous similaires avec une pente de l'ordre de 1 à 3 %.

Le profil moyen actuel de la plage présente une hauteur de berme aux environs de +2 m NGA et une profondeur de fermeture vers -8 m NGA. La hauteur active du profil est donc proche de 10 m. Ainsi, une avancée de 10 m sur un linéaire de 1 mètre représente un volume de 100 m³.

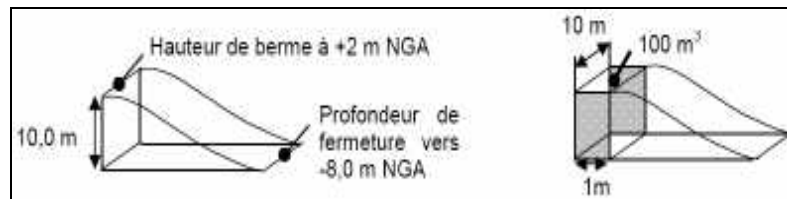


Figure V.8 : Profil moyen retenu pour estimer les apports de sables sur Palm Beach. (SGH, 2010)

Lors de la mise en place du rechargement, la fraction fine du sable rapporté est perdue. Avec le type de sable envisagé (un sable de D_{50} de 0,3 à 0,5 mm serait bien adapté au site d'étude), la perte est de l'ordre de 10 % du rechargement réalisé. Ainsi, un élargissement de 10 m de la plage sur un mètre linéaire nécessite un rechargement de l'ordre de 110 m³/ml.

Théoriquement, sur un linéaire côtier de l'ordre de 1000m, l'élargissement de la plage de 10m nécessiterait l'apport d'environ 110000 m³.

V.4.4.3. Dimensionnement des ouvrages : Formule d'Hudson

Pour le dimensionnement des ouvrages de défense en enrochements (ou éventuellement en blocs artificiels en béton), Hudson (1958-1959) a donné une formule basée sur les résultats des travaux de l'U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station à Vicksbury (*Chapon, 1978*), il s'agit de la formule la plus utilisée :

$$W = \frac{1}{K_D} \cdot \frac{\rho_s H^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1\right)^3 \cot g \alpha}$$

Où :

W : Poids moyen du bloc/enrochement (en tonne).

H : hauteur significative de la houle incidente au pied de l'ouvrage (houle de projet en m).

ρ_e : poids spécifique de l'eau de mer = 1,028 t/m³.

ρ_s : masse volumique du matériau.

α : angle du talus avec l'horizontal.

K_D : coefficient de stabilité sans dimension qui tient compte de la nature et de l'arrangement des enrochements ou des blocs.

Dans cette étude, nous avons fait l'hypothèse que :

La masse volumique des enrochements est de $\rho_s = 2,65$ t/m³.

La masse volumique du béton est de $\rho_s = 2,40$ t/m³.

V.4.4.4. Le modèle Mopla

Le modèle MOPLA a été déjà présenté et exploité, il permet de déterminer les courants à la côte engendrés par la houle ainsi que l'agitation (H_s), notamment derrière les ouvrages avancés.

V.4.4.5. Le modèle Genesis

Le modèle Genesis a été déjà présenté et exploité, il permet de préciser la position future du trait de côte sur le littoral d'étude et sur le littoral voisin (au Nord comme au Sud) et de mettre en évidence les éventuels impacts négatifs sur les littoraux adjacents.

V.5. Propositions des variantes

Pour la protection de Palm Beach-Azur contre le phénomène érosif, on propose six variantes. Il sera considéré pour toutes ces variantes, (sauf spécification contraire) ce qui suit :

- Aucune nouvelle intervention sur la zone Sud n°1 ni sur la zone Nord n°5.
- Pour la zone n°2 (entre l'épi Nord du complexe des Sables d'Or / Safir Mazafran et le débouché de l'oued) un confortement de l'espace dunaire et l'acceptation d'un recul stratégique/contrôlé et suivi sur l'ensemble de cette zone.

V.5.1. Variante n°1 : protection longitudinale de haut de plage

La variante n°1 repose sur la réalisation d'une protection longitudinale de haut de plage en enrochements sur la zone n°3 Sud (linéaire d'environ 200 m) et en zone n°4 Sud (linéaire d'environ 400 m). En variante 1b, une protection en « géotextile » est considérée pour la zone n°3 Sud.

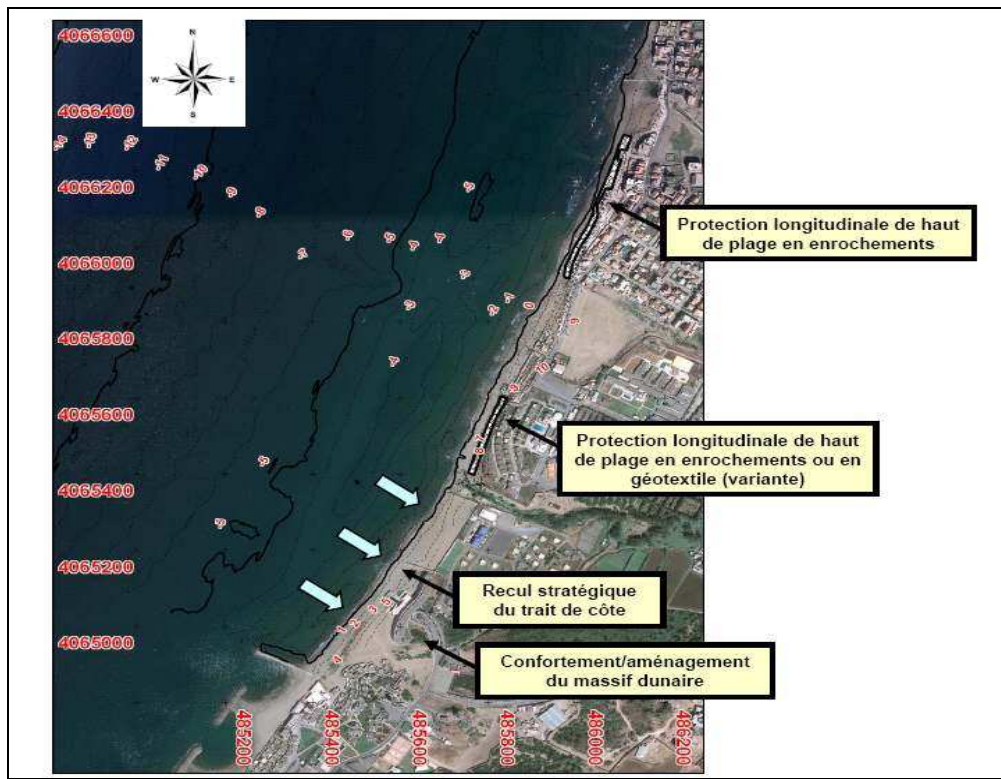


Figure V.9 : La variante de protection n°1 de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

V.5.2. Variante n°2 : batterie de 5 brise-lames hauts et apport de sable

La variante n°2 s'articule autour de la mise en place de brise-lames hauts accompagnés d'un faible apport de sable (avancée de 5 m) sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud. Ces brise-lames sont en enrochements car le géotextile n'est pas adapté pour ce genre d'ouvrage (dimension de l'ouvrage et non résistance aux UV).

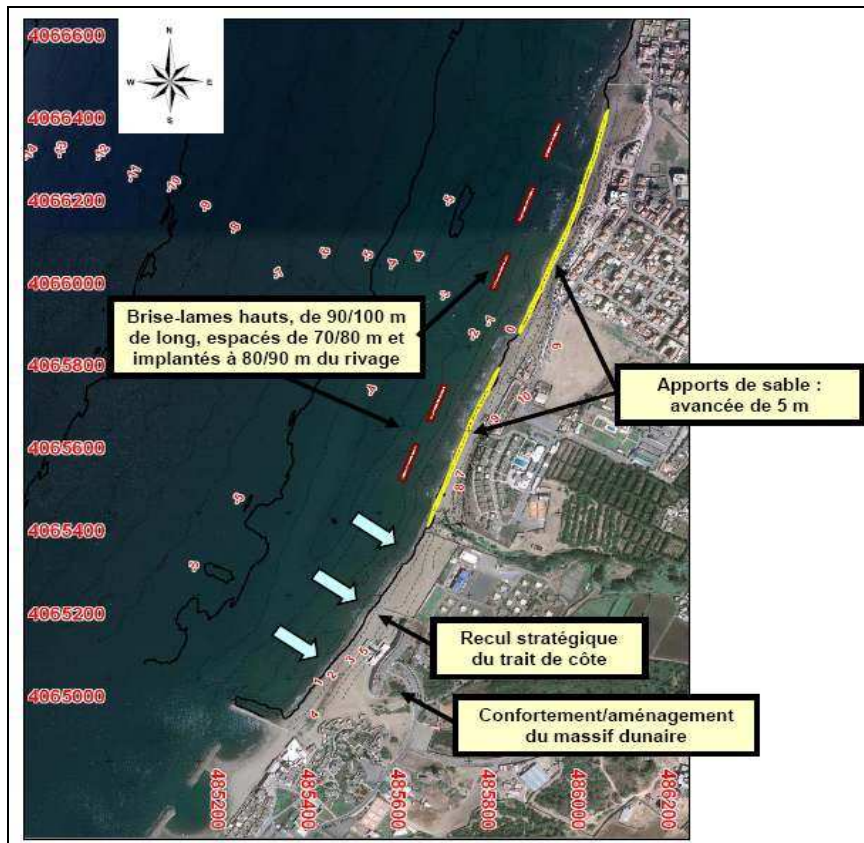


Figure V.10 : La variante de protection n°2 de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

V.5.3. Variante n°3 : batterie de 5 brise-lames bas et apport de sable

La variante n°3 s'apparente à la variante n°2, mais il s'agit de brise-lames bas accompagnés d'un apport de sable plus conséquent que pour la variante n°2 (avancée de 20 m) sont envisagés sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud au lieu de brise-lames hauts. Comme pour la variante n°2, ces brise-lames sont prévus en enrochements (géotextile non adapté).

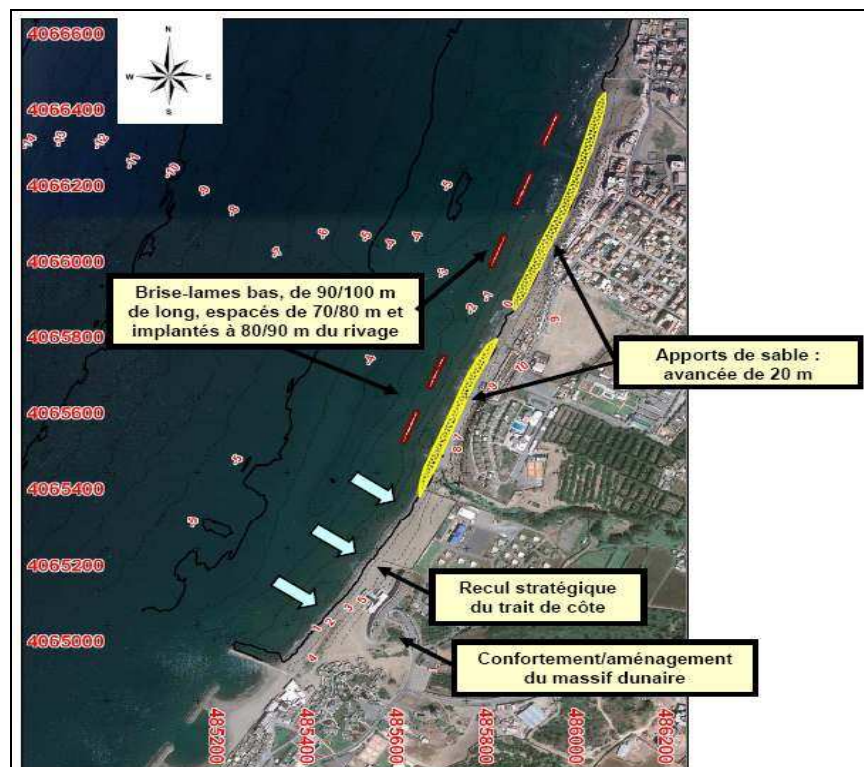


Figure V.11 : La variante de protection n°3 de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

V.5.4. Variante n°4 : protection longitudinale de haut de plage en enrochements accompagnée d'une batterie de 5 brise-lames bas et d'un apport de sable

La variante n°4 constitue un « mix » des variantes n°1 (protection longitudinale de haut de plage sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud) et n°3 (5 brise-lames bas et apport de sable sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud) mais avec un :

- dimensionnement plus léger des protections longitudinales de haut de plage que celui envisagé dans le cas de la variante n°1.
- apport de sable plus faible (avancée de 5m équivalente à celle de la variante n°2) que celui de la variante n°3.

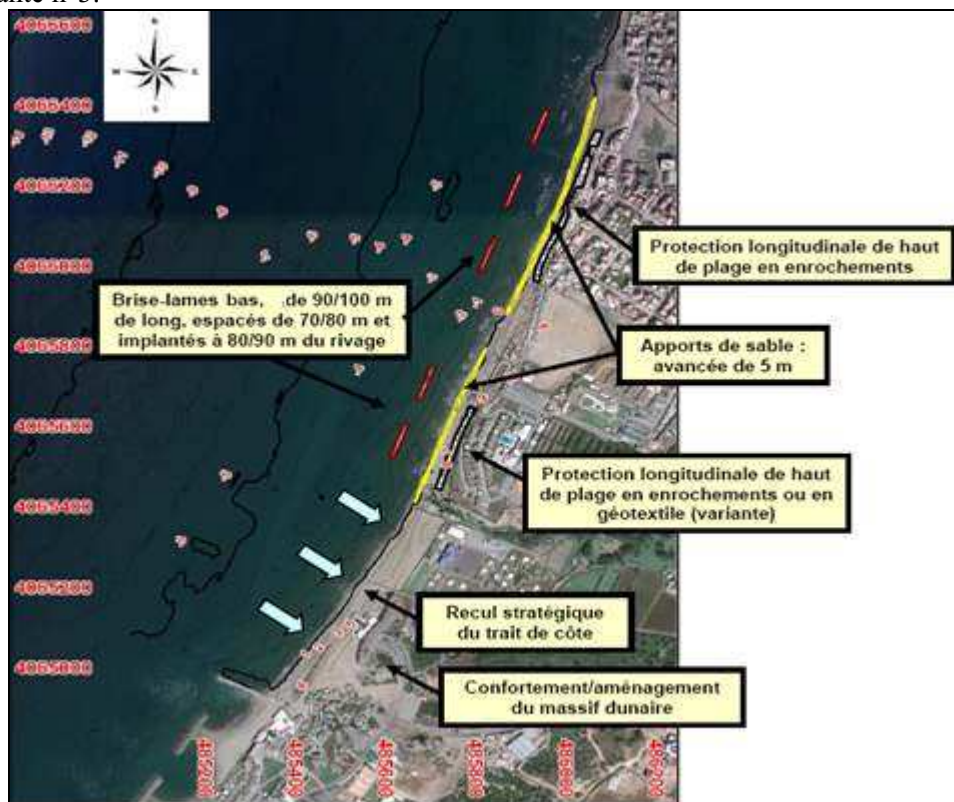


Figure V.12 : La variante de protection n°4 de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

V.5.5. Variante n°5 : protection longitudinale de haut de plage en enrochements accompagnée d'une batterie de boudins géotextile immergés

La variante n°5 consiste en une protection de haut de plage à laquelle est associée une « ligne » quasi continue de boudins en géotextile (espacés de 20 m) sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud.

Ces ouvrages feront office de digues sous-marines immergées pour réduire la hauteur des houles avant qu'elles n'atteignent la plage, favoriser le déferlement de la houle au dessus des ouvrages et ainsi diminuer l'agitation au devant de la plage pour en limiter l'érosion et contenir en partie les sables.

Un dimensionnement plus léger de la protection longitudinale de haut de plage en enrochements sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud que celui de la variante n°1 est à prévoir, du fait de l'atténuation attendue de la houle derrière les boudins géotextiles.

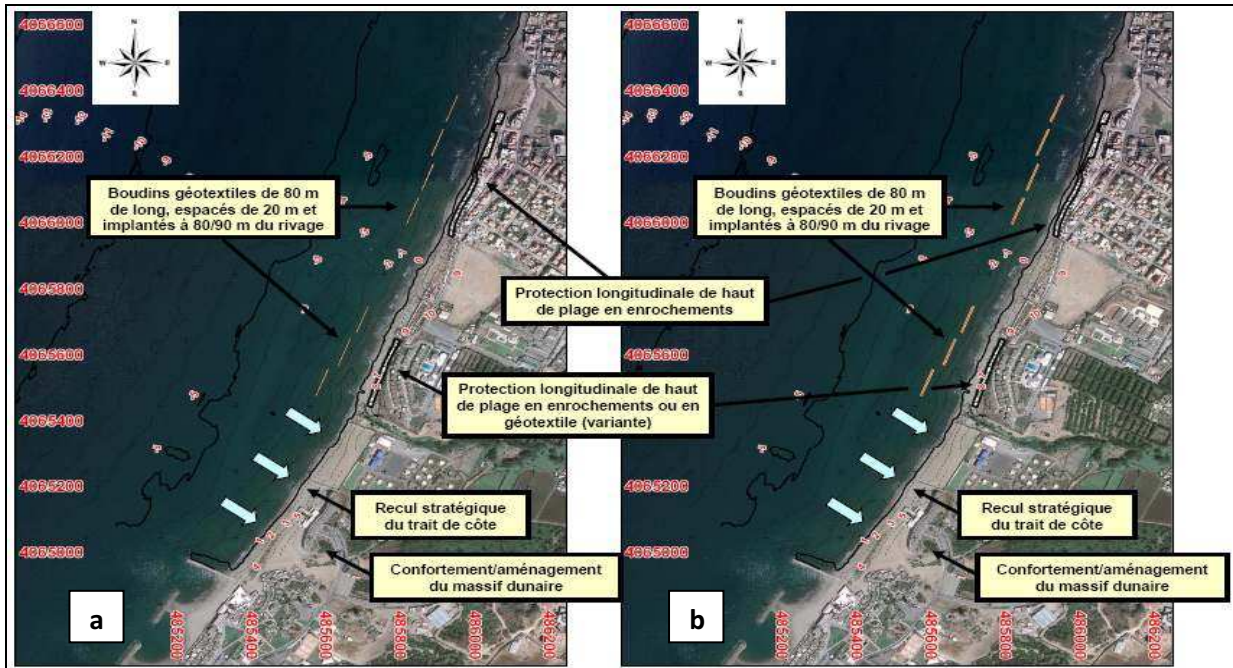


Figure V.13 : La variante de protection n°5 a et 5 b de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

V.5.6. Variante n°6 : système EcoPlage

La dernière variante étudiée repose sur le système EcoPlage prévu sur les zones n°3 Sud et n°4 Sud.

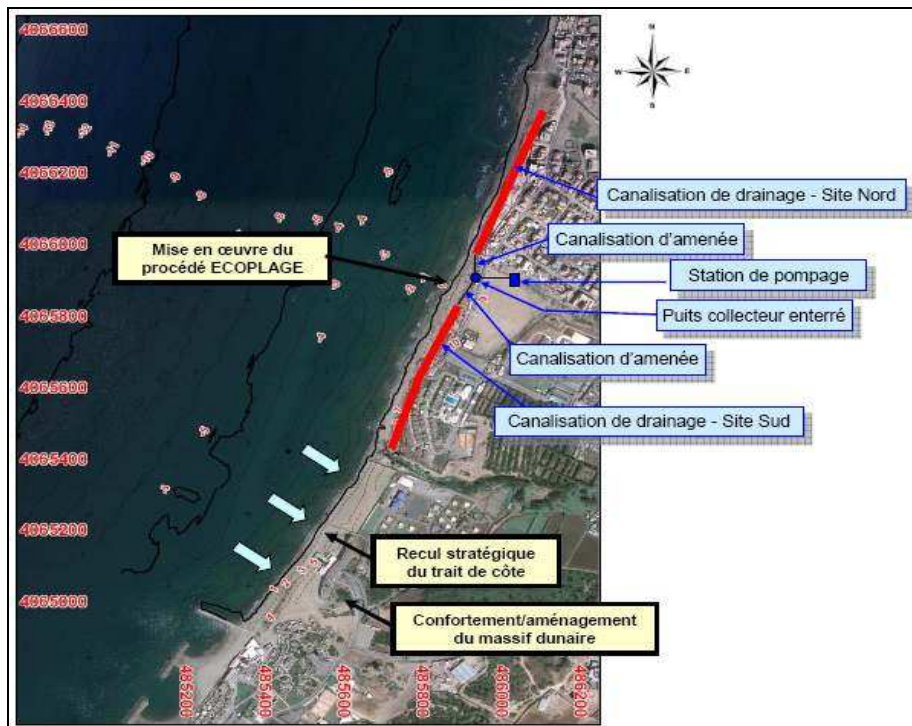


Figure V.14 : La variante de protection n°6 de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

V.6. Etude des variantes

Chacune des variantes va maintenant être étudiée. Ainsi, l'analyse multicritère permettra de faire ressortir la variante la plus satisfaisante. La variante retenue sera ensuite mise au point lors des essais sur modèles réduits physiques.

V.6.1. Confortement de l'espace dunaire en zone n°2

La protection de la zone vierge récupérable dans le cadre de la vision du recul stratégique envisagée en zone n°2 de la plage de Palm Beach-Azur serait accompagnée par des dispositifs de protection écologiquement adaptés contre la dégradation des dunes bordières.

On préconise un reprofilage éolien basé principalement sur le placement des ganivelles perpendiculairement aux vents dominants de secteurs WSW et ENE. Le système de ganivelles sera complété de plantation d'oyats au fur et à mesure de l'ensevelissement jusqu'à l'obtention d'un massif conséquent. Un confortement sur une hauteur de 1 à 1,5 m pourrait être un premier objectif.

Le massif dunaire une fois reconstitué devra faire l'objet d'un suivi et d'un maintien contre la détérioration de son paysage et de sa couverture végétale par la fréquentation surtout en saison estivale. Cette dernière pourra être organisée par la création de cheminements et accès canalisés à la plage.

En revanche, une protection en pied par des tubes ou « nappes » en géotextiles pourrait être envisagée. Celle-ci pourrait s'avérer intéressante si la protection contre l'érosion de la zone n°3 Sud était assurée par un même dispositif.

V.6.2. Variante n°1 : protection longitudinale de haut de plage

La variante n°1 comporte :

- En zone n°2 : le confortement de l'espace dunaire.
- En zones n°3 Sud et n°4 Sud : une protection longitudinale de haut de plage en enrochements.

En variante 1b, une protection en « géotextile » est considérée pour la zone n°3 Sud.

V.6.2.1. Défense longitudinale de haut de plage en enrochements : variante 1a

La défense longitudinale de haut de plage le long du littoral est un aménagement adapté pour lutter contre l'érosion lors des tempêtes. Cette défense en enrochements serait située devant les zones les plus menacées par l'érosion, c'est-à-dire la zone n°3 Sud sur un linéaire d'environ 200 m et la zone n°4 Sud (au niveau du remblai) sur un linéaire d'environ 400 m.

La protection, telle que préconisée, prévoit la réalisation d'une défense double couche en enrochements, comportant une carapace et une sous-couche déposée sur le talus.

Les paramètres et critères considérés pour le dimensionnement de la protection (à partir de la formule d'Hudson) sont les suivants :

- houle de projet sous 2 m de hauteur d'eau : $H_s=1,5$ m et $T_p=13$ s. On considère la houle de projet cinquantennale par 1m de profondeur (position du pied de la structure) avec un plan d'eau à +1m NGA. Ainsi, notre houle de projet considéré est celle par 2 m de hauteur d'eau.
- masse volumique des enrochements : $\rho_s = 2,65$ t/m³.
- masse volumique de l'eau de mer : $\rho_e = 1,028$ t/m³.
- pente du talus : $\cotg \alpha = 3/2$.
- coefficient de stabilité de la formule de Hudson : $K_D=2,1$.

V.6.2.1.1. Carapace externe

Le poids moyen des enrochements de la carapace externe est de l'ordre de 0,8 t. Le choix des enrochements 1 à 2 t permet de s'assurer une bonne protection du littoral. La carapace externe de la défense présente alors une épaisseur de l'ordre de 2 m. La cote d'arase de l'ouvrage doit se situer à minima à +3,10 m NGA ($1,4 \cdot H_s$ au dessus du plan = 2,10 m + 1m NGA du plan d'eau considéré).

Compte tenu de la cote de la berme au niveau de la zone n°3 Sud ($\leq +4$ m NGA), il conviendrait de disposer en crête d'ouvrage au minimum 3 blocs de 1 à 2 t représentant une longueur horizontale minimale de 3 m. Par sécurité, on retiendra une cote d'arase adaptée à la cote du terrain naturel (TN) soit entre +3,5 et +4 m NGA.

Concernant la zone n°4 Sud, la cote du remblai est bien supérieure à cette cote minimale de +3,1 m NGA. On peut envisager de réaliser un cheminement piétonnier au dessus de la structure en enrochements (platelage bois, par exemple, qui pourrait être retiré en période hivernale) et de fixer la partie haute du remblai par des dispositifs de type pavés autobloquants agrémentés de végétation adaptée au milieu marin et aux embruns. La cote d'arase de la carapace sera considérée à +3,5 m NGA.

V.6.2.1.2. Sous couche

Il convient de respecter des règles de compatibilité granulaire de sorte que ces couches jouent le rôle de filtre en empêchant les matériaux les plus fins de passer à travers les couches les plus grossières (SGH, 1989).

Pour les digues, ces couches sont réalisées en enrochements naturels mais contrairement à la carapace qui doit présenter une catégorie assez homogène pour obtenir une forte porosité en vue de réduire les sous-pressions, les couches de transition posées sur un terrain devraient présenter une granulométrie assez étendue pour participer à l'étanchéité de l'ouvrage et jouer le rôle de filtre.

On applique généralement la règle du 1/10 (Règle de Terzagui, SGH, 1989). Elle consiste à prendre 1/10 pour le rapport entre les poids moyens des deux couches.

La carapace externe est constituée d'enrochements de 1 à 2 t, cela nous conduit à préconiser une sous-couche sécuritaire en 2 rangées de 100 – 500 kg qui donne une épaisseur de 1,15 m. La sous-couche sera arasée à la cote +2,0 m NGA.

V.6.2.1.3. Butée de pied

La carapace de cette solution de défense longitudinale s'appuiera sur une butée de pied qui sera ensouillée dans le sable pour limiter le glissement de la carapace externe, pour stabiliser l'ouvrage et pour limiter les risques d'accident. Cette butée sera composée par les mêmes enrochements que la carapace externe et sera dans la continuité de cette dernière sur une largeur de 2,5 m.

Elle reposera sur une monocouche d'enrochements de 100 à 500 kg, elle-même posée sur un tapis de matériaux plus fins (10-50 kg) et sur un géotextile pour éviter les poinçonnements dans le sol meuble). Cette disposition est sécurisante par rapport au risque d'abaissement des fonds meubles prévisible devant un tel ouvrage lorsque les fonds sont sableux.

La mise en place de cette butée nécessitera la réalisation préalable d'une tranchée au fond de laquelle sera disposé le géotextile avant la mise en place de la butée de pied proprement dite.

Les coupe-types de la variante n°1a sont présentées ci-dessous.

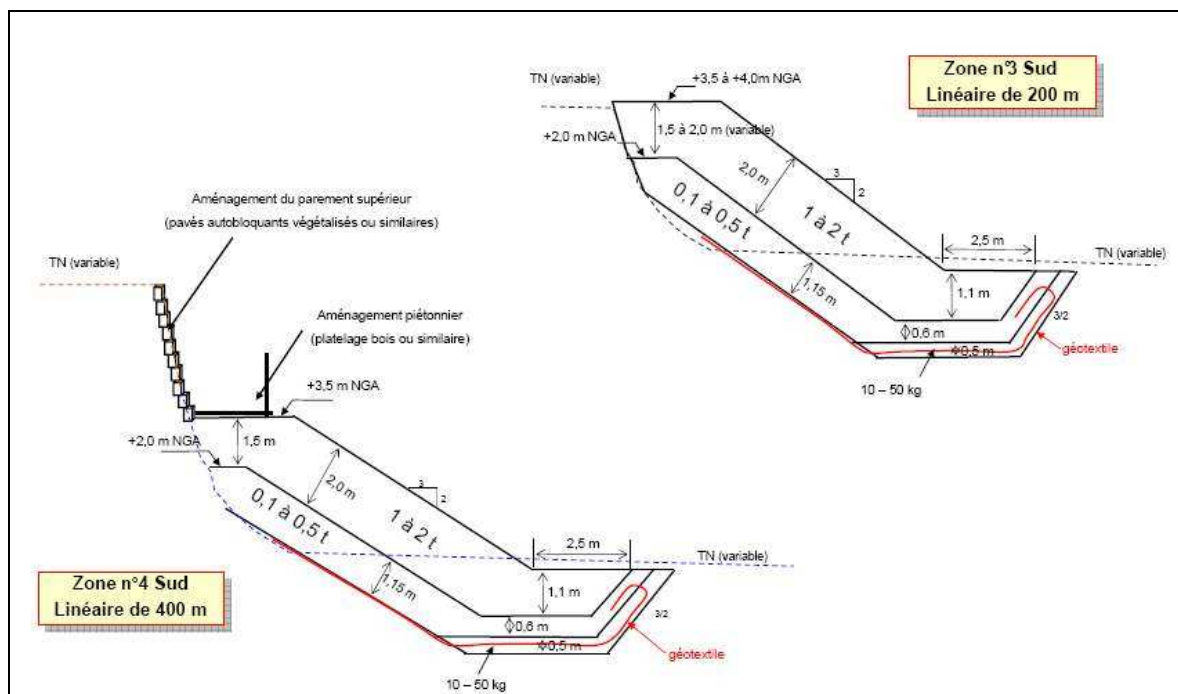


Figure V.15 : Coupe-types de la variante n°1a de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)

V.6.2.2. Défense longitudinale de haut de plage en géotextiles : variante 1b

La mise en place d'une défense longitudinale de haut de plage en géotextiles peut être envisagée sur la partie Sud de la zone n°3, sur un linéaire d'environ 200 m, là où une zone d'estran encore suffisamment large subsiste, contrairement à la zone n°4 Sud.

Cette variante 1b viendrait se substituer à la protection en enrochements présentée précédemment. Elle reposerait sur la mise en œuvre de bandes (ou nappes) en géotextiles remplies de sable (nappes rabattues après remplissage) et ancrées par des pieux en bois. Cette disposition devra être recouverte de sable pour reconstituer l'estran et soustraire les panneaux géotextiles à l'action directe des UV.

La solution préconisée à trois panneaux est à préférer au boudin unique car présentant une durée de vie plus grande (la dégradation d'un panneau ne conduit pas à la ruine du dispositif, comme cela pourrait l'être avec un seul boudin).

L'apport de sable associé au dispositif pour remplir et protéger les panneaux et pour reconstituer une plage d'une quinzaine de mètres de largeur serait d'environ 40 m³/ml, soit environ 10000 m³ pour un linéaire de 200 m (en incluant les « raccordements » aux extrémités de la zone aménagée).

La coupe-type de la solution proposée en variante n°1b est présentée ci-dessous.

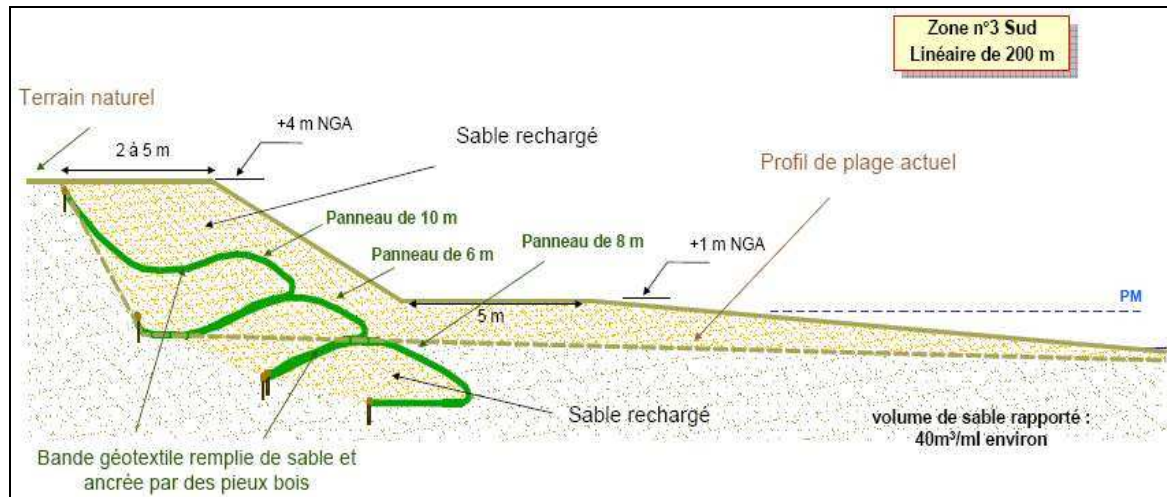


Figure V.16 : Coupe-type de la variante n°1b de protection de Palm Beach.

V.6.3. Variante n°2 : batterie de 5 brise-lames hauts et apport de sable

La variante n°2 comporte :

- En zone n°2 : le confortement de l'espace dunaire.
- En zones n°3 Sud et n°4 Sud :
Cinq brise-lames hauts en enrochements.
Un apport de sable correspondant à une avancée du rivage actuel de 5 m.

V.6.3.1. Généralités sur la disposition des brise-lames

Un brise-lame exerce deux types d'actions sur les houles s'approchant du rivage. Il diminue d'une part l'énergie des houles atteignant le plan d'eau et la zone côtière situés à son abri, en réfléchissant ou absorbant au moins partiellement l'énergie des houles qui le frappent directement. Les houles résiduelles étant transmises par-dessus l'ouvrage (franchissement) et au travers de l'ouvrage (perméabilité). D'autre part, il provoque la diffraction des houles à ses extrémités ce qui entraîne une modification du tracé des orthogonales et des crêtes de houle en arrière de lui (*Samat, 2007*).

De ces deux effets, en découle une modification du tracé des orthogonales de houles générant elles mêmes un remodelage des fonds. Ces actions provoquent le développement d'une avancée à partir de la ligne de rivage. Si la longueur du brise-lame est suffisante par rapport à sa distance à la ligne de rivage, cette avancée peut rejoindre l'ouvrage, pour former un tombolo.

Il n'existe pas actuellement de règles bien définies pour fixer les caractéristiques optimales des brise-lames (profondeur d'implantation, longueur et espacement, hauteur). Celles-ci dépendent de l'amplitude de la marée, de la houle (hauteur, période, longueur d'onde) de la pente de l'ouvrage et de la pente des fonds. Il semble en tout état de cause que les brises lames efficaces sont ceux qui ne sont pas franchis par les vagues. Différentes études effectuées par le *Lchf (Migniot, 1989)* et le *Cerc (Shore Protection Manual, 1984)* ont permis de proposer des valeurs seuils concernant leur implantation dans le profil, leur longueur et espacement, leur hauteur et leur largeur en crête.

Si la distance au rivage d'un brise-hune augmente, son efficacité diminue, mais si cette distance est trop faible, le bassin de dissipation de l'ouvrage est trop petit pour absorber l'énergie de la houle après déferlement. Son implantation résulte donc de trois types de considération :

V.6.3.1.1. Distance par rapport à la côte :

Sur ce thème, les recommandations sont quelque peu différentes selon les organismes.

Des études faites au **Lchf** montrent que pour qu'un brise lame puisse provoquer la formation d'un tombolo se raccordant à l'ouvrage, il faut que les limites d'expansion de la houle, issues de chacune des extrémités de l'ouvrage, se croisent sur le trait de côte, ce qui conduit dans le cas d'une houle normale à la côte, à la relation (*SGH, 1989*):

$$l > 1,2 (l_c + 0,3L)$$

Avec l : longueur du brise-lames.

l_c : distance du brise-lames à la côte.

L : longueur d'onde de la houle au point considéré.

Le **Cerc** montre que la formation d'un tombolo peut habituellement être évitée si $l < l_c$. En revanche, si la longueur de l'ouvrage devient supérieure à sa distance à la côte, la probabilité de formation d'un tombolo augmente, et pour $l > 2l_c$ un tombolo se forme.

En côte ouverte, les brise-lames sont la plupart du temps implantés dans des profondeurs d'eau comprises entre 1 et 8 m.

Situé par petits fonds, un brise-lame a une action importante en faisant déferler même les faibles houles, mais il est alors soumis à des contraintes importantes des lames de houles. Situé par grands fonds, son action est limitée aux plus fortes houles mais il est peu soumis à l'action des vagues. Selon le cas il peut être émergent ou submersible. Il peut être isolé de la côte ou relié à elle s'apparentant alors à un épi en L ou en T (*Samat, 2007*).

V.6.3.1.2. Longueur et espacement

Des brise-lames séparés constituent une solution très fonctionnelle pour une longue section de ligne de côte qui nécessite une transmission de la houle pour éviter la formation d'un tombolo. Ils peuvent ainsi être conçus de façon à permettre à la plage qu'ils abritent de s'engraisser suffisamment pour fournir un stock tampon mobilisable pendant les tempêtes tout en maintenant le débit de transport littoral naturel pendant les conditions de houle normale (*Trmal et al., 2007*).

La quantité d'énergie atteignant la zone abritée par l'ouvrage est régie par l'espacement des brise-lames, et la diffraction de la houle au travers des ouvertures correspondantes. Généralement un accroissement du rapport espacement entre brise lame et longueur d'onde locale de la houle augmente la quantité d'énergie atteignant la zone d'ombre, tandis que les effets de la diffraction décroissent.

Le **Lchf** recommande pour qu'il n'y ait pas d'érosion du rivage entre deux brises lames successifs un espacement e entre deux brise-laines tel que :

$$e < 0,83 l_c + 0,5L$$

avec l_c : distance du brise-lames à la côte.

L : longueur d'onde de la houle au point considéré.

Le **Cerc** recommande un espacement égal à deux fois la longueur d'onde de la houle ($2 L$) avec une longueur de chaque ouvrage inférieure à sa distance au rivage (*Samat, 2007*).

V.6.3.1.3. Hauteur

La hauteur à donner à un brise-lames dépend de l'objectif poursuivi, dans la mesure où son efficacité dépend en grande partie de sa cote d'arase, qui conditionne la hauteur des houles qui le franchissent sans déferler.

Pour que l'ouvrage soit totalement émergent, il serait nécessaire de l'araser à une cote de l'ordre du niveau de la marée la plus haute augmenté de 1,25 fois la hauteur de la houle maximale. Pour un brise-lames submersible, on peut estimer que l'amortissement de la houle qu'il provoque est égal à 50% si l'ouvrage est arasé à une cote voisine du niveau de l'eau au repos (*Caminade, 1995*).

V.6.3.1.4. La largeur en crête

Des expériences réalisées en laboratoire ont montré que si la côte d'arase d'un brise-lames doit être abaissée, cette diminution, rendant l'ouvrage plus vulnérable à l'arrière et moins efficace lors des tempêtes, peut être en partie compensée par une augmentation de la largeur en crête. Cette condition s'exprime par la relation (*Dehouse, 1985*) :

$$25 - 5za < b < 15 - 5za$$

Où : b : largeur du brise lames en crête (m).

za : cote d'arase de l'ouvrage (m).

Globalement l'alimentation en sédiments joue un rôle essentiel dans l'évolution du rivage subissant l'influence d'un brise-lames, si elle est insuffisante, l'ajustement escompté de la ligne de rivage sous la forme d'une avancée ne se développe pas complètement.

V.6.3.2. Profil retenu pour la variante n°2

Les cinq brise-lames seront situés par des fonds de -2,5 m NGA (axe de la structure) à une distance moyenne du trait de côte actuel de l'ordre de 90 m (zone n°3 Sud)/100 m (zone n°4 Sud) environ. Chaque brise-lames aura une longueur de 90 m de musoir à musoir et ils seront espacés les uns des autres de 70 m en zone n°3 Sud et de 80 m en zone n°4 Sud.

Ces caractéristiques, longueur et espacement des brise-lames, distance entre les brise-lames et le trait de côte, distance entre le centre de l'ouverture (entre deux brise-lames) et le trait de côte initial, sont définies de façon à respecter les ratios classiques, cités plus haut, permettant la création de tombolos à l'arrière des brise-lames (pour autant que le stock sableux sur la plage soit suffisant).

Cette dernière situation n'est pas toujours respectée, c'est pourquoi nous proposons, d'associer à ces structures un apport minimum de sable correspondant à une avancée moyenne du trait de côte de l'équivalent de 5 m. Cette disposition ne devrait provoquer qu'un faible recul du trait de côte face à l'ouverture des brise-lames. La localisation de ces ouvrages est présentée sur la *figure V.10*.

Considérant un plan d'eau à +1,0 m NGA, la houle de projet a été calculée (houle cinquantennale) pour 3,5 à 4 m de hauteur d'eau. Il a été considéré pour le dimensionnement des brise-lames :

- houle de projet sous 4 m de hauteur d'eau (côté mer) : $H_s=2,5$ m et $T_p=13$ s.
- masse volumique des enrochements : $\rho_s = 2,65$ t/m³.
- masse volumique de l'eau de mer : $\rho_e = 1,028$ t/m³.
- pente du talus, côté mer : $\cotg \alpha=2/1$.
- coefficient de stabilité de la formule d'Hudson : $K_D=2,5$ en profil courant et 2,0 en musoir.

L'application de la formule d'Hudson conduit, pour la carapace externe côté mer, à un poids moyen des enrochements en profil courant de l'ordre de 2,1 t. On retiendra, à ce stade du pré-dimensionnement, des enrochements 2 à 4 t. Pour le musoir, le poids moyen calculé est proche de 2,7 t, on adoptera des enrochements de 3 à 5 t.

Pour la crête, une protection monocouche sera considérée (pour respecter la cote d'arase et les méthodes constructives de l'ouvrage), par sécurité le poids des enrochements sera augmenté de 3 à 5 t.

En présence de fonds sableux, il est nécessaire de poser l'ouvrage sur une semelle en tout venant d'un mètre d'épaisseur qui va permettre de stabiliser l'ouvrage.

Donc, les caractéristiques des enrochements seront les suivantes :

- Carapace :
 - sur la crête en profil courant et au musoir : enrochements de 3 – 5 t placés en monocouche.
 - sur les talus en profil courant : enrochements de 2 à 4 t placés en bicouches. Pente des talus : 2/1 côté mer et 4/3 côté terre.
 - sur les talus en musoir : enrochements de 3 – 5 t placés en bicouches. Pente du talus : 2/1.
- Sous-couche et tapis de pied : enrochements de 0,5 – 1 t en bicouches.
- Noyau : tout-venant 1– 500 kg.

Les caractéristiques dimensionnelles générales des 5 brise-lames (sur une base d'implantation des ouvrages dans des profondeurs autour de -2,5m NGA) seront les suivantes :

- arase supérieure : +2,5 m NGA.
- largeur de l'arase supérieure de la carapace : 11,8 m.

- largeur de l'arase supérieure du noyau : 3,0 m.
- largeur du tapis anti-affouillements : 1,5 m.
- épaisseur de la carapace : 2,5 m sur les talus, 1,35 m en crête.

La vue en plan et la coupe type des ouvrages en profil courant sont présentées ci-après.

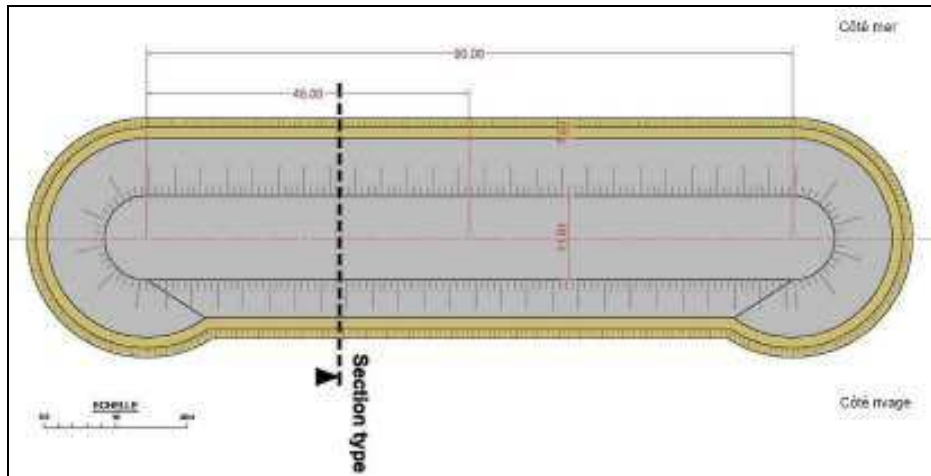


Figure V.17 : Vue en plan des brise-lames hauts de la variante n°2 de protection de Palm Beach.

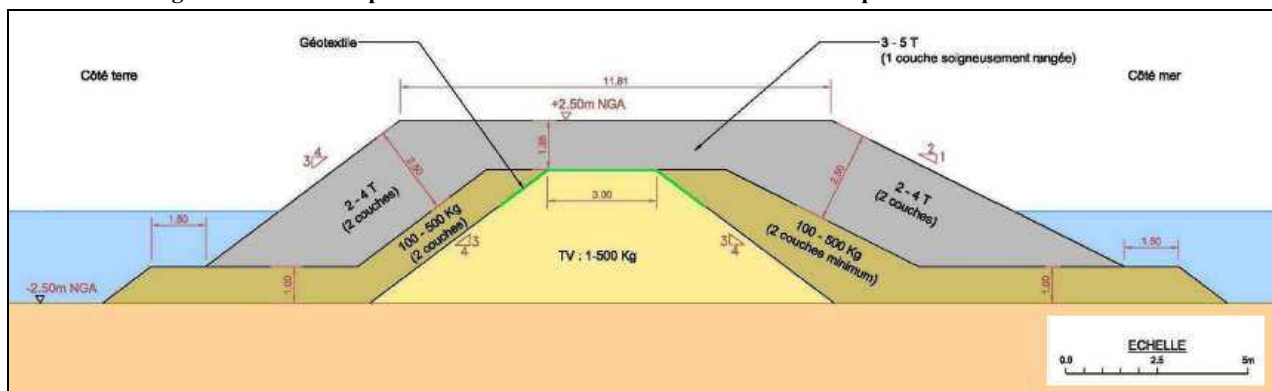


Figure V.18 : Section-type des brise-lames hauts de la variante n°2 de protection de Palm Beach.

V.6.3.3. Apport de sable

L'apport de sable est une solution complémentaire à la mise en place des brise-lames. Les tombolos qui se forment à l'abri des brise-lames conduisent à la création de plages de type alvéolaire et les sables participant à la formation de ces tombolos sont en partie pris aux tronçons plus exposés, situés en face des ouvertures. Cela conduit à réduire la largeur de la plage à ces endroits. L'apport de sable permet de minimiser l'impact du recul du rivage à ce niveau.

Le sable d'apport doit être de granulométrie supérieure (ou au pire, égale) à celle du sable présent actuellement. Plus le sable est grossier, moins il partira de la plage par érosion. Au regard des caractéristiques granulométriques du sédiment en place sur l'estran (0,20 à 0,25 mm), un sable d'apport de D_{50} de 0,3 à 0,5 mm serait bien adapté au site.

Pour le linéaire côtier total à recharger (de l'ordre de 1000 m pour les deux zones n°3 Sud et n°4 Sud cumulées), l'élargissement de la plage de 5 m nécessiterait l'apport de 55000 m³ de sable (en considérant un volume moyen de 55 m³/ml, incluant 10 % de perte lors de la mise en œuvre du sable (fraction fine)).

V.6.4. Variante n°3 : batterie de 5 brise-lames bas et apport de sable

La variante n°3 comporte :

- En zone n°2 : le confortement de l'espace dunaire.
- En zones n°3 Sud et n°4 Sud :
 - Cinq brise-lames bas en enrochements.
 - Un apport de sable correspondant à une avancée du rivage actuel de 20 m.

V.6.4.1. Dimensionnement des brise-lames bas

Les cinq brise-lames bas proposés pour cette variante n°3, seront arasés à la cote +0,5 m NGA et auront l'avantage, par rapport aux brise-lames hauts envisagés dans la variante n°2, d'avoir un impact visuel moins fort. Par contre, ils sont moins efficaces que les brise-lames hauts qui atténuent la houle de l'ordre de 80 % contre 50 % pour les ouvrages bas.

En effet, ces brise-lames bas, qui constituent un premier élément du dispositif, présentent, pour une surcote de +1 m et pour une largeur en crête de l'ordre de 8 m, un K_t (coefficient de transmission de la houle équivalent à la hauteur de houle transmise divisée par la hauteur de houle avant l'ouvrage) de l'ordre de 0,5.

De façon similaire aux brise-lames hauts, ces ouvrages bas seront implantés par des fonds de - 2,5 m NGA à une distance de la côte de 90 à 100 m. Ils seront espacés les uns des autres de 70 à 80 m environ et auront une longueur de musoir à musoir de l'ordre de 90 m (*figure V.11*).

Les ouvrages bas sont franchis par la houle. Une partie de l'énergie de la houle est dissipée par franchissement, le poids unitaire des enrochements est donc inférieur à ce qu'il est pour un ouvrage moins franchi tel que le brise-lames haut de la variante n°2.

Les mêmes critères de dimensionnement que ceux considérés pour les brise-lames hauts de la variante n°2 ont été retenus pour le dimensionnement des brise-lames bas. L'application de la formule d'Hudson conduit à un poids moyen des enrochements de 2,5 t.

L'ouvrage étant franchi régulièrement, selon Sogreah, on applique un coefficient de 20% sur le dimensionnement de l'ouvrage qui réduit le poids moyen des enrochements à 2 t. Ainsi, la carapace externe des ouvrages pourrait être réalisée avec des blocs d'enrochements 1 – 3 t, elle reposera sur une semelle en tout venant (enrochements de 1 – 500 kg) d'un mètre d'épaisseur qui va permettre de stabiliser l'ouvrage implanté sur des fonds sableux.

Pour réduire l'énergie des vagues, une largeur minimale est à considérer. Nous adopterons une largeur en crête de 8 m au niveau +0,5 m NGA et de plus de 20 m au niveau -0,5 m NGA.

La coupe type des ouvrages qui découle de ces considérations est présentée ci-dessous.

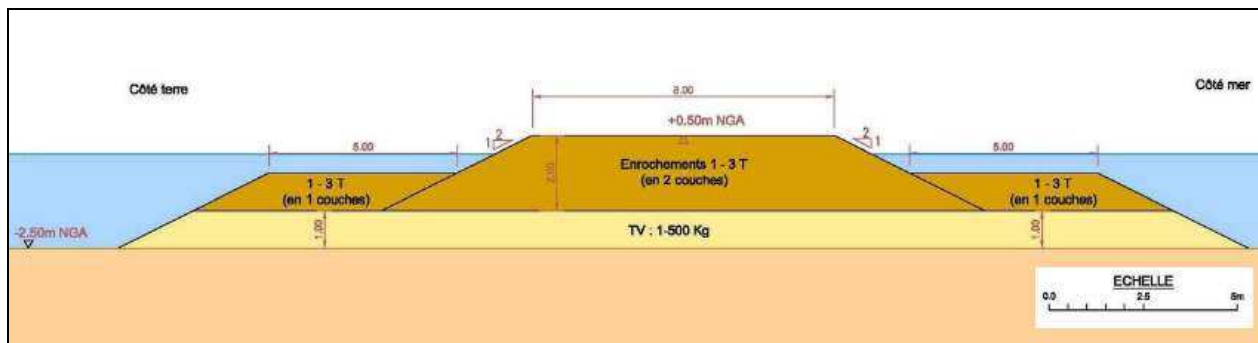


Figure V.19 : Section-type des brise-lames bas de la variante n°3 de protection de Palm Beach.

On rappelle que pour la réalisation des brise-lames hauts ou bas, une piste d'accès devra être construite perpendiculairement à la position de l'ouvrage. L'accès pour la construction du premier brise-lames sera enlevé une fois les travaux exécutés. Ces matériaux seront, pour une grande majorité, réutilisés pour constituer l'accès au second brise-lames, et ainsi de suite.

V.6.4.2. Apport de sable

La moindre efficacité attendue d'un ouvrage arasé à +0,5 m NGA par rapport à un ouvrage arasé à +2,5 m NGA, nous conduit à proposer, pour cette variante n°3, un apport de sable en haut de plage plus conséquent que celui envisagé pour la variante n°2.

Il est ici proposé un rechargement de la plage sur une largeur de berme équivalente à 20 m. Pour le linéaire concerné par le rechargement (1000 m pour les deux zones n°3 Sud et n°4 Sud), l'élargissement de la plage de 20 m (par un sable de D_{50} de 0,3 à 0,5 mm) nécessiterait l'apport de 220000 m³ de sable (en considérant un volume moyen de 220 m³/ml, incluant 10 % de perte lors de la mise en œuvre du sable).

V.6.5. Variante n°4 : protection longitudinale de haut de plage en enrochements accompagnée d'une batterie de 5 brise-lames bas et d'un apport de sable

La variante n°4 comporte :

- En zone n°2 : le confortement de l'espace dunaire.
- En zones n°3 Sud et n°4 Sud :
 - Une protection longitudinale de haut de plage.
 - Cinq brise-lames bas.
 - Un apport de sable correspondant à une avancée de 5 m du rivage actuel.

V.6.5.1. Les brise-lames bas

Les brise-lames bas envisagés pour cette variante n°4 sont équivalents à ceux de la variante n°3 (*figure V.19*).

V.6.5.2. Défense longitudinale de haut de plage en enrochements

Pour la défense longitudinale, un nouveau dimensionnement est réalisé en prenant en compte l'efficacité des brise-lames bas situés par -2,5 m NGA, on considère un amortissement de la houle de 60 % (selon Sogreah). Ainsi, la houle dimensionnant 2,5 m de hauteur H_s au pied du brise-lames est atténuée et la houle résiduelle à terre du brise-lames et continuant sa propagation vers le haut de plage ne présente plus qu'une hauteur d'environ 1 m (40 % de la hauteur en amont du brise-lames).

Le pré-dimensionnement de cette solution a donc été réalisé en considérant les éléments suivants :

- houle de projet sous 2 m de hauteur d'eau : $H_s=1$ m et $T_p=13$ s.
- masse volumique des enrochements : $\rho_s = 2,65$ t/m³.
- masse volumique de l'eau de mer : $\rho_e = 1,028$ t/m³.
- pente du talus : $\cotg \alpha=3/2$.
- coefficient de stabilité de la formule de Hudson : $K_D=2,1$.

Sur ces bases, la protection serait constituée d'une carapace en enrochements de 0,5 – 1 t disposés en bicouche (le calcul conduit à un poids moyen proche de 0,25 t) reposant sur une sous-couche d'enrochements de 100 – 500 kg.

Les coupes types de cette protection, à réaliser sur un linéaire de 200 m pour la zone 3 Sud et de 400 m pour la zone 4 Sud, seraient similaires à celles-présentées sur la *figure V.15* (variante 1a) à la seule différence de la blocométrie des enrochements de carapace et de l'épaisseur de celle-ci : 1,6 m avec des enrochements de 0,5–1 t au lieu de 2 m avec des enrochements de 1 – 2 t.

V.6.5.3. Apport de sable

Un rechargement de la plage (linéaire global de 1000 m pour les deux zones n°3 Sud et n°4 Sud), sur une largeur de berme équivalente à 5 m avec un sable de D_{50} de 0,3 à 0,5 mm, nécessiterait l'apport de 55000 m³ de sable (en considérant un volume moyen de 55 m³/ml, incluant 10 % de perte lors de sa mise en œuvre).

V.6.6. Variante n°5 : protection longitudinale de haut de plage accompagnée d'une batterie de boudins géotextile immergés

La variante n°5 comporte :

- En zone n°2 : le confortement de l'espace dunaire.
- En zone n°3 Sud et en zone 4 Sud :
 - Une protection de haut de plage.
 - Une ligne de boudins en géotextile (espacés de 20 m).

Deux variantes seront considérées dans ce qui suit, elles seront étudiées par la suite du point de vue de leur fonctionnement et de leur efficacité à l'aide des modèles numériques mis en œuvre à cette occasion.

La première de ces variantes (variante 5a) consiste en une ligne de boudins géotextiles disposés en deux « groupes » : 3 boudins sont implantés au niveau de la zone n°3 Sud et 4 autres boudins implantés au droit de la zone n°4 Sud, environ 270 m au Nord des précédents.

Cette ligne est implantée par de fonds moyens de -2,5 m NGA, elle est constituée par une seule rangée de boudins de longueur unitaire de 80 m et espacés de 20 m, le diamètre moyen des boudins est de 2,5 m. Une

fois remplis de sable, les boudins « s'aplatissent » et présentent une largeur d'environ 3,2 m pour une hauteur moyenne de 1,5 m, leur cote d'arase moyenne se situant dans ces conditions autour de -1,0 m NGA. La coupe type est donnée sur la figure ci-dessous.

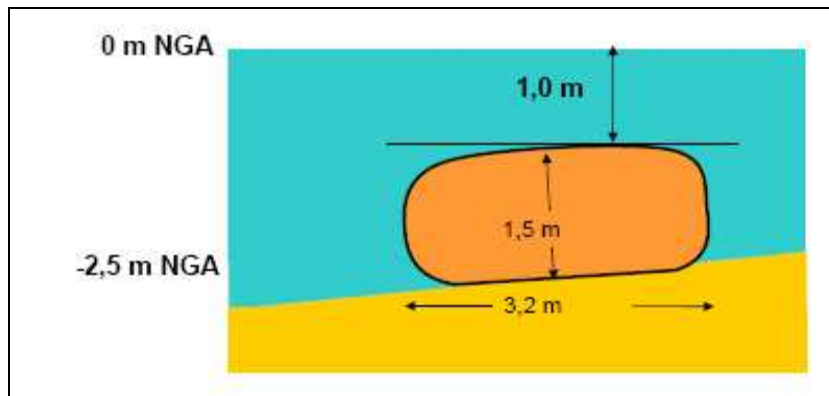


Figure V.20 : Section-type des boudins géotextile immergés de la variante n°5 a de protection de Palm Beach.

La faible efficacité de ce dispositif (prouvée en modélisation numérique selon Sogreah) nous conduit à proposer une seconde alternative, variante 5b. L'implantation des boudins entre les deux variantes 5a et 5b reste la même (*figure V.13*), la différence réside dans les caractéristiques dimensionnelles de la ligne de boudins, constituée, pour la variante 5b, de l'association de deux boudins de diamètre unitaire moyen de 3,25 m collés l'un contre l'autre.

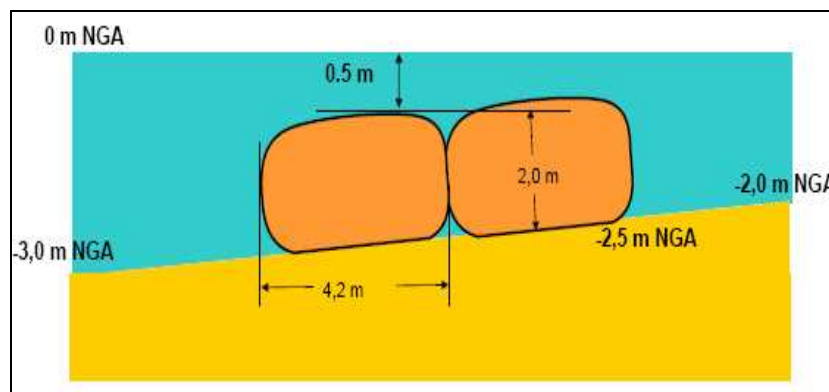


Figure V.21 : Section-type des boudins géotextile immergés de la variante n°5 b de protection de Palm Beach.

Une fois en place, l'ouvrage ainsi constitué présente alors une largeur totale de 8,4 m pour une hauteur moyenne de 2 m et une cote d'arase située à -0,5 m NGA environ.

V.6.7. Variante n°6 : système Ecoplage

La variante n°6 comporte :

- En zone n°2 : le confortement de l'espace dunaire.
- En zone n°3 Sud et en zone n°4 Sud : l'implantation d'un système Ecoplage.

D'après Sogreah, la société Ecoplage qui sera amenée à étudier cette variante, si celle-ci devait être retenue, le dispositif, dans les grandes lignes pourrait se décliner comme suit :

- Réalisation de deux lignes de canalisations de drainage avec système de filtration sur 2 fois 400 m de linéaire disposées (et enfouies) au niveau de l'estran parallèlement au rivage, au droit des zones n°3 Sud et n°4 Sud,
- Réalisation d'une station de pompage qui serait implantée au niveau du parking (en arrière de la route littorale) entre les deux sites, chaque canalisation de drainage (au Nord et au Sud de la station de pompage) étant reliée à un puits collecteur lui-même relié à la station par une canalisation d'amenée des eaux.

V.7. Modélisation numérique des variantes proposées

Le but de cette étude est de valider le système de modélisation morpho-dynamique consistant en l'emploi de deux modèles numériques: agitation de la houle, hydrodynamique et évolution des fonds afin d'étudier l'impact des ouvrages proposés sur les évolutions sédimentaires des plages de sables.

V.7.1. Modèle numérique Mopla : courants de déferlement et agitation à la côte

V.7.1.1. Méthodologie et présentation des résultats pour chacune des variantes

On a procédé à une modélisation des différentes variantes avec le modèle Mopla exploité par Sogreah. Une analyse des résultats a été réalisée dans le but de comparer l'efficacité de chacune des variantes proposées. Seules les variantes présentant un ouvrage maritime ont pu être modélisées. Mopla ne peut pas modéliser l'effet d'une protection longitudinale de haut de plage ni le système Ecoplage.

Pour chacun des 5 cas de calculs modélisés : H1, H2, H3, T1 et T2, les résultats des variantes et de la situation actuelle ont été comparés entre eux et présentés sur les *figures 1 à 20* en *Annexe IV*, pour les cas d'agitation et pour les cas des courants.

Pour mieux comparer l'efficacité de chacune des variantes, 9 points de sortie de résultats (de 1 à 9 du Sud vers le Nord) ont été placés par des fonds compris entre -1 et -1,5 m NGA suivant les points. Pour chacun des 9 points ont été sortis les résultats bruts de l'agitation et des courants et les résultats sont présentés respectivement dans les *tableaux 1 et 2 en Annexe IV*.

Avec ces résultats bruts fournis par Sogreah, une analyse présentant l'efficacité des variantes avec l'amortissement en % (de la houle et des courants de houle) engendré par chacune des variantes est exposée dans les tableaux ci-dessous.

Tableau V.2 : Amortissement (en %) des houles, analyse des résultats Mopla pour chaque variante de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)

Amortissement	80 – 100%		60 – 80%		40 – 60%		20 – 40%		0 – 20%		< 0%
Points	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 9	
H1	H1 : Dir = N270° Hs = 1,0 m Tp = 6 s										
Etat actuel	0,81	0,86	0,82	0,80	0,74	0,79	0,84	0,93	0,83		
Solution 2	33	87	40	86	69	8	76	33	82		
Solution 3	56	94	55	81	77	13	77	29	86		
Solution 5a	1	5	4	3	-1	3	5	5	-1		
Solution 5b	40	12	40	30	28	15	10	46	41		
H2	H2 : Dir = N310° Hs = 1,0 m Tp = 6 s										
Etat actuel	0,78	0,88	0,84	0,79	0,72	0,79	0,87	0,89	0,91		
Solution 2	33	82	39	82	60	18	69	17	81		
Solution 3	54	92	55	77	68	27	72	10	81		
Solution 5a	1	0	4	1	-1	3	2	0	0		
Solution 5b	31	20	31	39	21	16	20	37	41		
H3	H3 : Dir = N350° Hs = 1,0 m Tp = 6 s										
Etat actuel	0,72	0,79	0,79	0,70	0,66	0,77	0,82	0,66	0,91		
Solution 2	38	80	34	73	58	44	54	-21	76		
Solution 3	53	91	51	69	68	48	61	-27	78		
Solution 5a	0	0	1	0	-3	0	-1	-3	1		
Solution 5b	42	38	51	29	27	29	17	6	26		
T1	T1 : Dir = N285° Hs = 5,7 m Tp = 10 s										
Etat actuel	1,61	1,74	1,69	1,66	1,56	1,60	1,67	1,81	1,67		
Solution 2	22	75	37	69	62	25	70	35	79		
Solution 3	31	74	46	62	47	18	64	43	61		
Solution 5a	5	3	8	6	4	6	7	6	3		
Solution 5b	29	8	28	37	28	19	22	44	22		
T2	T2 : Dir = N320° Hs = 5,7 m Tp = 12 s										
Etat actuel	1,55	1,72	1,69	1,61	1,52	1,60	1,68	1,68	1,75		
Solution 2	32	73	30	66	56	39	67	11	70		
Solution 3	39	61	34	65	53	35	64	4	45		
Solution 5a	4	2	6	6	3	6	5	5	4		
Solution 5b	17	13	21	30	11	11	19	10	23		

Tableau V.3 : Amortissement (en %) des courants de houle, analyse des résultats Mopla pour chaque variante de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)

Amortissement	80 – 100%		60 – 80%		40 – 60%		20 – 40%		0 – 20%		< 0%
Points	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 9	
H1	H1 : Dir = N270° Hs = 1,0 m Tp = 6 s										
Etat actuel	0,05	0,07	0,06	0,08	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05		
Solution 2	-40	43	67	63	20	40	40	0	40		
Solution 3	0	57	67	75	40	40	40	50	40		
Solution 5a	-20	0	0	13	0	20	20	0	0		
Solution 5b	0	29	17	38	40	40	40	0	-40		

H2		H2 : Dir = N310° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,09	0,05	0,07	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,10	
Solution 2	67	60	0	0	50	100	0	100	60	
Solution 3	78	80	29	100	75	67	50	75	60	
Solution 5a	11	20	14	0	0	0	0	0	10	
Solution 5b	67	100	86	0	75	67	100	75	80	
H3		H3 : Dir = N350° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,12	0,08	0,11	0,10	0,06	0,07	0,06	0,07	0,15	
Solution 2	83	63	27	40	33	71	50	71	67	
Solution 3	75	63	55	70	33	71	50	57	60	
Solution 5a	0	13	0	0	0	0	-17	0	7	
Solution 5b	58	50	73	40	50	57	50	57	80	
T1		T1 : Dir = N285° Hs = 5,7 m Tp = 10 s								
Etat actuel	0,03	0,06	0,06	0,08	0,05	0,06	0,07	0,04	0,04	
Solution 2	-67	17	33	38	0	50	43	0	50	
Solution 3	-33	0	-50	-38	20	17	-14	-200	-225	
Solution 5a	0	17	17	13	20	17	29	0	0	
Solution 5b	0	33	0	0	20	33	43	0	-75	
T2		T2 : Dir = N320° Hs = 5,7 m Tp = 12 s								
Etat actuel	0,16	0,13	0,15	0,10	0,11	0,09	0,08	0,09	0,15	
Solution 2	63	69	47	50	64	67	63	89	67	
Solution 3	-13	15	53	90	45	33	75	89	60	
Solution 5a	13	15	13	0	18	0	13	11	13	
Solution 5b	25	31	40	40	27	22	38	44	47	

Enfin, pour l'agitation, une analyse spécifique a permis de déterminer l'efficacité de l'amortissement de la houle (en %) à l'arrière et entre les brise-lames (hauts et bas, variantes n°2 et n°3) et à l'arrière des boudins immergés en géotextile (variantes n°5a et n°5b). Ces résultats sont présentés ci-après.

Tableau V.4 : Amortissement (en %) de la houle H1, H2, H3, T1 et T2 à l'arrière et entre les brise-lames (variantes n°2 et n°3 de protection de Palm Beach). Analyse des résultats Mopla.

	Amortissement de la variante n°2 (%)		Amortissement de la variante n°3 (%)	
	à l'arrière des BL hauts	entre les BL hauts	à l'arrière des BL bas	entre les BL bas
H1	80	23	83	30
H2	75	21	78	29
H3	68	19	73	25
T1	71	24	62	28
T2	66	22	58	22
Moyenne des cas	72	22	71	27

Tableau V.5 : Amortissement (en %) de la houle H1, H2, H3, T1 et T2 à l'arrière des boudins immergés en géotextile (variantes n°5 a-b de protection de Palm Beach). Analyse des résultats Mopla.

	Amortissement des boudins immergés en géotextile	
	variante n°5a (%)	variante n°5b (%)
H1	2	34
H2	1	31
H3	-1	30
T1	5	30
T2	5	18
Moyenne des cas	2	29

V.7.1.2. Analyse des résultats

L'analyse de l'effet sur la houle et les courants de déferlement de chacune des variantes modélisées révèle ce qui suit.

- **Variante n°2** : Les brise-lames permettent de bien atténuer la houle. En effet, suivant les cas, la houle est amortie de l'ordre de 65 à 80 % à l'arrière des ouvrages et de l'ordre de 20 à 25 % entre les ouvrages. Les courants de déferlement sont diminués de l'ordre de 30 à 60 % à l'arrière et entre les brise-lames. Avec cette solution, on va assister à la création de tombolos. Les courants responsables de cette hydrodynamique sédimentaire sont visibles notamment sur les *figures 16 et 18 de l'Annexe IV*.

- **Variante n°3** : Pour les faibles houles, l'efficacité des brise-lames bas est équivalente à celle des brise-lames hauts avec une houle amortie de l'ordre de 65 à 80 % à l'arrière des ouvrages et de l'ordre de 25 à 30 % entre les ouvrages. Par contre, par conditions de tempête et avec un niveau d'eau élevé (+1 m pour les calculs), la houle submerge les brise-lames bas et elle est donc moins amortie à l'arrière des ouvrages, de l'ordre de 50 à 60 %.
On remarque que la différence d'efficacité avec la variante n°2 n'est pas très importante car pour la variante n°3 les fonds sont moins profonds puisque la plage est avancée de 20 m contre seulement 5 m pour la variante n°2. On rappellera que plus la hauteur de l'eau est faible, plus la houle déferle tôt. Les courants de déferlement entre les brise-lames et la plage sont atténués de l'ordre de 50 % pour les houles faibles. Par contre, en tempêtes, la houle submergeant les brise-lames bas va déferler au dessus de l'ouvrage et donc accélérer les courants de déferlement comme on peut le constater sur les *figures 17 et 19 de l'Annexe IV*. Ainsi, cette solution est moins efficace pour lutter contre les courants et les transferts de sédiments qui en découlent.
- **Variante n°5a** : Ces ouvrages sont trop fins, largeur de 3,2 m, et les effets sur la houle sont très faibles. En effet, la houle « sent » faiblement les ouvrages et déferlent très peu au-dessus des ouvrages. L'amortissement est de l'ordre de 1 à 5 % à l'arrière des ouvrages.
Les ouvrages sont quasiment invisibles par la houle donc il y a très peu d'effets sur les courants. Cette variante n'est pas efficace.
- **Variante n°5b** : Les boudins ont une largeur de 4,2 m chacun et donc les ouvrages constitués par deux boudins ont une largeur de 8,4 m. Cette largeur plus conséquente et la côte d'arase plus haute que la variante n°5a améliorent fortement l'efficacité. A l'arrière des ouvrages, la houle est amortie de l'ordre de 20 à 30 %.
On constate une diminution des courants à l'arrière des ouvrages pour les houles comprises entre N300° et N360° (c'est-à-dire pour les houles en provenance de l'Ouest par rapport à l'orientation du trait de côte) et au contraire une faible efficacité voire même une légère accentuation des courants pour les houles en provenance du N270° à N300°.

En conclusion, on constate que concernant l'agitation et les courants, l'ensemble des variantes permet de bien amortir la houle à l'arrière des ouvrages, sauf la variante 5a qui n'a que très peu d'effet sur la houle et donc sur les courants de déferlement.

Le classement des variantes par ordre décroissant d'efficacité à amortir la houle et à diminuer les courants conduit ainsi à la : variante n°2, ensuite la variante n°3, puis la variante n°5b et enfin la variante n°5a étant la moins efficace.

V.7.2. Modèle numérique Genesis : évolution du trait de côte

V.7.2.1. Méthodologie et présentation des résultats pour chacune des variantes

Une analyse des résultats a été réalisée dans le but de comparer l'efficacité de chacune des variantes proposées. Seules les variantes présentant un ouvrage maritime émergé ont pu être modélisées. **Genesis** ne peut pas modéliser ni l'effet d'une protection longitudinale de haut de plage (le trait de côte étant alors « artificiellement » fixé par cette protection), ni un boudin en géotextile immergé, ni le système Ecoplage.

Les calculs de la position du trait de côte (avancée / recul) ont été réalisés sur une évolution future à moyen terme (10 ans) de la période 2009-2019 sur l'ensemble de la zone et sont détaillés ci-dessous :

- Configuration actuelle sans protection de la plage (*figures IV.19 et IV.20*).
- Variante n°2 (*figures V.22 et V.23*).
- Variante n°3 (*figures V.24 et V.25*).
- Variante n°4 (*figures V.26 et V.28*).

Les taux d'avancée / recul sont exprimés en m/an.

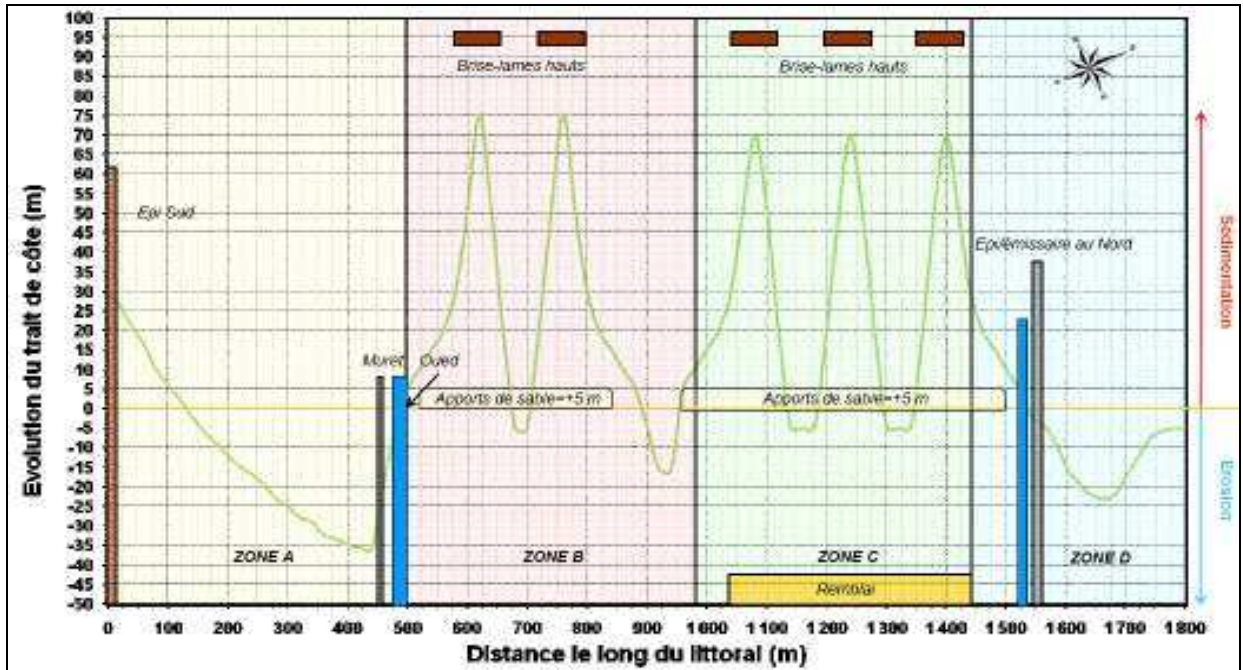


Figure V.22 : Evolution Genesis du trait de côte en m/an sur 10 ans (2009-2019), variante n°2 de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)



Figure V.23 : Position du trait de côte évalué par Genesis en m/an sur 10 ans (2009 nature -2019 modèle), variante n°2 de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)

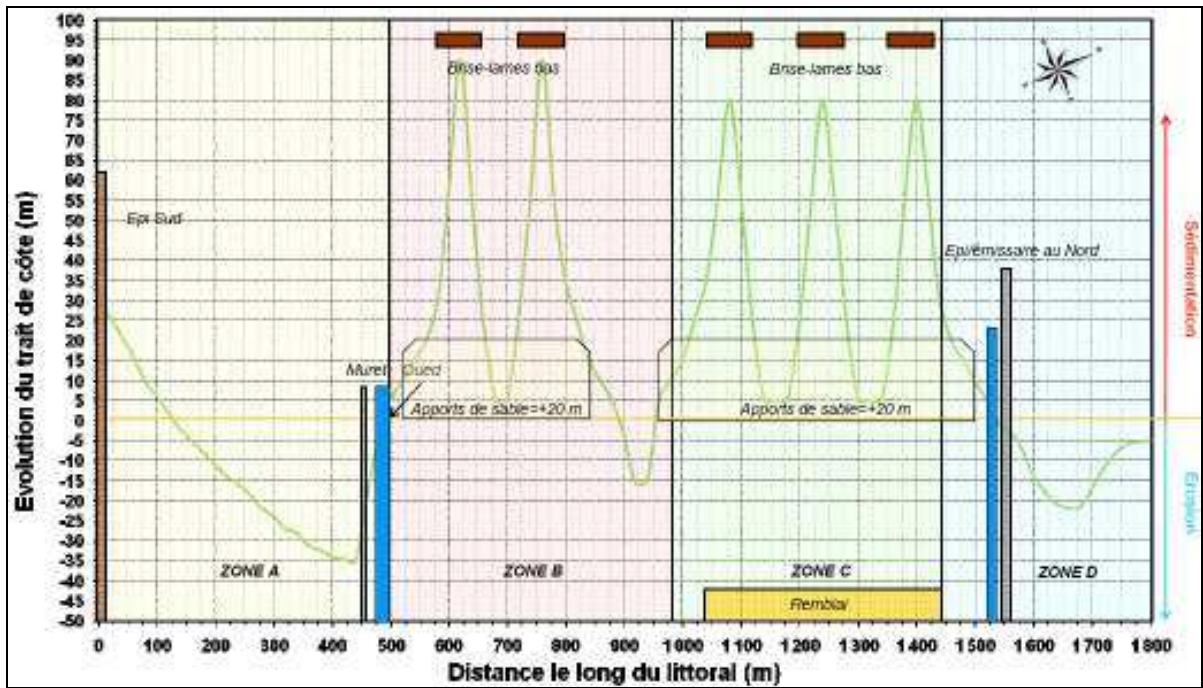


Figure V.24 : Evolution Genesis du trait de côte en m/an sur 10 ans (2009-2019), variante n°3 de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)



Figure V.25 : Position du trait de côte évalué par Genesis sur 10 ans (2009 nature - 2019 modèle), variante n°3 de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)

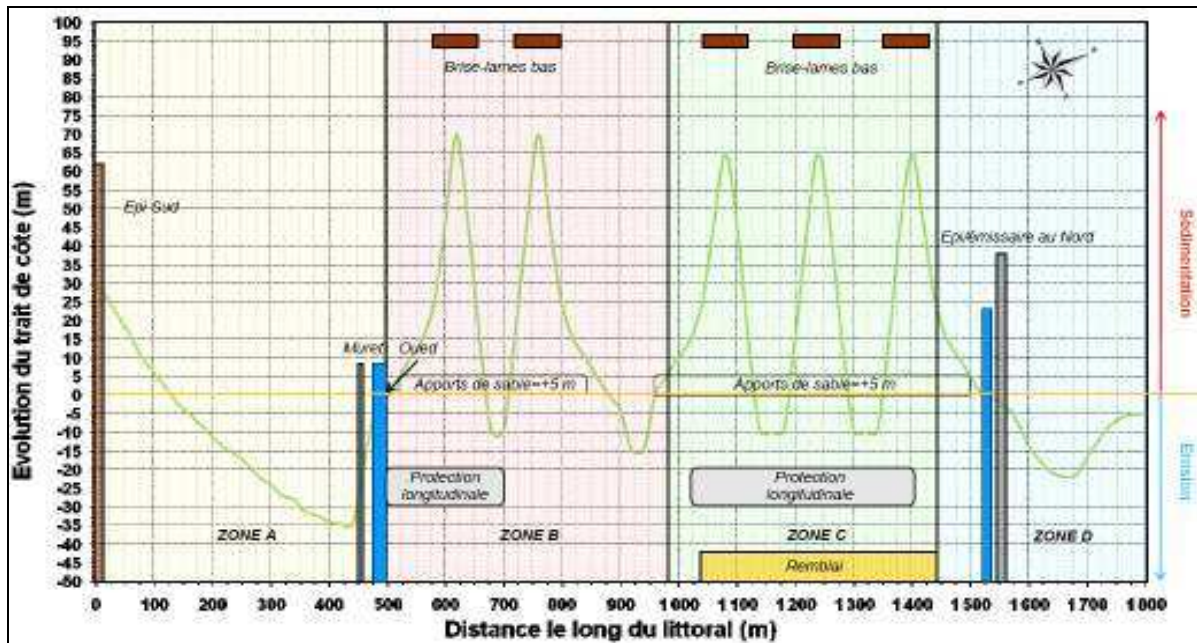


Figure V.26 : Evolution Genesis du trait de côte en m/an sur 10 ans (2009-2019), variante n°4 de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)



Figure V.27 : Position du trait de côte évalué par Genesis sur 10 ans (2009 nature - 2019 modèle), variante n°4 de protection de Palm Beach. (SGH, 2010)

V.7.2.2. Analyse des résultats

Le tableau ci-après présente les résultats des calculs en termes de recul/avancée du trait de côte :

Tableau V.6 : Evolution Genesis du trait de côte (m) sur 10ans (2009-2019)

par secteur et pour chaque variante de protection de Palm Beach.

