

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

Etude en modèle réduit physique en bassin à houle à fond mobile sur le plan qualitatif de la protection de rivage du club hippique de Béjaïa

ALIM Ghiles

Sous la direction de

Mr Rabie MESSAHLI MAA
Mlle Hadjer MOKEDDEM Ingénieur

Présenté et soutenu publiquement le 09 Juillet 2020

Composition du Jury

Président	Mlle	Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteur	Mr	Rabie MESSAHLI	MAA	ENP
	Mlle	Hadjer MOKEDDEM	Ingénieur	LEM
Examineur	M ^{me}	Meriem CHETIBI	Docteur	ENP
	M ^r	Salim BENZIADA	MAA	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

Etude en modèle réduit physique en bassin à houle à fond mobile sur le plan qualitatif de la protection de rivage du club hippique de Béjaïa

ALIM Ghiles

Sous la direction de

Mr Rabie MESSAHLI MAA
Mlle Hadjer MOKEDDEM Ingénieur

Présenté et soutenu publiquement le 09 Juillet 2020

Composition du Jury

Président	Mlle	Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteur	Mr	Rabie MESSAHLI	MAA	ENP
	Mlle	Hadjer MOKEDDEM	Ingénieur	LEM
Examineur	M ^{me}	Meriem CHETIBI	Docteur	ENP
	M ^r	Salim BENZIADA	MAA	ENP

Remerciements

Je remercie tout le chaleureux personnel du Laboratoire d'Etudes Maritimes pour m'avoir permis d'y effectuer mon projet de fin d'étude, et ce dans des conditions de travail optimales. Ce fut une expérience très enrichissante pour moi de côtoyer les ingénieurs et les techniciens travaillant dans un établissement de si grande renommée, tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je parle en particulier de **Mlle Mokeddem Hadjer** et **Mr Benaissa Zouhair**, deux personnes très compétentes qui m'ont beaucoup assisté dans la réalisation dans ce modeste travail et veillé à répondre à mes questions.

Un grand merci à mon encadreur et enseignant, **Mr Messahli Rabie**, pour l'énergie, l'implication et la passion qu'il a toujours exhibées lors de ses cours d'hydraulique maritime et à travers lesquels, il nous a fait part de son savoir dans cette discipline.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers la très aimable **Mlle Benmamar Saida** et le très charismatique **Mr Benziada Salim** pour avoir toujours cru en mes capacités et pour le soutien moral qu'ils m'ont tout deux apporté tout au long de l'année scolaire et sans lequel, je ne serais pas arrivé à ce stade.

Je remercie également **M^{me} Chetibi** d'avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner mon mémoire.

الملخص

في مواجهة التآكل الشديد الذي يصيب شاطئ نادي بجاية لسباق الخيل بفعل عوامل هيدروديناميكية طبيعية و أخرى من طبيعة بشرية، أجرى مختبر الدراسات البحرية دراسة حماية الشاطئ على نموذج الحجم المصغر مع قاع متحرك من أجل وضع حل هدفه تثبيت الخط الساحلي والسماح أيضا بشحن الشاطئ بالرمال مجددا.

الكلمات المفتاحية: التآكل، تثبيت، الخط الساحلي، شحن الشاطئ، نموذج الحجم المصغر، قاع متحرك.

Abstract

Faced with the severe erosion afflicted on the beach of the Béjaïa horse racing club by natural hydrodynamic factors and others of man-made nature, the Laboratory of Maritime Studies conducted a shore protection study on a physical scale model with a mobile bottom in order to establish a solution that will stabilize the coastline and also cause the beach to recharge with sand.

Key words: erosion, stabilize, coastline, recharge, scale model, mobile bottom.

Résumé

Face à la sévère érosion affligée à la plage du club hippique de Béjaïa par des facteurs naturels hydrodynamiques et d'autres de nature anthropique, le Laboratoire d'Etudes Maritimes a mené une étude de protection du rivage sur modèle réduit physique à fond mobile afin d'établir une solution qui provoquera une stabilisation du trait de côte et permettra d'autre part le rechargement de la plage en sédiments.

Mots-clés : érosion, stabilisation, rechargement, côte, modèle réduit, fond mobile.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des photos

Liste des symboles

Liste des acronymes

Introduction générale.....	14
I. La situation actuelle à la plage du club hippique de Béjaïa.....	16
I. 1. Présentation de la zone d'étude.....	16
I. 2. Aspect morphologique du golfe de Béjaïa.....	17
I. 3. Données climatologiques.....	18
I. 3. 1. Précipitations.....	19
I. 3. 2. Température.....	19
I. 3. 3. Vent.....	19
I. 4. Données hydrodynamiques.....	20
I. 4. 1. La marée.....	20
I. 4. 2. La houle au large.....	21
I. 4. 3. La houle à la côte.....	25
I. 4. 3. 1. Méthodologie de l'étude de réfraction.....	25
I. 4. 3. 2. Les étapes du calcul de réfraction.....	27
I. 4. 3. 3. Résultats obtenus.....	27
I. 4. 3. 4. Interprétation des résultats.....	29
I. 4. 4. Les courants marins.....	30
I. 4. 4. 1. Le courant marin général.....	30
I. 4. 4. 2. Le courant de marée.....	30
I. 4. 4. 3. Les courants de houle.....	30
I. 5. Analyse du trait de côte.....	30
I. 6. Etude sédimentologique.....	33
I. 6. 1. Analyse bathymétrique.....	33
I. 6. 2. Analyse granulométrique.....	34
I. 6. 2. 1. Position des points de prélèvement.....	34
I. 6. 2. 2. Etude de la fraction fine.....	35
I. 6. 2. 3. Etude de la fraction grossière.....	35
I. 7. Conclusion.....	38

II. Etablissement de la solution au problème de la plage du club hippique.....	40
II. 1. Les méthodes et ouvrages de protection littorale	40
II. 1. 1. Les ouvrages de défense verticaux	40
II. 1. 2. Les ouvrages de défense longitudinaux	43
II. 1. 2. 1. Brise-lames	43
II. 1. 2. 2. Les ouvrages de haut-de-plage	49
II. 1. 3. Les solutions dynamiques	52
II. 2. Choix de la solution	53
II. 3. Pré-dimensionnement de la solution.....	56
II. 3. 1. Définition du plan d'aménagement.....	56
II. 3. 1. 1. Longueur relative des brise-lames (relation L – D)	57
II. 3. 1. 3. Longueur des brise-lames	57
II. 3. 1. 4. Espacement des brise-lames	58
II. 3. 1. 5. Calculs et résultats	58
II. 3. 2. Définition du profil du brise-lame	60
II. 3. 2. 1. La hauteur du brise-lames	60
II. 3. 2. 2. La largeur en tête du brise-lames	61
II. 3. 2. 3. Dimensionnement de la partie courante.....	62
II. 3. 2. 4. Dimensionnement du talus arrière	64
II. 3. 2. 5. Dimensionnement de la partie musoir	64
II. 4. Conclusion	65
III. Etude en modèle réduit à fond mobile	67
III. 1. Introduction aux modèles réduits physiques	67
III. 2. Les lois de similitude.....	68
III. 2. 1. La similitude géométrique	68
III. 2. 2. La similitude cinématique	68
III. 2. 3. La similitude hydrodynamique	69
III. 2. 4. La similitude de Froude	72
III. 3. Construction du modèle	73
III. 3. 1. Choix de l'échelle géométrique	73
III. 3. 2. Choix du matériau mobile	74
III. 3. 3. Construction des fonds	75
III. 3. 4. Densité de l'eau	77
III. 3. 5. Construction des brise-lames.....	78
III. 4. Déroulement des essais	79
III. 4. 1. Cadre des essais	79
III. 4. 2. Hypothèses des essais	79

III. 4. 3. Génération de la houle	80
III. 4. 4. Méthodes et matériel de mesure	80
III. 4. 5. Observations effectuées et moyens mis en œuvre	81
III. 5. Conditions de houles	83
III. 6. Essais sédimentologiques	85
III. 6. 1. Calibration sédimentologique	85
III. 6. 1. 1. Déroulement	85
III. 6. 1. 2. Résultats des essais de calibration sédimentologique	87
III. 6. 2. Essais sédimentologiques sur la solution	90
III. 6. 2. 1. Déroulement	90
III. 6. 2. 2. Résultats	90
III. 6. 2. 3. Conclusion	90
III. 6. 3. Essais sédimentologiques sur la variante 2	96
III. 6. 4. Essais sédimentologiques sur la variante 3	100
III. 7. Essais de stabilité	104
III. 7. 1. Essais de stabilité avec la direction N60°	104
III. 7. 2. Essais de stabilité avec la direction N45°	105
III. 7. 3. Essais de stabilité avec la direction N20°	106
III. 7. 4. Conclusion sur les essais de stabilité	109
III. 8. Conclusion	109
IV. Discussion des résultats du modèle numérique	111
IV. 1. Présentation du modèle numérique	111
IV. 1. 1. Le maillage	112
IV. 1. 2. Le domaine de calcul	112
IV. 1. 3. La bathymétrie	113
IV. 1. 4. Données sédimentologiques	114
IV. 1. 5. Données de houle	114
IV. 2. Démarche de l'approche numérique	115
IV. 3. Résultats de la simulation numérique	115
IV. 4. Conclusion	120
Conclusion générale	121
Références bibliographiques	123
Annexe	125

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Fréquences mensuelles moyennes d'apparition de la houle au large selon sa direction de provenance	21
Tableau I-2 : La relation état de la mer – amplitude de la houle	22
Tableau I-3 : Répartition (%) des houles au large en fonction de l'amplitude et de la période	22
Tableau I-4 : Valeurs des hauteurs des houles extrêmes par direction de provenance.....	23
Tableau I-5 : Hauteur des houles annuelles par direction de provenance et par période.....	26
Tableau I-6 : Caractéristiques des houles extrêmes par direction et par période de retour	26
Tableau I-7 : Moyennes des résultats obtenus pour la houle annuelle à –10 m.....	28
Tableau I-8 : Moyenne des résultats obtenus pour les houles extrêmes de différentes périodes de retour à différentes profondeurs	28
Tableau II-1 : Comparaison des variantes en enrochements et en géotubes	55
Tableau II-2 : Corrélation entre les longueurs de l'ouvrage et de l'onde d'après O. Toyoshima	58
Tableau II-3 : Application des différentes méthodes de calcul	59
Tableau II-4 : Calcul de la largeur de la berme du brise-lame	62
Tableau II-5 : Calcul des dimensions de la partie courante du brise-lame.....	64
Tableau III-1 : Rapports de similitude des différentes grandeurs physiques	73
Tableau III-2 : Caractéristiques des enrochements du brise-lame en prototype et en modèle	78
Tableau III-4 : Statistiques de la houle à -7.00 mètres de profondeur	83
Tableau III-5 : Caractéristiques des houles annuelles concernées par l'étude sédimentologique	83
Tableau III-6 : La répartition temporelle du cycle annuel selon la direction et la période	84
Tableau III-7 : Résultats des essais de stabilité pour la N60°	104
Tableau III-8 : Observations issues des essais de stabilité pour la N60°	104
Tableau III-9 : Résultats des essais de stabilité pour la N45°	105
Tableau III-10 : Observations issues des essais de stabilité pour la N45°	105
Tableau III-11 : Résultats des essais de stabilité pour la N20°	106
Tableau III-12 : Observations issues des essais de stabilité pour la N20°	106
Tableau IV-1 : Caractéristiques des houles au large utilisées dans la simulation numérique	114
Tableau IV-2 : Forçage aux limites du modèle de calcul	114
Tableau IV-3 : Atouts que possède chacun des modèles	120

Liste des figures

Figure I.1 : Vue satellitaire de la zone d'étude (Google Earth)	17
Figure I.2 : Vue satellitaire du golfe de Béjaïa (Google Earth)	18
Figure I.3 : Roses des vents trimestrielles de la fréquence d'apparition du vent au large	20
Figure I.4 : Histogramme des fréquences moyennes annuelles d'apparition de la houle au large selon sa direction de provenance	22
Figure I.5 : Les houles qui peuvent atteindre le rivage du club hippique	24
Figure I.6 : Organigramme qui illustre la procédure du calcul de réfraction	27
Figure I.7 : L'évolution du trait de côte de la plage du club hippique entre 2004 et 2020	31
Figure I.8 : L'impact du régime de houles Nord-est sur l'érosion de la côte	32
Figure I.9 : Carte bathymétrique de la plage du club hippique	33
Figure I.10 : Répartition des 60 échantillons de sédiments prélevés	34
Figure I.11 : Répartition de la fraction fine (lutites)	35
Figure I.12 : Courbe granulométrique unimodale de l'échantillon 6	36
Figure I.13 : Courbe granulométrique bimodale de l'échantillon 11	36
Figure I.14 : Carte de répartition des sédiments selon la médiane D_{50}	37
Figure II.1 : Epi en enrochement classique	41
Figure II.2 : Epi en L à Bulverhythe, Royaume Uni	41
Figure II.3 : Epi en Y	42
Figure II.4 : Série de brise-lames, Elmer, Royaume-Uni	43
Figure II.5 : Photo d'un brise-lame en pneus	44
Figure II.6 : Illustration d'un brise-lame ponton de l'entreprise chinoise Superflex	45
Figure II.7 : Schéma de la coupe d'un géotube	46
Figure II.8 : Emploi d'un brise-lame en géotubes à Kaohsiung, Taiwan	46
Figure II.9 : Brise-lame en enrochement naturel. Perth, Australie	47
Figure II.10 : Dessins illustrant de gauche à droite : le cube rainuré, le tétrapode, l'accropode	48
Figure II.11 : Brise-lame muni d'une carapace en accropodes. Pays-Bas	48
Figure II.12 : Perré en maçonnerie datant du 19 ^{ème} siècle. La Flotte-en-Ré, France	50
Figure II.13 : Enrochements de haut-de-plage à Fouesnant, France	50
Figure II.14 : Reconstitution des dunes à Saintes Maries de la Mer, France	51
Figure II.15 : Travaux de rechargement de plage à Capbreton, France	52
Figure II.16 : Itinéraire entre le club hippique et la carrière de Tiab (14 km)	54
Figure II.17 : Schéma du plan d'aménagement et de ses paramètres	56
Figure II.18 : Tracé en plan de l'aménagement de la plage du club hippique	60
Figure II.19 : Schéma du profil du brise-lame	61
Figure II.20 : Coupe-type d'une digue à talus	62
Figure II.21 : Coupe du brise-lame dimensionnée	65
Figure II.22 : Vue en plan du brise-lame	65

Figure III.1 : Représentation graphique du cycle de houle.....	85
Figure III.2 : Levé initial T0.....	88
Figure III.3 : Evolution des fonds entre T0 et T1.....	89
Figure III.4 : Levé initial T0 (avec solution).....	92
Figure III.5 : Evolution des fonds entre T1 et T0 (avec solution).....	93
Figure III.6 : Levé bathymétrique T3.....	94
Figure III.7 : Evolution des fonds entre T0 et T3.....	95
Figure III.8 : Plan masse de la variante 2.....	96
Figure III.9 : Levé bathymétrique T4.....	98
Figure III.10 : Evolution des fonds entre T0 et T4.....	99
Figure III.11 : Plan masse de la variante 3.....	100
Figure III.12 : Levé bathymétrique T5.....	102
Figure III.13 : Evolution des fonds entre T0 et T5.....	103
Figure IV.1 : Maillage triangulaire flexible adapté au domaine de calcul.....	112
Figure IV.2 : Bathymétrie de la zone d'étude.....	113
Figure IV.3 : Simulation du champ de courants générés par la houle N60° en présence des ouvrages.....	116
Figure IV.4 : Simulation de l'évolution des fonds en présence des ouvrages sous l'action de la houle N60°.....	117
Figure IV.5 : Hauteur de la houle transmise derrière les brise-lames.....	118
Figure IV.6 : Estimation en % de la houle transmise derrière les brise-lames.....	119

Liste des photos

Photo III.1 : Le PVC (photo prise au LEM)	75
Photo III.2 : Construction des fonds du modèle réduit	76
Photo III.3 : Les fonds à l'état final	76
Photo III.4 : Les enrochements utilisés au LEM.....	77
Photo III.5 : Modèle du brise-lame en cours de construction	79
Photo III.6 : A l'intérieur de la cabine de commande des essais	80
Photo III.7 : Les sondes ou capteurs de houle	81
Photo III.8 : Le laser 3D	82
Photo III.9 : Houles de la direction Nord 60°	86
Photo III.10 : Houles de la direction Nord 45°	86
Photo III.11 : Houles de la direction Nord 60° (vues d'un autre angle)	86
Photo III.12 : Photo des brise-lames avant le démarrage des essais	91
Photo III.13 : Les résultats obtenus après le cycle 3	91
Photo III.14 : Essais du cycle 4 : houles de la direction N60°	97
Photo III.15 : Vue de la plage après le cycle 4	97
Photo III.16 : L'érosion de la plage persiste au même endroit	97
Photo III.17 : Photo de la variante n°3 avant les essais	101
Photo III.18 : Essais du cycle 5 : houle de la direction N60°	101
Photo III.19 : Vue de la plage après le cycle 5	101
Photo III.20 : Essais de la houle cinquantennale de la direction N60°	107
Photo III.21 : Essais de la houle cinquantennale de la direction N45°	107
Photo III.22 : Essais de la houle cinquantennale de la direction N20°	107
Photo III.23 : Photo du brise-lames BL1 après les essais de stabilité	108
Photo III.24 : Photo du brise-lames BL2 après la série d'essais de stabilité	108
Photo III.25 : Photo du brise-lames BL3 après les essais de stabilité	108

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
B	Largeur de la berme.	[m]
C_p	Coefficient de perméabilité.	[-]
D	Distance à la côte.	[m]
$d_{\text{médian}}$	Diamètre médian des enrochements.	[m]
D_{50}	Diamètre médian des sédiments.	[m]
E	Espacement des brise-lames.	[m]
e_{carapace}	Épaisseur de la carapace.	[m]
F_R	Nombre de Froude.	[m]
g	Accélération de la pesanteur.	[m/s ²]
h	Profondeur.	[m]
H_m	Hauteur moyenne de la houle.	[m]
H_s	Hauteur significative de la houle.	[m]
K	Coefficient d'épaisseur de couche.	[-]
K_d	Coefficient de stabilité.	[-]
K_r	Coefficient de réfraction.	[-]
K_t	Coefficient de transmission.	[-]
L	Longueur du brise-lame	[m]
L_m	Longueur en modèle.	[m]
L_n	Longueur en prototype.	[m]
l	Longueur d'onde à la côte.	[m]
l_0	Longueur d'onde au large.	[m]
N	Nombre de couches de la carapace.	[-]
P	Poids.	[N]

Liste des symboles

R_c	Revanche de la crête.	[m]
T	Période de retour de la houle.	[an]
T_p	Période de la houle.	[s]
v_m	Vitesse en modèle.	[m/s]
v_n	Vitesse en prototype.	[m/s]
W	Poids des enrochements	[tonne]
α	Angle du talus coté mer.	[°]
λ	Echelle des longueurs.	[-]
ρ_s	Masse volumique des enrochements.	[t/m ³]
ρ_ω	Masse volumique de l'eau de mer.	[t/m ³]
ε_B	Le nombre d'Irribaren-Battjes.	[-]

Liste des acronymes

A.M.P.C.R.	Association Marocaine Permanente des Congres de la Route.
CEM	Centre d'essais sur modèle.
CERC	Coastal Engineering Research Center.
CETMEF	Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales.
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project.
L.C.H.F.	Laboratoire Central d'Hydraulique de France.
LEM	Laboratoire d'Etudes Maritimes.
MNT	Modèle numérique de terrain.
N.G.A.	Nivellement Général Algérien.
PVC	Polychlorure de vinyle.
SETHYAL	Société des Etudes Hydrauliques d'Alger.
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
SIG	Système d'information géographique.
SOGREAH	Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques.
SPM	Shore Protection Manual.
S.S.M.O.	Summary of Synoptic Meteorological Observations.
SWAN	Simulating Waves Nearshore.
TVC	Tout-venant de carrière.