Secteur		Recul/Accrétion en m			
		Actuel	Variante n°2	Variante n°3	Variante n°4
A	Secteur entre l'épi Sud et l'oued	-10,9	-10,3	-9,6	-9,8
B	Secteur entre l'oued et le remblai	-12,8	21,4	25,7	17,2
C	Secteur devant le remblai	-18,6	28,4	35,2	23,4
D	Secteur à l'Est du remblai	-7,9	-4,8	-4,3	-5,6

La mise en place de brise-lames parallèles au trait de côte sur les petits fonds, qu'ils soient hauts (arasés à +2,5 m NGA) ou bas (arasés à +0,5 m NGA), permettent d'élargir les plages à l'arrière.

Ces dernières vont prendre une forme alvéolaire avec la création de salient (tombolo non raccordé à la face arrière d'un brise-lames) ou d'un tombolo si le sable atteint l'arrière du brise-lames. Cependant, une légère érosion est présente sur la portion de plage située entre deux brise-lames si aucun apport conséquent de sable n'est réalisé. Dans le cadre cette étude, des apports de sable plus ou moins importants (+220000 m³ soit une avancée de la plage de 20 m, +55000 m³ soit une avancée de la plage de 5 m) ont été envisagés avec les variantes.

Ces solutions permettent donc de protéger les plages situées à l'arrière des brise-lames (plages alvéolaires plus larges que les plages initiales) mais présentent toutefois un inconvénient important. En effet, les plages situées de part et d'autre des brise-lames vont s'éroder plus fortement que dans la configuration actuelle. C'est ce sable érodé qui va venir se stocker à l'arrière des brise-lames pour former les salients (ou les tombolos). Cette zone érosive (recul de l'ordre de 1 à 2 m/an) se situe sur un linéaire de l'ordre de 400 m de part et d'autre du brise-lames.

D'après les résultats du modèle **Genesis**, le classement des variantes par ordre décroissant d'efficacité à protéger la plage de Palm Beach-Azur donne la variante n°3, suivie de la variante n°2, et en enfin la variante n°4.

On retiendra que le développement des salients ou des tombolos dépendent de plusieurs facteurs :

- la quantité de sable apporté (les calculs ont été réalisés pour des apports de +220000 m³ et +55000 m³).
- les dimensions du brise-lames : côte d'arase, largeur, espacement entre deux brise-lames, etc. (ici, les calculs ont été réalisés pour des ouvrages arasés à +0,5 et +2,5 m NGA).

Ainsi, plus les brise-lames sont rapprochés ou sont hauts, plus le sable est présent en grande quantité et alors plus les plages alvéolaires seront larges avec des chances qu'un tombolo se forme jusqu'au brise-lames.

V.8. Analyse comparative des variantes de protection

Pour comparer les différentes solutions et variantes proposées, une analyse multicritère a été réalisée. Les critères de comparaison pris en compte dans le cadre de cette analyse sont les suivants :

- Efficacité des solutions de protection.
 - Contre l'érosion.
 - Contre la submersion.
- Pérennité de la solution.
- Impact sur l'environnement (qualité des eaux, impacts sur les herbiers, impact sur la faune, etc.).
- Impact sur les pratiques actuelles sur le site d'étude (activités balnéaires, pêche, tourisme, etc.),
- Critère paysager et impact visuel sur le site.
- Impact pendant la phase travaux (milieux physiques).
- Difficultés de réalisation en phase chantier.
- Les coûts d'investissement (estimés par Sogreah-Lem).

Cette analyse est présentée sous forme graphique en évaluant chaque critère selon une échelle de couleur qui doit permettre de visualiser rapidement les avantages et inconvénients de chaque solution. L'échelle de couleur qui a été utilisée est la suivante :

Tableau V.7 : Echelle de couleurs pour l'analyse multicritère des variantes de protection de Palm Beach.

Couleur	Pour les critères autres que le prix
	Bonne Amélioration

	Amélioration moyenne
	Légère amélioration
	Nulle, équivalent à la situation actuelle
	Légèrement moins bon
	Moyennement moins bon
	Pénalisant

La grille de l'analyse multicritère est donnée ci-après.

Tableau V.8 : Analyse multicritère des 6 variantes de protection de Palm Beach-Azur. (SGH, 2010)

Variantes	Efficacité dans la protection du site		Pérennité de la solution dans le temps	Impact sur l'environnement	Impact sur les pratiques actuelles sur le site	Critère paysager - Impact visuel	Impact pendant la phase travaux	Coûts ordre croissant (1à8)	
	Erosion	Submersion							
n°1	1a	Le trait de côte est fixé	Très bonne	Bonne	Léger	Léger	Fort	Léger	3
	1b	Le trait de côte est fixé	Très bonne	Entretien à réaliser après chaque tempête	Nul	Léger	Nul	Léger	2
n°2		Création de plages alvéolaires qui devraient rester stables	Très bonne sauf au droit des ouvertures des brise-lames	Bonne	Léger	Moyen	Moyen grâce à la création de plages	Moyen	6
n°3		Création de plages alvéolaires qui devraient rester stables	Bonne sauf au droit des ouvertures des brise-lames mais faible efficacité en tempête	Bonne	Léger	Moyen	Léger grâce à la création de plages et aux faibles cotes d'arase	Moyen	8
n°4		Création de plages alvéolaires qui devraient rester stables	Bonne seulement par faible houle. Faible efficacité en tempête et entre les brise-lames par tout type de houle	Bonne	Léger	Moyen	Léger grâce à la création de plages et aux faibles cotes d'arase	Moyen	7
n°5	5a	Efficacité quasi-nulle	Efficacité quasi-nulle	Moyenne	Nul	Léger	Nul	Moyen	4
	5b	Faible efficacité	Faible efficacité	Moyenne	Nul	Léger	Nul	Moyen	5
n°6		Faible efficacité	Efficacité nulle	Moyenne	Nul	Nul	Nul	Léger	1

V.9. Synthèse des résultats et recommandations

Plusieurs des solutions proposées reposent sur la mise en œuvre d'enrochements (protection de haut de plage (variante n°1, 4 et 5) ou brise-lames (variante n°2, 3 et 4)). Bien que ce type de protection ait un fort impact visuel, pénalisant pour un site balnéaire par excellence comme celui de Palm Beach-Azur, son efficacité reste prouvée. De l'analyse des résultats obtenus, il en ressort ce qui suit :

La variante n°6 (Ecoplage) présente le coût d'investissement le moins cher, cependant, elle présente l'inconvénient de sa maîtrise technique difficile et de son entretien onéreux. Ces deux facteurs jouent en défaveur de cette solution qui ne peut être recommandée pour sa réalisation.

La variante n°1 (protection frontale de haut de plage) vient en 2^{ème} position en termes de coût. La variante 1a présente l'inconvénient d'avoir un impact visible important mais reste pour la zone d'étude et des enjeux y afférant, une des solutions les plus sécuritaires pour assurer sa défense. La variante 1b (nappes en géotextile), sans impacts visuels significatifs, est particulièrement adaptée au secteur au Sud du remblai (zone 3 Sud), elle est par contre contraignante en termes d'entretien.

La variante n°5 se classe en 3^{ème} position en termes de coûts. Elle consiste en la mise en place d'une batterie de boudins en géotextile immergés associés à une défense de haut de plage, deux sous variantes 5a et 5b ont été étudiées. La 5a consiste en une ligne de 7 boudins en géotextile et la 5b consiste en deux

lignes de 7 boudins. La première n'a pas été jugée suffisamment efficace à l'issue de l'étude en modèle numérique. C'est la 2^{ème} solution qui a été jugée la plus efficace. Cette solution présente cependant des inconvénients de pérennité et d'entretien.

La variante n°2 consiste en une batterie de 5 brise-lames hauts accompagnés d'un élargissement de la plage d'une largeur de 5m (apport de sable). Cette solution efficace présente l'inconvénient des brise-lames hauts qui ont un impact visuel important pour un site touristique. C'est ce type de solution qui a déjà été réalisé pour assurer la protection du complexe touristique au Sud immédiat de la plage de Palm Beach-Azur.

La variante n°4 consiste en une protection frontale accompagnée d'une batterie de 5 brise-lames bas et d'un élargissement de la plage de 5m (rechargement). Bien qu'efficace, cette solution présente l'inconvénient de la protection frontale qui n'est pas indiquée pour un site balnéaire comme Palm Beach-Azur.

La variante n°3 consiste en une batterie de 5 brise-lames bas accompagnée d'un élargissement de la plage de 20m (apport de sable). A l'issue des études de simulation numérique sur une période de dix ans, cette solution s'est avérée comme étant la plus efficace parmi toutes les variantes étudiées. Son coût est cependant le plus élevé.

Compte tenu de l'efficacité qu'elle présente et de la nature balnéaire du site à protéger, cette dernière est recommandée pour la protection de Palm Beach-Azur. On rappelle, qu'en plus de cette protection en zone Sud n°3 et 4, un confortement de l'espace dunaire aura lieu au niveau de la zone n°2 tout en acceptant un recul stratégique surveillé.

La réalisation de tels projets apportera des modifications importantes à la situation actuelle, pour lesquelles il est nécessaire de s'assurer de leur faisabilité. C'est pourquoi une étude sur modèles réduits physiques bidimensionnel 2D et tridimensionnel 3D (à fond fixe et à fond mobile), afin de tester et optimiser les aménagements proposés, est indispensable.

Chapitre VI:

Modélisation physique

Chapitre VI. Modélisation physique

VI.1. Nécessité de la modélisation

Les ouvrages et aménagements maritimes sont généralement très coûteux, il est donc nécessaire, avant de les réaliser, de bien prévoir leur fonctionnement (*Viguiet, 1992*). Ainsi, lors de la mise au point du projet, il faut :

- S'assurer que les objectifs visés seront atteints (bassin portuaire bien abrité, pérennité d'une plage et/ou de l'urbanisation située en arrière assurée par un aménagement du littoral, etc.).
- S'assurer que les ouvrages seront capables de bien résister aux actions de la mer.
- Prévoir les risques d'ensablement (et/ou d'envasement) d'un port, définir les impacts sur les fonds et littoraux avoisinants et proposer des mesures compensatoires si besoin, c'est-à-dire optimiser le projet tant au point de vue économique, que technique, que de son impact sur l'environnement.

Les phénomènes en jeu étant très complexes, des outils ont été développés pour améliorer la connaissance des processus hydrodynamiques et sédimentologiques et pouvoir mieux étudier la conception et les impacts des aménagements maritimes. Les modèles constituent l'essentiel de ces outils.

VI.2. Objectifs et types de modèles

Les modèles permettent d'appréhender une nature très complexe en un temps très court par rapport à la durée des phénomènes en nature. A la base, les modèles reposent donc nécessairement sur une analyse des facteurs en présence et une évaluation de l'importance de chacun d'eux dans le processus général à étudier (*Dalrymple, 1985*). Cela est fondamental pour définir les facteurs à simuler correctement et ceux qui peuvent, dans une certaine mesure, être négligés. En effet, un modèle est forcément restrictif, il ne peut reproduire toute la complexité des phénomènes naturels. Parmi les types de modèles, on distingue (*Viguiet, 1992*):

- les modèles réduits physiques.
- les modèles mathématiques.
- les modèles hybrides qui sont la combinaison des deux précédents.

Les modèles réduits physiques sont historiquement les plus anciens et les premiers à avoir été utilisés il y a maintenant plus d'un demi-siècle (*Viguiet, 1992*).

Une bonne modélisation physique repose sur la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels, un bon choix des échelles de réduction et la pratique d'un bon réglage. Ces deux derniers sont essentiellement fonction de l'expérience du laboratoire. Une fois le modèle réglé, il simule de lui-même les phénomènes induits sans exiger la connaissance théorique fine des phénomènes. On peut reprocher au modèle réduit physique (*Mignot et al., 2002*) :

- Une emprise forcément limitée de la zone couverte.
- Son encombrement qui nécessite des halls d'essais de grande superficie et un appareillage spécifique.
- Sa durée de vie limitée, car il est généralement détruit après son exploitation.

Le coût des études sur ces modèles dépend de leur nature (simple vérification, optimisation), du type d'essai réalisé (canal ou cuve) et de l'importance de l'ouvrage (*Caminade, 1995*).

Par contre, les premiers modèles mathématiques, apparus il y a une trentaine d'années, permettent de résoudre numériquement les équations théoriques régissant le phénomène dans un domaine donné. Les progrès des modèles mathématiques sont liés à trois aspects imbriqués de la science (*Caude, 2003*) :

- La connaissance physique et mathématique des phénomènes en croissance rapide sous l'impulsion des besoins et moyens mis en œuvre
- Les techniques mathématiques (analyses numériques) apparues il y a plus d'une cinquantaine d'années avec l'arrivée des premiers ordinateurs.
- Les moyens de calcul qui deviennent chaque jour plus puissants avec des coûts constamment en baisse, ce qui rend possible des calculs de plus en plus importants et complexes.

Par rapport au modèle physique, le modèle mathématique permet de couvrir des zones géographiques très grandes, son encombrement est nul, son exploitation est plus rapide et il peut être conservé, ce qui permet sa réutilisation ultérieure.

De plus, les techniques modernes de visualisation des résultats, telles que les animations vidéo, permettent des présentations des résultats dont la convivialité se rapproche de celles des modèles réduits physiques.

Toutefois, le modèle mathématique ne constitue pas une panacée. En effet, il ne peut simuler que les phénomènes dont on connaît les lois les régissant. Ce n'est pas toujours le cas, et pour un certain nombre tel, par exemple, que l'action des houles ou des courants sur les sédiments, les lois sont toujours de nature empirique et n'ont pas de caractère universel (*Viguié, 1992*).

Pour les études d'aménagements maritimes, il existe aujourd'hui toute une panoplie de modèles physiques et mathématiques. Si pour certains types d'études ils sont en concurrence, pour d'autres ils sont souvent complémentaires.

VI.3. Fondement des modèles réduits physiques

La définition que donne *HUGUES.S, 1993*: un modèle physique est la reproduction d'un système physique (généralement à taille réduite) conçue de telle sorte que les forces prépondérantes qui agissent sur le système sont représentées sur le modèle en proportion convenable par rapport au système physique lui-même (*Caude, 2003*).

Cette définition a le mérite de poser clairement ce qu'on attend du modèle physique, non pas une représentation complète mais une représentation reproduisant les principales forces en jeu dans la nature, non pas une reproduction exacte mais avec des proportions satisfaisantes. La qualité de l'ingénierie dépend de la bonne maîtrise de ces analyses des forces physiques prépondérantes à l'œuvre dans la nature et de la maîtrise des proportions considérées.

Pour résumer, on rappelle que le modèle réduit physique vient au secours du concepteur pour valider son projet, vérifier les problèmes, mais aussi mettre en évidence les éventuels points faibles. Ces points concernent essentiellement l'implantation et le dimensionnement des ouvrages de protection contre l'action de la houle et des courants marins.

VI.4. La simulation physique

Dans le domaine de la construction, la simulation physique est appliquée pour la résolution des problèmes de type (*Samat, 2007*):

- Hydraulique des barrages : dimensionnement des évacuateurs de crue, ouvrages annexes, ouvrages de vidange de fond, de dérivation...
- Hydraulique fluviale : stabilité des berges, impacts d'ouvrages sur les lits de rivières...
- Hydraulique maritime : optimisation d'aménagements portuaires, stabilité des ouvrages de protection contre la houle et les courants.

L'expérimentateur bénéficie de l'apport de l'analyse dimensionnelle qui lui permet de réduire le nombre des variables significatives du processus physique en jeu aux seules variables indépendantes et dispose de méthodes de similitude pour étudier la façon dont sont reliées les diverses grandeurs ou forces en jeu dans le modèle et dans la nature (*Caude, 2003*). On parle ainsi de similitude :

- géométrique quand les rapports entre dimensions linéaires du modèle et de la nature sont constants.
- cinématique quand les composantes des vecteurs 'vitesse' du modèle et de la nature sont identiques pour chaque particule du fluide et dans le temps.
- dynamique quand les rapports des forces vectorielles sont constants, ce qui est généralement impossible sauf à l'échelle 1.

C'est là qu'intervient l'expérience du modélisateur qui identifie les forces prépondérantes, avec deux d'entre elles dans la plupart des cas. Leur rapport adimensionnel par construction permet de retrouver aisément les grands critères de similitude hydraulique (*SGH, 1973*) :

- le nombre de Froude : rapport des forces d'inertie et de gravité.
- le nombre de Reynolds : rapport des forces d'inertie et de viscosité.
- le nombre d'Euler : rapport des forces de pression et d'inertie utilisé pour le cas des navires.

VI.4.1. Rappel général sur les lois de similitude

Il y a lieu tout d'abord de rappeler que les modèles réduits physiques hydrauliques doivent satisfaire à une similitude géométrique et à une similitude cinématique et dynamique. En effet, le but de tels modèles est de reproduire des mouvements de l'eau et son action sur des obstacles (ouvrages, fonds, etc.). (*Viguier, 1992*). En premier, on rappelle que les mouvements d'un fluide réel à surface libre sont le résultat de l'action des forces de gravité et des forces de frottement dues à la viscosité. Les premières sont respectées sur le modèle si les échelles adoptées permettent de conserver le nombre de Froude (*Mignot et al., 2002*) : $F = V / \sqrt{g.L}$ où V est la vitesse de l'écoulement, g , l'accélération de la pesanteur et L une dimension caractéristique (dimension d'un bloc, hauteur d'eau, etc.).

La reproduction en similitude des forces de viscosité suppose l'invariance du nombre de Reynolds (*in SGH, 1973*) $Re = V.D/v$, V étant la vitesse, D une longueur caractéristique (la hauteur d'eau généralement) et v la viscosité cinématique de l'eau.

Théoriquement, l'emploi du même liquide sur le modèle que dans la nature rend impossible le respect simultané de ces deux lois de similitude. Fort heureusement, dans la plupart des cas d'écoulements à surface libre, les forces de pesanteur sont prépondérantes, et dans la nature les écoulements sont turbulents. Il suffit, dans ce cas, que le nombre de Reynolds sur le modèle soit supérieur à une valeur critique correspondant au passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent. Autrement dit, la similitude de Froude est en général possible, la similitude de Reynolds n'intervenant que pour fixer des limites inférieures aux échelles de réduction (*Viguier, 1992*).

Dans certaines études, la nécessité de reproduire de grandes superficies conduit à réduire de façon relativement importante les dimensions en plan (échelle en plan comprise le plus souvent entre le 1/150° et 1/400°). Pour satisfaire la condition de Reynolds, les hauteurs sont moins réduites (entre le 1/70° et le 1/120°), le modèle est alors distordu (*Mignot et al., 2002*). Dans le cas de modèle de houle, les modèles sédimentologiques notamment, on applique la similitude dite de Froude généralisée, qui consiste à réduire les longueurs d'onde et les hauteurs des houles à l'échelle des hauteurs. Cela permet de simuler exactement les phénomènes de réflexion, la diffraction n'est qu'approchée (*Mignot, 1973*).

VI.5. Types d'étude sur les modèles réduits physiques

Il convient, pour tout ouvrage maritime, de s'assurer de la tenue de l'ouvrage, qui doit résister à l'action dynamique de la houle pour les tempêtes les plus fortes à craindre dans le site considéré (*Viguier, 1992*).

Lorsqu'une vague atteint un obstacle, une partie de son énergie se réfléchit et se superpose à l'énergie incidente pour donner naissance au clapotis, une autre est transmise derrière l'ouvrage, par exemple en franchissant sa crête, ou encore en se propageant dans le massif en enrochements.

De très nombreuses études expérimentales ont permis d'observer les processus d'action de la houle sur différents types d'ouvrages et de dégager des formules utilisables pour pré-dimensionner un ouvrage au stade d'avant-projet. Ces formules empiriques sont insuffisantes pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Aussi, le coût élevé de ces ouvrages maritimes justifie-t-il toujours le recours à une modélisation qui, étant donné la complexité des interactions houle-ouvrage, est pour l'instant et probablement pour longtemps encore du domaine des modèles réduits physiques (*Caude, 2003*).

VI.5.1. Etude à deux dimensions

Habituellement, la mise au point du profil s'effectue d'abord à deux dimensions (crêtes des vagues parallèles à la digue) dans un canal ayant le plus souvent 1 à 2 m de largeur et 50 m au moins de longueur. Ce canal est équipé d'un générateur de houle aléatoire.

Le modèle est construit à une échelle suffisamment grande, habituellement comprise entre le 1/30° et le 1/60°, pour permettre la construction en similitude de Froude non distordue de tous les éléments constitutifs de l'ouvrage à simuler (*Viguier, 1992*). La masse volumique de ces derniers sera la même qu'en nature (à une petite correction près du fait que l'eau du modèle est douce).

Le profil est soumis à des houles qui ont généralement des périodes de retour allant de 20 à 100 ans suivant le type d'ouvrage concerné. Certains phénomènes ne sont pas reproduits de façon rigoureuse, comme la transmission de la houle dans le massif. D'autres ne peuvent l'être, comme la résistance des blocs. Il serait nécessaire d'utiliser sur le modèle des blocs présentant aux échelles de réduction la même résistance

mécanique (*Richard et al., 2003*).

Il est par contre possible, sur le modèle, de mesurer à l'aide d'une balance les efforts subis par un bloc ou une partie de la structure. Par ailleurs, la résistance propre de ces éléments peut être déterminée à l'aide d'essais spécifiques (essais de chute dans le cas de blocs) ou de calculs de résistance dans le cas de structure. Cela permet de s'assurer qu'il y a compatibilité entre les efforts engendrés par la houle et la résistance de la structure.

Les comparaisons qui ont été effectuées sur le comportement d'ouvrages dans la nature et sur les modèles sont satisfaisantes, pour autant que ces études soient réalisées par des laboratoires possédant une grande expérience de ce type d'essai (*Caude, 2003*).

VI.5.2. Étude à trois dimensions

Les études à deux dimensions destinées à mettre au point le profil courant d'un ouvrage sont souvent complétées par des études à trois dimensions dans un bassin à houle de grande superficie (400 à 600 m²), afin d'examiner certains problèmes particuliers tels que (*Caude, 2004*) :

- L'influence des fonds et/ou de l'obliquité des vagues sur les conditions d'attaque de la houle.
- La stabilité de points singuliers tels que les musoirs d'extrémité, les points anguleux (coudes).

De tels essais peuvent également être utiles pour apprécier les risques de dommages en cas de tempête survenant pendant les phases de travaux et pour rechercher les protections provisoires à prévoir en cas d'annonce de tempête et/ou d'arrêt du chantier.

De telles études sont effectuées aux mêmes échelles que celles à deux dimensions, mais dans un bassin à houle de grandes dimensions qui permet de reproduire un plus grand linéaire d'ouvrage.

Par exemple, après étude du profil au 1/50^e dans un canal de 1m de large, un tronçon de l'ouvrage de plusieurs centaines de mètres de longueur comprenant le musoir peut être étudié à la même échelle, en général, dans une cuve à houle de 10 à 15m de large (*Viguié, 1992*).

VI.5.3. Étude des évolutions des fonds : modèles sédimentologiques

Cette catégorie d'études concerne l'action de la houle et des courants sur les sédiments marins et l'évolution des fonds qui en découle.

Elle recouvre un grand nombre de problèmes, comme (*Caude, 2003*) :

- L'ensablement et/ou l'envasement des ports et de leurs accès.
- L'érosion et la protection du littoral.
- L'impact d'ouvrages sur les fonds et sur le littoral.
- La création ou la restauration de plages.

Ces modèles, véritablement opérationnels, ont près d'un demi-siècle d'existence. Ils ne nécessitent pas la connaissance fine des phénomènes. Le fait que le modèle, une fois bien réglé, simule de lui-même les phénomènes suffit à valider son exploitation, à condition que les essais soient réalisés dans le même domaine (par exemple un modèle étalonné uniquement sur des processus de sédimentation ne peut, en toute rigueur, être utilisé pour examiner des processus d'érosion) (*Delouis, 2001*).

Ces modèles doivent simuler la dynamique hydrosédimentaire d'un site donné, c'est-à-dire qu'ils doivent reproduire à la fois les phénomènes hydrauliques (houles, marées, courants) et les phénomènes sédimentologiques (la reprise, le transport et le dépôt des sédiments).

La similitude de Froude doit être complétée par une similitude sédimentologique, qui permet entre autres de définir le matériau (densité et granulométrie) et de simuler le sédiment naturel et l'échelle des temps sédimentologiques (rapport entre les durées modèle et nature pendant lesquelles, sous des actions hydrauliques homologues, se produisent des évolutions de fond analogues) (*Mignot, 1973*).

La similitude hydrodynamique repose sur des lois physiques universelles découlant de la mécanique des fluides. Par contre, la similitude sédimentologique repose sur des formules empiriques (critères de débit d'entraînement, transport et dépôt de sédiments) ayant des caractéristiques spécifiques suivant le type d'action hydraulique (courants, houles), la nature du sédiment (sable, galet, vase) (*Mignot et al., 2002*).

Par ailleurs, il n'existe, pour simuler le sédiment naturel, qu'une gamme limitée de matériaux techniquement et économiquement utilisables (matières plastiques, bakélite, nacre artificielle, poudre de bois, vase naturelle traitée, sable). Ainsi, il n'y a pas une, mais des similitudes sédimentologiques, et

chaque laboratoire a développé ses méthodes propres basées sur son expérience, mais elles sont finalement peu différentes (*Viguié, 1992*).

Les modèles à fonds mobiles doivent permettre d'étudier des longueurs de côte généralement comprises entre 3 et 6 km et s'étendant vers le large sur 2 à 4 km. Ces modèles sont construits en maçonnerie à partir des levés des fonds dans des cuves à houle ayant 700 à 1500 m² de surface. Ces cuves sont équipées de l'appareillage de reproduction des phénomènes naturels (générateurs de houle, de marée et de courant) (*Delouis, 2001*).

Une étude sur modèle réduit sédimentologique comprend les phases successives suivantes (*Migniot, 1973*) :

- Construction du modèle.
- Réglage hydraulique : reproduction des phénomènes hydrodynamiques du site (houles, marées, courants,...).
- Réglage sédimentologique : mise au point d'un cycle annuel qui est la succession schématique des houles naturelles (hauteurs, périodes et directions) telle qu'elle a pu être observée sur le site lors d'une année moyenne, c'est-à-dire avec des périodes de tempête et des périodes de beau temps.
- Reproduction des évolutions des fonds observées par le passé (méthode historique), cette phase est la plus importante, car elle va valider le modèle quant à sa capacité à reproduire la dynamique du site.
- Essais, avec généralement des essais de recherche qui permettent de tester les aménagements étudiés sur des périodes de 3 à 5 ans, et un essai final au cours duquel l'aménagement retenu à l'issue des différents essais de recherche est étudié sur une longue période (8 à 10 ans ou plus).

VI.6. Modélisation physique de la variante retenue pour la protection de Palm Beach-Azur

Palm Beach-Azur connaît une érosion assez importante. L'étude hydrosédimentaire a révélé un recul du rivage de 1 à 1,5m/an (valeur moyenne sur 10ans). Pour y remédier, la protection par des brise-lames bas en enrochements naturels et rechargement d'une partie de la plage a été retenue (variante n°3).

Vu les vocations touristique et socio-économique de la côte de Palm Beach, l'installation d'une telle protection doit faire l'objet d'une étude préalable approfondie en modèles réduits physiques afin d'assurer la vérification de l'ouvrage prévu ou d'aller jusqu'à l'optimisation de celui-ci. Trois études sur modèles réduits physiques ont été réalisées : à deux dimensions en canal à houle et à trois dimensions en bassin à houle par fonds fixes et par fonds mobiles.

Les renseignements recueillis lors de la phase préliminaire de cette étude sont suffisants pour pouvoir déterminer les profils en modèle de la protection retenue, mais ils s'avèrent souvent trop partiels pour pouvoir définir et concevoir de façon précise le dit ouvrage.

Il y a donc lieu, avant d'entreprendre la construction des modèles au laboratoire, de recourir à une campagne de reconnaissance spécifique au site et afin de bien connaître ses caractéristiques et donc de pouvoir représenter fidèlement le modèle. La visite a été effectuée en février 2010, il a été observé de l'Est à l'Ouest de la plage de Palm Beach-Azur ce qui suit :

- La plage est constituée de sable fins, moyen et des galets qui longent presque toute la côte.
- Des dunes de sable en état de destruction avec des pentes en rupture.
- Présence de déchet le long de la côte.
- Présence de plusieurs rejets d'eaux usées.
- L'extrémité Ouest du site est protégée par un épi en enrochement attaché à la plage sur un linéaire de 150m environ.

Il est exposé ci-dessous un reportage photographique de la visite.

		
<p>1. Côté Est de Palm Beach, présence de galets fins sur la côte et présence de rochers.</p>		<p>2. Déferlement de la houle à la côte de Palm Beach.</p>
		
<p>3. Erosion de la dune bordière, des enrochements ont été posés provisoirement afin de protéger la dune. Présence de déchets.</p>		<p>4. Destruction d'une plate forme en béton sous l'effet de la houle.</p>
		
<p>5. Affouillement de la dalle en béton à cause des houles destructives.</p>		
		
<p>6. Mise en place provisoire d'enrochements de petite catégorie afin de protéger la dune côtière qui se trouve en érosion.</p>		<p>7. Une partie de la plage est constituée de sable et galets fins</p>

		
8. Afin de protéger les constructions, un gabionnage a été mis en place pour protéger quelques habitations et plantations et stabiliser la dune côtière.		9. Erosion importante de la dune avec une rupture de la pente.
		
10. Débouché de l'oued, ses berges sont en sable fin, sa largeur est d'environ 2m.	11. L'extrémité Ouest de Palm Beach, limitée par l'épi Est de la protection de la plage de Zéralda.	

A la fin de la visite, on a prospecté le fonctionnement des trois brise-lames et l'épi qui protègent la plage de Zéralda. Ces brise-lames sont long de 100m et espacés de 70m, alors que l'épi de 135 m de longueur est placé décalé de 7° vers la gauche par rapport à la perpendiculaire (*LEM, 2002*). Le reportage photographique est donné ci-après.

		
1. Bon fonctionnement des brise-lames hauts illustré par la formation de plages alvéolaires. Artificialisation accrue du paysage.		2. Engraissement des enrochements (1-3t) de l'épi Ouest ancré à la plage.
		
3. Traces de franchissements sur la dalle de roulement de l'épi Ouest.	4. Glissement de quelques enrochements (1 – 3)t au niveau	5. Altération du béton de la dalle de roulement de l'épi Ouest.

Ces constats nous amènent à confirmer que la plage de Palm Beach connaît un dégraissement important suite aux houles destructives qui menacent la côte, d'une part et la pression des activités humaines, d'autre part.

VI.6.1. Modélisation à deux dimensions en canal à houle

L'étude en canal à houle a pour objectif de tester la stabilité de la partie courante des brise-lames. Plusieurs variantes de profil type des ouvrages en question peuvent être testées pour aboutir à une configuration adéquate et satisfaisante sur le plan technico-économique, tout en réduisant l'action frontale et érosive des houles.

VI.6.1.1. Cadre des essais

Les essais se sont déroulés dans le canal à houle du centre d'essais sur modèle (CEM) du laboratoire d'études maritimes. Les dimensions principales de ce canal sont : 0,60 m en largeur, 1,10 m en profondeur et 39,0 m en longueur :

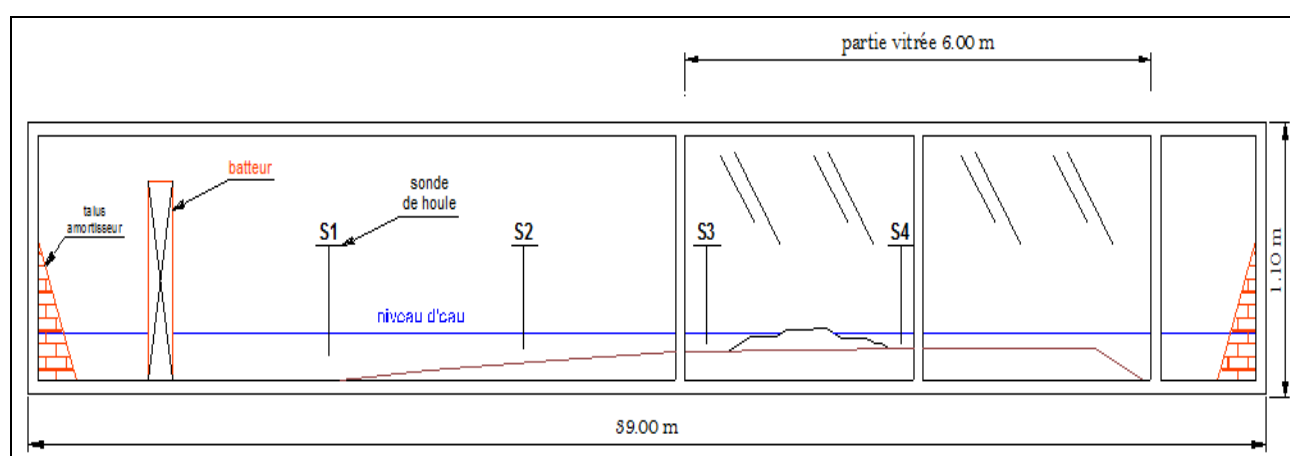


Figure VI.1 : Schéma du canal à houle.

Ce canal est équipé d'un générateur de houle régulière et aléatoire constitué :

- d'un volet plan.
- d'un vérin hydraulique asservi en position sur un signal de commande continu.
- d'un générateur électronique qui élabore le signal de commande lié à un programme de génération à l'aide d'un ordinateur, représentant un train de houle réel enregistré en nature et converti en train de houle en modèle.

Dans le cas de la houle aléatoire (houle utilisée pour l'ensemble de l'étude), le signal est effectivement aléatoire suivant une durée de tempête préalablement fixée.

Deux grandes baies vitrées (6 m de longueur) permettent l'observation directe des évolutions des maquettes de l'ouvrage.

Une conduite met en communication permanente la partie du canal située à l'arrière de la maquette de l'ouvrage et la partie profonde où se trouve le batteur. Ce dispositif évite une éventuelle surélévation du plan d'eau par suite de franchissements répétés.

VI.6.1.2. Hypothèses d'essais

VI.6.1.2.1. Lois de similitude adoptées

En hydraulique maritime, les deux phénomènes à représenter sont la marée et la houle. Dans notre cas (Méditerranée) seule la dernière est prise en considération. Les problèmes liés à la propagation de la houle étudiés sur le modèle réduit, sont surtout ceux liés à la combinaison de la réfraction et la diffraction.

L'échelle de réduction géométrique λ , étant choisie pour satisfaire du mieux possible les différentes contraintes de réalisation du modèle tout en garantissant une représentativité des phénomènes et une précision de leur mesure suffisante, le choix de la similitude consiste à convenir d'une ou de plusieurs relations entre l'échelle de réduction géométrique et les échelles de représentation des autres grandeurs.

Pour ce type d'essai, la nature des principaux phénomènes mis en jeu (propagation d'une onde de gravité, équilibre de corps solides, etc.) suggère de privilégier la représentation des forces déterminantes que sont les forces liées aux accélérations (gravité et inertie). Pour cela, il est nécessaire que la similitude adoptée laisse invariant le nombre de Froude F (*Mignot et al., 2002 modifié*).

$$F = V_n / \sqrt{g \cdot L_n} = V_m / \sqrt{g \cdot L_m}$$

Avec : V_n et L_n , vitesse et longueur en nature.

V_m et L_m , vitesse et longueur en modèle.

En opérant dans le même champ de pesanteur que celui du prototype et en adoptant une représentation invariante des accélérations, le respect de ce critère détermine les échelles des vitesses, donc des temps d'une part et des volumes, donc des masses et des poids d'autre part :

-Echelle des vitesses, temps : $\sqrt{\lambda}$.

- Echelle des volumes, masses, poids : λ^3 .

VI.6.1.2.2. Distorsions

VI.6.1.2.2. 1. Distorsion due à la viscosité

Pour que la représentation des forces de viscosité soit correcte, il est théoriquement nécessaire que la similitude adoptée laisse invariant le nombre de Reynolds (*SGH, 1973 modifié*) :

$$Re = V \cdot D / \nu$$

avec :

V : Vitesse caractéristique (vitesse orbitale, célérité,...).

ν : Viscosité cinématique du fluide.

D : Dimension caractéristique (dimension d'un bloc, hauteur d'eau,...).

Or, l'adoption a priori de la similitude de Froude impose une échelle de $\lambda^{3/2}$ pour le groupement VD .

Pour satisfaire à la fois aux critères de similitude de Froude et de Reynolds, il serait donc théoriquement nécessaire d'utiliser pour le modèle, un fluide de très faible viscosité, 1/189,57 fois celle de l'eau dans ce cas. Cette impossibilité pratique conduit très généralement à préférer le simple choix de l'eau pour le modèle et donc à accepter une distorsion sur la représentation du nombre de Reynolds, distorsion d'autant plus importante que l'échelle de réduction des longueurs est plus grande (*LEM, 2006*).

Cependant, pour une échelle donnée, les conséquences pratiques de cette distorsion (distorsion des seules forces de viscosité) restent relativement négligeables tant que le modèle fonctionne dans des conditions d'écoulement telles que les forces de viscosité restent négligeables.

Pour des raisons de simplicité pratique, on se contente de ne respecter que la similitude dite similitude de Froude.

VI.6.1.2.2. 1. Distorsion due à la densité de l'eau

L'eau utilisée dans le modèle est douce ($\delta_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) alors qu'elle est salée en nature, donc plus dense (δ_w d'environ 1025 kg/m^3). La masse spécifique de l'eau intervient directement dans les forces de nature inertielle, proportionnelles aux volumes et aux accélérations, ainsi que dans les poussées d'Archimède. En fait, cette caractéristique intervient globalement sur la stabilité suivant une relation empirique (formule de stabilité d'Hudson évoqué précédemment) qui traduit les conditions d'apparition d'un certain degré de dommage. Ainsi la formule d'Hudson peut s'écrire aussi de la manière suivante (*LEM, 2006*) pour le volume des blocs :

$$V = \frac{1}{K_D} \cdot \frac{H^3}{\left(\frac{\delta_s}{\delta_w} - 1 \right)^3 \cot g \alpha}$$

Pour compenser de manière simple la distorsion qu'entraîne l'emploi de l'eau douce, il suffit donc d'adopter pour les modèles de blocs (réduits à l'échelle) un matériau de densité inférieure à celle des blocs du prototype de manière à ce que le groupement $(\delta_s / \delta_w - 1)$, de la formule d'Hudson, ait la même valeur dans les deux systèmes.

Ainsi, avec $\delta_w = 1025 \text{ kg/m}^3$ pour le prototype, et $\delta_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ pour le modèle, la valeur de la masse spécifique des matériaux à utiliser pour représenter les blocs artificiels de béton est : 2341 Kg/m^3 au lieu de 2400 Kg/m^3 , contrairement aux enrochements naturels pour lesquels un facteur de correction égal à 0,87 intervient directement sur leurs poids afin corriger la différence de densité entre l'eau de mer et l'eau douce du modèle (**LEM, 2006**). On note que ce coefficient peut être appliqué uniquement sur les enrochements des carapaces extérieures. Dans notre cas, on l'applique pour toutes les catégories d'enrochements constituant le brise-lames (mesure sécuritaire).

VI.6.1.3. Construction du modèle

VI.6.1.3.1. Choix de l'échelle

Le choix de l'échelle dans le canal repose sur plusieurs paramètres :

- Les dimensions du canal.
- Les dimensions de l'ouvrage (hauteur, implantation).
- Les conditions hydrographiques du modèle : profondeur de l'eau, possibilité de génération des houles voulues.

On note que l'échelle ne doit pas être trop petite, car elle peut entraîner des 'effets modèle' tels qu'un amortissement trop important de la houle provoqué par la trop grande importance des forces de viscosité dans la masse d'eau, un frottement excessif sur les fonds ou des phénomènes de tension superficielle à la surface libre, comme elle ne doit pas être trop grande non plus.

Compte tenu de tous ces paramètres, l'échelle du modèle qui a été retenue est de $1/\lambda=1/24$.

VI.6.1.3.2. Construction des fonds

Pour les essais hydrauliques en canal à houle (bidimensionnel), la direction de houle à prendre en considération est la direction frontale à l'ouvrage. Dans notre cas, le brise-lames BL4 est celui qui reçoit l'incidence frontale des houles dans la direction Nord 295° , donc on retient cette direction pour la construction.

On note que le choix de ce brise-lames BL4 ne se fait pas par hasard, il s'agit du secteur le plus défavorable en termes d'incidence frontale (la perpendiculaire) mais aussi en termes de bathymétrie (l'existence d'un bas-fond qui risque d'amplifier la hauteur des houles), ce choix est le plus sécuritaire.

Les fonds sont construits, jusqu'à des profondeurs de -10m, par du sable lissé par une couche de mortier. Le plan de masse montrant la section testée en canal est donné en **Annexes –Plans** (plan de masse n°1).

VI.6.1.3.3. Choix des matériaux de l'ouvrage

Les matériaux constituant les différentes parties de l'ouvrage, sont sélectionnés en fonction de leurs poids et de leurs tailles.

Chaque catégorie d'enrochements fait l'objet d'un tri soigné. En ce qui concerne le tout-venant de carrière, il est soumis à un lavage préliminaire afin d'éliminer les éléments fins susceptibles de déformer la représentation de la perméabilité de l'ouvrage.

Les caractéristiques des matériaux constituant l'ouvrage ont été déjà évoquées. Pour les matériaux du modèle, on appliquera, comme entendu, la relation suivante :

$$P_{\text{modèle}} (g) = (P_{\text{nature}} (g) / \lambda^3) \cdot 0,87$$

Les poids obtenus (valeurs arrondies) des enrochements utilisés dans ce modèle sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau VI.1 : Caractéristiques des matériaux de la protection de Palm Beach.

Types de matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle E=1/24	
	Poids (t)	Densité (t/m^3)	Poids (g)	Densité (g/cm^3)
Catégories des enrochements	1 – 500kg	2,60	0,06 – 31,50	2,60
	1 – 3	2,60	63,0 – 189,0	2,60
	2 – 4	2,60	126,0 – 252,0	2,60
	2 – 5	2,60	126,0 – 315,0	2,60
	3 – 6	2,60	189,0 – 378,0	2,60

On constate que les densités des matériaux entre nature et modèle sont les mêmes, car on a utilisé des enrochements naturels pour toutes les catégories du brise-lames et on a pesé pour chaque catégorie. L'épaisseur de la carapace et des sous-couches est estimée par la formule suivante (SGH, 1973):

$$e = n.c.v^{1/3}$$

Avec :
 n : nombre de rangées.
 c: coefficient de couche dépendant de la forme des blocs.
 c (enrochements) = 1,15.
 v : volume du bloc.

Tableau VI.2 : Epaisseur des couches des matériaux de la protection de Palm Beach.

Matériaux	Epaisseur de la couche
Enr. 1 – 3t	2,00 m (2 couches)
Enr. 2 – 4t	1,20 m (1 couche)
Enr. 2 – 5t	1,27 m (1 couche)
Enr. 3 – 6t	1,40 m (1 couche)

Le nombre de blocs nécessaires à la couverture d'une surface A (en m²) est donné par la relation (SGH, 1973) :

$$N_r = A.n.c. (1 - P/100) v^{-2/3}$$

P étant l'indice des vides à respecter, et qui est de 35% pour les enrochements (LEM, 2006).

VI.6.1.3.4. Construction de la section du brise-lames

Après construction des fonds bathymétriques, un tracé de la section type de l'ouvrage est reproduit sur la vitre du canal afin de matérialiser les différentes catégories d'enrochements.

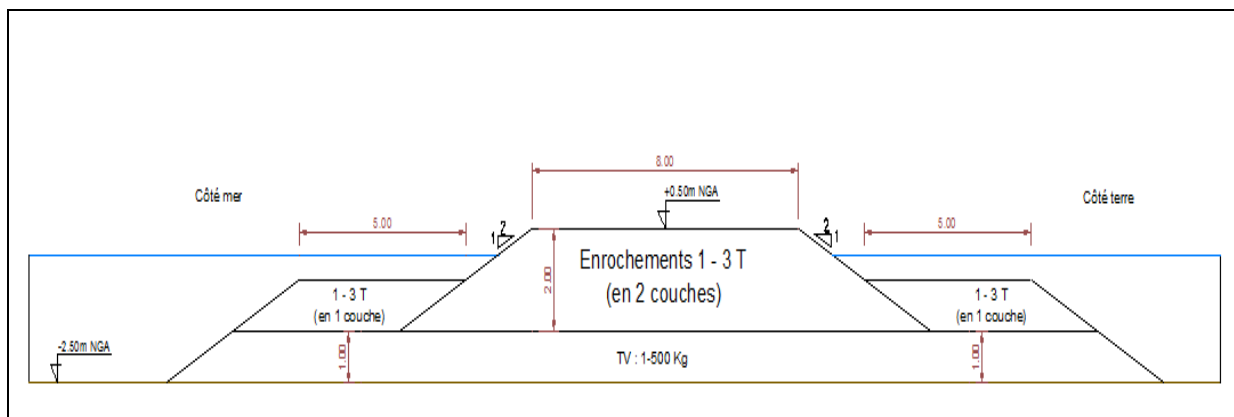


Figure VI.2 : Profil type du brise-lames de la protection n°3 retenue sur Palm Beach.

La maquette du tronçon du brise-lames (figure VI.3) est construite sur les fonds construits par simple mise en place naturelle des différents éléments. L'eau est ensuite remplie jusqu'à un niveau de +0,00



Figure VI.3 : Pose de la maquette du brise-lames dans le canal et remplissage en eau, laboratoire du LEM.

VI.6.1.4. Calibration (réglage hydraulique du modèle)

Après la construction des fonds et le remplissage en eau, une calibration du modèle est effectuée. Elle a pour but d'une part de faire la mise au point de l'appareillage, et d'autre part d'ajuster les conditions expérimentales de manière à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques soit reproduits conformément à la nature. On procède donc à la calibration des sondes d'enregistrement (*figure VI.1*), vérification de leurs emplacements, vérification du niveau d'eau, etc.

VI.6.1.5. Conditions des essais

VI.6.1.5.1. Conditions hydrographiques

Les conditions hydrographiques considérées lors de cette étude en modèle réduit physique bidimensionnel sont comme suit :

- Hauteur significative à l'ouvrage, $H_s = 2,50$ m.
- Période de pointe $T_p = 13$ s.

Afin d'étudier les conditions de houles les plus défavorables, on a jugé nécessaire de prendre en considération, dans cette étude en modèle, les niveaux d'eau et surcotes suivants :

- Niveau $\pm 0,00$ NGA : pour les essais de la série progressive issue de l'analyse des houles.
- Niveau $+0,50$ m NGA et $+1,00$ m NGA : pour les essais de la série d'endurance en utilisant la houle cinquantennale (houle de projet), ces essais servent à voir la réaction de l'ouvrage dans un temps plus long pour pouvoir reproduire des houles de tempêtes et voir leurs effets.
- Niveau $- 0,50$ m NGA : pour les essais de la série progressive et de l'endurance, au cas de phénomènes de marée basse (par précaution).

VI.6.1.5.2. Les houles

Les conditions de houles retenues pour la modélisation sont celles issues de l'étude des houles au large, elles sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau VI.3 : Houles H_s (m) au large de Palm Beach par direction et par période de retour.

Direction	N240° à N360°	N300° à N360°	N0° à N60°	Toutes directions
Période de retour				
Annuelle (1 an)	5,20m	4,80m	4,80m	5,70m
Quinquennale (5 ans)	6,30m	6,30m	6,30m	7,10m
Décennale (10 ans)	6,80m	7,00m	7,00m	7,70m
Vingtennale (20 ans)	7,30m	7,70m	7,70m	8,40m
Cinquantennale (50 ans)	8,00m	8,60m	8,60m	9,20m
Centennale (100 ans)	8,50m	9,30m	9,30m	9,90m

Puisque nous avons retenu la direction de houle frontale à l'ouvrage, soit la Nord 295°. L'étude de statistiques des houles au large (N240° à N360°) transférées à la côte (à -10m) a donné les houles suivantes, qui seront utilisées lors des essais :

Tableau VI.4 : Statistiques de la houle à -10 m de la côte de Palm Beach.

Houles	Hauteur Hs dans la direction Nord 295°
Annuelle (1 an)	3,80 m
Quinquennale (5 ans)	4,20 m
Décennale (10 ans)	4,50 m
Cinquantennale (50 ans)	4,80 m

VI.6.1.5.3. Période de pointe

Pour les besoins de l'étude en modèle, il est demandé de faire correspondre à chaque hauteur de houle une période de pointe T_p afférente. Le modèle est équipé d'un logiciel acquis récemment par le LEM du laboratoire Anglais Wallingford. Celui ci impose le choix du spectre devant être choisi pour la génération en modèle. Dans le cadre de cette étude, le spectre choisi étant celui de Jonswap.

Ainsi la période correspondante pour chaque hauteur de houle est donnée par la relation (SGH, 1973) :

$$T_p (s) = \frac{2\pi}{0,25 + \frac{1,80}{H_s + 0,60}}$$

D'où les résultats de Hs et T_p mentionnés dans le tableau ci-après :

Tableau VI.5 : Hauteurs significatives Hs/ Périodes de pointe à -10 m de la côte de Palm Beach.

Houles	Hs dans la direction Nord 295°	Périodes de pointe T_p
Annuelle (1 an)	3,80 m	09 s
Quinquennale (5 ans)	4,20 m	11 s
Décennale (10 ans)	4,50 m	12 s
Cinquantennale (50 ans)	4,80 m	13 s

Chaque essai est exécuté avec une houle augmentée par palier progressif, un palier de houle est caractérisé par un couple hauteur significative (Hs) et une période de pointe (T_p).

La durée de chaque test varie en fonction du cycle time défini par le logiciel de génération, entre 12mn et 23mn en modèle ce qui correspond à un intervalle de 1 heure à 1h50mn de tempêtes en nature (par application de l'échelle des temps de la similitude de Froude). La durée de la série d'endurance est de 2h50mn en modèle correspondant à une tempête de 14h environ en nature.

Avant d'appliquer les houles significatives, l'ouvrage est soumis à des houles dites de tassement, qui ont pour but de réaliser l'imbrication des blocs de la carapace.

VI.6.1.5.4. Génération de la houle

La houle appliquée sur la maquette est générée par un batteur fonctionnant dans un plan horizontal, dont le placement est comparable à un piston. Le déplacement du volet est assuré par un vérin, lui-même actionné par un groupe de puissance hydraulique à 110 bars.



Figure VI.4 : Canal à houle, dispositif mécanique de génération des houles, laboratoire du LEM.

Tout est piloté par un générateur électronique qui est lié à un logiciel informatique dénommé Wavegen représentant un train de houle théorique en nature et converti en train de houle en modèle. Cette fonction est introduite dans un système "Servo" qui contrôle le mouvement du vérin. Le générateur reproduit des houles aléatoires relevant du spectre d'énergie déterminé. Les périodes et amplitudes simulées en modèle sont obtenues respectivement par variation de la vitesse et par amplification du signal de puissance (Out-Put) du générateur électronique.



Figure VI.5 : Chambre de pilotage liée au canal et dispositif électronique de génération des houles, laboratoire du LEM.

VI.6.1.5.5. Mesure de la houle

La houle générée dans le modèle est enregistrée par des capteurs de houle (sondes) basés sur le principe de conductance électrique entre deux électrodes.

Les signaux des capteurs de houle sont enregistrés en continu et analysés par une chaîne de mesure informatisée préprogrammé " **Multi Chanel Wave Analyser** " qui peut traiter jusqu'à 32 canaux. A la fin de chaque essai, la chaîne de mesure transmet à l'imprimante (*figure VI.5*) les répartitions statistiques de tous les signaux enregistrés. Un exemple des résultats imprimés est montré ci-dessous.

Resultats statistiques
 Laboratoire D'Etudes Maritimes
 Date : 14/06/2010
 Heure : 16:30:20
 Projet : Palm Beach
 Variante : 1
 Direction : NORD295°
 Test : Annuelle
 Gain: 1.9
 Durée : 941s

Canal	Nombre_Vagues	Hmax	Hmin	H10	H3	Hmoy
1	621	6.02	0.02	4.81	3.93	2.50
2	573	3.35	0.02	2.54	2.20	2.20
3	508	4.17	0.02	2.84	2.42	1.61
4	746	1.60	0.01	1.09	0.78	0.41

Figure VI.6 : Exemple d'un résultat d'impression après la génération d'une houle annuelle.

Ces résultats sont interprétés comme suit :

- Colonne n°1 : indique les numéros des capteurs de houle ou canaux ;
- Colonne n°2 : représente le nombre de vagues générées au niveau de chaque capteur.
- Colonne n°3 : représente la hauteur significative maximale enregistrée de la houle.
- Colonne n°4 : représente la hauteur significative minimale enregistrée de la houle.
- Colonne n°5 : indique la moyenne de 1/10 des plus grandes houles significatives enregistrées.
- Colonne n°6 : indique la moyenne de 1/3 des plus grandes houles enregistrées.
- Colonne n°7 : représente la hauteur moyenne des houles enregistrées.

Pour l'interprétation des résultats des essais, Hs serait la moyenne du 1/3 des vagues les plus hautes dans le train de houle en modèle, H la moyenne des vagues enregistrées et Tp la période qui correspond à la plus grande densité d'énergie spectrale.

VI.6.1.6. Observations effectuées et moyens mis en œuvre

VI.6.1.6.1. Observations hydrauliques

Lors de chaque essai, le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage est étudié avec attention. Ainsi, pour chaque configuration d'essai sont notés :

- les franchissements : nature, localisation, importance.
- les déferlements.

Ces observations sont ensuite corrélées avec les dégâts pour une analyse complète.

VI.6.1.6.2. Observation des dégâts

L'observation des dégâts est principalement faite dans les zones sensibles de l'ouvrage, notamment la berme supérieure et les contrebutees intérieure et extérieure : stabilité des enrochements et estimation des dégâts.

Les observations des dégâts sont réalisées pendant le déroulement des essais (mode de dégradation) et à la fin des essais, après vidange (évaluation des dégâts).

VI.6.1.6.3. Critères de stabilité

Il convient, pour tout ouvrage maritime, de s'assurer de la tenue de l'ouvrage qui doit résister à l'action dynamique de la houle pour les tempêtes les plus fortes.

La finalité de cette étude est de définir une conception optimale du point de vue technico-économique en se basant sur les critères de dommages acceptables.

Le dommage est défini comme dommage relatif, qui est égal au rapport entre le nombre des blocs déplacés et le nombre de blocs posés, dont les dégâts admissibles sont fixés à 5% maximum pour la houle cinquantennale (*LEM, 2006*).

VI.6.1.6.4. Moyens mis en œuvre pour les observations

Toutes les observations sont notées au fur et à mesure des essais. Ainsi, de nombreux clichés sont réalisés permettant en outre de comparer les dégâts propres à chaque essai, et éventuellement, un enregistrement vidéo est aussi effectué pour visualiser de manière plus concrète le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage.

VI.6.1.7. Description des variantes et résultats des essais

VI.6.1.7.1. La variante initiale

Le profil de la variante initiale retenue (variante n°3) est constitué de (*figure VI.7*) :

- d'un tapis anti-affouillement en enrochements (1-500kg), d'une épaisseur de 1m, arasée à la cote -1,50m.
- d'un noyau en enrochements (1-3t) en deux couches, d'une épaisseur de 2m, arasée à la cote +0,50m NGA, et d'une pente de 2/1.
- d'une contre butée, du côté intérieur et extérieur, en enrochements (1-3t), d'une épaisseur de 1m (1 couche), arasée à la cote -0.50m NGA et d'une pente de 2/1.

Les hauteurs H_s indiquées dans les différents tableaux qui suivent sont exprimées en mètres.

Tableau VI.6 : Résultats des essais de la variante initiale – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.

N° Test	Tp (s)	$H_{s\text{désirée}}$ à -10 m	$H_{s\text{obtenue}}$ à -10 m	$H_{s\text{obtenue}}$ à -4 m	Observations
1	7,00	0,95	0,92	0,94	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements très faibles (embruns). - Quelques agitations au niveau du TVC extérieur. - Dé rangement puis Rocking au niveau de la contrebutée extérieure.
2	8,00	2,00	2,25	1,97	<ul style="list-style-type: none"> - Embruns et franchissements plus ou moins importants. - Glissement d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure sur le TVC. - Deux dérangements au niveau de la berme dont un est suivi d'un léger déplacement sur la contrebutée intérieure. - Déferlement de la houle avant l'ouvrage.
3	9,00	3,80	3,72	2,26	<ul style="list-style-type: none"> - Trois Rocking au niveau de la contrebutée extérieure. - Glissement d'un enrochement de la contrebutée extérieure sur le TVC. - Légère modification de la pente de l'assise du côté extérieur. - Déferlement sur la contrebutée extérieure et franchissements assez forts.

4	11,00	4,20	4,26	2,33	<ul style="list-style-type: none"> - Projection d'un enrochement 1-3t de la berme vers la contrebutée intérieure due au franchissement. - Deux déplacements de la berme vers la contrebutée intérieure. - Rocking au niveau de la berme. - Les enrochements ayant glissé sur la contrebutée intérieure se trouvent sur le TVC. - Absence de Rocking à la fin de l'essai.
5	12,00	4,50	4,54	2,38	<ul style="list-style-type: none"> - Projection d'un enrochement de la berme vers la contrebutée intérieure due au franchissement, puis chute sur le TVC. - Déferlement sur la berme. - Deux glissements de la contrebutée extérieure sur le TVC. - Deux nouveaux déplacements de la berme vers la contrebutée intérieure. - Un nouveau Rocking au niveau de la contrebutée extérieure.
6	13,00	4,80	4,74	2,34	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements importants. - Déferlement sur berme et contrebutées. - Chute d'un enrochement 1-3t de la contrebutée intérieure sur l'assise. - Deux déplacements de la berme vers la contrebutée intérieure. - Deux Rocking dans la contrebutée extérieure dont un est suivi d'un déplacement sur le TVC extérieur.
7	13,00	4,80 Endurance (Niv. +0.5m NGA)	5,32	-	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements importants. - Déferlement de la houle sur l'ouvrage. - Trois nouvelles projections de la berme vers la contrebutée intérieure. - Deux nouveaux glissements de la contrebutée extérieure sur le TVC. - Rocking et dérangement de plusieurs enrochements 1-3t au niveau de la berme. - Glissement d'un enrochement de la berme vers la contrebutée extérieure (effet de la houle de retour).
<p>A la fin des essais, six enrochements 1-3t (dont 5 proviennent de la berme et un de la contrebutée intérieure) se trouvent sur le TVC intérieur et cinq autres enrochements 1-3t de la contrebutée extérieure sont au pied de l'assise du côté extérieur.</p>					

Tableau VI.7 : Résultats des essais de la variante initiale – Canal niveau -0.5m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1	7,00	0,95	0,92	0,93	- RAS
2	8,00	2,00	2,09	1,91	<ul style="list-style-type: none"> - Légers franchissements sur la berme. - Rocking d'un enrochement (1 – 3t) au niveau de la berme.
3	9,00	3,80	3,69	2,16	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements importants. - Glissement d'un enrochement (1 - 3t) de la contre butée intérieure vers le fond.

4	11,00	4,20	4,09	2,24	- Franchissements importants.
5	12,00	4,50	4,28	2,28	- Franchissements importants. - Glissement d'un 2 ^{ème} enrochement (1 - 3t) de la contre butée intérieure vers le fond.
6	13,00	4,80	5,09	2,25	- Franchissements très importants. - Déplacement d'un enrochement (1 - 3t) de la berme vers la contre butée intérieure.
7	13,00	4,80 Endurance	4,44	2,12	- Franchissements très importants. - Déplacement d'un enrochement (1 - 3t) de la berme. - Glissement de quelques enrochements (1 - 3t) de la contre butée extérieure vers le fond.

VI.6.1.7.1.1. Conclusion : Profil instable

La déstabilisation et les dégâts considérés lors des essais sont au-delà des seuils acceptables de stabilité, aussi bien pour la berme (> 7% entre dérangements et déplacements) que pour la contrebutée extérieure (> 5%). Pour une meilleure résistance de l'ouvrage, on opte pour une modification du profil.

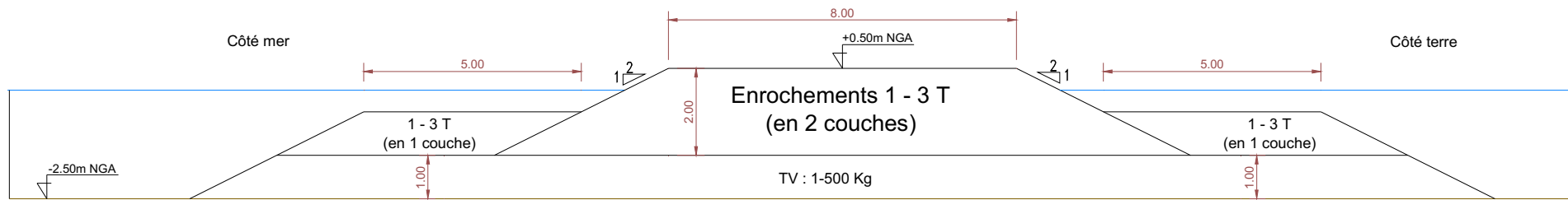


Figure VI.7 : Profil type de la variante initiale de protection de Palm Beach (en canal à houle).

VI.6.1.7.2. La variante initiale Bis

Le profil de cette variante (*figure VI.8*) ne diffère de celui de la variante précédente que d'un élargissement de l'assise en TVC de 2m du côté mer et de 1m du côté terre, les mêmes pentes sont retenues.

Tableau VI.8 : Résultats des essais de la variante initiale Bis – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1	7,00	0,95	0,92	0,97	- Pas de franchissements observés. - Faibles embruns.
2	8,00	2,00	2,20	2,05	- Franchissements très faibles. - Glissement d'un enrochement 1-3t de la berme sur la contrebutée intérieure.
3	9,00	3,80	3,73	2,42	- Franchissements importants. - Rocking et dérangement dans la berme et la contrebutée extérieure. - Projection d'un enrochement de la berme vers la contrebutée intérieure. - Projection de quatre enrochements 1-3t de la contrebutée extérieure vers la berme.
4	11,00	4,20	4,28	2,41	- Franchissements très importants. - Déplacement d'un troisième enrochement de l'extrémité de la berme vers la contrebutée intérieure.
5	12,00	4,50	4,60	2,43	- Franchissements très importants. - Glissement d'un autre enrochement de la berme vers la contrebutée intérieure.
6	13,00	4,80	4,71	2,45	- Franchissements très importants. - Projection d'un cinquième enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure vers la berme.
17% des enrochements 1-3t de la contrebutée extérieure se sont déplacés ainsi environ 3% des enrochements 1-3t au niveau de la berme.					

VI.6.1.7.2.1. Conclusion : Profil instable

Les dégâts survenus lors des essais de la série progressive nécessitent l'arrêt des tests. Des modifications sur profil s'avèrent nécessaires.

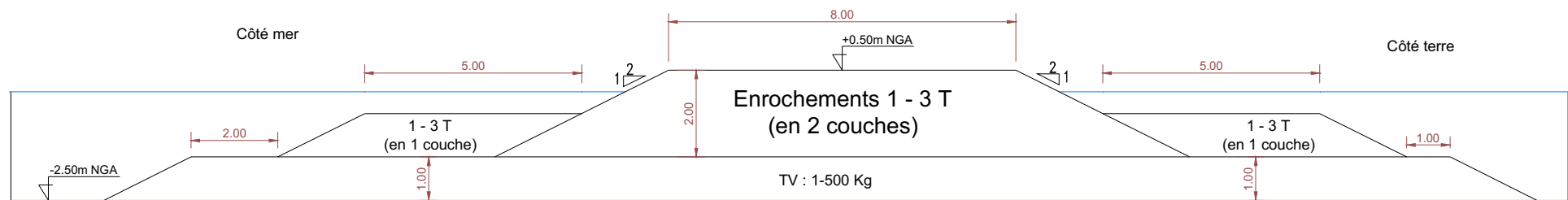


Figure VI.8 : Profil type de la variante initiale Bis de protection de Palm Beach (en canal à houle).

VI.6.1.7.3. La variante 1

On retient pour cette variante le profil précédent et on augmente la catégorie des enrochements de la contrebutée extérieure de 1-3t à 2-5t. (*figure VI.9*).

Tableau VI.9 : Résultats des essais de la variante 1 – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1	8,00	2,00	2,16	1,93	<ul style="list-style-type: none"> - Déferlements et franchissements plus ou moins importants. - Projection d'un petit enrochement 1-3t de la berme vers le pied du TVC intérieur. - Léger déplacement d'un enrochement 2-5t de la contrebutée extérieure sur le TVC. - Deux Rocking dans la contrebutée extérieure et un dérangement au niveau de la berme.
2	9,00	3,80	3,78	2,28	<ul style="list-style-type: none"> - Déferlements importants sur la contrebutée extérieure et sur la berme. - Un Rocking au niveau de la berme et un autre dans la contrebutée extérieure. - Projection d'un petit enrochement 1-3t de la berme vers la contrebutée intérieure.
3	12,00	4,50	4,61	2,35	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements très importants. - Glissement d'un troisième enrochement de la berme vers la contrebutée intérieure. - Trois nouveaux dérangements au niveau de la berme.
4	13,00	4,80	4,70	2,36	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements très importants. - Glissement d'un autre enrochement 1-3t de la berme jusqu'au pied du TVC intérieur.
5	13,00	4,80 Endurance (Niv. +0.5m NGA)	4,82	2,65	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement de quatre autres enrochements de la berme vers la contrebutée intérieure. - Franchissements et déferlements importants. - Plusieurs Rocking et dérangements dans la berme et la contrebutée extérieure. - Déplacement d'un enrochement de la contrebutée extérieure vers le TVC. - Légère érosion de la cote du TVC du côté mer.

Tableau VI.10 : Résultats des essais de la variante 1 – Canal niveau -0.5m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1	8,00	2,00	2,01	1,88	- Rocking d'un enrochement 2-5t de la contrebutée extérieure.
2	9,00	3,80	3,64	2,13	- Idem.
3	12,00	4,50	4,20	2,19	- Glissement d'un enrochement 1-3t de la contrebutée intérieure sur le TVC.
4	13,00	4,80	4,24	2,11	- Idem.
5	13,00	4,80 Endurance	4,32	2,06	- Déferlement de la houle sur l'ouvrage. - Rocking de quelques enrochements au niveau de la berme et de la contrebutée extérieure.

VI.6.1.7.3.1. Conclusion : Profil plus stable que le précédent mais des améliorations demeurent nécessaires

Au total, 13 petits enrochements 1-3t de la berme se sont déplacés soit par dérangement soit par glissement ou par projection, ce qui correspondrait à plus de 5% de dégâts. De plus, les Rocking ont continué même à la fin des essais et la berme de l'assise extérieure s'est érodée. Les dégâts constatés sont importants et restent inacceptables si l'on veut une résistance optimale de l'ouvrage vis-à-vis de l'action frontale des houles.

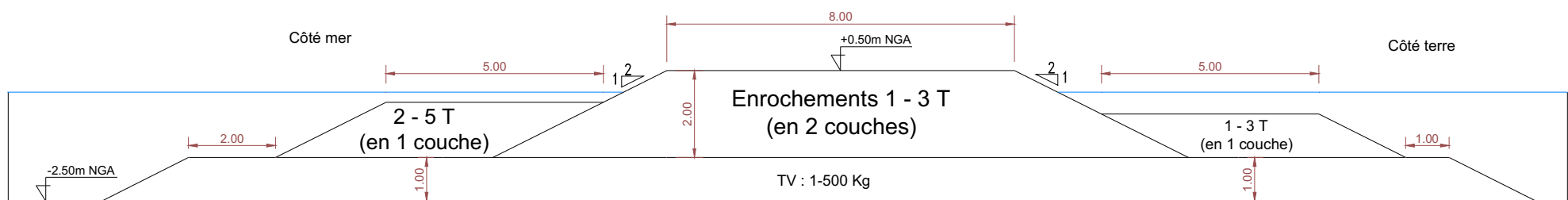


Figure VI.9 : Profil type de la variante 1 de protection de Palm Beach (en canal à houle).

VI.6.1.7.4. La variante 2

Cette variante (*figure VI.10*) consiste en :

- La substitution du tapis anti affouillement et de la contre butée extérieurs par une contre butée en enrochements de (1 - 3t) mais en deux couches.
- L'augmentation du tonnage de la catégorie d'enrochements de la couche supérieure du noyau de (1 - 3t) à (2 - 4t).

Tableau VI.11 : Résultats des essais de la variante 2 – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.

N° Test	Tp (s)	H _s désirée à -10 m	H _s obtenue à -10 m	H _s obtenue à -4 m	Observations
1	7,00	0,95	0,92	0,91	- Rocking d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure.
2	8,00	2,00	2,12	1,94	- Glissement de 4 enrochements 2-4t de la berme vers la contrebutée intérieure. - Déferlement sur l'ouvrage. - Rocking d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure.
3	9,00	3,80	3,82	2,27	- Rocking de deux enrochements 1-3t (contrebutée extérieure) et de deux autres 2-4t de la berme.
4	12,00	4,50	4,74	2,36	- Rocking d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure. - Rocking de deux enrochements 2-4t de la berme.
5	13,00	4,80	4,78	2,32	- Idem.
6	13,00	4,80 Endurance (Niv. +0.5m NGA)	5,30	2,68	- Franchissements importants. - Déferlement de la houle sur l'ouvrage. - Rocking de plusieurs enrochements au niveau de la berme et de la contrebutée extérieure. - Glissement d'un cinquième enrochement de 2-4t de la berme vers la contrebutée intérieure.

Tableau VI.12 : Résultats des essais de la variante 2 – Canal niveau -0.5m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1	8,00	2,00	2,08	1,86	- Rocking d'un enrochement 2-4t de la berme.
2	12,00	4,50	4,39	5,14	- Déferlement de la houle sur l'ouvrage. - Rocking d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure. - Rocking d'enrochement 2-4t de la berme.
3	13,00	4,80	4,43	2,07	- Idem.
4	13,00	4,80 Endurance	4,45	2,06	- Franchissements importants. - Déferlement de la houle sur l'ouvrage. - Rocking de plusieurs enrochements au niveau de la berme et de la contrebutée extérieure. - Projection d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure vers la berme. - Glissement d'un enrochement 1-3t de la deuxième couche de la berme vers la contrebutée intérieure.

VI.6.1.7.4.1. Conclusion : Etat un peu plus stable

Le profil de la variante 2 a montré une amélioration par rapport aux profils précédents, mais sa stabilité reste insatisfaisante par rapport aux critères prédéfinis.

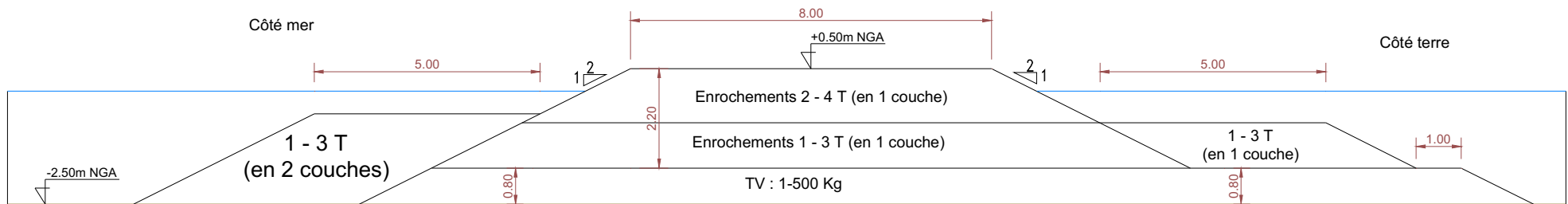


Figure VI.10 : Profil type de la variante 2 de protection de Palm Beach (canal à houle).

VI.6.1.7.5. La variante 2Bis

Cette variante (*figure VI.11*) se caractérise par le changement de la catégorie des enrochements de la berme (couche supérieure) de 2-4t à 3-6t uniquement sur les deux rangées du côté intérieur.

Tableau VI.13 : Résultats des essais de la variante 2Bis – Canal niveaux ± 0.00 , $+0.5m$ et $+1m$ NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1	12,00	4,50	4,75	2,37	- Dé rangement d'un enrochement 1-3t de la contrebutée extérieure. - Rocking d'enrochements 2-4t de la berme.
2	13,00	4,80	4,88	2,35	- Idem.
3	13,00	4,80 Endurance (Niv. +0.5m NGA)	5,04	2,63	- Déferlement de la houle sur la berme de l'ouvrage. - Léger déplacement au niveau de la contrebutée extérieure. - Glissement d'un enrochement de (3-6t) sur la contrebutée intérieure.
4	13,00	4,80 Endurance (Niv. +1m NGA)	5,33	2,98	- Déplacement de quelques enrochements (1-3t) de la contre butée extérieure. - Déplacement d'un enrochement (2-4t) de la berme vers la contre butée intérieure. - Déplacement d'un seul enrochement (3-6t) de la berme sur la contre butée intérieure, durant la deuxième moitié du test et s'est stabilisé par la suite.

Tableau VI.14 : Résultats des essais de la variante 2Bis – Canal niveau $-0.5m$ NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -10 m	Hs _{obtenue} à -10 m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1	12,00	4,50	4,46	2,21	- Déferlement de la houle sur la contrebutée extérieure. - Rocking d'enrochement (2-4t) de la berme.
2	13,00	4,80	4,32	2,20	- Glissement d'un deuxième enrochement (3-6t) de la berme vers la contrebutée intérieure.
3	13,00	4,80 Endurance	4,52	2,10	- Déferlement de la houle avant et sur l'ouvrage. - Quelques dérangements et Rocking d'enrochements qui se stabilisent à la fin de l'essai.

VI.6.1.7.5.1. Conclusion : Profil stable

Le profil de la variante 2bis répond d'une manière assez satisfaisante aux objectifs de l'étude.

Les essais de stabilité en 3D nous indiqueront davantage sur le degré de stabilité des brise-lames notamment dans leurs parties singulières (musoirs).

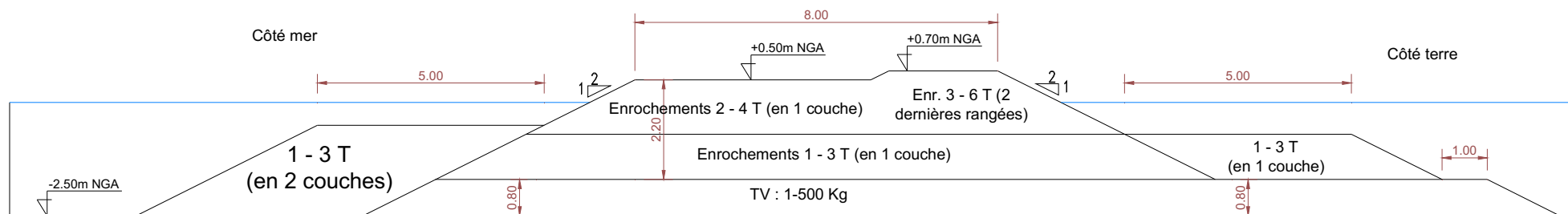


Figure VI.11 : Profil type de la variante 2 Bis de protection de Palm Beach (canal à houle).

VI.6.1.7.6. Reportage photographique des essais

Suivi de la variante initiale :



Photo n° 1 : Profil initial avant essais.



Photo n° 2 : Vue du côté intérieur du brise-lames.



Photo n° 3 : Vue du côté extérieur du brise-lames.



Photo n° 4 : Déferlement de la houle sur la berme supérieure de l'ouvrage.



Photo n° 5 : Point d'impact de la houle sur l'ouvrage pendant l'essai d'endurance niveau +0.5m NGA.



Photo n° 6 : Profil après essai d'endurance.



Photo n° 7 : Etat de la contrebutée intérieure après essais.



Photo n° 8 : Etat de la contrebutée extérieure après essais.



Photo n° 9 : Point d'impact de la houle sur l'ouvrage pendant l'essai les essais avec niveau -0.5m NGA.



Photo n° 10 : Pas d'évolution de l'état de stabilité de la contre butée intérieure après les essais avec niveau d'eau à -0.5m.



Photo n° 11 : Pas d'évolution de l'état de stabilité de la contre butée extérieure après les essais avec niveau d'eau à -0.5m.

Suivi de la variante initiale bis :



Photo n° 12 : Profil de la variante initiale bis avant essais.



Photo n° 13 : Vue du côté intérieur du brise-lames.



Photo n° 14 : Vue du côté extérieur du brise-lames.

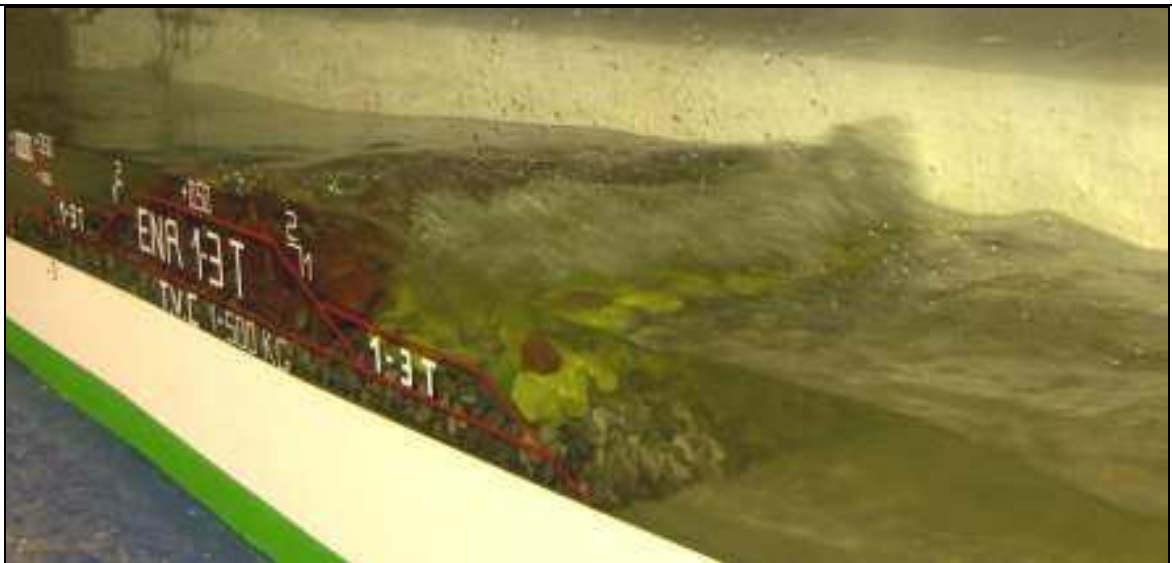


Photo n° 15 : Mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage.



Photo n° 16 : Etat de l'ouvrage après essais.



Photo n° 17 : Etat de la contrebutée intérieure après essais.



Photo n° 18 : Etat de la contrebutée extérieure après essais.

Suivi de la variante 1 :



Photo n° 19 : Profil de la variante initiale bis avant essais.



Photo n° 20 : Vue du côté intérieur du brise-lames.



Photo n° 21 : Vue du côté extérieur du brise-lames.

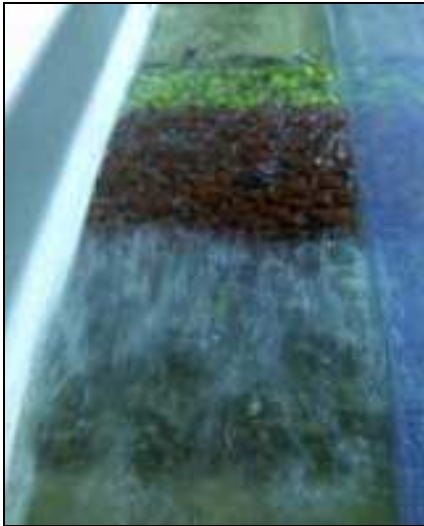


Photo n° 22 : Mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage.

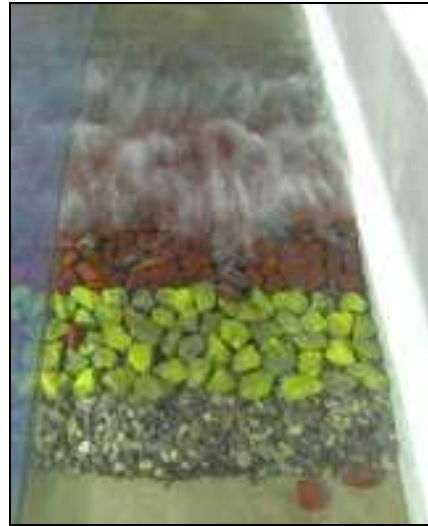


Photo n° 23 : Projection d'énrochements (1-3t) de la berme vers le côté intérieur.

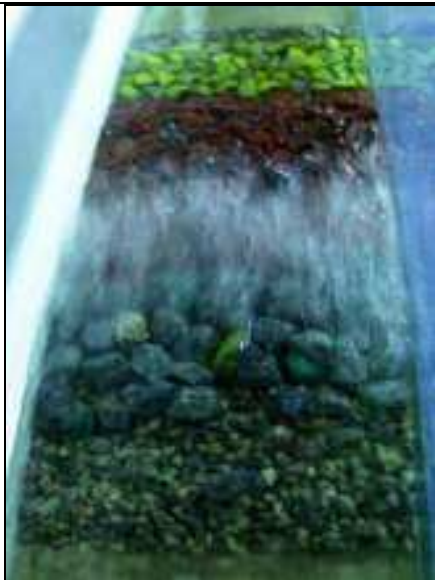


Photo n° 24 : Déplacement d'un énrochement (2-5t) de la contre butée extérieure dès la houle $H_s=2m$.



Photo n° 25 : Déferlement de la houle sur l'ouvrage pendant l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA).



Photo n° 26 : Vue du côté intérieur du brise-lames après l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA).



Photo n° 27 : Vue du côté extérieur du brise-lames après l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA).

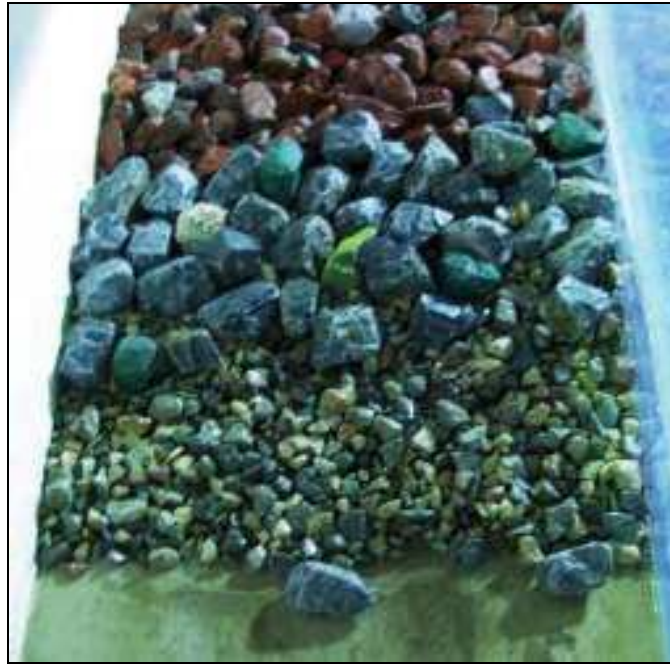

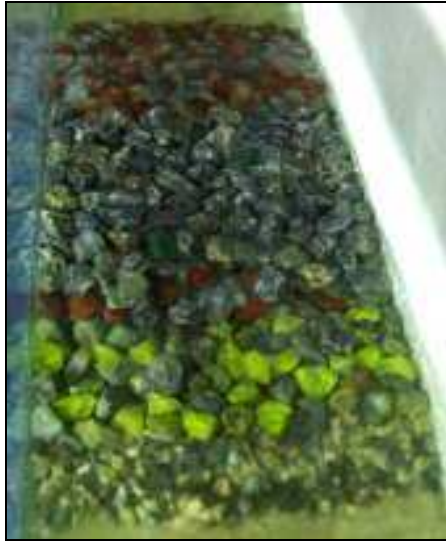




Photo n° 28 : Vue de l'ouvrage du côté extérieur après les essais avec un niveau -0.5m NGA
Pas d'évolution des dégâts.





Photo n° 29 : Vue de l'ouvrage du côté intérieur après les essais avec un niveau -0.5m NGA
Pas d'évolution des dégâts.







Suivi de la variante 2 :

	<p>Photo n° 30 : Déferlement de la houle sur la partie intérieure de la berme pendant l'essai d'endurance.</p>	
	<p>Photo n° 31 : Déplacement des enrochements des deux dernières rangées de la berme supérieure.</p>	

	<p>Photo n° 32 : Etat du côté intérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA) Cintre butée stable – berme supérieure instable.</p>	
	<p>Photo n° 33 : Etat du côté extérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA) Contre butée stable.</p>	

	<p>Photo n° 34 : Etat du côté intérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. -0.5m NGA) - Pas d'évolution des dégâts.</p>	
	<p>Photo n° 35 : Etat du côté extérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. -0.5m NGA) - Pas d'évolution des dégâts.</p>	

Suivi de la variante 2Bis :

	<p>Photo n° 36 : Déferlement de la houle sur la partie intérieure de la berme pendant l'essai d'endurance.</p>		
		<p>Photo n° 37 : Impact de la houle sur la contre butée extérieure.</p>	
	<p>Photo n° 38 : Etat du côté intérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA) Cintre butée et berme supérieure stables.</p>	<p>Photo n° 39 : Etat du côté extérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. +0.5m NGA) Contre butée stable.</p>	
	<p>Photo n° 40 : Etat du côté intérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. -0.5m NGA) - Ouvrage stable.</p>	<p>Photo n° 41 : Etat du côté extérieur de l'ouvrage après l'essai d'endurance (niv. -0.5m NGA) - Ouvrage stable.</p>	

VI.6.1.8. Conclusion générale de l'essai bidimensionnel

Les essais sur les différentes variantes ont montré que le profil initial présente une certaine fragilité. Les modifications apportées sur ce profil ont considérablement améliorées sa stabilité. Par conséquent, on recommande le profil de la variante 2Bis, pour la réalisation de la partie courante des brise-lames. Cette variante est constituée des éléments suivants :

- Un tapis anti-affouillement en TVC (1-500kg) d'une épaisseur de 1m, arasée à -1,50m.
- Une berme en enrochements en deux couches : la première est en (1-3)t et la deuxième en (2 – 4t) avec les deux dernières rangées du côté intérieur en (3 – 6t). La berme est d'une largeur de 8m, d'une épaisseur de 2m, arasée à la cote +0,50m NGA et d'une pente de 2/1.
- Une contre butée en enrochements de (1-3t) en deux couches du côté extérieur (sans tapis anti-affouillement) et une seule couche du côté intérieur avec tapis anti-affouillement.

Les essais en bassin à houle réformeront cette décision et définiront le profil des musoirs des brise-lames.

VI.6.2. Modélisation à trois dimensions en bassin à houle : fonds fixes (FF)

La modélisation physique, dans le cadre de cette étude, est étendue à l'étude en bassin à houle de l'ensemble de la structure de protection, qui est les brise-lames, afin de pouvoir tester au mieux la stabilité à la houle et les points singuliers.

Pour des raisons d'échelles et des dimensions du bassin disponible, ne seront modélisés que trois (03) brise-lames (BL3, BL4 et BL5) sur les cinq proposés.

Ces trois brise-lames sont cependant représentatifs de l'ensemble de la protection, vu l'homogénéité des caractéristiques géométriques des brise-lames, la régularité de la morphologie des fonds sur la zone d'implantation des ouvrages et leur profondeur d'implantation similaire.

La variante initiale en bassin à houle, est la variante 2 Bis retenue à l'issue des essais en canal à houle. Il sera nécessaire de vérifier que l'ouvrage répond bien aux critères de stabilité retenus pour le projet et l'on poursuivra les essais en augmentant les conditions de houle afin d'estimer quelles sont les réserves de stabilité offertes par l'ouvrage.

VI.6.2.1. Cadre des essais

Les essais se sont déroulés dans le bassin à houle du centre d'essais sur modèle du laboratoire d'études maritimes (*figure VI.12*). Les dimensions principales sont :

- Longueur : 26,0 m.
- Largeur : 17,0 m.
- Profondeur : 1,00 m.

Le bassin possède le même équipage du générateur de houle que celui du canal, le signal est aléatoire suivant une durée de tempête préalablement fixée.

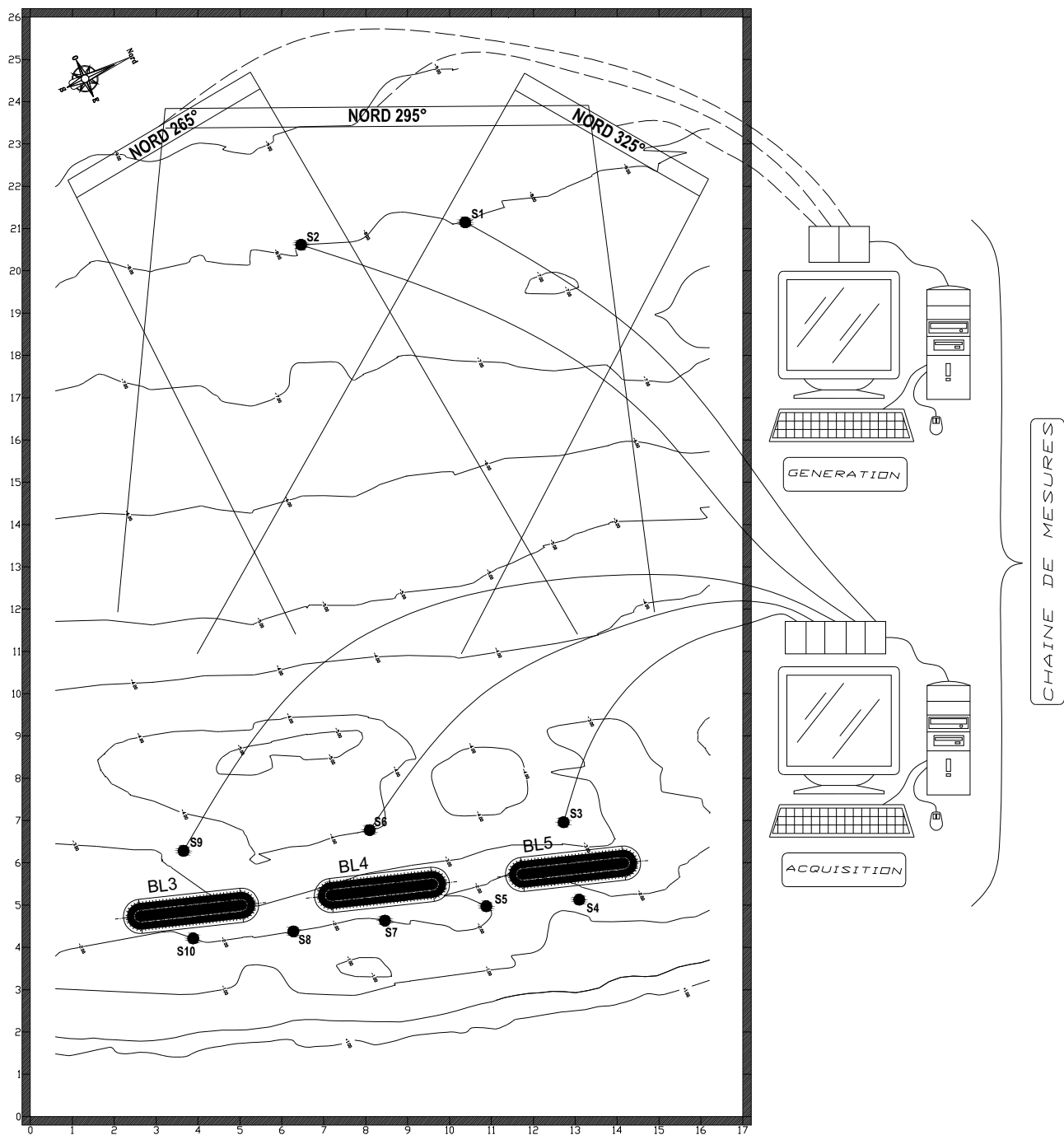


Figure VI.12 : Schéma du bassin à houle (modèle, génération, acquisition) réalisé pour la protection de Palm Beach.

VI.6.2.2. Hypothèses d'essais

On applique pour l'étude en bassin, exactement, les mêmes lois de similitude et distorsions que celles appliquées dans l'étude de modélisation à deux dimensions.

VI.6.2.3. Construction du modèle

VI.6.2.3.1. Choix de l'échelle

Compte tenu des dimensions du bassin, ceux des ouvrages (les brise-lames BL3, BL4 et BL5) et leur disposition, ainsi que des conditions hydrographiques, l'échelle du modèle retenue est $1/\lambda=1/34$ (c'est-à-dire 1m en nature = 34m en modèle).

VI.6.2.3.2. Construction des fonds

La bathymétrie a été reproduite conformément aux levés effectués par le LEM en octobre 2009. Les fonds sont construits, jusqu'à des profondeurs de -10m

La construction du modèle est faite suivant les phases suivantes :

- Carroyage du bassin pour le repérage tous les mètres.
- Dessin sur la dalle du bassin, des contours du site et des isobathes à l'échelle 1/34.
- Calage et matérialisation des niveaux des contours du site et isobathes grâce à un niveau topographique et à des fers plats façonnés suivant le dessin reporté sur la dalle.
- Le remplissage du fond du modèle avec un sable.
- Lissage de finition avec une chape en mortier de ciment de 5cm d'épaisseur arasée au niveau des fers plats représentant les isobathes.

Le déroulement des travaux de construction est donné dans le reportage photographique suivant.



Figure VI.13 : Travaux de construction des fonds bathymétriques dans le bassin à houle, laboratoire du LEM.

Le plan de masse du modèle est donné en *Annexes-Plans* (plan de masse n°2).

VI.6.2.3.3. Choix des matériaux de l'ouvrage

Les mêmes procédures du choix des enrochements du canal à houle sont suivies dans le bassin, sauf que l'échelle change. Les matériaux de construction utilisés sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau VI.15 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la protection de Palm Beach.

Types de matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle E=1/34	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Catégories des enrochements	1 – 500kg	2,60	0,02 – 11,0	2,60
	1 – 3	2,60	22,10 – 66,40	2,60
	2 – 4	2,60	44,30 – 88,50	2,60
	3 – 6	2,60	66,40 – 128,80	2,60

Idem pour l'épaisseur, et on obtient :

Tableau VI.16 : Epaisseur des couches de matériaux utilisés pour la protection de Palm Beach.

Matériaux	Epaisseur de la couche
Enr. 1 – 3t	2,10 m (2 couches)
Enr. 2 – 4t	2,40 m (2 couches)
Enr. 3 – 6t	1,40 m (1 couche)

VI.6.2.3.4. Construction de la section des brise-lames

La maquette des brise-lames est construite dans le bassin vide par simple mise manuelle des différents éléments suivant le tracé de l'ouvrage (suivant le profil de la variante 2Bis retenue en canal, *figure VI.11*) qui est préalablement reproduit comme suit :

- Le tracé des limites et axes des profils de la protection sur le fond.
- Positionnement de la limite des profils perpendiculairement à l'axe de l'ouvrage.
- La pose des gabarits en bois découpés suivant les profils proposés et positionnés sur l'axe de l'ouvrage.
- La pose manuelle des différentes couches de matériaux.

Pour minimiser la création des houles parasites dues à la réflexion, les limites du bassin à houles sont couvertes d'un filtre absorbant en enrochements.

Les travaux de pose sont donnés dans le reportage photographique ci-dessous.





Figure VI.15 : Pose des maquettes des brise-lames sur le fonds reproduits en bassin et remplissage en eau, laboratoire du LEM.

VI.6.2.4. Calibration (réglage hydraulique du modèle)

Une calibration du modèle est effectuée comme en canal à houle. Ce réglage a pour but d'une part de procéder à la mise au point et à l'étalonnage de l'appareillage (surtout les sondes d'enregistrement S1 à S10, *figure VI.17*).

VI.6.2.5. Conditions des essais

VI.6.2.5.1. Conditions hydrographiques

Les conditions hydrographiques considérées lors de cette étude sont :

- Niveaux d'eau et surcotes :
 - ± 0,00 NGA pour les essais de la série progressive.
 - +1.00m NGA pour l'essai d'endurance.
 - 0,50m NGA pour les essais de la série progressive et de l'endurance, prenant en considération les phénomènes de marée basse.
- Hauteurs significatives aux ouvrages : entre 1,80m et 2,50m (issues de l'étude de réfraction de la houle vers la côte).

VI.6.2.5.2. Les houles

Les conditions de houles retenues sont issues de l'étude des houles au large (*tableau VI.3*). Trois directions, qui touchent le littoral d'étude, ont été retenues dans l'essai tridimensionnel :

- Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale, soit la N 295°.
- Deux directions de part et d'autre de cette perpendiculaire à la côte, soit la N 265° et la N° 325.

L'étude de propagation de ces houles vers la côte, effectuée sur le modèle numérique SWAN, a donné les résultats suivants par fonds de -8 à -10m :

Tableau VI.17 : Statistiques de la houle à la côte de Palm Beach (-10 m).

Houles	Nord 265°	Nord 295°	Nord 325°
Annuelle (1 an)	3,50 m	3,80 m	3,70 m
Quinquennale (5 ans)	4,20 m	4,20 m	4,30 m
Décennale (10 ans)	4,50 m	4,50 m	4,50 m
Cinquantennale (50 ans)	4,80 m	4,80 m	4,80 m

VI.6.2.5.3. Conduite des essais

Comme en canal, chaque essai est exécuté avec une houle augmentée par palier progressif, un palier de houle est caractérisé par un couple hauteur significative (Hs) et une période de pointe (Tp). Ainsi, les périodes de pointe associées à chaque hauteur de houle pour chaque direction sont données ci-dessous :

Tableau VI.18 : Hauteurs significatives Hs/ Périodes de pointe à la côte de Palm Beach (-8 à -10 m).

Houles	Nord 265°		Nord 295°		Nord 325°	
	Hs (m)	Tp(s)	Hs (s)	Tp(s)	Hs (m)	Tp (s)
Tassement (Hs < 1m)	0,85	7	0,95	7	0,90	7
Annuelle (1 an)	3,50	9	3,80	9	3,70	9
Quinquennale (5 ans)	4,20	11	4,20	11	4,30	11
Décennale (10 ans)	4,50	12	4,50	12	4,50	12
Cinquantennale (50 ans)	4,80	13	4,80	13	4,80	13

Avant d'appliquer les houles exceptionnelles, l'ouvrage est soumis à des houles dites de tassement, qui ont pour but de réaliser l'imbrication naturelle des blocs de la carapace.

La durée de chaque test varie en fonction du cycle time défini par le logiciel de génération, entre 13mn et 19mn en modèle ce qui correspond à un intervalle de 1h16mn à 1h50mn de tempêtes en nature. La durée de la série d'endurance est de 2h25mn en modèle correspondant à une tempête de 14h environ en nature (par application de l'échelle des temps de la similitude de Froude).

VI.6.2.5.4. Génération de la houle

La houle appliquée sur la maquette est générée par un batteur fonctionnant dans un plan horizontal, constitué de deux éléments « fixes » de 5,5 m de longueur unitaire. Il est attaché à celui-ci des barres verticales métallique pour maintenir la direction. Le principe de génération est exactement le même que celui appliqué en canal à houle.



Figure VI.16 : Chambre de pilotage lié au bassin et dispositif électronique de génération des houles, laboratoire du LEM.

VI.6.2.5.5. Mesure de la houle

La houle générée dans le modèle est enregistrée par dix capteurs de houle (sondes) basés sur le principe de conductance électrique entre deux électrodes, ces sondes sont placés sur l'ensemble du bassin, à -8m, en avant, en arrière et entre les brise-lames.

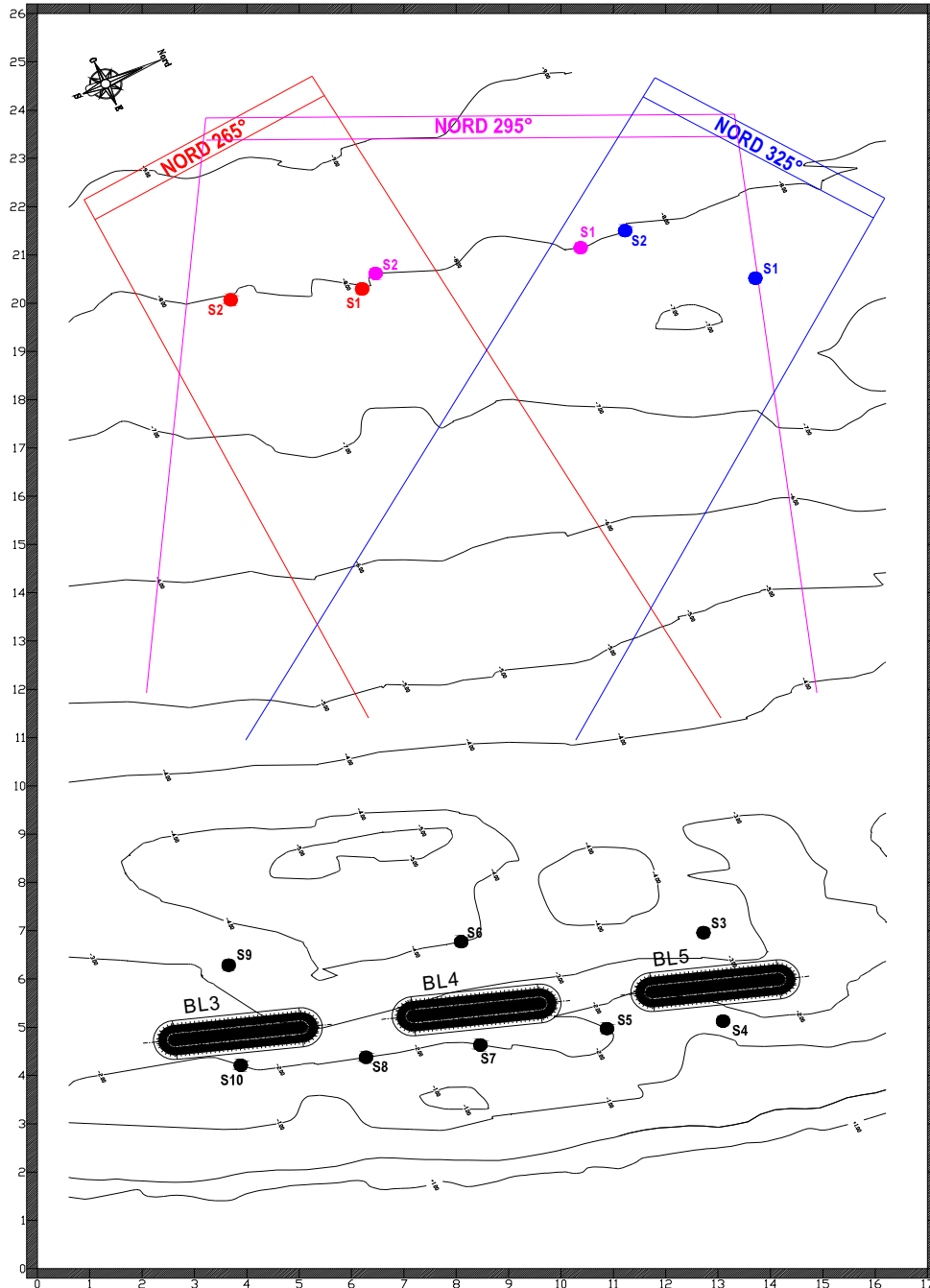


Figure VI.17 : Plan de positionnement des sondes dans le bassin à houle.

Les signaux sont enregistrés en continu et analysés par une chaîne de mesure informatisée qui transmet, à l'imprimante (*figure VI.16*), les répartitions statistiques de tous les signaux enregistrés. Le mode d'affichage et l'interprétation est le même que celui en canal.

VI.6.2.6. Observations effectuées et moyens mis en œuvre

VI.6.2.6.1. Observations hydrauliques et observation des dégâts

Lors de chaque essai, le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage est étudié avec attention. Ainsi, pour chaque configuration, on note les franchissements (nature, localisation, importance) et les déferlements. Ces observations sont ensuite corrélées avec celles des dégâts, consistant principalement en l'examen des zones sensibles de l'ouvrage, notamment les bermes supérieures et les contrebutées intérieure et extérieure (stabilité des enrochements : rocking, chute, projection, glissement...) pendant l'essai, à la fin et après vidange, et en l'estimation des dégâts.

VI.6.2.6.2. Critères de stabilité

Comme pour le canal, le dommage relatif est égal au rapport entre le nombre des blocs/enrochements déplacés et le nombre de blocs/enrochements posés. Les dégâts admissibles, pour la houle cinquantennale, sont fixés à (**LEM, 1998**) :

- Partie courante de l'ouvrage : de 3 à 5%.
- Musoir : de 0 à 4%.

VI.6.2.6.3. Moyens mis en œuvre pour les observations

Toutes les observations sont notées au fur et à mesure des essais. Les mêmes moyens employés en canal, pour visualiser le mode d'attaque de la houle sur les ouvrages, sont employés dans l'essai tridimensionnel (appareil-photo et caméra-vidéo).

VI.6.2.7. Description des variantes et résultats des essais

VI.6.2.7.1. La variante initiale

Le premier essai s'applique sur la variante retenue en canal à houle (**figure VI.11**), qui devient la variante initiale en bassin. Les hauteurs H_s indiquées dans tous les tableaux qui suivent sont exprimées en mètres. Les résultats obtenus sur toutes les sondes sont données en **Annexe V**.

**Tableau VI.19 : Résultats des essais de la variante initiale- Direction N295°.
Bassin FF - niveaux $\pm 0.00, +1.0m$ NGA.**

N° Test	Tp (s)	$H_{s\text{désirée}}$ à -8 m	$H_{s\text{obtenue}}$ à -8m	$H_{s\text{obtenue}}$ à -4m	Observations
1 (tassement)	7,00	0,95	1,00	S3 = 0,99 S6 = 2,30 S9 = 0,65	- R.A.S
2 (tassement)	8,00	2,00	2,00	S3 = 1,69 S6 = 2,94 S9 = 1,94	- Légers franchissements. - Déferlement de la houle sur les ouvrages. - Chute de 3 enrochements 3-6t sur la contrebutée intérieure du BL3. Ceci peut être lié à un problème de pose. - Quelques dérangements d'enr. 1-3t du musoir droit de BL4. - Plusieurs dérangements au niveau des bermes des BL.
3 (1 an)	9,00	3,80	3,75	S3 = 1,66 S6 = 3,39 S9 = 2,10	- Déferlement de la houle sur les ouvrages. - Départ de 3 à 4 enr. 1-3t de tous les musoirs du à la diffraction de la houle. - Quelques dérangements notés au niveau de la contrebutée extérieure du BL3. - Projection de 4 autres enrochements 3-6t du BL3 et un glissement. - Glissement d'un enrochement 3-6t sur la contrebutée intérieure du BL5.
4 (5 ans)	11,00	4,20	3,89	S3 = 1,68 S6 = 2,14 S9 = 2,23	- Chute de 3 enrochements 2-4t de la berme sur le musoir gauche du BL3. - Glissement et dérangement de plusieurs enrochements 1-3t du musoir gauche du BL3 et du BL4. - Glissement de deux enrochement 3-6t sur la contrebutée intérieure du BL4. - Glissement d'un enrochement 3-6t sur la contrebutée intérieure du BL5. - Plusieurs dérangements d'enr. 2-4t des bermes des ouvrages.
5 (10 ans)	12,00	4,50	3,86	S3 = 1,75 S6 = 2,11 S9 = 2,11	- Déferlement de la houle sur les ouvrages. 2 nouveaux glissements d'enrochement 3-6t sur la contrebutée intérieure du BL3.
6 (50 ans)	13,00	4,80	3,82	S3 = 1,75 S6 = 2,06 S9 = 2,13	- IDEM.

Tableau VI.20 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N 295°.
Bassin FF - niveau -0.5m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1 (1 an)	9,00	3,80	3,52	S3 = 1,40 S6 = 1,70 S9 = 1,67	- Déferlements de la houle avant et sur les ouvrages.
2 (5 ans)	11,00	4,20	3,54	S3 = 1,39 S6 = 1,67 S9 = 1,74	- Quelques Nouveaux glissements d' enr. 1-3t de la contrebutée intérieur vers le TVC du BL3.
3 (10 ans)	12,00	4,50	3,42	S3 = 1,53 S6 = 1,82 S9 = 1,76	- Plusieurs glissements d' enr 1-3t du musoir droit du BL4.
4 (50 ans)	13,00	4,80	3,36	S3 = 1,51 S6 = 1,91 S9 = 1,66	- Glissement de quelques enr 3-6t et 2-4t de la berme vers l'intérieur du BL3.
5 (50 ans) Endurance	13,00	4,80	3,35	S3 = 1,52 S6 = 1,91 S9 = 1,70	- Quelques glissements d' enr déjà instables ont été relevés : BL3 : quelques glissements d' enr 3-6t et 2-4t de la berme vers l'intérieur. Quelques chutes du musoir droit. BL4 : 2 enr 3-6t de la berme vers l'intérieur et deux autres 2-4t du musoir gauche. 5 enr 1-3t de la contrebutée extérieure vers le large. BL5 : quelques Enr 1-3t du musoir gauche. 2 enr 1-3t de la contre butée intérieure sur le TVC.
Les séries d'essais ont été poursuivies pour les autres directions (Nord 325° et Nord 265°) afin de voir les dégâts cumulés sur les ouvrages et d'estimer l'importance de l'impact de ces directions sur la stabilité des brise-lames.					

Tableau VI.21 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N325°.
Bassin FF - niveaux ± 0.00 et +1.0m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1 (1 an)	9,00	3,80	3,32	S3 = 0,94 S6 = 1,75 S9 = 1,81	- R.A.S.
2 (5 ans)	11,00	4,20	3,41	S3 = 0,99 S6 = 1,77 S9 = 1,79	- Déferlements de la houle sur les ouvrages.
3 (10 ans)	12,00	4,50	3,41	S3 = 0,95 S6 = 1,78 S9 = 1,73	- Dérangement de quelques enrochements au niveau des bermes du BL3 et BL4 et des musoirs.
4 (50 ans)	13,00	4,80	3,30	S3 = 0,93 S6 = 1,82 S9 = 1,83	- Dérangement de quelques enrochements au niveau des musoirs.
5 (50 ans) Endurance Niveau +1.00	13,00	4,80	4,43	S3 = 1,05 S6 = 1,97 S9 = 2,26	- Glissement d'une dizaine d' enr. 2-4t et 3-6t de la berme du BL3 et du BL4. - Glissement d'autres enr. 1-3t de la contrebutée intérieure sur le TVC du BL3 et du BL4. - Glissement d'autres enrochements 1-3t de la contre butée extérieure du BL3 vers le large.

Tableau VI.22 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N 325° Niveau -0.5m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1 (1 an)	9,00	3,80	3,00	S3 = 0,76 S6 = 1,47 S9 = 1,56	- Dérangement de quelques enrochements 1-3t déjà instables de la contrebutée intérieure du BL3.
2 (10 ans)	12,00	4,50	3,16	S3 = 0,82 S6 = 1,61 S9 = 1,52	- IDEM.
3 (50 ans)	13,00	4,80	3,03	S3 = 0,82 S6 = 1,62 S9 = 1,50	- IDEM.
5 (50 ans) Endurance	13,00	4,80	3,05	S3 = 0,83 S6 = 1,59 S9 = 1,50	- R.A.S.

**Tableau VI.23 : Résultats des essais de la variante initiale -Direction N265°
Bassin FF - niveaux ± 0.00, +1.0m NGA.**

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1 (1 an)	9,00	3,80	3,27	S3 = 1,97 S6 = 1,75 S9 = 0,99	- Déferlement de la houle sur l'ouvrage BL4 et BL5.
2 (5 ans)	11,00	4,20	3,33	S3 = 1,99 S6 = 1,69 S9 = 0,97	- IDEM.
3 (10 ans)	12,00	4,50	3,39	S3 = 2,05 S6 = 1,67 S9 = 0,96	- IDEM.
4 (50 ans)	13,00	4,80	3,41	S3 = 1,95 S6 = 1,63 S9 = 0,94	- IDEM.
5 (50 ans) Endurance Niveau +1.00	13,00	4,80	3,90	S3 = 2,47 S6 = 2,52 S9 = 0,89	- Déferlement de la houle sur les ouvrages BL4 et BL5. - Glissement de 10 nouveaux Enr 2-4t sur la contrebutée intérieure du BL5. - Départ de matériaux du TVC du BL5. - Etalement de la berme du côté du musoir extérieur du BL5.

**Tableau VI.24 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N265°.
Bassin FF - niveau -0.5m NGA.**

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8 m	Hs _{obtenue} à -4 m	Observations
1 (1 an)	9,00	3,80	3,02	S3 = 1,54 S6 = 1,56 S9 = 0,97	- R.A.S.
2 (5 ans)	11,00	4,20	2,96	S3 = 1,43 S6 = 1,56 S9 = 1,06	- R.A.S.
3 (10 ans)	12,00	4,50	3,15	S3 = 1,59 S6 = 1,46 S9 = 1,01	- R.A.S.
4 (50 ans)	13,00	4,80	3,12	S3 = 1,61 S6 = 1,45 S9 = 1,05	- R.A.S.
5 (50 ans) Endurance	13,00	4,80	3,12	S3 = 1,61 S6 = 1,46 S9 = 1,04	- R.A.S. Impact négligeable des houles avec ce niveau d'eau.

VI.6.2.7.1.1. Conclusion :

Les essais effectués sur la variante initiale démontrent la fragilité des bermes et des musoirs des brise-lames vis-à-vis de la houle. D'où la nécessité de procéder à :

- L'augmentation de la catégorie d'enrochements des deux rangées intérieures des bermes des BL par la sélection des enrochements de poids entre 5 et 6t.
- L'augmentation de la catégorie d'enrochements des butées de pied des musoirs de 1-3t à 2-4t.

Les houles des directions Nord 265° et 325° n'ayant pas d'impact significatif sur les ouvrages, les séries d'essais qui suivent se limiteront à la direction la plus défavorable qu'est la N295°.

De même que pour le niveau d'eau de -0,50m NGA, les houles n'ont pratiquement pas d'effets sur les ouvrages. Les prochains essais ne nécessitent pas le passage par ce niveau.

VI.6.2.7.2. La variante 1

Le profil de cette variante (*figure VI.17, VI.18*) diffère de celui de la variante précédente par :

- La sélection des enrochements dont le poids est supérieur à 5 tonnes de la catégorie 3 – 6t.
- L'augmentation du poids des enrochements de la butée de pied des musoirs de 1-3t à 2-4t.

Tableau VI.25 : Résultats des essais de la variante 1 – Direction N295°.

Bassin FF - niveaux ± 0.00 et +1.0m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1 (tassement)	8,00	2,00	1,95	S3 = 1,71 S6 = 2,24 S9 = 1,76	- Déferlement des houles au large et sur les ouvrages.
2 (1 an)	9,00	3,80	3,68	S3 = 1,77 S6 = 2,36 S9 = 1,88	- Déferlement des houles sur les ouvrages. - Glissement de 5 enr. 5-6t du BL3 vers l'intérieur. - Glissement de deux enr. 5-6t du BL4 vers l'intérieur. - Glissement d'enr. 5-6t du BL5 vers l'intérieur. - Chute d'un enr. 2-4t au niveau du musoir gauche du BL3, un autre du musoir droit du BL4 et de deux autres du musoir gauche du BL5.
3 (10 ans)	12,00	4,50	3,82	S3 = 1,80 S6 = 2,67 S9 = 2,10	- Déferlement des houles sur les ouvrages. - 3 autres glissements au niveau du musoir gauche du BL5 et deux autres dans le musoir droit. - 5 autres glissements d'enr. 5-6t de la berme du BL3 vers l'intérieur.
4 (50 ans)	13,00	4,80	3,90	S3 = 1,81 S6 = 2,62 S9 = 2,05	- Déferlement des houles sur les ouvrages. - Un 3 ^{ème} glissement d'enr. 5-6t du BL4. - Projection du 11 ^{ème} enr. 5-6t de la deuxième rangée vers la contrebutée intérieure du BL3. - Un 2 ^{ème} glissement d'enr. 5-6t du BL5. - 4 autres glissements au niveau du musoir gauche du BL5 et deux autres dans le musoir droit du BL4 et gauche du BL3, suite aux effets de la diffraction.
5 (50 ans) Endurance Niveau +1.00	13,00	4,80	4,09	-	- Glissement de 10 autres enr. 5-6t de la berme du BL3 sur la contrebutée intérieure et le TVC. - Glissement de deux enr. 2-4t de la berme du BL3 vers l'intérieur. - Trois nouveaux glissements d'enr. 2-4t au niveau du musoir extérieur du BL3. - 3 nouveaux glissements d'enr. 5-6t du BL4. - 7 glissements dans le musoir droit du BL4. - 9 glissements dans le musoir gauche du BL4. - BL5 est resté stable.

VI.6.3.7.2.1. Conclusion :

A l'issue de cette deuxième série d'essais, on constate que les dégâts sont moins importants au niveau du BL3 par rapport au profil précédent, mais ils restent significatifs. Il est nécessaire d'opter pour un autre changement.

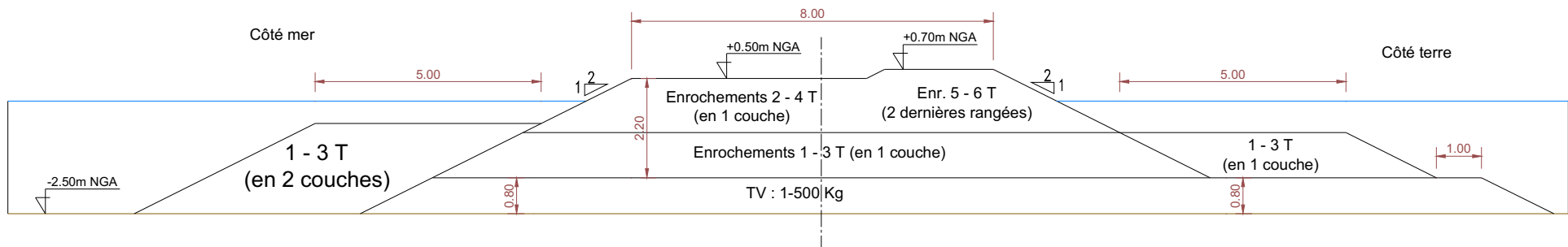


Figure VI.17 : Profil type de la partie courante de la variante 1 de protection de Palm Beach (Bassin FF).

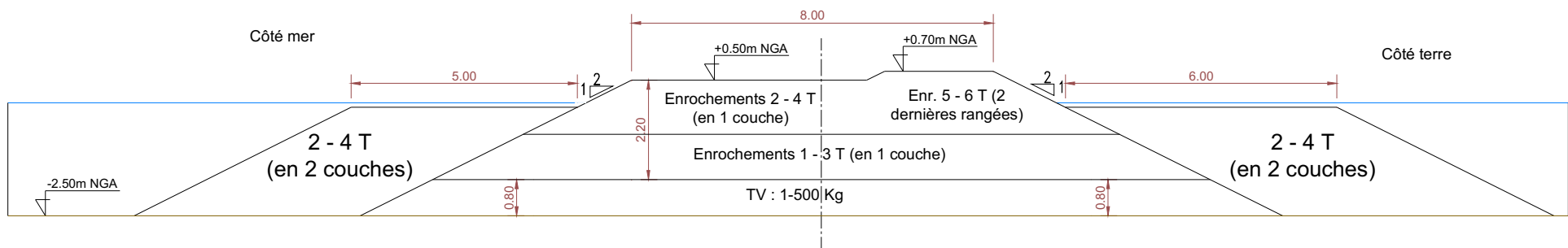


Figure VI.18 : Profil type du musoir de la variante 1 de protection de Palm Beach (Bassin FF).

VI.6.3.7.3. La variante 2

Le profil de cette variante (*figure VI.19*) diffère de celui de la précédente par la substitution du tapis arrière en TVC par une couche en enrochements 1-3t pour que cette contre butée contribue à la stabilité des enrochements 5-6t de la berme (carapace).

Tableau VI.26 : Résultats des essais de la variante 2 – Direction N295°.
Bassin FF - niveaux ± 0.00 et +1.0m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1 (tassement)	8,00	2,00	2,04	S3 = 1,81 S9 = 3,55	- R.A.S
2 (1 an)	9,00	3,80	3,33	S3 = 1,69 S6 = 2,06 S9 = 4,02	- R.A.S
3 (10 ans)	12,00	4,50	3,50	S3 = 1,72 S6 = 2,19 S9 = 4,34	- Déplacement d'un enr. 2-4t du pied du musoir gauche du BL4 et 2 enr. du pied du musoir du BL5.
4 (50 ans)	13,00	4,80	3,48	S3 = 1,69 S6 = 2,21 S9 = 4,28	- Dérangement d'un enr. 5-6t du BL3. - Déplacement d'un 2 ^{ème} enr. 2-4t du musoir gauche du BL4. - Déplacement de 2 autres enr. 2-4t du musoir gauche du BL5. - Déplacement de 2 enr. 2-4t du pied du musoir droit du BL5.
5 (50 ans) Endurance Niveau +1.00	13,00	4,80	4,80	S3 = 1,69 S6 = 2,06 S9 = 4,02	- BL3 : - Chute d'un enr. 5-6t de la partie courante. - Déplacement d'un enr. 2-4t du musoir droit. - Dérangement de 2 autres enr. 5-6t de la partie courante. - BL4 : - Chute de 3 enr. 5-6t de la berme. - Légère érosion du musoir gauche. - Déplacement de quelques enr. 1-3t de la contre butée intérieure. - BL5 : - Déplacement de 7 enr. 1-3t de la contre butée intérieure. - Chute d'un enr. 5-6t de la berme. - Déplacement de 5 enr. 2-4t du musoir gauche.

VI.6.3.7.3.1. Conclusion :

Les dégâts enregistrés au niveau des bermes ne dépassent pas les 7% pour la catégorie d'enrochements de 5-6t. Si ce pourcentage est acceptable par rapport au critère fixé au préalable, la stabilité devrait être améliorée du fait que l'entretien de ces ouvrages ne serait pratiquement pas possible vu la profondeur d'implantation réduite, d'où leur inaccessibilité.

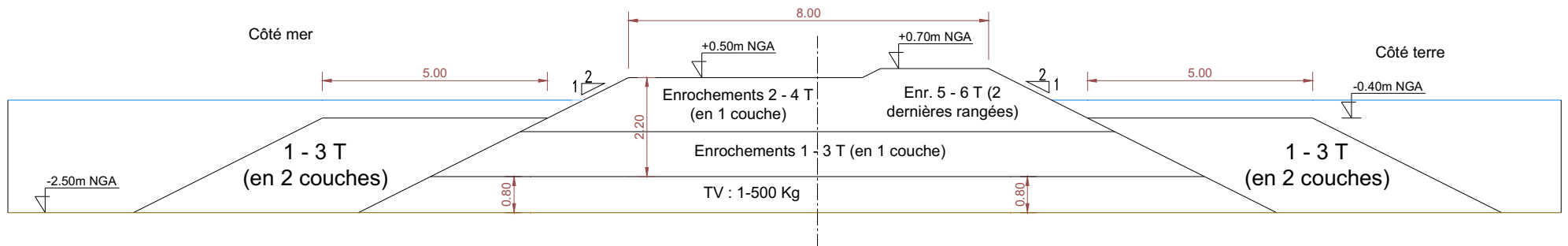


Figure VI.19 : Profil type de la variante 2 (partie courante) de protection de Palm Beach (Bassin FF).

VI.6.2.7.3. La variante 3

Cette variante consiste en :

- La diminution de 2m de la largeur de la contre butée intérieure, vu la bonne stabilité qu'a montré cette dernière tout au long des essais.
- L'augmentation de 2m de la largeur de la contre butée extérieure pour essayer de diminuer l'énergie de la houle en arrivant sur les ouvrages et d'améliorer ainsi la stabilité de la berme et conserver sa côte d'arase (*figure VI.20*).

Tableau VI.27 : Résultats des essais de la variante 3 – Direction N295°.
Bassin FF - niveaux ± 0.00 et +1.0m NGA.

N° Test	Tp (s)	Hs _{désirée} à -8 m	Hs _{obtenue} à -8m	Hs _{obtenue} à -4m	Observations
1 (tassement)	7,00	0,95	1,00	S3 = 1,04 S6 = 1,17 S9 = 0,70	- R.A.S.
2 (tassement)	8,00	2,00	2,21	S3 = 1,56 S6 = 2,09 S9 = 1,63	- R.A.S.
3 (1 an)	9,00	3,80	3,59	S3 = 1,71 S6 = 1,96 S9 = 1,91	- Déplacement d'un enr. 2-4t du pied du musoir gauche du BL4.
4 (10 ans)	12,00	4,50	3,62	S3 = 1,77 S6 = 2,14 S9 = 2,05	- BL3 : Déplacement de quelques enr. 1-3t de la contre butée intérieure. Chute d'un enr. 2-4t de la berme supérieure (carapace) vers le côté intérieur. - BL4 : Glissement d'un 2 ^{ème} enr. 2-4t du pied du musoir gauche. Chute de 2 enr. 1-3t de la contre buté intérieure. - BL5 : Glissement de 2 enr. 2-4t du pied du musoir gauche.
5 (50 ans)	13,00	4,80	4,41	S3 = 1,73 S6 = 1,98 S9 = 2,07	- BL3 : Glissement d'un 2 ^{ème} enr. 2-4t du pied du musoir gauche. Glissement de 4 enr. 1-3t de la contre buté intérieure. - BL4 : Chute de 5 autres enr. 1-3t de la contre buté intérieure. - Chute d'un enr. 1-3t de la contre buté extérieure. - BL5 : Erosion légère du pied du musoir gauche (côté intérieur). Glissement de 4 enr. 1-3t des contre butées intérieure et extérieure.

6 (50 ans) Endurance Niveau +1.00	13,00	4,80	3,95	S3 = 2,31 S6 = 2,56 S9 = 2,53	<ul style="list-style-type: none"> - BL3 : Glissement de 4 enr. 2-4t du musoir gauche. Chute de quelques enr. 1-3t de la contre buté intérieure. Léger déplacement de 2 enr. 5-6t de la berme supérieure sur la contre butée intérieure. - BL4 : Chute de 8 enr. 2-4 du musoir gauche. Chute d'une douzaine d'enr. 5-6t de la berme supérieure. Erosion localisée de la contre butée intérieure Contre buté extérieure stable. - BL5 : Stabilisation du musoir gauche. Glissement d'une dizaine d'enr. 1-3t de la contre butée intérieure.
---	-------	------	------	-------------------------------------	---

VI.6.2.7.4.1. Conclusion :

On note pour cette variante l'instabilité du BL4 du fait du départ massif d'encrochements 5-6t de la berme supérieure (carapace) dépassant les critères admissibles.

Les autres brise-lames ont montré une assez bonne stabilité vis-à-vis des houles extrêmes.

Ce constat nous mène à reprendre la **variante 2** qui a présenté une meilleure stabilité des ouvrages dans leur ensemble. La rigueur dans la pose des encrochements de la carapace et des contre butées est vivement recommandée.

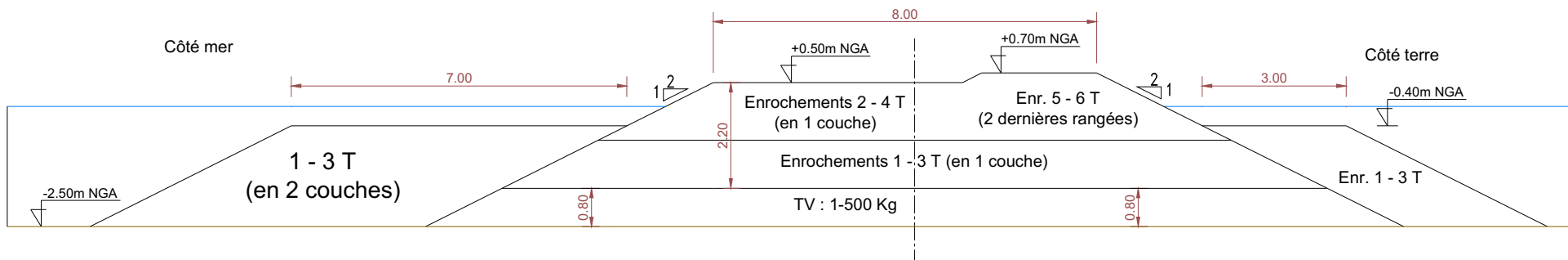


Figure VI.20 : Profil type de la variante 3 (partie courante) de protection de Palm Beach (Bassin FF).

VI.6.2.7.4. Reportage photographique des essais

Suivi de la variante initiale :

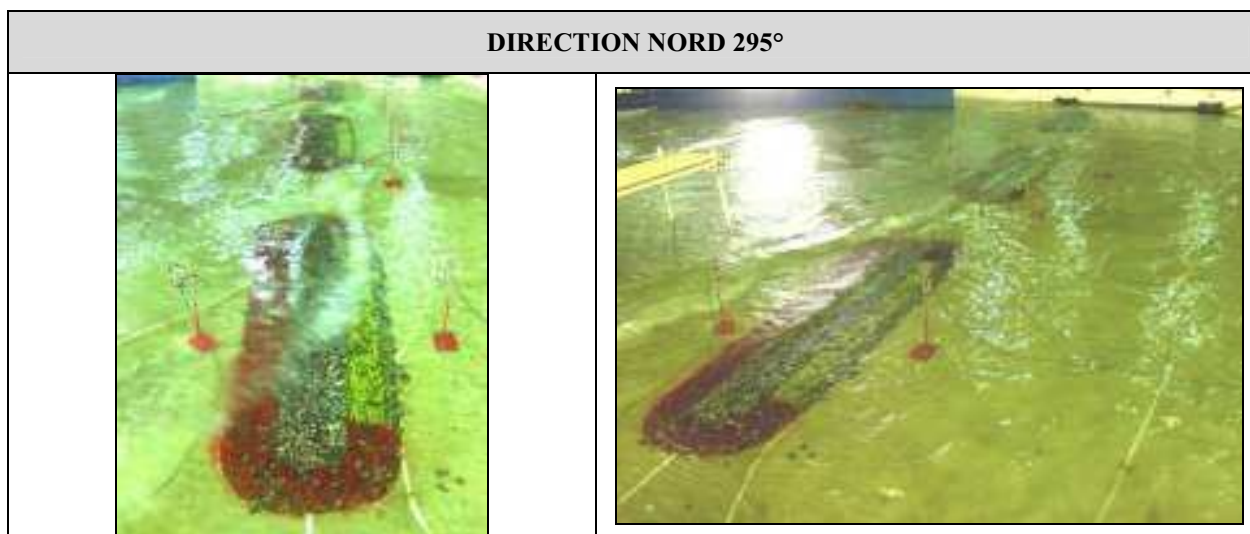
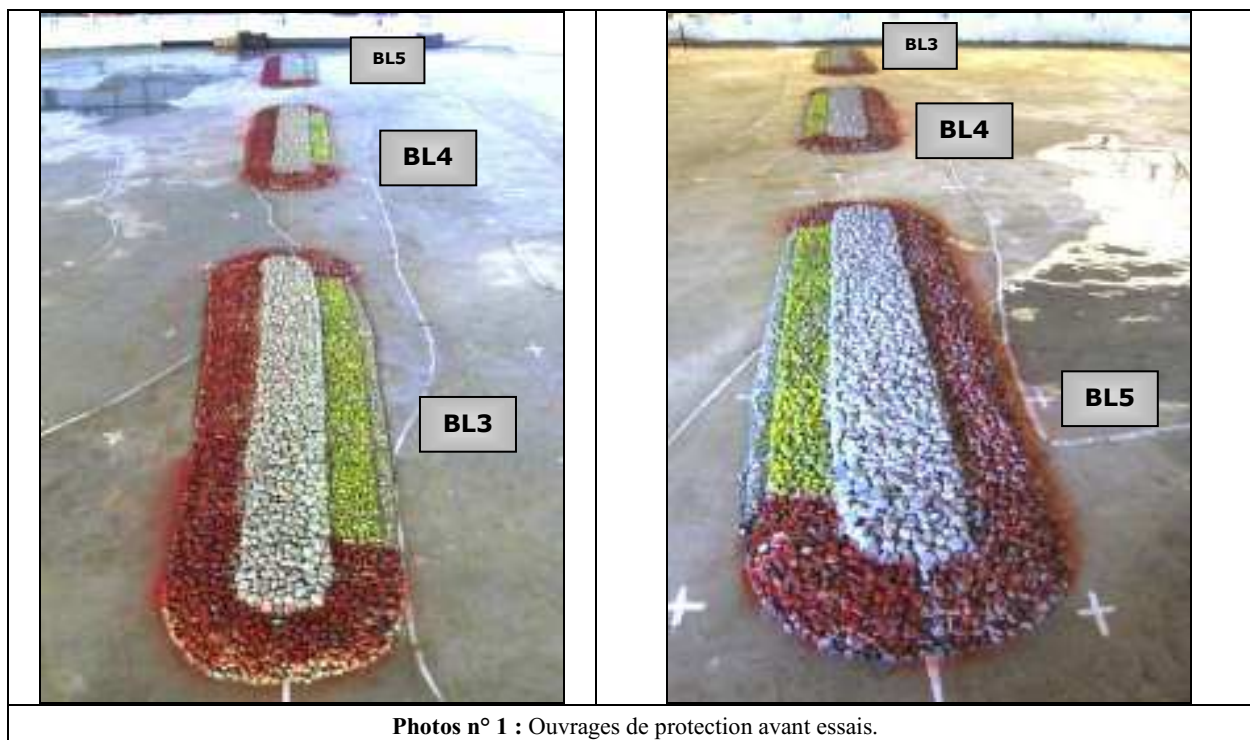
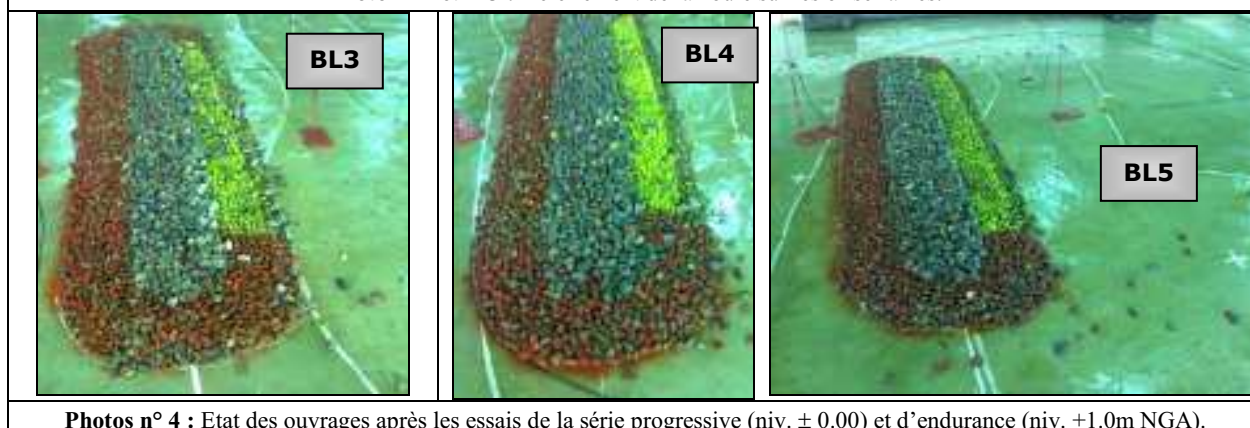


Photo n° 2 et n°3 : Déferlement de la houle sur les brise-lames.



Photos n° 4 : Etat des ouvrages après les essais de la série progressive (niv. ± 0.00) et d'endurance (niv. +1.0m NGA).



Photos n° 5 : Déferlement de la houle sur les brise-lames – niveau -0.5m NGA.



Photos n° 6 : Etat des ouvrages après les essais de la série progressive et d'endurance (niv. -0.5m NGA).

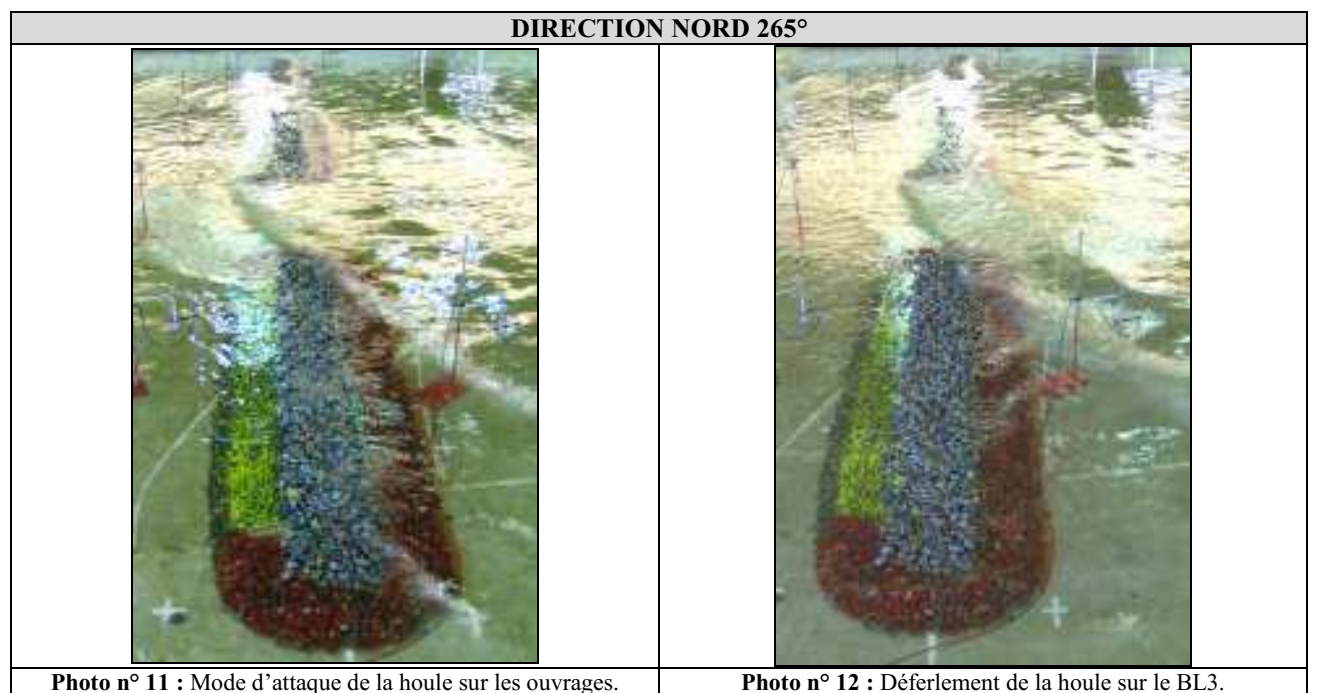
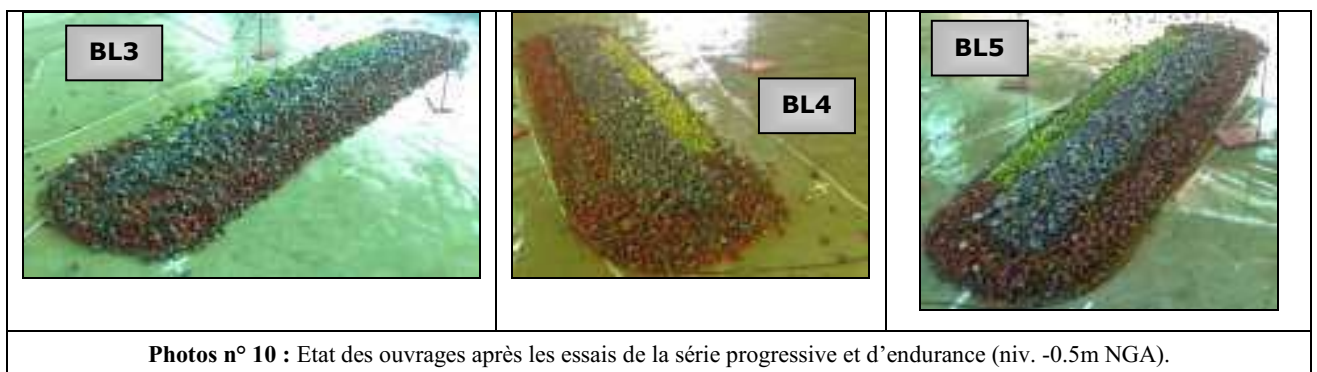
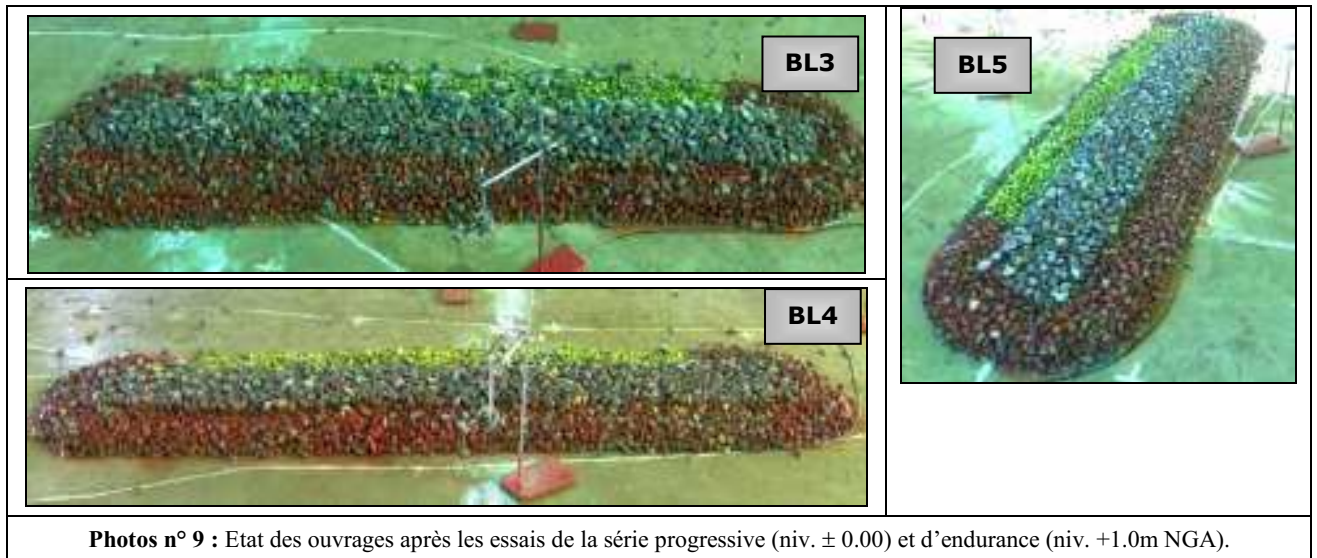
DIRECTION NORD 325°

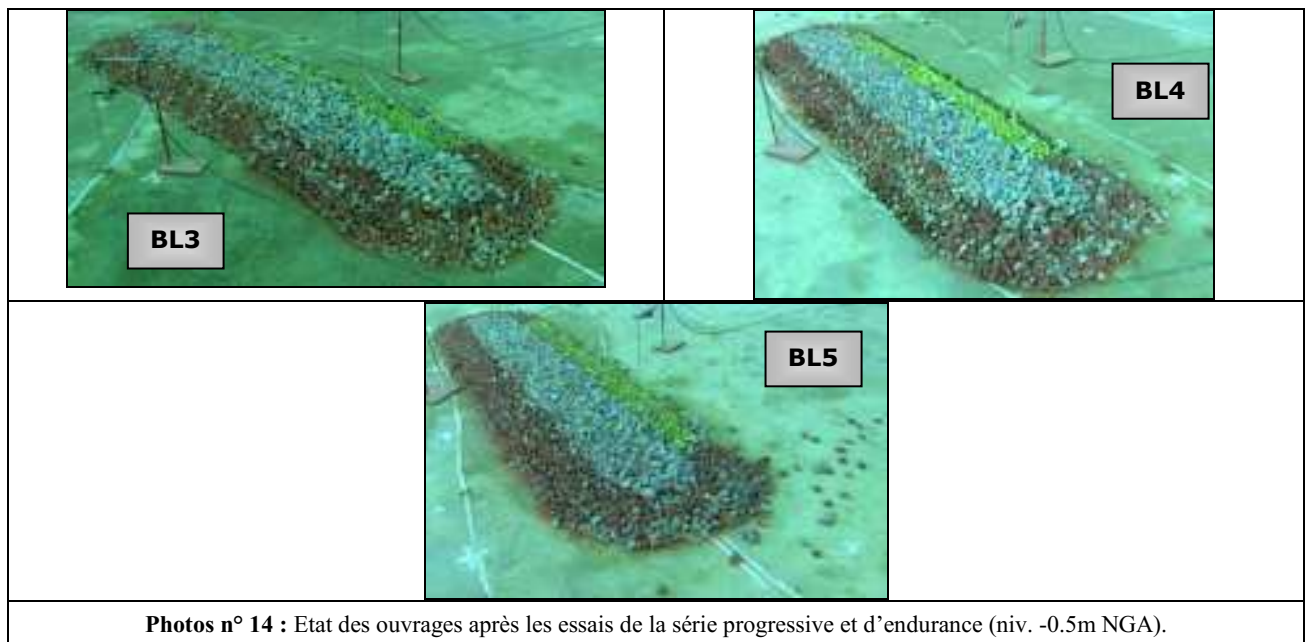
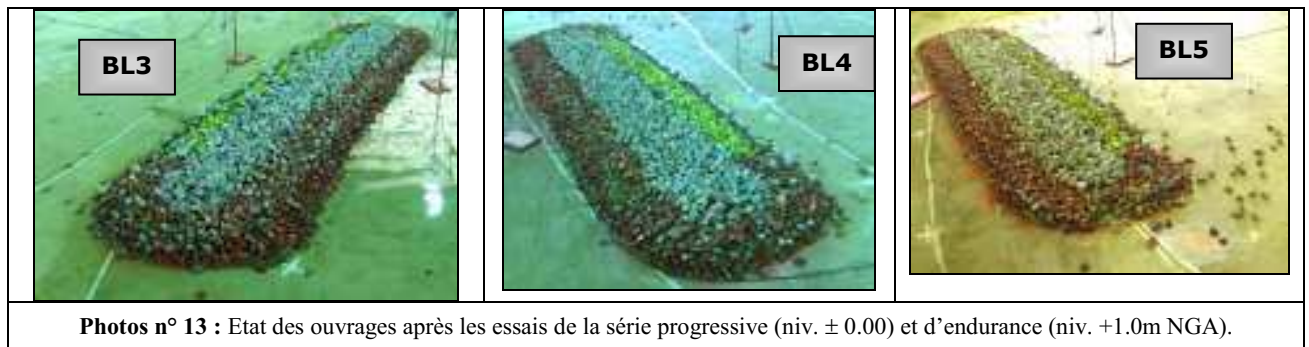


Photo n° 7 : Mode d'attaque de la houle sur les ouvrages.

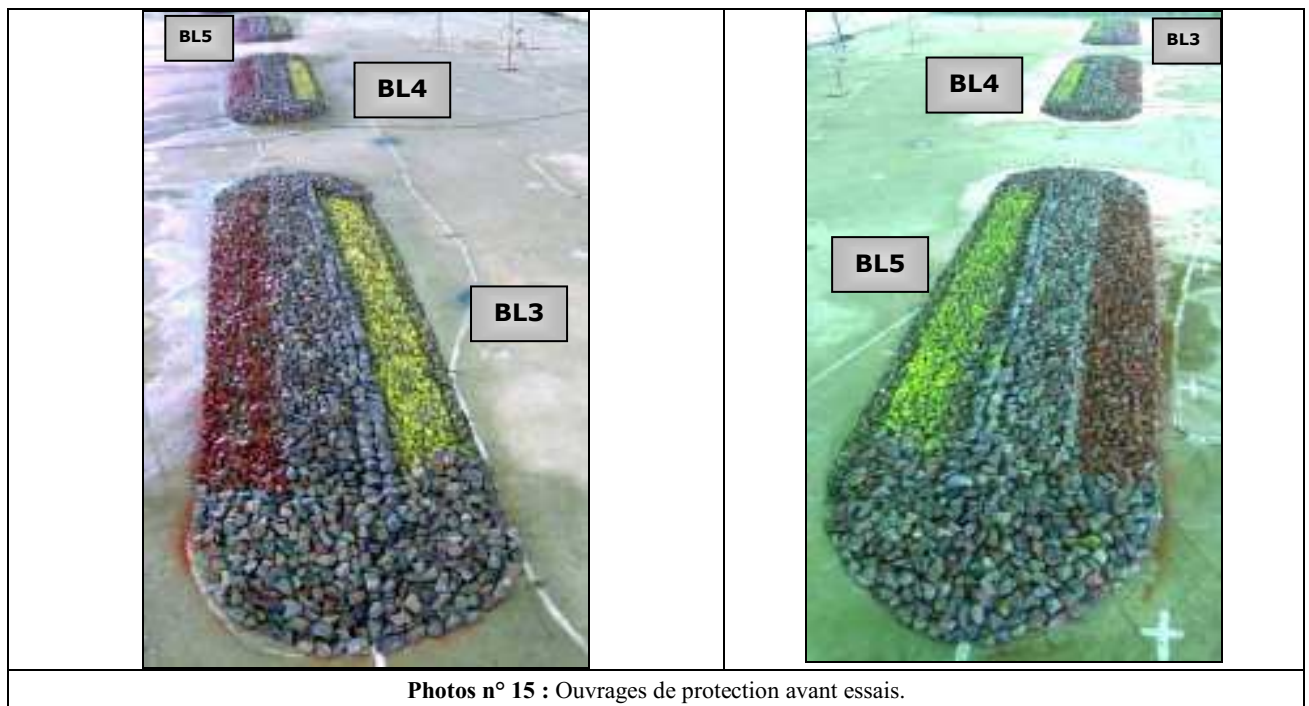


Photo n° 8 : Déferlement de la houle sur le BL3.

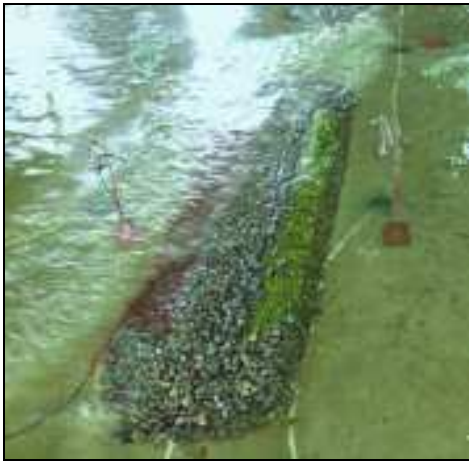




Suivi de la variante 1 :



DIRECTION NORD 295°



Photos n° 16 : Déferlement de la houle sur les brise-lames.



BL3



BL4



BL5

Photos n° 17 : Etat des ouvrages après les essais de la série progressive (niv. ± 0.00) et d'endurance (niv. $+1.0m$ NGA).

Suivi de la variante 2 :



BL3



BL4



BL5

Photos n° 18 : Ouvrages de protection avant essais.

DIRECTION NORD 295°



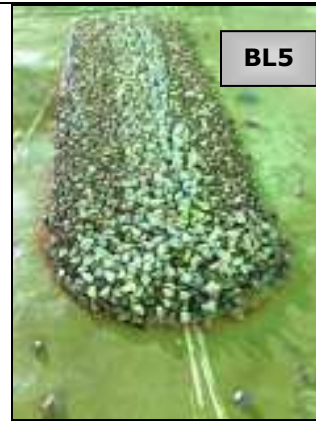
Photos n° 19 : Déferlement de la houle devant et sur les brise-lames.