Introduction générale

La côte, également connue sous le nom de littoral ou bord de mer, est définie comme la zone où la terre rencontre la mer ou l'océan, ou comme une ligne qui forme la frontière entre les deux. Cette étroite bande de terre qui borde la mer le long d'un continent ou d'une île est un endroit idéal pour témoigner d'un paysage en constante évolution. En effet, l'action ininterrompue des vagues, ou « houles » signifie que rien ne reste jamais figé très longtemps. On dit même que ces dernières sont les « sculpteurs » du littoral. Générées par des vents lointains au large, elles libèrent leur énergie, ainsi que les sédiments qu'elles transportent, lorsqu'elles se brisent sur le rivage. Quand elles se retirent, le lavage à contre-courant qu'elles provoquent emporte lui aussi du sable et du gravier de la plage vers la mer. **(Adapté d'un article de National Geographic).**

Environ 620 000 kilomètres de côte se trouvent sur notre planète, un chiffre qui était, autrefois, plus élevé. En effet, les agressions marines auxquelles elles sont constamment soumises, combinées aux activités humaines qui perturbent l'équilibre sédimentaire naturel du littoral, engendre un processus d'érosion des plages et de recul du trait de côte. Ce phénomène peut être observé de manière explicite lors des épisodes d'importante érosion côtière qui se produisent suite aux événements météorologiques extrêmes : tempêtes, inondations, tsunami...

À l'heure actuelle, l'érosion côtière est très courante. C'est un phénomène global qui a marqué, jusqu'à présent, 70% des côtes sablonneuses dans le monde. Les terres côtières sont rongées par l'eau de mer et les villages et les maisons côtières sont contraints de se déplacer à l'intérieur des continents, ce qui aboutit à une augmentation la densité de population, une destruction de la biodiversité des plages et de l'équilibre écologique, ainsi que des dommages directs ou indirects sur les vies humaines. L'érosion côtière est donc passée d'un changement naturel de l'environnement à un réel danger dont il faut se protéger. Cette nécessité a donné naissance à une discipline de l'ingénieur qui concerne la protection et la stabilisation des littoraux à travers des aménagements côtiers.

La plage du club hippique de Béjaïa, à l'Ouest de l'aéroport Abane Ramdane, est un parfait exemple de ce fléau. Le littoral à cet endroit subit depuis plusieurs années une érosion si intense que la mer inonde la route nationale n°09 lors des tempêtes. Pour remédier à ce problème, la Direction des Travaux Publics de la Wilaya de Béjaïa a fait appel à l'expertise du Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM), situé à Hydra, Alger, et lui a confié l'étude de protection du rivage du club hippique.

Dans le cadre de mon projet de fin d'études, j'ai participé à l'étude sur modèle réduit physique qui a été menée au niveau du centre d'essais sur modèle réduit (CEM) du LEM dans le but d'établir une solution à la problématique du club hippique. Le présent document veille à fournir tous les détails concernant cette étude et à retracer de manière logique les étapes du travail qui a été effectué afin de mener à bien le projet.

Chapitre I
La situation actuelle à la
plage du club hippique de
Béjaïa

I. La situation actuelle à la plage du club hippique de Béjaïa

Au cours de ce premier chapitre, nous veillerons à présenter et expliquer la situation actuelle au niveau de la plage du club hippique de Béjaïa, ainsi que toutes les données nécessaires à la compréhension et, par la suite, la résolution du problème exposé.

I. 1. Présentation de la zone d'étude

Exclusivement réservée aux activités équestres, telles que les randonnées à cheval et les cours d'équitation, la plage du club hippique concernée par l'étude est située sur la côte du golfe de Béjaïa, à l'est de l'aéroport Abane Ramdane, s'étalant parallèlement à la route reliant Béjaïa à Tichy.

Elle est délimitée :

- Au Nord par la mer méditerranée.
- Au Sud par la route nationale 9.
- A l'Ouest par un épi en T.
- A l'Est par une plateforme aménagée.

La plage du club hippique s'étend sur une longueur d'environ 800 mètres entre les deux points de coordonnées Lambert suivantes :

Point « Epi » :

36°42'32.07" Latitude Nord et 5° 5'20.16" Longitude Est.

Point « Plateforme » :

36°42'07.13" Latitude Nord et 5° 5'28.21" Longitude Est.

Au premier abord, la plage est formée en grande majorité de sable avec quelques galets de diamètre variable qui se concentrent en bancs au bas de celle-ci, formant ainsi une pente plus ou moins douce au niveau du trait de cote. Elle devient ensuite plus raide en haut avec une accumulation de bancs de sable, une attestation que la mer arrive jusqu'au haut-de-plage lors des tempêtes.

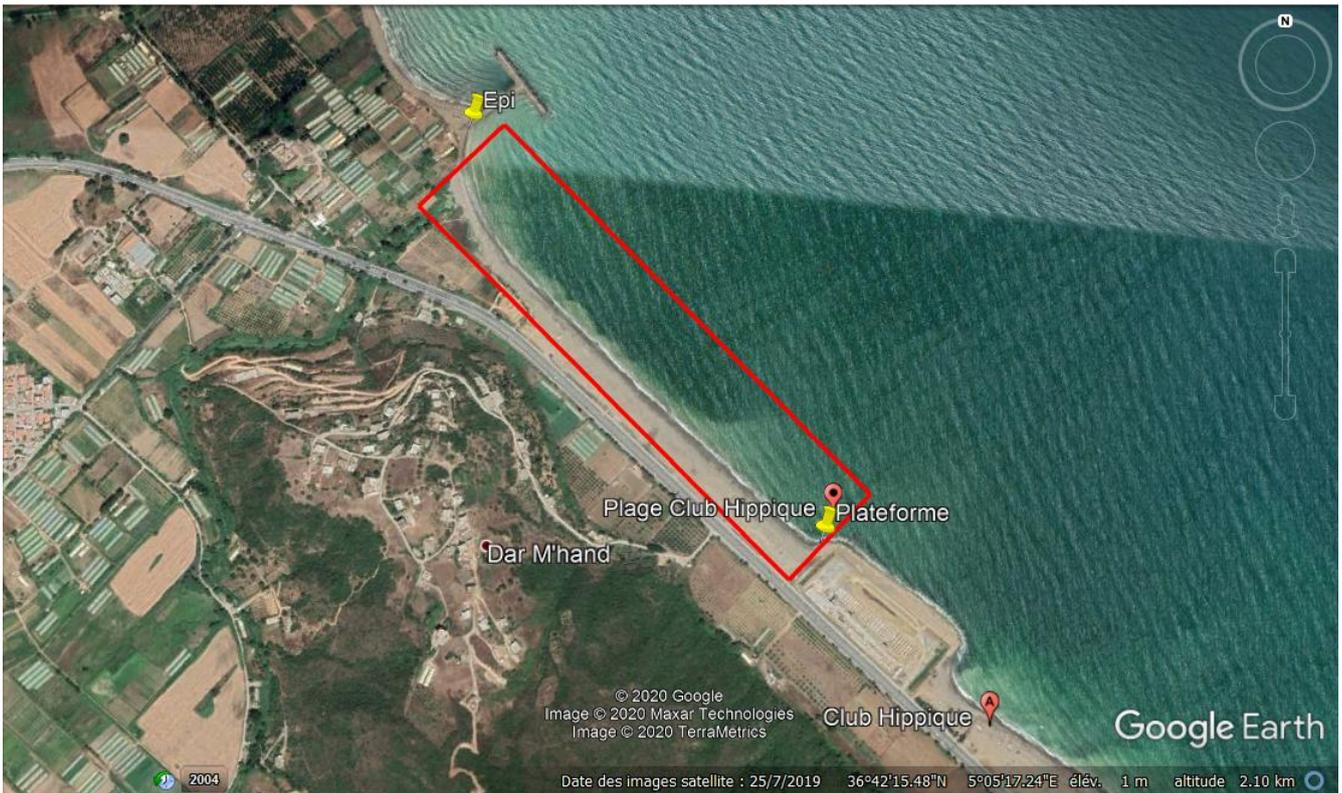


Figure I.1 : Vue satellitaire de la zone d'étude (Google Earth).

I. 2. Aspect morphologique du golfe de Béjaïa

Situé dans la partie sud du bassin méditerranéen, le golfe de Béjaïa s'étend du Cap Bouak à l'ouest au massif volcanique d'El Aouana à l'est, formant ainsi un arc de forme semi-circulaire sur un périmètre d'environ 54 kilomètres. Il se singularise par un plateau continental peu étendu, d'une largeur moyenne de 1,5 kilomètres, un glacis continental festonné par d'imposantes criques (Cap Aokas, Béni Segoual), d'où partent des vallées sous marines. La profondeur maximale du golfe de Béjaïa est d'environ 1000 mètres.

Les côtes occidentales et orientales de Béjaïa sont caractérisées par une succession de falaises, de zones rocheuses et de plages, soit de sable, de galets ou une mixture des deux. Cependant, il est à noter que l'aspect ou le faciès rocheux possède une présence dominante. Ce dernier est constitué notamment par :

- **Les pointes** : Pointe Boulima, Pointe Mézaïa, Pointe des Salines, Pointe Noire, Pointe Thamakrent.
- **Les caps** : Cap Sigli, Cap Bouak, Cap Aokas, Cap Ziama Mansouriah, Cap Afia, Cap Noir, Cap Carbon.
- **Les falaises et rochers maritimes** : les falaises et rochers maritimes de Melbou, les falaises des grottes merveilleuses, les rochers maritimes d'El Aouana.

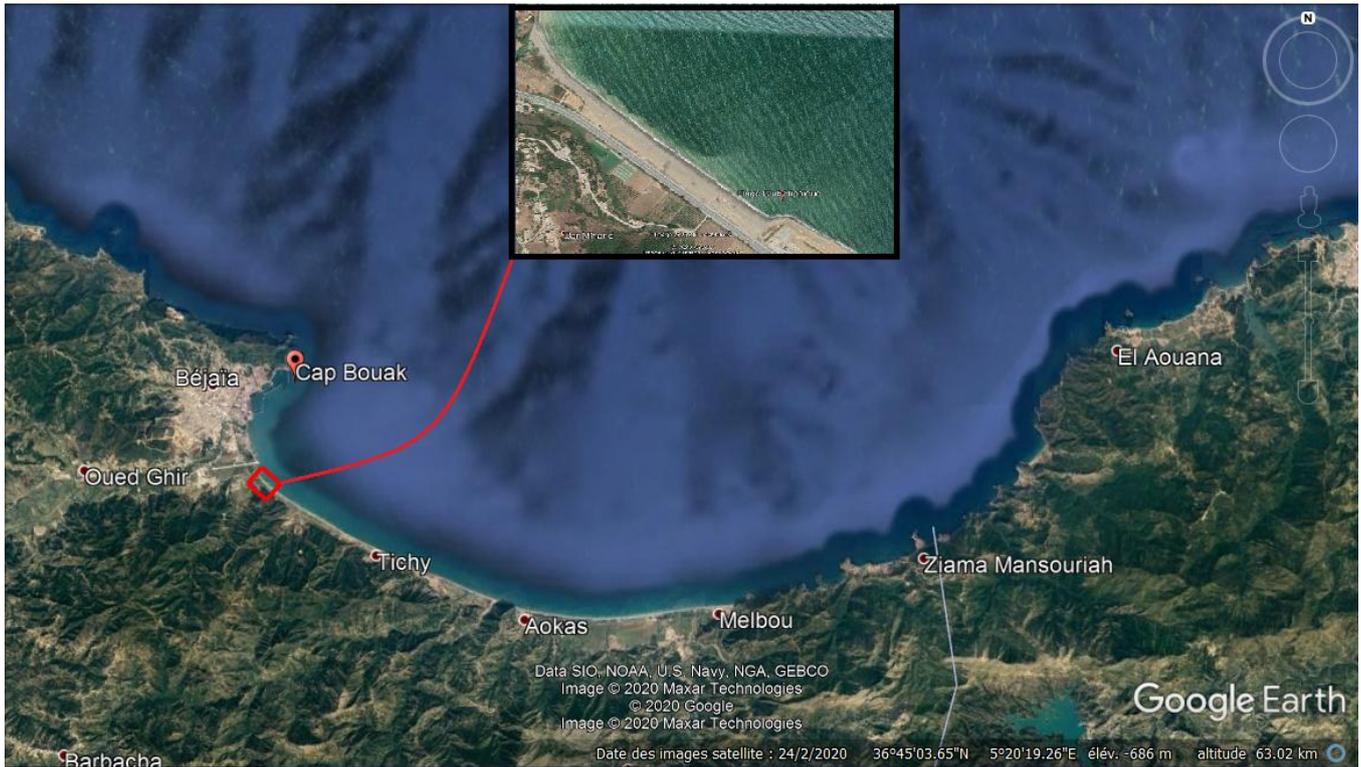


Figure I.2 : Vue satellitaire du golfe de Béjaïa (Google Earth).

D'autre part, les types de sédiments dominants dans le golfe selon **Leclaire (1972)** sont :

- Les sédiments siliceux (63 à 64% du plateau continental et son rebord) présents sous forme de vases silico-calcaires et silico-argileuses.
- Les sédiments calcaires (sables, graviers et vases calcaréo-siliceuses) dispersés sur la bordure rocheuse du golfe de Béjaïa.
- Les sédiments argileux représentés par les boues argilo-siliceuses.

Tandis que les sédiments sableux et graveleux sont présents de manière plus faible.

Le golfe de Béjaïa représente aussi la finalité dans laquelle se déversent un grand nombre d'oueds dont : oued Djemaa, oued Zitoun, oued Agrioun, mais notamment aussi oued Soummam, qui compte parmi les plus grands oueds du territoire algérien.

I. 3. Données climatologiques

La collecte des données de différents types est une étape primordiale afin de mener à bien toute étude d'aménagement maritime, et en particulier celles des facteurs à caractère climatologique, étant donnée l'influence de ces derniers sur la dynamique sédimentaire du littoral.

I. 3. 1. Précipitations

Les données pluviométriques fournies par la SETHYAL ont été obtenues à partir de la station de Béjaïa et couvrent une période de 18 ans (1969-1986). Elles nous permettent de déduire les points suivants :

- La pluviométrie moyenne de la région de Béjaïa est de 798 mm/an.
- La répartition de la pluviométrie au cours de l'année est fortement disproportionnée et son intensité est dictée par le facteur de saison.
- Le cycle humide est observé entre Novembre et Mars, avec un pic journalier de 160 mm (moyenne interannuelle) en Janvier ou Février. La saison sèche s'étend entre Mai et Août avec une hauteur de pluie moyenne inférieure à 6 mm pendant cette période, pour les années les moins pluvieuses (1985, 1986).
- Le nombre de jours de pluie par an est de l'ordre de 100 jours avec un maximum en hiver (38 jours) et un minimum en été (7 jours).

I. 3. 2. Température

Les données de température disponibles au niveau de la station de Béjaïa pour les années de 1969 à 1973 indiquent une température moyenne de 18,6 °C avec :

Une période hivernale où la température moyenne est comprise entre 11 et 15 °C, le minimum étant enregistré pendant le mois de Janvier (11 °C).

Une période estivale où la température moyenne est comprise entre 18 et 26 °C, le maximum étant mesuré pendant le mois d'Août (30 °C).

I. 3. 3. Vent

Les données relatives au vent observé au large des côtes de l'Algérie sont rapportées par l'U.S. Naval Weather Service dans le S.S.M.O. (**Summary of Synoptic Meteorological Observations**) et sont présentées sous forme de rose des vents pour chaque trimestre de l'année.

Les données disponibles concernent la période allant de 1914 à 1970 et permettent d'extraire les informations suivantes :

- Du mois d'Octobre au mois de Mars, les vents de l'Ouest et du Sud-ouest dominant et sont souvent d'une vitesse supérieure à 16 nœuds.

- Les vents de l'Est et du Nord-est dominant au cours de l'été mais ont, pour la plupart, des vitesses inférieures à 16 nœuds.
- Les vents de l'Est et du Nord-est se caractérisent par leur fréquence, tandis que les vents du Nord et du Nord-ouest se distinguent par leur vitesse.

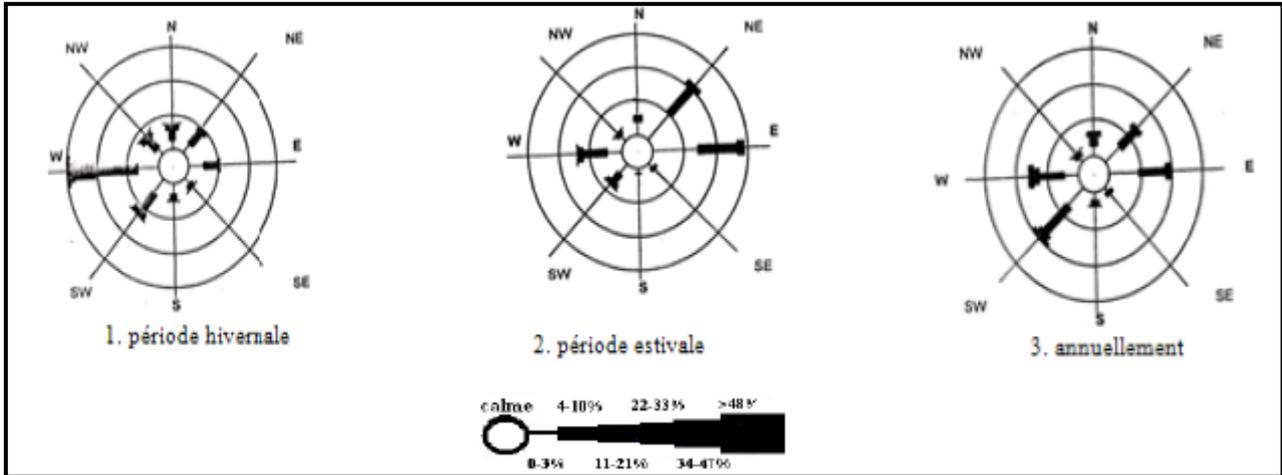


Figure I.3 : Roses des vents trimestrielles de la fréquence d'apparition du vent au large (Source : S.S.M.O., 1914-1970).

D'autre part, la collecte des données au niveau de la région de Béjaïa montre que le vent est affecté par le relief avoisinant, notamment : le mont de Yemma Gouraya et la vallée de la Soummam. Ce dernier réoriente les vents provenant de l'Ouest et leur donne les directions Nord-est et Sud-ouest.

I. 4. Données hydrodynamiques

Le second type de données qui nous est fort intéressant dans le cadre de cette étude sont les données hydrodynamiques ou océanographiques.

I. 4. 1. La marée

La marée astrale est un phénomène de faible amplitude dans la mer méditerranée, son effet est donc peu perceptible sur les côtes algériennes.

Le marnage de la marée de pleine lune est en moyenne entre 25 et 30 cm, tandis qu'il est de 5 à 15 cm lors de la nouvelle lune.

I. 4. 2. La houle au large

La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage. On appelle houle cet ensemble d'ondulations ou de vagues. La houle est un mouvement

oscillatoire des couches superficielles de l'eau dû au frottement du vent sur la surface de la mer (Charel, 2003).

Extraites à partir du *S.S.M.O. Tome 2*, les données de la houle au large couvrent une période de 8 ans, de 1963 à 1970, et sont résumées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau I-1 : Fréquences mensuelles moyennes d'apparition de la houle au large selon sa direction de provenance. (Source : S.S.M.O., 1963-1970).

Mois	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Janvier	8,10	12,90	18,20	5,00	6,50	13,20	28,80	7,30
Février	8,80	10,30	12,60	4,00	6,10	16,90	35,60	5,80
Mars	11,30	12,60	15,80	3,60	4,50	12,30	30,50	9,20
Avril	11,70	15,40	16,00	2,00	4,40	13,70	26,70	10,20
Mai	8,20	26,30	31,90	3,00	3,30	7,20	13,90	6,20
Juin	9,20	29,10	29,80	1,80	1,40	8,20	16,40	4,20
Juillet	5,90	32,50	35,10	1,40	1,00	5,90	16,30	2,00
Août	8,80	27,70	37,30	1,90	1,10	5,00	13,40	4,90
Septembre	6,70	26,40	40,50	2,20	2,30	4,60	14,80	2,50
Octobre	7,80	14,10	20,30	3,20	4,20	14,80	28,80	6,80
Novembre	5,50	5,80	10,00	5,10	8,00	15,90	40,40	9,40
Décembre	10,20	6,20	9,40	4,60	7,50	15,00	37,10	10,00
Annuelle	8,50	18,30	23,10	3,20	4,20	11,00	25,20	6,50

Les données de ce premier tableau nous permettent de dessiner les roses de houle saisonnières et de conclure les points suivants :

- Du mois d'Octobre au mois d'Avril, la houle prédominante est celle de l'Ouest.
- De Mai à Septembre (période estivale), la houle prédominante est celle de l'Est, suivie par celle du Nord-est, puis par celle de l'Ouest.
- Les houles de plus basse fréquence au cours de l'année sont celles du Sud-est, Sud et Nord-ouest.
- La houle du Nord ne subit pas de fortes fluctuations en fréquence et reste plus ou moins stable au fil de l'année.

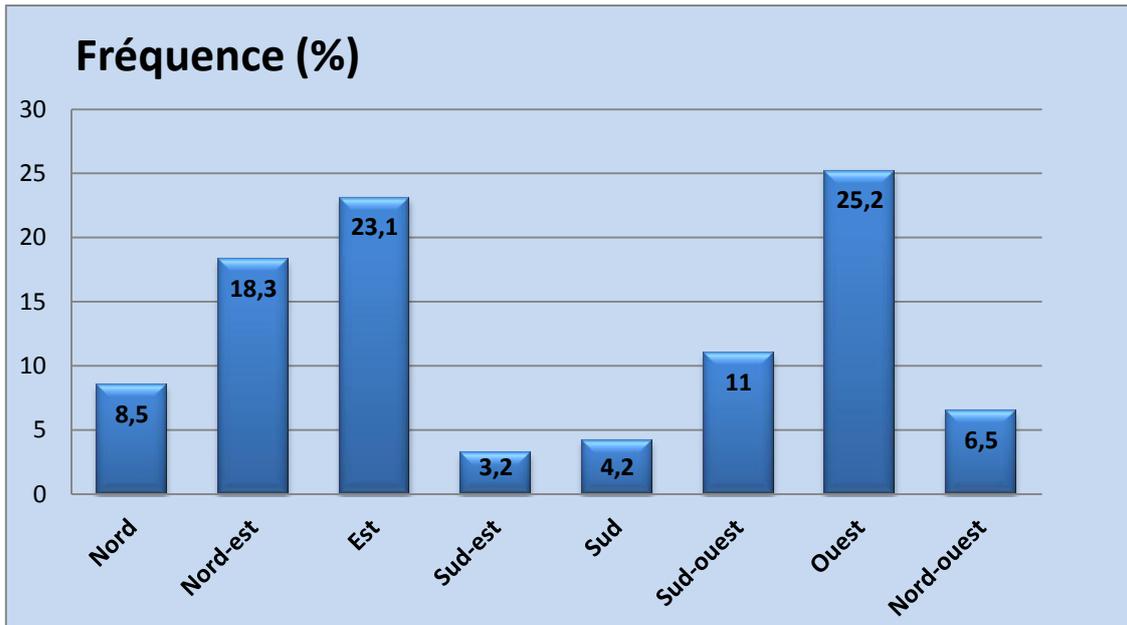


Figure I.4 : Histogramme des fréquences moyennes annuelles d'apparition de la houle au large selon sa direction de provenance.

Tableau I-2 : La relation état de la mer – amplitude de la houle.

Degré	Amplitude (m)	Etat de la mer
Calme	< 0,25	Ridée ou belle
Degré 0	0,25-0,75	Ridée ou belle
Degré 1	0,75-1,75	Modérée
Degré 2	1,75-2,75	Agitée
Degré 3	2,75-3,75	Forte
Degré 4	> 3,75	Très forte ou supérieure

Le tableau ci-dessus définit les degrés qui permettent de décrire l'état de la mer par rapport à l'amplitude de la houle au large. Il aidera à la compréhension du tableau suivant :

Tableau I-3 : Répartition (%) des houles au large en fonction de l'amplitude et de la période.

Etat de mer	PERIODE DE LA HOULE					
	< 6 s	6 - 7 s	8 - 9 s	10 - 11 s	11 - 12 s	13 s
Calme	5,20	0,10	-	-	-	-
Degré 0	20,80	1,90	0,40	-	-	-
Degré 1	24,60	13,10	2,70	0,50	0,20	-
Degré 2	2,60	5,40	3,10	0,90	0,20	-
Degré 3	0,40	1,10	1,00	0,60	0,20	-
Degré 4	0,10	0,50	0,30	0,30	0,30	-
Total	53,70%	22,10%	7,50%	2,30%	0,90%	-

Le tableau (I-3) explicite la relation période-amplitude de la houle au large et son analyse nous permet de déduire les points suivants :

- 75,80% des houles observées au large ont une période inférieure ou égale à 7 secondes.
- Seulement 3,2% d'entre elles ont une période supérieure ou égale à 10 secondes et aucune houle de période supérieure à 13 secondes n'a été observée.
- Pour les plus faibles amplitudes (degré inférieur ou égal à 1), les houles ont tendance à avoir des périodes plus courtes.

➤ **Caractéristiques des houles extrêmes au large**

Les houles extrêmes peuvent être définies comme les houles d'amplitude maximale qui surgissent sur une période d'une ou plusieurs années, appelée « période de retour ».

Leurs caractéristiques, selon la direction de provenance et la période de retour associée sont données comme suit :

Tableau I-4 : Valeurs des hauteurs des houles extrêmes (en mètre) par direction de provenance (Source : S.S.M.O., 1963-1970).

Direction	Est	Nord-est	Nord	Nord-ouest	Ouest	Toutes
Période de retour						
2 ans	4,12	4,93	4,90	4,16	7,36	7,44
5 ans	4,70	5,67	5,75	4,87	8,43	8,34
10 ans	5,14	6,23	6,38	5,40	9,22	9,02
20 ans	5,59	6,79	7,02	5,94	10,02	9,70
50 ans	6,17	7,53	7,87	6,65	11,08	10,60
100 ans	6,62	8,08	8,50	7,18	11,88	11,27

Nous pouvons constater que pour toute période de retour :

- Les houles extrêmes provenant de l'Ouest sont les plus grandes.
- Les houles extrêmes provenant de l'Est sont les plus petites.
- La hauteur des houles extrêmes est généralement comprise entre 4 et 8 mètres, sauf pour celles de provenance Ouest, dont la hauteur va de 7 à 12 mètres.

➤ **Le choix du secteur angulaire**

Le secteur angulaire représente les limites naturelles imposées par la disposition géographique du site d'étude, ainsi que par le secteur d'intérêt des houles du large.

Trois (03) directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude :

- Deux (02) directions approximativement perpendiculaires à la côte qui ont l'effet d'une houle frontale (N45° et N60°).
- Une (01) direction de houle à incidence approximativement oblique (N20°).

Le Cap Carbon protège la zone d'étude des houles de secteurs Nord (N360°), Nord-ouest et Ouest tandis que le massif volcanique d'El Aouna du golfe de Béjaïa empêche les houles de provenance Est d'atteindre le club hippique.

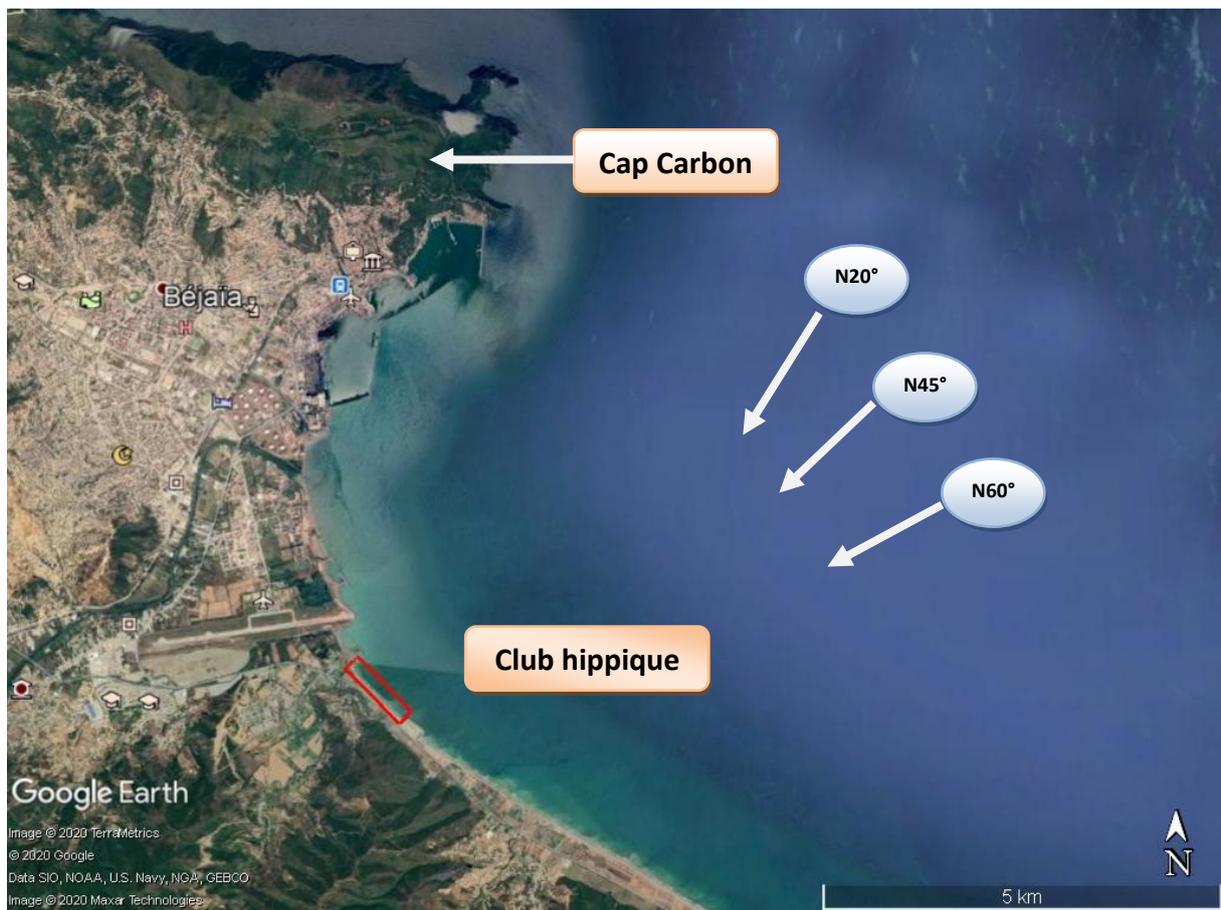


Figure I.5 : Les houles qui peuvent atteindre le rivage du club hippique.

I. 4. 3. La houle à la côte

En se propageant entre le large et la côte, la houle est assujettie à des déformations dues à sa réfraction sur les fonds et aux effets de diffraction latérale. Ces déformations varient selon les caractéristiques de la houle au large (période, hauteur et direction de provenance) et du relief des fonds. La direction de provenance peut être notablement modifiée ainsi que la distribution des hauteurs le long du littoral, avec des zones où celles-ci sont augmentées, qu'on appelle « zones de concentration d'énergie », ou au contraire diminuées ; on obtient alors les « zones d'atténuation de l'énergie » (**Viguié, 1992**).

En menant une étude de réfraction de la houle, on arrive à obtenir ses caractéristiques lorsqu'elle s'approche du rivage. C'est donc une étape essentielle de notre projet.

I. 4. 3. 1. Méthodologie de l'étude de réfraction

Le calcul de réfraction est assuré par un modèle numérique développé par l'université de technologie de Delft (Pays-Bas), appelé « SWAN » (**Simulating Waves Nearshore**). Ce logiciel génère le plan de réfraction de la houle en résolvant l'équation de conservation de l'énergie de la houle aléatoire en milieu peu profond. Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant notamment en compte les phénomènes de :

- Réfraction, sur les fonds et autour des ouvrages.
- Frottement sur le fond.
- Déferlement.

Les paramètres significatifs de la houle ont été représentés avec un spectre bidimensionnel de type JONSWAP ayant un facteur d'affinement du pic (γ) et une diffusion directionnelle issus de la formule de la cambrure de la houle (**Wilson, 1965**).

Le logiciel nécessite l'introduction de deux types de données qui sont les suivants :

- **Les données bathymétriques**

La bathymétrie utilisée pour cette étude sera celle obtenue à partir de la digitalisation de la carte SHOM n°3029 (échelle de $\frac{1}{100\ 000}$). Elle a été actualisée par le levé bathymétrique effectué en Mars 2019 par l'équipe de reconnaissance du LEM.

- **Les données de la houle au large**

Les données utilisées pour le calcul de réfraction de la houle au large sont celles du S.S.M.O. (zone centre) qui couvrent la période de 1963 à 1970.

Toutefois, elles doivent d'abord passer par un traitement statistique afin de déterminer la fréquence d'apparition des houles selon la période et la direction et être transformées en houles équivalentes afin d'optimiser les calculs sur le logiciel SWAN.

Les tableaux suivants montrent les caractéristiques des houles au large qui serviront de données d'entrée :

Tableau I-5 : Hauteur des houles annuelles (m) par direction de provenance et par période.

Période	Direction de la houle		
	N 20°	N 45°	N 60°
6 s	1,00	1,09	1,06
8 s	2,67	2,56	2,53
10 s	4,92	5,05	6,52

Tableau I-6 : Caractéristiques des houles extrêmes par direction et par période de retour.

Période de retour	Caractéristique	Direction N 20°	Direction N 45°	Direction N 60°
2 ans	H _s (m)	4,9	4,93	4,12
	T _p (s)	11	11	9,94
5 ans	H _s (m)	5,75	5,67	4,7
	T _p (s)	11,85	11,85	10,65
10 ans	H _s (m)	6,38	6,23	5,14
	T _p (s)	12,56	12,31	11,14
20 ans	H _s (m)	7,02	6,79	5,59
	T _p (s)	13,08	12,81	11,61
50 ans	H _s (m)	7,87	7,53	6,17
	T _p (s)	13,65	13,36	12,17

I. 4. 3. 2. Les étapes du calcul de réfraction

La manière de procéder afin d'effectuer le calcul de réfraction à travers le logiciel SWAN est résumée dans le schéma suivant :

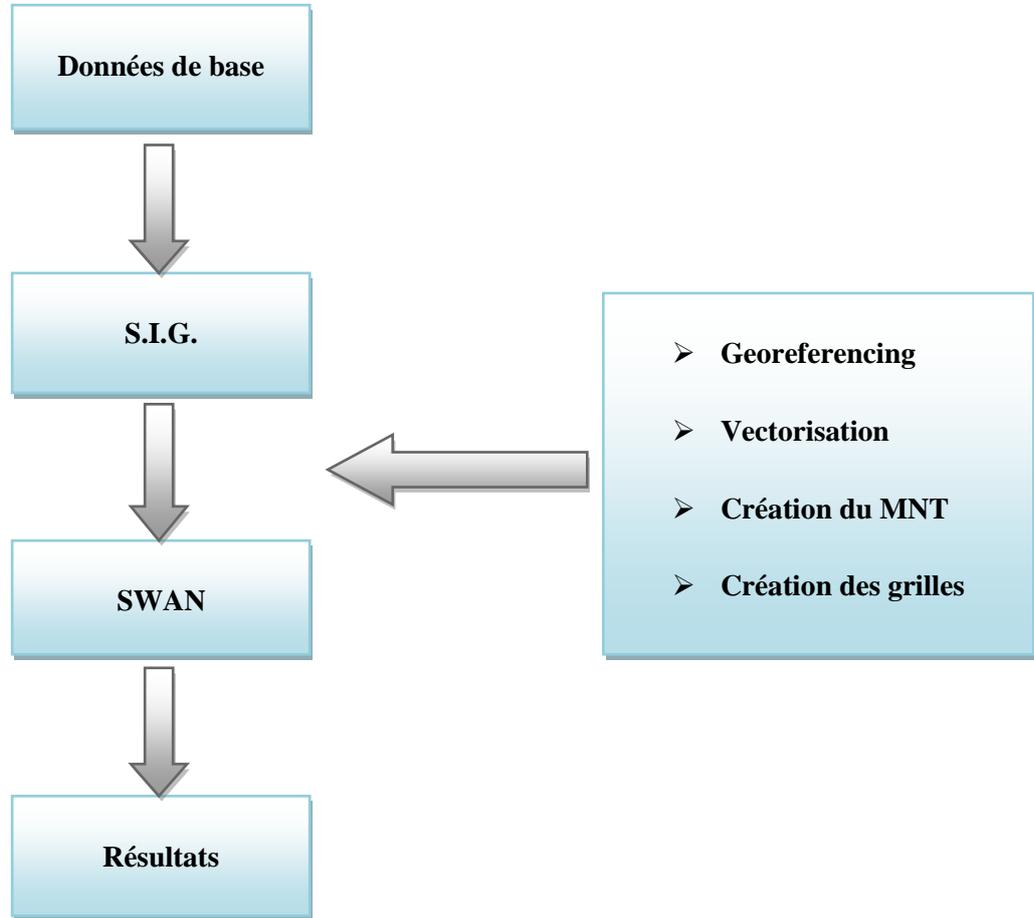


Figure I.6 : Organigramme qui illustre la procédure du calcul de réfraction.

I. 4. 3. 3. Résultats obtenus

Les résultats du calcul de réfraction sont résumés dans les deux tableaux ci-dessous. Le coefficient de réfraction est défini comme suit :

$$K_r = \frac{H_s \text{ locale}}{H_s \text{ large}}$$

Les valeurs de ce coefficient peuvent être interprétées de la manière suivante :

- $K_r < 1$: Diminution de l'énergie de la houle due à la divergence des vagues.
- $K_r = 1$: Conservation de l'énergie due à la propagation rectiligne des vagues.
- $K_r > 1$: Augmentation de l'énergie de la houle due à la convergence des vagues.

Tableau I-7 : Moyennes des résultats obtenus pour la houle annuelle à -10 m.

Direction	Période	Amplitude au large (m)	Amplitude à -10 m	Angle d'arrivée (°)	Coefficient de réfraction à -10 m
N20°	6 s	1,00	0,82	28	0,82
	8 s	2,67	2,20	31	0,82
	10 s	4,92	3,77	34	0,76
N45°	6 s	1,09	1,00	46	0,91
	8 s	2,56	2,32	47	0,90
	10 s	5,05	4,07	47	0,80
N60°	6 s	1,06	0,98	59	0,92
	8 s	2,53	2,31	58	0,91
	10 s	6,52	4,40	56	0,67

Tableau I-8 : Moyenne des résultats obtenus pour les houles extrêmes de différentes périodes de retour à différentes profondeurs (en mètre).