BL3



BL4



BL5

Photos n° 20 : Etat des ouvrages après les essais de la série progressive (niv. ± 0.00) et d'endurance (niv. +1.0m NGA).

Suivi de la variante 3 :



BL5

BL4

BL3

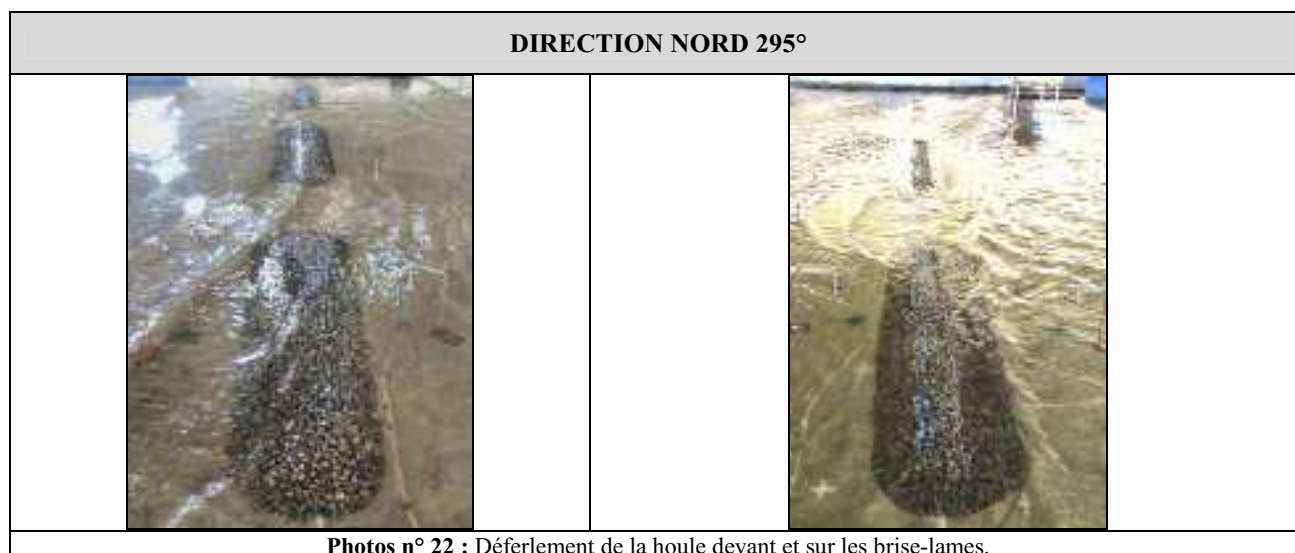


BL5

BL4

BL3

Photos n° 21 : Ouvrages de protection avant essais.



VI.6.2.8. Conclusion générale de l'essai tridimensionnel à fond fixe

Le déroulement des essais sur les différentes variantes a permis d'aboutir à une configuration des ouvrages de protection stable à la houle.

Les modifications apportées concernaient essentiellement la contre butée intérieure et les musoirs.

La variante qui a montré le meilleur état de stabilité est la variante 2, par conséquent, on recommande cette variante pour l'ensemble des brise-lames proposés pour la protection de la plage de Palm Beach-Azur.

Les brise-lames, implantés à une profondeur moyenne de -2,5m, seront constitués des éléments suivants :

- Une assise en TVC (1-500kg) d'une épaisseur de 0,8m.
- Un corps d'ouvrage disposé selon une pente de 2/1 et constitué d'enrochements disposés en deux couches, sur une épaisseur de 2,2m ; la première en (1 – 3t) et la deuxième en (2 – 4t), avec une largeur en crête de 8m, arasée à la cote +0,50m NGA. Sur les deux dernières rangées du côté intérieur, il est recommandée de mettre en œuvre des enrochements de 5 - 6 t (l'arase atteignant +0,7 m NGA).
- Les contrebutées intérieure (côté terre) et extérieure (côté mer) sont en enrochements en deux couches de (1 – 3t) sur le profil courant et de (2 - 4t) au niveau des musoirs (*figure VI.19* pour partie courante et *figure VI.18* pour musoir).

Néanmoins, il est possible d'exécuter des essais complémentaires de stabilité. Ces essais dépendront de la configuration finale des ouvrages retenue à l'issue des essais en modèle sédimentologique.

VI.6.3. Modélisation à trois dimensions en bassin à houle : fonds mobiles (FM)

L'étude est étendue à la modélisation à fonds mobiles en bassin à houle, afin de pouvoir représenter le plus fidèlement possible le comportement des fonds bathymétriques près de la côte et voir l'efficacité de la solution en brise-lames bas retenue lors des derniers essais en modèles réduits à fonds fixes ainsi que le rechargement de la plage.

VI.6.3.1. Objectifs et phénomènes modélisés

Le modèle réduit sédimentologique permettra de simuler la dynamique hydrosédimentaire du site, après la mise en place des brise-lames, en reproduisant à la fois les phénomènes hydrauliques (la houle et le courant) que les phénomènes sédimentologiques (transport et dépôt du sable). Il permettra ainsi de modéliser le rechargement artificiel prévu sur une partie de la plage.

Il faut noter que les modèles sédimentologiques physiques sont des outils très lourds, donc coûteux, qui ne fournissent de résultats valables et fiables que si les données de base (observations sur site) sont bien représentatives de la réalité et qu'elles ont été convenablement introduites dans le modèle. Pour vérifier cela, on essaye de reproduire les évolutions passées sur une période suffisante (calage du modèle).

Il n'est pas rare de constater que le modèle diverge notablement de ce que l'on observe en nature. Il faut alors vérifier que les hypothèses retenues lors de la phase de modélisation sont correctes. Très souvent, cela conduit à réaliser une nouvelle campagne de mesures sur le site (*Caude, 2003*).

VI.6.3.2. Echelle du modèle

Le choix des échelles est la résultante d'un compromis entre :

- La reproduction d'une zone d'étude suffisamment importante dans le bassin à houle pour étudier les phénomènes dans leur globalité (*in Coutos-Thévenot et al, 2010*).
- La recherche d'une bonne précision des phénomènes représentés et des mesures.
- La bonne reproduction de la dynamique hydrosédimentaire tout en ayant une hauteur d'eau suffisante pour reproduire les houles voulues.

L'examen de ces paramètres nous a conduit à réduire l'échelle des dimensions horizontales à $1/150^{\text{ième}}$ noté par $1/m = 1/150$.

Pour satisfaire la condition de Reynolds que nous développons dans ce qui suit, les hauteurs ont été moins réduites que les distances en plan, à $1/90^{\text{ième}}$ noté par $1/n = 1/90$.

VI.6.3.2. Emprise

Le modèle est réalisé en maçonnerie dans un bassin à houle de 26m x 19m x 1m. Les fonds durs (bathymétrie de fin 2009) ont été reproduits jusqu'à des profondeurs de -30m (l'objectif est d'avoir la hauteur d'eau suffisante pour générer les grandes houles).

Le principe de construction du modèle est le même que celui des essais précédents, à l'exception que pour la zone en fonds mobiles, qui s'étale du trait de côte (0,00m NGA) jusqu'à l'isobathe -8m NGA (profondeur limite d'action des houles), est nivelée en dessous des fonds réels d'une épaisseur égale à 3m en nature, soit 3,33 cm en modèle. La bathymétrie finale est obtenue après mise en place des matériaux mobiles.

On note qu'avant la mise en place du matériau, il était important de le mouiller pour le débarrasser des propriétés électriques de cohésion qu'il a acquises lors du broyage et du tamisage.

Le bassin possède le même équipage du générateur de houle que celui des essais précédents.

Le plan de masse du modèle à fond mobile est donné en *Annexes-Plans* (plan de masse n°3).

VI.6.3.3. La similitude hydrodynamique

Comme on l'a déjà expliqué, les mouvements d'un fluide réel à surface libre sont le résultat de l'action des forces de gravité et des forces de frottements dues à la viscosité :

- Les premières sont respectées sur le modèle lorsque les échelles adoptées permettent de conserver le nombre de Froude.
- La reproduction en similitude des forces de viscosité suppose l'invariance du nombre de Reynolds. La plupart des écoulements à reproduire étant turbulents, il suffit que le nombre de Reynolds sur le modèle soit supérieur à une valeur critique correspondant au passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent.

L'application de la similitude de Froude conduit aux échelles suivantes pour les différentes grandeurs hydrodynamiques.

Tableau VI.28 : Grandeurs hydrodynamiques obtenues suivant la similitude de Froude.

Grandeur	Symbole	Valeur
Longueurs, largeurs	1/m	1/150

λ_L		
Hauteurs λ_h	1/n	1/90
Distorsion Δ	m/n	1,67
Temps hydrauliques	$n^{1/2}/m$	1/15,811
Vitesses horizontales	$1/n^{1/2}$	1/9,486
Vitesses verticales	$m/n^{3/2}$	1/5,692
Amplitude	1/n	1/90
Longueur d'onde	1/n	1/90
Période	$1/n^{1/2}$	1/9,486
Célérité	$1/n^{1/2}$	1/9,486
Débits liquides	$1/m n^{3/2}$	$1/15,685 \times 10^5$
Volumes	$1/m^2 n$	$1/2,025 \times 10^6$
Surfaces horizontales	$1/m^2$	1/22.500
Surfaces verticales	1/m.n	1/13.500

VI.6.3.4. La similitude sédimentologique, choix et mise en place du matériau mobile

La similitude sédimentologique repose sur des formules empiriques (critère de début d'entraînement, transport et dépôt de sédiments) ayant des caractéristiques spécifiques suivant le type d'action hydraulique (courant, houle) et la nature du sédiment (sable, galet, vase). Par ailleurs, il n'existe pour simuler le sédiment naturel, qu'une gamme limitée de matériaux techniquement et économiquement utilisables (matières plastiques, bakélite, nacre artificielle, poudre de bois, sable).

Le transport de sédiments sous l'effet prédominant de la houle est caractérisé par le paramètre addimensionnel G appelé paramètre du grain. Pour reproduire des mouvements sédimentaires en modèle comparables à ceux de la nature, il est nécessaire de choisir un matériau artificiel dont le comportement soit analogue à celui des sédiments naturels en conservant le même régime d'écoulement du grain tombant en chute libre dans l'eau (*Migniot, 1973*).

L'emploi du sable comme matériau mobile, compte tenu des échelles du modèle, va mener à l'emploi d'un sédiment cohésif. Afin d'éviter cela, un matériau plus léger a été utilisé sur le modèle pour schématiser le sable naturel. Il s'agit du PVC plastique de masse volumique proche de $1,4 \text{ g/cm}^3$ confirmée au laboratoire, la fiche technique du PVC plastique est donnée en *Annexe VI*.

Le critère G est respecté si l'on conserve en modèle la même valeur du paramètre qu'en nature, sans distorsion du grain G (*Formule du Lchf in Benguerifa et al., 1995*), avec :

$$G = \varepsilon g D^3 / \nu^2$$

Où ν est la viscosité cinématique de l'eau, et

$$\varepsilon = ((\rho_s - \rho_{\text{eau}}) / \rho_{\text{eau}}), \text{ est la densité apparente du matériau.}$$

Ainsi, il convient d'avoir dans le modèle les mêmes conditions d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle qu'en réalité, ce qui est donné par la relation (*Coutos-Thévenot et al., 2010*) :

$$\frac{d_{\text{modèle}}}{d_{\text{nature}}} = n^{1/8}$$

L'égalité $G_{\text{modèle}} = G_{\text{nature}}$ permet de définir le rapport entre les diamètres des grains en modèle et en nature :

$$\frac{d_{\text{modèle}}}{d_{\text{nature}}} = \left(\frac{\varepsilon_{\text{modèle}}}{\varepsilon_{\text{nature}}} \right)^{-1/3} \times \left(\frac{V_{\text{modèle}}}{V_{\text{nature}}} \right)^{2/3}$$

Le deuxième terme de la relation tend vers 1, on obtient alors :

$$\frac{\varepsilon_{\text{nature}}}{\varepsilon_{\text{modèle}}} = n^{3/8} \quad \varepsilon_{\text{nature}} = \varepsilon_{\text{modèle}} \times n^{3/8}$$

Etant donné que $\varepsilon_{\text{nature}} = ((\rho_{s \text{ nature}} - \rho_{\text{eau}}) / \rho_{\text{eau}}) / n^{3/8}$, $\rho_{s \text{ nature}}$ est de $2,65 \text{ t/m}^3$, et de 1 t/m^3 , d est le diamètre des grains, par application numérique, on obtient un facteur de grossissement des grains du matériau artificiel de 1,75 par rapport aux grains naturels :

$$\frac{d_{\text{modèle}}}{d_{\text{nature}}} = 1,75 \quad \Rightarrow \quad d_{\text{modèle}} = d_{\text{nature}} \times 1,75$$

Le PVC plastique est fourni en rouleaux, donc il a été broyé à plusieurs reprises sur différentes grilles pour atteindre les diamètres voulus. Pour ce faire, le LEM s'est procuré d'un broyeur BT200 pour plastique, la fiche technique de celui-ci est donnée en *Annexe VI*.

Le broyage va devoir obtenir les diamètres moyens de la zone en nature multipliés par le facteur de grossissement :

Tableau VI.29 : Granulométrie du matériau artificiel.

Diamètres moyens	D ₂₀	D ₅₀	D ₈₀
Nature (mm)	0,170	0,200	0,250
Equivalent modèle (mm)	0,300	0,350	0,440

On note que le matériau qui sera utilisé dans le modèle est un matériau intermédiaire afin qu'il puisse avoir un comportement similaire à celui en nature sous les facteurs hydrodynamiques. Ce choix devrait être validé dans la phase de calibration du modèle.

Ainsi, la courbe granulométrique d'un échantillon du matériau obtenu après tamisage a donné pour les D₂₀, D₈₀ et D₅₀ les valeurs 315, 400 et 500µm respectivement. On a procédé alors à mélanger 30% du D₂₀, 30% du D₈₀ et 40% du D₅₀ pour se rapprocher le plus de la valeur moyenne, soit 350µm.

Pour la dépose du matériau mobile jusqu'à l'isobathe -8m, il est inutile de le déposer selon sa répartition spatiale en nature. On dépose le mélange sur une épaisseur de 3,33cm, puis sous l'action de la houle, le triage côte-large devrait se faire automatiquement.

Un volume en matériaux mobiles de 2,43 m³ a été étalé sur la zone, soit, pour une densité de 1,4t/m³, un poids de 3,40 tonnes.

VI.6.3.5. Mise en œuvre du modèle

VI.6.3.5.1. L'échelles des temps sédimentologiques

Un des points clefs dans le réglage d'un modèle à fond mobile consiste à déterminer l'échelle des temps sédimentologiques qui correspond au rapport des durées respectives pour obtenir en modèle réduit les mêmes évolutions des fonds qu'en nature sous les mêmes actions hydrauliques reproduites en similitude.

Cette échelle est, dans le cas des transports de sable sous l'action de la houle, différente de l'échelle des temps hydrauliques (environ 1/16 dans notre cas).

En effet, il a été par exemple possible de calculer l'échelle théorique des temps sédimentologiques tel que le transport de sable par la houle soit en parfaite similitude. La formule du **Lchf (Coutos-Thévenot et al, 2010)** s'écrit :

$$V = k \cdot (g/c) \cdot H^2 T \cdot \sin(2\alpha) t$$

Avec : V transit littoral en m³,
k coefficient de transport (fonction des caractéristiques du sédiment),
g accélération de la pesanteur (9,81m/s²),
c cambrure de la houle au large,
H hauteur de la houle par des fonds de 15m,
T période de la houle,
α incidence de la houle par des fonds de 15m et
t durée d'action de la houle.

On note aussi K = kg/c, ainsi, on obtient la relation suivante :

$$t_{\text{nature}} / t_{\text{modèle}} = n^{1/2} (m/n)^2 * (K_{\text{modèle}} / K_{\text{nature}}).$$

L'expérience (Sogreah France) donne un rapport K_{modèle} / K_{nature} égale à 25. Après application numérique, on trouve qu'une année " nature " sera représentée sur le modèle par équivalence en 13,667 heures, soit 13h40mn environ.

VI.6.3.5.2. Détermination du cycle des houles

Sur un cycle de houle, soit une année en nature, on veut reproduire les mêmes conditions hydrauliques observées en nature.

Dans le modèle sédimentologique, nous avons construits les fonds jusqu'à l'isobathe -30m dans le souci de pouvoir générer les grandes houles, alors que la profondeur sur laquelle nous allons suivre la simulation des houles est la -15m.

Les statistiques de houle à -15m fournis par Sogreah, en prenant en considération la fréquence et le pourcentage d'apparition des différentes houles à différentes périodes et directions, sont donnés dans le **tableau 1 et 2 en Annexe VI**.

La corrélation entre la houle Hs et le temps de pointe Tp (**tableau 3 en Annexe VI**) a permis de retenir des classes de houles qui apparaissent le plus, ce qui est donné dans le tableau ci-après :

Tableau VI.30 : Classes de houles dominantes avec Tp associés (SGH, 2010).

Classe Hs (m)	0-0,5	0,5-1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-5,5	>5,5
Tp (s)	4	6	7	9	11	14

Grâce à une étude statistique sur le secteur moyen de houles qui touchent la zone, de 250 à 340°N, Sogreah fournit un tableau de climat regroupé de part et d'autre d'une orientation moyenne de 295°N (**tableau 4 en Annexe VI**). Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau VI.31 : Pourcentage de houles obtenu par secteur.

Agitation	secteur	Pourcentage cumulé
> 0,5 m	250-290°N	29,09%
	300-340°N	24,91%
Total 1		54,00%
> 1,5 m	250-290°N	10,26%
	300-340°N	5,97%
Total 2		16,24%
> 2,5 m	250-290°N	2,69%
	300-340°N	1,54%
Total 3		4,23%

Le calcul du climat équivalent pour définir le pourcentage de certaines houles Hs intermédiaires (obtenues à -15m lors de la réfraction par le **Swan**), est donné dans le **tableau 5 en Annexe VI**. Ceci a montré que l'apparition de ces houles n'influence pas grandement les pourcentages, on maintient alors les pourcentages des houles du climat regroupé (**tableau 5 en Annexe VI**). Puis, sur la direction 340N°, on éliminera 20% des clapots (houles calmes < 0,5m qui n'ont pas d'effet sur les déplacements sédimentaires), ce qui nous amène aux résultats suivants :

Tableau VI.32 : Climat équivalent (%) (à – 15m de Palm Beach). Orientation moyenne 295°, (Balayage du batteur en modèle au maximum 45° de part et d'autre, soit 250-340°N).

% Houles		Directions et Orientation Batteur									Total	
		250	260	270	280	290	300	310	320	330		340
Hs (m)	Tp (s)	-45	-35	-25	-15	-5	5	15	25	35	45	

0,2 - 1,5	5	1,04%	1,43%	7,24%	8,75%	3,21%	2,14%	1,73%	1,53%	1,80%	34,91%	63,76%
1,5 - 2,5	7			2,42%	4,26%	0,90%	0,57%	0,51%	0,52%	0,95%	1,89%	12,01%
2,5 - 3,5	9			0,18%	1,81%	0,25%	0,14%	0,15%	0,21%	0,34%	0,35%	3,42%
3,5 - 6,0	12				0,33%	0,12%	0,07%	0,06%	0,08%	0,13%	0,03%	0,81%
Total		1,04%	1,43%	9,84%	15,14%	4,48%	2,92%	2,44%	2,33%	3,21%	37,17%	80,00%

Comme on l'a déjà traité, le cycle annuel en nature correspondrait à 13h40 en modèle. Cependant, les houles efficaces de tout le secteur marin qui parviennent à la plage ne représentent pas plus de **50%** des observations. Par conséquent, on réduit le cycle annuel à :

$$13,667h \times 0,8 \times 0,5 \implies \text{le cycle annuel serait de } \sim 5h30mn = 330mn.$$

Ainsi, le temps en minutes correspondant aux pourcentages de chaque direction serait égal à :

Tableau VI.33 : Temps en minutes correspondants aux pourcentages de houles.

Temps (mn)		Directions et Orientation Batteur										Total
Hs (m)	Tp (s)	250 -45	260 -35	270 -25	280 -15	290 -5	300 5	310 15	320 25	330 35	340 45	
0,2 - 1,5	5	4,3	5,9	29,9	36,1	13,2	8,8	7,1	6,3	7,4	144,0	263,0
1,5 - 2,5	7			10,0	17,6	3,7	2,4	2,1	2,1	3,9	7,8	49,5
2,5 - 3,5	9			0,8	7,4	1,0	0,6	0,6	0,9	1,4	1,4	14,1
3,5 - 6,0	12				1,3	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,1	3,3
Total		4	6	41	62	18	12	10	10	13	153	330mn

L'ensemble de ces directions sera simulé par secteur suivant les houles les plus dominantes, soient le secteur de la **325°N**, **265°N** et un secteur d'une direction frontale **Nord 295°** (par déplacement du batteur). La répartition par direction serait :

Tableau VI.34 : Temps en minutes correspondants aux directions de houles.

Temps en minutes			Directions dominantes			Total
Classes Hs (m)	Hs moy	Tp (s)	265	295	325	
0,2 - 1,5	0,9	5	76	29	158	263
1,5 - 2,5	2,1	7	28	8	14	50
2,5 - 3,5	3,1	9	8	2	4	14
3,5 - 6,0	5	12	1	1	1	3
Total			113	41	176	330mn

En effectuant une simple répartition de houles par direction et par minutes sur un cycle annuel de 330mn, on aboutit au tableau suivant :

Tableau VI.35 : Répartition des houles en minutes par direction sur un cycle annuel.

Ordre	Directions	Hs (m) à -15m NGA (Réfraction SWAN)	Tp (s)	Temps cumulés (mn)
1	325°N	0,90	5,00	31
		2,10	7,00	5

		0,90	5,00	30
2	265°N	0,90	5,00	10
		2,10	7,00	15
		3,10	9,00	2
		5,00	12,00	1
		3,10	9,00	2
		0,90	5,00	8
3	325°N	0,90	5,00	15
		2,10	7,00	3
		0,90	5,00	15
4	265°N	0,90	5,00	29
		2,10	7,00	7
		3,10	9,00	4
		2,10	7,00	6
		0,90	5,00	29
5	295°N	0,90	5,00	14
		2,10	7,00	4
		3,10	9,00	1
		5,00	12,00	1
		3,10	9,00	1
		2,10	7,00	4
		0,90	5,00	15
6	325°N	0,90	5,00	33
		2,10	7,00	3
		3,10	9,00	2
		5,00	12,00	1
		3,10	9,00	2
		2,10	7,00	3
		0,90	5,00	34

Ce cycle est illustré graphiquement dans le graphique suivant :

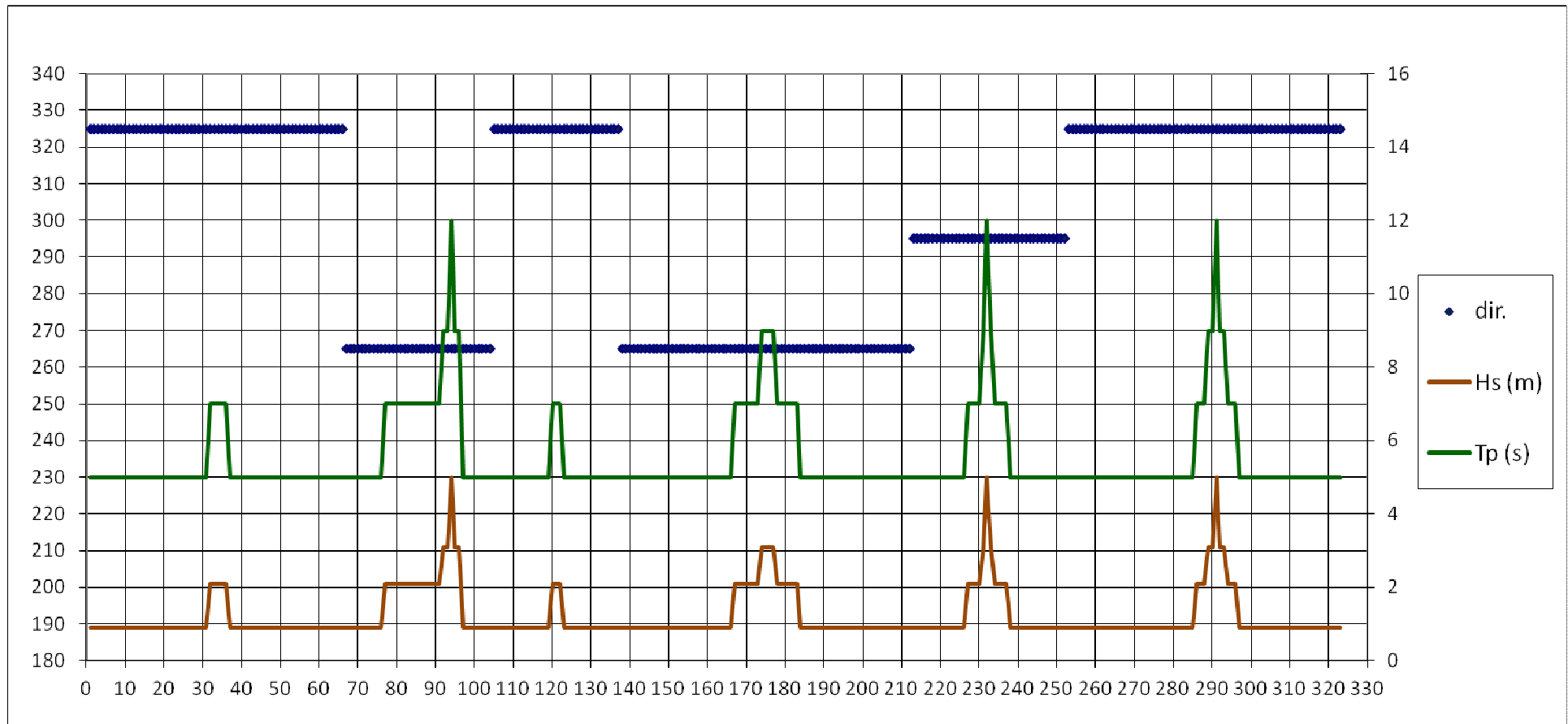


Figure VI.21 : Cycle schématique initial de houles appliquées au modèle sédimentologique de Palm Beach.

VI.6.3.5.3. Présentation de la méthodologie

Le tableau ci-dessous détaille les étapes suivies lors la mise en œuvre du modèle sédimentologique de la côte de Palm Beach.

Tableau VI.36 : Méthodologie de la mise en œuvre du modèle sédimentologique.

Étapes de mise en œuvre du modèle sédimentologique	
-1- Réglages du modèle	Réglage hydraulique Reproduction des phénomènes hydrodynamiques du site (essentiellement la houle).
	Réglage sédimentologique Mise au point d'un cycle annuel de houle qui permet de reproduire la dynamique sédimentaire du site.
-2- Essai de validation	Reproduction des évolutions de fonds observées sur le site par le passé.
-3- Essais	Reproduction d'un cycle annuel avec la solution.
	Reproduction de deux nouveaux cycles annuels.
	Exploitation des résultats.

VI.6.3.5.4. Réglage hydraulique

La simulation des houles dans ce cas consiste essentiellement à vérifier que l'agitation due à la houle est semblable à celle de la nature en vérifiant que le déferlement se produit en des points homologues.

Deux capteurs de houles ont été placés à -15m. Après l'étalonnage de l'appareillage, le cycle de houle initial a été appliqué sur les fonds fixes du modèle en effectuant les cinq changements de direction prévus.

On a remarqué que les houles obtenues à -15m s'approchent suffisamment des houles désirées, le déferlement observé est semblable à celui en nature. On retient alors les mêmes conditions de génération de houles pour les prochaines étapes. L'eau est vidée pour la mise en place de la couche mobile.

VI.6.3.5.5. Calibration sédimentologique

Le calage sédimentologique consiste en la reproduction d'une évolution connue des fonds et mise au point du cycle schématisé des houles (soient les conditions de fonctionnement du modèle).

VI.6.3.5.5.1. Nivellement des fonds T_0 :

Un premier levé est réalisé après la construction des fonds 2009. On note que les levés sont faits par dépose d'un fil de laine sur une laisse de niveau avec un « pas » du mètre (à densifier si nécessaire), positionnement de repères au sol (pour le calage) et prise de photographies « aériennes » et traitement sous Map-Info (géo-référencement, digitalisation, établissement de la grille, ...).

On note que nous avons prévu un stock en matériaux artificiels pour l'alimentation selon le sens du transit littoral et une fosse de récupération au NW à la limite fonds durs/fonds mobiles. Aussi, on a reproduit un peu partiellement en béton les constructions et talus qui se trouvent sur le haut de plage en plus de l'épi de Zéralda qui est confectionné à une échelle distordue par des enrochements moyens de (2-4)t. Cet épi est construit par approximation selon les dimensions « en nature » suivantes : 10m d'enracinement dans la plage (décalé de 7° vers le sud par rapport à la perpendiculaire), sa partie courante de 135m de longueur et 12m de largeur, et arasé à +2,05m (*in LEM, 2002*), mais le musoir est lissé sous forme d'un demi-cône en béton pour maintenir la diffraction.

Le traitement du levé initial des fonds (état T_0) est donné dans la figure suivante :

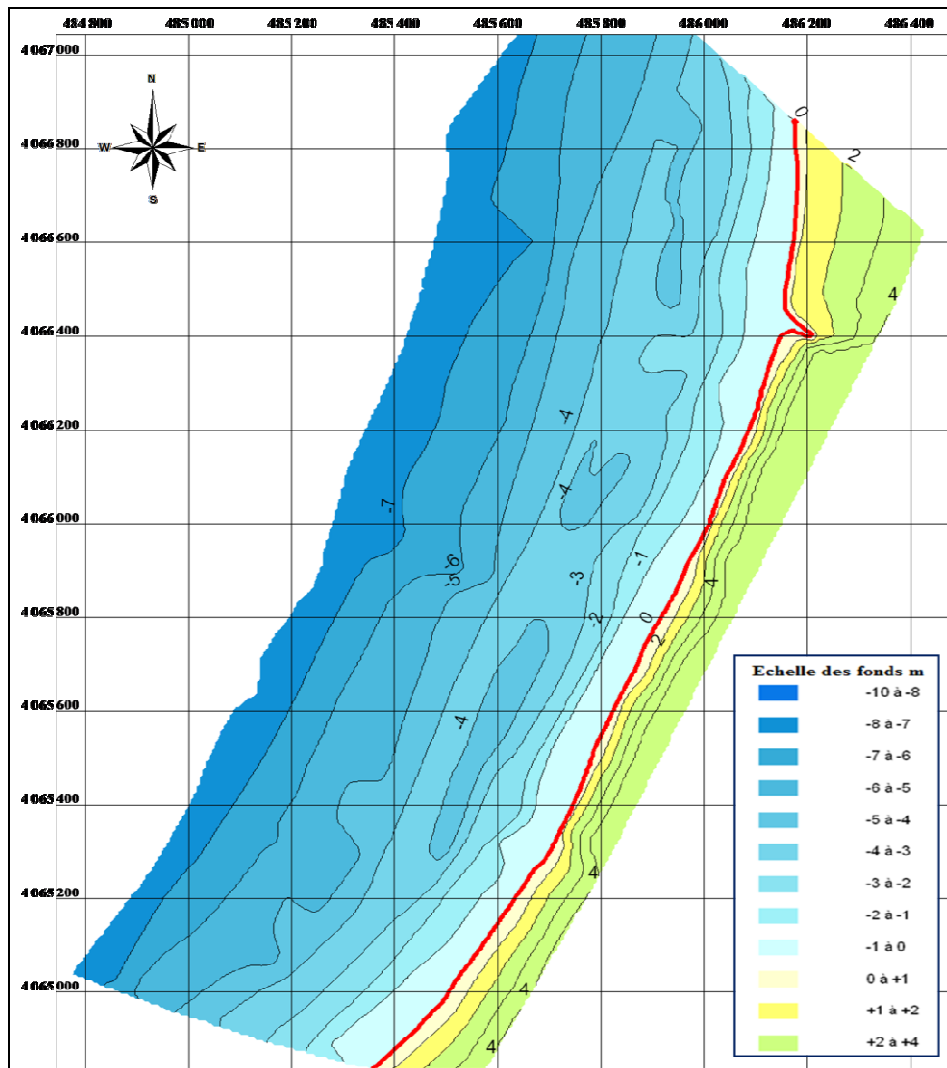


Figure VI.22 : Calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, levé à l'état initial T_0 .

VI.6.3.5.5.2. Réalisation d'un cycle annuel T_1 :

Après le premier levé, la cuve est alimentée doucement en eau. Dès maintenant, il est important lors de toutes les opérations (par exemple changement de direction du générateur, levé ou autres) de ne pas perturber le plan d'eau par des gestes brusques pour ne pas générer d'ondes qui pourraient affecter les fonds mobiles.

Après réalisation d'un cycle de houle, les premiers résultats montrent pour les principaux :

- Une bonne mobilité du matériau.
- Des formations morphologiques (bancs d'avant plage, dépressions, ...) bien marquées, mais un peu exagérées.
- Des triages granulométriques de matériaux significatifs.
- Une érosion généralisée des fonds au-delà de -3 à -5 m (approximativement).
- Des dépôts de matériaux vers l'estran conduisant à une avancée de la plage sur le cycle reproduit.

Suivant les différentes directions :

- Avec les houles de 2,1 m de la $325^\circ N$, les rides se dessinent sur les petits fonds, le matériau est redescendu vers les petits fonds attestant la bonne mobilité du matériau.
- Avec les houles faibles de 0,9 m, il y a formation du cordon quasi continu en avancée de la plage; on revient à une situation assez proche de celle d'avant « tempête » malgré une durée d'action limitée.
- Avec les houles obliques, le transit littoral est bien effectif et il s'intensifie lors des plus fortes vagues.

- La houle frontale favorise le lissage du rivage et des fonds pour les faibles houles, alors que l'érosion se poursuit dans les fonds plus au large lors des tempêtes (3,1m et 5m) sans aucune forme morphologique particulière.

Le levé à l'état T_1 est réalisé en pompant l'eau du bassin doucement d'un mètre d'intervalle (ce qui est vérifié sur une règle graduée mise sur un mur de la cuve) et en mettant le fil de laine suivant la ligne d'eau. Le levé est exploité pour donner la carte ci-dessous :

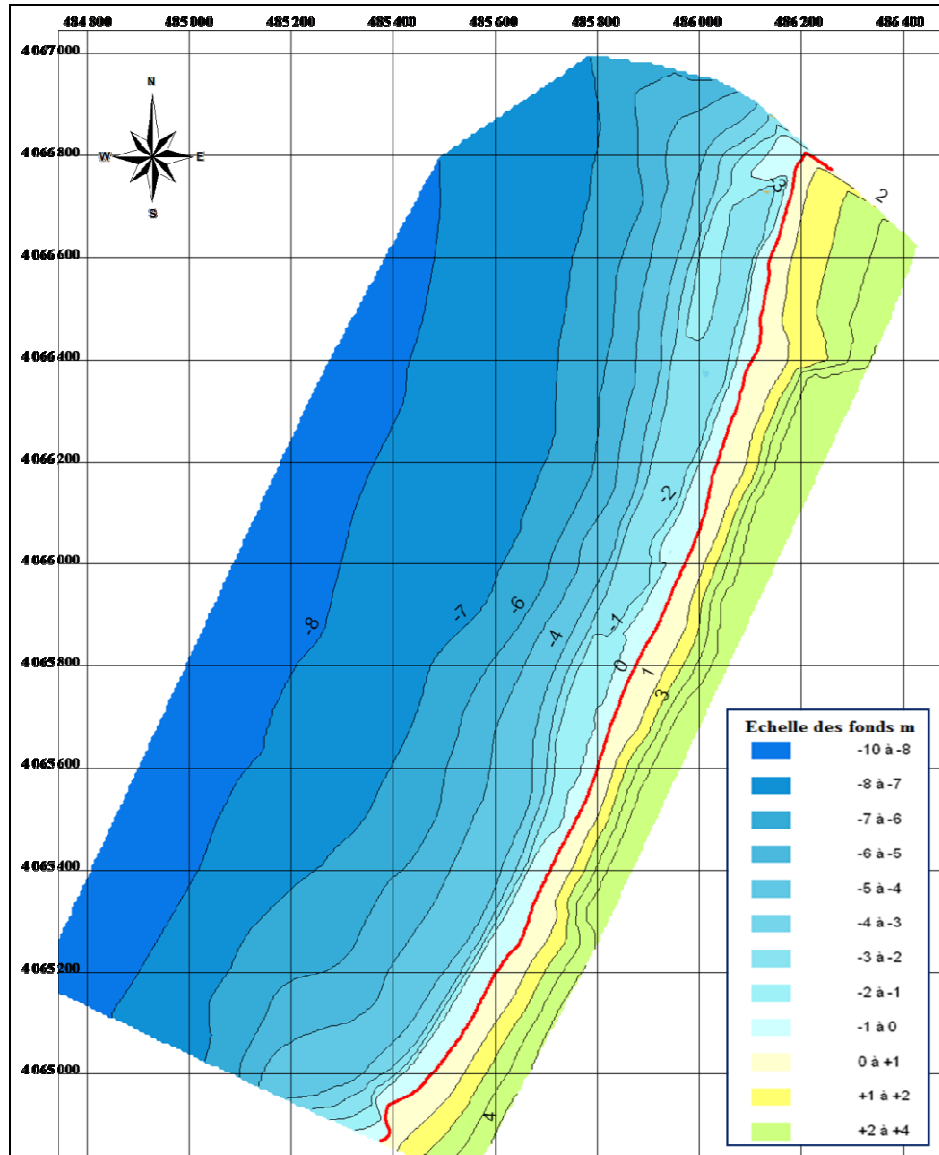


Figure VI.23 : Levé du calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, Etat T_1 .

Aussi, on peut réaliser une évolution des fonds entre l'état T_0 et T_1 , ce qui est illustré par la figure suivante.

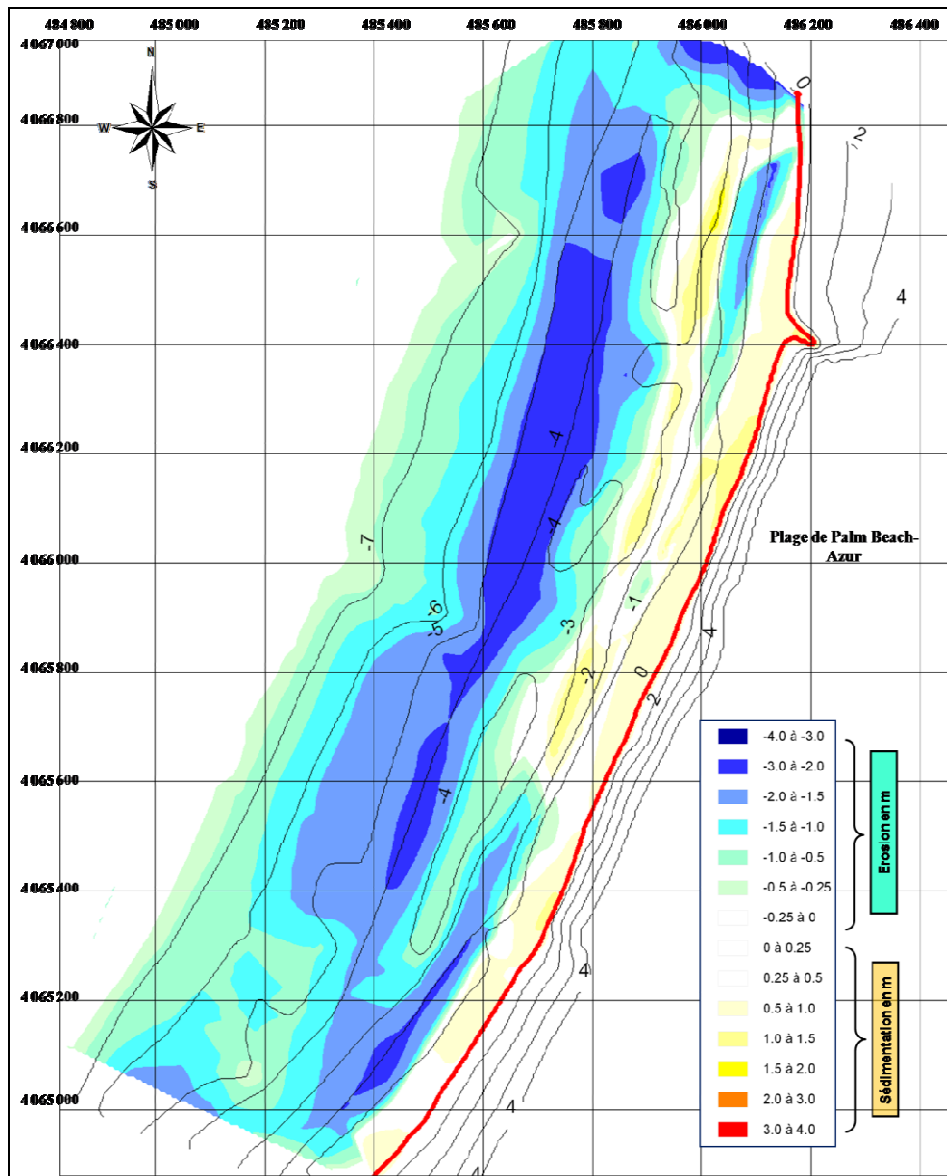


Figure VI.24 : Calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, évolution T_0 à T_1 .

Comme on l'a déjà noté et comme le montre la figure, les phénomènes d'érosion sont assez apparents, et la sédimentation est bien marquée. A l'issue du premier cycle de houle, on retient que le modèle répond correctement pour ce qui est de la mobilité du matériau tant en houle frontale (mouvements dans le profil) qu'en houles obliques (dérive littorale), mais les phénomènes observés restent un peu exacerbés.

Ainsi, les modifications sur le nouveau cycle proposé portent sur :

- Une réduction significative de la durée des houles les plus faibles (en séparant la classe 0 - 1,5 m en deux classes (0 - 0,5 m et 0,5 - 1,5 m) selon les occurrences des houles nature, et, de fait, l'introduction des houles faibles en début de cycle (pour faire « travailler » le matériau fraîchement nivelé) et en fin de cycle pour « lisser » le haut estran).
- Un allongement des périodes des différentes houles.
- Le déplacement des houles frontales du 295°N en première partie du cycle.

Le nouveau cycle proposé est présenté graphiquement dans la figure suivante :

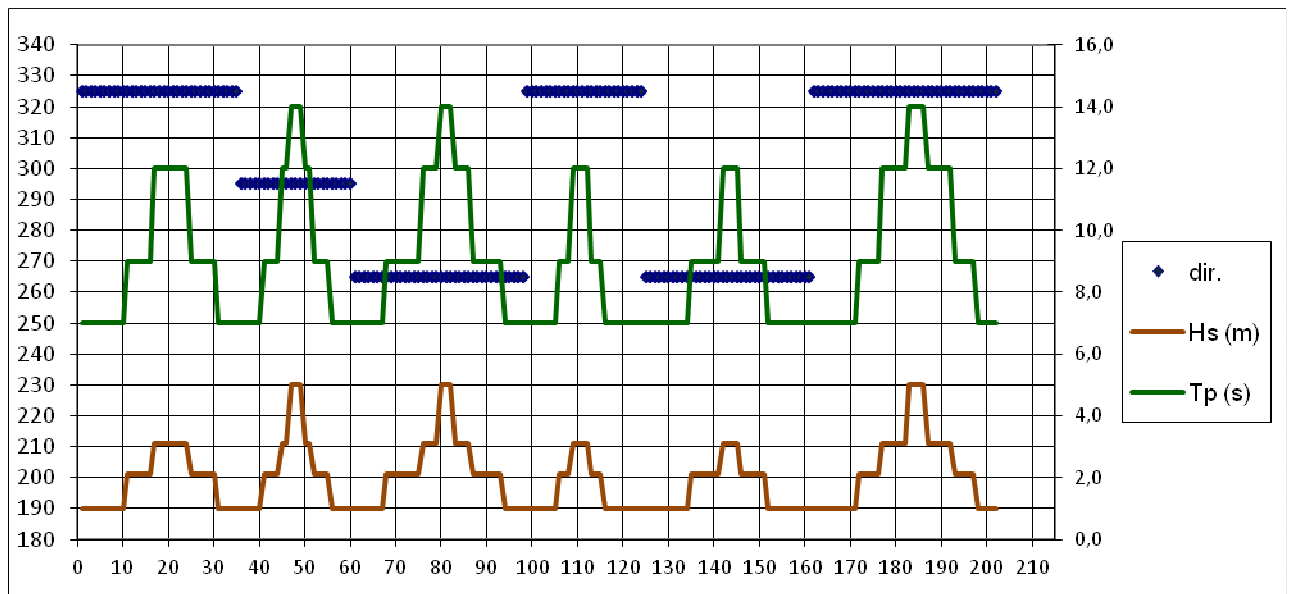


Figure VI.25 : Deuxième cycle schématique de houles.

Pendant le prochain test, il est plus intéressant d'enchaîner deux nouveaux cycles et de faire un levé après 3 cycles afin de pouvoir apprécier comment le modèle réagit sur une plus longue durée et de voir si les évolutions des fonds sont linéaires ou si elles s'estompent dans le temps.

VI.6.3.5.3. Réalisation de deux cycles annuels consécutifs T_3 :

Le nouveau test avec le modèle en fonctionnement (deuxième cycle annuel) est réalisé en respectant la chronologie des houles du nouveau schéma proposé, mais en modifiant les durées d'action de la houle. Les modifications n'ont pas beaucoup apporté au modèle.

On note toujours un étalement des bancs avancés avec les plus fortes vagues, les courants de retour se développant en houle frontale ou de faible obliquité, sont visibles sur le modèle.

On propose de partager les houles en un cycle d'hiver (houles de tempêtes) et un cycle d'été (houles calmes).

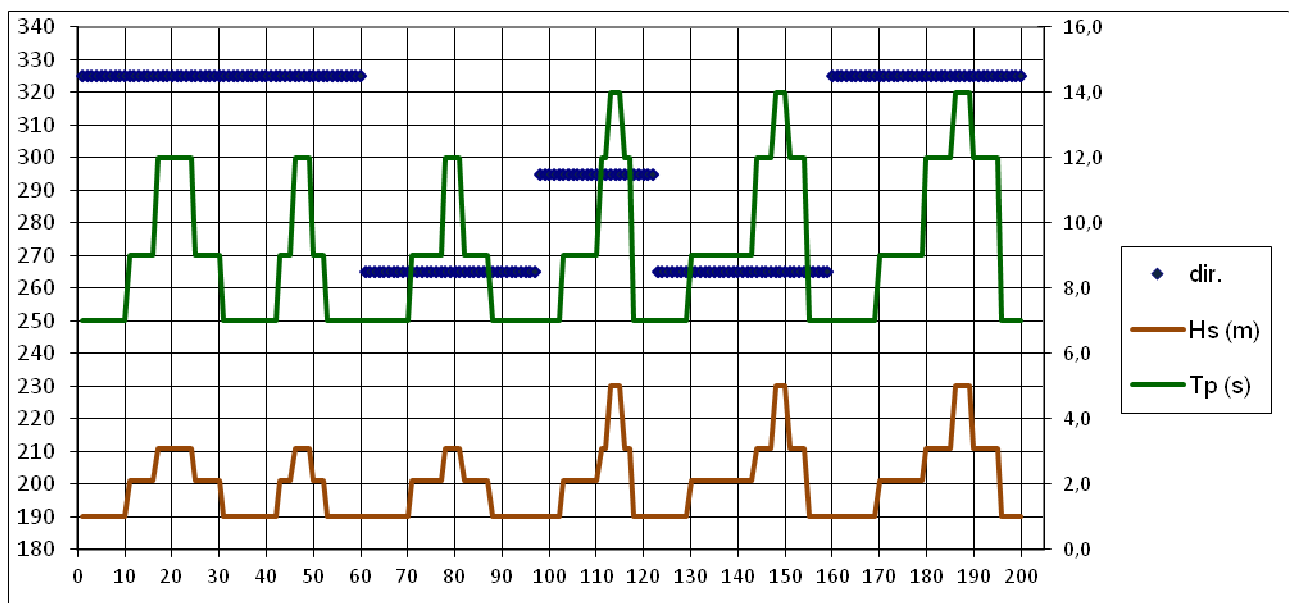


Figure VI.26 : Troisième cycle schématique de houles.

Un levé des fonds est réalisé après les deux cycles. L'exploitation des photos « aériennes » et le traitement sous MapInfo donne la figure ci-dessous :

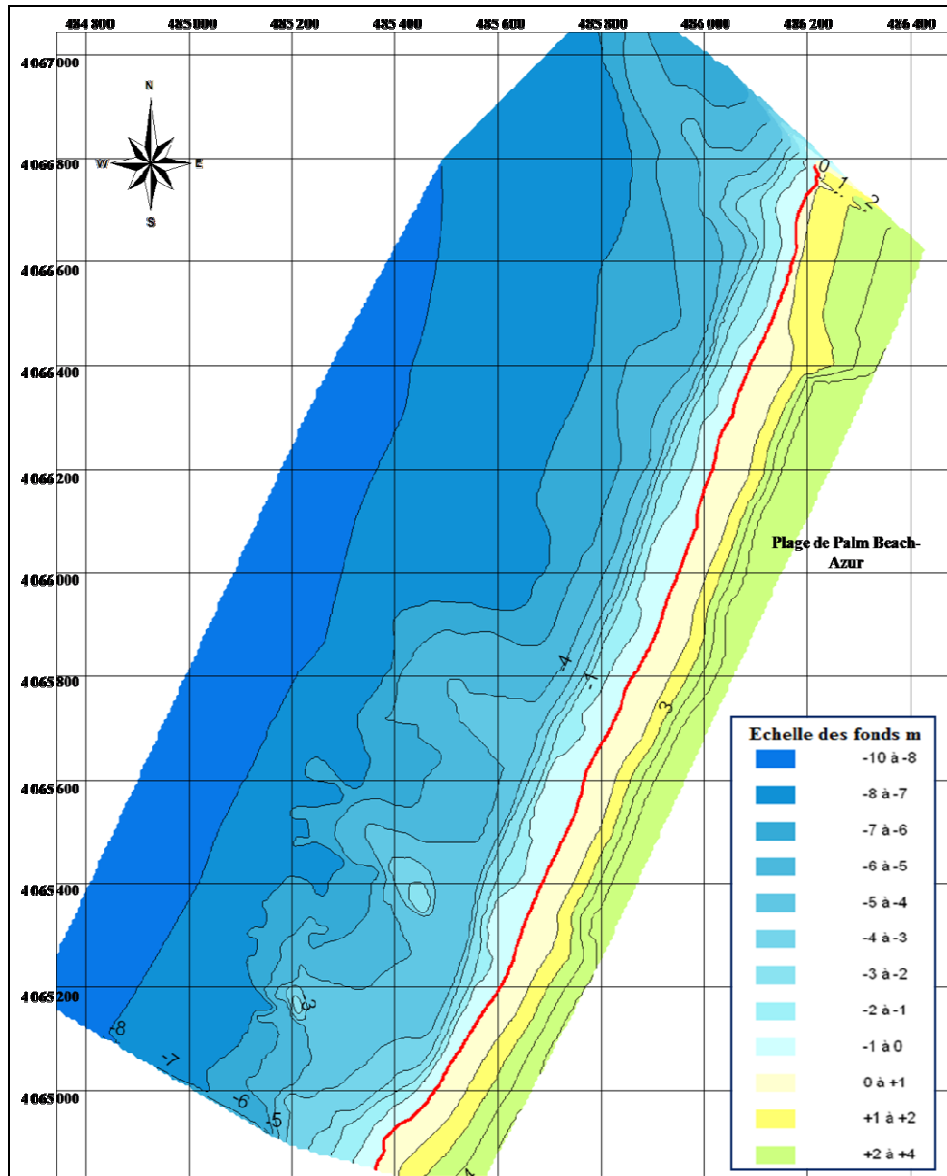


Figure VI.27 : Levé du calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, Etat T₃.

D'après le levé, on remarque une bonne tendance de distribution du matériau. L'érosion se fait toujours mais pas d'une manière exagérée comme à l'état T₁, alors que les dépôts ont diminué. Pour mieux apprécier l'évolution du modèle de l'état T₁ à l'état T₃, on réalise le traitement illustré par la figure ci-après :

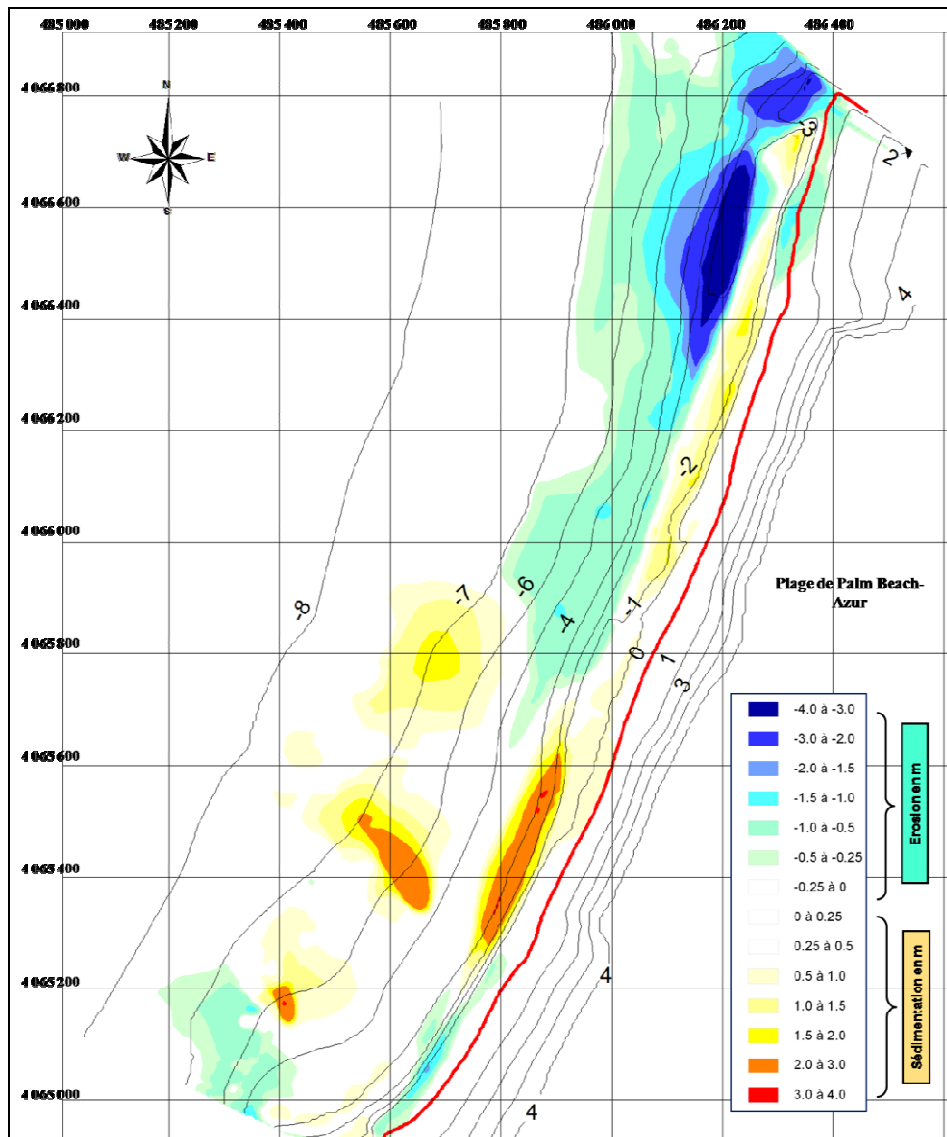


Figure VI.28 : Calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, évolution T₁ à T₃.

Comme le montre l'état d'évolution des fonds, le modèle tend à se rapprocher assez clairement de la configuration bathymétrique initiale. La modification du cycle a favorisé la reprise et la dispersion du matériau de la côte vers le large. Un recul du trait de côte commence à prendre lieu.

On a pu noter que les houles de tempêtes sont responsables des formes d'érosion dans la plupart du temps, mais elles participent également au charriage du matériau et à son dépôt. Or, les houles de faible amplitude sont des houles de lissage.

Les critères de réglage ayant pu être reproduits :

- Le triage granulométrique et la mobilité satisfaisante du PVC.
- Le transit littoral faible entraîné par les directions obliques, et le déferlement des houles.
- Une tendance érosive des petits fonds marins et un recul plus ou moins lent du rivage.

Ceci témoigne alors un bon calage du modèle, à l'exception que les durées des houles « en pic » ne doivent pas être allongées car elles façonnent les fonds de manière importante, et les houles de faible amplitude n'ont pas le temps ni l'énergie de pouvoir lisser. Aussi, le partage en deux groupes estival et hivernal ne favorise pas tellement le façonnement morphologique. Ceci nous amène à apporter quelques petites modifications et retenir le cycle suivant pour l'essai de validation.

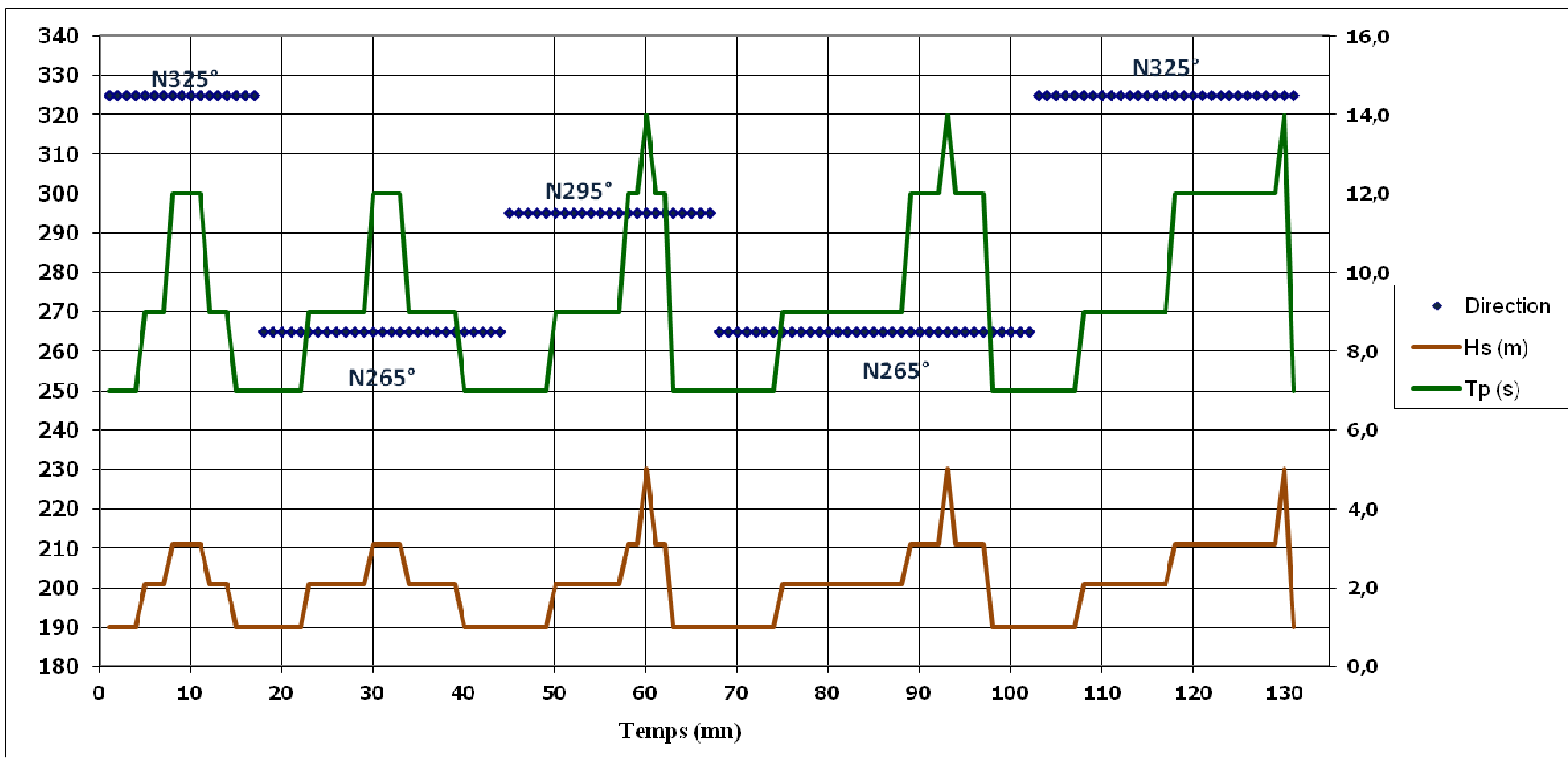


Figure VI.29 : Cycle annuel définitif de houles appliqué au modèle sédimentologique de Palm Beach.

VI.6.3.5.6. Essai de validation

L'essai de validation basé sur la méthode historique consiste à reproduire des évolutions de fonds observées sur le site par le passé. Pour ce faire, on a opté à mettre sur place un brise-lames haut représentatif de celui se trouvant au sud du site pour la protection du complexe touristique de Zéralda.

De plus, on met en œuvre un brise-lames bas qui représentera la protection prévue pour la plage de Palm Beach.

L'épi de Zéralda construit au début du calage est gardé, au nord de celui-ci sont mis en place les deux brise-lames. Le comportement du modèle vis-à-vis de ces ouvrages est très important pour valider le calage.

Pour le brise-lames bas, faisant environ 90m de musoir à musoir et ~ 30m de large en nature, on reprend ces dimensions selon l'échelle distordue du modèle. Pour les enrochements, on prend une catégorie moyenne de (1-3)t arasé à la bonne cote (+0,5 NGA), on rassemble les enrochements entre eux par du vernis léger pour éviter qu'ils se disjoignent sous la houle, mais aussi en respectant un certain indice des vides entre eux.

Pour le brise-lames haut de Zéralda, de la même manière, on le construit à une échelle distordue des dimensions en nature (m), qui sont pour la partie courante de ~ 30m de largeur, ~ 100m de longueur et une côte d'arasé à +2,65m (LEM, 2002). Ainsi, il est nécessaire pour brise-lames (comme pour l'api) de Zéralda de mettre en place des musoirs "lisses" (demi-cônes en béton) pour favoriser la diffraction.

L'application du cycle annuel retenu à l'issue du réglage sédimentologique a permis de voir ce que montre les photos suivantes :

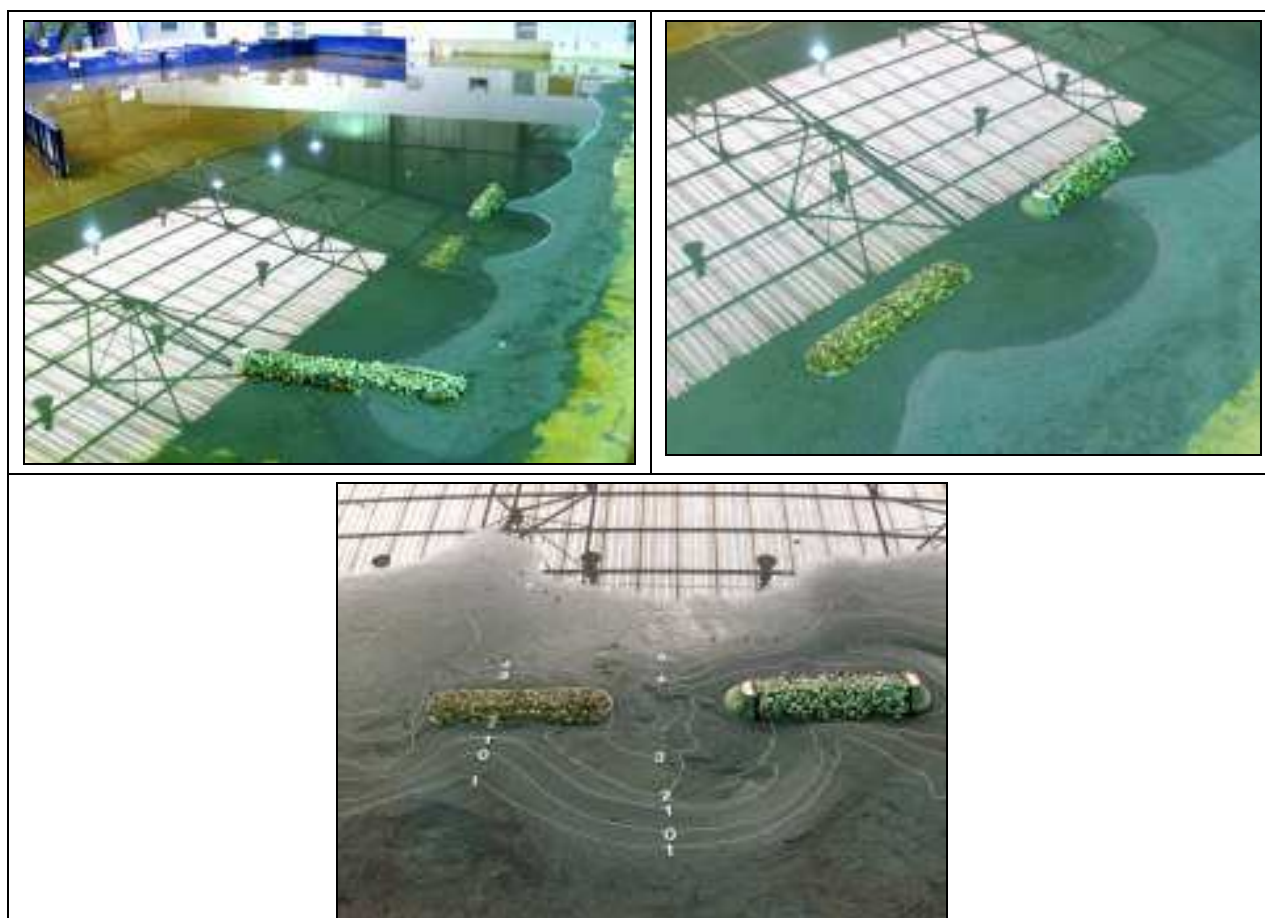


Figure VI.30 : Photographies de l'essai de validation, laboratoire du LEM.

L'essai a donné une formation morphologique distinguée qui s'est formé suite à la diffraction de la houle autour des musoirs. Après une année de houle, la différence de fonctionnement entre les deux ouvrages est singulière.

Le brise-lames haut, étant un ouvrage émergé, permet de former une connexion nette entre le trait de côte et le pied de l'ouvrage, c'est un vrai tombolo. Alors que le brise-lames bas, étant un ouvrage franchissable, réduit l'énergie de la houle ce qui favorise la formation d'un salient, tout en maintenant une circulation permanente de l'eau.

Pour l'épi de Zéralda, les phénomènes caractéristiques de ce genre d'ouvrages (érosion/ sédimentation) ont bien été marqués.

Pour conclure, le modèle est validé et le dernier schéma de houles sera maintenu pour les essais suivants, définissant ainsi une échelle des temps sédimentologiques à 2h10mn, c'est-à-dire que 2h10 de fonctionnement du modèle permettraient de représenter une évolution des fonds bathymétriques équivalente à une année « nature ».

VI.6.3.5.7. Essai sur la solution d'aménagement

La solution d'aménagement retenue à l'issu des essais en modèle réduit tridimensionnel à fond fixe consiste en la mise en place d'une batterie de cinq brise-lames bas arasés à la cote $\sim +0,50\text{m NGA}$, implantés par des fonds de $-2,50\text{m}$ à une distance de la côte de 90 à 100m, espacés de 70 à 80m, et faisant chacun une largeur de 30m et une longueur d'environ 90m de musoir à musoir. Ces ouvrages seront accompagnés d'un apport de sable.

La simulation en modèle sédimentologique va permettre de tester l'efficacité de ces solutions d'aménagement, c'est-à-dire, la stabilisation ou non de la plage de Palm Beach-Azur.

De ce fait, on procède durant cet essai aux opérations suivantes :

VI.6.3.7.1. Nivellement des fonds mobiles

On réalise un nouveau nivellement des fonds mobiles selon la bathymétrie 2009, tout en gardant les lignes bathymétriques qui se rapprochent de celle-ci.

VI.6.3.7.2. Mise en place des ouvrages et prise d'un levé

La mise en place des ouvrages de protection sur le modèle selon l'emplacement tracé au préalable dans le plan de masse est suivie par la réalisation d'un levé à l'état T_0 . Le levé traité donne la figure ci-après. On note que les brise-lames bas sont édifiés de la même façon expliqué dans la section précédente.

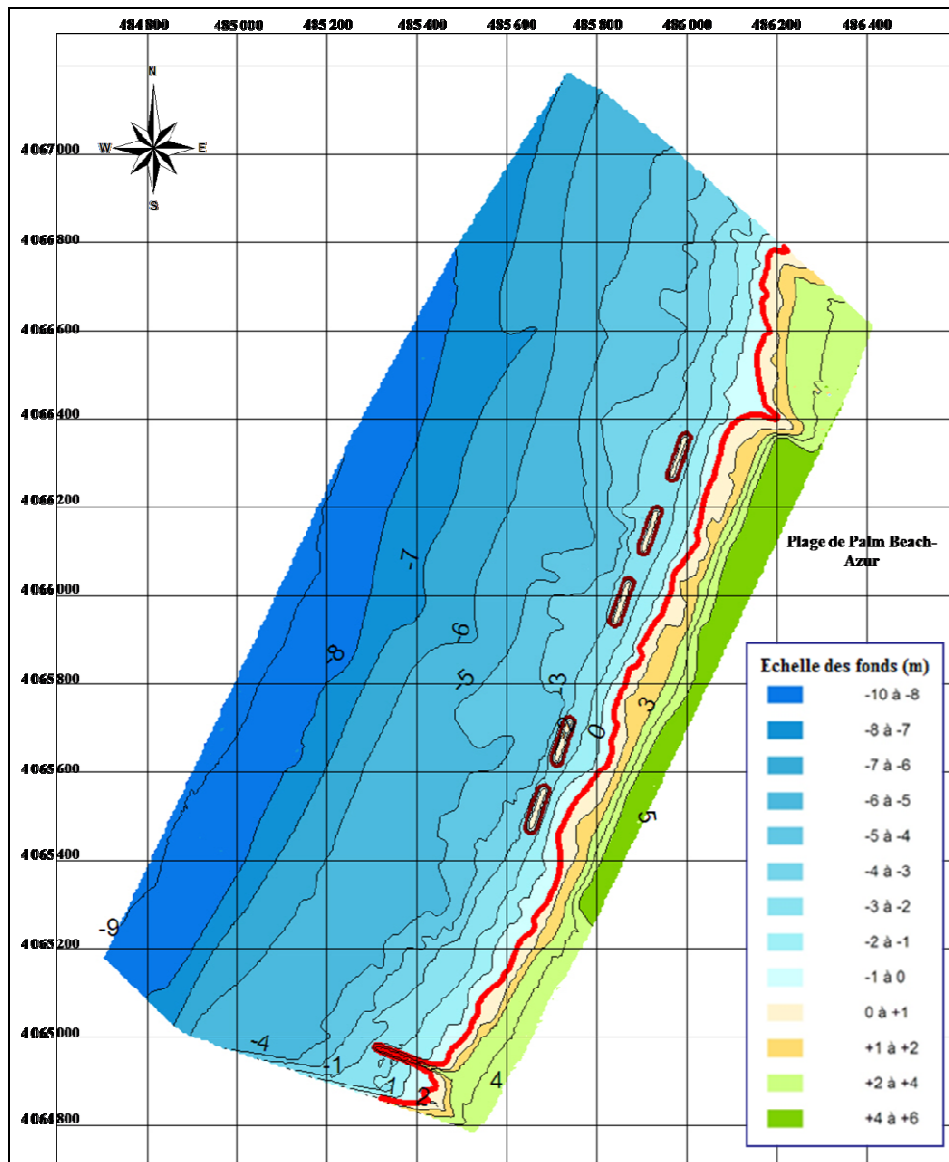


Figure VI.31 : Levé initial T_0 et présentation schématique des aménagements à la côte de Palm Beach.

Une photographie montre les ouvrages et le levé réalisé :



Figure VI.32 : Mise en place de la protection de Palm Beach sur modèle et réalisation d'un levé T_0 .

VI.6.3.7.3. Application d'un cycle annuel de houles

Le schéma de houles retenu à l'issu de l'essai de validation est appliqué sur les solutions de protection de la plage de Palm-Beach simulés sur le modèle sédimentologique.

Les remarques notées lors de ce test :

- Les brise-lames bas sont franchis par les houles (surtout de forte amplitude) qui ensuite diminuent d'énergie et favorisent les dépôts.
- Formation de barres sableuses au rivage qui disparaissent rapidement au début du test.
- Les phénomènes de diffraction autour des musoirs sont très visibles.
- Un transit sédimentaire +/- faible selon les directions obliques.
- La houle frontale joue un rôle de lissage entre le rivage et les brise-lames.

A la fin de celui-ci, un levé est réalisé de la même méthodologie que ses précédents donnant, après exploitation des résultats, la carte suivante.

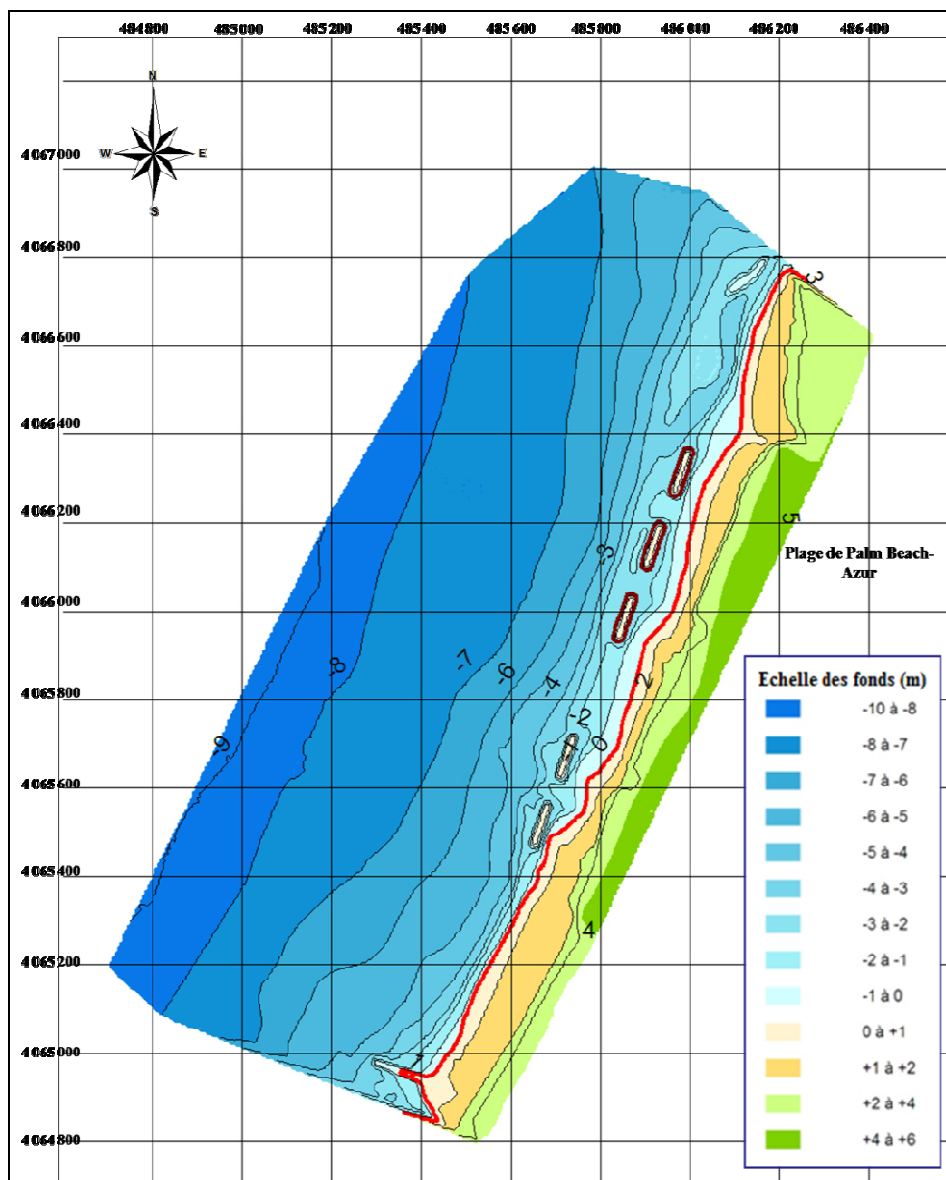


Figure VI.33 : Levé T_1 avec la protection en brise-lames sur Palm Beach après un cycle de houles.

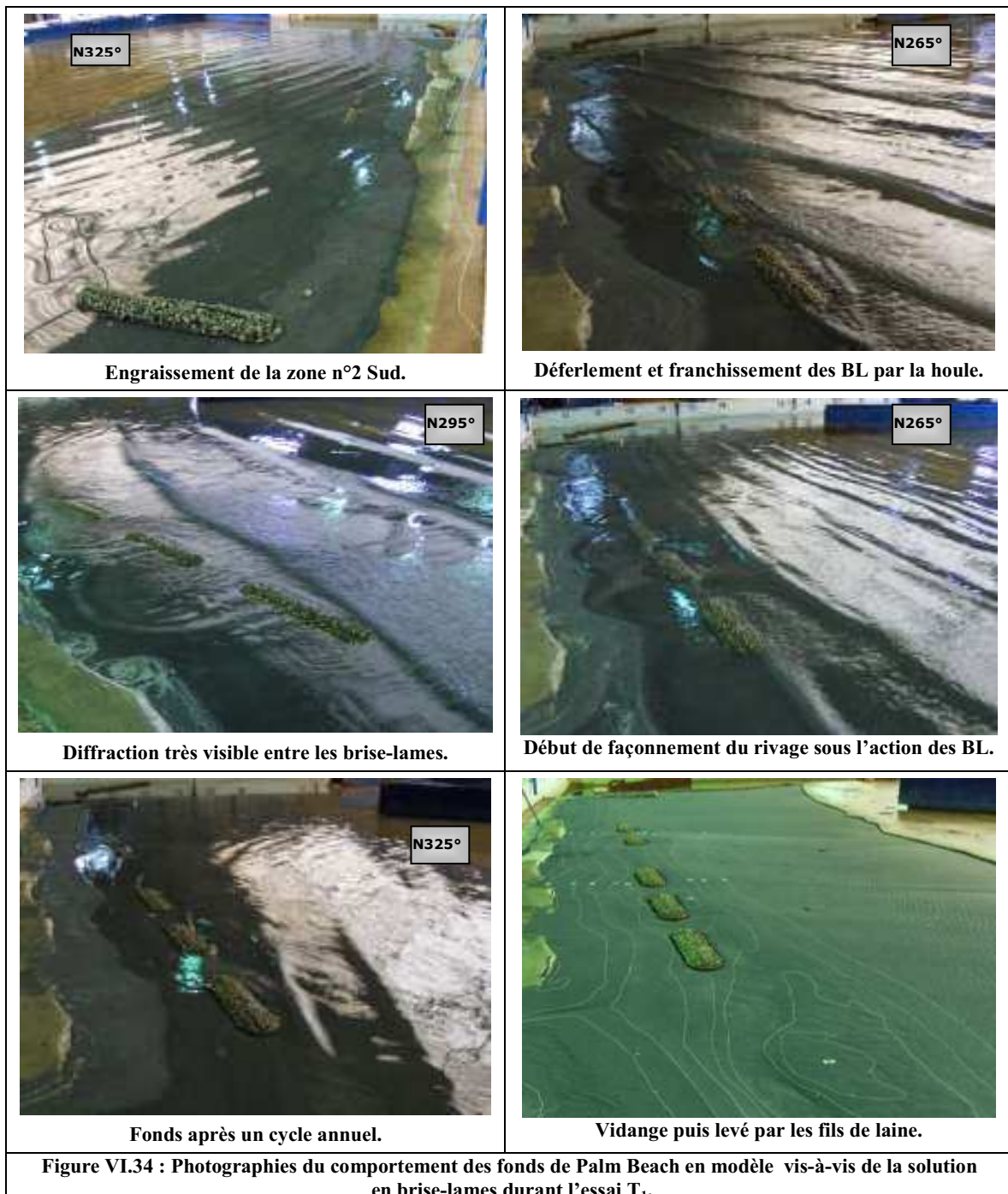
On a remarqué une avancée du trait de côte assez satisfaisante (début de formation de salients), faisant preuve du bon fonctionnement du modèle sur les différentes directions. Autres points « positifs » correspondent au fait que la ligne 0 n'a que peu évolué entre les BL 1 et 2 et le BL 3 et 4.

La comparaison entre les deux états met en évidence un départ de sédiment des fonds au-delà de -3m NGA (correspondant au resserrement des lignes bathymétriques) et un dépôt particulièrement visible au Sud du brise-lames BL 1. Ceci serait très intéressant car en nature, comme on l'a vu, les fonds (entre -4 à -5m) ont

tendance à s'engraisser, donc les brise-lames permettraient de récupérer un peu de ces dépôts pour engraisser la plage, qui elle, est en recul.

On remarque aussi que la zone n°2 Sud, où il n'est prévu aucune protection marine (sauf le confortement du cordon dunaire), s'est engraisée d'une cote de presque 1m à 1,50 m témoignant ainsi l'aspect optimiste du modèle.

Les principaux constats sont confortés par les photographies ci-après :



VI.6.3.7.4. Simulation du rechargement

Comme on l'a déjà évoqué, il est prévu un rechargement artificiel correspondant à une avancée du rivage actuel de 20m, soit 220000 m³ de sable pour le linéaire de 1000 m en zones n°3 Sud et n°4 Sud.

VI.6.3.7.4.1. Préparation et procédé du rechargement en modèle :

Connaissant qu'en nature le diamètre moyen du sable de la plage aérienne est de D_{50} de $200\mu\text{m}$, le sable apporté doit être plus grossier pour qu'il ne soit pas emporté par les houles, c'est-à-dire, entre de D_{50} de 300 à $500\mu\text{m}$.

En appliquant le facteur de grossissement (1,75), on a prévu un stock granulométrique de diamètres moyens et ceci selon les capacités du broyeur. Ainsi on prévoit :

Tableau VI.29 : Stock granulométrique prévu au rechargement en modèle.

Pourcentages %	30	40	30
Diamètres mm	0,500	0,630	0,800

Pour le rechargement sur le modèle, on procède de la sorte :

- Mettre une ligne fictive correspondant à la +2m, l'équivalent de 20 m en avant (au large) de la ligne +2m levée après le cycle T_1 et rajouter du matériau en nivelant à l'horizontale (une berme de +2m).
- Positionner une ligne fictive -2m à 20m au large de la ligne -2m du levé T_1 et reconstituer par rechargement le profil entre +2 et -2 m (en longueur) dans le secteur : 100m au sud du BL1 jusqu'à 100m au nord du BL5 (en largeur).
- Bien noter le volume de matériaux mis en place.

Le profil type du rechargement est donné dans la figure suivante :

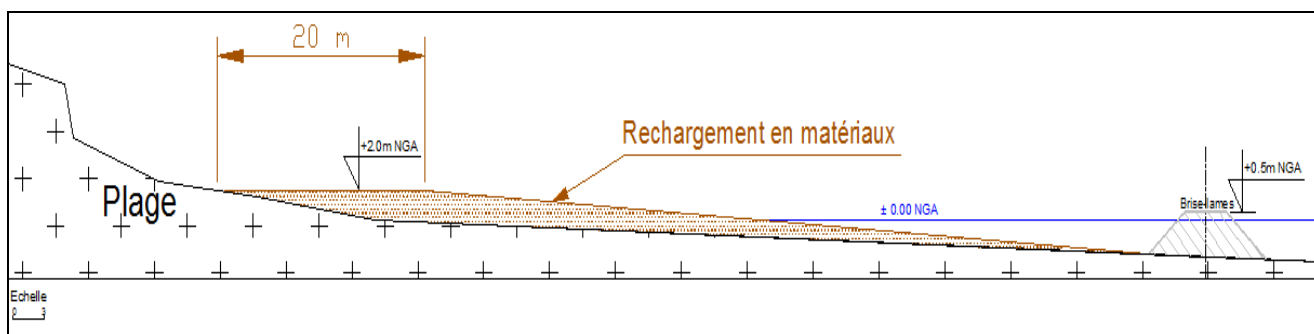


Figure VI.35 : Profil type de rechargement sur Palm Beach en modèle.

On aura ainsi forcé le modèle en redonnant au profil de plage une pente plus ou moins équivalente à celle obtenue sur le modèle après le premier cycle. Le volume rechargé est équivalent à $96\ 800\ \text{m}^3$ en nature.

La photographie suivante montre les fonds après réalisation du rechargement :



Figure VI.36 : Photographies après rechargement.

VI.6.3.7.4.2. Réalisation d'un essai de deux cycles annuels :

Le modèle est soumis à deux cycles annuels de houles (= cycle long) pour vérifier la dynamique sédimentaire du site après le rechargement.

Au début des tests, on note la reprise régulière de matériaux de plage pendant la première vingtaine de minutes. Ensuite, pendant le fonctionnement du modèle, on a remarqué une dynamique sédimentaire ordinaire et assez stable. Les houles de forte amplitude remanient les matériaux de plage, en créant des courants de retour qui, surtout pour la houle frontale, érodent la côte. Cependant, les houles obliques favorisent assez visiblement les formations morpho-dynamiques.

Pour mieux confirmer les constats, un levé est réalisé à l'état T_3 après vidange de l'eau. Le traitement sous logiciels des photographies aériennes prises à une quinzaine de mètres de haut a permis d'obtenir la carte suivante.

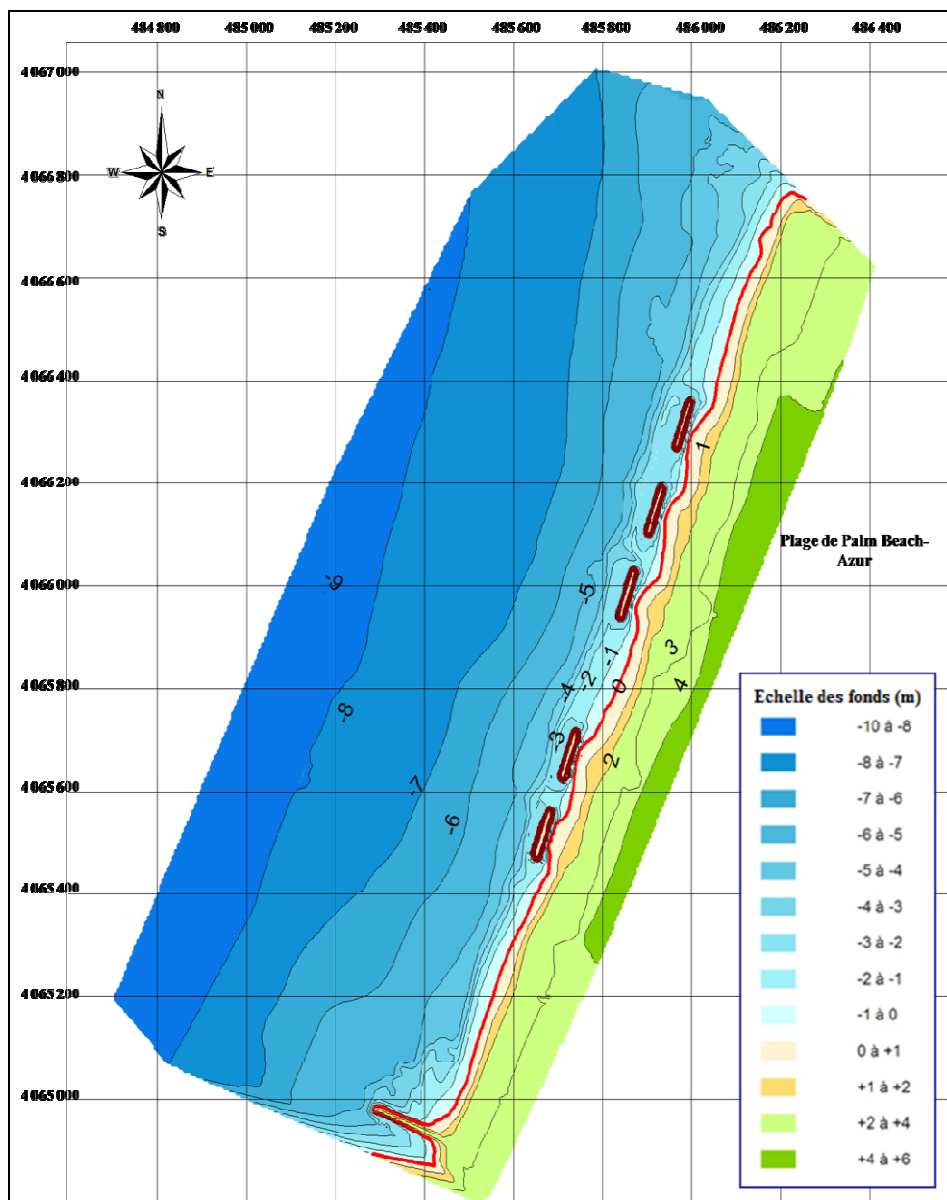
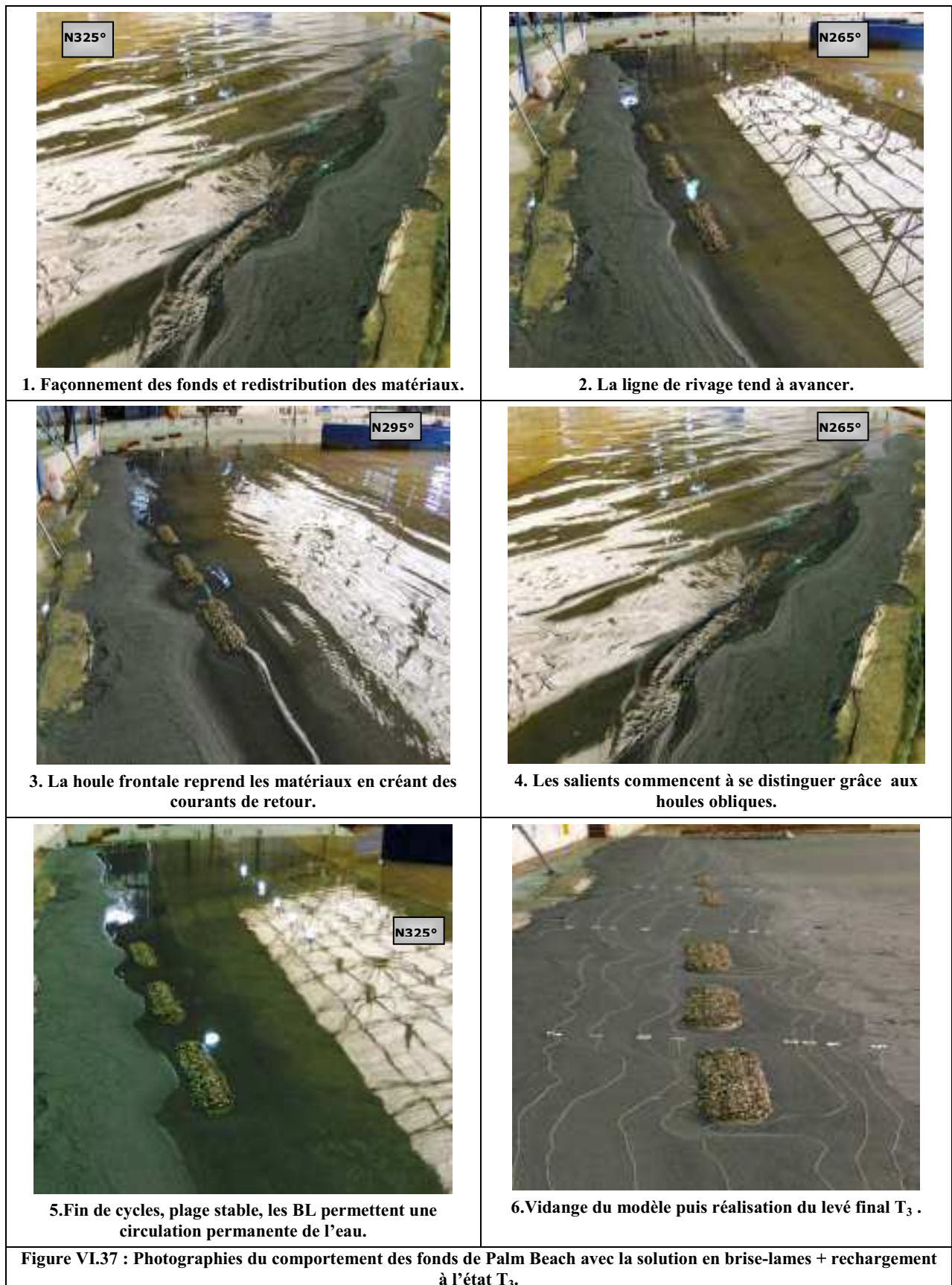


Figure VI.36 : Levé T_3 avec la protection en brise-lames et le rechargement de Palm Beach.

D'après le levé, la ligne de rivage s'est avancée devant les brise-lames, alors qu'entre ceux-ci, elle a peu avancé, ce qui témoigne d'une évolution typique de ce genre d'ouvrages, soit la formation des salients. Au-delà de -5m NGA, les fonds n'ont pas évolué ce qui montre l'effet stabilisateur du rechargement artificiel.

Visuellement, on note qu'environ 90% des quantités apportées sont restées sur place, alors que les autres volumes se sont redistribués entre les lignes -1 à -4m de profondeur.

Les photographies ci-après illustrent mieux la configuration côtière obtenue au bout du 3^{ème} cycle :



A l'issue de ces essais, des recommandations seront données pour le rechargement en nature, sa quantité et son profil.

VI.6.3.8. Conclusion générale de l'essai tridimensionnel à fond mobile

La mise en œuvre du modèle calibré a permis de tester l'efficacité des solutions d'aménagement de la plage de Palm Beach-Azur, et de définir le profil le mieux adapté au contexte hydrosédimentaire du site.

La simulation par du matériau artificiel PVC plastique d'une évolution des fonds de cette plage en plusieurs années 'modèle', a été conséquente. On considère que le modèle a fonctionné d'une façon satisfaisante, et parfois « optimiste » par endroit tel que dans la zone sud du site d'étude, au bout de quatre ans (y compris l'année anticipée).

Ainsi, on exige selon les résultats de l'essai sédimentologique :

- De maintenir les dimensions et l'emplacement des brise-lames bas retenus suite aux essais 3D à fond fixe (**Figure VI.19**).
- D'exécuter le rechargement une année après la construction des cinq brise-lames. On note que dans l'étude théorique, il était prévu de recharger un volume de 220000m³ comme solution d'urgence juste avant de réaliser les brise-lames en nature. Le modèle réduit à fond mobile nous a permis expérimentalement d'avantager l'apport artificiel après une année de fonctionnement des brise-lames.
- D'écarter la possibilité de recharger avant la construction car il y a grand risque de perdre la quasi-totalité des apports sous l'action de la mer.
- D'éviter de recharger en même temps que les travaux de réalisation, car ces derniers vont déstabiliser et reprofiler le haut de plage et la plage rechargés (même en présence d'un chenal d'accès), de plus, les brise-lames sont franchissables et les pertes de volumes de rechargement seront importantes, donc par précaution, il est recommandé de laisser la nature travailler les brise-lames pour voir leurs impacts puis recharger selon les nouveaux profils de la plage au bout d'une année.
- Le volume rechargé en modèle est équivalent à ~97000 m³ en nature, la procédure en modèle citée plus haut est une anticipation : une partie reste sur place (une berme de 20m à la +2m) et le reste érodé par la mer puis étalé en pente jusqu'au brise-lames. C'est-à-dire qu'on a donné à la plage le profil obtenu sous l'effet de la mer.

En nature, on n'anticipe pas vu qu'on ne peut pas effectuer des rechargements jusqu'à des profondeurs de -2m, à cause du plan d'eau très réduit et du manque d'engins adaptés à ce genre de travaux maritimes en Algérie. On va procéder, alors, par recharger des volumes de 107000 à 110000 m³ représentant 50% des volumes théoriques prévus, sur un linéaire de 1000m : à partir de 100m au sud du BL1 à 100m au nord du BL2 et à partir de 100m au sud du BL3 à 100m au nord du BL5 sur une berme de 30 à 35 m à partir de la ligne +2m, le reste des apports sont rechargés en pente douce. Le profil type du rechargement en nature est donné dans la figure ci-dessous (**Figure VI.38**).

Les 50% des quantités restantes par rapport aux volumes théoriques seraient différées dans le temps lors des rechargements d'entretien. On ne que les pertes lors de la mise en œuvre, constituées beaucoup plus de sables fins, sont estimés à 10%.

- Le sable rechargé le plus adapté devrait être supérieur aux sables autochtones, soit un D₅₀ de 0,3 à 0,5 mm.

On prévoit que, sous l'action de la mer, les premiers 15 à 20 m seront grignotés par la mer et redistribués sur les petits fonds (jusqu'à -2m NGA). De ce fait, des apports d'entretien sont recommandés.

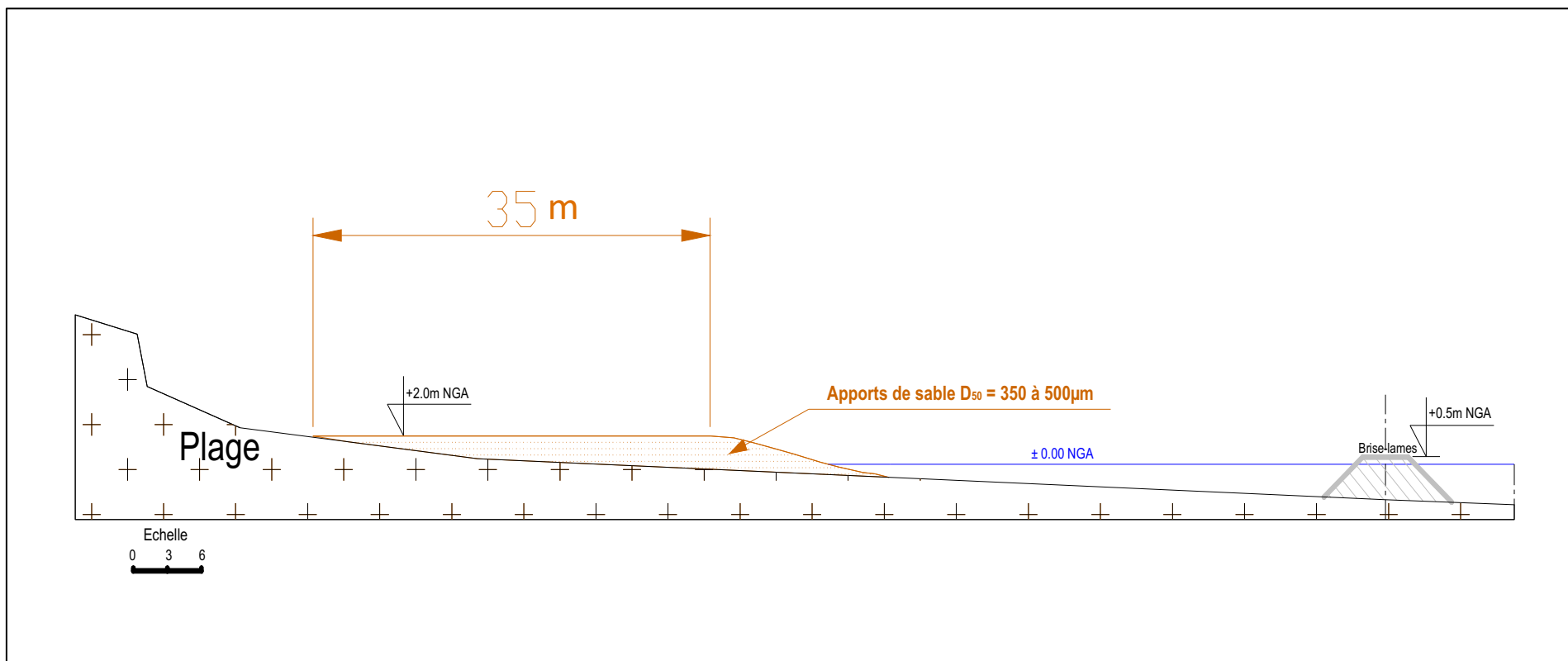


Figure VI.38 : Profil type du rechargement en nature sur la côte de Palm Beach-Azur.

Avant de se lancer dans une étude sédimentologique, il est donc indispensable de préciser les paramètres qui interviennent, les phénomènes à reproduire et la limite des possibilités du modèle. Sous ces réserves, les essais sédimentologiques restent le seul moyen valable pour prévoir l'influence d'un ouvrage sur l'équilibre naturel.

Aussi bien dans le modèle numérique que dans le modèle sédimentologique ou physique en général, on a droit à plusieurs approximations car on ne peut présenter la nature dans son ensemble, mais il reste que voir à l'œil l'évolution des fonds ou le comportement d'un ouvrage est irrévocablement meilleur : pour appuyer la théorie puis améliorer la technique.

Les résultats obtenus sur le modèle sédimentologique sont une preuve que ces modèles sont un outil de travail très utile à condition de les diriger d'une façon correcte, de les comprendre et de les interpréter avec discernement et avec un esprit critique développé (*Migniot, 1973*).

Le présent modèle a pris, depuis sa préparation jusqu'au dernier essai, plus de 16 mois. Ce paramètre temps a fait qu'on l'utilise de moins en moins aussi bien en Algérie qu'en Europe. On a recours à ce type d'étude surtout lorsqu'il s'agit de côtes à haute vocation touristique ou de cas délicats d'atteinte aux infrastructures littorales. En effet, cette étude est un re-lancement des études à fond mobile dans les laboratoires du Lem et dans toute l'Algérie.

VI.7. Exigences et possibilités d'approvisionnement

Il est essentiel d'imposer à l'entreprise des travaux maritimes, qui se chargera de la réalisation des ouvrages de protection de la plage de Palm Beach-Azur, les opérations suivantes :

- Réaliser impérativement avant d'intervenir sur le secteur, des levés topo-bathymétriques allant du pied des talus de la plage jusqu'à - 4m NGA (le dernier levé remonte à 2009).
- Faire une analyse sédimentologique des sédiments de la plage pour s'assurer du diamètre de la plage.

Il relève aussi de la responsabilité de l'entreprise de procéder à une recherche active de carrières de sables et d'enrochements. Ces derniers ont les caractéristiques suivantes :

Tableau VI.30 : Granulats et enrochements à prospector pour la protection de Palm Beach.

Types	Catégories	Poids moyens	Destination
TVC	1-500Kg	4 980 t	noyau
Enrochements par brise-lame	1-3t	7 013 t	Corps de l'ouvrage
	2-4t	3 500 t	
	5-6	4 240 t	
	1-3t	3 830 t	Contrebutées
	2-4t	1 700 t	Contrebutées du Musoir
Granulats	0,3 à 0,5mm	265 000 t	Plage

L'idéal est de soumissionner cette phase aux carrières se trouvant pas loin de Zéralda ou dans les environs de la wilaya d'Alger. D'après la DTP d'Alger, la carrière qui tiendra cette partie pourrait, quelque soit sa capacité, ouvrir de nouveaux gisements pour pouvoir réaliser le tonnage voulu, tout en respectant la loi minière n° 01-10 du 3 juillet 2001 et les décrets miniers n° 02-65 du 06 février 2002 et n° 08-188 du 01 juillet 2008. On propose dans le tableau suivant la liste de carrières fonctionnelles pouvant être sollicitées :

Tableau VI.31 : Carrières et sablières à prospector pour la protection de Palm Beach.

Carrières	Matériaux	Commune	Wilaya	Capacité
-----------	-----------	---------	--------	----------

Hadjrat El Nos	Microgranite (Enrochements)	Cherchell	Tipaza	2000 t/jour*
Hadjrat El Nos	Granulats concassés	Cherchell	Tipaza	1500 à 1600 t/jour*
Agregal	Granulats concassés	Keddarra	Boumerdes	500 000 t/an*
Azrou Concassage	Granulats concassés	Keddarra	Boumerdes	500 000 t/an*
ENOF	Granulats concassés	Keddarra	Boumerdes	1 000 000 t/an*
EPTP	Granulats concassés	Keddarra	Boumerdes	500 000 t/an*
Meditram	Tvc et Enrochements	Ammal	Boumerdes	N.D
Jobert Pescade	Agrégats	Ain Benian	Alger	N.D

* source : Directeur d'exploitation/ Directeur technique

On note que pour la réalisation des ouvrages maritimes en enrochements, les entreprises des travaux maritimes préfèrent que les protections ne soient pas composées de catégories différentes de tonnage des enrochements, non seulement 'économiquement' les prix ne diffèrent pas beaucoup, mais aussi le pesage et la mise en place demandera beaucoup plus de temps.

De ce fait, on insiste que les catégories proposées doivent être respectées. La rigueur dans la pose des enrochements des carapaces et contrebutées des brise-lames est vivement recommandée.

Il aurait été intéressant de pouvoir utiliser les sables de dragage en grandes quantités du port de Cap Djinet à la wilaya de Boumerdes, mais il s'avère que ce sable est trop fin (étude sédimentologique du **LEM, 2010**) par rapport à la granulométrie recherchée dans notre cas.

Aussi, une extraction de matériaux sous-marins en offshore aurait pu être une source importante, mais la loi n° 2002-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral, interdit dans son article 21 toute extraction avant l'isobathe – 25m, au-delà, les matériaux sont également très fins pour notre étude.

VI.8. Etudes similaires

Les ouvrages maritimes de type brise-lames bas sont parmi les rares protections proposées sur le littoral algérien, du fait que souvent les entreprises de réalisation rejettent ces solutions vu la difficulté de leur réalisation (en offshore), la durée plus longue et le coût très cher.

De point de vue hydrodynamique et technique, on a pu repérer une étude similaire à la présente protection, qui consiste en un cordon en enrochements et un rechargement qui a été réalisé à la plage de Ténès, à 261km à l'ouest d'Alger. Les houles qui avaient le plus d'impact sur ce site provenaient des secteurs Nord-Nord-Ouest, responsables du phénomène d'érosion. La hauteur significative Hs à l'ouvrage étant de 3,00m à 6,00m et les Tp correspondant sont de 9,57s à 12,09 s. (**LEM, 2005**)

L'étude menée par le Lem en 2005, a opté pour :

- Un rechargement de la plage composé de granulats concassés (0,063, 4, 10, 20 et 40mm).
- Le rechargement est protégé en pied par un cordon en enrochements: en partie intérieure, le poids unitaire varie entre 0,5 à 1t, arasé à la côte $\pm 0,00$ suivant une pente de 3/2; et en partie extérieure le poids unitaire varie entre 1 à 2t.
- Le cordon est fondé à l'isobathe -1,00m. (**LEM, 2005**)

La solution d'après les visites d'expertise, a beaucoup amélioré la situation de la plage qui s'est engraisée au point de pouvoir aménager un front de mer en l'an 2009. Pour pouvoir apprécier au mieux l'efficacité de la solution, des photographies de cette zone, avant et après protection, sont données ci-dessous.

	
1. Plage de Ténès (Marina) en forte érosion. Avril 2005	2. Atteinte aux constructions au bord de la mer. Avril 2005
	
3. Travaux de mise en place du cordon en enrochements immergés et de rechargement. Mars 2006	
	
4. Plage plus large, aménagement d'un front de mer. Décembre 2009.	5. Galets rechargés encore sur place. Décembre 2009.

Il faut rappeler, que même si les ouvrages maritimes de type brise-lames bas ou affleurants ne favorisent pas la formation d'un vrai tombolo, ils permettent la formation de salients, qui eux-mêmes par leur fonctionnement, engraisent la plage, tout en réduisant le régime du recul des secteurs entre les brise-lames. Cet aspect est très important pour une plage à vocation touristique comme celle de notre étude.

VI.9. Visite de prospection

Au 22 mars de l'an 2011, parallèlement à la réalisation des essais en modèle sédimentologique, une visite sur le site de Palm Beach-Azur a été réalisée, nous permettant ainsi de voir l'évolution du site à la fin de la saison hivernale. Des photographies commentées sont données ci-après pour mieux illustrer l'état de la zone d'étude.



A la fin de la saison hivernale, l'érosion a laissé beaucoup de ses traces, aussi bien sur les cordons dunaires, les constructions, les talus, et le trait de côte. La zone est toujours au même stade inquiétant du dégraissage ce qui réduit sa capacité d'accueil. Un site pareil à vocation touristique, il faut le protéger et le promouvoir.

Les travaux sur l'émissaire des eaux usées auraient pu ne pas avoir lieu s'il l'on a pensé à dévier cet émissaire vers la station d'épuration de la combe de Zéralda qui n'est pas encore fonctionnelle, ou alors le raccorder à la station d'épuration de Staoueli (*Al.Sid Chikh et al, 2008*).

VII. Dispositions préventives de la protection de Palm Beach

La protection prévue pour Palm Beach-Azur s'est vue considérer plusieurs aspects :

- La protection de la zone vierge récupérable dans le cadre de la vision du recul stratégique envisagée en zone n°2 de la plage serait accompagnée par des dispositifs écologiquement adaptés contre la dégradation des dunes bordières. On a préconisé un reprofilage éolien basé principalement sur le placement des ganivelles perpendiculairement aux vents dominants des secteurs WSW et ENE. Le système de ganivelles sera complété de plantation d'oyats au fur et à mesure de l'ensevelissement.
- Le massif dunaire une fois reconstitué devra faire l'objet d'un suivi et d'un maintien contre la détérioration de son paysage et de sa couverture végétale par la fréquentation surtout en saison estivale. Cette situation serait évitée par la création de cheminements et accès canalisés à la plage.
- Les brise-lames bas érigés à 80m de la côte ont moins d'impacts visuels, d'autant plus que la zone au sud immédiat de Palm Beach est aménagée en brise-lames hauts. L'aspect esthétique est donc pris en considération. Mais aussi, ces brise-lames bas sont submersibles permettant le renouvellement constant des eaux, voilà encore l'aspect pollution épargné.
- Les enrochements des brise-lames sont des enrochements naturels, et ils reposent sur un tapis anti-affouillement pour éviter les poinçonnements dans le sol meuble. Ces dispositions sont sécurisantes par rapport au risque prévisible d'abaissement des fonds sableux.
- Les essais en modèles réduits physiques bidimensionnel et tridimensionnel de l'aménagement projeté ont procédé avec soin à l'obtention du profil le plus résistant et n'ont toléré qu'une ruine assez infime, ainsi, les surcotes et décotes considérées sont elles mêmes une exagération de la mesure sécuritaire.
- Le rechargement de la plage sur une largeur de 40 à 45 m, 107000 à 110000m³ de sable pour le linéaire de 1000 m en zones n°3 Sud et n°4 Sud, avec un sable adapté supérieur au sable autochtone de D₅₀ de 0,3 à 0,5 mm, les pertes ne dépasseraient pas les 10 % perdus lors de la mise en œuvre. Les travaux de rechargement doivent être réalisés juste avant la période estivale (moins de perte par temps calmes). Après l'action des houles et vagues, le profil final de la plage devrait garder environ 20m en avant du trait de côte actuel.

VIII. Recommandations et perspectives

Devant l'importance des érosions des littoraux dans la baie de Bou-Ismaïl, par suite de causes naturelles et d'interventions humaines, différentes réflexions et recommandations peuvent être formulées pour tenter de réduire à un strict minimum les conséquences de ces phénomènes.

On rappelle que la majorité des plages de la baie de Bou-Ismaïl connaît un rétrécissement important. D'Ouest en Est de la baie, Chenoua plage recule de 1,02 à 2,7 m/an (1972-1992), Anse de Kouali ; 0,75 m/an, plage familiale de Bou Haroun ; 0,8 m/an, front de mer centre de Bou-Ismaïl ; 1,60 m/an, Fouka marine ; environ 2 m/an, plage Colonel Abbas de Douaouda ; environ 1,2 m/an et l'embouchure de l'oued Mazafran recule de 0,35 à 1,4 m/an (1959-1999) (*in Al.Sid Chikh et al, 2008*). Cette réalité est complexe à appréhender car, nous l'avons déjà indiqué, les causes sont multiples. Seule une approche systémique permet d'aborder la dynamique de ce milieu, le rôle des interactions et l'organisation de l'espace.

Avant d'intervenir, il faut savoir que la réalisation d'un aménagement littoral, quel qu'il soit, va modifier l'équilibre naturel. Des campagnes de surveillance des ouvrages devront être programmées de façon régulière et complétées par des observations après chaque tempête importante. Une fois les constatations faites, il faudra procéder aux travaux normaux d'entretien ou aux travaux plus lourds de réparation.

Il est nécessaire de suivre l'évolution d'un certain nombre de points critiques. Tout d'abord, il faut s'assurer, par des reconnaissances sous-marines à l'aide de plongeurs si la transparence de l'eau le permet, ou sinon par sondages bathymétriques, que la base des brise-lames conçus pour Palm Beach n'est pas soumise à des érosions capables à terme de détériorer le reste de l'ouvrage. Ensuite et après chaque tempête, il faut s'assurer de l'intégrité de l'ouvrage. Il est normal que les brise-lames aillent subir de nombreuses tempêtes qui les malmèneront, pendant les premières années, on constate un léger tassement. Ce phénomène n'est pas dangereux sous réserve d'avoir procédé à des rechargements de la plage et des rechargements réguliers d'entretien. Il faut surveiller aussi, périodiquement, l'évolution de la ligne du rivage et la bonne tenue de la dune bordière.

Une des solutions qui peut s'avérer très intéressante est d'organiser le repli des constructions derrière une nouvelle ligne de défense naturelle ou aménagée sur la plage puisque des installations humaines, trop proches du rivage, sont soumises à l'érosion marine. L'observation montre qu'une plage peut reculer sans pour autant disparaître lorsqu'il existe en arrière d'elle des terrains meubles (*Paskoff, 2003*).

Cette piste, si elle est adoptée, doit être envisagée sur tout le littoral algérien. Cependant, l'Algérie compte un nombre extrêmement important d'infrastructures régissant une part importante de l'économie du pays (Hydrocarbures, transit maritime et autres) ce qui nous amène à dire que cette éventualité de défense des plages pourrait être appliquée localement (habitations, petites infrastructures commerciales...) ou alors elle devrait s'insérer dans les objectifs d'une gestion intégrée des zones côtières qui elle-même doit être mise en œuvre dans le cadre d'un projet global de réaménagement stratégique des côtes algériennes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux d'ingénierie pour protéger les plages font aujourd'hui l'objet d'une réévaluation critique à la lumière des travaux des naturalistes. L'évolution naturelle d'une plage, qui n'est soumise à aucune contrainte d'aménagement, serait le moyen de défense le plus efficace, mais la forte anthropisation de la bande littorale a rendu nécessaire la lutte contre le phénomène érosif pour protéger les infrastructures construites à proximité des rivages.

Pour toute défense contre l'érosion, il est donc plus efficace de se tourner vers des ouvrages de défense souples qui travaillent en harmonie avec les dynamiques naturelles en jeu et ont ainsi un moindre impact sur le littoral, plutôt que d'utiliser des ouvrages de défense rigides qui tendent à réprimer les processus côtiers.

Cependant, la diversité des phénomènes à l'origine de l'érosion littorale conduit à une diversité de réponses techniques qui ne s'opposent pas forcément les unes aux autres, mais qui sont souvent complémentaires. En effet, pour améliorer l'efficacité des interventions de protection sur le site de Palm Beach-Azur, on a opté pour des défenses de natures mixtes (aménagement en brise-lames bas, rechargement artificiel et confortement de l'espace dunaire).

Les modélisations numérique et physique (à fond fixe et mobile), avec toutes les études secondaires qu'elles imposent (sédimentologie, évolution des fonds, étude du climat, ingénierie des ouvrages, évolution des fonds, autres manipulations sur logiciels, etc.) nous ont été un outil incontournable pour l'aménagement du littoral de Palm Beach-Azur, à la fois à cause de la diversité des questions qui se posent durant la conception d'ouvrages maritimes, à cause des développements que les expérimentateurs ont mis en œuvre pour améliorer son utilisation (génération des phénomènes hydrauliques, et mesures automatisées, simulation des matériaux...) et parce que cet outil est beaucoup plus parlant pour le grand public.

La conception des aménagements et ouvrages hydrauliques peut donc difficilement se passer du recours à la modélisation dès lors qu'il s'agit de concevoir un ensemble de dispositions qui auront des conséquences hydrauliques et/ou sédimentaires difficiles à anticiper, s'agissant d'une situation nouvelle ou de dispositions à insérer dans un environnement très complexe à décrire.

Loin de s'opposer, les modélisations numériques et physiques sont aujourd'hui très complémentaires et bien adaptées à une utilisation conjointe pour la simulation des phénomènes hydrauliques et maritimes les plus délicats.

On rappelle que les solutions retenues pour la protection de la zone touristique de Palm Beach-Azur se sont avérées être les plus efficaces en termes d'impacts visuels paysagers et en termes d'efficacité, soient la lutte contre l'érosion et la reconstitution des plages. Même si elles sont plus coûteuses en première phase, elles sont plus efficaces à long terme et leur impact sur l'écosystème est plus facilement accepté.

Malgré la fiabilité prouvée en modèles de cette protection, il reste recommandé de suivre son évolution dans le temps, de mettre en place des études d'observation de l'évolution du trait de côte et des fonds marins afin d'évaluer l'impact de l'ouvrage et la nécessité d'effectuer des interventions d'entretien, d'estimer, dans l'optique d'un développement durable de la zone, les retombées socio-économiques des aménagements, et enfin d'améliorer l'accueil des activités côtières de Palm Beach, une gestion intégrée serait alors plus que rentable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Alonso. B et al., 2007-2008.** Beach erosion monitoring, Results from Beachmed-e / Optimal project. Optimisation des Techniques Intégrées de Monitoring Appliquées aux Littoraux. *Edited by Enzo Pranzini & Lilian Wetzel, 233 p.*
- Al Sid Chikh.S et Lainser.K, 2008.** Baie de Bou-Ismaïl et baie d'El Djamilia. Paramètres océanographiques, gestion littorale et imagerie bathymétrique. *Mémoire d'ingénieur d'état en Aménagement du littoral. ISMAL. 77p.*
- Augris. C et Cressard. A P, 1984.** Les granulats marins. Publications du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO). *Rapports scientifiques et techniques – N° 51, 87 p.*
- Aymé. A, 1965.** La nouvelle carte géologique au 1/50 000 d'Alger. *Bulletin du service géologique de l'Algérie, nouvelle série, N°33, pp 02-40.*
- Bejaoui. B, Mouldi. B, Ben Mouelli. I et Rais. S, 2002.** Modélisation de l'évolution du trait de côte et de la protection du littoral dans le Golfe de Tunis. *Bulletin de l'institut national des sciences et technologies de la mer à Salammbô, Vol 29, 12p.*
- Benguerifa. S et Oucheikh. M, 1995.** Contribution à la réalisation d'un modèle réduit à fond mobile. Baie de Zéralda. Ecole Nationale Polytechnique, Département Hydraulique. *Projet de fin d'étude, dirigé par Mr Berkani. M, 169p.*
- Benoit. M, Laborie. V, et al., 2009.** Chapitre "4. Caractérisation du site et collecte des données" du Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. *Version française du Rock Manual. Ciria, Cur, Cetmef, pp 310-480.*
- Berthot. A, Rey. V, et Fraunié. P, 2000.** Modélisation de l'évolution long-terme du trait de côte. VI^{ème} Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Caen, France, 17-19 mai 2000. <http://www.paralia.fr> - DOI:10.5150/jngcgc.2000, 015-B, pp 163-173.
- Blanc. J J et Froget-Claude. H, 1981.** Mesure et méthode d'étude quantitative de l'érosion des littoraux meubles. Exemple de la Camargue. In: *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire - Volume 18 – N°1-1981, pp 47-52.*
- Blanc. J J, 1996.** Plages en recul et dynamique des profils littoraux à Faraman (Camargue, delta du Rhône), méthodes d'études; essai d'analyse prévisionnelle. In: *Quaternaire - Volume 7 – N°1-1996, pp 53-62.*
- Bonnefille. R, 1992.** Cours d'hydraulique maritime. 3^{ème} édition. Ed : Armand Colin, Paris, 208 p.
- Bonnefille. R, 1994.** Mouvements de la mer. École Nationale Supérieure d'Électrotechnique et d'Hydraulique de Toulouse. © *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, 19 p.*
- Bravard. J P, 1983.** Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. Approche qualitative et spatiale. t.: LXXI - 1983 – 4, *Revue de Géographie Alpine, 365 p.*
- Brives. A, 1924.** Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie. Travaux récents des collaborateurs. *Fascicule 1. Imprimerie Jean Gaudet, Alger, 191 p.*
- Bujan. N, 2009.** Application d'un modèle de circulation quasi-tridimensionnel littoral à la dynamique des plages du Languedoc-Roussillon. Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc. *Ecole Doctorale : Sibaghe, Systèmes intégrées en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences et Environnement. Thèse de Doctorat, 254 p.*
- Camenen. B, et Larson. M, 2004.** Transport solide par charriage sous une interaction houle-courant. VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004, pp 157-165.

Camenen. B, Pedreros. R, Dupuis. H, Howa. H, et Larroudé. P, 2000. Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse. VI^{ème} Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Caen, France, 17-19 mai 2000. <http://www.paralia.fr>- DOI: 10.5150/jngcgc.2000, 020-C, pp 219-228.

Caminade. D, 1995. Ouvrages de protection contre la houle. Université du Havre. © Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/genie-civil-ti254/ouvrages-de-protection-contre-la-houle-c4631/>, 28 p.

Caminade. D, 1996. Ouvrages de protection des côtes. Université du Havre. © Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/genie-civil-ti254/ouvrages-de-protection-des-cotes-c4690/>, 16 p.

Carte géologique de l'Algérie. 2^{ème} Ed, Echelle 500 000^e. Dressée d'après la 1^{ère} Ed 1933 à 1940 et les travaux récents par Cornet. A et al, avec la collaboration de Aymé. A et al du service géologique de la société nationale de recherche et d'exploitation des Pétroles en Algérie et des services géologiques du Maroc et de la Tunisie pour leurs territoires respectifs. *Editée en 1951-1952. Imprimerie Gaillac-Monrocq, Paris.*

Caude. G, 2003. Modélisation physique au XXI^{ème} siècle. *Colloque SHF « Quels modèles physiques pour le XXI^{ème} siècle ? », Lyon, 08-09 octobre 2003, Cetmef, pp 01-09.*

Caude. G, 2004. La modélisation physique au XXI^{ème} siècle. *La Houille Blanche, N°3 (mai-juin 2004). DOI: 10.1051/lhb:200403001, pp 17-24.*

CECW-EH-D. 1992. Engineering and design coastal littoral transport. Department of The Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 20314-1000. *Engineer Manual N° 1110-2-1502, pp 44-65.*

Chapon. J, 1978. Travaux maritimes. Tome I. Le milieu marin – le navire, La navigation – les côtes, Les ouvrages extérieurs des ports maritimes. Cours de l'école nationale des ponts & Chaussées. *Ed : Eyrolles, Paris, 309 p.*

Ciria, Cur, Cetmef, 2009. Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. 2^{ème} édition. *Version française du Rock Manual. Ed : Cetmef, Compiègne. ISBN 978-2-11-098518-7, 1302 p.*

Clercq-Roques. G, 2009. Protection du littoral de l'Orb à l'Aude – secteur 2b. DRE Languedoc-Roussillon, Service Espaces Littoraux. *Aménagements et Risques Littoraux (ARL), 06 p.*

Colas, S, 2007. Analyse statistique et cartographique de l'érosion marine. Les dossiers IFEN, *publication N° 06 octobre 2007, Institut Français de l'Environnement, Orléans, 39 p.*

Colas, S, 2007. Le littoral, entre nature et artificialisation. Les dossiers IFEN, *publication N° 120 octobre 2007, Institut Français de l'Environnement, Orléans. ISSN 1777-1838, 04 p.*

Coutos-Thévenot. M, et De Croutte. E L, 2010. Etude sur modèle physique de l'évolution de la flèche sédimentaire au droit du port de St-Louis du Sénégal. *La Houille Blanche, N°6- 2010, Sédimentation en domaines côtiers-modèles physiques. Ed : Société hydrotechnique de France, ISSN:0018-6368, pp 47-53.*

Dagorne. A, 1970. Remarques préliminaires sur la sédimentation pré-littorale en baie de Bou-Ismaïl (Ouest Alger). *Annales algériens de géographie N°7, pp 73-78.*

Dalrymple. R A, 1985. Physical modeling in coastal engineering. *Department of Civil Engineering & College of Marine Studies University of Delaware, Newark, USA. pp 03-09.*

De Vriend, H J, 1991. Mathematical modelling and large scale coastal behaviour. *Journal of hydraulic research, 29/6, Part 1 and 2, pp 727-753.*

Dehousse. N M, 1985. Cours de génie maritime. Constructions du Génie Civil, Ouvrages Hydrauliques. Université de Liège, Faculté des sciences appliquées. *Institut du Génie Civil. 362 p.*

Delouis. A, 2001. Transfert des sédiments et modélisation à fond mobile. Sédiments et navigation en estuaire. *La Houille Blanche, N°8 (décembre2001). DOI: 10.1051/lhb/2001092, pp 62-67.*

Dembele1. J M, et Cambier. C, 2006. Modélisation multi-agents de systèmes physiques : application à l'érosion côtière. 8th African Conference on Research in Computer Science, Cotonou-Benin, November 6-9, 2006, 08 p.

Dennis J. Whitford, 2001. Teaching ocean wave forecasting using computer-generated visualization and animation, Part 1: swell forecasting. *Computers & Geosciences* 28(2002) 537–546. Department of Oceanography, U.S. Naval Academy, 572M Holloway Road, Annapolis, MD 21402-5026, USA. <http://chl.erdc.usace.army.mil/>.

Dennis J. Whitford, 2001. Teaching ocean wave forecasting using computer-generated visualization and animation, Part 2: swell forecasting. *Computers & Geosciences* 28 (2002) 547–554. Department of Oceanography, U.S. Naval Academy, 572M Holloway Road, Annapolis, MD 21402-5026, USA. <http://chl.erdc.usace.army.mil/>.

Desmazes. F, 2001. Etude relative à la caractérisation et la répartition des barres sableuses pré-littorales. PHASE 2 : Etude de cas. Annexe technique. *Université de Bordeaux 1, Science technologies, SHOM, 77 p.*

Desmazes. F, 2005. Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte Aquitaine. Exemple de la plage du Truc-Vert. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1, Science technologies. *Ecole Doctorale Sciences du Vivant, Géosciences, Sciences de l'Environnement, 299 p.*

Ehrholda. A, Auffreta. J P, 1996. Approche bidimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels. Exemple de la partie occidentale de la baie du Mont Saint-Michel. Laboratoire de Géologie Marine, Université de CAEN. <http://www.paralia.fr> - DOI:10.5150/jngcgc.1996, 029-E, 08 p.

Elmore. WC, Heald. M A, 1969. *Physics of Waves. McGraw- Hill, New York, 203 p.*

Evrard et al, 1989. Les enrochements, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC. Ministère de l'équipement, du logement, des transports et de la mer, France. ISBN 2-7208-6200-2, *Publication du LCPC, 107 p.*

Fascicule, 1981. La Houle Comment S'en Protéger. Dossier Technique. Département de la Martinique, France. *Direction Départementale de l'équipement. Arrondissement opérationnel, 226 p.*

Fredsoe. J, et Deigaard. R, 1992. Mechanics of coastal sediment transport. Advanced series on ocean Engineering – Volume 3. Ed : *World scientific publishing, Singapore-New Jersey-London-Hong Kong, 369p.*

González. M, et Medina. R, (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coastal Engineering* 43, pp 209-225.

Guide technique n° 9, 2005. Connaissance et gestion de l'érosion du littoral. Bassin Rhône Méditerranée et Bassin de Corse. Ed : *EID Méditerranée et SMNLR, 55p.*

Hallermeir. R J, 1978. Uses for a calculated limit depth to the active beach profile. *Proceedings of 16th conference on coastal engineering, ASCE, pp 1493-1512.*

Héquette. A, 2001. Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale, le rôle des courants orbitaux et de downwelling. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement, janvier-mars 2001, vol. 7, n°1, pp 05-16.*

Hervouet. J M et Villaret. C, 2004. Simulation numérique des évolutions sédimentaires, importance d'une approche intégrée. VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004. Ed : *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement, Electricité De France, R & D, France, pp 185-193.*

Hsu, J R C, Silvester. R, et Xia. Y M, 1989. Generality on static equilibrium bays. *Coastal Engineering, 12, pp 353-369.*

Leclaire. L, 1972. La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (Précontinent algérien). Mémoires du muséum national d'histoire naturelle. Nouvelle série C, sciences de la terre, Tome XXIV, Fascicule unique. Ed : *Editions du Muséum, Paris, pp 28-78.*

- LEM, 1998.** Etude de protection du rivage de la wilaya de Tipaza. Site de Bou-Ismaïl (Avant projet sommaire). *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, pp53-56.
- LEM, 1999.** Etude de l'établissement de la carte sédimentaire du littoral algérien. 1ère tranche. Etude sédimentologique par province (Mission 5). Rapport de synthèse (Mission 6). *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, 60 p.
- LEM, 2002.** Etude de protection de la plage de Zéralda. Etude en modèle réduit physique. Rapport de Synthèse (Mission 4). *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, pp 04-13.
- LEM, 2005.** Actualisation de l'étude de protection du rivage marin de la ville de TENES. Etude sur modèle réduit physique en canal à houle. *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, pp 01-13.
- LEM, 2006.** Etude pour la protection des infrastructures du GTGC/Cherchell. Etude sur modèle réduit physique en canal à houle. *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, 71p.
- LEM, 2009.** Rapport1, Collecte et analyse des données de base. Octobre 2009. *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, 28 p.
- LEM, 2010.** Etude d'aménagement du Port de pêche et de plaisance à Cap Djinet. Etude d'ensablement du Port. *Laboratoire d'Etudes Maritimes, Alger*, 35p.
- Levoyl. F, et Monfort. O, 2002.** Les transports sédimentaires sur les côtes sableuses, retour d'expérience sur la fiabilité des principales techniques de mesures. *VII^{ème} Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Anglet, France, 15-17 mai 2002*. <http://www.paralia.fr> - DOI:10.5150/jngcgc.2002.040-L, pp 393-400.
- Migniot. C, 1977.** Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. *Grenoble, La Houille Blanche N°1, 1977*, pp 9-47.
- Migniot. C, 1973.** Modèles à fonds mobiles, Facteurs hydrodynamiques intervenant sur les modèles sédimentologiques, Cours sur les techniques de l'hydraulique expérimentale. *Publication du Laboratoire Central d'Hydraulique de France*, 47 p.
- Migniot. C, 1989.** Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral. Cours enseigné à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat et à la Faculté des Sciences d'Orsay-Paris Sud. *Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Sogreah-Lchf. N°51078 R.2.*, 105 p.
- Mignot. E, Tanguy. J M et Pons. F, 2002.** Modélisation morpho-dynamique des fonds autour des brise-lames. *VII^{ème} Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Anglet, France, 15-17 mai 2002*, ISBN 2-9505787-6-4, pp 179-186.
- Millot. C, 1989.** La circulation générale en Méditerranée occidentale. Aperçu de nos connaissances et projets d'études. *Annales de géographie. n° 549, XCVII*. pp 498-515.
- Miossec. A, 1998.** La question du recul des côtes « Erosion marine, les réponses ». IGARUN, Université de Nantes. *Ed : Mappemonde 52 (1998.4)*, 06 p.
- Oliveros. C, 1986.** Etude de l'érosion du littoral entre l'étang de Terrenzana et le Grau de l'étang de Diana à Tallone (Haute Corse). Synthèse sur la dynamique sédimentaire et propositions d'action. *Bureau de recherches géologiques et minières BRGM, service géologique régional Corse*, 47p.
- Ottmann. F, 1965.** Introduction à la géologie marine et littorale. *Ed : Masson et C^{ie}, Paris*, pp 07-49.
- Ouahsine. A, 2008.** Rapport d'activités 2005-2008. Laboratoire d'Hydraulique Numérique LHN. Université de Technologie de Compiègne. *Ed : Commun UTC-CETMEF-CNRS, Compiègne*, 19 p.
- Paskoff. R, 2003.** Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution. 3ème édition; *Ed : Masson, Paris*, 257 p.
- Richard. P et Pestour. J L, 2003.** Le modèle physique, outil privilégié de communication avec les riverains pour les projets d'aménagement torrentiel. *Colloque SHF « Quels modèles physiques pour le XXI^{ème} siècle ? »*. Lyon, 08-09 octobre 2003, 08 p.

- Riviere. A, 1977.** Méthode granulométrique, technique et application. Ed : Masson, Paris. *Techniques et méthodes de sédimentologie*, 170 p.
- Ramoge, 2002.** La défense des plages contre l'érosion. *Guide à l'attention des maîtres d'ouvrages*, Monaco, 25p.
- Sabatier. F, Lambert. A, Chaibi. M, Samat. O, Provansal. M, 2002.** Morphodynamique du profil de plage en milieu microtidal : du relevé de terrain au modèle mathématique et numérique. *Symposium « Geomorphology: from expert opinion to modelling »*, Strasbourg, France, 26-27 April 2002, pp 357-360.
- Saint-Cast. F, Castelle. B, Bonneton. P, et Caltagirone. J P, 2002.** Modélisation des écoulements induits par la houle sur les plages d'Aquitaine. *VII^{ème} Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier*, Anglet, France, 15-17 mai 2002. <http://www.paralia.fr>- DOI: 10.5150/jngcgc.2002, 003-S, pp 23-30.
- Samat. O, 2007.** Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Université Aix-Marseille I – Université de Provence. UFR des Sciences Géographiques et de l'Aménagement. *Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (UMR 6635-CNRS). Thèse de Doctorat*, 264 p.
- Sanchez Angulo. M, 2000.** Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. *Université de Caen - Basse Normandie. U.F.R. Sciences*, 88 p.
- SOGREAH, 1972.** Mission d'expertise à El Kala, Tichy, Moretti, Sidi-Ferruch, Zéralda, Tipaza-Club et Tipaza-Plage. Du 31/01 au 04/02/1972. *Rapport général R_72011*, pp 10-50.
- SOGREAH, 1972.** Tipaza-Club. *Rapport général, R_76054*, pp 20-34.
- SOGREAH, 1973.** Protection du complexe touristique de Tipaza-Matares. Campagne d'observations en nature. *Rapport général, R_74014*, pp 15-56.
- SOGREAH, 1989.** Hydrodynamique sédimentaire, principales formules à retenir pour évaluer les mouvements sédimentaires. Extrait du manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire (1^{ère} partie) du Service Technique Central P.M.V.N par Claude MIGNIOT. *Formation Continue E.N.P.C. & E.N.T.P.E*, 17 p.
- SOGREAH, 2010.** Rapport de mission, version 1. Palm Beach-Azur. *Sogreah Consultants, Alger*, 83 p.
- Spielmann. K, Astruc. D et Thual. O, 1998.** Modèle numérique d'évolution du profil d'une plage sableuse. Université d'Aix-Marseille II et INP Toulouse. <http://www.paralia.fr>- DOI:10.5150/jngcgc.1998, 015-S, 09 p.
- SSMO, 1970.** Summary of Synoptic Meteorological Observations. *U.S Naval Weather Service Command. Mediterranean marine areas, Volume 2, October 1970*, 632 p.
- Stumpp. C, et Dupain. R, 1990.** Contribution à l'étude de la dynamique littorale en milieu estuarien. Laboratoire de Génie Civil EN.S.M., I.U.T. Saint-Nazaire, <http://www.paralia.fr>- DOI:10.5150/jngcgc.1990.023-S, 10 p.
- Suanez. S, Bruzzi. C, et Arnoux-Chiavassa. S, 1998.** Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône. Plage Napoléon et flèche de la Gracieuse. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 4, n°4, DOI: 10.3406/morfo.1998.966, pp 291-311.
- Tabet. H, Brossard. J, Colinet. et M, Jacinthe. B, 2004.** Effet de la butée de pied posée à faible profondeur sur la stabilité de talus de protection. VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004. Ed : *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement, Electricité De France EDF, R & D, France*, pp 613-620.
- Teisson. Ch, 1990.** Reculer pour mieux défendre. Protection de la plage de galets de Criel/Mer. Laboratoire National d'Hydraulique LNH, Chatou, <http://www.paralia.fr>-DOI:10.5150/jngcgc.1990.020-T, 11 p.
- Trmal. C, et Trichet. J J, 2007.** Utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Mise à jour du « rock manual ». Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (Cetmef), Compiègne. In : *Colloque SHF – AIPCN – Cetmef "Grands aménagements maritimes et fluviaux, Techniques nouvelles de conception et insertion environnementale " – Paris – décembre 2007*, pp 19-22.

Viguiet. J, 1992. Modèles en hydraulique maritime. Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie. © *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction*, pp 01-11.

Viguiet. J, 2001. Notions de dynamiques sédimentaires. Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie. © *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction*, 10 p.

Villaret. C, 2003. Modélisation du transport sédimentaire et granulométrie étendue. Etude bibliographique Programme Biparti 2001. Département Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement LNHE. *Groupe Ouvrages d'Eau et Environnement. Ed : Electricité De France EDF*, 51 p.

Villaret. C, 2004. Modélisation du transport littoral. VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004. *Ed : Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement, Electricité De France EDF, R & D, France*, pp 251-260.

Wilson. B W, 1955. Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches. *Tech Memo 73, Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers*.

Wilson. B W, 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1965. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, vol 18, no 3, pp 114-130.

Young. I R, 1999. Wind generated ocean waves. Elsevier Engineering Book Series. *Volume 2. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. First Edition 1999*, pp 07-27.

Liens internet:

<http://www.mar.ist.utl.pt/hipocas/index.asp>.....Août 2010

http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/hydro/Archive/idf/logiciel_de_visualisation_des_quantiles_pluvieux.html.....Novembre 2010

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/beisee95/group3/be12/hydrodin/hydrod.htm>

.....Octobre 2010

<http://www.littoral.ifen.fr/Telechargements.56.0.html>.....Octobre 2010

http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/MODELES/index.html.....Août 2010

<http://www.scribd.com/doc/9513617/Density-current-under-surface-waves>.....Novembre 2010

<http://www.mtp.gov.dz/GUIDE%20JURIDIQUE/domaine-public-maritime/2-Loi-n10-12-02-2002.pdf>

.....Janvier 2011

<http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=795>.....Avril 2011

http://www.anpm.gov.dz/investisseurs/lois/MIN/_fr/DEC-08-188.pdf.....Mai 2011

http://www.anpm.gov.dz/investisseurs/lois/MIN/_fr/loi_mine_2001.pdf.....Mai 2011

Liste des figures

Figure I.1: Localisation géographique de la Plage de Palm Beach Azur.	03
Figure I.2: Carte géomorphologique de la baie de Bou-Ismaïl.	04
Figure I.3 : Carte géologique de la baie de Bou-Ismaïl.	04
Figure I.4 : Statistiques du climat dans la zone de Zéralda.	05
Figure I.5 : Roses de vents, données du Ssmo au large d'Alger (1914-1970).	07
Figure I.6 : Rose des vents des données de Medatlas au point 3°00'E et 37°00'N en Méditerranée (1999-2004).	08
Figure I.7 : Roses de houles, données du Ssmo au large d'Alger (1963-1970).	11
Figure I.8 : Répartition de l'énergie de l'ensemble des houles en fonction de la direction pour les périodes les plus courantes, Méditerranée entre 2°-4° longitude Est et 37°-38° latitude Nord (KNMI 1961-1980)	13
Figure I.9 : Indexation du site de Palm Beach pour le reportage photographique.	14
Figure II.1 : Positionnement des 50 points de prélèvement sur Palm Beach Azur.	19
Figure II.2: Plan et profils topo-bathymétriques réalisés sur Palm Beach-Azur.	20
Figure II.3: Protocole de l'essai granulométrique.	21
Figure II.4 : Répartition spatiale des pélites dans la plage de Palm Beach Azur.	22
Figure II.5: Courbes granulométriques représentatives de trois groupes d'échantillons identifiés sur Palm Beach-Azur.	23
Figure II.6 : Répartition spatiale du diamètre D_{50} (μm) dans la plage de Palm Beach-Azur.	24
Figure II.7 : Répartition spatiale du diamètre D_{90} (μm) dans la plage de Palm Beach-Azur.	25
Figure II.8: Fréquence des modes les plus représentatifs dans la plage de Palm Beach-Azur.	25
Figure II.9 : Répartition spatiale du mode M1 (200 μm) dans la plage de Palm Beach-Azur.	26
Figure II.10 : Résultats de l'indice de classement S_0 dans la plage de Palm Beach-Azur.	27
Figure II.11 : Résultats de l'indice d'asymétrie SK dans la plage de Palm Beach-Azur.	27
Figure II.12 : Diagramme de Passega, résultats des sédiments de Palm Beach-Azur.	28
Figure III.1 : Localisation du Point Simar N°2070015 au large d'Alger.	29
Figure III.2 : Distribution statistique des vents moyens au large d'Alger (m/s) données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001.	31
Figure III.3 : Roses des vents moyens des données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001. Occurrences d'apparition au large par secteur et par classe de vitesse (m/s)	32
Figure III.4 : Abaque de Brestschneider. Hauteur et période significatives de la houle en fonction de la longueur du fetch, de la durée et de la vitesse du vent	36
Figure III.5 : Exemple d'un schéma d'enregistrement de houle	37
Figure III.6 : Exemple de série chronologique de houle H.	37
Figure III.7 : Exemple de l'estimation des houles annuelle, décennale et centennale.	38
Figure III.8 : Spectre de Jonswap.	40
Figure III.9 : Distribution statistique des houles moyennes (H_m m/s) au large d'Alger. Données du Point Simar-2070015 sur la période 1958-2001	41
Figure III.10 : Distribution statistique des périodes T_p (s) des houles moyennes au large d'Alger. Données du Point SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001.	43
Figure III.11 : Roses des houles des données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001. Occurrences d'apparition au large d'Alger par secteur et par classe de H_m (m/s) moyennes.	44
Figure III.12 : Roses des houles des données du point Simar-2070015 sur la période 1958-2001. Occurrences d'apparition au large d'Alger par secteur et par classe de période.	45
Figure III.13 : Emprise et bathymétrie du modèle de propagation Swan sur Palm Beach.	50
Figure III.14: Carte Shom N°3030.	50
Figure III.15 : Emprise et bathymétrie du modèle local de propagation Swan sur Palm Beach.	51

Figure III.16 : Levé bathymétrique de la côte de Palm Beach, 2009.	51
Figure III.17 : Distribution statistique des houles H_m (m) moyennes réfractées et des périodes T_p (s) à -15 m de Palm Beach. Résultats de réfraction Swan des houles au point Simar 2070015, 1958-2001	54
Figure III.18 : Roses des houles à la côte (-15m de Palm Beach). Occurrences d'apparition par secteur et par classe de H_m (m/s) moyennes réfractées obtenues par Swan (1958-2001).....	56
Figure III.19 : Roses des houles à la côte (-15 m de Palm Beach).Occurrences d'apparition par secteur et par classe de période. Houles réfractées obtenues par Swan (1958-2001).....	57
Figure IV.1: Bathymétrie de la baie de Zéralda, 1999.	60
Figure IV.2 : Profils bathymétriques réalisés dans la baie de Zéralda	61
Figure IV.3 : Grille d'échantillonnage dans la baie de Zéralda, 1999.....	61
Figure IV.4 : Répartition spatiale de la fraction fine dans la Baie de Zéralda, 1999	62
Figure IV.5 : Fréquence des modes granulométriques représentatifs de la baie de Zéralda, 1999	62
Figure IV.6: Schéma explicatif des mouvements sédimentaires engendrés par la houle.	64
Figure IV.7 : Schéma général des courants près de la côte	65
Figure IV.8 : Angle entre la crête des houles déferlantes et le trait de côte.	67
Figure IV.9 : Emprise du modèle Mopla sur Palm Beach.....	70
Figure IV.10 : Résultats de modélisation de la propagation de différentes houles entre -15m et la côte de Palm Beach avec modèle Mopla.	72
Figure IV.11 : Résultats de modélisation de la propagation de différentes houles entre -15m et la côte de Palm Beach-Azur avec modèle Mopla.	73
Figure IV.12 : Résultats de modélisation des courants côtiers selon différents cas de houles à Palm Beach-Azur avec modèle Mopla.	74
Figure IV.13 : Résultats de modélisation des courants côtiers selon différents cas de houles à Palm Beach-Azur avec modèle Mopla.	75
Figure IV.14 : Code du modèle Genesis	77
Figure IV.15 : Emprise du modèle Genesis sur Palm Beach-Azur.	77
Figure IV.16 : Calage du modèle Genesis sur la période 1999-2009. Evolution du trait de côte de Palm Beach en m/an.	78
Figure IV.17 : Traits de côte de 1999 (nature) et de 2009 (modèle Genesis) de Palm Beach.....	78
Figure IV.18 : Evolution future du trait de côte de Palm Beach en m/an sur 10 ans (2009 à 2019) calculée par Genesis	79
Figure IV.19 : Traits de côte de 2009 (nature) et de 2019 (modèle Genesis) de Palm Beach.....	80
Figure IV.20 : Levé bathymétrique issu de la carte Shom n°3030 sur Palm Beach.....	81
Figure IV.21 : Levé bathymétrique effectué en 2007 sur Palm Beach (Etude sur le port de plaisance de Zéralda)	81
Figure IV.22 : Densité des points du levé 2009 et de la carte Shom N°3030 sur Palm Beach.	82
Figure IV.23 : Différentiel bathymétrique entre le levé 2009 et la carte Shom N°3030 sur Palm Beach.....	83
Figure IV.24 : Densité des points du levé 2007 et du levé 2009 sur Palm Beach.....	83
Figure IV.25 : Différentiel bathymétrique entre le levé 2009 et le levé 2007 sur Palm Beach.....	84
Figure IV.26 : Calcul de cubature sur le différentiel du levé 2009 et de la carte Shom n°3030 de Palm Beach.....	85
Figure IV.27 : Calcul de cubature sur le différentiel des levés 2009 et 2007 sur Palm Beach.....	86
Figure IV.28 : Profils de suivi du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009.....	88
Figure IV.29 : Profils de l'évolution passée du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009.....	88
Figure IV.30 : Analyse de l'évolution moyenne et annuelle du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009.....	90
Figure IV.31 : Synthèse de l'évolution du trait de côte de Palm Beach de 1999 à 2009.	91
Figure IV.32 : Localisation des profils transversaux à étudier sur Palm Beach.....	92
Figure IV.33 : Profils transversaux P1 à P8 du levé bathymétrique 2009 de Palm Beach.....	92
Figure IV.34 : Profils transversaux P9 à P18 du levé bathymétrique 2009 de Palm Beach.....	93
Figure IV.35 : Profils transversaux P9 à P18 du levé bathymétrique 2007 de Palm Beach.....	93

Figure IV.36 : Comparaisons des profils transversaux P11, P13, P15 et P17 de la bathymétrie 2007 et 2009 de Palm Beach.....	95
Figure V.1 : Découpage de la plage de Palm Beach-Azur en 5 zones d'aménagement.....	98
Figure V.2 : Mise en place des épis.....	100
Figure V.3 : Mode de fonctionnement des épis.....	101
Figure V.4 : Schéma d'un épi en forme de T.	102
Figure V.5 : Schéma d'un front de mer.....	102
Figure V.6 : Schématisation de l'action des brise-lames.....	103
Figure V.7 : Principe de fonctionnement du système Ecoplage.....	105
Figure V.8 : Profil moyen retenu pour estimer les apports de sables sur Palm Beach.....	108
Figure V.9 : La variante de protection n°1 de Palm Beach-Azur.....	109
Figure V.10 : La variante de protection n°2 de Palm Beach-Azur.....	110
Figure V.11 : La variante de protection n°3 de Palm Beach-Azur.....	110
Figure V.12 : La variante de protection n°4 de Palm Beach-Azur.....	111
Figure V.13 : La variante de protection n°5 a et b de Palm Beach-Azur.	112
Figure V.14 : La variante de protection n°6 de Palm Beach-Azur.....	112
Figure V.15 : Coupe-types de la variante n°1a de protection de Palm Beach.....	114
Figure V.16 : Coupe-type de la variante n°1b de protection de Palm Beach.	115
Figure V.17 : Vue en plan des brise-lames hauts de la variante n°2 de protection de Palm Beach.	118
Figure V.18 : Section-type des brise-lames hauts de la variante n°2 de protection de Palm Beach.	118
Figure V.19 : Section-type des brise-lames bas de la variante n°3 de protection de Palm Beach.....	119
Figure V.20 : Section-type des boudins géotextile immergés de la variante n°5 a de protection de Palm Beach.....	121
Figure V.21 : Section-type des boudins géotextile immergés de la variante n°5 b de protection de Palm Beach.....	121
Figure V.22 : Evolution Genesis du trait de côte en m/an sur 10 ans (2009-2019), variante n°2 de protection de Palm Beach.....	125
Figure V.23 : Position du trait de côte évalué par Genesis en m/an sur 10 ans (2009 nature -2019 modèle), variante n°2 de protection de Palm Beach.....	125
Figure V.24 : Evolution Genesis du trait de côte en m/an sur 10 ans (2009-2019), variante n°3 de protection de Palm Beach de protection de Palm Beach.	126
Figure V.25 : Position du trait de côte évalué par Genesis en m/an sur 10 ans (2009 nature-2019 modèle), variante n°3 de protection de Palm Beach.....	126
Figure V.26 : Evolution Genesis du trait de côte en m/an sur 10 ans (2009-2019), variante n°4 de protection de Palm Beach.	127
Figure V.27 : Position du trait de côte évalué par Genesis en m/an sur 10 ans (2009 nature-2019 modèle), variante n°4 de protection de Palm Beach.....	127
Figure VI.1 : Vue de face du canal à houle.	138
Figure VI.2 : Profil type du brise-lames de la protection n°3 retenue sur Palm Beach.....	141
Figure VI.3 : Pose de la maquette du brise-lames dans le canal et remplissage en eau.	141
Figure VI.4 : Canal à houle, dispositif mécanique de génération des houles.....	143
Figure VI.5 : Chambre de pilotage liée au canal et dispositif électronique de génération des houles.	144
Figure VI.6 : Exemple d'un résultat d'impression après la génération d'une houle annuelle.	144
Figure VI.7 : Profil type de la variante initiale de protection de Palm Beach (en canal à houle)	150
Figure VI.8 : Profil type de la variante initiale Bis de protection de Palm Beach (en canal à houle).	150
Figure VI.9 : Profil type de la variante 1 de protection de Palm Beach (en canal à houle).....	153
Figure VI.10 : Profil type de la variante 2 de protection de Palm Beach (en canal à houle).....	156
Figure VI.11 : Profil type de la variante 2 Bis de protection de Palm Beach (en canal à houle)..	158
Figure VI.12 : Schéma du bassin à houle (modèle, génération, acquisition) réalisé pour la protection de Palm Beach.....	169
Figure VI.13 : Travaux de construction des fonds bathymétriques dans le bassin à houle.....	170

Figure VI.15 : Pose des maquettes des brise-lames sur le fonds reproduits en bassin et remplissage en eau.....	171
Figure VI.16 : Chambre de pilotage lié au bassin et dispositif électronique de génération des houles.....	173
Figure VI.17 : Plan de positionnement des sondes dans le bassin à houle.....	174
Figure VI.17 : Profil type de la partie courante de la variante 1 de protection de Palm Beach (Bassin FF).....	180
Figure VI.18 : Profil type du musoir de la variante 1 de protection de Palm Beach (Bassin FF).....	180
Figure VI.19 : Profil type de la variante 2 (partie courante) de protection de Palm Beach (Bassin FF).....	182
Figure VI.20 : Profil type de la variante 3 (partie courante) de protection de Palm Beach (Bassin FF).....	185
Figure VI.21 : Cycle schématique initial de houles appliquées au modèle sédimentologique de Palm Beach.....	199
Figure VI.22 : Calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, levé à l'état initial T_0	201
Figure VI.23 : Levé du calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, Etat T_1	202
Figure VI.24 : Calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, évolution T_0 à T_1	203
Figure VI.25 : Deuxième cycle schématique de houles.....	204
Figure VI.26 : Troisième cycle schématique de houles.....	204
Figure VI.27 : Levé du calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, Etat T_3	205
Figure VI.28 : Calage sédimentologique du modèle de Palm Beach-Azur, évolution T_1 à T_3	206
Figure VI.29 : Cycle annuel définitif de houles appliqué au modèle sédimentologique de Palm Beach....	207
Figure VI.30 : Photographies de l'essai de validation.....	208
Figure VI.31 : Levé initial T_0 et présentation schématique des aménagements à la côte de Palm Beach... 210	210
Figure VI.32 : Mise en place de la protection de Palm Beach sur modèle et réalisation d'un levé T_0	210
Figure VI.33 : Levé T_1 avec la protection en brise-lames sur Palm Beach après un cycle de houles.	211
Figure VI.34 : Photographies du comportement des fonds de Palm Beach en modèle vis-à-vis de la solution en brise-lames durant l'essai T_1	212
Figure VI.35 : Profil type de rechargement sur Palm Beach en modèle.....	213
Figure VI.36 : Photographies après rechargement.....	213
Figure VI.36 : Levé T_3 avec la protection en brise-lames et le rechargement de Palm Beach.....	214
Figure VI.37 : Photographies du comportement des fonds de Palm Beach de la solution en brise-lames + rechargement à l'état T_3	215
Figure VI.38 : Profil type du rechargement en nature sur la côte de Palm Beach-Azur.....	217