T (ans)	D	Prof.	-20		-15		-10		-5		-2		-1	
		$H_s l$	H_s	K_r										
2	N20	4,9	4,53	0,92	4,36	0,89	3,8	0,77	2,73	0,55	1,79	0,36	1,32	0,26
	N45	4,93	4,57	0,92	4,64	0,94	4,02	0,81	2,76	0,56	1,8	0,36	1,32	0,26
	N60	4,12	3,76	0,91	3,89	0,94	3,69	0,89	2,63	0,63	1,71	0,41	1,25	0,3
5	N20	5,75	5,36	0,93	5,06	0,88	4,08	0,7	2,83	0,49	1,86	0,32	1,38	0,24
	N45	5,67	5,3	0,93	5,22	0,92	4,22	0,74	2,86	0,5	1,87	0,33	1,39	0,24
	N60	4,7	4,3	0,91	4,47	0,95	3,98	0,84	2,73	0,58	1,77	0,37	1,3	0,27
10	N20	6,38	6,01	0,94	5,47	0,85	4,19	0,65	2,87	0,45	1,89	0,29	1,41	0,22
	N45	6,23	5,87	0,94	5,53	0,88	4,28	0,83	2,88	0,46	1,9	0,3	1,41	0,22
	N60	5,14	4,73	0,92	4,9	0,95	4,1	0,79	2,77	0,53	1,8	0,35	1,32	0,25
20	N20	7,02	6,61	0,94	5,82	0,82	4,32	0,61	2,94	0,41	1,94	0,27	1,45	0,2
	N45	6,79	6,39	0,94	5,8	0,85	4,39	0,64	2,95	0,43	1,94	0,28	1,44	0,21
	N60	5,59	5,15	0,92	5,27	0,94	4,23	0,75	2,84	0,5	1,85	0,33	1,36	0,24
50	N20	7,87	7,32	0,93	6,11	0,77	4,38	0,55	2,97	0,37	1,97	0,25	1,48	0,18
	N45	7,53	7,02	0,93	6,03	0,8	4,44	0,59	2,98	0,39	1,97	0,26	1,47	0,19
	N60	6,17	5,73	0,92	5,62	0,92	4,3	0,69	2,88	0,46	1,88	0,3	1,38	0,22

I. 4. 3. 4. Interprétation des résultats

➤ Houle N20°

La houle annuelle est plus ou moins réfractée, et présente un coefficient de réfraction compris entre 0,76 et 0,82. La perte en énergie est donc comprise entre 16 % et 24 %. Son angle de déviation maximale est de 14° et elle aborde le rivage de manière oblique.

Pour ce qui est de la houle extrême, à -20 m, celle-ci présente un coefficient de réfraction de plus de 0,9, quelque soit sa période de retour. A -15 m, son coefficient de réfraction est entre 0,77 et 0,89. A -10 m, le coefficient de réfraction est compris entre 0,55 et 0,65 pour les houles cinquantennale, vingtennale et décennale ; elles perdent ainsi 35 % à 45% de leur énergie. La houle de période de retour de 5 ans présente un coefficient de réfraction de 0,7. A -5 m, la houle a un coefficient de réfraction moyen de 0,45 et perd donc en moyenne 55 % de son énergie.

➤ Houle N45°

La houle annuelle est peu réfractée, et présente un coefficient de réfraction compris entre 0,8 et 0,91, et conserve ainsi la majorité de son énergie initiale. Son angle de déviation maximale est de 2°, elle arrive donc sur le rivage de manière presque frontale.

En ce qui concerne la houle extrême, à -20 m, celle-ci présente un coefficient de réfraction de supérieur à 0,9, quelque soit sa période de retour. A -15 m, son coefficient de réfraction moyen est de 0,88. On note un léger gonflement de la houle biannuelle. A -10 m, le coefficient de réfraction est aux alentours de 0,6 pour les houles cinquantennale et vingtennale ; elles perdent environ 40 % de leur énergie. Les autres périodes de retour présentent en moyenne un coefficient de réfraction de 0,8. La houle de période de retour de 5 ans possède un coefficient de réfraction de 0,74.

A -5 m, la houle a un coefficient de réfraction moyen de 0,47 et perd donc en moyenne 53 % de son énergie.

➤ Houle N60°

La houle annuelle est plus ou moins réfractée, et présente un coefficient de réfraction compris entre 0,67 et 0,92. La perte en énergie est donc comprise entre 8 et 33 %. Son angle de déviation maximale est de 4° ; elle arrive sur le rivage de manière presque frontale.

Concernant la houle extrême, à -20 m et à -15 m, celle-ci présente un coefficient de réfraction supérieur à 0,9, quelque soit sa période de retour. On note un léger gonflement de la houle biannuelle. A -10 m, le coefficient de réfraction est aux alentours de 0,7 pour les houles cinquantennale, vingtennale, elles perdent donc environ 30 % de leur énergie. Les autres périodes de retour, à cette profondeur, ont en moyenne un coefficient de réfraction de 0,84.

A -5 m, la houle a un coefficient de réfraction moyen de 0,54 et perd ainsi en moyenne 46 % de son énergie.

I. 4. 4. Les courants marins

Les courants jouent un grand rôle dans la dynamique sédimentaire des littoraux et viennent sous plusieurs types.

I. 4. 4. 1. Le courant marin général

Les eaux qui pénètrent la mer méditerranée par le détroit de Gibraltar forment le courant atlantique qui se propage, d'Ouest en Est, sur les côtes de l'Afrique du Nord ; une fois arrivé à la limite orientale de la baie de Béjaïa, une partie s'en détache et s'incurve au sein du golfe sous l'effet de la force de Coriolis, pour prendre la direction opposée : Est-Ouest. Ce contre-courant tend à rejoindre la branche atlantique dans la partie occidentale de la baie, formant ainsi des mouvements tourbillonnaires à l'échelle locale. Ce courant dont la vitesse est de l'ordre de 0,5 à 2,5 nœuds joue seulement un rôle dans le déplacement des sédiments fins.

I. 4. 4. 2. Le courant de marée

Ce sont les seuls courants marins réellement capable d'une érosion des fonds et d'un important transport des sédiments.

Cependant, du fait de la faiblesse du phénomène de marée astrale et du marnage qu'elle provoque au sein de la mer méditerranée, les courants de marée qui en naissent sont négligeables au niveau des côtes algériennes.

I. 4. 4. 3. Les courants de houle

Lorsque la houle est inclinée par rapport au rivage (houle oblique), on constate l'apparition de courants de houle qui vont transporter les matériaux préalablement mis en mouvement. Sur le rivage, la descente de la lame ne se fait plus alors dans la même direction que la montée et les matériaux vont se déplacer en dents de scie : c'est le phénomène du jet de rive (**Caminade, 1995**).

I. 5. Analyse du trait de côte

Sous l'action de la mer et du vent, les côtes sont en perpétuelle évolution qui, à l'échelle des temps géologiques, tend à régulariser les côtes en émoussant les zones convexes et en remblayant les zones de concavité de la côte. Elle peut cependant se manifester par des évolutions rapides préjudiciables aux activités humaines en entamant des terrains occupés et aménagés (**Graillet, 1987**).

En effet, l'inspection des photos satellitaires de la plage du club hippique entre 2004 et 2020 permet de constater une forte régression de la ligne de côte dans les 16 dernières années et la disparition d'une grande quantité de sédiments qui couvraient la plage auparavant.

Le recul du trait de côte a été estimé tout le long de plage à travers Google Earth et réduit à une moyenne de 102,5 mètres, soit environ 6,4 mètres de perte par an.

Il est à noter qu'il y a eu un engraissement de sable à l'ouest de l'épi en T, ce qui prouve le bon fonctionnement de ce dernier.



Figure I.7 : L'évolution du trait de côte de la plage du club hippique entre 2004 et 2020.

L'érosion de la plage peut être expliquée par l'agissement de plusieurs facteurs :

➤ **Le régime de houle**

Les données de la houle au large montrent qu'il existe deux régimes de houles différents : celles provenant de l'Ouest et celles venant du Nord-est.

La zone d'étude étant orientée vers le Nord-est aussi, les houles l'impactent de manière plus ou moins frontale et la leur réfraction tend à les redresser perpendiculairement vers la côte. Les courants de houle (dérive littorale) sont donc renvoyés vers le large et causent ainsi un transport de sédiments en faveur de l'érosion de la plage.

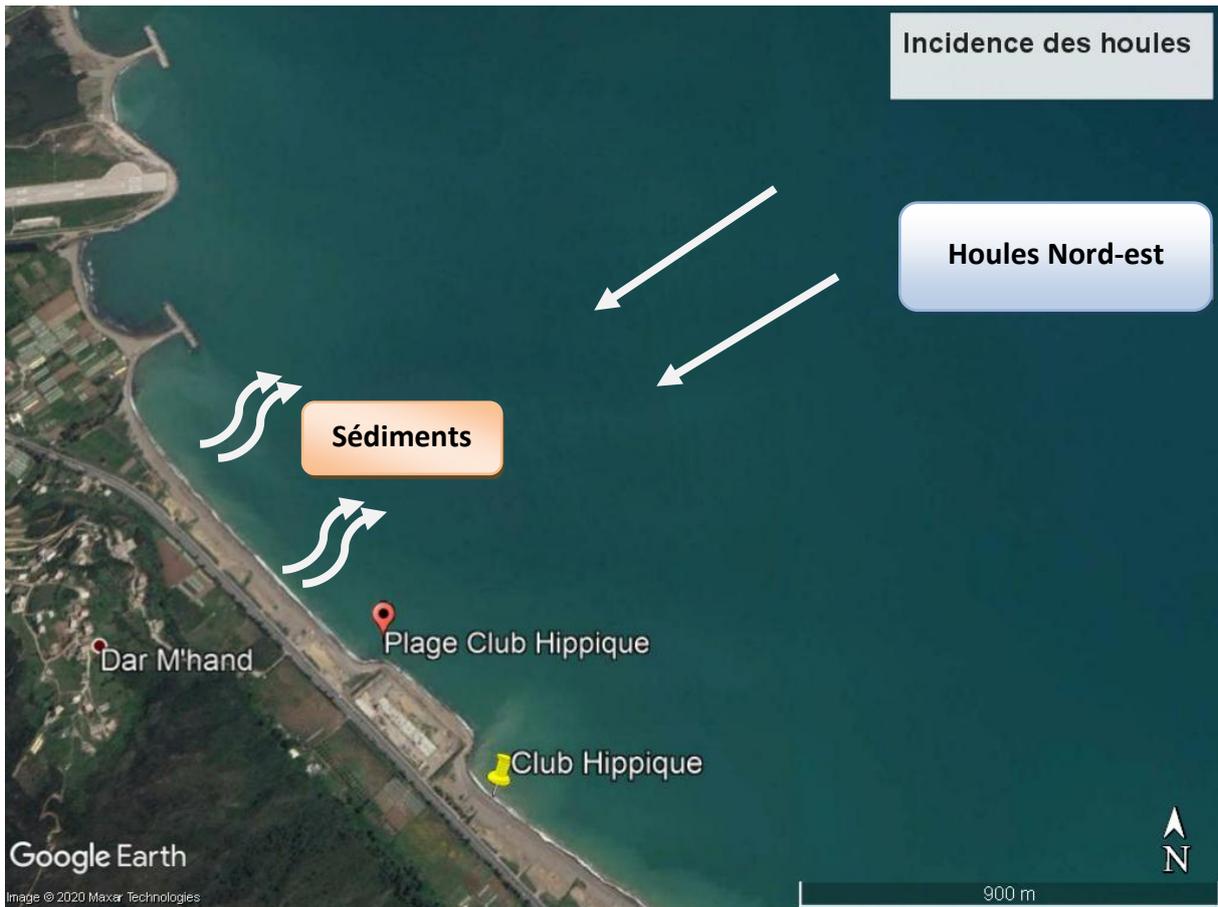


Figure I.8 : L'impact du régime de houles Nord-est sur l'érosion de la côte (Google Earth, 2020).

➤ **La présence d'ouvrages sur la côte**

L'implémentation d'ouvrages de protection artificiels au niveau de la plage du club hippique tel que l'épi en T à l'Est ou la protection frontale à l'Ouest, a perturbé l'équilibre sédimentaire de la zone de manière considérable. Ces ouvrages ont eu une conséquence directe sur le trait de côte en bloquant une grande partie des apports sédimentaires dus au transit littoral, empêchant ainsi le rechargement de la plage en sable.

➤ **Le facteur humain**

Depuis très longtemps, le sable des plages et des dunes a été considéré par les humains comme une source naturelle d'approvisionnement pour assurer les besoins en matériaux des travaux de génie civil (maisons, bâtiments...). Souvent clandestine et excessive, cette extraction du sable de plage s'additionne aux facteurs naturels préexistants et accélère le processus d'érosion car elle réduit considérablement le stock sédimentaire disponible.

I. 6. Etude sédimentologique

La réalisation d'une étude sédimentologique permet dégager la répartition des sédiments sur le littoral ainsi que leurs caractéristiques. C'est une étape capitale pour la construction d'un modèle physique correct, qui reflète la réalité du terrain.

I. 6. 1. Analyse bathymétrique

Dans le cadre de cette étude, il a été effectué sur un linéaire de côte de 1800 mètres, une superficie de 630 hectares de levé bathymétrique selon des profils séparés de 40 mètres, atteignant une profondeur d'environ 15 mètres.

Le traitement de données bathymétriques a permis d'établir en premier lieu une esquisse bathymétrique, puis de réaliser des profils représentant la morphologie sous marine.

La carte bathymétrique ci-dessous révèle une morphologie régulière avec des isobathes parallèles à la côte. A moins de 6 mètres de profondeur, la distance entre ces dernières est assez petite, mais elle tend ensuite à s'élargir au fur et à mesure qu'on avance vers le large ; ceci signifie que la pente du fond marin est très raide au départ puis elle s'adoucit plus on s'éloigne de la côte.

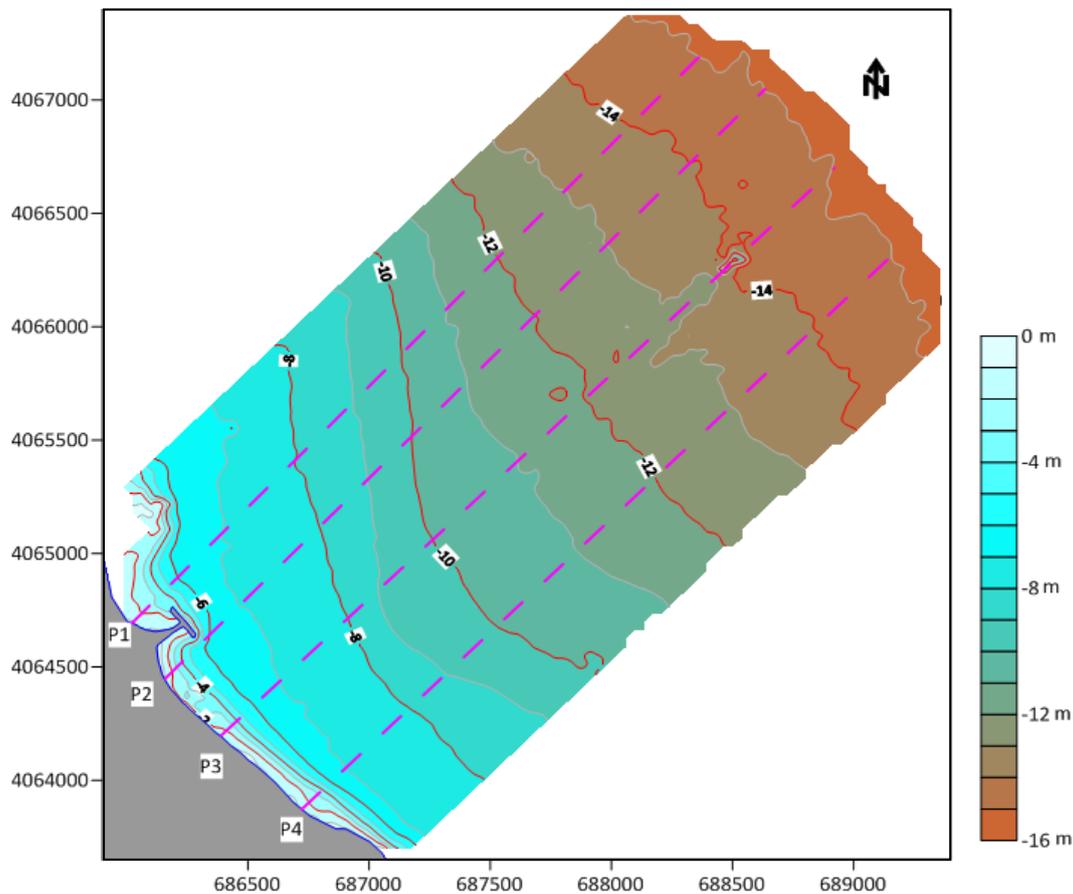


Figure I.9 : Carte bathymétrique de la plage du club hippique.

I. 6. 2. Analyse granulométrique

Cette étude s'est appuyée sur la base d'échantillons de sédiments superficiels prélevés en mer. Ceux-ci ont été analysés au laboratoire et les résultats ont permis d'établir la carte de répartition spatiale des sédiments.

I. 6. 2. 1. Position des points de prélèvement

Au total, soixante (60) échantillons de sédiments superficiels situés entre 0 et 15 mètres de profondeur ont été prélevés au niveau de la zone d'étude. Leur répartition sur la carte bathymétrique est comme suit :

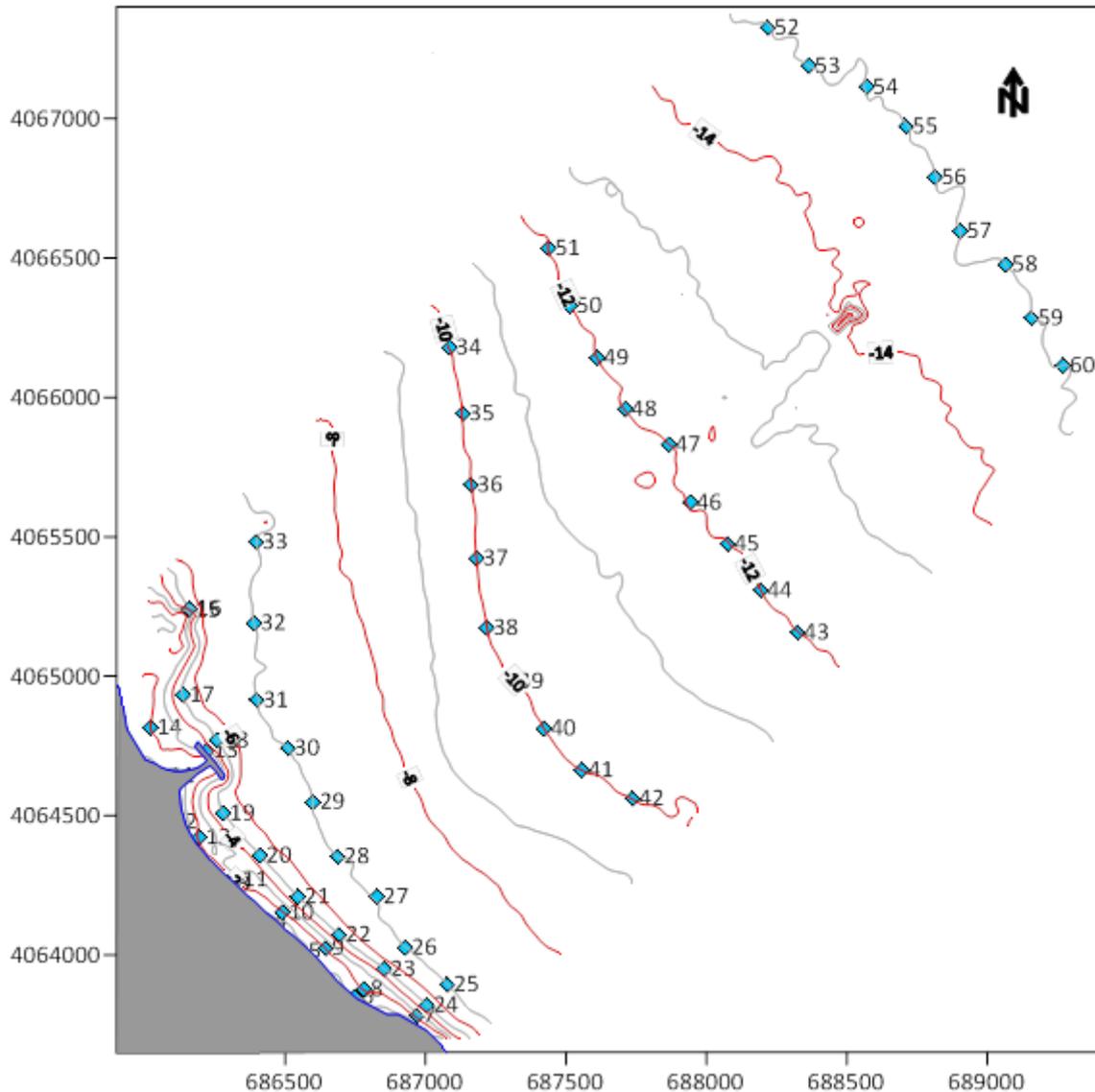


Figure I.10 : Répartition des 60 échantillons de sédiments prélevés.