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Précipitations enregistrées à la station de Bouharoun dans la région de Zéralda sur la période 1993-1996.....	06
Tableau I.2 : Températures enregistrées sur la période 1976-2005 dans la région de Zéralda (ONM).	06
Tableau I.3 : Fréquences d'apparition du vent par vitesse et par direction au large d'Alger	07
Tableau I.4 : Fréquences mensuelles (%) de la houle du large d'Alger par direction.....	11
Tableau I.5 : Répartition des états de mers par période au large d'Alger	12
Tableau I.6 : Hauteurs des houles extrêmes (m) par secteur de provenance au large d'Alger	12
Tableau II.1: Classification granulométrique des sédiments selon Folk, 1966.	21
Tableau II.2 : Classement des sédiments selon l'indice de Trask S0.	26
Tableau III.1 : Vents extrêmes (m/s) du point Simar au large d'Alger par période de retour, tout secteur confondu).	33
Tableau III.2 : Vents extrêmes (m/s) du point Simar au large d'Alger par période de retour. (Secteur WNW – N220° à N300°).....	33
Tableau III. 3 : Vents extrêmes (m/s) du point Simar au large d'Alger par période de retour. (Secteur ENE – N30° à N110°).....	34
Tableau III.4 : Vents extrêmes par direction et par période de retour au point Simar au large d'Alger.	34
Tableau III.5 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger, tous secteurs confondus.	46
Tableau III.6 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger. (Secteur WNW – N240° à N300°).....	46
Tableau III.7 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger. (Secteur NNW – N300° à N360°).....	47
Tableau III.8 : Houles extrêmes du point Simar par période de retour au large d'Alger. (Secteur NNE – N0° à N60°).	47
Tableau III.9 : Houles extrêmes au point Simar au large d'Alger par direction et par période de retour.	47
Tableau III.10 : Données pour la réfraction Swan des houles extrêmes au large d'Alger.	53
Tableau III.11 : Houles extrêmes obtenues par le Swan à -15m NGA de Palm Beach, tout secteur confondu.....	58
Tableau III.12 : Houles extrêmes obtenues par le SWAN à -15m NGA de Palm Beach. (Secteur WNW – N240° à N300°).....	58
Tableau III.13 : Houles extrêmes obtenues par le SWAN à -15m NGA de Palm Beach. (Secteur NNW – N300° à N360°).....	58
Tableau III.14 : Houles extrêmes au large (Simar) et à -15m NGA (Swan) de Palm Beach.	59
Tableau III.15 : Hauteurs de houles extrêmes obtenues par le Swan entre -8 à -10m NGA de Palm Beach.....	59
Tableau IV.1 : Transits potentiels devant la plage de Palm Beach-Azur.	67
Tableau IV.2 : Transit potentiel (m ³ /an) devant la plage de Palm Beach-Azur par année de 1958 à 2001... ..	68
Tableau IV.3 : Vitesse de début d'entraînement en fonction du diamètre du grain sur le littoral de Palm Beach.....	69
Tableau IV.4 : Cas de houle appliqués pour le calcul de propagation avec le modèle Mopla.....	70
Tableau IV.5 : Séparation et indexation des zones caractéristiques du littoral de Palm Beach.	77
Tableau IV.6 : Evolution du trait de côte de Palm Beach entre nature et modèle de 1999 à 2009.	79
Tableau IV.7 : Evolution du trait de côte de Palm Beach de 2009 à 2019 donnée par Genesis.....	80
Tableau IV.8 : Bilan sédimentaire (cubature) entre 2009 et 1867-1868 dans la côte de Palm Beach.....	85
Tableau IV.9 : Bilan sédimentaire (cubature) entre 2009 et 2007 dans la côte de Palm Beach.....	86
Tableau IV.10 : Synthèse par zone de l'évolution du trait de côte de Palm Beach entre 1999 et 2009	90

Tableau V.1 : Résultats de propagation de la houle en fonction de la hauteur d'eau à Palm Beach	107
Tableau V.2 : Amortissement (en %) des houles, analyse des résultats Mopla pour chaque variante de protection de Palm Beach.....	122
Tableau V.3 : Amortissement (en %) des courants de houle, analyse des résultats Mopla pour chaque variante de protection de Palm Beach.	123
Tableau V.4 : Amortissement (en %) de la houle H1, H2, H3, T1 et T2 à l'arrière et entre les brise-lames (variantes n°2 et n°3 de protection de Palm Beach). Analyse des résultats Mopla.....	123
Tableau V.5 : Amortissement (en %) de la houle H1, H2, H3, T1 et T2 à l'arrière des boudins immergés en géotextile (variantes n°5 a et b de protection de Palm Beach). Analyse des résultats Mopla	123
Tableau V.6 : Evolution Genesis du trait de côte (m) sur 10ans (2009-2019) par secteur et pour chaque variante de protection de Palm Beach	128
Tableau V.7 : Echelle de couleurs pour l'analyse multicritère des variantes de protection de Palm Beach.....	129
Tableau V.8 : Analyse multicritère des 6 variantes de protection de Palm Beach.....	129
Tableau VI.1 : Caractéristiques des matériaux de la protection de Palm Beach.....	140
Tableau VI.2 : Epaisseur des couches des matériaux de la protection de Palm Beach.....	141
Tableau VI.3 : Houles Hs (m) au large de Palm Beach d'Alger par direction et par période de retour.....	142
Tableau VI.4 : Statistiques de la houle à -10 m de la côte de Palm Beach.....	142
Tableau VI.5 : Hauteurs significatives Hs/ Périodes de pointe à -10 m de la côte de Palm Beach.....	143
Tableau VI.6 : Résultats des essais de la variante initiale – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.....	146
Tableau VI.7 : Résultats des essais de la variante initiale – Canal niveau $-0.5m$ NGA.....	147
Tableau VI.8 : Résultats des essais de la variante initiale Bis – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.....	149
Tableau VI.9 : Résultats des essais de la variante 1 – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.....	151
Tableau VI.10 : Résultats des essais de la variante 1 – Canal niveau $-0.5m$ NGA.....	152
Tableau VI.11 : Résultats des essais de la variante 2 – Canal niveaux ± 0.00 et $+0.5m$ NGA.....	154
Tableau VI.12 : Résultats des essais de la variante 2 – Canal niveau $-0.5m$ NGA.....	155
Tableau VI.13 : Résultats des essais de la variante 2Bis – Canal niveaux ± 0.00 , $+0.5m$ et $+1m$ NGA...157	157
Tableau VI.14 : Résultats des essais de la variante 2Bis – Canal niveau $-0.5m$ NGA.....	157
Tableau VI.15 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la protection de Palm Beach.....	170
Tableau VI.16 : Epaisseur des couches des matériaux utilisés pour la protection de Palm Beach.....	171
Tableau VI.17 : Statistiques de la houle à la côte de Palm Beach (-10 m).....	172
Tableau VI.18 : Hauteurs significatives Hs/ Périodes de pointe à la côte de Palm Beach (-8 à -10 m).....	172
Tableau VI.19 : Résultats des essais de la variante initiale-Direction N295°. Bassin FF niveaux ± 0.00 , $+1.0m$ NGA.....	175
Tableau VI.20 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N 295°. Bassin FF niveau $- 0.5m$ NGA.....	176
Tableau VI.21 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N325°. Bassin FF niveaux ± 0.00 et $+1.0m$ NGA.....	176
Tableau VI.22 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N 325°. Bassin FF niveau $-0.5m$ NGA.....	177
Tableau VI.23 : Résultats des essais de la variante initiale -Direction N265°. Bassin FF niveaux ± 0.00 , $+1.0m$ NGA.....	177
Tableau VI.24 : Résultats des essais de la variante initiale – Direction N265°. Bassin FF niveau $-0.5m$ NGA.....	178
Tableau VI.25 : Résultats des essais de la variante 1 – Direction N295°. Bassin FF niveaux ± 0.00 et $+1.0m$ NGA.....	179
Tableau VI.26 : Résultats des essais de la variante 2 – Direction N295°. Bassin FF niveaux ± 0.00 et $+1.0m$ NGA.....	181
Tableau VI.27 : Résultats des essais de la variante 3 – Direction N295°. Bassin FF niveaux ± 0.00 et $+1.0m$ NGA.....	183
Tableau VI.28 : Grandeurs hydrodynamiques obtenues suivant la similitude de Froude.....	194

Tableau VI.29 : Granulométrie du matériau artificiel.	195
Tableau VI.30 : Classes de houles dominantes avec Tp associés.....	196
Tableau VI.31 : Pourcentage de houles obtenu par secteur.....	196
Tableau VI.32 : Climat équivalent (%) (à -15m de Palm Beach). Orientation moyenne 295°	197
Tableau VI.33 : Temps en minutes correspondants aux pourcentages de houles.	197
Tableau VI.34 : Temps en minutes correspondants aux directions de houles.....	197
Tableau VI.35 : Répartition des houles en minutes par direction sur un cycle annuel.....	198
Tableau VI.36 : Méthodologie de la mise en œuvre du modèle sédimentologique.	200
Tableau VI.29 : Stock granulométrique prévu au rechargement en modèle.	213
Tableau VI.30 : Granulats et enrochements à prospector pour la protection de Palm Beach.....	218
Tableau VI.31 : Carrières et sablières à prospector pour la protection de Palm Beach.....	219

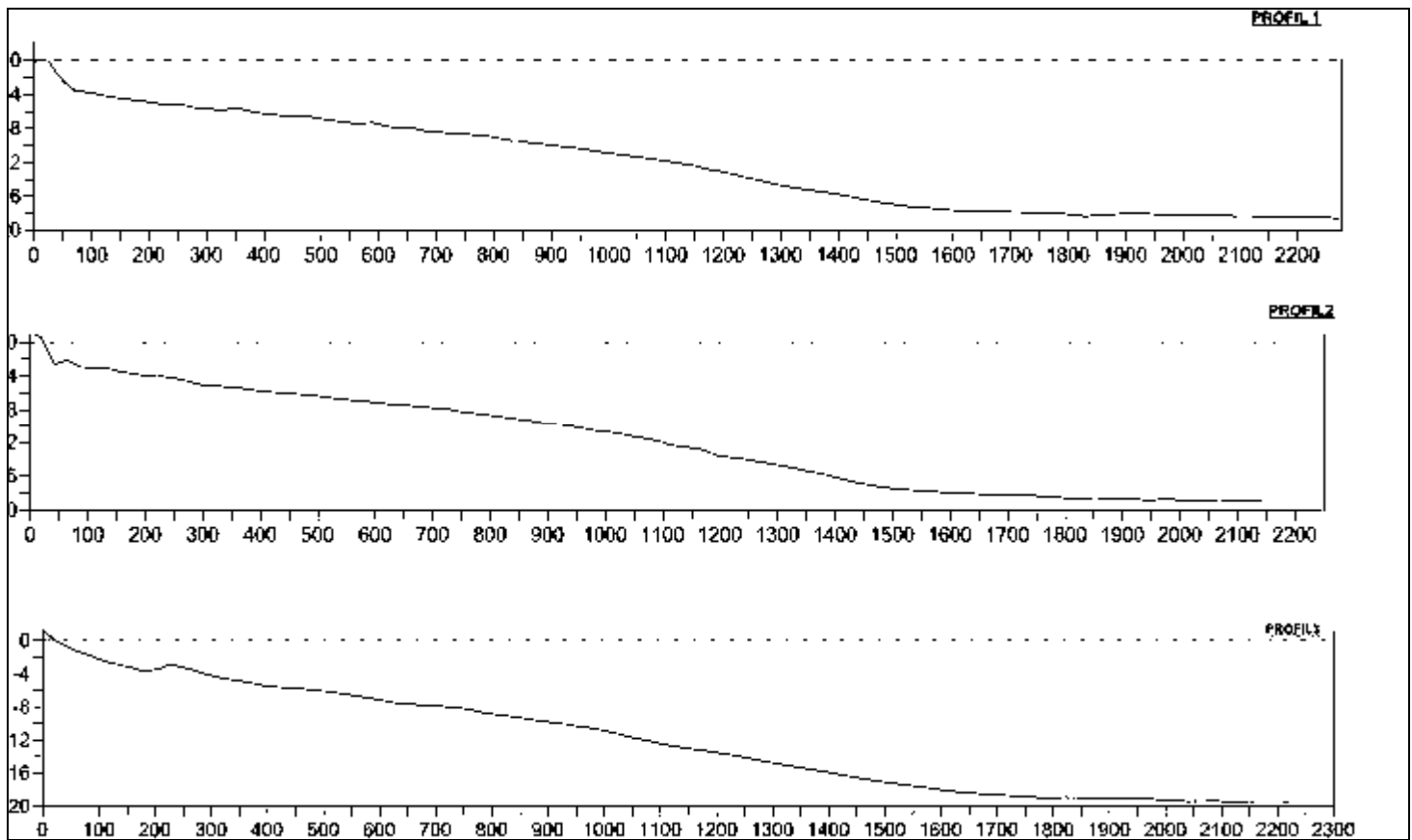
Annexes

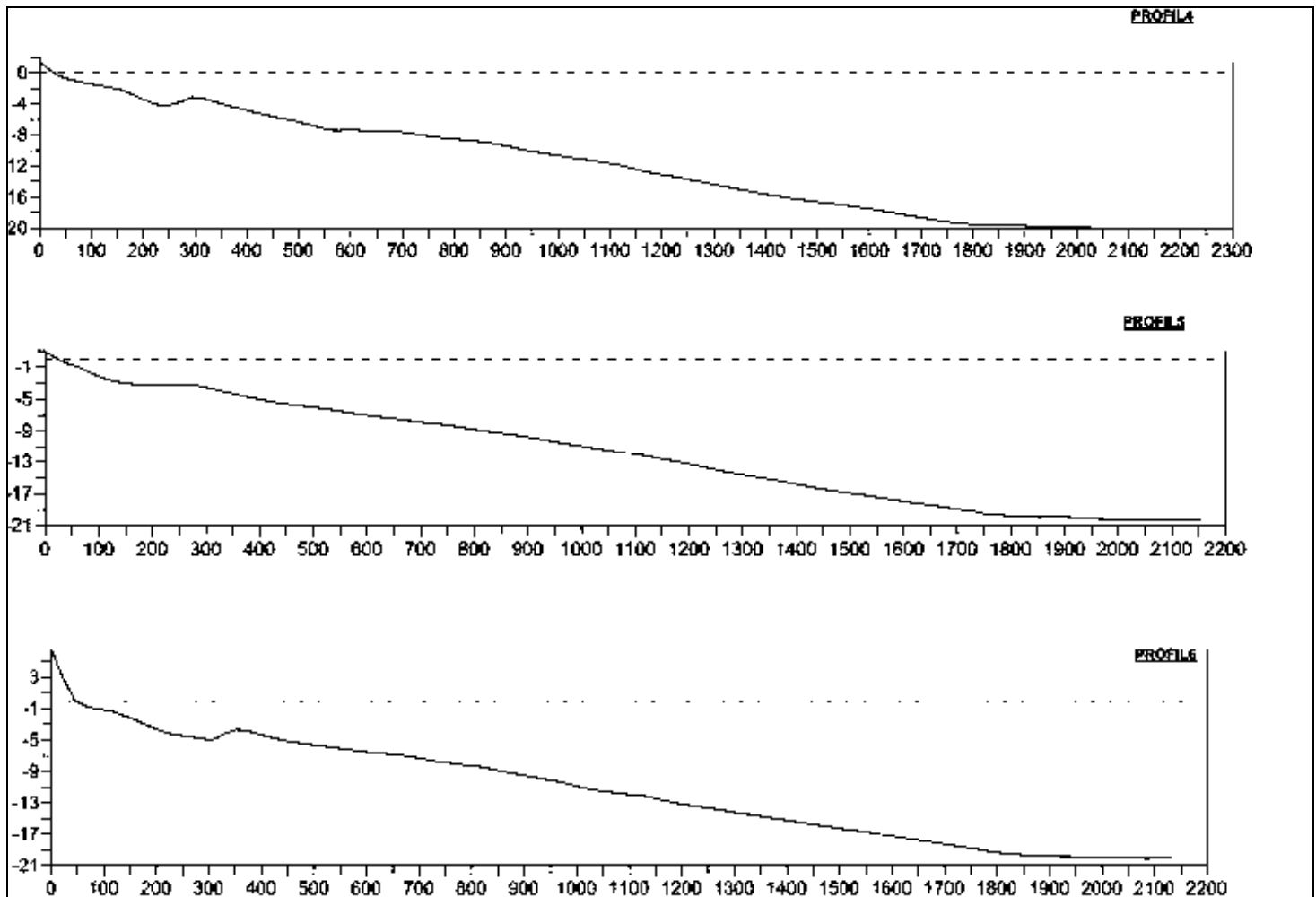
ANNEXE I

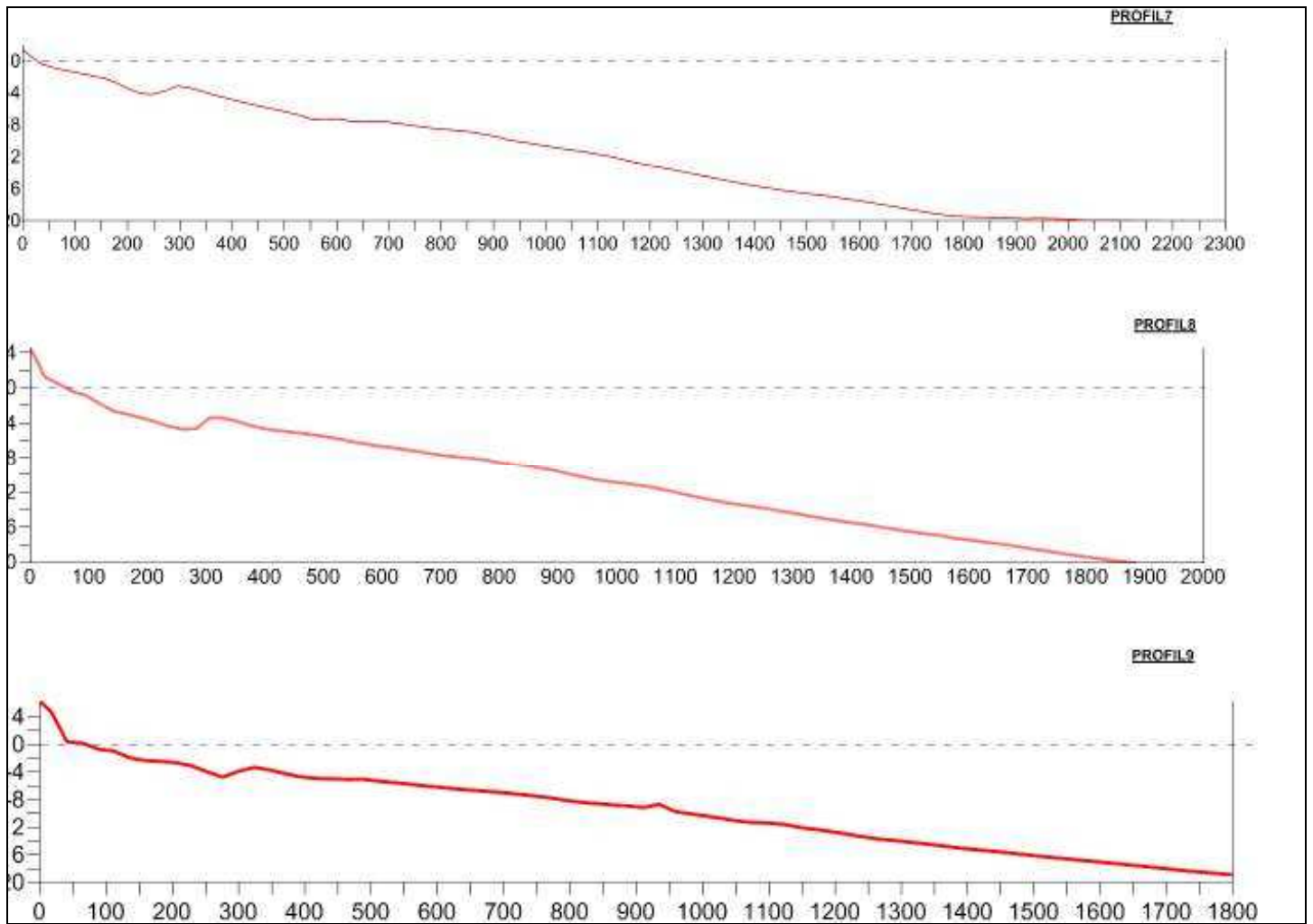
Tableau 1: Coordonnées géographiques des stations de prélèvements et nature des matériaux. Palm Beach-Azur, Octobre 2009.

N° St	Coordonnées métriques		Nature des matériaux	N° St	Coordonnées métriques		Nature des matériaux
	X	Y			X	Y	
St 01	486194,02	4066629,51	Sableux	St 26	485340,32	4066049,93	Sableux
St 02	485812,35	4066820,18		St 27	485864,83	4065676,12	
St 03	485253,98	4067099,12		St 28	485517,02	4065849,88	
St 04	486028,85	4066600,24	Rocheux	St 29	485110,56	4066052,93	
St 05	485550,29	4066839,31	Sableux	St 30	485729,94	4065631,72	
St 06	486170,79	4066428,4		St 31	485276,1	4065858,45	
St 07	485785,3	4066610,12		St 32	485786,01	4065491,93	
St 08	485276,26	4066864,43		St 33	485435,46	4065667,05	
St 09	486019,05	4066381,57		St 34	485024,54	4065872,34	
St 10	485521,73	4066630,01		St 35	485616,86	4065464,65	
St 11	486094,83	4066231,92		St 36	485183,62	4065681,09	
St 12	485715,54	4066421,41		St 37	484643,38	4065950,97	
St 13	485251,4	4066653,28		St 38	485700,61	4065311,03	
St 14	485942	4066196,49		St 39	485390,47	4065465,96	
St 15	485489,05	4066422,77		St 40	484940,35	4065690,83	
St 16	486031,45	4066040		St 41	485544,15	4065277,41	
St 17	485678,85	4066216,17		St 42	485081,39	4065508,58	
St 18	485201,72	4066454,53		St 43	485589,55	4065142,94	
St 19	485887,59	4066000,1		St 44	485322,93	4065276,13	
St 20	485422,12	4066232,64		St 45	484853,18	4065510,8	
St 21	484815,21	4066535,83		St 46	485427,65	4065112,04	
St 22	485948,51	4065857,89		St 47	484990,6	4065330,37	
St 23	485600,49	4066031,75		St 48	485482,2	4064973	
St 24	485159	4066252,3		St 49	485145,47	4065141,22	
St 25	485806,84	4065816,87	St 50	484765,46	4065331,06		

**Figure 1 : Profils topo-bathymétriques réalisés au site d'étude
(Palm Beach, profils 01 à 12).**







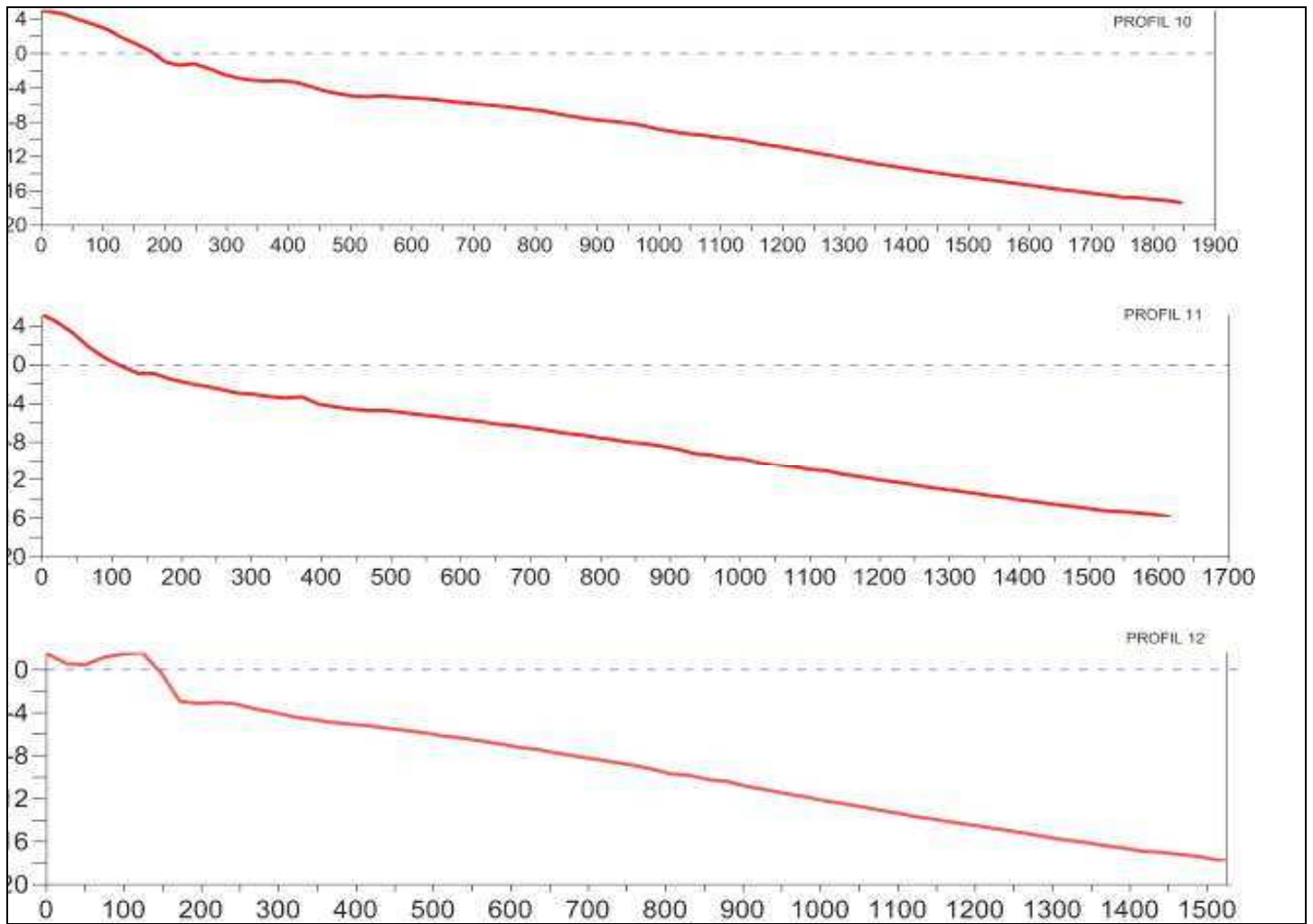
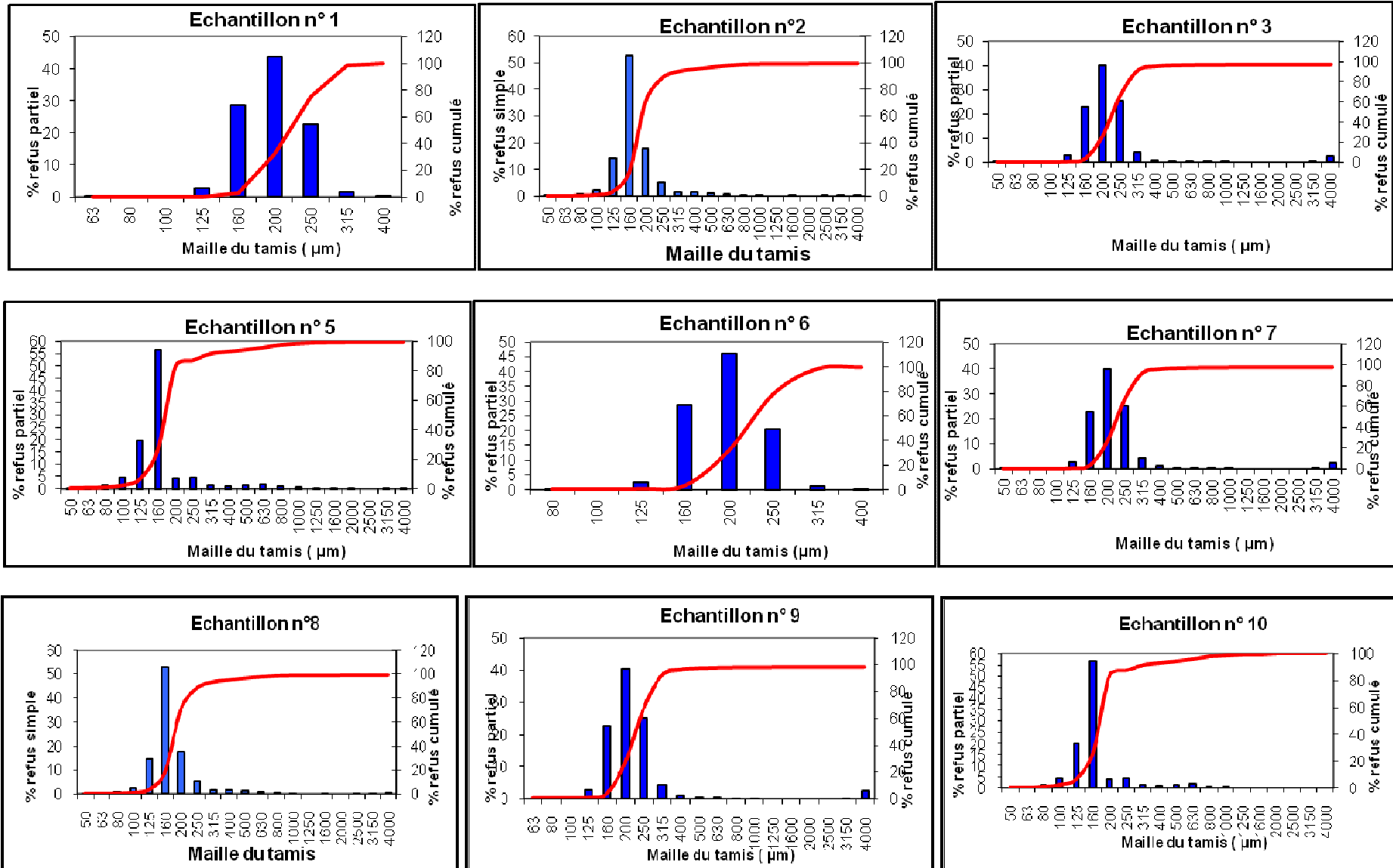
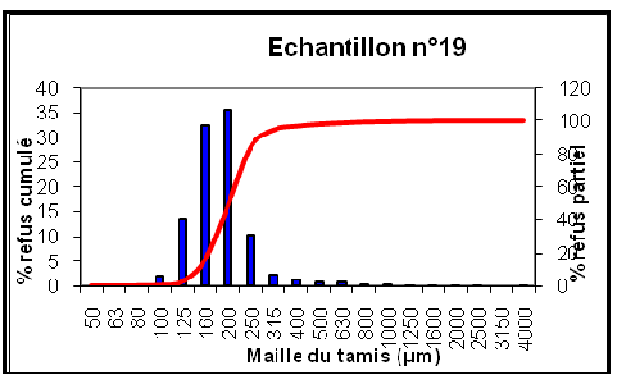
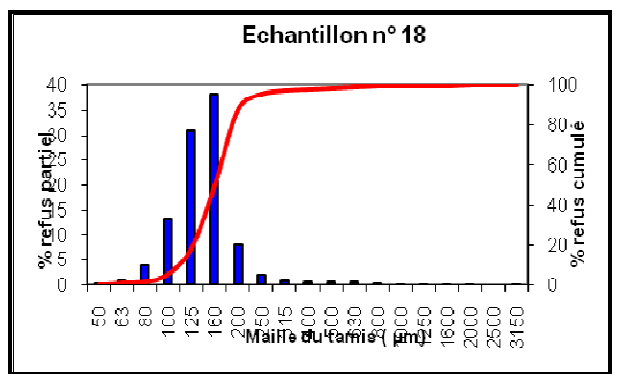
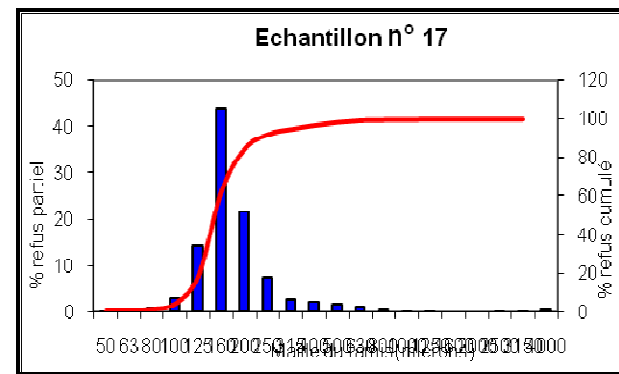
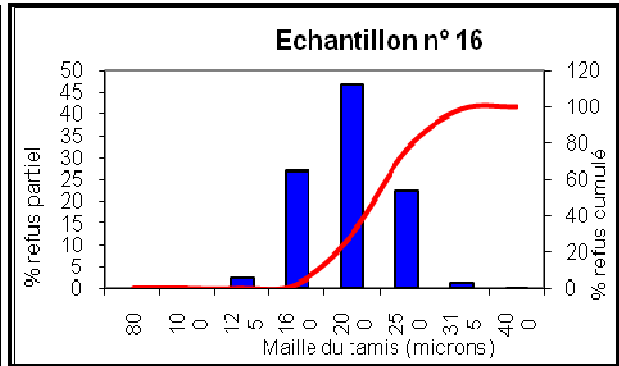
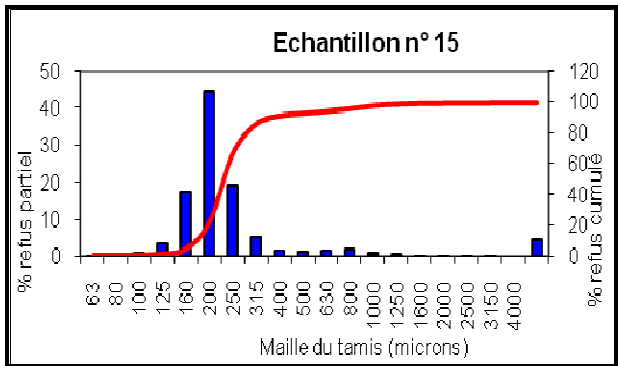
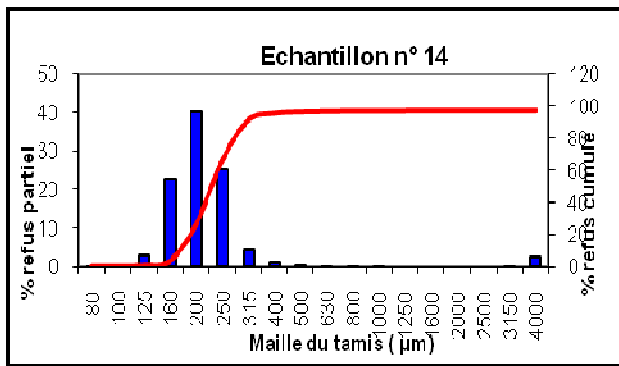
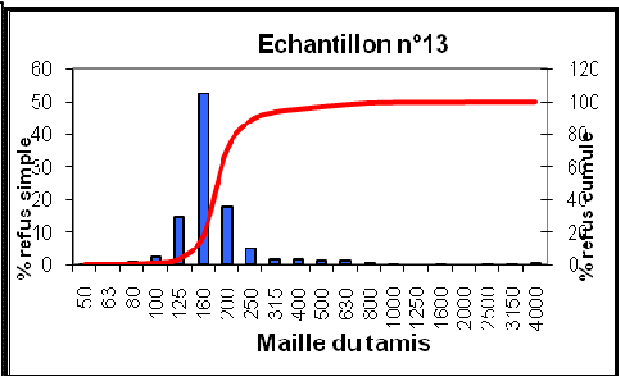
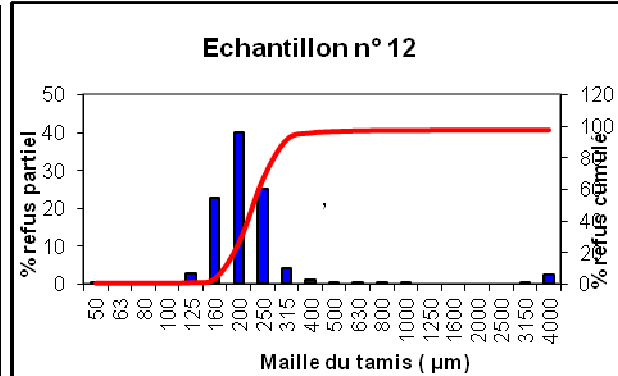
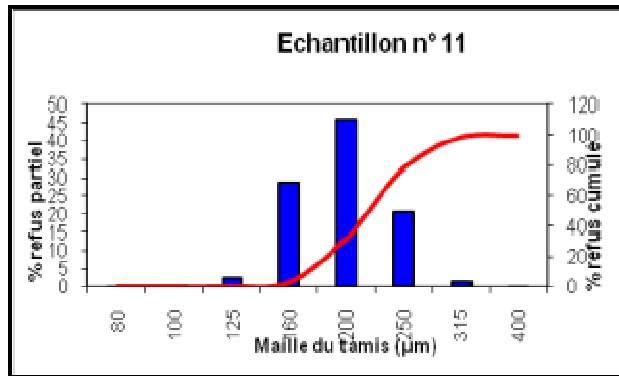
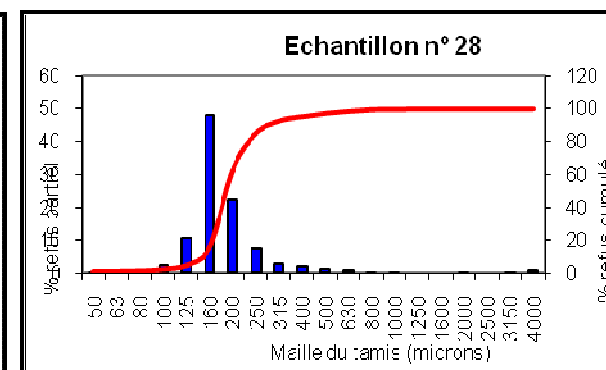
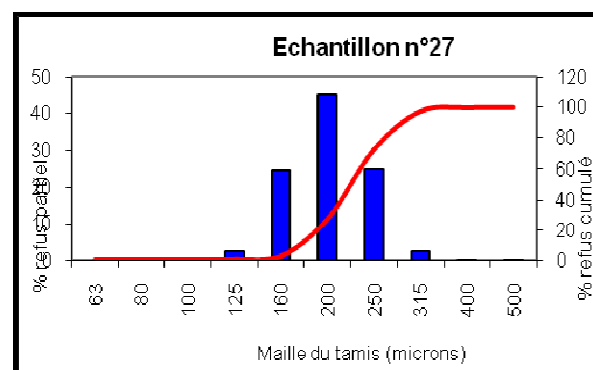
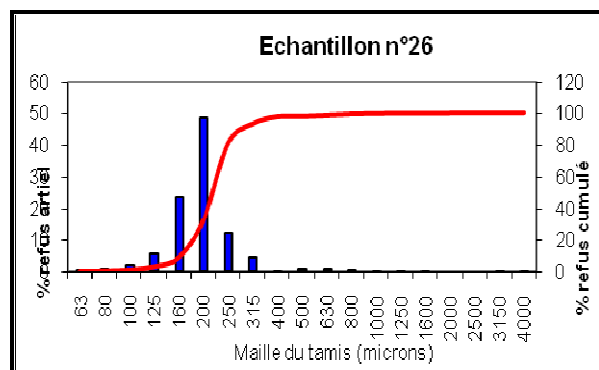
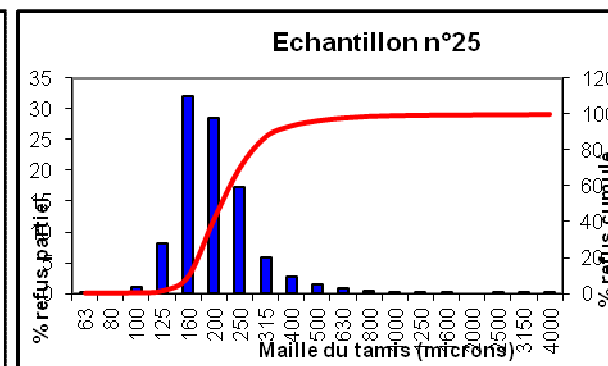
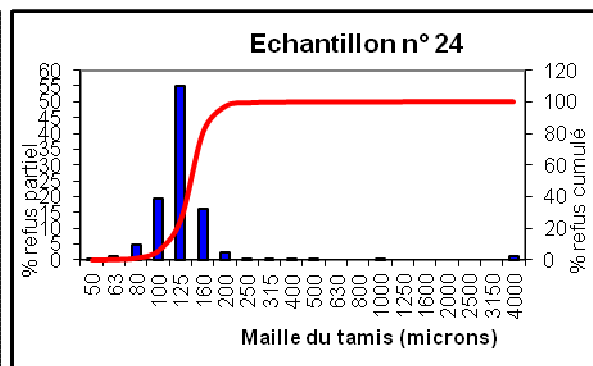
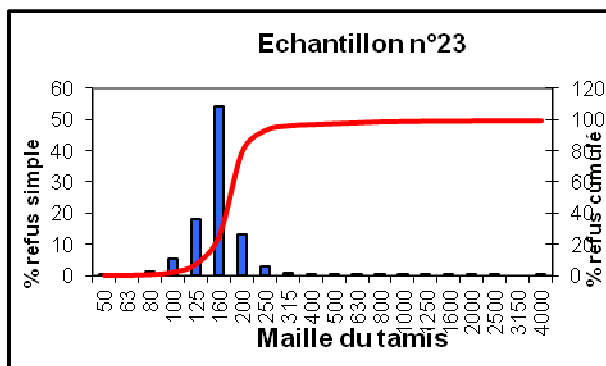
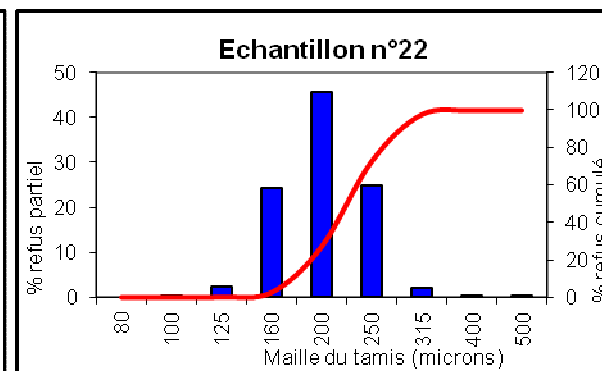
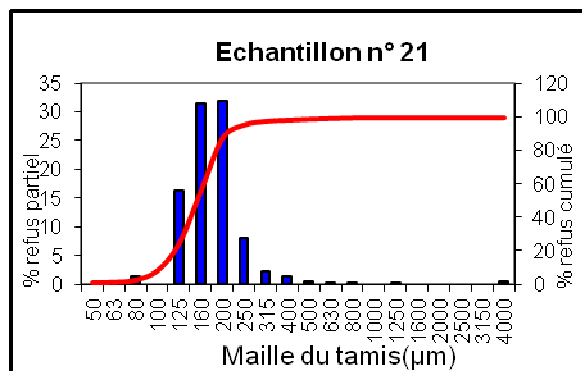
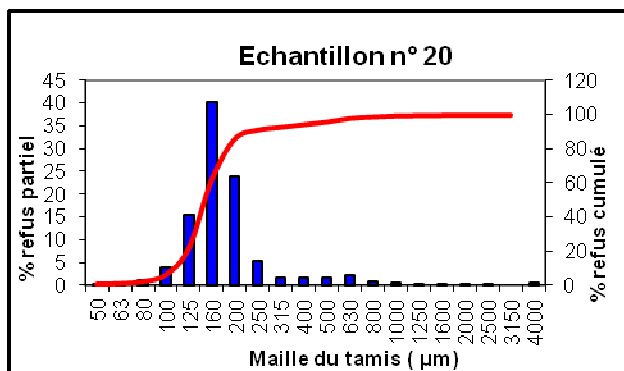
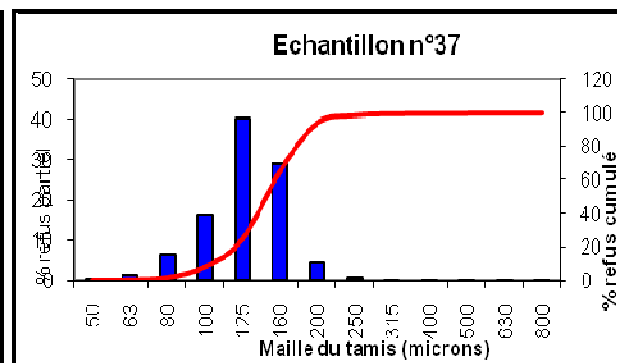
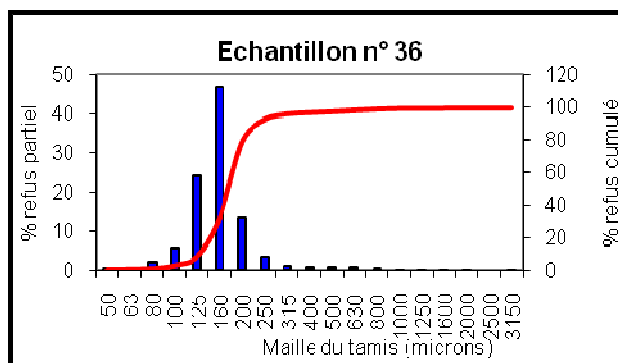
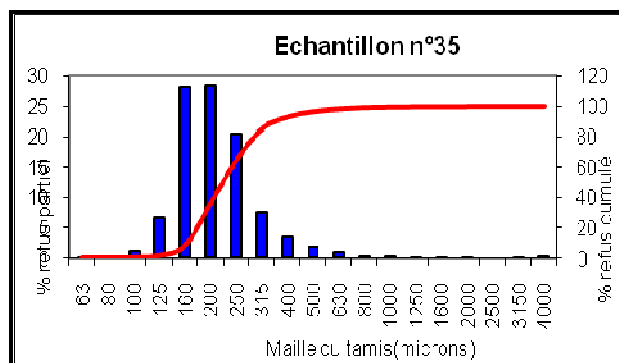
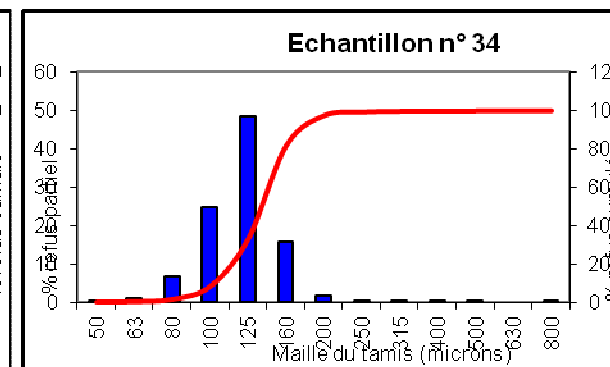
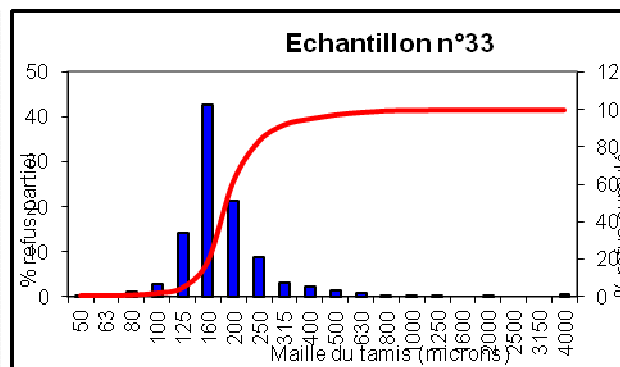
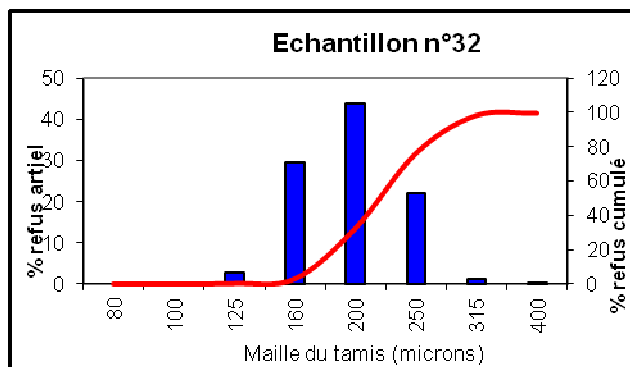
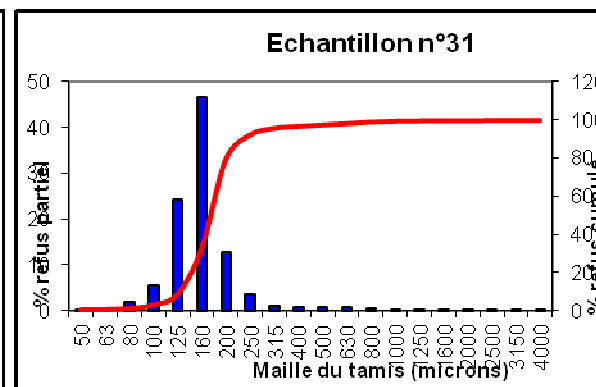
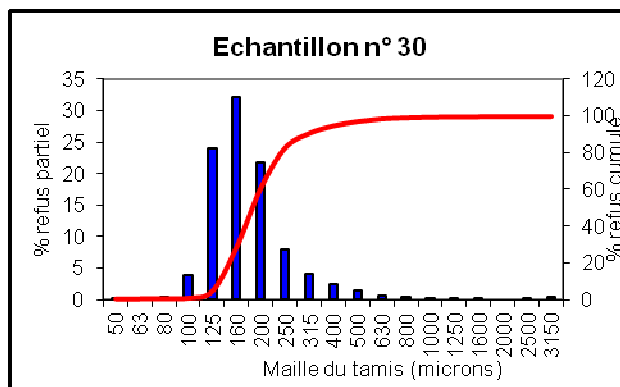
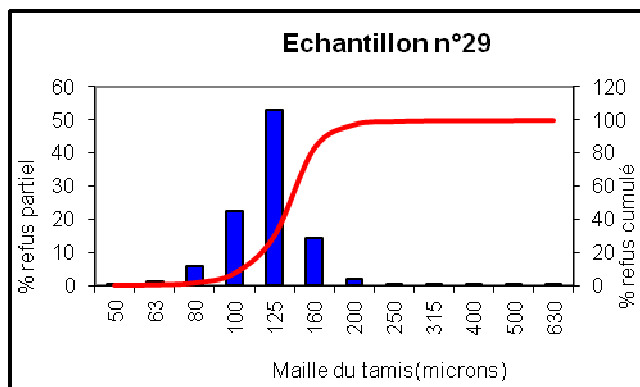


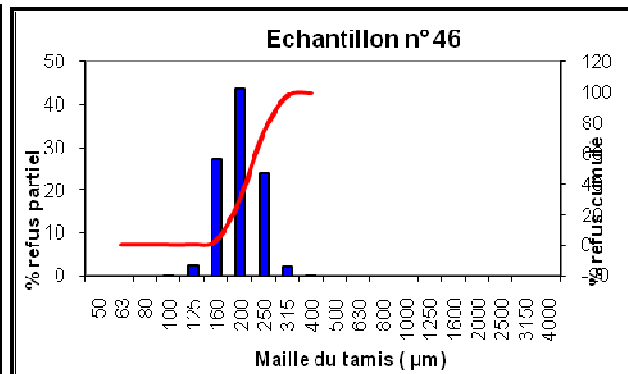
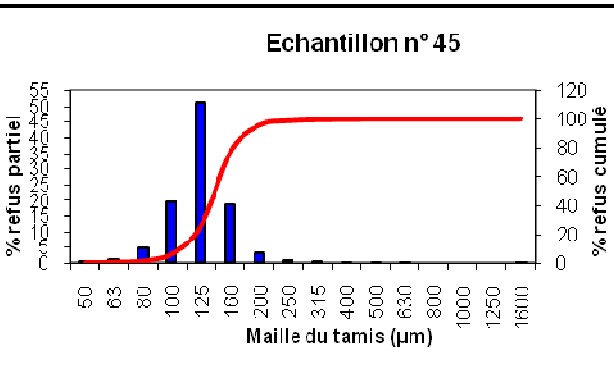
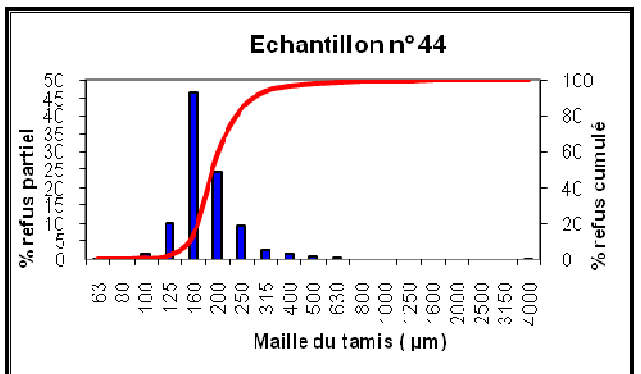
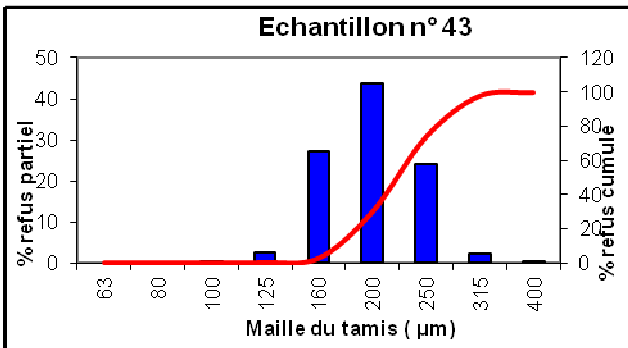
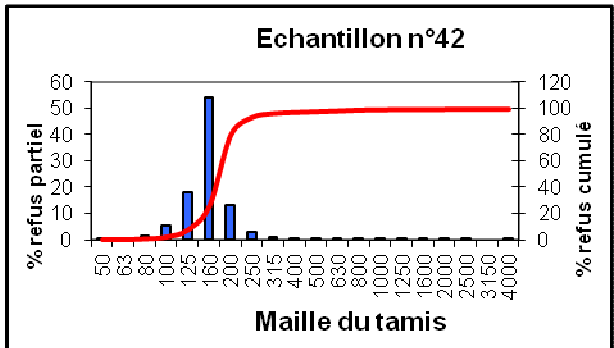
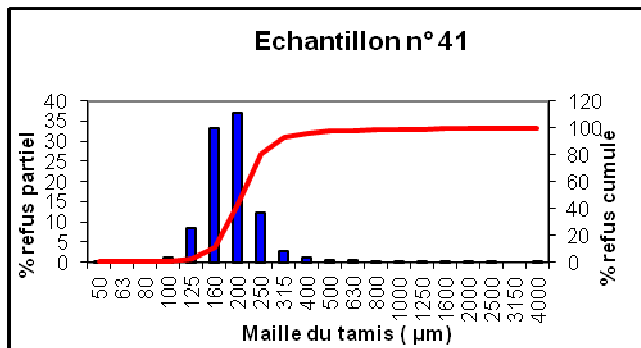
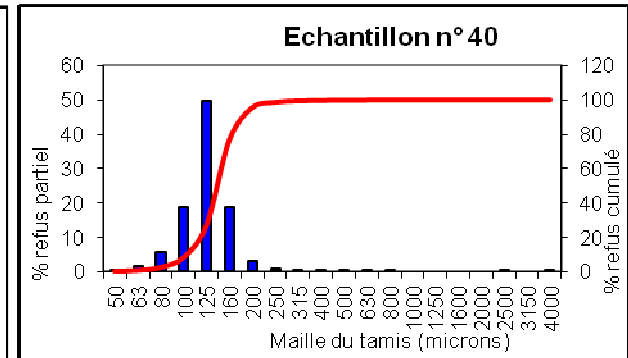
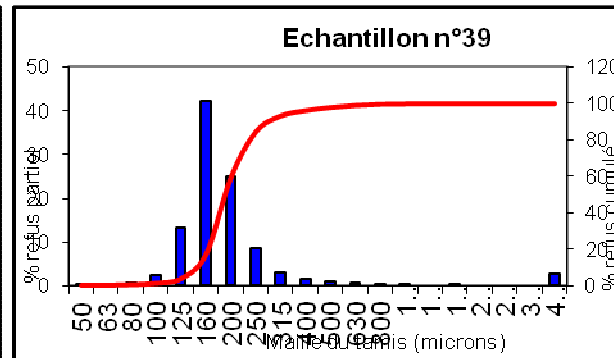
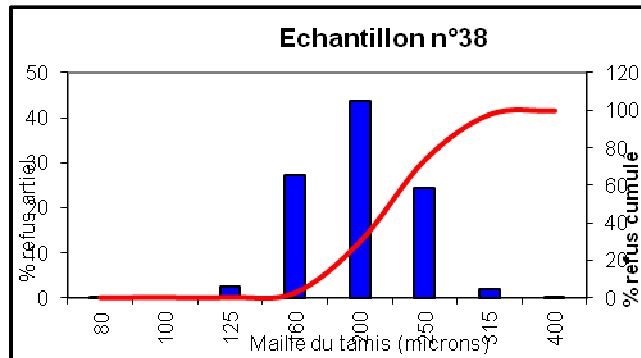
Figure 2 : Courbes granulométriques des 49 échantillons prélevés à Palm Beach.











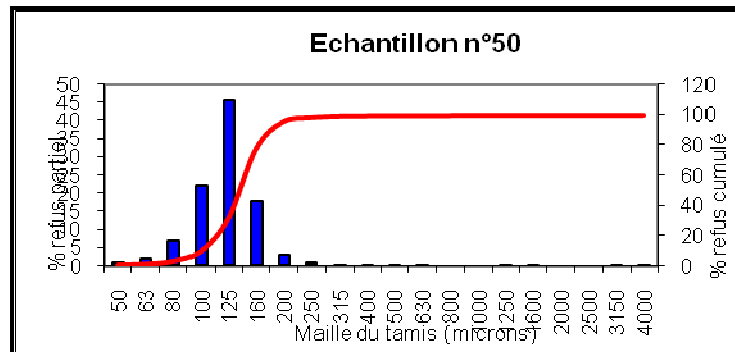
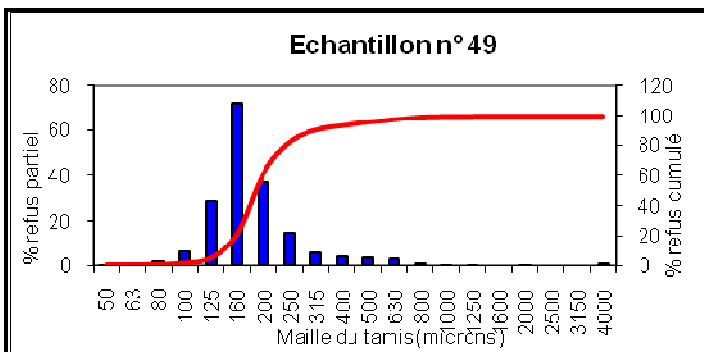
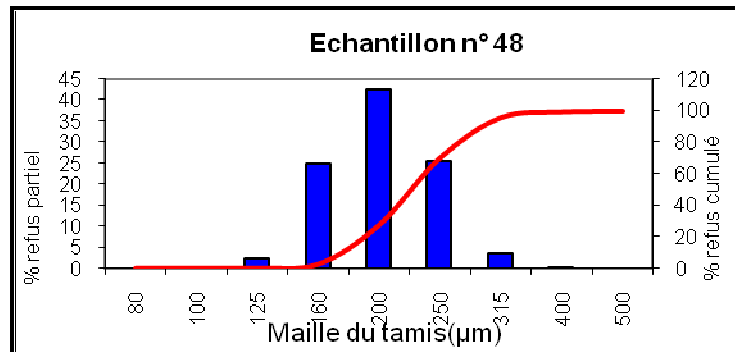
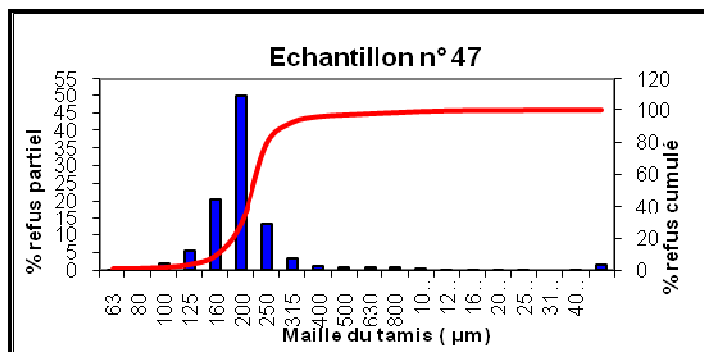


Tableau 2: Résultats des pourcentages en pélites par échantillon de Palm Beach.

Ech N°	P1(g)	P2 (g)	p1-p2/p1	p1-p2/p1%	Ech N°	P1(g)	P2(g)	p1-p2/p1	p1-p2/p1%
1	62,4	59,4	0,04807692	5%	26	60,7	56,7	0,06589786	7%
2	82,3	79,8	0,03037667	3%	27	82,7	80,4	0,02781137	3%
3	100,7	98,8	0,01886792	2%	28	95,7	93,5	0,02298851	2%
4	ROCHEUX				29	60,7	53,4	0,12026359	12%
5	96,3	91,9	0,04569055	5%	30	90,8	88,4	0,02643172	3%
6	102,4	98,7	0,03613281	4%	31	78,9	71,9	0,0887199	9%
7	62,5	59,7	0,0448	4%	32	77,2	74,9	0,02979275	3%
8	79	74,6	0,0556962	6%	33	84,1	79,9	0,04994055	5%
9	73,4	72,4	0,01362398	1%	34	65,2	50,3	0,22852761	23%
10	78,6	76,7	0,02417303	2%	35	87,9	84,2	0,04209329	4%
11	67,9	67,2	0,01030928	1%	36	85,1	80,8	0,05052879	5%
12	92	87,7	0,04673913	5%	37	68,1	61,4	0,09838473	10%
13	61,9	59,1	59,1	5%	38	87	85,4	0,0183908	2%
14	70,2	67,7	0,03561254	4%	39	88,8	85,8	0,03378378	3%
15	87,1	84,3	0,03214696	3%	40	59,2	55,3	0,06587838	7%
16	70,8	63,3	0,1059322	11%	41	64,4	60,3	0,0636646	6%
17	96,2	93,7	0,02598753	3%	42	64,4	61,4	0,04658385	5%
18	85,1	79,5	0,06580494	7%	43	90,1	88,2	0,02108768	2%
19	93,8	90,2	0,03837953	4%	44	71,6	65,9	0,07960894	8%
20	61,3	58,4	0,04730832	5%	45	78,2	72,4	0,0741688	7%
21	96,4	89,9	0,06742739	7%	46	63	57,9	0,08095238	8%
22	67,4	66,4	0,0148368	1%	47	67,9	64,6	0,04860088	5%
23	86,7	84,7	0,02306805	2%	48	76,3	73,3	0,03931848	4%
24	62,9	57,2	0,09062003	9%	49	110,2	106,7	0,03176044	3%
25	86,2	79,8	0,07424594	7%	50	80	69,2	0,135	14%

Tableau 3: Résultats des D50, D90, D99, S0 et SK par échantillon.

chantillon	D50 µm	D90 µm	D99 µm	SK	SO
1	219,5	289,4	349	1	1,1
2	183,3	269,7	877,8	1	1,1
3	228,4	310,6	4555,5	1	1,2
5	175,7	286,4	1047,5	1	1,1
6	218,5	286,1	335,5	1	1,1
7	190,1	281,9	736	1,1	1,1
8	176,7	243,7	896,7	1	1,1
9	225	499,7	4565,9	1	1,2
10	184,5	292,7	1184,5	1,1	1,2
11	219,7	288,8	346,2	1	1,1
12	187,8	296,7	1124,3	1,1	1,2
13	175,8	244,9	907,8	1	1,1
14	214,4	357,1	1419,5	1	1,2
15	184,2	301,4	1197,87	1,1	1,2
16	220,5	288,1	337,8	1	1,1
17	187,6	297,2	761,4	1,1	1,2
18	160,7	215,2	665,4	1	1,2
19	202	285,7	785,5	1	1,2
20	187,4	302,6	1145	1,1	1,2

21	153,4	215,2	535,7	1	1,2
22	223,7	293,3	364,1	1	1,1
23	188,1	296,7	772,4	1,1	1,2
24	139,4	181,6	245,8	1	1,1
25	213,4	348,8	910,8	1	1,2
26	217,1	298,1	772,1	1	1,1
27	223,9	294,4	370,8	1	1,1
28	189	294,1	749,5	1,1	1,2
29	137,3	178,5	242,2	1	1,1
30	232,1	395,6	1039,4	1	1,2
31	173,9	240,9	827,5	1	1,1
32	218,6	288	337,9	1	1,1
33	188,5	301,4	754,3	1,1	1,2
34	136,2	179,9	241,8	1	1,2
35	223,2	368,2	931,4	1	1,2
36	173,8	238,4	744,3	1	1,1
37	146	193,8	278,7	1	1,2
38	221,6	292	357,6	1	1,1
39	190,5	289,9	643,4	1,1	1,2
40	140,3	287,8	292	1	1,1
41	207,6	295,7	1004,5	1	1,2
42	176,8	236,6	896,4	1	1,1
43	221,5	292,3	363,1	1	1,1
44	190,9	288	631	1,1	1,2
45	140,4	187,2	282,8	1	1,1
46	185,2	249,5	805,4	1	1,1
47	176	241,5	872	1	1,1
48	224,9	298,9	387,3	1	1,2
49	187,8	312,3	793,3	1,1	1,2
50	138,1	186,6	296,6	1	1,2

ANNEXE II

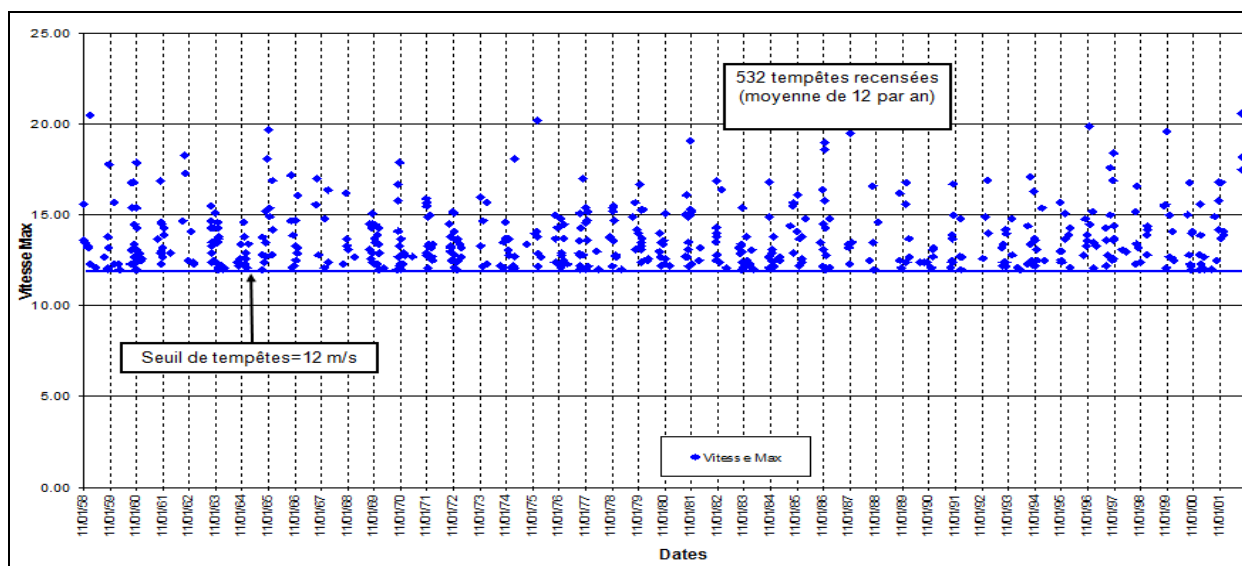


Figure 1 : Tempêtes de vent m/s du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, tous secteurs confondus (SGH, 2010).

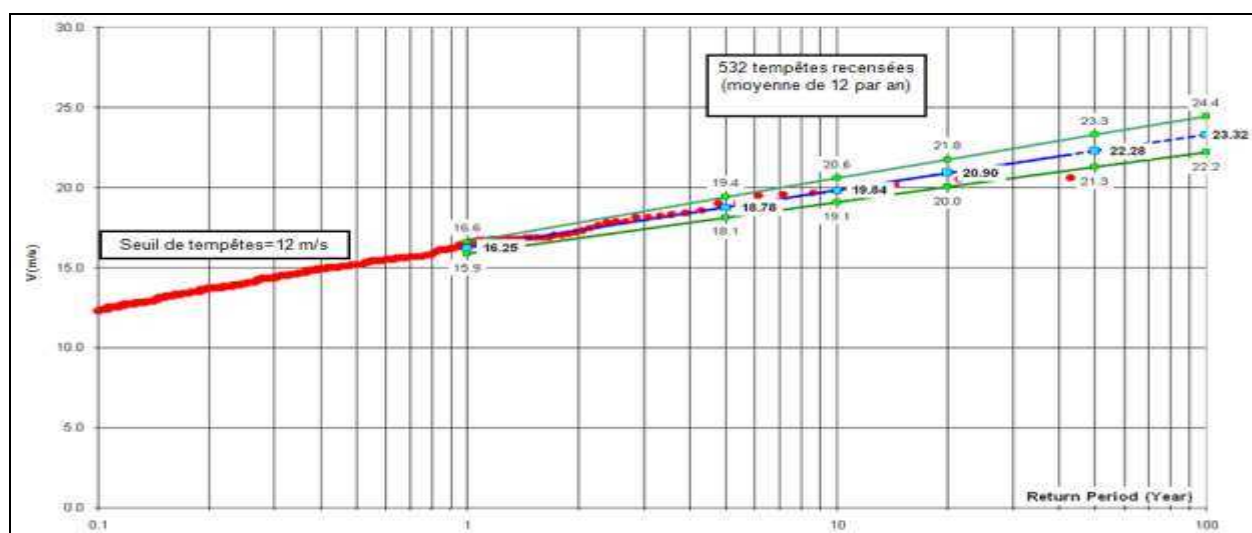


Figure 2 : Analyse des vents extrêmes (m/s) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, tous secteurs confondus (SGH, 2010).

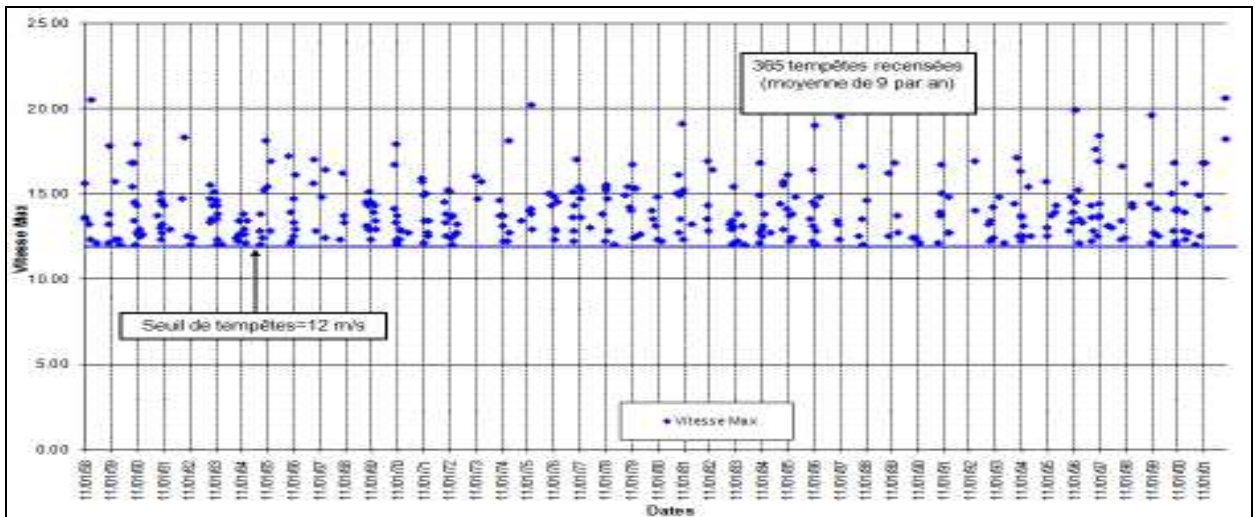


Figure 3 : Tempêtes de vent (m/s) du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, secteur WNW N220°-N300° (SGH, 2010).

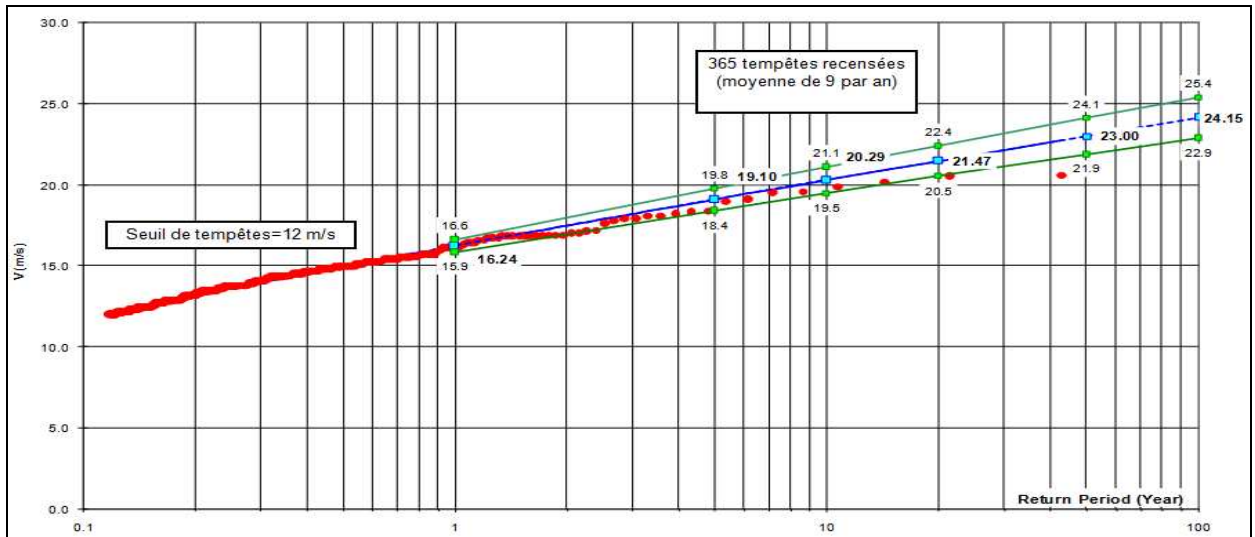


Figure 4 : Analyse des vents extrêmes (m/s) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, secteur WNW – N220° à N300° (SGH, 2010).

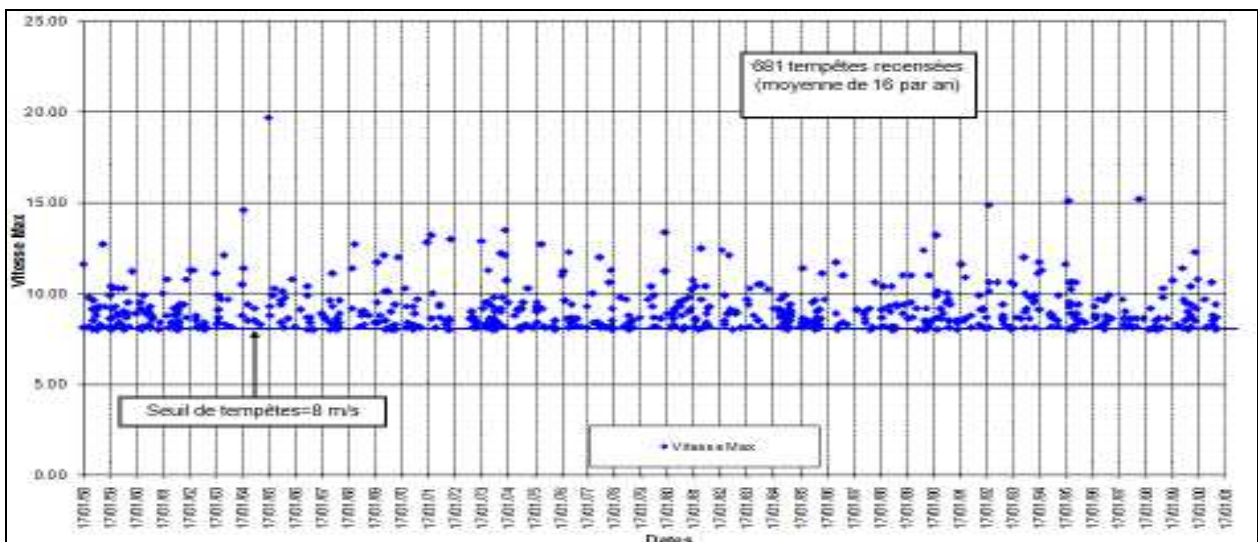


Figure 5: Tempêtes de vent (m/s) du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, secteur ENE – N30° à N110° (SGH, 2010).

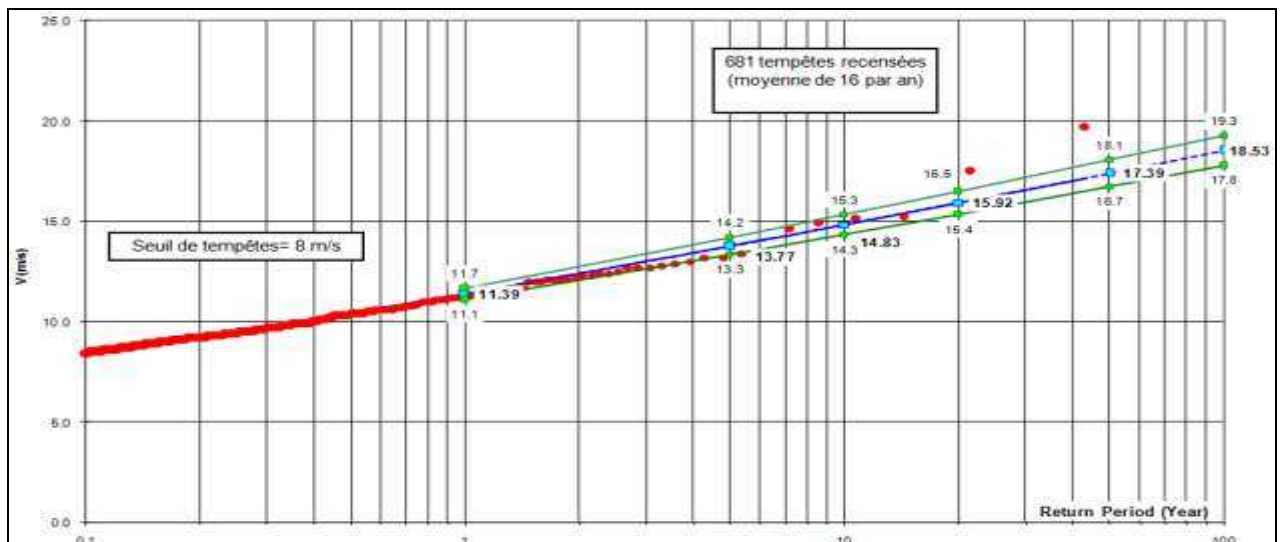


Figure 6 : Analyse des vents extrêmes (m/s) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, secteur ENE – N30° à N110° (SGH, 2010).

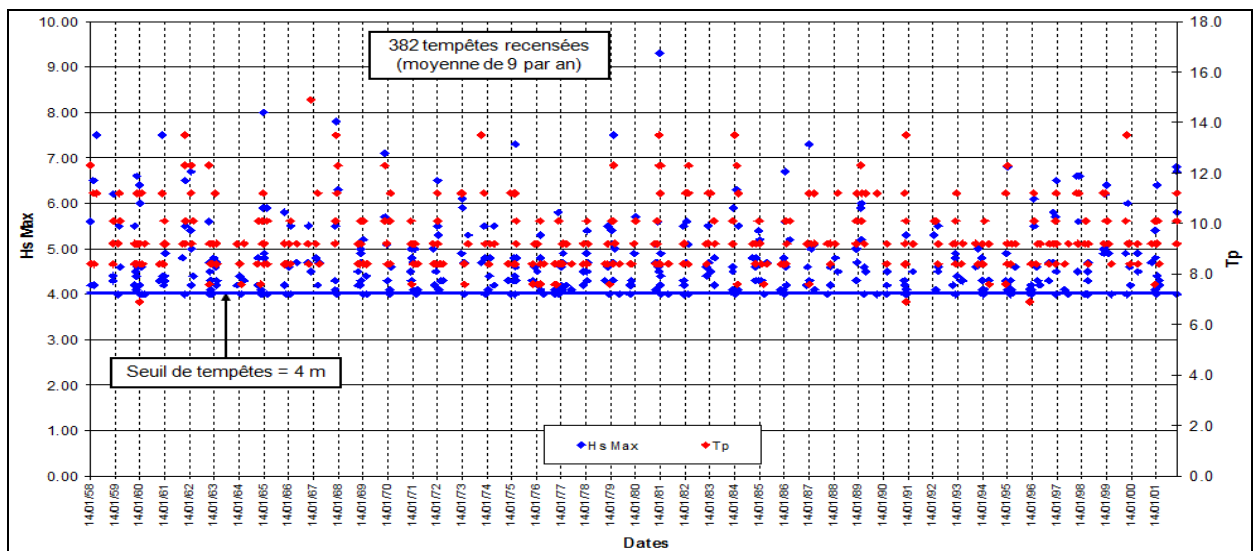


Figure 7 : Houles de tempêtes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, tous secteurs confondus (SGH, 2010).

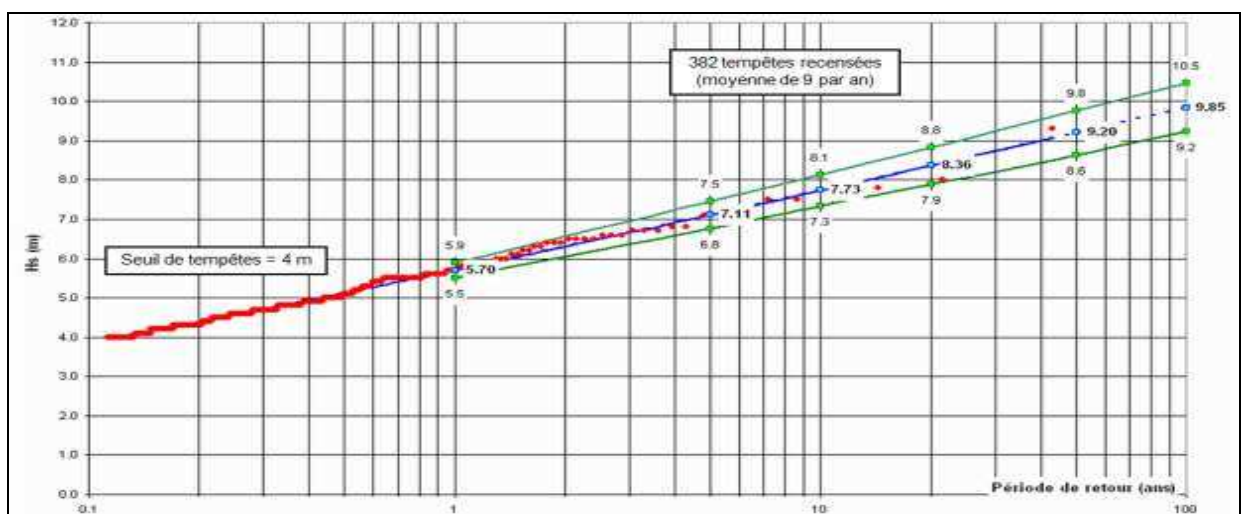


Figure 8 : Analyse des houles extrêmes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, tous secteurs confondus (SGH, 2010).

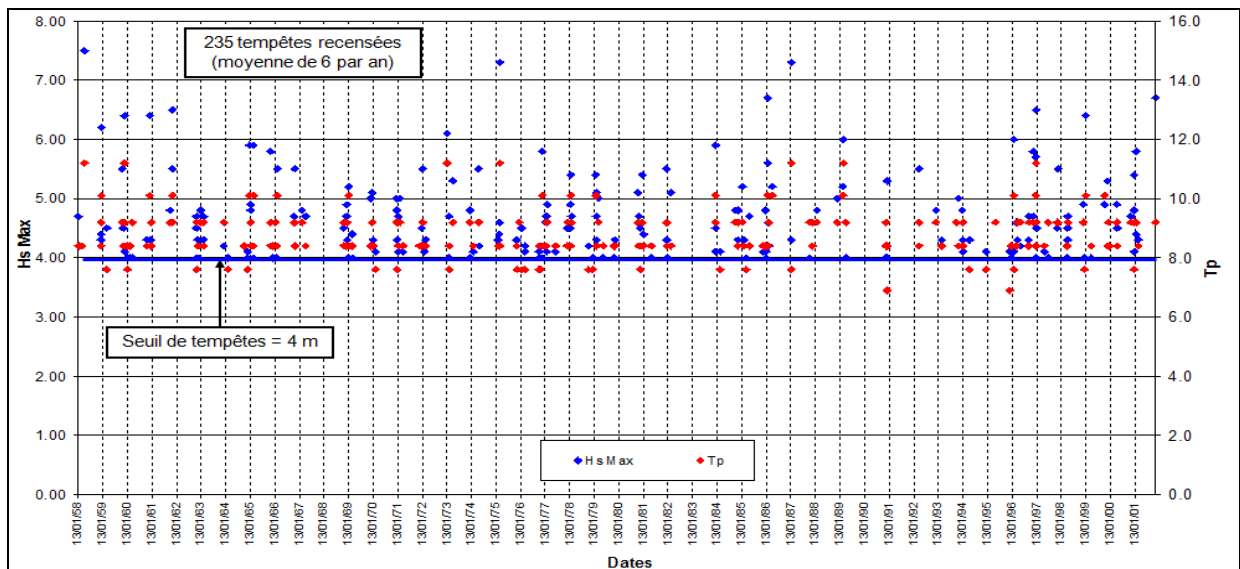


Figure 9 : Houles de tempêtes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, secteur WNW – N240° à N300° (SGH, 2010).

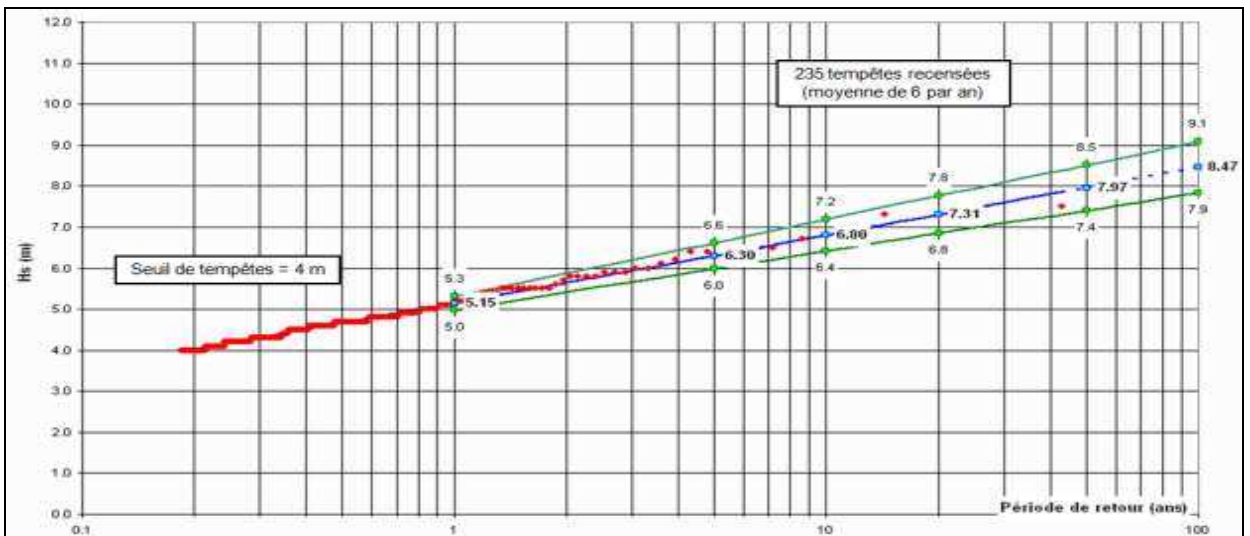


Figure 10 : Analyse des houles extrêmes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, secteur WNW – N240° à N300° (SGH, 2010).

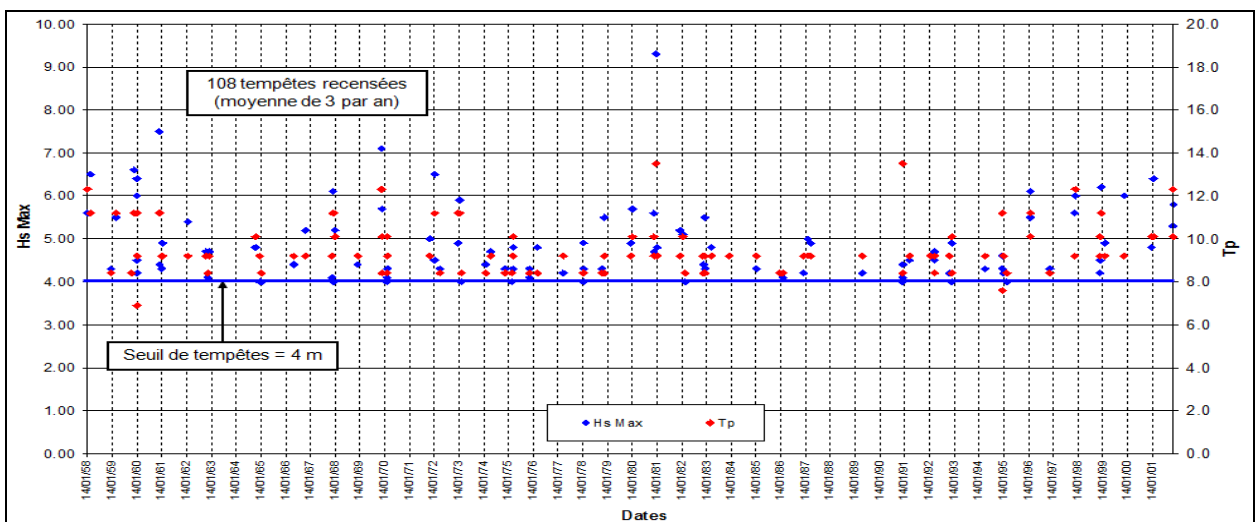


Figure 11 : Houles de tempêtes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, secteur NNW – N300° à N360° (SGH, 2010).

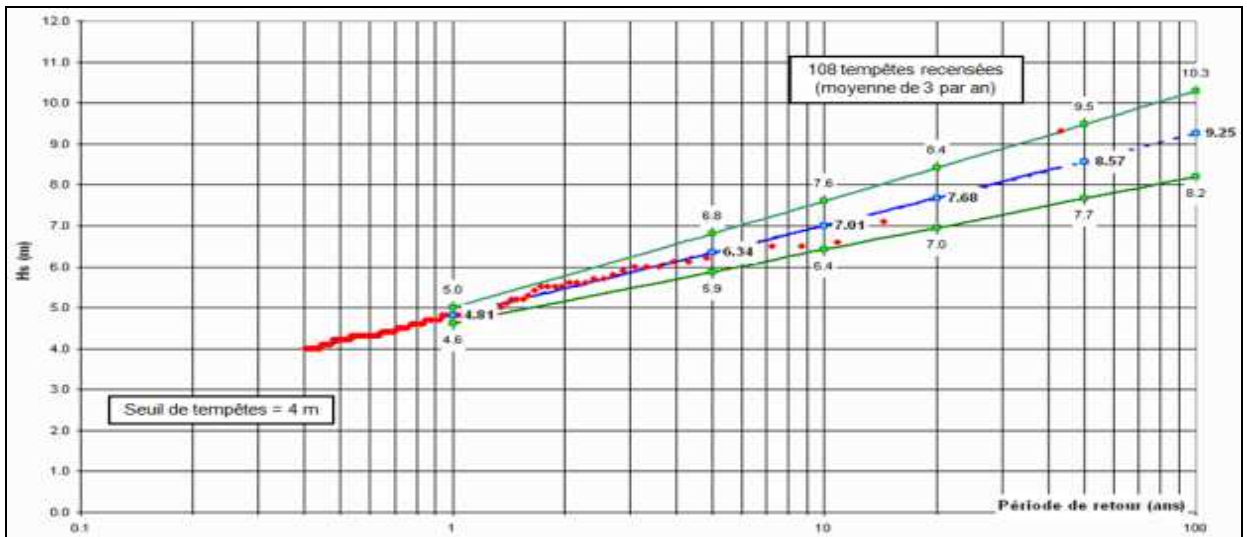


Figure 12 : Analyse des houles extrêmes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, secteur NNW – N300° à N360° (SGH, 2010).

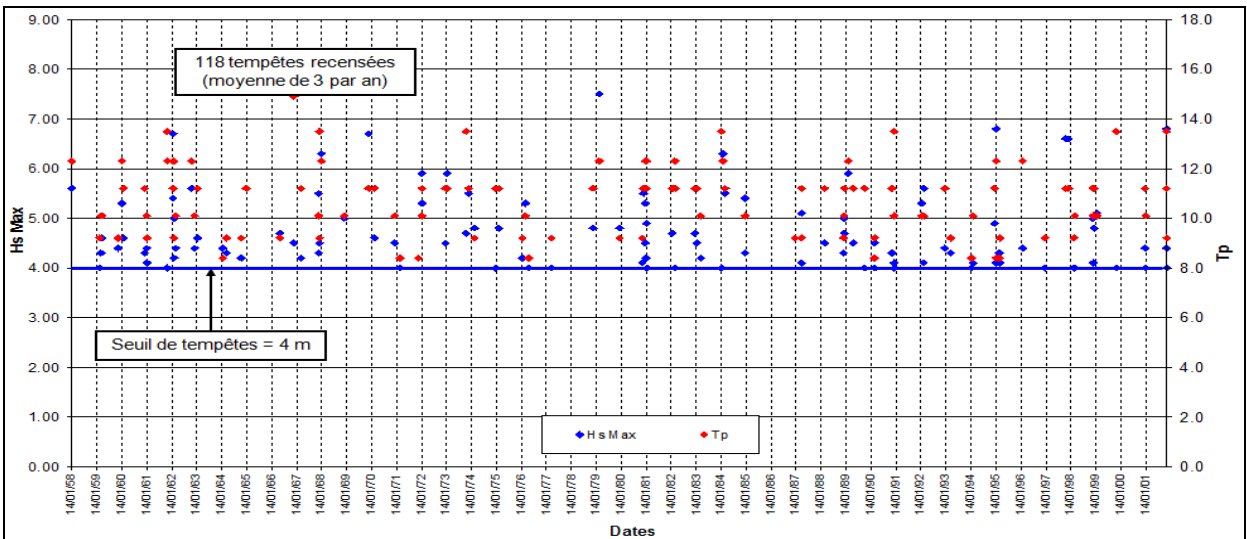


Figure 13 : Houles de tempêtes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 sur la période 1958-2001, secteur NNE – N0° à N60° (SGH, 2010).

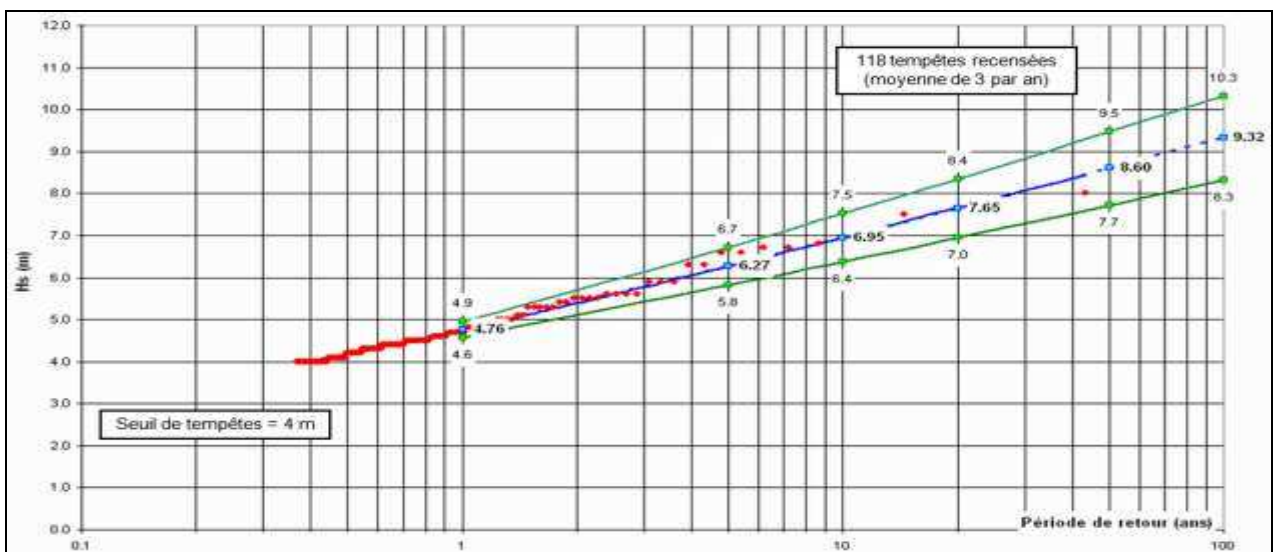


Figure 14 : Analyse des houles extrêmes (m) du point d'étude SIMAR-2070015 par période de retour, secteur NNE – N0° à N60° (SGH, 2010).

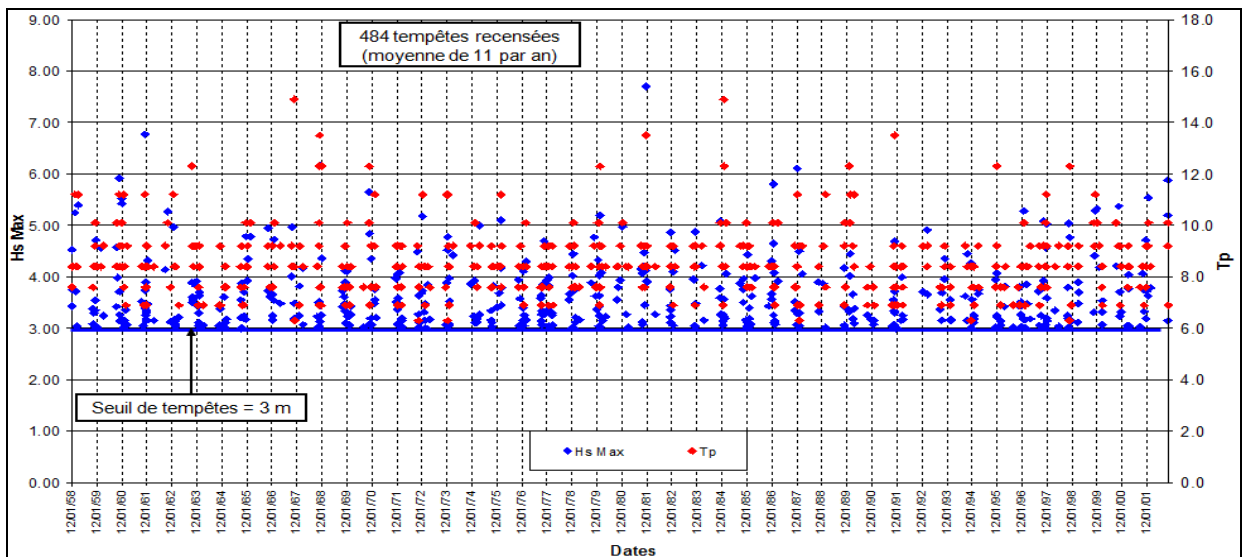


Figure 15 : Houles de tempêtes (m) à la côte de Palm Beach à -15 m NGA. Tous secteurs confondus, sur la période 1958-2001, (SGH, 2010).

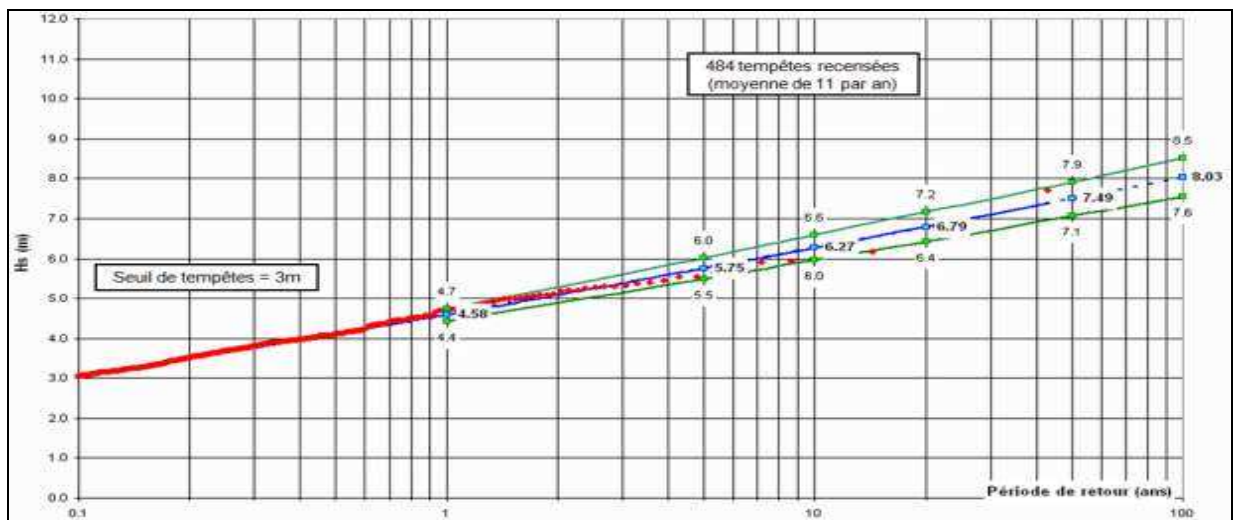


Figure 16 : Analyse des houles extrêmes (m) réfractées à -15m NGA de Palm Beach par période de retour, tous secteurs confondus (SGH, 2010).

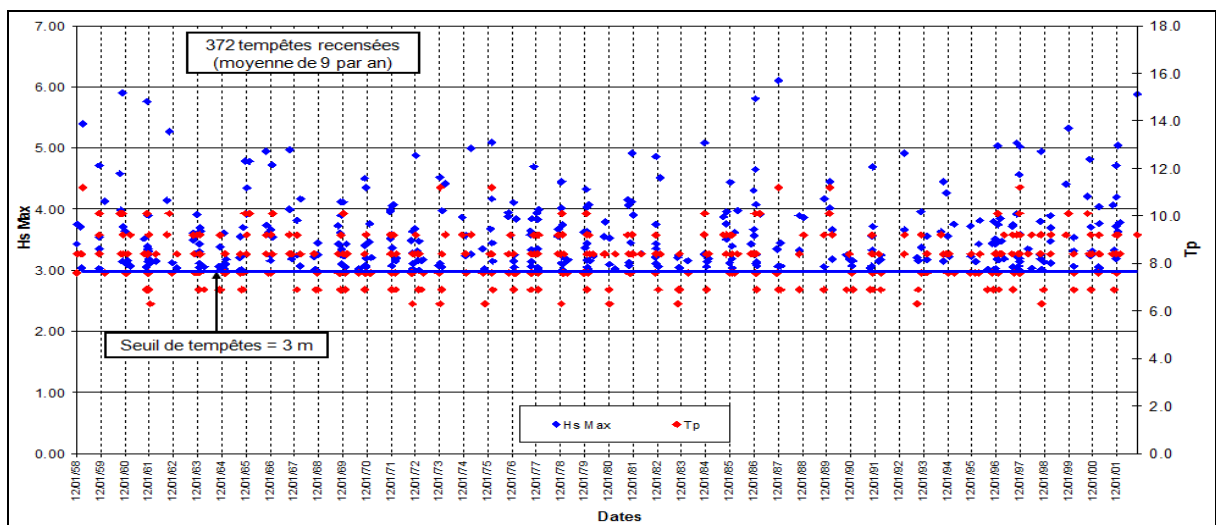


Figure 17 : Houles de tempêtes (m) à la côte de Palm Beach à -15 m NGA. Secteur WNW – N240° à N300°, sur la période 1958-2001, (SGH, 2010).

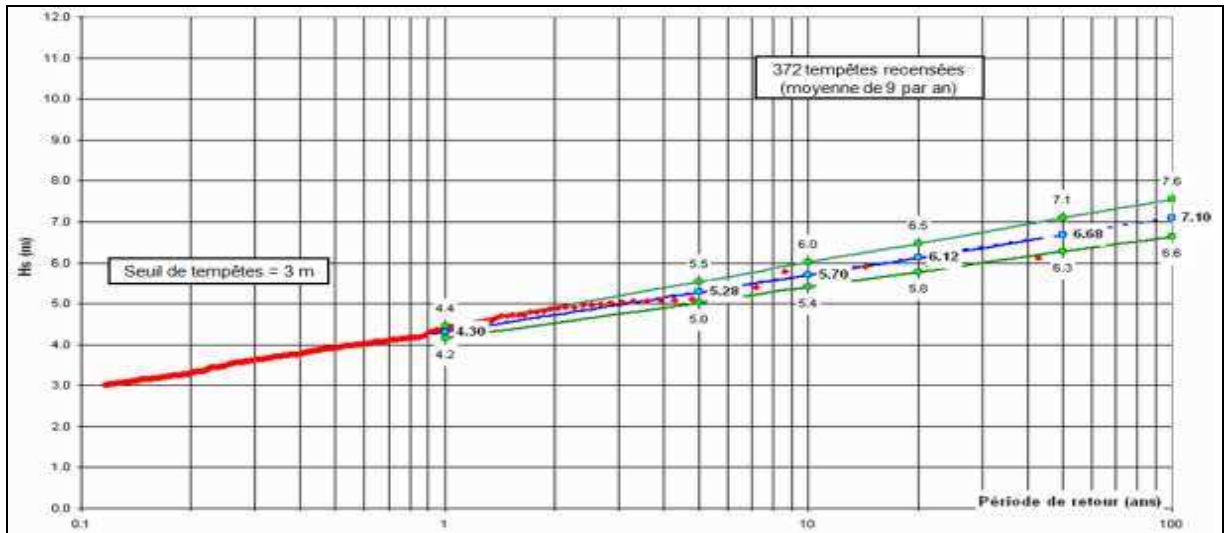


Figure 18 : Analyse des houles extrêmes (m) réfractées à -15m NGA de Palm Beach par période de retour, Secteur WNW – N240° à N300° (SGH, 2010).

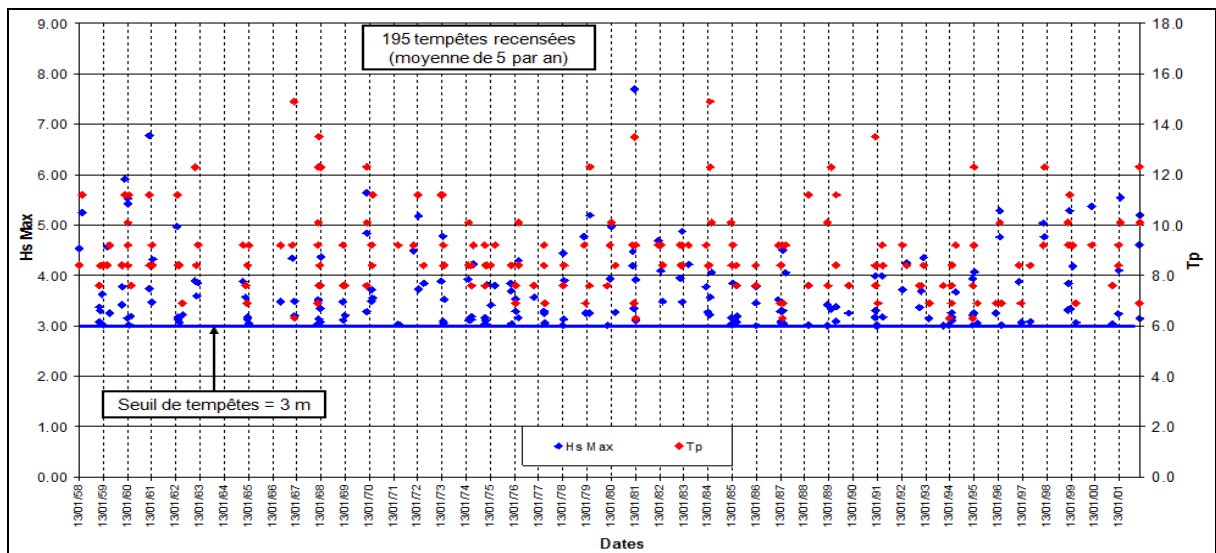


Figure 19 : Houles de tempêtes (m) à la côte de Palm Beach à -15 m NGA. Secteur NNW – N300° à N360°, sur la période 1958-2001, (SGH, 2010).

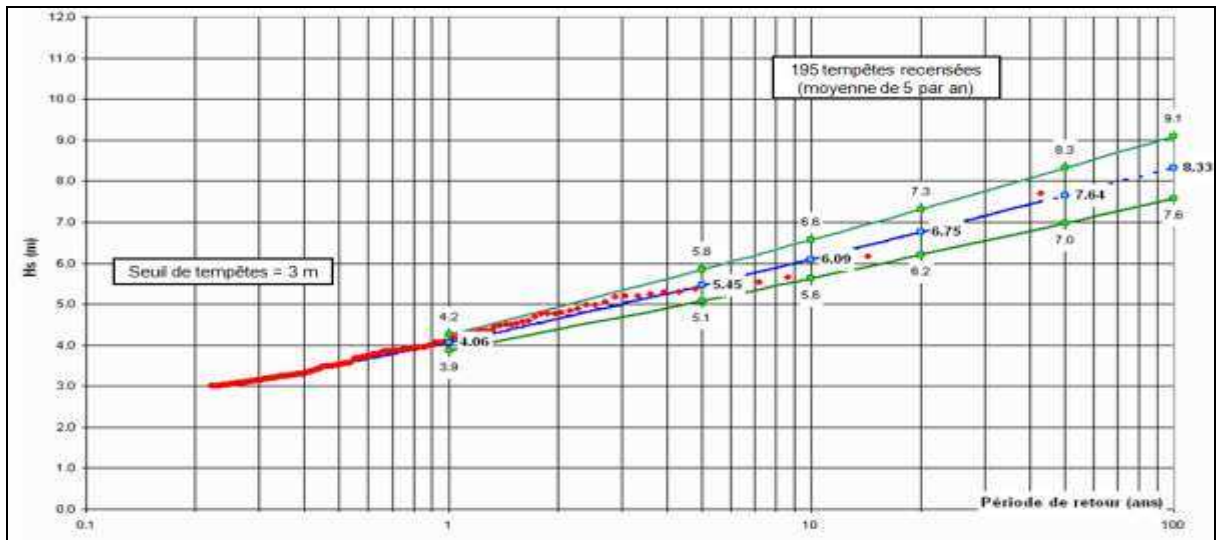


Figure 20 : Analyse des houles extrêmes (m) réfractées à -15m NGA de Palm Beach par période de retour, Secteur NNW – N300° à N360° (SGH, 2010).

ANNEXE III

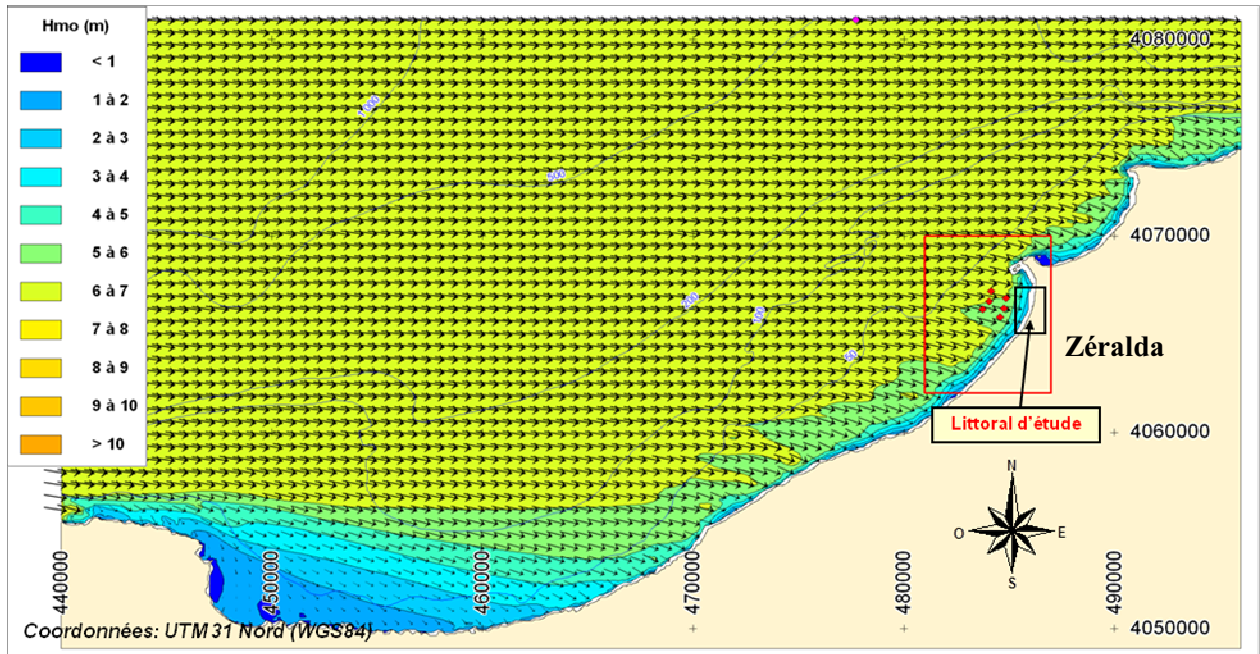


Figure 4: Modèle de propagation Swan – Modèle régional – Période de retour 10 ans
Houle du large de direction 280° Nord, Tpic = 10s, Hmo = 6,8m, Niveau = 0m NGA.

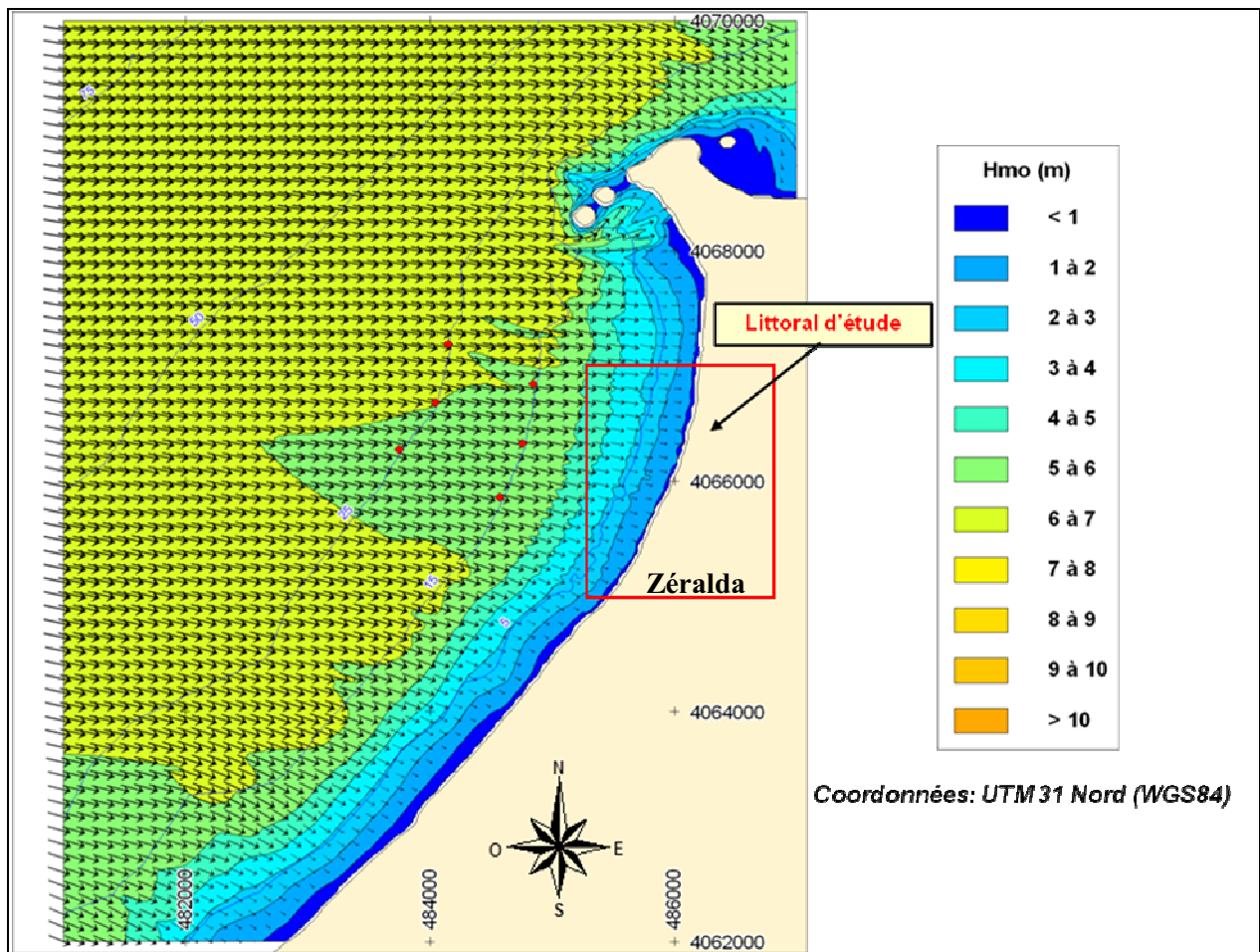


Figure 5 : Modèle de propagation Swan – Modèle local – Période de retour 10 ans
 Houle du large de direction 280° Nord, Tpic = 10s, Hs = 6,8m, Niveau = 0m NGA.

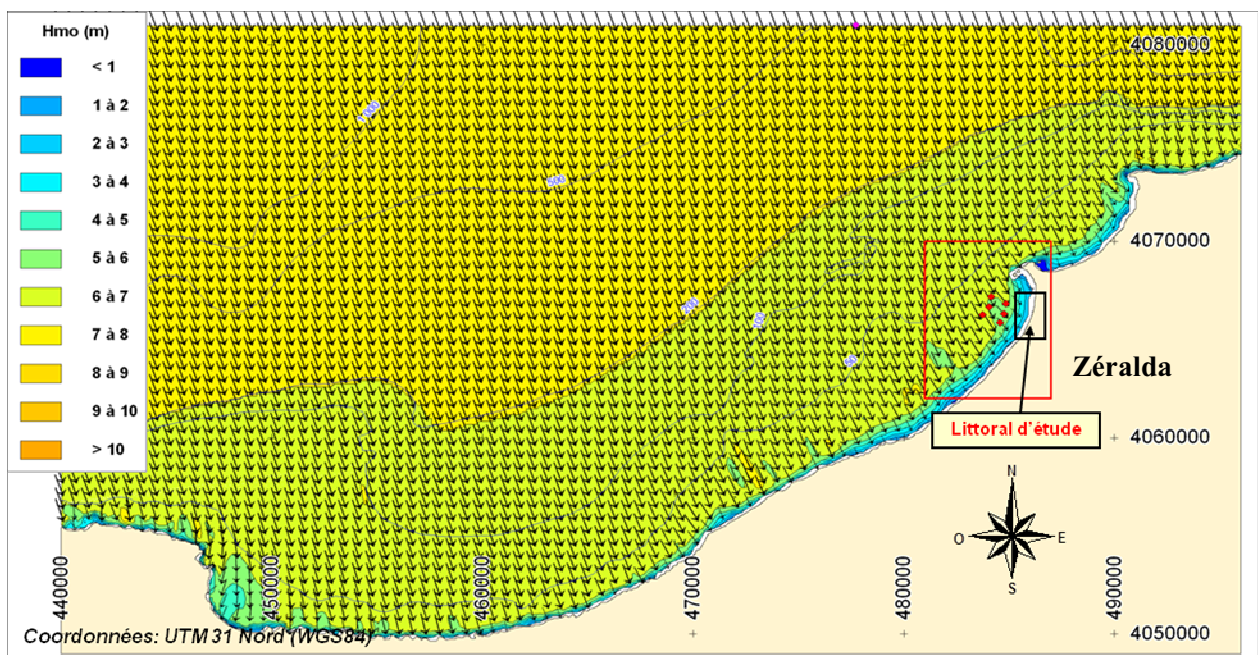


Figure 6 : Modèle de propagation Swan – Modèle régional – Période de retour 10 ans
 Houle du large de direction 340° Nord, Tpic = 12s, Hs = 7,0m, Niveau = 0m NGA.

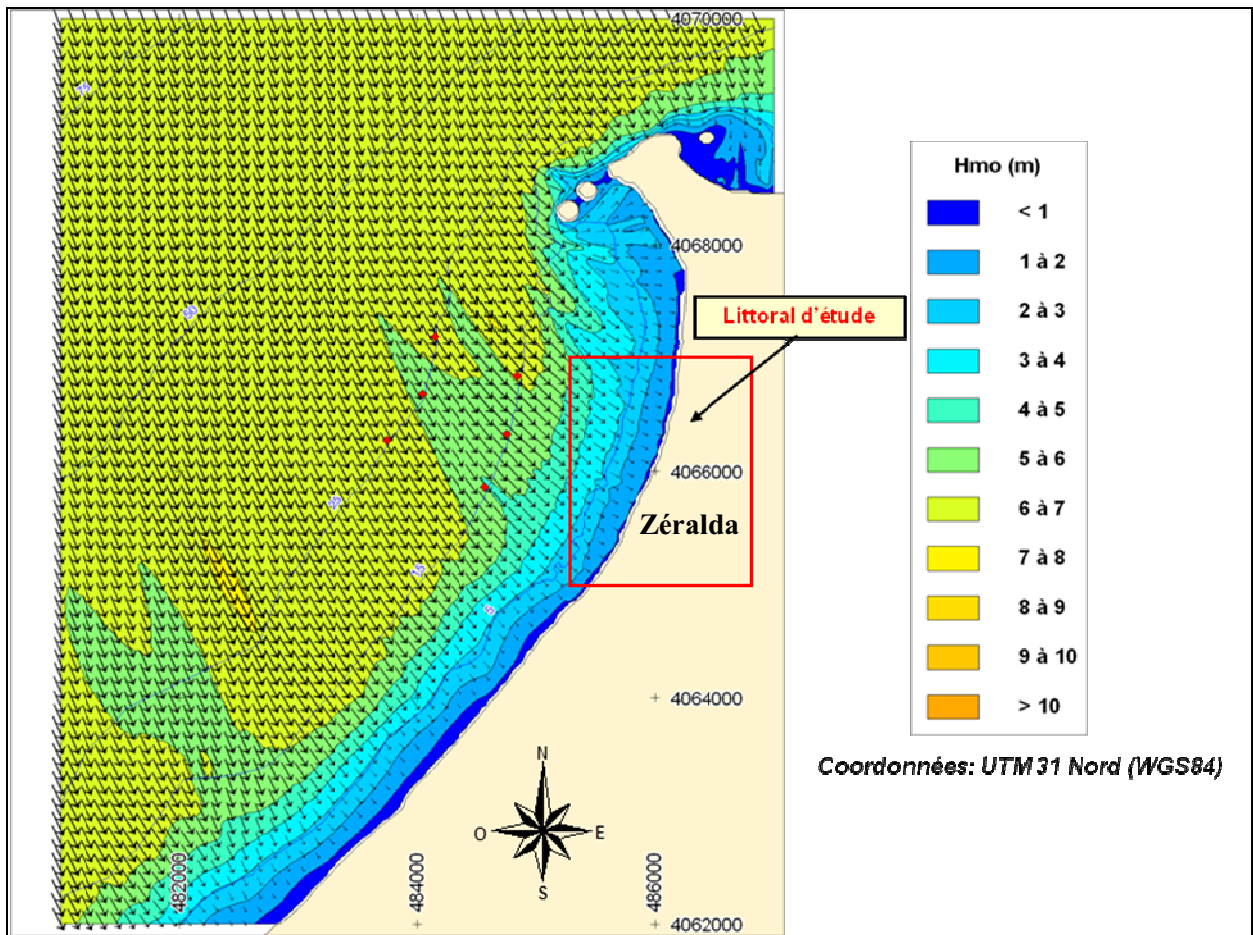


Figure 7: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Période de retour 10 ans
 Houle du large de direction 340° Nord, Tpic = 12s, Hs = 7,0m, Niveau = 0m NGA.

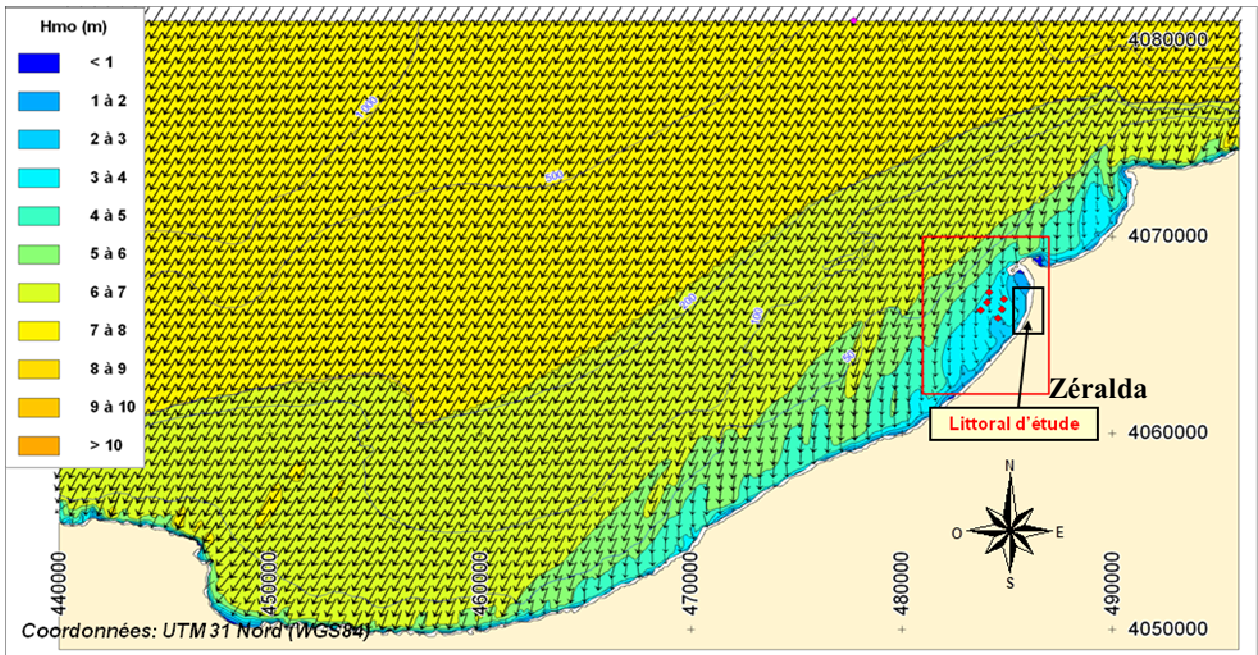


Figure 8: Modèle de propagation Swan – Modèle régional – Période de retour 10 ans
Houle du large de direction 30° Nord, $T_{pic} = 12s$, $H_s = 7,0m$, Niveau = 0m NGA.

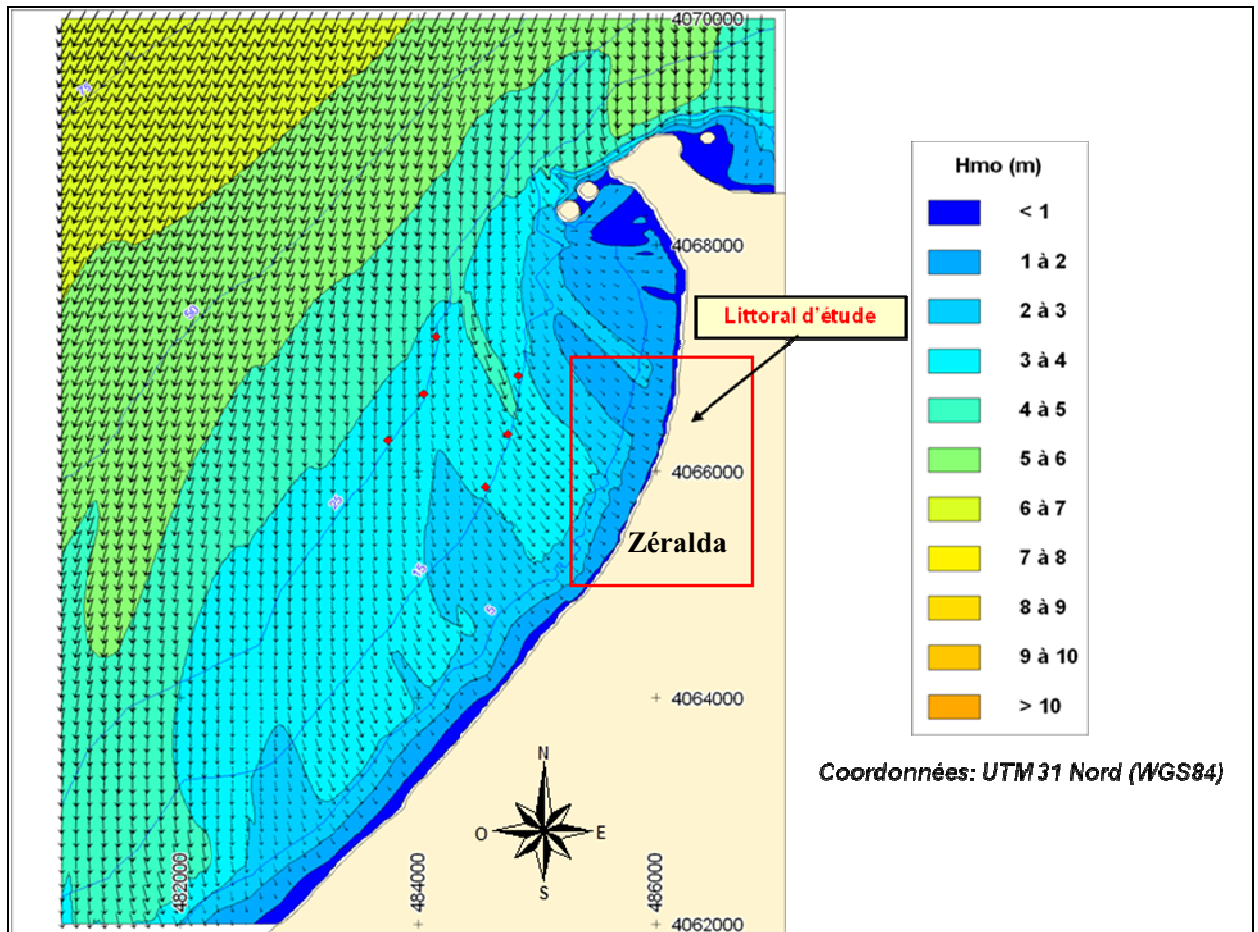


Figure 9: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Période de retour 10 ans
Houle du large de direction 30° Nord, $T_{pic} = 12s$, $H_s = 7,0m$, Niveau = 0m NGA.

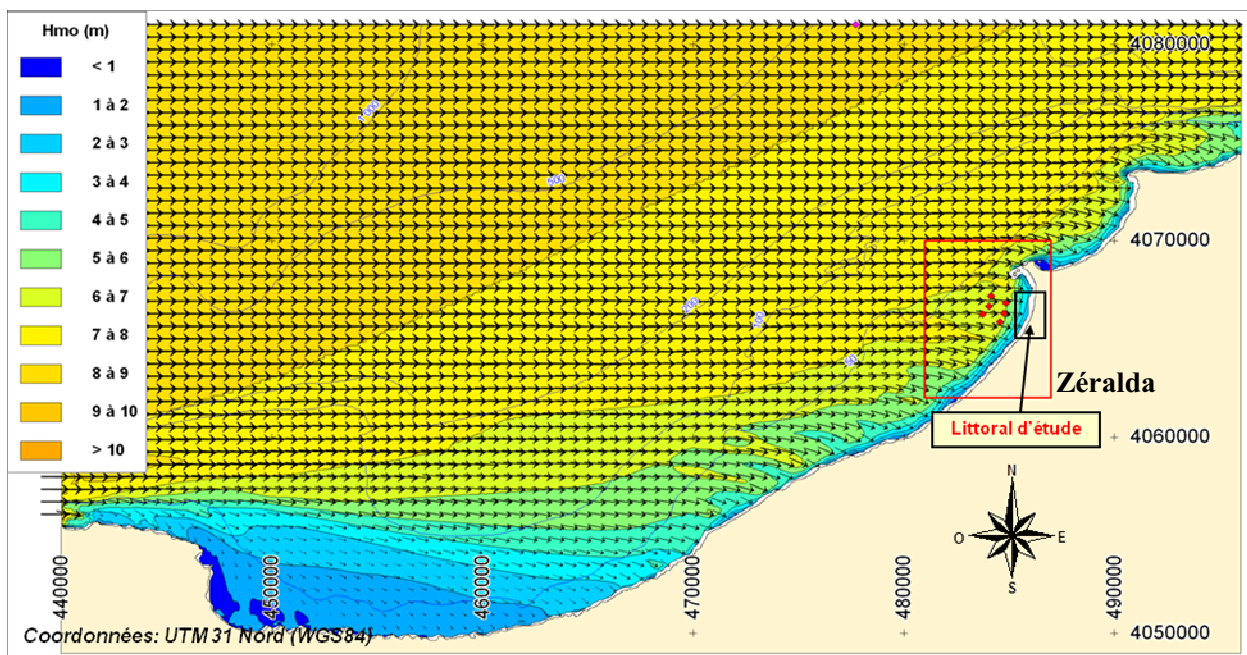


Figure 10: Modèle de propagation Swan – Modèle régional – Période de retour 50 ans
 Houle du large de direction 270° Nord, Tpic = 11s, Hs = 8,0m, Niveau = 0m NGA.

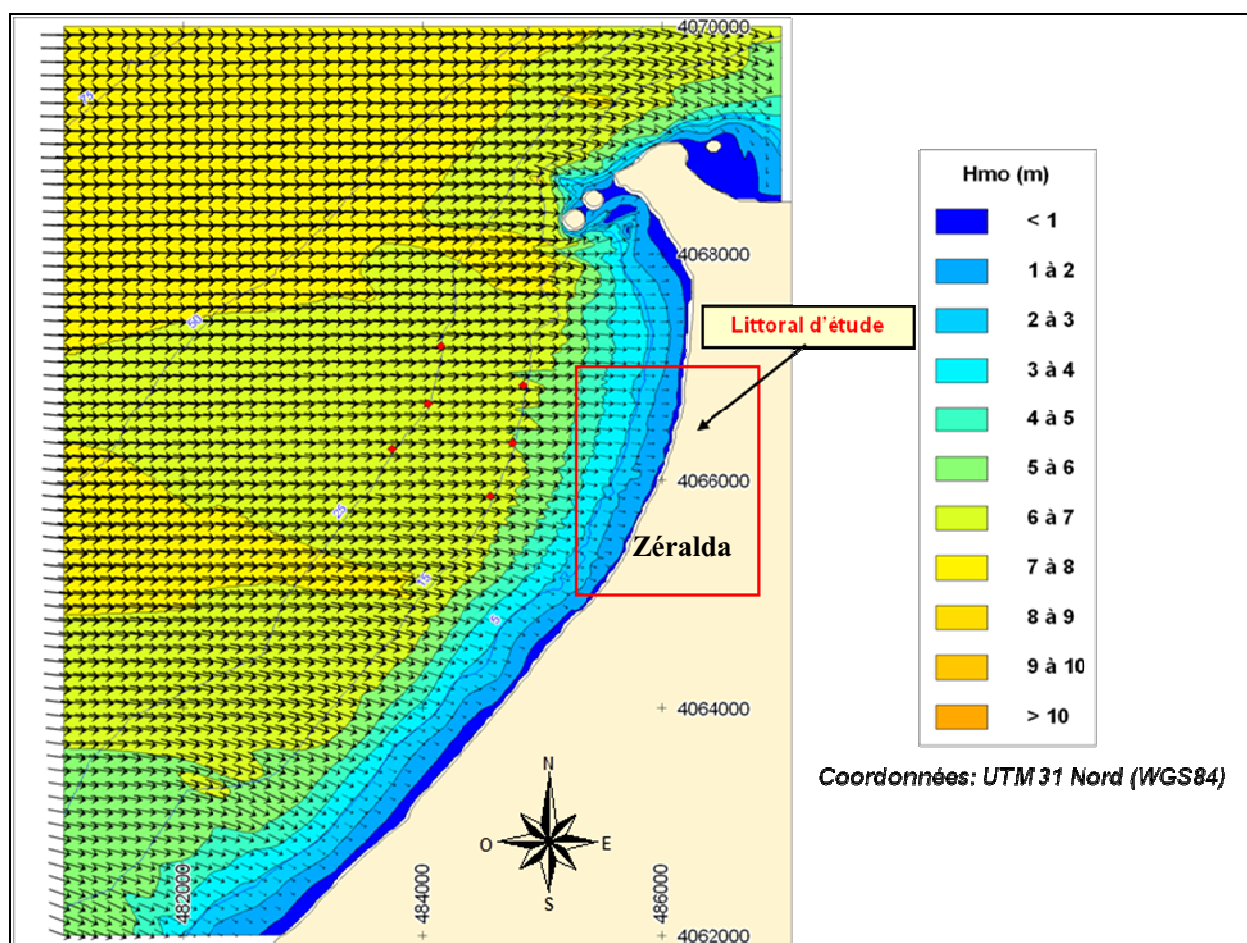


Figure 11: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Période de retour 50 ans
 Houle du large de direction 270° Nord, Tpic = 11s, Hs = 8,0m, Niveau = 0m NGA.

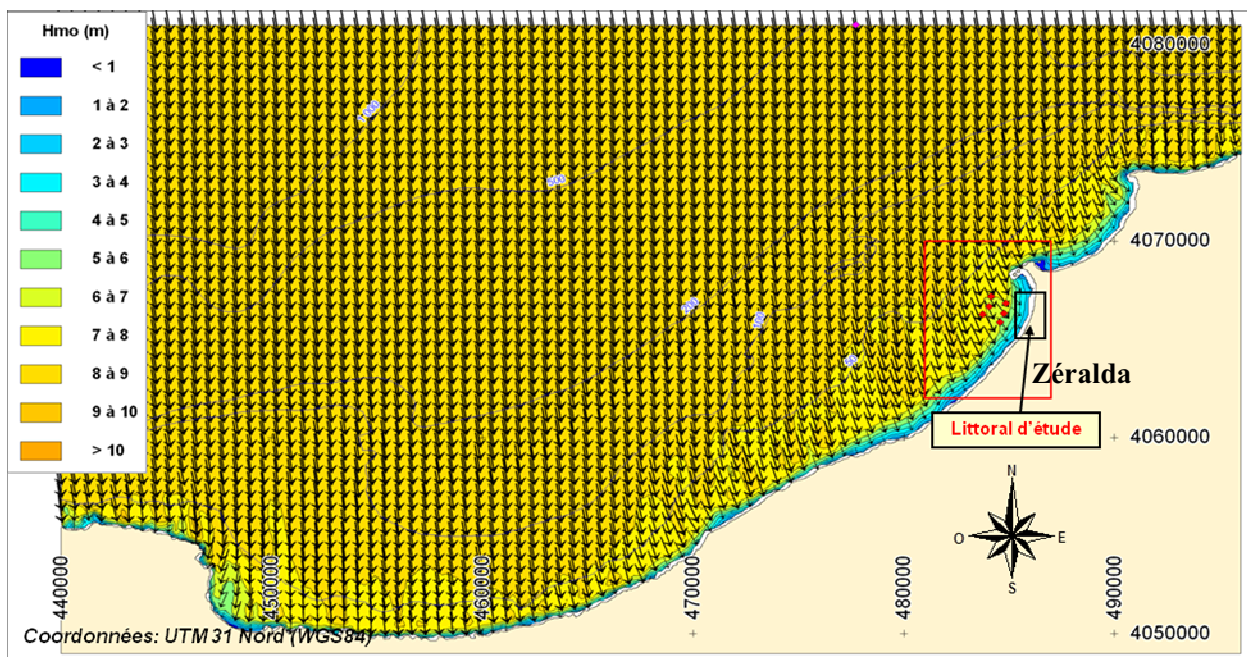


Figure 12: Modèle de propagation Swan – Modèle régional – Période de retour 50 ans
 Houle du large de direction 350° Nord, Tpic = 13s, Hs = 8,6m, Niveau = 0m NGA.

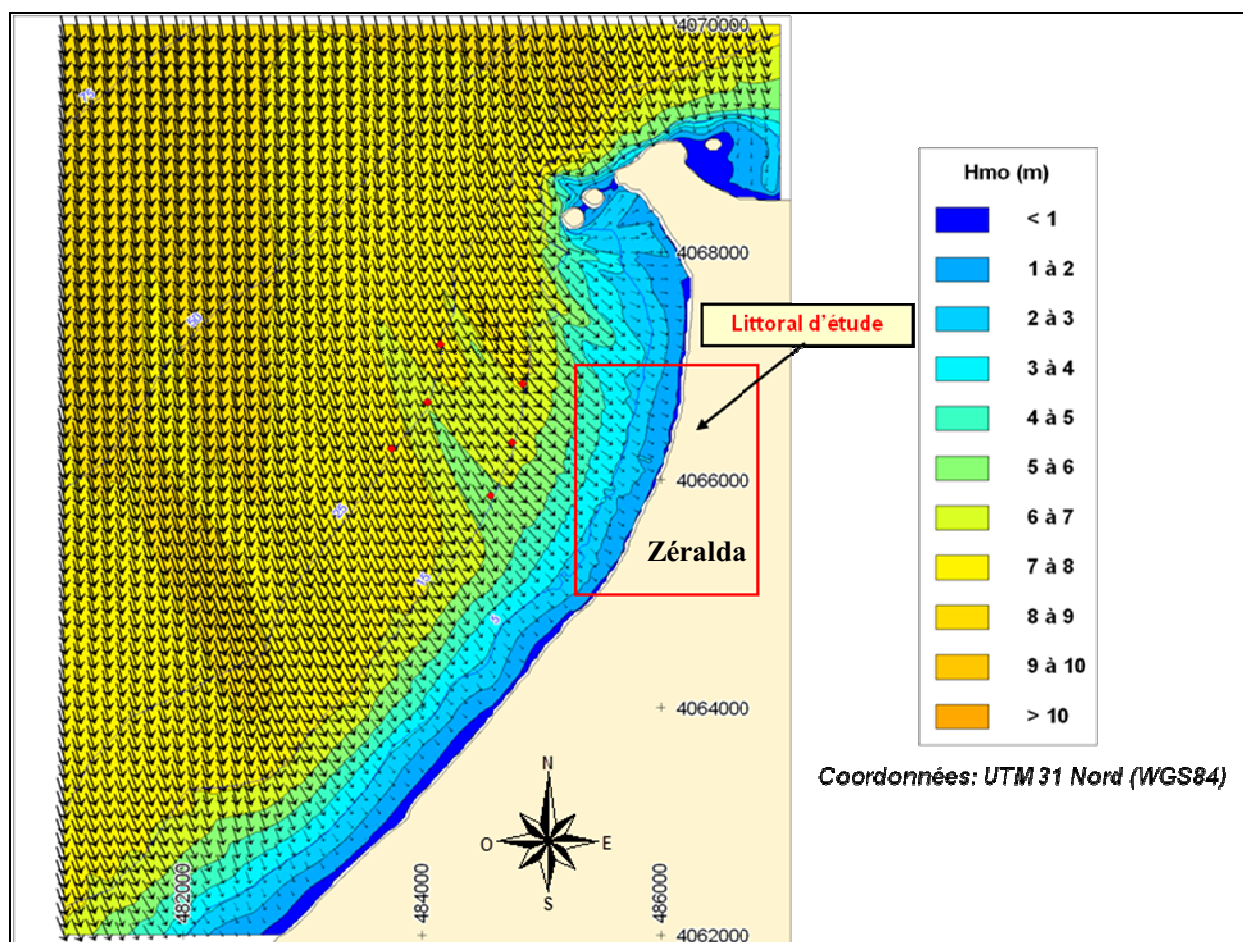


Figure 13: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Période de retour 50 ans
 Houle du large de direction 350° Nord, Tpic = 13s, Hs = 8,6m, Niveau = 0m NGA.

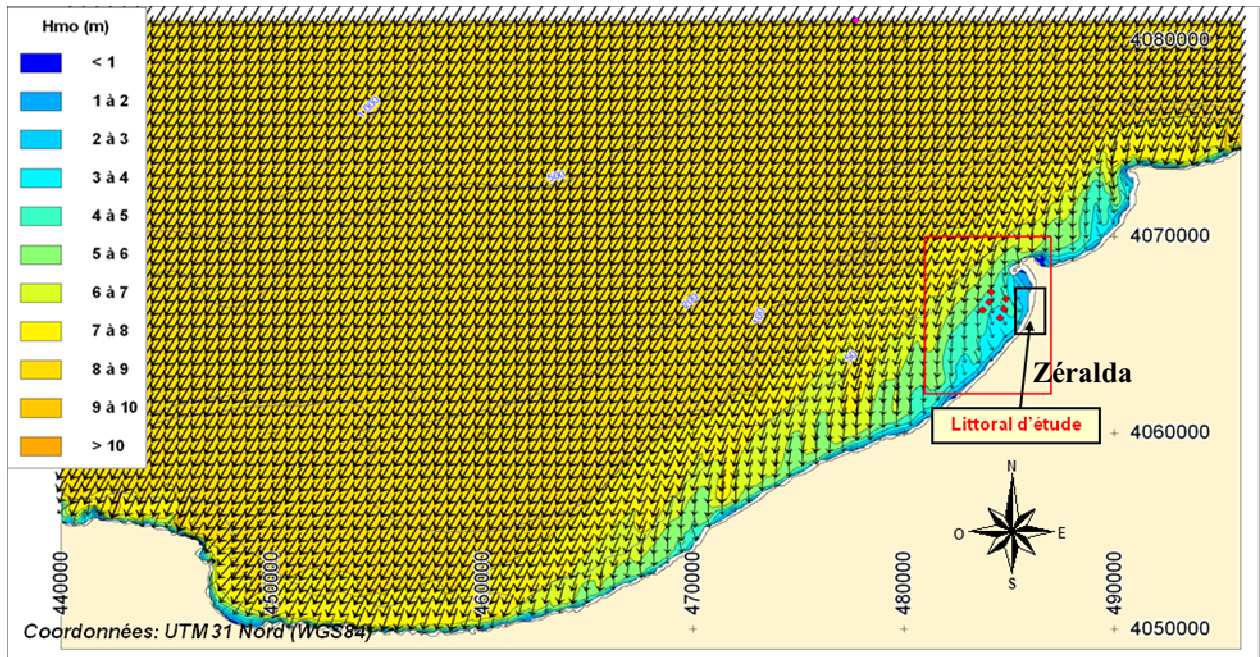


Figure 14: Modèle de propagation Swan – Modèle régional – Période de retour 50 ans
 Houle du large de direction 30° Nord, Tpic = 12s, Hs = 8,6m, Niveau = 0m NGA.

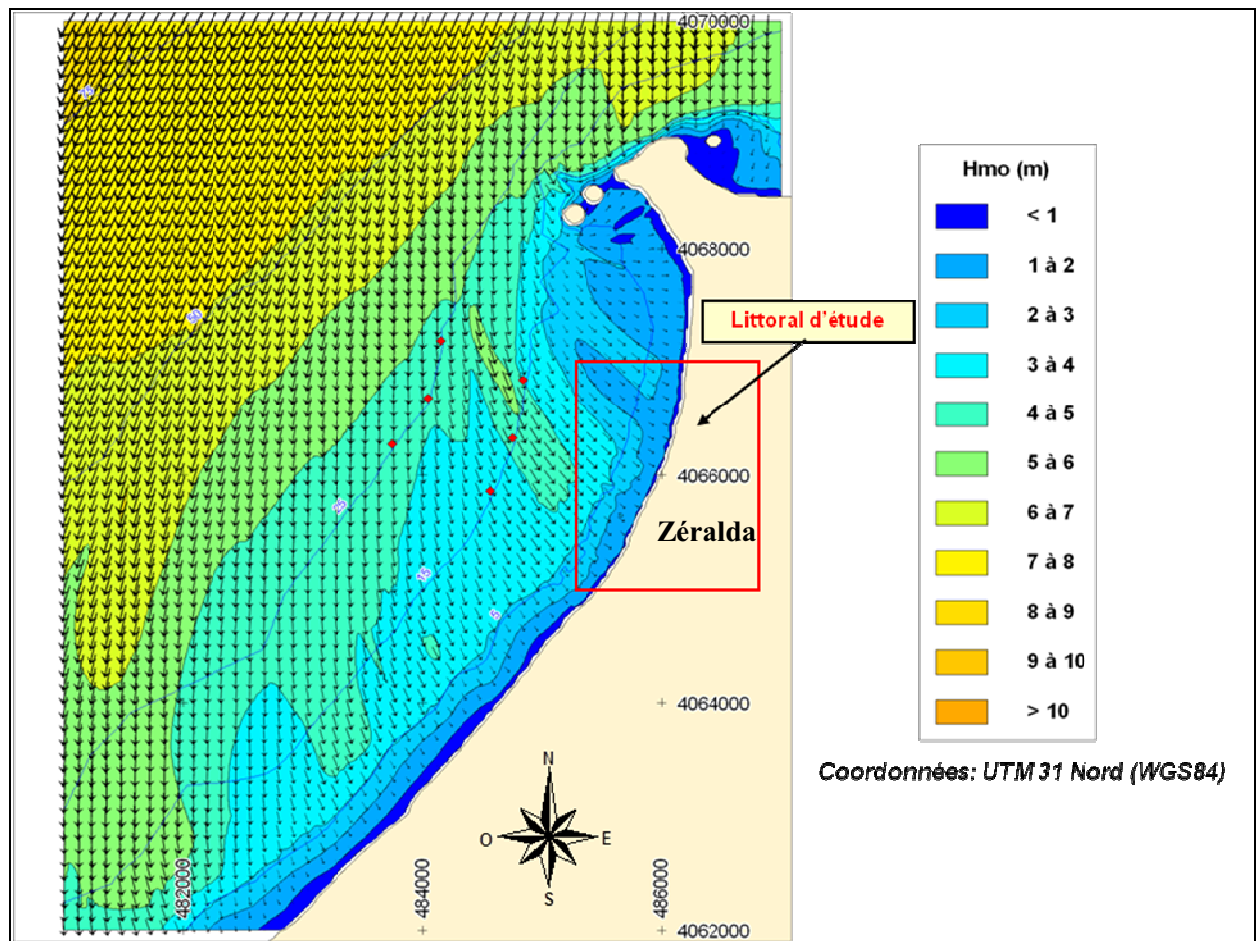


Figure 15: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Période de retour 50 ans
 Houle du large de direction 30° Nord, Tpic = 12s, Hs = 8,6m, Niveau = 0m NGA.

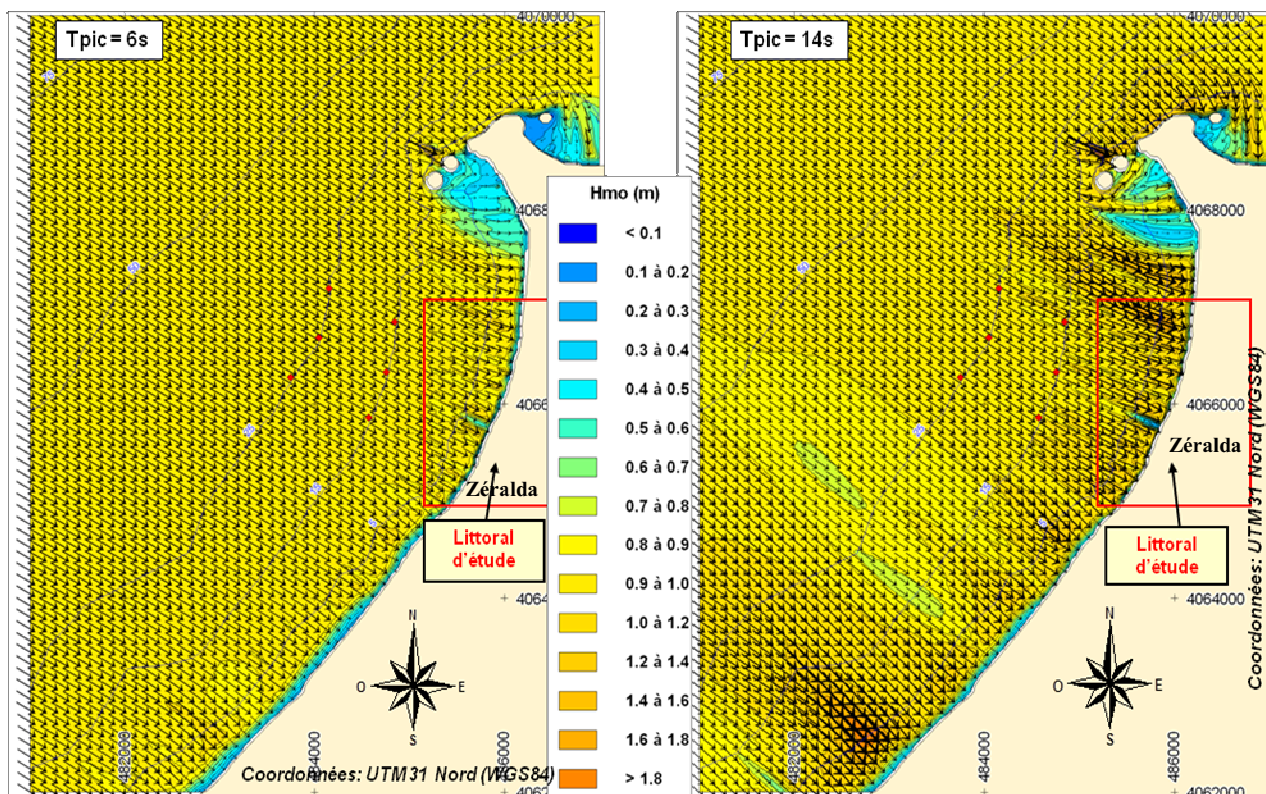


Figure 13: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Calculs en houle unitaire
Houles du large de direction $300^{\circ}N$, $T_{pic} = 6s$ et $14s$, $H_s = 1,0m$, Niveau = $0m$ NGA.

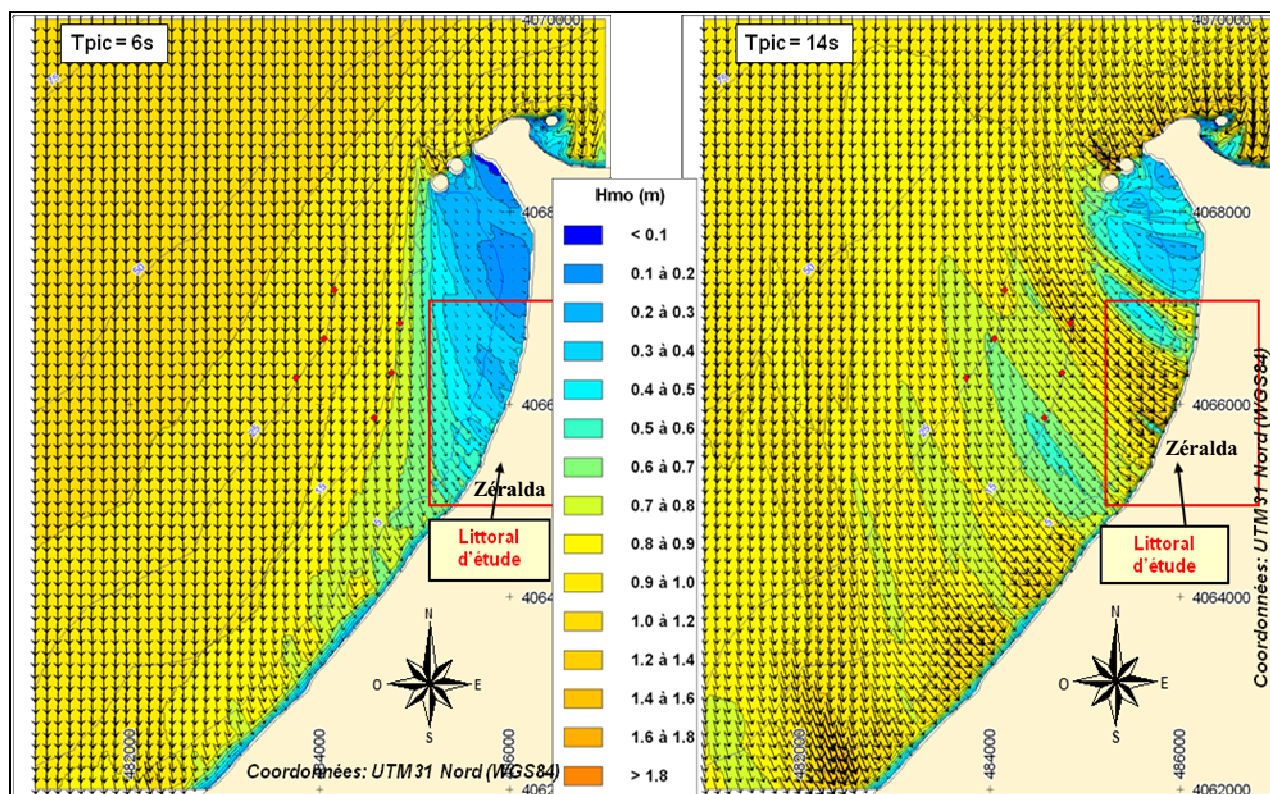


Figure 14: Modèle de propagation Swan – Modèle local – Calculs en houle unitaire
Houles du large de direction $360^{\circ}N$, $T_{pic} = 6s$ et $14s$, $H_s = 1,0m$, Niveau = $0m$ NGA.