I. 6. 2. 2. Etude de la fraction fine

Aussi appelée la fraction lutitique, la fraction fine représente les sédiments de diamètre inférieur à 50 micromètres (μm), obtenue par séparation à travers un tamis de maille équivalente.

L'estimation de la teneur en fraction fine dans les 60 échantillons permet de schématiser la répartition spatiale de cette classe granulométrique dans la zone d'étude. Les résultats ont montré que 56 des prélèvements contiennent des teneurs allant de 0 à 20%, tandis que les 4 restants possèdent des teneurs plus hautes.

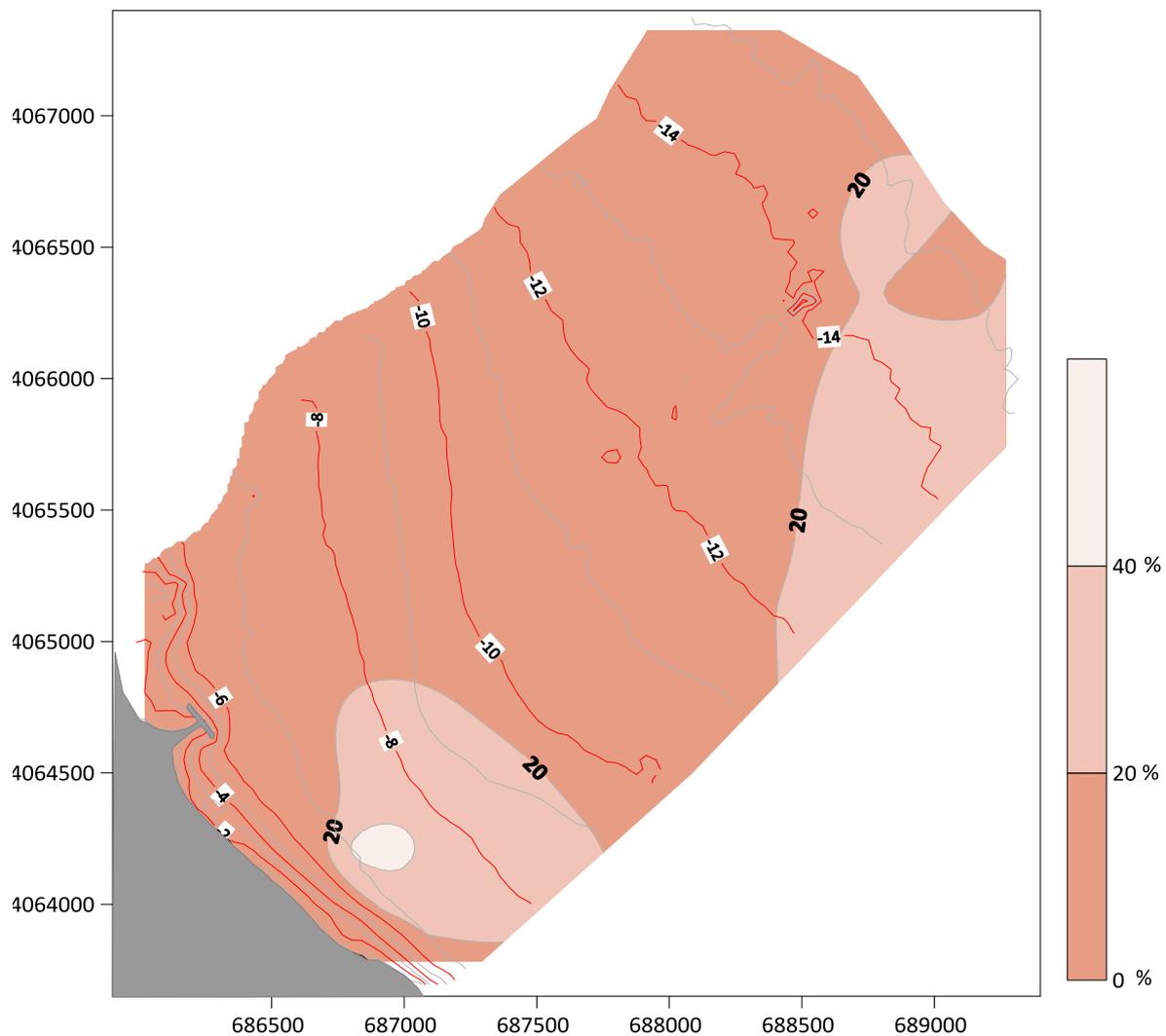


Figure I.11 : Répartition de la fraction fine (lutites).

I. 6. 2. 3. Etude de la fraction grossière

Par contraste, la fraction grossière est constituée de la classe granulométrique de sédiments supérieurs à 50 micromètres en diamètre. On procède à leur caractérisation de la manière suivante :

➤ **Les courbes granulométriques**

Ces courbes sont tracées sur une grille à échelle semi-logarithmique en portant sur l'axe des ordonnées le pourcentage cumulé des refus et en abscisse le diamètre de la maille des tamis.

L'examen de ces courbes permet de repérer les différents stocks de sédiments présents. Une courbe **unimodale** est attribuée à un échantillon de sable composé d'un seul stock sédimentaire tandis qu'une courbe **plurimodale** représente un échantillon qui contient deux à plusieurs stocks sédimentaires.

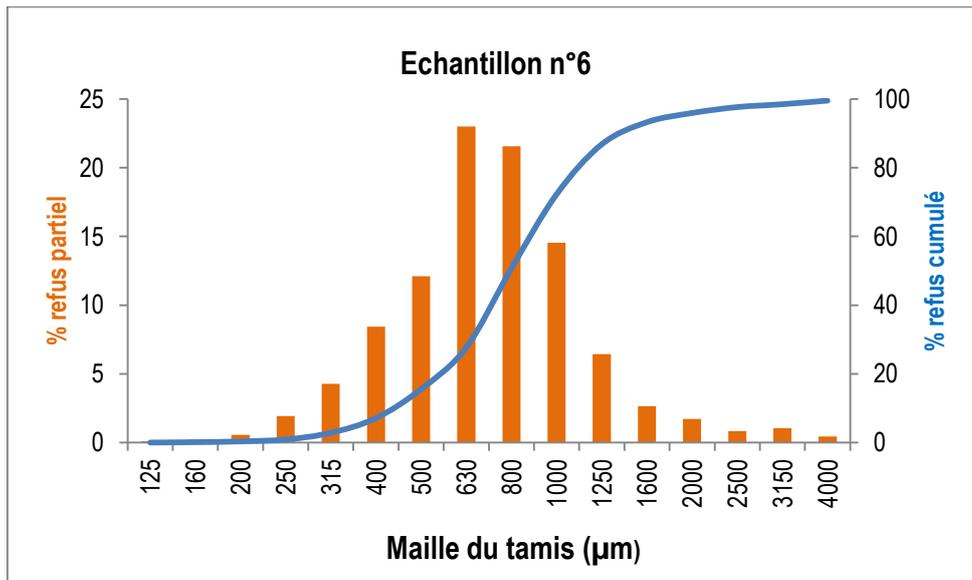


Figure I.12 : Courbe granulométrique unimodale de l'échantillon 6.

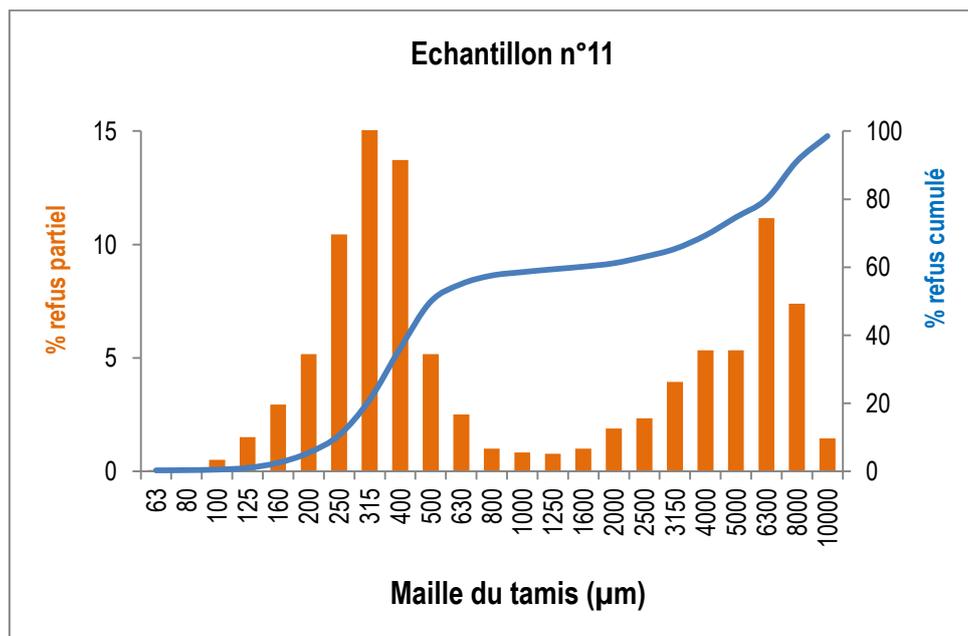


Figure I.13 : Courbe granulométrique bimodale de l'échantillon 11.

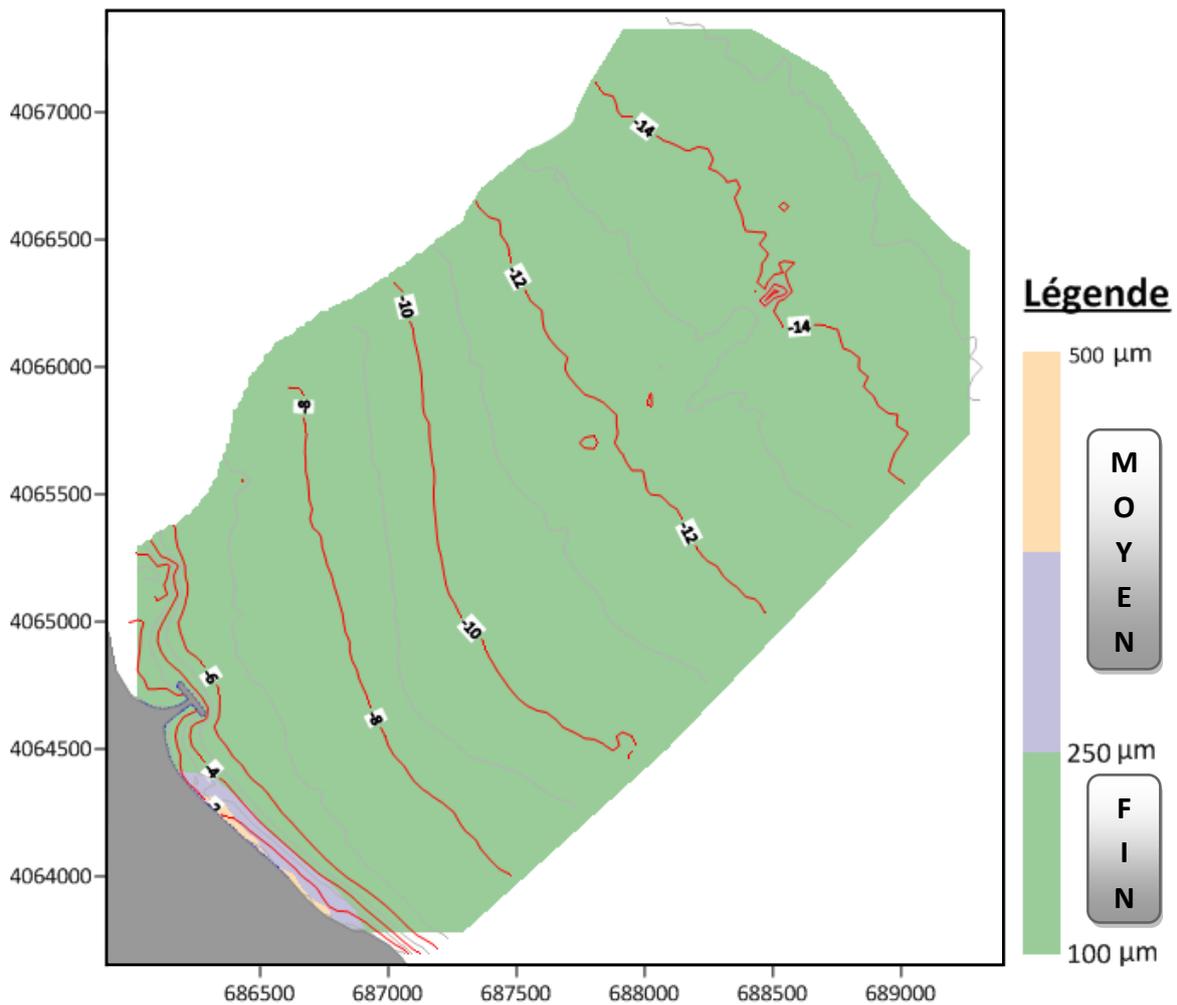
➤ Répartition de la médiane granulométrique D₅₀

Dans les courbes granulométriques, on distingue le quartile médian (D₅₀) qui est le diamètre de la maille qui correspond à une masse cumulée égale à 50 % du poids total de l'échantillon.

La carte ci-dessous, établie grâce aux médianes tirées des courbes cumulatives, montre la répartition spatiale du grain médian de la fraction grossière dans la zone d'étude. Elle a révélé l'existence de deux types de sable qui recouvrent cette dernière.

- **Sable fin** : les grains constituant ce sable présentent un diamètre médian entre 100 µm et 250 µm.
- **Sable moyen** : le diamètre du grain médian (D₅₀) est compris entre 250 et 500 µm.

La présence du sable moyen est limitée au fond marin de moins de 4 mètres de profondeur. Au-delà de cette valeur, c'est le sable fin qui est trouvé en abondance puisqu'il recouvre, jusqu'à 15 m de profondeur, la totalité du relief sous-marin.



I. 7. Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de nous plonger dans le projet de protection de la plage du club hippique et de comprendre la dynamique actuelle qui y régit, et ce à travers l'analyse des différentes données (climatologiques, hydrodynamiques, océanographiques, sédimentologiques) et figures présentées.

Chapitre II
Etablissement de la solution
au problème de la plage du
club hippique

II. Etablissement de la solution au problème de la plage du club hippique

Face au problème d'érosion diagnostiqué à travers le chapitre précédent, il est maintenant question de trouver un moyen qui permettra à la fois d'arrêter la dégradation de la plage du club hippique ainsi que de donner lieu à un rechargement de la plage en sable. Le but de ce présent chapitre sera donc d'étudier les différents ouvrages de protection côtière afin de choisir d'entre eux le plus approprié dans cette situation à laquelle nous faisons face. Une fois ceci fait, nous procéderons à un prédimensionnement de la solution estimée la plus efficace.

II. 1. Les méthodes et ouvrages de protection littorale

Selon la nature de la problématique de protection de côte qui se pose, on dispose d'une multitude de solutions, qui se subdivisent en deux catégories :

- Les solutions **statiques**, appelées aussi les protections dures, elles comprennent :
 - Les ouvrages de défense perpendiculaires au rivage (verticaux).
 - Les ouvrages de défense parallèles au rivage (longitudinaux).
- Les solutions **dynamiques** ou « protections douces », à travers lesquelles, on essaye d'utiliser au mieux la nature pour stabiliser et protéger le rivage.

Nous verrons maintenant chacune de ces solutions de plus près.

II. 1. 1. Les ouvrages de défense verticaux

Le principe de fonctionnement de ce type d'ouvrage repose sur leur capacité à bloquer le transit sédimentaire littoral qui se produit parallèlement à la côte, causant ainsi un engraissement à l'amont du transport solide et par conséquent, une érosion à l'aval de celui-ci, étant donné que ce dernier sera privé d'apports en sable.

Cette famille est majoritairement composée d'épis : des ouvrages en enrochements, de longueur variable, qui avancent vers la mer à partir de la plage pour faire barrière au débit solide.

Selon le livre *Travaux Maritimes (Tome 2)*, les épis sont utilisés pour :

- Construite ou élargir une plage en piégeant le transport littoral.
- Stabiliser une plage sujette à des tempêtes excessives.
- Réduire le taux de transport vers une certaine zone.
- Réduire les pertes de matériaux à l'extérieur d'une zone remblayée artificiellement.

Il existe plusieurs types d'épis, notamment :

- **L'épi classique**, de disposition constructive simple. C'est sa forme la plus commune.



Figure II.1 : Epi en enrochement classique. Source : Guide Enrochement.

- **L'épi en L/T** qui servent à créer des caps artificiels dans les zones de faible marnage.



Figure II.2 : Epi en L à Bulverhythe, Royaume Uni. Source : Guide Enrochement.

- **L'épi en Y**, qui associe les caractéristiques du brise-lame à ceux de l'épi, tout en évitant les effets indésirables de ces deux ouvrages pris individuellement. En effet, les bras de l'épi en Y permettent à la fois de dissiper l'énergie de la houle et d'obstruer le transport provoqué par les courants littoraux. Les larges musoirs sont conçus de manière à améliorer la capacité de l'ouvrage à diffracter la houle, réduire sa tendance à la réflexion et empêcher l'affouillement du fond de mer.



Figure II.3 : Epi en Y. Source : Guide Enrochement.

Les épis peuvent être perméables ou non, selon la longueur relative à la ligne de passage des courants littoraux. Dans les épis perméables, la hauteur joue un rôle dans la quantité de sable qui peut y passer à travers.

➤ **Désavantages de l'épi**

L'utilisation des épis connaît bien des inconvénients. Outre le phénomène d'érosion à l'aval déjà mentionné, les épis n'agissent que sur les fluides et les solides qui se déplacent longitudinalement à la côte. Ils ne peuvent donc pas faire face à l'action érosive des courants de retour ou des courants sagittaux qui agissent verticalement à la rive. Ou bien encore l'attaque frontale d'une houle.

D'autre part, ils représentent aussi un danger potentiel pour les vies humaines. En effet, au sein des alvéoles créées par un système d'épis de grande longueur, sont générés des courants qui peuvent mettre en péril les personnes qui s'y baignent.