ANNEXE IV

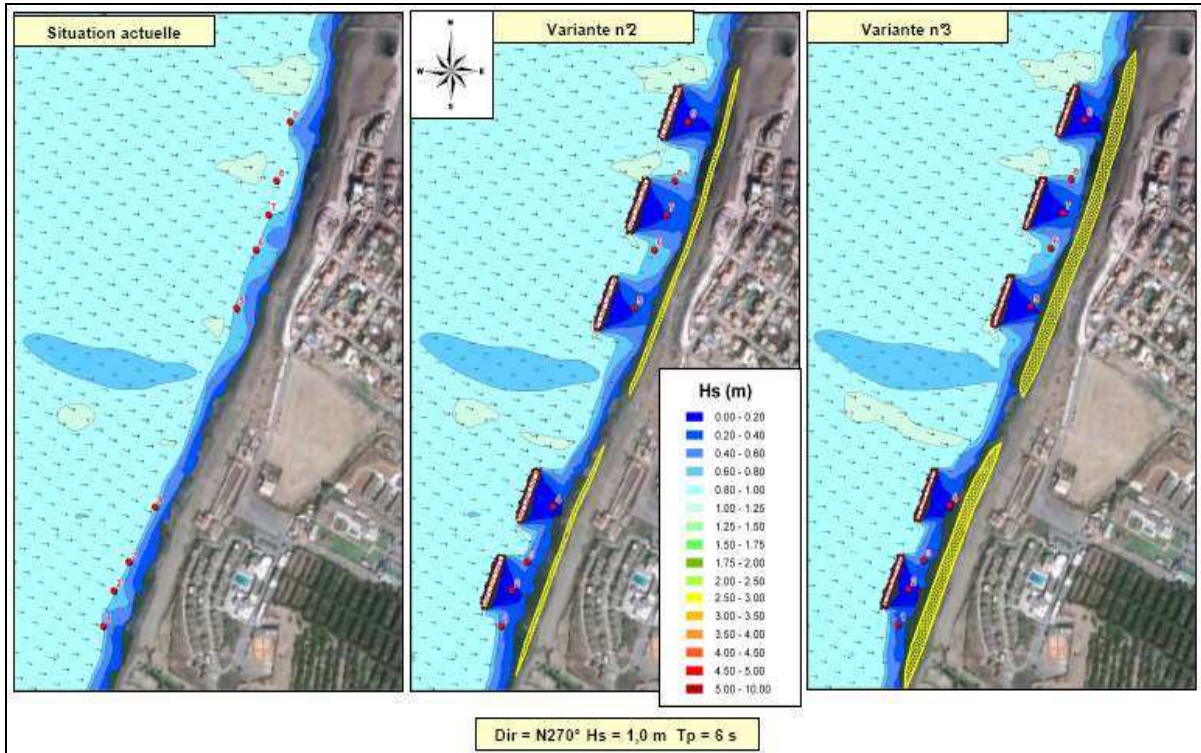


Figure 1 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas H1.

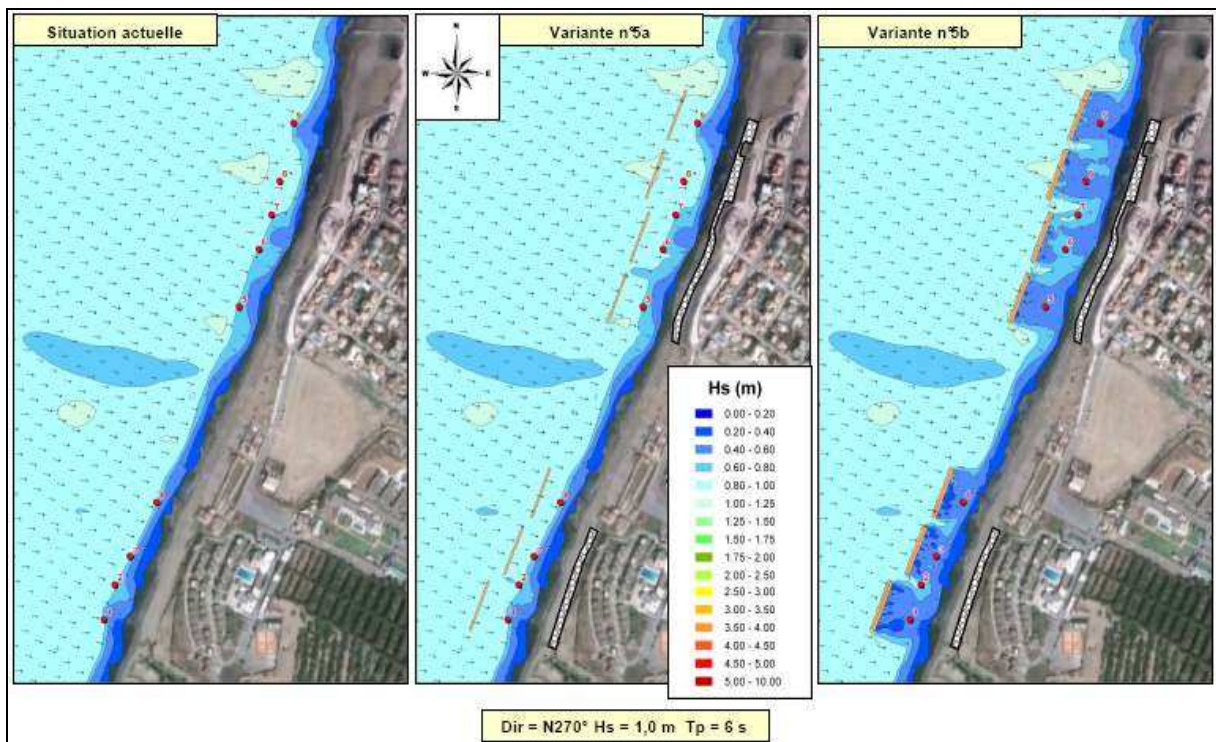


Figure 2 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas H1.

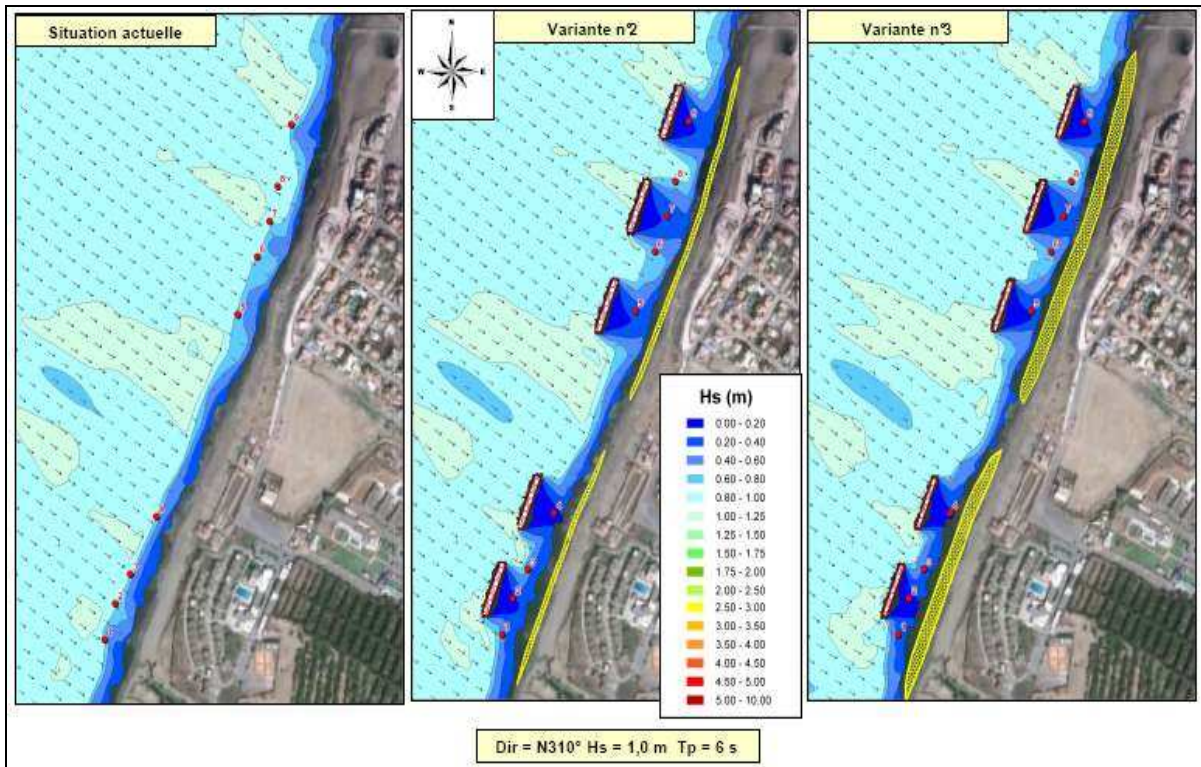


Figure 3 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas H2.

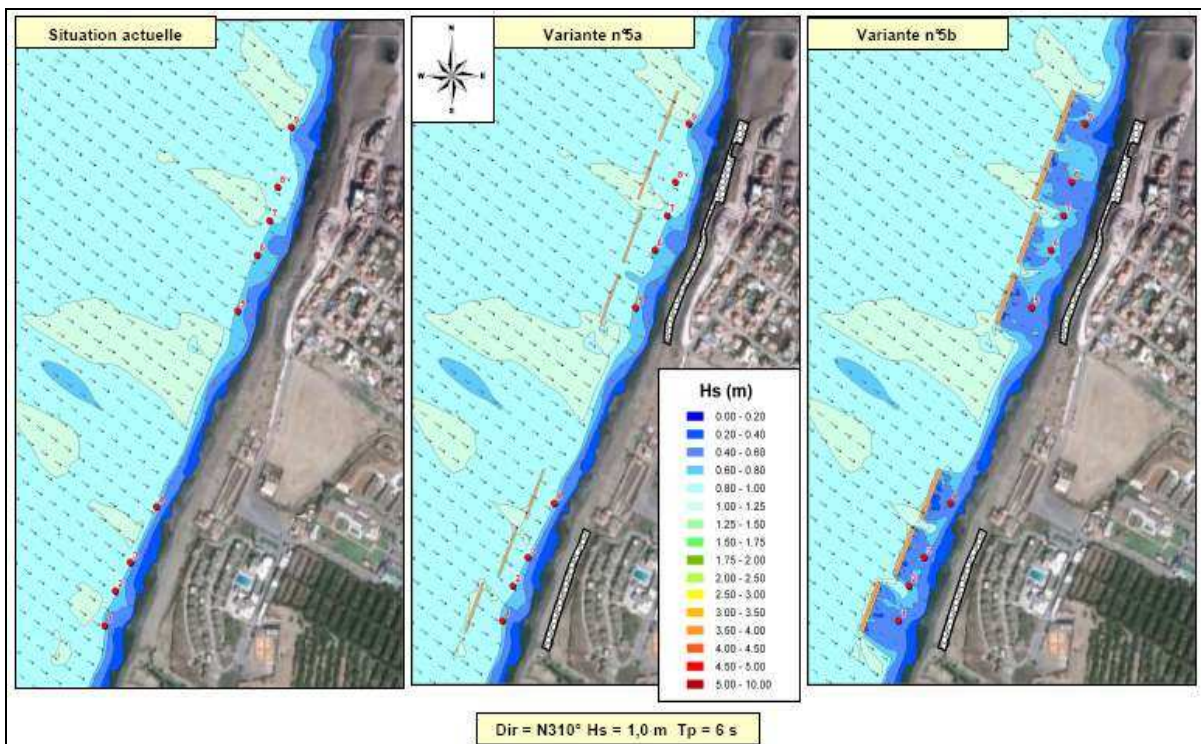


Figure 4 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas H2.

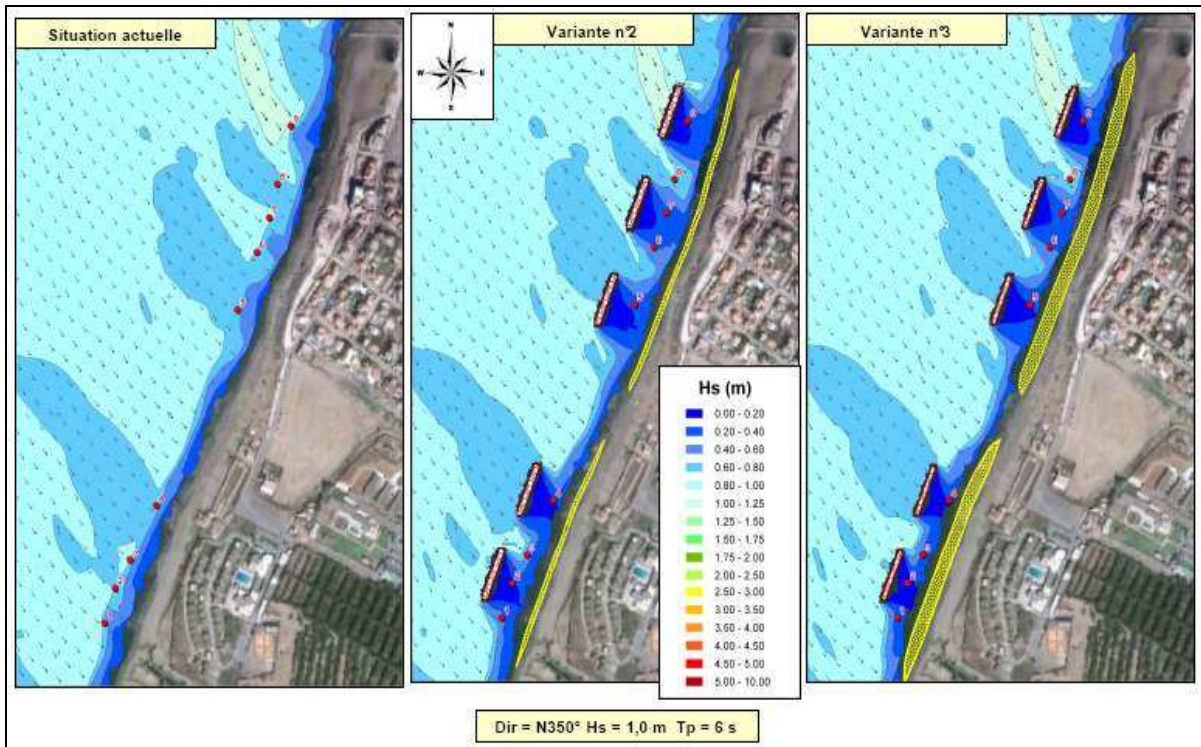


Figure 5 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas H3.

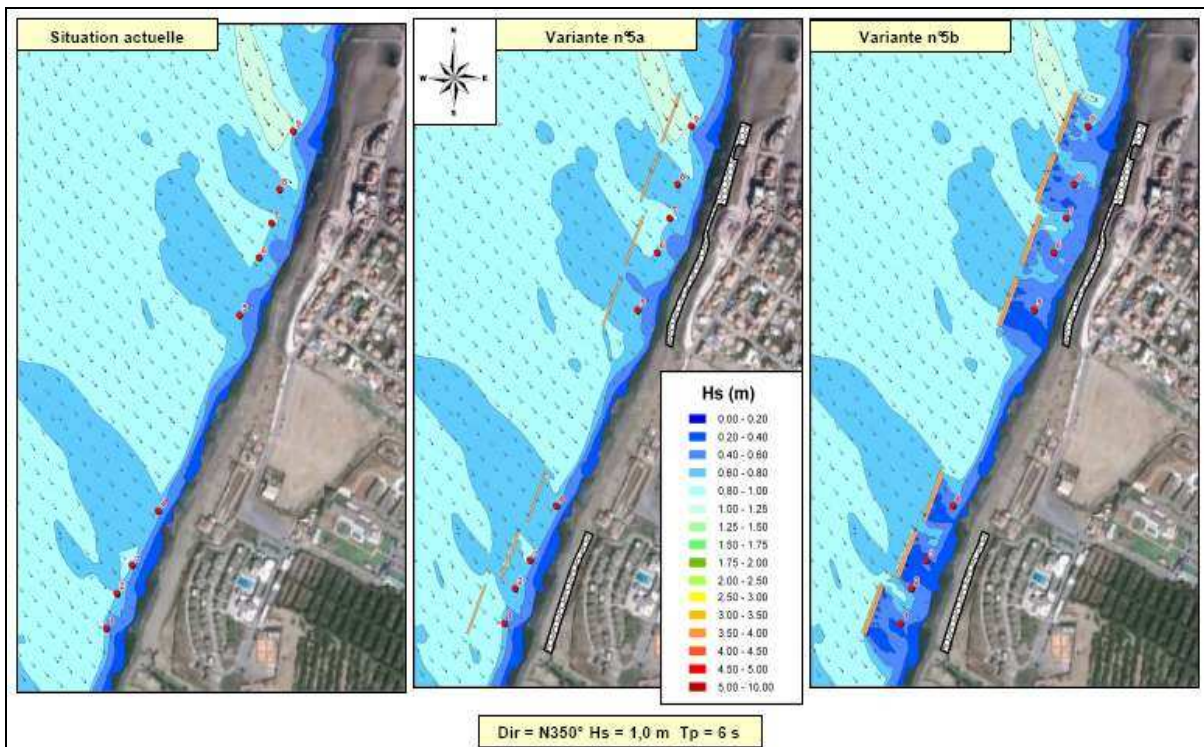


Figure 6 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas H3.

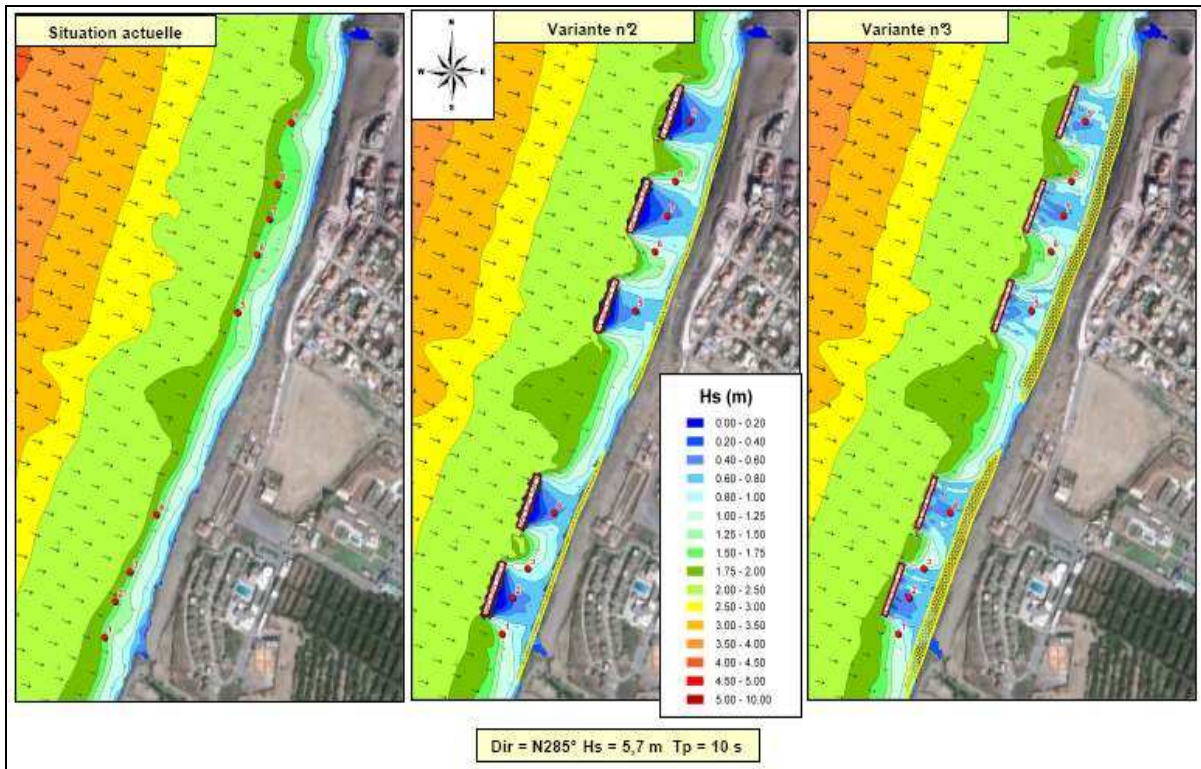


Figure 7 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas T1.

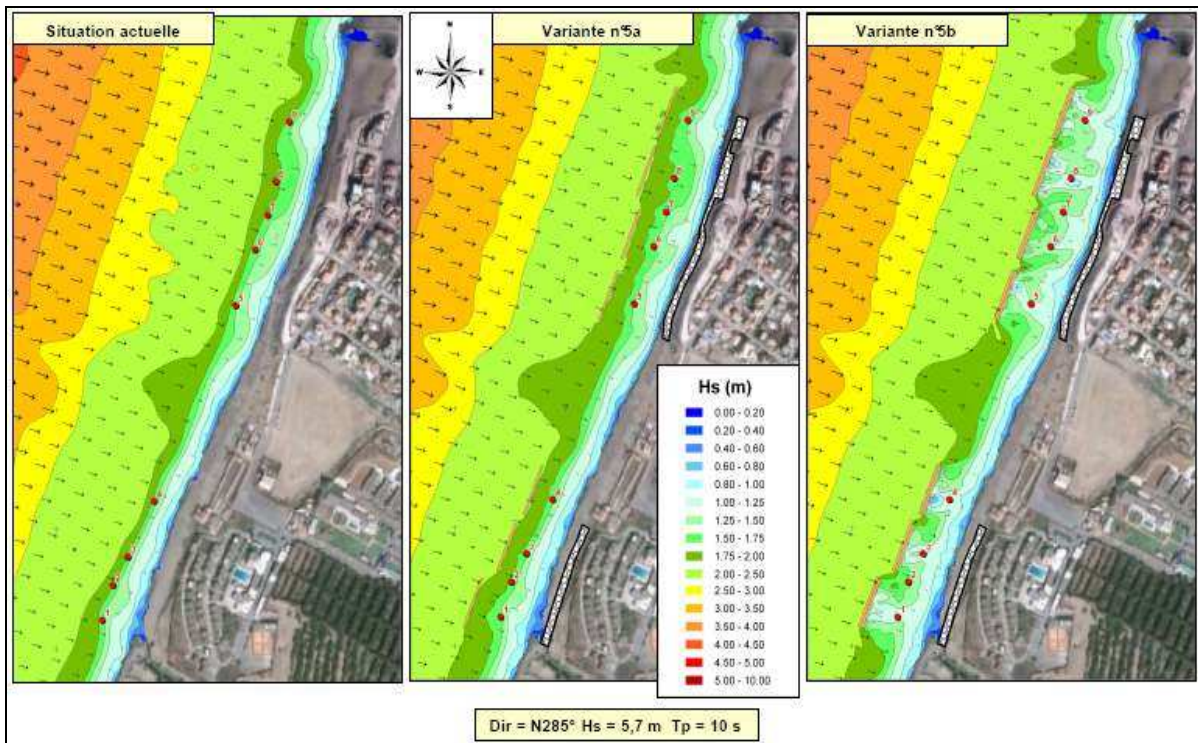


Figure 8 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas T1.

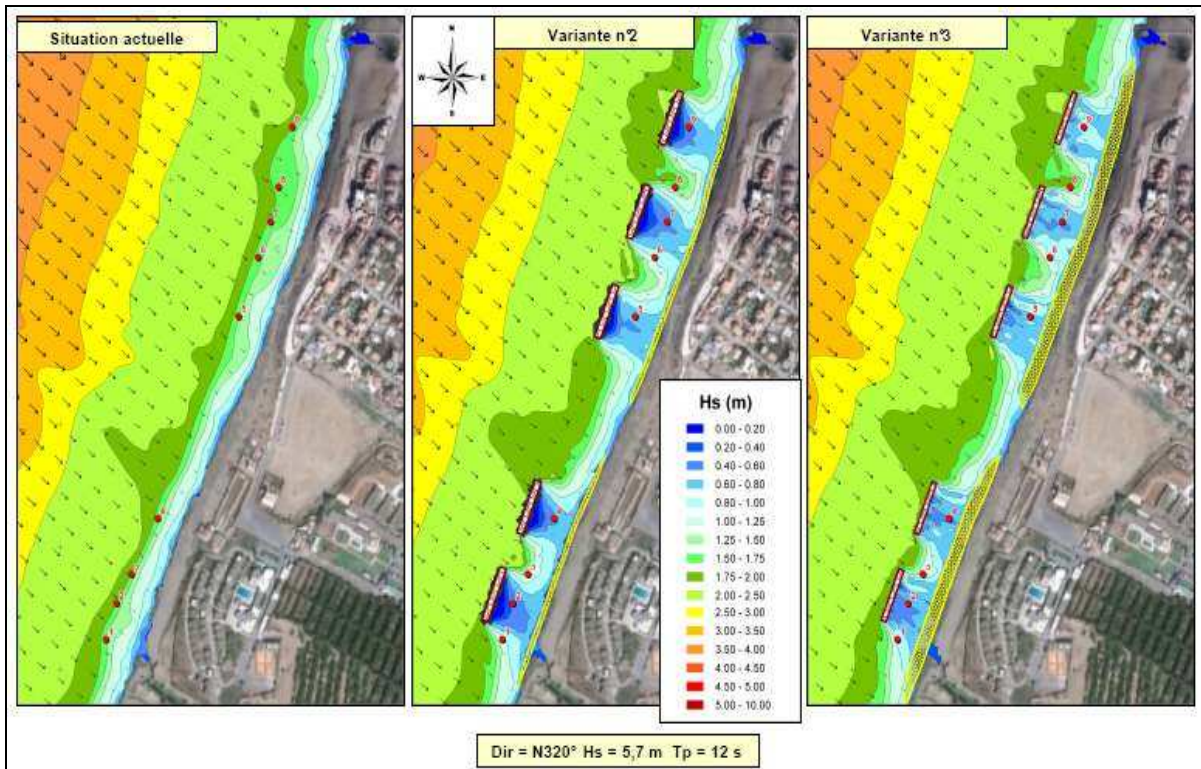


Figure 9 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas T2.

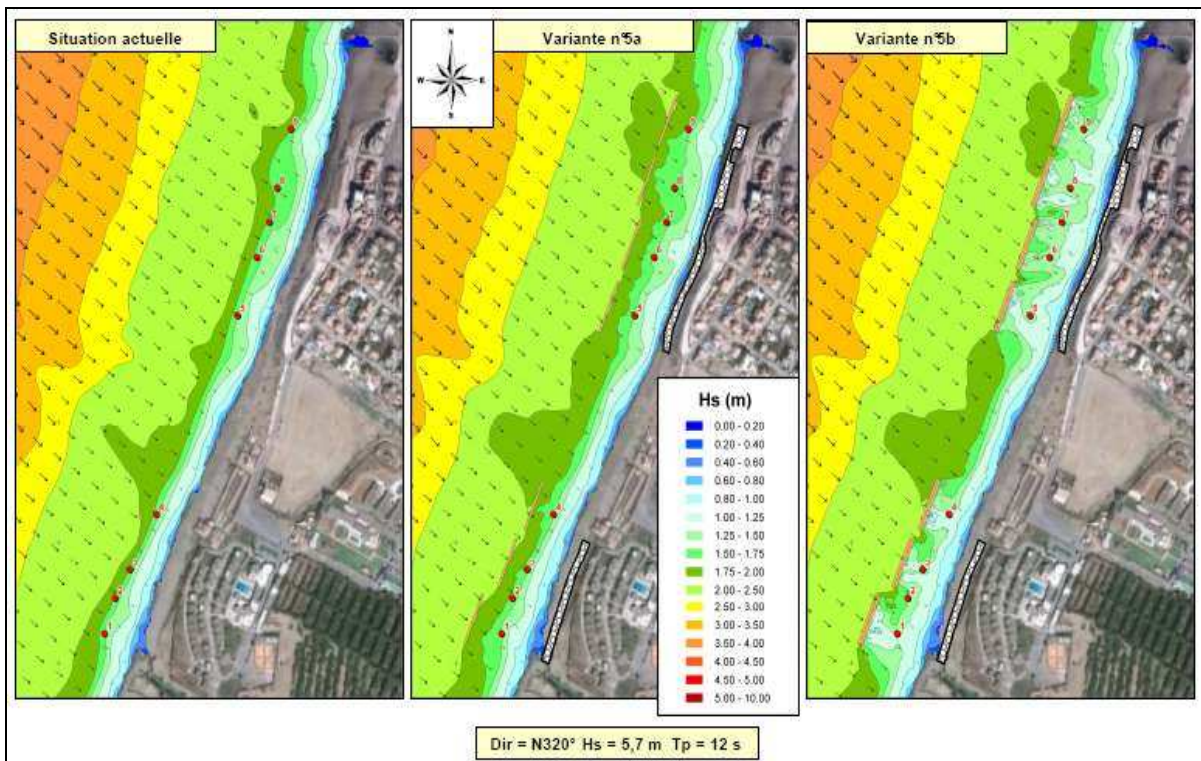


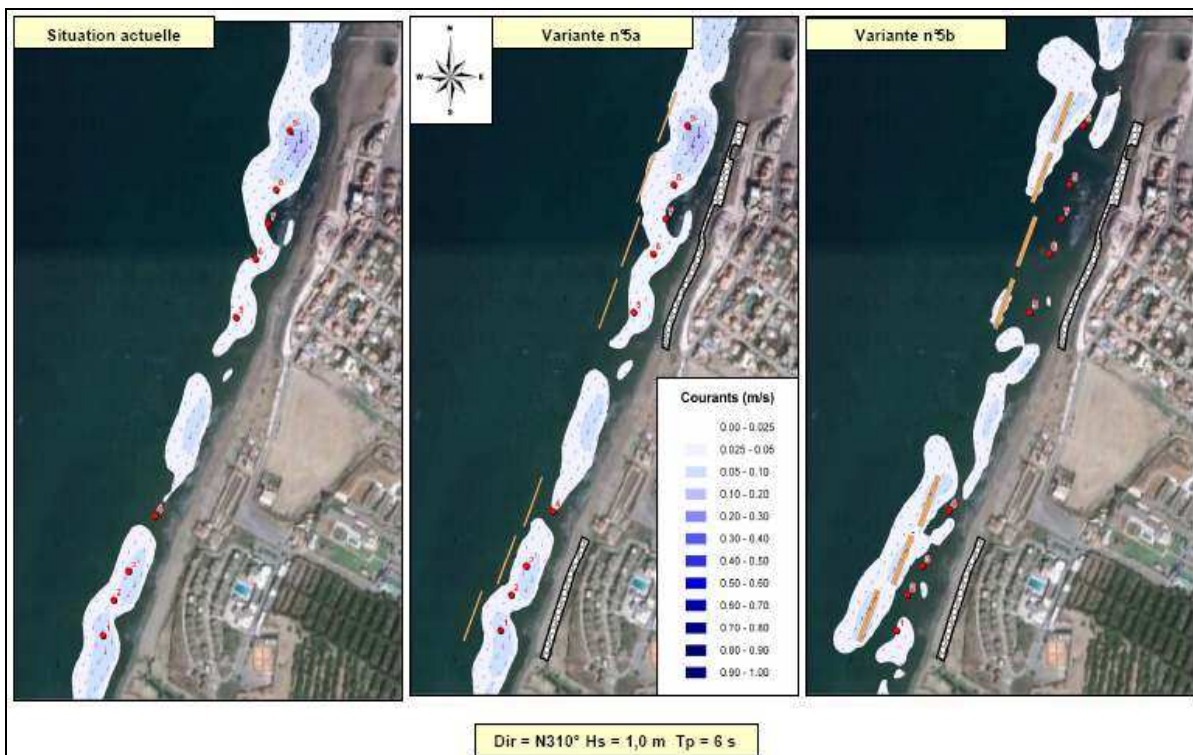
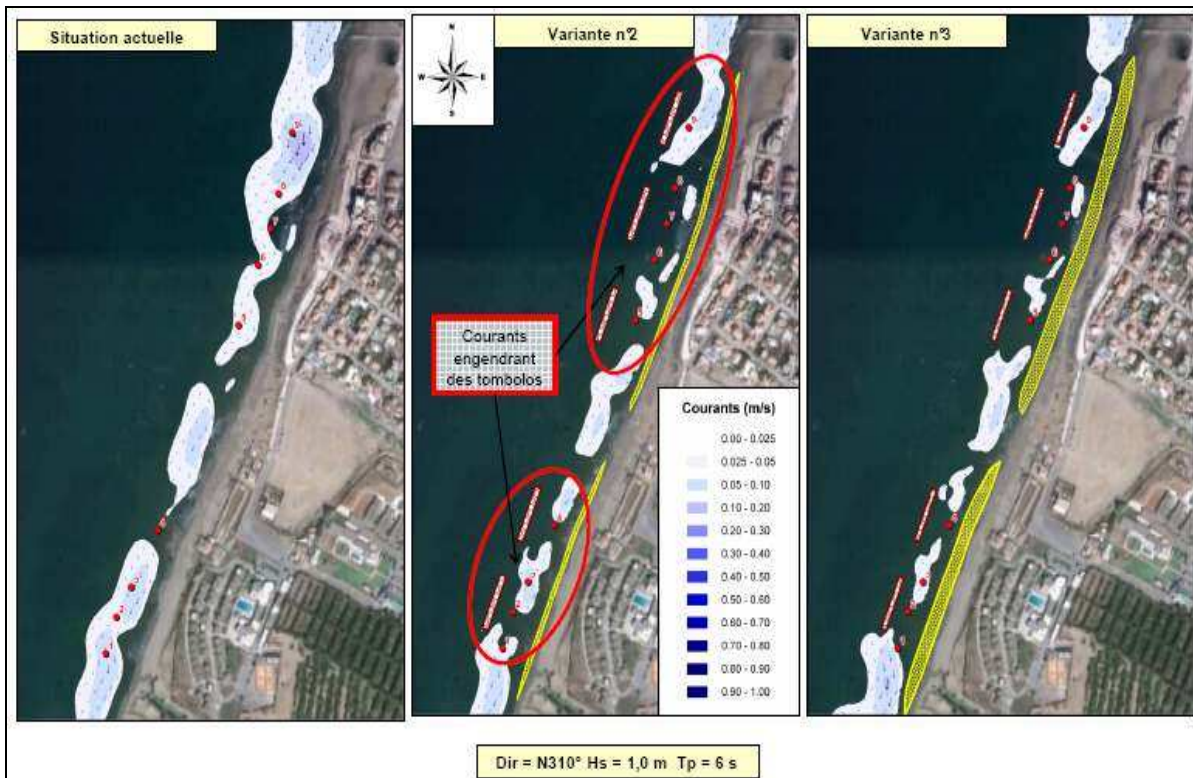
Figure 10 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, agitation pour le cas T2.



Figure 11: Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas H1.



Figure 12 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas H1.



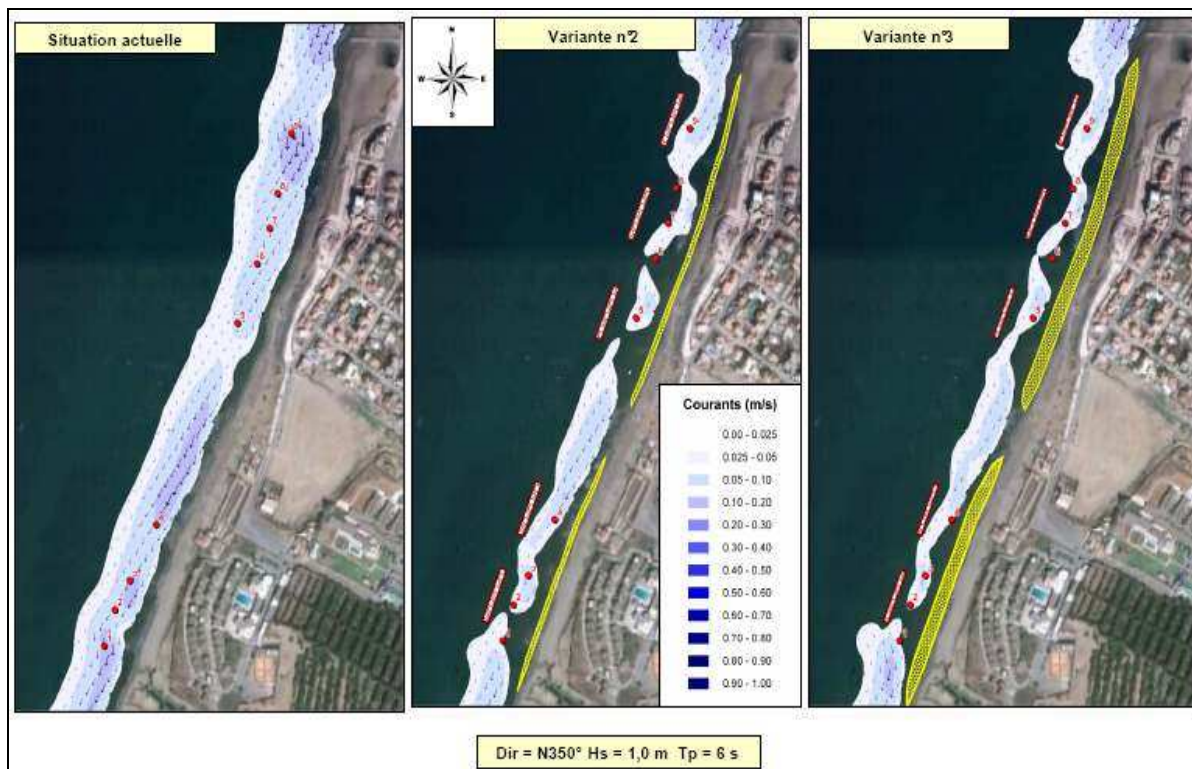


Figure 15 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas H3.



Figure 16 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas H3.

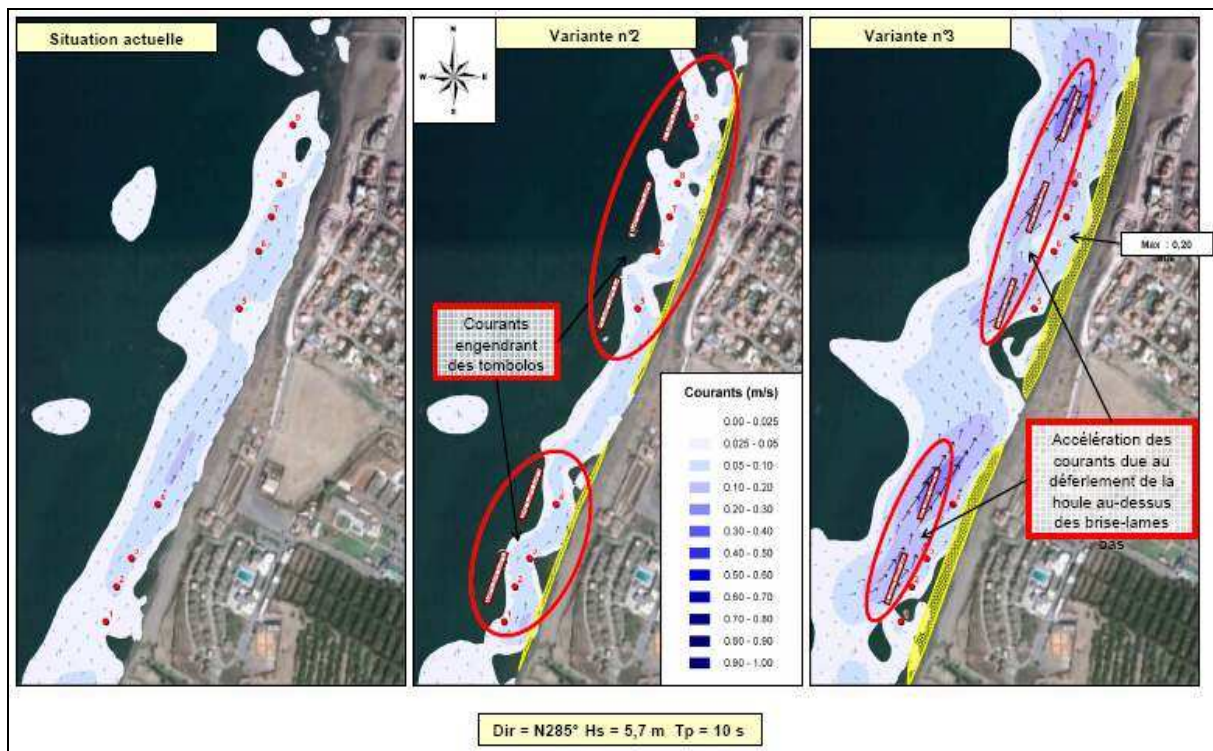


Figure 17 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas T1.

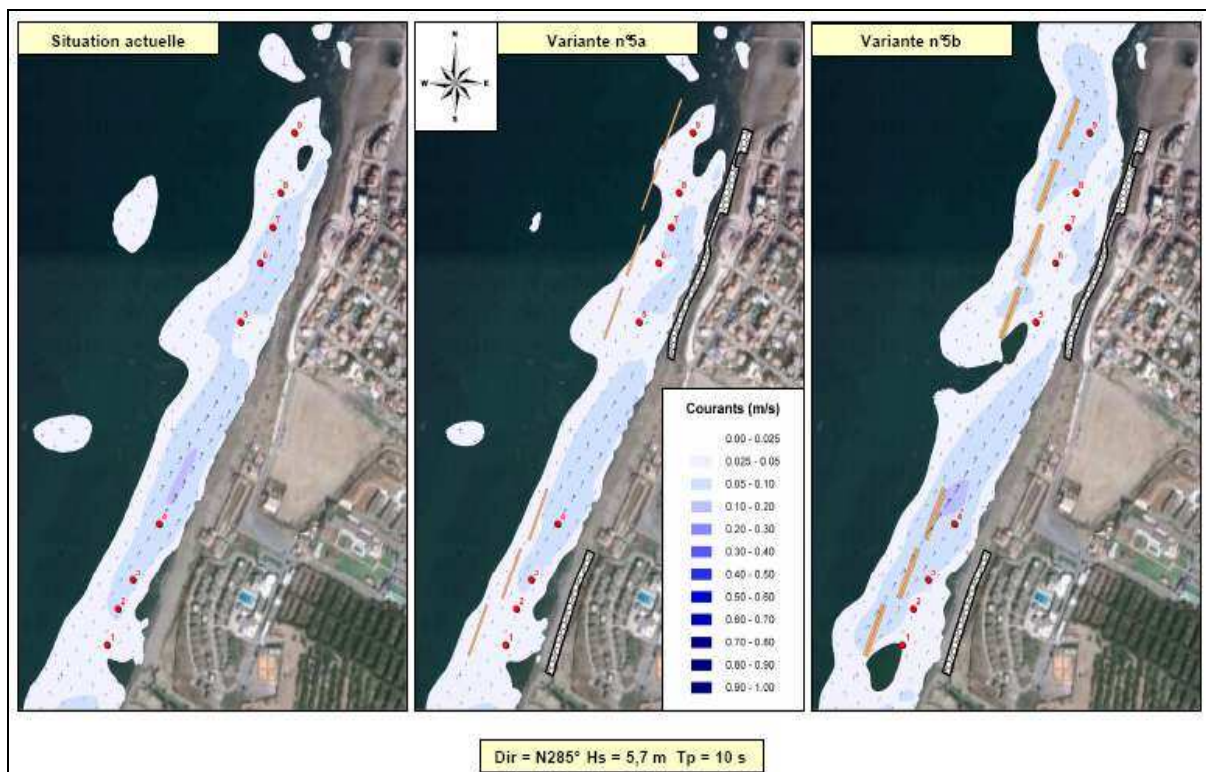


Figure 18 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas T1.

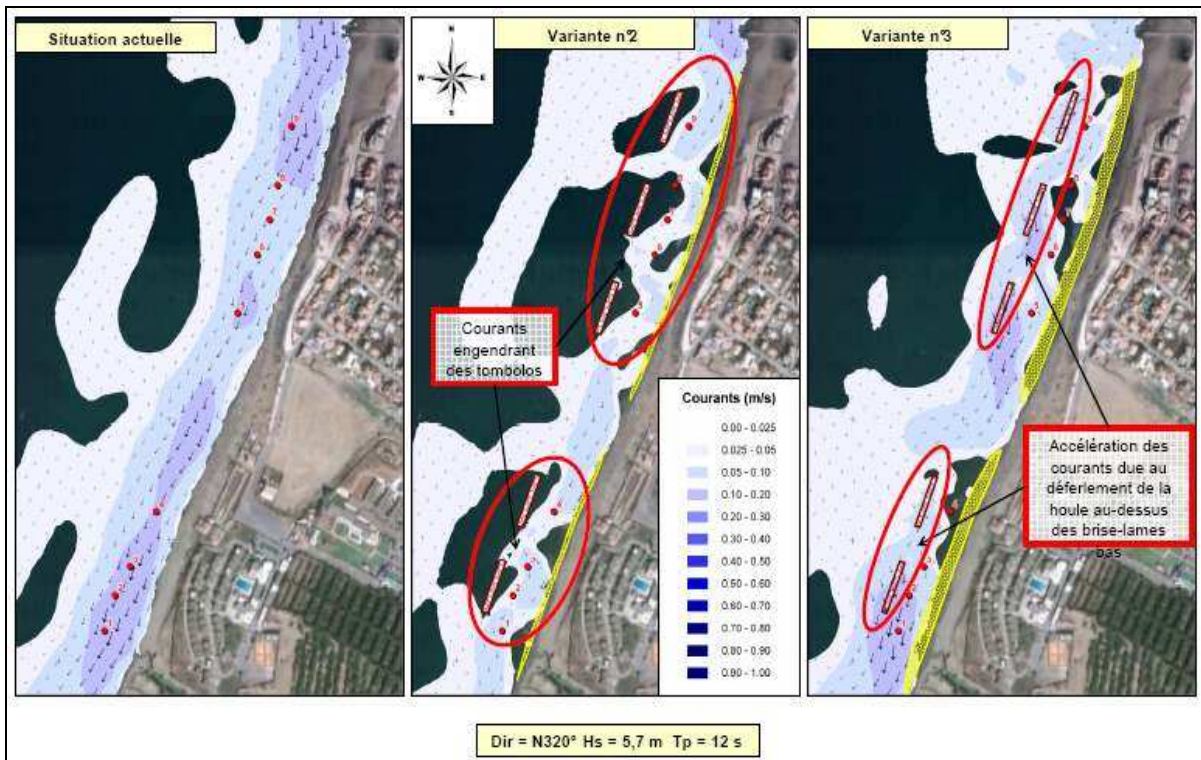


Figure 19 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas T2.

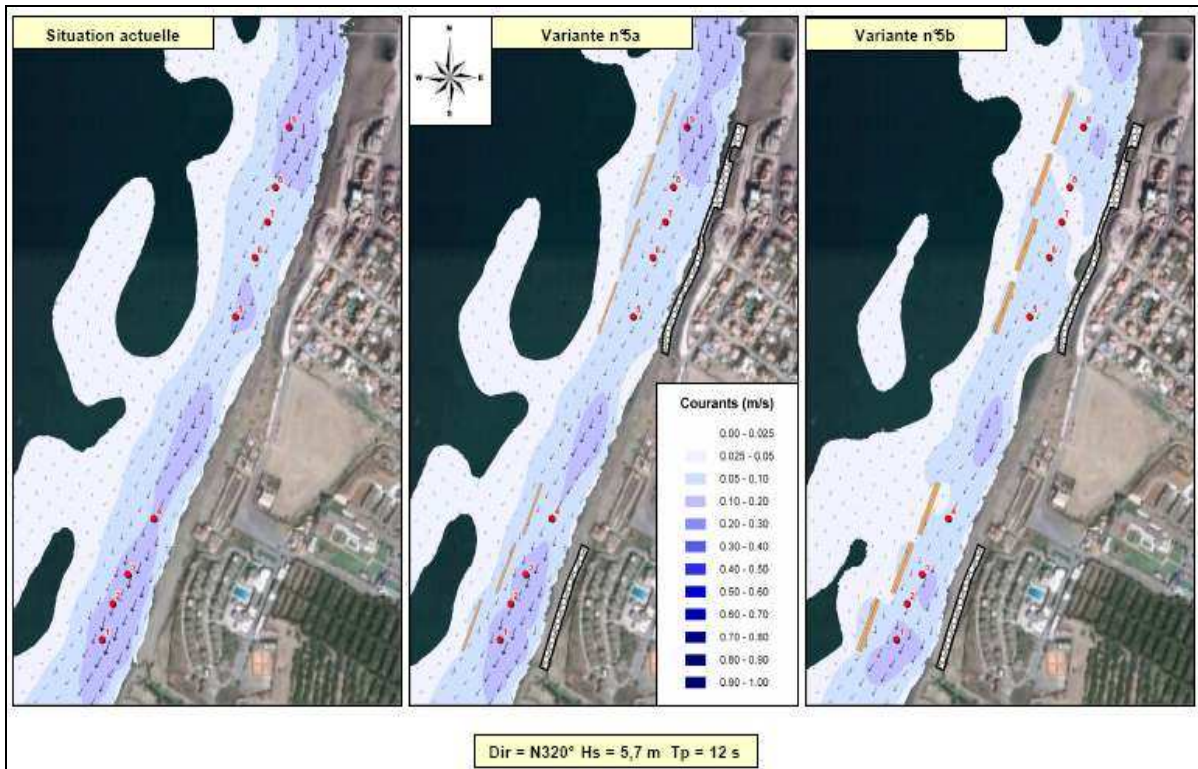


Figure 20 : Comparaison des variantes de protection de Palm Beach par Mopla, Courants pour le cas T2.

Tableau 1 : Résultats bruts des Hs (m) aux 9 points de mesure par variante de protection de Palm Beach sur le modèle Mopla.

		Hs aux points de mesure (m)								
Points	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	
H1	H1 : Dir = N270° Hs = 1,0 m Tp = 6 s									

Etat actuel	0,81	0,86	0,82	0,80	0,74	0,79	0,84	0,93	0,83
Solution 2	0,54	0,11	0,49	0,11	0,23	0,73	0,20	0,62	0,15
Solution 3	0,36	0,05	0,37	0,15	0,17	0,69	0,19	0,66	0,12
Solution 5a	0,80	0,82	0,79	0,78	0,75	0,77	0,80	0,88	0,84
Solution 5b	0,49	0,76	0,49	0,56	0,53	0,67	0,76	0,50	0,49
H2	H2 : Dir = N310° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,78	0,88	0,84	0,79	0,72	0,79	0,87	0,89	0,91
Solution 2	0,52	0,16	0,51	0,14	0,29	0,65	0,27	0,74	0,17
Solution 3	0,36	0,07	0,38	0,18	0,23	0,58	0,24	0,80	0,17
Solution 5a	0,77	0,88	0,81	0,78	0,73	0,77	0,85	0,89	0,91
Solution 5b	0,54	0,70	0,58	0,48	0,57	0,66	0,70	0,56	0,54
H3	H3 : Dir = N350° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,72	0,79	0,79	0,70	0,66	0,77	0,82	0,66	0,91
Solution 2	0,45	0,16	0,52	0,19	0,28	0,43	0,38	0,80	0,22
Solution 3	0,34	0,07	0,39	0,22	0,21	0,40	0,32	0,84	0,20
Solution 5a	0,72	0,79	0,78	0,70	0,68	0,77	0,83	0,68	0,90
Solution 5b	0,42	0,49	0,39	0,50	0,48	0,55	0,68	0,62	0,67
T1	T1 : Dir = N285° Hs = 5,7 m Tp = 10 s								
Etat actuel	1,61	1,74	1,69	1,66	1,56	1,60	1,67	1,81	1,67
Solution 2	1,26	0,43	1,06	0,52	0,59	1,20	0,50	1,17	0,35
Solution 3	1,11	0,45	0,91	0,63	0,82	1,31	0,60	1,04	0,65
Solution 5a	1,53	1,69	1,56	1,56	1,50	1,51	1,55	1,70	1,62
Solution 5b	1,15	1,60	1,21	1,04	1,13	1,29	1,31	1,01	1,30
T2	T2 : Dir = N320° Hs = 5,7 m Tp = 12 s								
Etat actuel	1,55	1,72	1,69	1,61	1,52	1,60	1,68	1,68	1,75
Solution 2	1,06	0,46	1,19	0,55	0,67	0,98	0,56	1,49	0,52
Solution 3	0,95	0,67	1,12	0,57	0,72	1,04	0,60	1,61	0,96
Solution 5a	1,49	1,68	1,59	1,52	1,48	1,50	1,59	1,59	1,68
Solution 5b	1,29	1,49	1,34	1,12	1,35	1,42	1,36	1,51	1,34

Tableau 2 : Résultats bruts des des courants (m/s) aux 9 points de mesure par variante de protection de Palm Beach sur le modèle Mopla.

Points	Hs aux points de mesure (m)								
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9
H1	H1 : Dir = N270° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,05	0,07	0,06	0,08	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05
Solution 2	0,07	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03
Solution 3	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,03
Solution 5a	0,06	0,07	0,06	0,07	0,05	0,04	0,04	0,02	0,05
Solution 5b	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,07
H2	H2 : Dir = N310° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,09	0,05	0,07	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,10
Solution 2	0,03	0,02	0,07	0,02	0,02	0,00	0,02	0,00	0,04
Solution 3	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
Solution 5a	0,08	0,04	0,06	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,09
Solution 5b	0,03	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
H3	H3 : Dir = N350° Hs = 1,0 m Tp = 6 s								
Etat actuel	0,12	0,08	0,11	0,10	0,06	0,07	0,06	0,07	0,15
Solution 2	0,02	0,03	0,08	0,06	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05
Solution 3	0,03	0,03	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06
Solution 5a	0,12	0,07	0,11	0,10	0,06	0,07	0,07	0,07	0,14
Solution 5b	0,05	0,04	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
T1	T1 : Dir = N285° Hs = 5,7 m Tp = 10 s								
Etat actuel	0,03	0,06	0,06	0,08	0,05	0,06	0,07	0,04	0,04
Solution 2	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02
Solution 3	0,04	0,06	0,09	0,11	0,04	0,05	0,08	0,12	0,13
Solution 5a	0,03	0,05	0,05	0,07	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04
Solution 5b	0,03	0,04	0,06	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07
T2	T2 : Dir = N320° Hs = 5,7 m Tp = 12 s								
Etat actuel	0,16	0,13	0,15	0,10	0,11	0,09	0,08	0,09	0,15
Solution 2	0,06	0,04	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,01	0,05
Solution 3	0,18	0,11	0,07	0,01	0,06	0,06	0,02	0,01	0,06
Solution 5a	0,14	0,11	0,13	0,10	0,09	0,09	0,07	0,08	0,13
Solution 5b	0,12	0,09	0,09	0,06	0,08	0,07	0,05	0,05	0,08

ANNEXE V

Tableau 1 : Résultats des sondes de la variante initiale de l'essai tridimensionnel à fond fixe.

Direction	Niveau d'eau m NGA	Houle	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Nord 295°	± 0,00	Tassement Hs = 0,95m	1,00	0,91	0,99	0,19	0,87	2,30	0,22	0,97	0,65	0,12
		Tassement Hs = 2,00m	2,00	2,04	1,69	0,41	1,14	2,94	0,47	1,74	1,95	0,29
		Annuelle Hs = 3,80m	3,13	3,30	1,71	0,56	1,29	3,28	0,64	1,78	2,12	0,46
		Quinquennale Hs = 4,20m	3,89	3,55	1,68	0,55	6,23	2,14	0,64	1,60	2,23	0,53
		Décennale Hs = 4,50m	3,86	3,62	1,75	0,60	1,22	2,11	0,69	1,57	2,11	0,55
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,82	3,61	1,75	0,67	1,25	2,06	0,74	1,58	2,13	0,30
	+ 1,00	Cinquantennale Hs = 4,80m	3,84	4,11	2,14	1,28	1,92	2,33	1,33	2,08	2,84	1,25
	- 0,50	Annuelle Hs = 3,80m	3,52	3,21	1,40	0,42	0,79	1,70	0,51	1,25	1,67	0,41
		Quinquennale Hs = 4,20m	3,54	3,24	1,39	0,51	0,79	1,67	0,56	1,27	1,74	0,46
		Décennale Hs = 4,50m	3,42	3,31	1,53	0,57	0,83	1,82	0,56	1,28	1,76	0,47
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,24	3,36	1,51	0,55	0,82	1,91	0,57	1,25	1,66	0,47
Cinquantennale Hs = 4,80m Endurance		3,08	3,32	1,52	0,56	0,82	1,89	0,57	1,24	1,70	0,44	

Direction	Niveau d'eau m NGA	Houle	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Nord 325°	± 0,00	Tassement Hs = 0,95m	0,94	0,91	0,14	0,09	0,29	1,35	0,16	0,85	0,60	0,13
		Tassement Hs = 2,00m	2,13	1,90	0,63	0,18	0,83	1,91	0,32	1,34	1,57	0,27
		Annuelle Hs = 3,80m	3,32	3,23	0,94	0,24	0,84	1,75	0,47	1,57	1,81	0,47
		Quinquennale Hs = 4,20m	3,41	3,36	0,99	0,28	0,84	1,77	0,49	1,64	1,79	0,47
		Décennale Hs = 4,50m	3,37	3,410,95	0,31	0,84	1,78	0,50	1,66	1,73	0,47	
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,24	3,30	0,93	0,30	0,83	1,82	0,53	1,61	1,83	0,48
	+ 1,00	Cinquantennale Hs = 4,80m	4,32	4,43	1,05	0,54	1,27	1,97	2,10	4,77	2,26	1,06
	- 0,50	Annuelle Hs = 3,80m	3,00	3,00	0,76	0,15	0,62	1,47	0,24	1,08	1,56	0,25
		Quinquennale Hs = 4,20m	4,49	2,97	0,84	0,66	0,64	1,43	0,43	1,06	1,36	0,31
		Décennale Hs = 4,50m	3,16	3,13	0,82	0,22	0,66	1,61	0,31	1,16	1,52	0,34
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,02	3,03	0,82	0,23	0,65	1,62	0,35	1,16	1,50	0,36
		Cinquantennale Hs = 4,80m Endurance	3,05	3,04	0,83	0,22	0,65	1,59	0,35	1,16	1,50	0,36

Direction	Niveau d'eau m NGA	Houle	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Nord 265°	± 0,00	Annuelle Hs = 3,80m	3,21	3,27	1,97	0,50	1,14	1,75	0,47	1,17	0,99	0,23
		Quinquennale Hs = 4,20m	3,28	3,33	1,99	0,55	1,12	1,69	0,49	1,21	0,97	0,25
		Décennale Hs = 4,50m	3,38	3,39	2,05	0,52	1,11	1,67	0,49	1,21	0,96	0,25
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,41	3,37	1,95	0,58	1,12	1,63	0,53	1,17	0,94	0,25
	+ 1,00	Cinquantennale Hs = 4,80m	3,83	3,85	2,47	1,30	1,75	2,52	1,17	1,28	0,90	0,61
	- 0,50	Annuelle Hs = 3,80m	2,93	3,02	1,54	0,39	0,80	1,56	0,27	1,01	0,97	0,17
		Quinquennale Hs = 4,20m	2,96	2,91	1,43	0,32	0,74	1,56	0,23	0,99	1,06	0,15
		Décennale Hs = 4,50m	3,09	3,15	1,59	0,42	0,78	1,46	0,26	1,03	1,01	0,19
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,04	3,12	1,61	0,41	0,76	1,45	0,28	1,02	1,05	0,20
		Cinquantennale Hs = 4,80m Endurance	3,08	3,12	1,60	0,41	0,76	1,46	0,27	1,03	1,03	0,20

Tableau 2 : Résultats des sondes de la variante 1 de l'essai tridimensionnel à fond fixe.

Direction	Niveau d'eau m NGA	Houle	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Nord 295°	± 0,00	Tassement Hs = 2,00m	1,95	2,12	1,71	0,54	1,04	2,24	0,43	1,37	1,76	0,26
		Annuelle Hs = 3,80m	3,68	3,36	1,77	0,72	1,19	2,36	0,59	1,66	1,88	0,43
		Décennale Hs = 4,50m	3,82	3,46	1,80	0,74	1,17	2,67	0,69	1,57	2,10	0,53
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,90	3,37	1,81	0,74	1,23	2,62	0,72	1,54	2,05	0,54
	+ 1,00	Cinquantennale Hs = 4,80m	3,27	3,82	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 3 : Résultats des sondes de la variante 2 de l'essai tridimensionnel à fond fixe.

Direction	Niveau d'eau m NGA	Houle	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Nord 295°	± 0,00	Tassement Hs = 2,00m	1,86	2,04	1,51	0,32	1,06	00	0,44	1,42	3,55	0,34
		Annuelle Hs = 3,80m	3,26	3,33	1,69	0,47	1,17	2,04	0,65	1,60	4,02	0,62
		Décennale Hs = 4,50m	3,25	3,50	1,72	0,60	1,19	2,19	0,70	1,56	4,34	0,83
		Cinquantennale Hs = 4,80m	3,35	3,48	1,69	0,58	1,18	2,21	0,77	1,53	4,28	0,78
	+ 1,00	Cinquantennale Hs = 4,80m	4,01	3,88	2,44	-	-	2,49	-	-	2,61	-

Tableau 4 : Résultats des sondes de la variante 3 de l'essai tridimensionnel à fond fixe.

Direction	Niveau d'eau m NGA	Houle	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Nord 295°	± 0,00	Tassement Hs = 2,00m	2,03	2,21	1,56	0,34	1,13	2,09	0,43	1,38	1,63	0,29
		Annuelle Hs = 3,80m	3,41	3,59	1,71	0,50	1,26	1,96	0,62	1,61	1,91	0,54
		Décennale Hs = 4,50m	3,53	3,62	1,77	0,58	1,26	2,14	0,72	1,51	2,05	0,57
		Cinquantennale Hs = 4,80m	4,41	3,50	1,73	0,59	1,25	1,98	0,70	1,50	2,07	0,91
	+ 1,00	Cinquantennale Hs = 4,80m	3,85	3,94	2,31	1,19	1,90	2,58	1,34	1,97	2,53	1,71

ANNEXE VI

Figure 1 : fiche technique du PVC plastique utilisé en modèle à fond mobile.

SOCOPLAST - SPA
SOCIÉTÉ DE COMMERCIALISATION DES PRODUITS PLASTIQUES ET CAOUTCHOUCS
 CAPITAL SOCIAL 199.999.999 DA

Centre Régional de Distribution Alger

FICHE TECHNIQUE

Feuille en PVC pour Revêtement de Sol

Présentation

Caractéristiques	Standard	Sur Commande
Épaisseur (mm)	02	1 à 2,5
Largeur (cm)	140	130 à 150
Longueur & Poids des bobines (ml / kg)	20/80	En fonction de l'épaisseur et de la largeur commandée
Finissage	Lisse/crampon	Suivant motifs disponibles
Couleur	Gris - Marron	Toute teinte peut être reproduite
Étiquetage	Étiquetage mentionnant : Épaisseur, Poids, Longueur, Largeur, Date de fabrication.	
Emballage	Sous Polyéthylène ou papier	

Caractéristiques Techniques

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Épaisseur : 2 mm + 5% ✓ Poids : 2560 g / m² + 3% ✓ Masse volumique: 1,41 g / cm³ + 1% ✓ Résistance à la traction : > 60 kgf / cm ✓ Allongement à la rupture : > 130% ✓ Inflammabilité : Bonne ✓ Reprise élastique : 5,23% ✓ Inflammabilité : Contient un agent ignifuge. 	<ul style="list-style-type: none"> - Absorption eau : < 2% - Retrait : Longueur < 2% <li style="padding-left: 20px;">Transversal < 1% - Résistance à la lumière : Bonne - Température rupture à froid : -30°C - Abrasion : 0,95% - Résistance aux produits chimiques : Bonne
---	--

Application & Utilisation

Le « Revêtement de Sol » est destiné à être utilisé dans les chalets et toutes constructions préfabriquées.

Mode d'Utilisation

La pose du Revêtement de Sol se fait par collage.

Figure 2 : fiches techniques du Broyeur BT200 pour plastique (acquis par le LEM).



BROYEUR PLASTIQUE

» Broyeurs d'une conception rationnelle, d'une structure indéformable et usiné avec précision.

» Spécialement étudié pour broyage de toutes sortes de plastique avec une production satisfaisante.

Des mécanismes, à actionnement manuel et d'une grande sécurité, permettent un accès rapide et commode à la chambre de broyage en vue de nettoyage, de changement de couteaux ou de remplacement de la grille.

La forme et la disposition de la trémie, du rotor, des couteaux fixes et de la grille ont été étudiés en vue d'une alimentation continue, dans la meilleure position de coupe pour assurer un grain régulier.

Ce dernier est recueilli à l'aide d'un aspirateur.


- * La trémie est amovible, équipée d'écran perforé suivant le diamètre demandé.
- * Le rotor est en acier mono bloc équipé de lames réaffûtables.
- * Le stator entièrement mécanique, permet le réglage des lames stator. Les lames sont symétriques, réaffûtables et réglables.
- * Les lames sont usinées, traitées et recueillies dans nos ateliers.

TAB. LEAU DESCRIPTIF

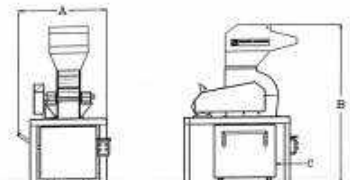
Type	Puissance Kw	Rotor Ø	Bloc de broyage	Reference lames	Capacité prod. en kg/h
BT 200	5,5	180	300X210	200X50X15	1
BT 300	7,5	220	360X310	150X60X15	1
BT 400	11	250	410X410	200X70X15	1
BT 600	15	340	620X520	300X80X20	2
BT 800	22	400	820X620	400X100X20	3

HALLOUYA
صناعة آلات الطحن
Fabrication Machines à broyer

Broyeur BT200
Manuel d'utilisation



BROYEUR POUR PLASTIQUE



Type	BT200
A	1480
B	1340
C	840

Modèle de Machine : BT 200

Partie de Travail : 1

Manuel en Français : 7

Code : 05.11 / 2008

Fabrication Machines à Broyer

Serit HALLOUYA MOUSSAOUI

TEL: 0033 20 246 252 2

39234038 20 852 546

Design

Plan

Mat

Tableaux: Statistiques des houles de Palm Beach-Azur à – 15m (Sogreah, 2010).

Tableau 1 : Climat des houles à -15m devant Palm Beach, Occurrences des apparitions par secteur %.

Directions moyennes des houles (degrés Nord)																							Lues	Significatives	
Secteurs →	355°-5°	1285°30	1285°30	1285°30	35°-45°	45°-55°	55°-65°	65°-75°	75°-85°	225°-235°	235°-245°	245°-255°	255°-265°	265°-275°	275°-285°	285°-295°	295°-305°	305°-315°	315°-325°	325°-335°	335°-345°	345°-355°	128530	128530	
Hs (m) ↓	0-360	10	20	30	40	50	60	70	80	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	Total		
Indéterminé																									
Calmes	0,12%	0,11%	0,11%	0,15%	0,23%	0,34%	0,70%	0,73%		0,20%	0,26%	0,24%	0,22%	0,19%	0,18%	0,14%	0,13%	0,10%	0,10%	0,08%	0,10%	0,08%	4,51%		Tp (s) associé
0.0 - 0.5	9,72%	21,60%	1,84%	1,54%	0,73%	0,81%	0,62%			0,03%	0,11%	0,19%	0,87%	0,13%	0,05%	0,03%	0,03%	0,02%	0,02%	0,02%	0,06%	3,07%	41,49%	4	
0.5 - 1.0	2,08%	0,03%											0,34%	4,82%	4,99%	2,04%	1,33%	1,04%	0,90%	0,97%	2,15%	4,82%	25,50%	5	
1.0 - 1.5	0,06%												0,00%	2,10%	3,53%	1,00%	0,65%	0,57%	0,51%	0,73%	1,70%	1,41%	12,26%	6	
1.5 - 2.0	0,00%													2,06%	2,85%	0,49%	0,32%	0,32%	0,32%	0,66%	1,03%	0,37%	8,42%	7	
2.0 - 2.5														0,35%	1,42%	0,41%	0,25%	0,19%	0,20%	0,28%	0,41%	0,07%	3,59%	7,5	
2.5 - 3.0														0,17%	1,19%	0,11%	0,08%	0,08%	0,12%	0,20%	0,25%	0,01%	2,21%	8	
3.0 - 3.5														0,01%	0,62%	0,14%	0,06%	0,07%	0,08%	0,13%	0,09%		1,20%	9	
3.5 - 4.0															0,23%	0,07%	0,04%	0,03%	0,04%	0,08%	0,02%		0,51%	10	
4.0 - 4.5															0,07%	0,02%	0,02%	0,01%	0,02%	0,03%	0,01%		0,18%	10	
4.5 - 5.0															0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%		0,07%	11	
5.0 - 5.5															0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%			0,04%	11	
5.5 - 6.0																0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%			0,01%	12	
6.0 - 6.5															0,00%	0,00%				0,00%			0,00%	13	
6.5 - 7.0																		0,00%	0,00%				0,00%	14	
7.0 - 7.5																			0,00%				0,00%	14	
7.5 - 8.0																			0,00%				0,00%	15	
> 8.0																							0,00%		
Total	11,86%	21,63%	1,84%	1,54%	0,73%	0,81%	0,62%			0,03%	0,11%	0,19%	1,21%	9,65%	14,96%	4,34%	2,78%	2,34%	2,23%	3,13%	5,73%	9,75%	100,00%		
Données	Lues : 128530, Ecrites : 128530, Significatives : 128530.																								

Tableau 2 : Climat des houles à -15m devant Palm Beach, Dépassement en pourcentage par secteur %.

Directions moyennes des houles (degrés Nord)																							
Secteurs →	355°-5°	5°-15°	15°-25°	25°-35°	35°-45°	45°-55°	55°-65°	65°-75°	75°-85°	225°-235°	235°-245°	245°-255°	255°-265°	265°-275°	275°-285°	285°-295°	295°-305°	305°-315°	315°-325°	325°-335°	335°-345°	345°-355°	
Hs (m) ↓	0 - 360	10	20	30	40	50	60	70	80	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	Total
> 0.0	11,86 %	21,63 %	1,84 %	1,54 %	0,73 %	0,81 %	0,62 %			0,03%	0,11%	0,19%	1,21%	9,65%	14,96%	4,34%	2,78%	2,34%	2,23%	3,13%	5,73%	9,75%	95,49 %
> 0.5	2,13 %	0,03 %											0,35%	9,52%	14,91%	4,31%	2,76%	2,32%	2,21%	3,11%	5,67%	6,68%	54,00 %
> 1.0	0,06 %												0,00%	4,70%	9,92%	2,27%	1,43%	1,28%	1,31%	2,14%	3,52%	1,86%	28,50 %
> 1.5	0,00 %													2,60%	6,40%	1,27%	0,78%	0,71%	0,80%	1,41%	1,81%	0,45%	16,24 %
> 2.0														0,53%	3,55%	0,78%	0,45%	0,40%	0,49%	0,75%	0,78%	0,08%	7,81 %
> 2.5														0,18%	2,13%	0,37%	0,20%	0,21%	0,29%	0,47%	0,37%	0,01%	4,23 %
> 3.0														0,01%	0,95%	0,26%	0,13%	0,13%	0,16%	0,26%	0,12%		2,02 %
> 3.5															0,33%	0,12%	0,07%	0,06%	0,08%	0,13%	0,03%		0,81 %
> 4.0															0,10%	0,05%	0,03%	0,03%	0,04%	0,05%	0,01%		0,30 %
> 4.5															0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,00%		0,13 %
> 5.0															0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%			0,06 %
> 5.5															0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%			0,02 %
> 6.0															0,00%	0,00%		0,00%	0,00%	0,00%			0,01 %
> 6.5																		0,00%	0,00%				0,00 %
> 7.0																			0,00%				0,00 %
> 7.5																			0,00%				0,00 %
> 8.0																							

Tableau 3 : Corrélation Hs/Tp.

Toutes Directions		Hs (m)																	
Classes	Indéterminés	0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0	7,0-7,5	7,5-8,0	8,0-8,5	>8,5
Tp (s)	Indéterminés																		
0		34																	
2		22	41	13															
4		3519	15275	8130	480	6	2												
6		1551	26334	15643	7765	3200	704	12	2										
8		602	9913	4971	4781	5906	3029	1770	726	108	6								
10		60	1704	3192	1585	800	522	879	707	444	152	40	15	3					
12		5	64	826	1041	724	250	126	83	87	64	44	26	13	2	1			
14			1	5	103	191	98	51	21	12	7	6	4	2	2		1	1	
16					1		3	6	9	1						1			
18																			
20																			

Tableau 4 : Climat regroupé des houles Hs par -15 m devant Palm Beach. Orientation moyenne 295°, balayage batteur au maximum 45 ° de part et d'autre, soit 250-340°N.												
Hs (m) ↓	Tp (s)	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	Total
<= 0.5	4	1,039%	1,088%	0,317%	0,233%	0,166%	0,159%	0,119%	0,120%	0,098%	42,661%	46,00%
0.5 - 1.5	6	0,000%	0,346%	6,924%	8,512%	3,041%	1,979%	1,608%	1,408%	1,698%	12,246%	37,76%
1.5 - 2.5	7			2,415%	4,264%	0,898%	0,574%	0,506%	0,517%	0,946%	1,887%	12,01%
2.5 - 3.5	9			0,183%	1,806%	0,254%	0,136%	0,148%	0,207%	0,338%	0,346%	3,42%
3.5 - 5.5	11				0,324%	0,113%	0,066%	0,056%	0,074%	0,128%	0,030%	0,79%
5.5 - 8.0	14				0,001%	0,007%	0,002%	0,003%	0,005%	0,002%		0,02%
Total		1,039%	1,435%	9,839%	15,141%	4,478%	2,915%	2,441%	2,332%	3,209%	57,170%	100,00%

Tableau 5 : Calcul du climat équivalent. Orientation moyenne 295°, balayage batteur au maximum 45 ° de part et d'autre, soit 250-340°N.
Houles équivalentes : $H^2T \sin(2a) dt$.

dt		250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	
	a	-45	-35	-25	-15	-5	5	15	25	35	45	
H	sin(2a)	-1,00	-0,94	-0,77	-0,50	-0,17	0,17	0,50	0,77	0,94	1,00	
0,38	4	-0,003	-0,003	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,124	<= 0.5
1,12	6	0,000	-0,024	-0,398	-0,319	-0,040	0,026	0,060	0,081	0,120	0,918	0.5 - 1.5
0,2 - 1,5 m	5	1,04%	1,43%	7,24%	8,75%	3,21%	2,14%	1,73%	1,53%	1,80%	54,91%	83,76%
1.5 - 2.5	7			2,42%	4,26%	0,90%	0,57%	0,51%	0,52%	0,95%	1,89%	12,01%
2.5 - 3.5	9			0,18%	1,81%	0,25%	0,14%	0,15%	0,21%	0,34%	0,35%	3,42%
4,61	11				-0,379	-0,046	0,027	0,065	0,132	0,280	0,069	3.5 - 5.5
6,29	14				-0,002	-0,007	0,001	0,009	0,023	0,012	0,000	5.5 - 7.0
3,5 - 6 m	12				0,33%	0,12%	0,07%	0,06%	0,08%	0,13%	0,03%	0,81%

Hs (m)	H = Racine($0,5*(H_{s1}^2+H_{s2}^2)$)	Tp (s)	H ² T
0,2 1,5	1,07	5	5,7
1,5 2,5	2,06	7	29,8
2,5 3,5	3,04	9	83,3
3,5 6,0	4,91	12	289,5
0,2 0,5	0,38	4	0,6
0,5 1,5	1,12	6	7,5
3,5 5,5	4,61	11	233,8
5,5 7,0	6,29	14	554,8

**Tableau 6 : Climat équivalent. Orientation moyenne 295°, balayage batteur au maximum 45 ° de part et d'autre, soit 250-340°N.
Houles équivalentes : $H^2T \sin(2a) dt$ pour ramener à 4 classes de houles.**

dt		250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	Total
Hs (m)	Tp (s)	-45	-35	-25	-15	-5	5	15	25	35	45	
0,2 - 1,5	5	1,04%	1,43%	7,24%	8,75%	3,21%	2,14%	1,73%	1,53%	1,80%	54,91%	63,76%
1.5 - 2.5	7			2,42%	4,26%	0,90%	0,57%	0,51%	0,52%	0,95%	1,89%	12,01%
2.5 - 3.5	9			0,18%	1,81%	0,25%	0,14%	0,15%	0,21%	0,34%	0,35%	3,42%
3,5 - 6,0	12				0,33%	0,12%	0,07%	0,06%	0,08%	0,13%	0,03%	0,81%
Total		1,04%	1,43%	9,84%	15,14%	4,48%	2,92%	2,44%	2,33%	3,21%	57,17%	100,00%