II. 1. 2. Les ouvrages de défense longitudinaux

Placés parallèlement au trait de côte, les ouvrages longitudinaux peuvent avoir deux emplacements distincts : l'avant-plage et le haut-de-plage.

Leur mécanisme d'action consiste à s'opposer directement aux houles ainsi qu'aux courants qui se dirigent perpendiculairement vers la rive.

II. 1. 2. 1. Brise-lames

Souvent visibles à la surface de la mer et parfois immergés, le rôle des brise-lames consiste à absorber l'énergie de la houle et encourager la déposition des sédiments à l'arrière de l'ouvrage, où ils y sont transportés par les courants résultants de la diffraction de la houle.

Contrairement aux épis qui emprisonnent les sédiments en agissant comme une barrière, les brise-lames créent derrière eux une zone où l'énergie de l'action de la houle est réduite, dans laquelle les sédiments auront tendance à se déposer et former des accrétions de sable en forme d'arc, qui ont tendance à se rejoindre entre chaque deux brise-lames ; on parle de «**tombolos**».

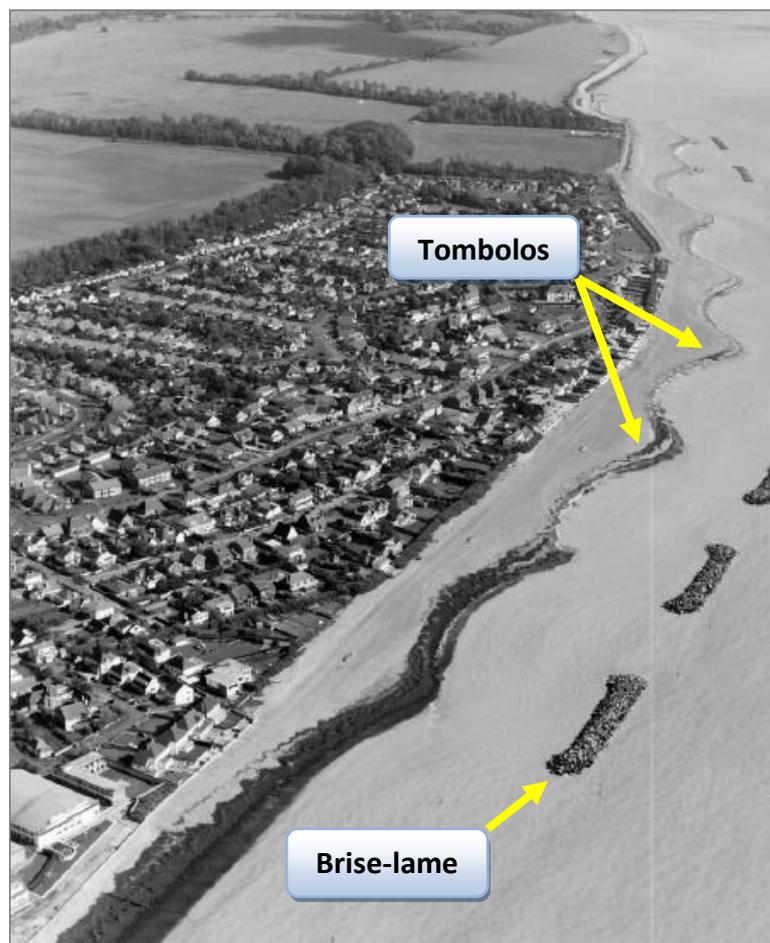


Figure II.4 : Série de brise-lames, Elmer, Royaume-Uni. Source : Guide Enrochement.

La formation d'un tombolo porte le bénéfice d'augmenter la surface disponible pour les activités humaines ludiques et facilite l'entretien du brise-lames par l'accès qu'il offre aux engins de maintenance.

Les brise-lames ont été utilisés avec un succès maximal sur les côtes où le marnage est négligeable ou faible. Ils présentent aussi de multiples avantages par rapport aux épis, lorsqu'ils sont appliqués à de larges plages de sable fin dans lesquelles le transport sédimentaire se fait principalement dans le profil de la plage, c'est-à-dire de la côte vers le large et vice-versa. (CETMEF, 2009).

Ces deux derniers points font donc du brise-lame un candidat potentiel pour la résolution de la problématique du club hippique.

➤ **Les différents types de brise-lame**

Selon les éléments dont il est constitué, on distingue une vaste variété de brise-lames :

• **Le brise-lame en pneus**

C'est un type de brise-lames flottants, qui sont généralement utilisés comme protection contre l'agitation au sein des constructions portuaires. Toutefois, il est possible de les employer pour la protection d'une plage.

L'inconvénient principal de ce brise-lame est lié à sa flottabilité auquel il faut remédier par un entretien continu des pneus, qui accumulent les sédiments et les déchets au fil du temps.



Figure II.5 : Photo d'un brise-lame en pneus.

Source : <http://www.gravurecaoutchouc.com/article-12271659.html>

- **Le brise-lame en pontons**

C'est un autre type de brise-lames flottants. Celui-ci a donné de très bons résultats en Colombie-Britannique, à l'ouest du Canada. Les pontons sont fabriqués en ciment ou en béton et ancrés au fond marin à l'aide de chaînes croisées dont la durée de vie va de 5 à 10 ans.



Figure II.6 : Illustration d'un brise-lame ponton de l'entreprise chinoise Superflex.

Source : www.nauticexpo.fr/prod/superflex-pontoon-mooring-systems-30285.html

- **Le brise-lame en géotubes**

Les géotubes sont des structures composées d'une membrane géotextile hautement résistance et perméable, tissée en forme de tube et injectée par pompage de matériaux, le plus souvent de sable hydraulique. Le résultat est une unité flexible et endurante face aux contraintes appliquées par la mer, dont la porosité permet à la fois de retenir les éléments fins et laisser passer l'eau.

Le tube est préfabriqué selon une grande variété de diamètres et de longueurs selon les applications spécifiques. La structure est caractérisée normalement par son diamètre théorique, sa circonférence et sa longueur. Le diamètre théorique du tube va de 1,50 à 5m.

La structure peut également être associée à un tapis anti-affouillement. Ce tapis assure la protection de la base du tube. Il peut être posé sous le tube et prolongé des deux côtés ou d'un côté uniquement. Sa largeur dépend de la taille du tube utilisé (**A.M.P.C.R. 7^{ème} congrès, 2006**).

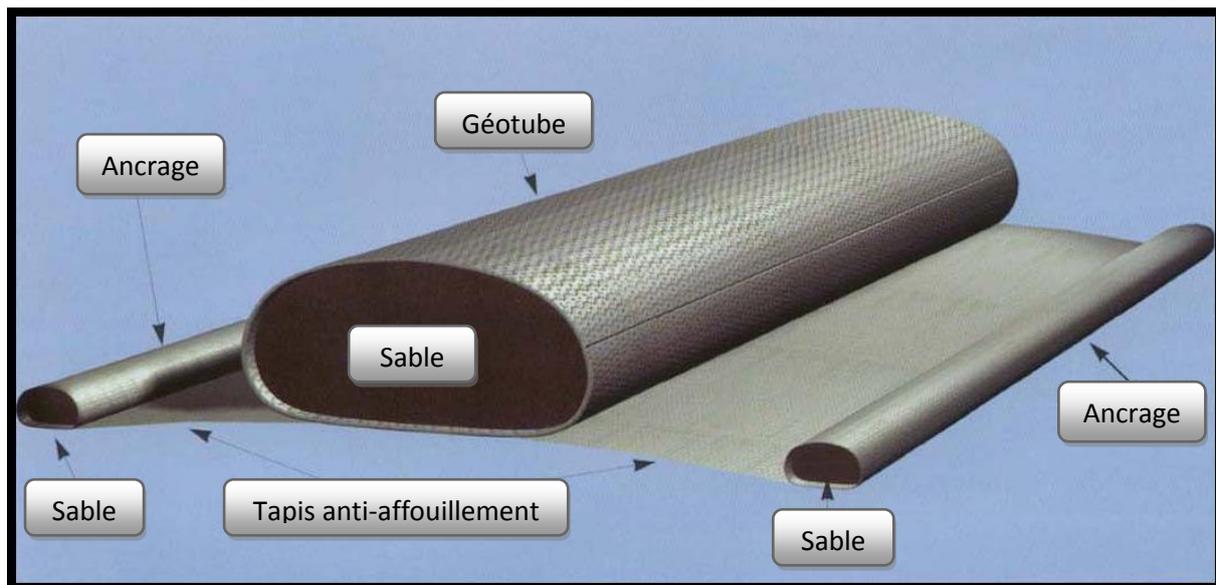


Figure II.7 : Schéma de la coupe d'un géotube.

La sensibilité du géotextile aux rayons de soleil engendre que les brise-lames en géotubes seront habituellement immergés sous la profondeur minimale d'un (01) mètre d'eau de mer.

Ceci implique que le rôle de l'ouvrage sera de réduire les volumes d'eau qui le franchissent et contraindre les houles qui dépasser une valeur de cambrure limite à déferler.

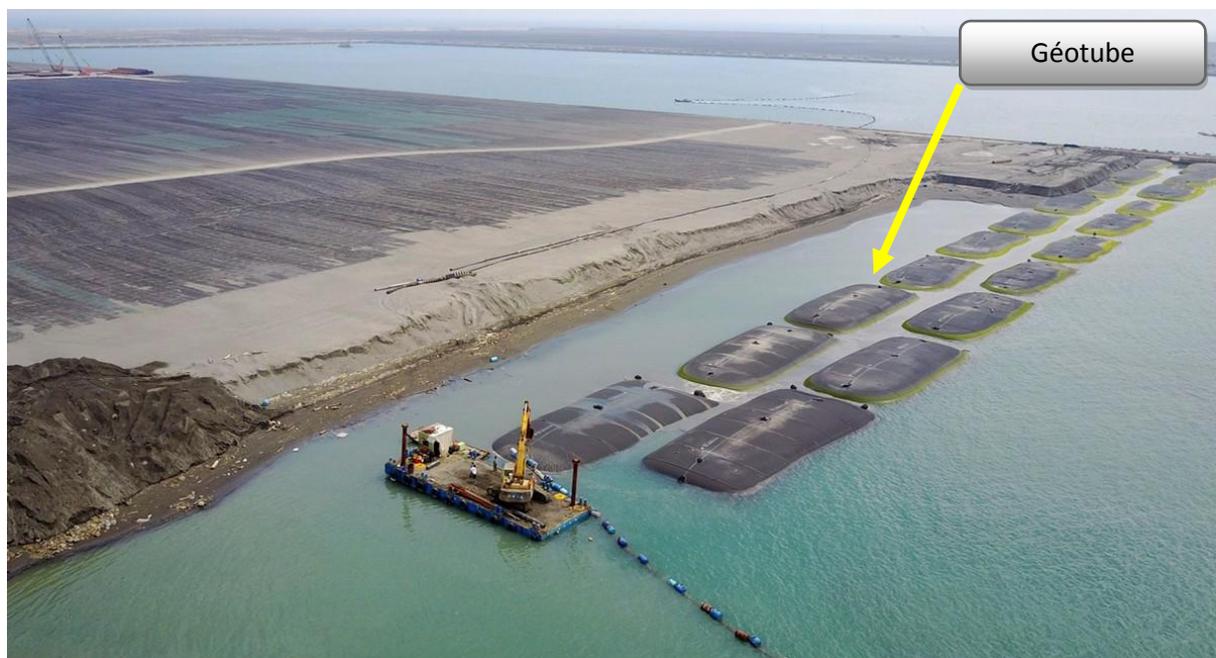


Figure II.8 : Emploi d'un brise-lame en géotubes à Kaohsiung, Taiwan.

Source : <https://www.geoace.com/ng/case/Marine-and-Coastal-Structures-Construction>

- **Le brise-lame en enrochement**

Aussi couramment appelé « digue ». C'est le type de brise-lame le plus fréquemment utilisé dans la protection des littoraux. Il est réalisé au moyen de matériaux plus ou moins grossiers, arrangés globalement sous la forme d'un trapèze ; on parle ici de « **digue à talus** ». Celle-ci va imposer à la progression de la houle une résistance d'autant plus efficace que le massif sera peu poreux et élevé. Néanmoins, des variantes immergées existent et certaines n'ont pas de talus non plus ; ce sont les « **dignes verticales** ».



Figure II.9 : Brise-lame en enrochement naturel. Perth, Australie.

Source : <http://estruct.com.au/waterways/revetment-walls/rock-armour/>

- **Le brise-lame en enrochement artificiel**

Une digue de protection est habituellement renforcée par une carapace en enrochement naturel issu de la même carrière que celle dont sont issus les autres matériaux employés dans sa construction. Toutefois pour que cette utilisation soit possible, il faut que les conditions suivantes soient remplies :

- Taille des enrochements disponibles suffisante pour résister à la houle.
- Bonne qualité et durabilité des enrochements lorsqu'ils sont soumis aux chocs.
- Respect de l'équilibre de la carrière.

Si les trois conditions ci-dessus sont réunies, alors l'utilisation des enrochements naturels s'avère être le meilleur choix, sur les plans économique et esthétique. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de recourir à des blocs artificiels en béton, généralement non armé.

Chaque famille de blocs est breveté et a été conçue avec une forme et des qualités spécifiques, il faudra donc choisir le type à utiliser selon les conditions de houle qui se présentent, ainsi que le budget disponible.

Parmi les blocs les plus utilisés en pratique, on cite le **bloc cubique rainuré**, le **tétrapode**, et l'**accropode**, illustrés dans la figure suivante.

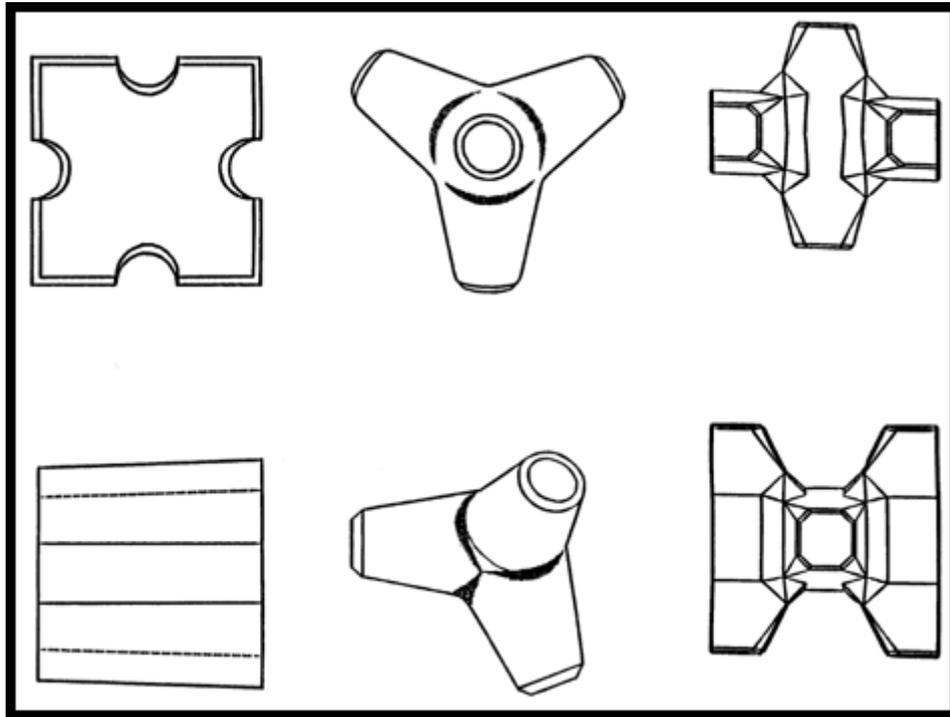


Figure II.10 : Dessins illustrant de gauche à droite : le cube rainuré, le tétrapode, l'accropode.



Figure II.11 : Brise-lame muni d'une carapace en accropodes. Pays-Bas.

Source : <http://breakwaterhealthscan.com/>

➤ **Désavantages du brise-lames flottant**

Les brise-lames flottants ne sont guère efficaces dans les zones de hautes vagues. Lors des fortes tempêtes, ils sont soumis à l'échec, et s'ils se détachent de leurs amarres, ils peuvent devenir un danger pour les vies humaines. Les coûts de main-d'œuvre peuvent aussi s'avérer très élevés.

➤ **Désavantages du brise-lames fixe**

Les coûts de construction d'un brise-lames fixe peuvent être relativement élevés. S'ils sont continus, ils peuvent représenter un danger écologique puisqu'ils empêchent les organismes vivants d'entrer ou de sortir de la zone qu'ils délimitent. Les brise-lames ont aussi le désavantage de ne pas être très esthétique et offre une vue déplaisante sur la rive. Ils peuvent aussi nuire aux activités de plongeon et à la navigation de plaisance.

II. 1. 2. 2. Les ouvrages de haut-de-plage

Ce sont des ouvrages construits et disposés parallèlement au rivage, constituant ainsi une barrière entre le sol dur et le milieu marin. Ils ont pour objectif de fixer la ligne de haut-de-plage et de protéger l'arrière-plage contre les agressions de la mer, jusqu'à ce que cette dernière les détruise. De tels ouvrages sont retrouvés généralement devant les zones urbaines qui bordent le littoral.

Les ouvrages de haut-de-plage doivent être conçus de manière à résister, par leur poids, au choc des lames déferlantes, tout en considérant aussi les efforts de soutènement engendrés par le massif qu'ils protègent.

➤ **Les différents types d'ouvrages de haut-de-plage**

Les ouvrages de haut-de-plage varient en complexité et peuvent être même de simples murs de séparation entre une ville et sa plage de même relief.

Il en existe plusieurs types :

- **Les ouvrages en maçonnerie**

Les ouvrages de haut-de-plage les plus anciens sont les perrés en maçonnerie. Ils ont une très longue durée de vie et ne sont menacés que par des défauts de construction lors de la mise-en-œuvre ou un mauvais entretien.



Figure II.12 : Perré en maçonnerie datant du 19^{ème} siècle. La Flotte-en-Ré, France.
Photo prise par J. Bougis.

- **Les ouvrages en enrochement**

Connus aussi sous le nom de cordons d'enrochement. Ces ouvrages sont composés d'un entassement de morceaux de roche de taille assez grande, disposés le long du trait de haut-de-plage.



Figure II.13 : Enrochements de haut-de-plage à Fouesnant, France.

- **Les dunes**

Les dunes sont un moyen naturel de blocage du sol et représentent la protection ultime contre les agressions de la mer et les inondations provoquées par les tempêtes. Stratégiquement déposées hors de la portée des houles, elles sont habituellement fixées et préservées par des pièges constitués d'herbe et de plantations.



Figure II.14 : Reconstitution des dunes à Saintes Maries de la Mer, France.
Photo prise par J. Bougis.

➤ **Désavantages des ouvrages de haut-de-plage**

- La fixation de la ligne de haut de plage s'effectue au détriment des sédiments de la plage qui continue à disparaître progressivement. L'ouvrage se retrouve alors souvent affouillé et se déchausse par la suite.
- Ces structures procurent une protection exclusivement aux terrains situés immédiatement derrière elles et aucune aux zones adjacentes. Elles peuvent même parfois accélérer le phénomène d'érosion dans les rivages de part et d'autre.

II. 1. 3. Les solutions dynamiques

La mise en place d'ouvrages de stabilisation du transit littoral ne garantit pas la reconstitution d'une plage. Il faut également que les sédiments soient disponibles en quantité suffisante et l'alimente de manière continue. C'est pour cela qu'il est courant d'avoir recours à ce type de solution, lorsqu'il n'existe pas d'apports suffisants assurés par une source d'alimentation naturelle pérenne, résultant en un débit solide faible.

On distingue plusieurs types de protection dynamique :

- **Le remodelage de l'estran**

Ce procédé consiste à emprunter les matériaux trouvés en basse mer et les répartir sur l'estran afin de rétablir le profil de plage.

Cette technique est appliquée aux mers à fort marnage, où le phénomène de marée est d'amplitude considérable. Elle n'est donc d'aucune utilité sur les côtes de la méditerranée.

- **L'apport de matériaux**

Une autre solution communément envisagée pour résoudre le problème d'érosion des plages consiste à l'alimenter périodiquement par des apports massifs en sable pour la reconstituer.

Généralement, on envisage un premier rechargement, puis des rechargements d'entretien annuels qui représentent chacun 10 à 20% de l'apport initial. Cette opération est souvent complétée par la réalisation de brise-lames afin de protéger le stock sédimentaire ajouté.



Figure II.15 : Travaux de rechargement de plage à Capbreton, France.

- **Le by-pass sédimentaire**

C'est un transit littoral artificiel qui sert de substitution au transit naturel, si ce dernier est jugé insuffisant. Cette technique consiste à empêcher le passage des sédiments à l'amont d'un obstacle tel qu'une digue et le rétablir ensuite à l'aval à l'aide de dragues flottantes ou d'engins terrestres.

L'efficacité de tels systèmes est débattue car ils n'ont pas toujours donné de bons résultats. Il faut donc être prudent à l'étude avant d'envisager ce type de solution.

II. 2. Choix de la solution

Les problèmes de protection côtière sont divisés en trois (03) grandes catégories selon le livre de *Travaux Maritimes (Tome 2)* :

- **Stabilisation du rivage :**

Ce cas se présente sur les côtes à falaises érodables, les côtes sableuses, dans les estuaires, les deltas, les graus.

- **Protection des zones urbanisées de la submersion marine**

Ce problème se pose sur les côtes de sable ou de galets, notamment les zones de cordon littoral.

- **Protection d'une passe**

Essentiellement sur les côtes rocheuses avec de petites plages de sable, les côtes sableuses, les estuaires, les deltas, les graus.

Etant donné que nous faisons face à une problématique de stabilisation de la ligne du rivage, les ouvrages de haut-de-plage sont immédiatement à écarter comme solution vu qu'ils ne sont pas un remède au phénomène d'érosion et donc mettent en péril la plage et ses sédiments. Leur fonction est limitée à la protection de l'arrière-plage en cas de surélévation du niveau marin (suite à une tempête, marée...).

Cependant, le résultat voulu de ce projet n'est pas uniquement d'interrompre le recul du trait de côte mais aussi d'inverser le processus et causer un rechargement de la plage. Un système d'épis ou de brise-lames seraient donc des solutions optimales étant donné que ces ouvrages sont connus pour provoquer des accrétions de sédiments.

La superficie des tombolos formés par l'action des brise-lames étant supérieure aux caps obtenus par des épis et l'effet érosif provoqué par ces derniers à l'aval étant bien plus important que celui qui se produit entre deux brise-lames, il serait préférable d'opter pour un système de brise-lames. La forme des tombolos est aussi bien plus adéquate compte tenu de la nature des activités au niveau de la plage du club hippique. Les chevaux pourraient par

malheur être blessés par la base des épis lors des courses ou des randonnées, ce qui n'est pas près d'arriver avec des brise-lames.

Les deux types de brise-lames dont l'efficacité est la plus lourdement documentée sont ceux en géotubes et ceux en enrochement. Le cadre géographique de la zone d'étude fait que le choix tombe sur ce deuxième type. En effet, l'existence de multiples carrières dans un rayon de 10 kilomètres de la plage du club hippique nous motive à opter pour le brise-lames en enrochement car la proximité de ces ressources en matériaux de construction le rendra beaucoup moins cher qu'une structure en géotubes.

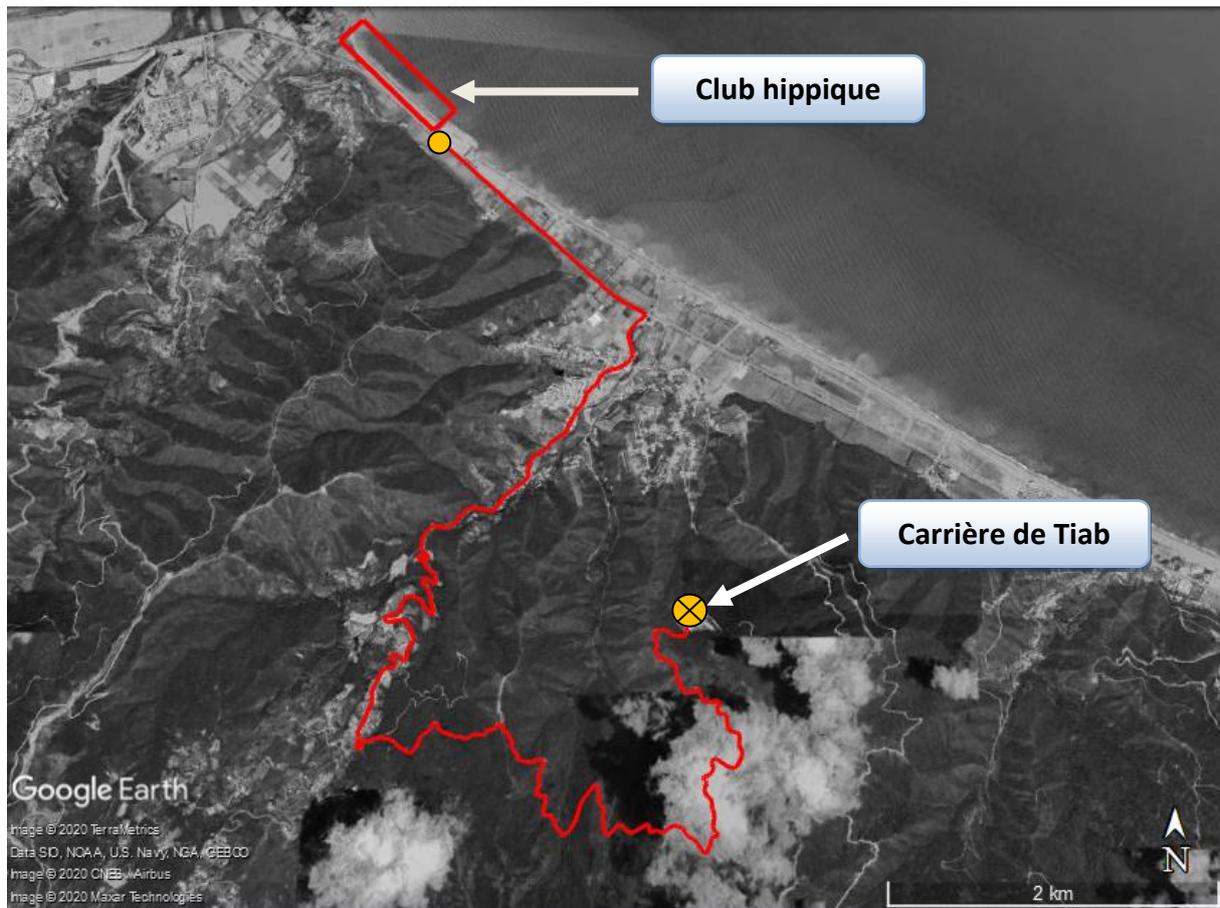


Figure II.16 : Itinéraire entre le club hippique et la carrière de Tiab (14 km).

Le brise-lame en enrochement n'est pas supérieur uniquement sur le plan financier. Il présente d'autres avantages, notamment en termes de :

- Taux de réduction de l'énergie de la houle
- Durabilité
- Maintenance et entretien
- Sécurité pour la navigation (car il est visible)

Tout de même, ils présentent quelques inconvénients tels qu'une durée de réalisation assez importante et un côté esthétique plutôt pauvre.

Dans tableau ci-dessous sont récapitulés les résultats de l'analyse multicritère qui a permis de comparer les deux variantes :

Tableau II-1 : Comparaison des variantes en enrochements et en géotubes.

Variante Critère	Variante 1 Brise-lames en enrochements	Variante 2 Brise-lames en géotubes
Délais de réalisation	C	C
Coût de réalisation	A	C
Durabilité	A	B
Sécurité des estivants	B	A
Sécurité pour la navigation	A	C
Entretien	B	C
Esthétique	B	A
Notation globale reçue	3A + 3B + 1C	2A + 1B + 4C

Les notations A, B, C sont attribuées à chacun des critères cités ci-dessus. Ces notations correspondent aux qualifications suivantes :

- Cas favorable : A
- Cas peu favorable : B
- Cas défavorable : C

Sur la base de ces critères et des notes attribuées à chacune d'entre elles, **la variante n°1** se démarque favorablement avec un score total de (3A+3B+1C) vis-à-vis de la variante n°2 car elle assure en plus des critères classiques, la sécurité de la navigation nautique.

II. 3. Pré-dimensionnement de la solution

L'ouvrage maintenant choisi, nous passons maintenant à l'étape du pré-dimensionnement de laquelle ressortira le plan d'aménagement de la protection côtière, ainsi que le profil des brise-lames.

II. 3. 1. Définition du plan d'aménagement

Les différents paramètres qui permettent de définir le tracé en plan de l'aménagement sont :

- La longueur L des brise-lames.
- La distance E entre les ouvrages.
- La distance D à la ligne du rivage.
- La profondeur h d'implantation.
- L'orientation δ du brise-lame par rapport au trait de rivage.

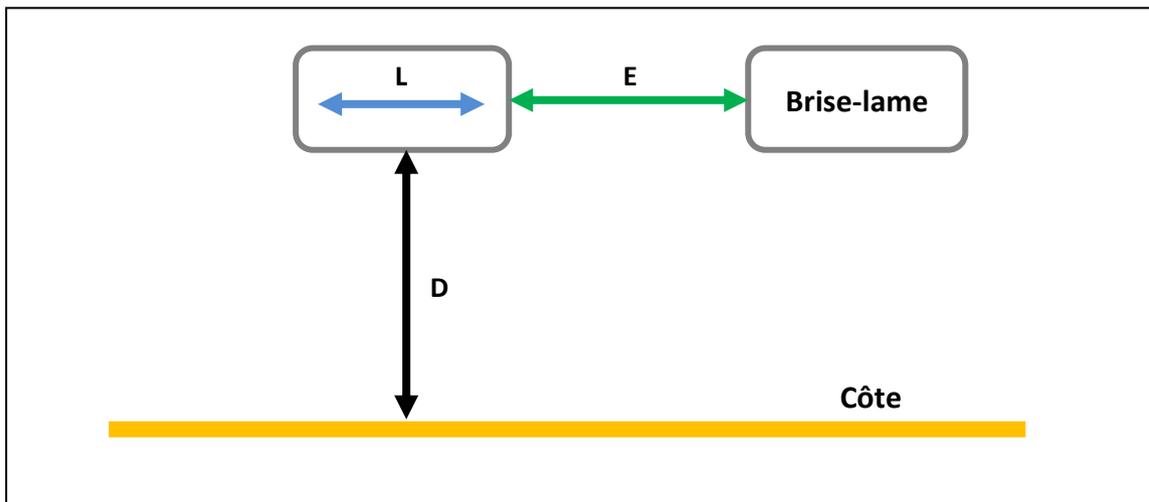


Figure II.17 : Schéma du plan d'aménagement et de ses paramètres.

Les paramètres les plus importants dans l'évolution du trait de côte suite à l'implantation des brise-lames sont liés au phénomène de diffraction. Ce sont notamment la longueur d'onde de la houle L , la distance E entre les brise-lames, la direction de la houle, et la hauteur de la houle H .

L'allure obtenue sera essentiellement gouvernée par la forme des lignes de crêtes de la houle et la vitesse de sa mise en place dépendra de l'énergie de la houle qui sera disponible pour assurer le transport sédimentaire (Bougis, 2000).

II. 3. 1. 1. Longueur relative des brise-lames (relation L – D)

La formation d'un tombolo à l'arrière d'un brise-lames dépend de sa longueur relative à sa distance à la côte. Ce rapport doit être suffisamment grand pour que ceci ait lieu.

$$\frac{L}{D} > a$$

Les expériences conduites sur des modèles réduits se sont conclues sur les résultats suivants :

$\frac{L}{D} < 1/3$: La formation du tombolo est impossible.

$\frac{L}{D} < 1/2$: La probabilité de formation du tombolo est presque nulle

$\frac{L}{D} < 1$: La probabilité de formation du tombolo est faible.

$\frac{L}{D} > 2$: La formation du tombolo est assurée.

II. 3 .1. 2. Longueur des brise-lames

La longueur du brise-lames est liée à deux autres longueurs qui sont la distance à la côte et la longueur d'onde de la houle.

Une fois de plus, différentes formules sont proposées pour choisir la longueur à donner à un brise-lames.

J. Charpentier (L.C.H.F.) propose la relation suivante :

$$L > 1.2 (D + 0,3 l)$$

La **SOGREAH** (Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques) emploie une formule plus simple, qui consiste à multiplier la longueur d'onde par un facteur de 1.25 pour obtenir la longueur du brise-lame :

$$L = 1,25 l$$

O. Toyoshima évoque une corrélation entre la longueur d'onde de la houle et la longueur du brise-lame exprimée dans le tableau suivant :

Tableau II-2 : Corrélation entre les longueurs de l'ouvrage et de l'onde d'après O. Toyoshima

Position de l'ouvrage	Profondeur d'eau	Longueur de l'ouvrage
Près du rivage	< 1 mètre	$L = 2 \text{ à } 3 l$
Faible profondeur	1 à 2 mètres	$L = 3 \text{ à } 5 l$
Moyenne profondeur	2 à 6 mètres	$L = 3 \text{ à } 10 l$
Grande profondeur	> 6 mètres	$L = 3 \text{ à } 10 l$

II. 3. 1. 3. Espacement des brise-lames

D'après les recommandations du **CERC** (Coastal Engineering Research Center), l'espace à la côte entre chaque deux brise-lames doit satisfaire les conditions suivantes afin d'assurer un niveau d'énergie suffisamment bas à l'abri des brise-lames :

$$\begin{cases} E < 2 l \\ L < D \end{cases}$$

De son côté, le japonais **O. Toyoshima** a proposé, à l'issue de ses nombreuses recherches, une distance plus courte entre les brise-lames, en fonction de la longueur d'onde de la houle à la profondeur considérée :

$$0,5 l < E < 1,5 l$$

Tandis que **J. Charpentier** du L.C.H.F. (Laboratoire Centrale d'Hydraulique de France) préconise la formule suivante :

$$E < \frac{D}{1,2} + \frac{l}{2}$$

Ces formulations sont toutes conformes au fait que le brise-lame semble posséder un « intervalle » de capture de la houle supérieur à sa propre longueur et proportionnel à la longueur d'onde de cette dernière.

II. 3. 1. 4. Calculs et résultats

En premier lieu, il nous faut déterminer la distance à la côte **D** dont dépendra le calcul du reste des paramètres.

Pour qu'un brise-lame fonctionne de manière optimale, la distance à la côte doit être en moyenne égale à la moitié de la longueur d'onde de la houle au large.

Il faut alors choisir les conditions de houle extrême face auxquelles l'ouvrage doit tenir : on parle de « houle de projet ». Les données recueillies dans le chapitre précédent indiquent que pour une période de retour de 50 ans, la houle dans le cas le plus défavorable possède une période de retour d'environ 14 secondes. On trouve alors :

$$l_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} = \frac{9,81 (14)^2}{2\pi} = 306,02 \text{ mètres}$$

On conclut donc que : $D = \frac{l_0}{2} = 153,01 \text{ mètres}$

Pour des raisons de sécurité, on prend **D = 160 m**. Cette distance à la côte correspond à une profondeur **h = 6 m**. La longueur d'onde de la houle à cet emplacement est :

$$l = l_0 \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 h}{gT_p^2}\right)} = 306,02 \sqrt{\tanh\left(\frac{(4\pi^2) 6}{9,81 (14)^2}\right)} = 107,14 \text{ mètres}$$

Il est désormais possible d'appliquer les formules empiriques vues précédemment :

Tableau II-3 : Application des différentes méthodes de calcul.

Paramètre	Longueur du brise-lame	Espacement
Méthode 1	Formule LCHF L > 230,6 m	Formule LCHF E < 187 m
Méthode 2	Formule SOGREAH L = 134m	Formule Toyoshima 53,6 m < E < 160,7 m

La valeur obtenue par la formule du L.C.H.F. propose d'adopter des brise-lames de trop grande taille (plus de 230 mètres), qui pourraient potentiellement créer des problèmes de pollution et de stagnation des eaux à l'arrière des ouvrages. Elle sera donc ignorée.

Conformément aux valeurs obtenues par les formules de SOGREAH et Toyoshima, la configuration choisie pour la protection de la plage du club hippique est composée de quatre (04) brise-lames installés à une distance de **160** mètres du rivage, d'une longueur unitaire de **140** mètres chacun et séparés par un espace de **100** mètres. Les 6 mètres rajoutés à la longueur théorique des brise-lames ont pour but d'augmenter la protection de la côte.

Ils seront implantés à une profondeur moyenne de **6** mètres et orientés parallèlement à la côte (et perpendiculairement au secteur Nord-est).

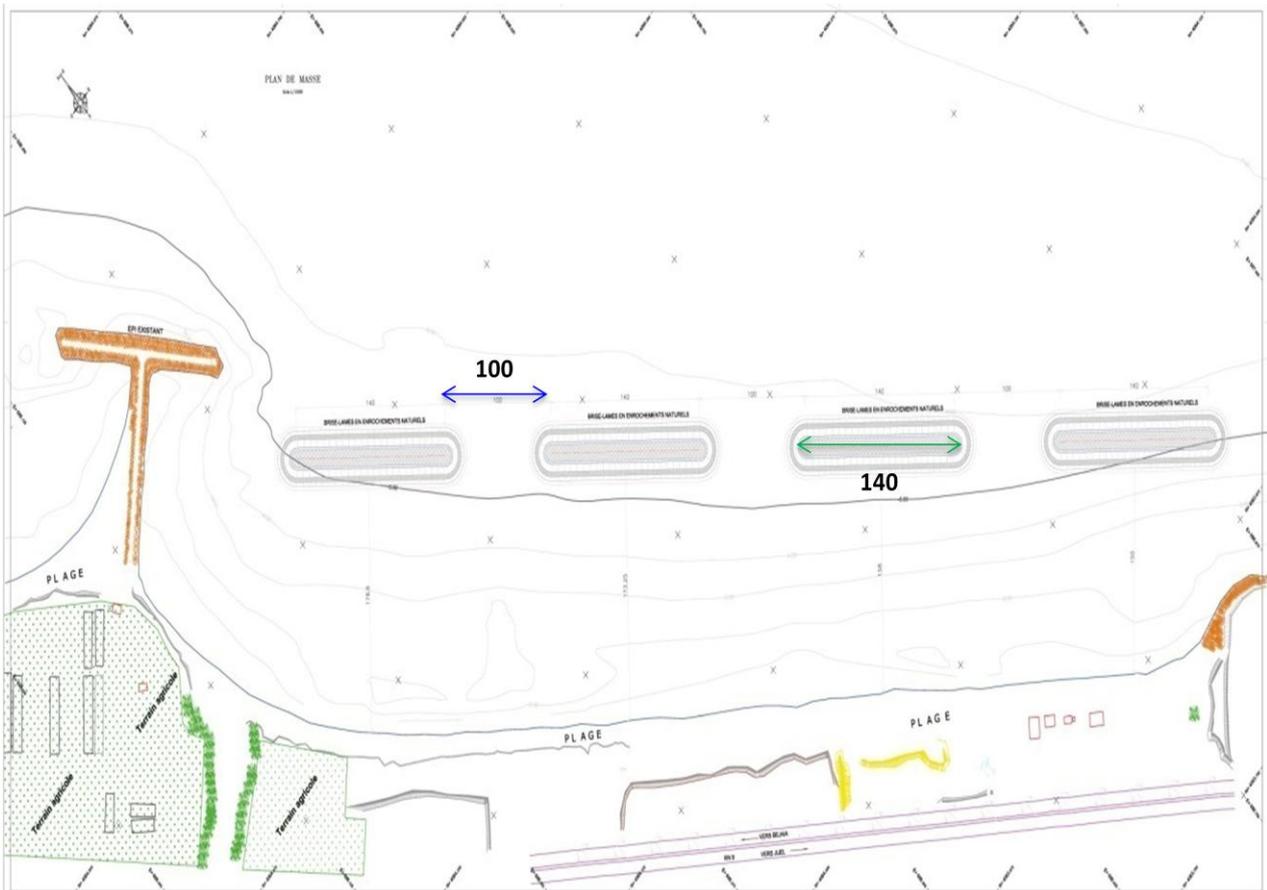


Figure II.18 : Tracé en plan de l'aménagement de la plage du club hippique.

II. 3. 2. Définition du profil du brise-lame

Le dimensionnement suivant se fera pour la même période de retour de 50 ans qui correspond à une houle de hauteur significative $H_s = 3,15$ m au pied de l'ouvrage, selon les résultats de l'étude de réfraction.

II. 3. 2. 1. La hauteur du brise-lames

La hauteur est le paramètre dont dépendra le plus l'efficacité du brise-lame à amortir les houles, en particulier celles de grande amplitude. Ainsi, les brise-lames à crête élevée limiteront fortement l'effet de la houle à l'arrière de l'ouvrage.

Du à des raisons liées à l'entretien de ce type de structure, nous avons décidé qu'elle soit émergente et non pas immergé. Comme première approche, on fixe la côte d'arase à 1,00 mètre N.G.A. Le brise-lame étant placé à une profondeur de 6 mètres, on obtient donc une hauteur totale de 7 mètres.

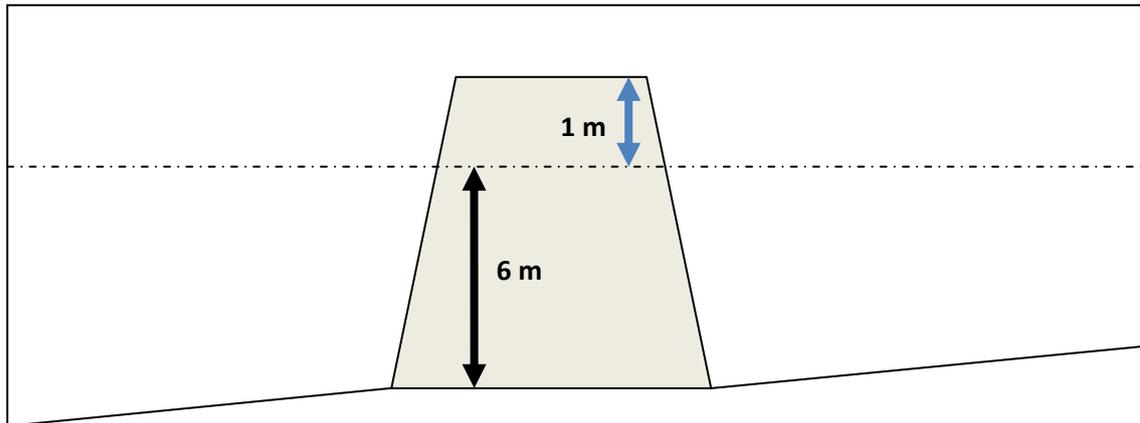


Figure II.19 : Schéma du profil du brise-lame.

II. 3. 2. 2. La largeur en tête du brise-lames

La transmission de l'énergie de la houle se produit souvent par franchissement de l'ouvrage. C'est pour cela que de nombreux essais ont été effectués afin de déterminer la largeur de la crête du brise-lame qui permettrait de minimiser ce phénomène qui nuit négativement à la formation des tombolos.

Les travaux de recherche d'Angremond, Van der Meer et Jong (1996) en laboratoire sur des modèles réduits de brise-lames en enrochements ont aboutit à la formule suivante qui permet de calculer une valeur pour la largeur de la crête du brise-lame :

$$K_t = -0,4 \frac{R_c}{H_s} + C_p \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0,31} (1 - e^{-0,5\varepsilon_B})$$

Où :

K_t : Coefficient de transmission.

R_c : Revanche de la crête (hauteur entre l'ouvrage et la surface de l'eau, comptée négativement vers le bas et positivement vers le haut).

H_s : Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage.

B : Largeur de la crête.

C_p : Coefficient de perméabilité de l'ouvrage.

ε_B : Le nombre d'Iribaren-Battjes, tel que :

$$\varepsilon_B = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/l_0}}$$

$\tan \alpha$: La pente du talus.

l_0 : La longueur d'onde de la houle au large.

A noter que cette formule est uniquement valable si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\begin{cases} B/H_s < 10 \\ 0,075 < K_t < 0,8 \end{cases}$$

Les résultats du calcul de la largeur de la crête sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II-4 : Calcul de la largeur de la berme du brise-lame.

R_c (m)	H_s (m)	C_p (-)	$\tan \alpha$ (-)	l_0 (m)	ϵ_B (-)	K_t (-)	B (m)
-1,00	3,15	0,64	0,67	306,02	6,60	0,60	11,00

II. 3. 2. 3. Dimensionnement de la partie courante

- Les constituants la partie courante

La figure (II.20) ci-dessous représente la coupe-type d'une digue à talus (brise-lames) avec ses divers éléments.

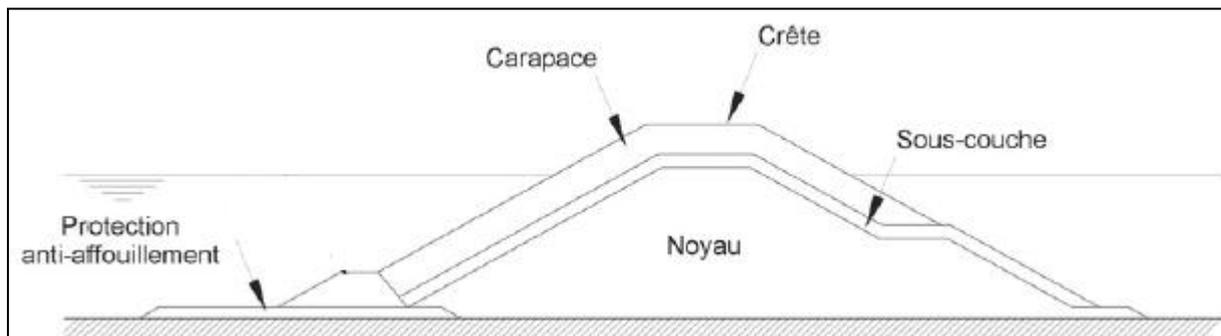


Figure II.20 : Coupe-type d'une digue à talus. Source : Guide Enrochement.

➤ Carapace

La carapace est l'élément le plus sensible à l'attaque de la houle, les caractéristiques des blocs utilisés sont donc très importantes. Les formules permettant de calculer le poids théorique des enrochements qui la constitue, sont nombreuses.

De nos jours, la formule d'**Hudson** est considérée comme étant la plus satisfaisante. Elle énonce, qu'une houle d'amplitude H_s ne crée pas de dégâts à un talus constitué de blocs de poids W , lorsqu'elle se déferle sur ce dernier.

La formule d'Hudson (**Bonnefille 1980, page 104**) est donnée comme suit :

$$W = \frac{\rho_s * H_s^3}{K_d * \left(\frac{\rho_s}{\rho_\omega} - 1\right)^3 * \text{Cotg } \alpha}$$

Où :

W : Poids des enrochements de la carapace en tonnes (t).

ρ_s : Masse volumique des enrochements (t/m^3).

ρ_ω : Masse volumique de l'eau de mer ($1,028 \text{ t/m}^3$).

K_d : Coefficient de stabilité.

α : Angle du talus côté mer.

La formule d'Hudson peut être utilisée en eau profonde comme peu profonde, et pour une houle déferlante ou non.

Connaissant la masse médiane d'un enrochement de la carapace W et la masse volumique de la roche employé ρ_s , on peut avoir une approximation du diamètre médian à utiliser :

$$d_{\text{médian}} = \left(\frac{W}{\rho_s}\right)^{1/3}$$

Une autre caractéristique importante dans la construction de la carapace est l'épaisseur de la couche d'enrochement, qui est obtenue avec la formule empirique suivante :

$$e_{\text{carapace}} = N * K * d_{\text{médian}}$$

K : Coefficient d'épaisseur de couche.

N : Nombre de couches de la carapace.

➤ Noyau

Il constitue le cœur de la digue. En général, on utilise le tout venant (TVC ou TVR) et il doit assurer une transition satisfaisante entre le soubassement (au matériau fin) et les matériaux les plus grossiers du filtre. Pour ce projet, un noyau constitué d'enrochements de poids entre 500 kilogrammes et 1 tonne a été choisi. Du à la taille des blocs utilisés pour celui-ci, il n'est pas nécessaire de prévoir un filtre comme dans la coupe type d'un brise-lame usuel.

• **Calculs et résultats**

Les résultats du dimensionnement de la partie courante sont résumés ci-dessous :

Tableau II-5 : Calcul des dimensions de la partie courante du brise-lame.

Partie de l'ouvrage	Formule utilisée	Application nm.	Résultat
Carapace $H_s = 3.15 \text{ m}$	$W = \frac{\rho_s * H_s^3}{K_d * \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3 * \text{Cotg } \alpha}$	$= \frac{2,65 * 3,15^3}{3,5 * \left(\frac{2,65}{1,028} - 1\right)^3 * 1,5}$	$= 3,5 \text{ t}$
	$d_{\text{median}} = \left(\frac{W}{\rho_s}\right)^{1/3}$	$= \left(\frac{3,5}{2,65}\right)^{1/3}$	$= 1,1 \text{ m}$
	$e_{\text{carapace}} = N * K * d_{\text{median}}$	$= 2 * 1,15 * 1,1$	$= 2,5 \text{ m}$
Noyau	<i>Enrochements : 0,5 – 1 tonne</i>		

II. 3. 2. 4. Dimensionnement du talus arrière

Le talus arrière est soumis à l'action de la houle – côté intérieur de la digue – ainsi qu'aux franchissements provenant de la houle, côté extérieur. Cette partie, très vulnérable, doit bien résister aux lames d'eau déversant par-dessus l'ouvrage, ainsi qu'à la retombée des paquets de mer projetés à grande hauteur lors du déferlement des vagues sur la carapace extérieure.

On procède au dimensionnement de la carapace intérieure de la même façon que pour la carapace extérieure.

II. 3. 2. 5. Dimensionnement de la partie musoir

Les musoirs situés aux extrémités droite et gauche d'un ouvrage en enrochement présentent un réel problème de stabilité. La houle qui déferle sur un musoir peut s'y concentrer et causer des dégâts, en particulier à l'arrière du musoir : on parle du phénomène de diffraction.

La vulnérabilité du musoir nous pousse à adopter pour sa carapace, des blocs tout aussi denses que pour le reste de l'ouvrage afin de minimiser la fréquence des dommages sur celui-ci.

II. 4. Conclusion

Suite à une recherche bibliographique sur les ouvrages de défense côtière, ce chapitre a permis l'établissement d'une solution théorique au problème d'érosion de la plage du club hippique qui consiste à implanter 4 brise-lames en série, chacun caractérisé par les paramètres suivants :

- Profondeur approximative d'implantation : 6 m.
- Longueur unitaire : 140 m.
- Côte d'arase de : +1,00 m N.G.A.
- Largeur de crête : 11 m.
- Une carapace en enrochements (2 – 5 T), d'une épaisseur de 2,50 m et une pente de 3/2.
- Un noyau en enrochements (0,5 – 1 T) avec une pente de 3 pour 2, posé sur un tapis anti-affouillement en géotextile.

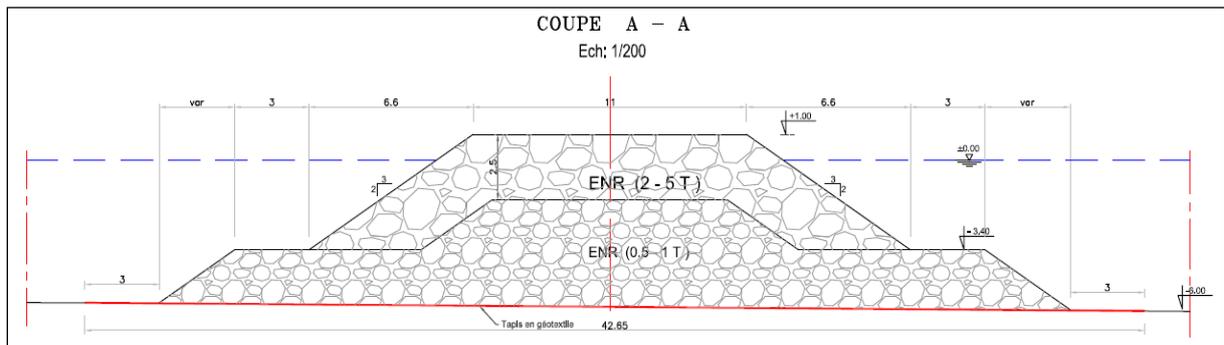


Figure II.21 : Coupe du brise-lame dimensionnée.

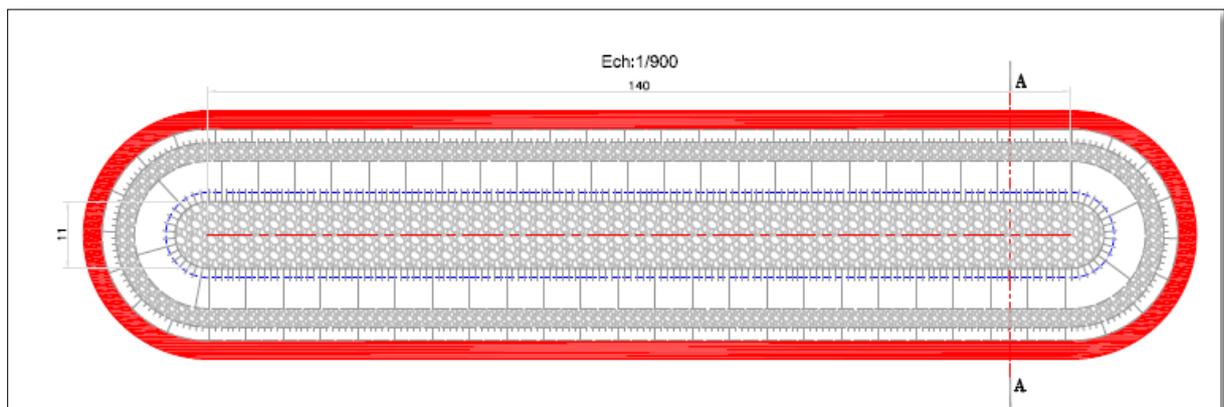


Figure II.22 : Vue en plan du brise-lame.

Chapitre III

Etude en modèle réduit à fond mobile

III. Etude en modèle réduit à fond mobile

La solution que nous avons établi dans le chapitre précédent n'est, pour l'instant, valable que sur plan théorique. Afin de valider sa pertinence et confirmer qu'elle remédie réellement au problème d'érosion du rivage du club hippique, l'étape suivante sera de mener une étude sur modèle réduit physique.

Selon les résultats obtenus à la suite de ces essais sur modèle physique, des modifications pourraient lui être apportées afin d'optimiser son fonctionnement.

III. 1. Introduction aux modèles réduits physiques

Souvent désignés par le terme « maquette », les modèles réduits sont la représentation analogue d'un phénomène ou d'un ouvrage qui existe dans la réalité. Ils sont généralement appelés afin de simuler la performance ou la réponse d'une structure et de voir à petite échelle de ce qui se passera à grande échelle dans les mêmes conditions.

L'idée d'expérimenter sur des modèles réduits est apparu il y a des siècles et y avoir recours reste justifié jusqu'à ce jour malgré les énormes avancements technologiques qu'il y a eu dans les dernières décennies car il est toujours courant de faire face à un phénomène si complexe qu'il est très difficile de le décrire par des équations et encore moins évident de manipuler son modèle mathématique. C'est là qu'intervient le modèle physique afin de nous sauver énormément de temps et d'énergie, tout en procurant des résultats fiables. En effet, puisqu'il prend en compte toutes les lois physiques qui régissent le phénomène étudié, il s'avère être un puissant « calculateur » qui reproduit fidèlement la réalité des choses.

La simulation physique est employée dans de nombreux domaines et l'hydraulique maritime n'en fait pas exception. Elle trouve en fait toute son utilité dans cette dernière en permettant de tester la stabilité et l'efficacité des ouvrages dimensionnés et d'éviter de grosses pertes financières (ou même de vies) dans le cas échéant. La plupart des modèles sont conçus pour des protections côtières soumises aux attaques de la houle (digue, perré...), ce qui est le cas de notre étude. Les coûts induits par ces structures de défense sont si élevés que la modélisation physique, en dépit des dépenses qu'elle impose, devient très rentable.

L'expérimentation sur modèle réduit bénéficie aussi de plusieurs autres avantages qui peuvent être résumés par la facilité des mesures effectuées au laboratoire, la plus haute précision qu'autorisent les appareils de mesure utilisés, la possibilité d'effectuer de nombreuses expériences et de les répéter tout en faisant varier les différents paramètres du problème si nécessaire.

Cependant une question très pertinente se pose : dans quelle mesure et suivant quelles lois les résultats obtenus sur les modèles réduits peuvent-ils être transposés à la réalité, en grandeur réelle ?

III. 2. Les lois de similitude

La technologie des modèles réduits est basée sur les règles de similitude qui découlent de l'analyse dimensionnelle. Ces lois permettent d'une part de concevoir et d'exploiter le modèle et d'autre part, de lier les résultats obtenus à la réalité. On distingue les similitudes :

- Géométrique
- Cinématique
- Dynamique

III. 2. 1. La similitude géométrique

Selon laquelle, le rapport entre les dimensions du prototype et du modèle doit demeurer constant. Pour une longueur L_n du prototype (nature) et une longueur correspondante L_m du modèle, on écrit :

$$\lambda = \frac{L_m}{L_n}$$

L'échelle des longueurs $\longrightarrow \lambda$

III. 2. 2. La similitude cinématique

Elle stipule que le rapport des vitesses et des accélérations en tout point du prototype et son homologue dans le modèle, doit être constant.

En considérant :

t_n : Le temps nécessaire pour parcourir une distance L_n du prototype.

t_m : Le temps nécessaire pour parcourir une distance L_m du modèle.

On définit les échelles suivantes :

- L'échelle des temps $\longrightarrow \lambda_t = \frac{t_m}{t_n}$
- L'échelle des vitesses $\longrightarrow \lambda_v = \frac{v_m}{v_n}$
- L'échelle des accélérations $\longrightarrow \lambda_a = \frac{a_m}{a_n}$

D'autre part :

$$\begin{cases} v_m = \frac{L_m}{t_m} \\ v_n = \frac{L_n}{t_n} \end{cases}$$

En divisant membre à membre, on obtient :

$$\frac{v_m}{v_n} = \lambda_v = \frac{L_m}{L_n} \frac{t_n}{t_m} = \frac{\lambda}{\lambda_t}$$

En dérivant les expressions de la vitesse par rapport au temps, on trouve les accélérations :

$$\begin{cases} a_m = \frac{L_m}{t_m^2} \\ a_n = \frac{L_n}{t_n^2} \end{cases}$$

Il en ressort que :

$$\frac{a_m}{a_n} = \lambda_a = \frac{L_m}{L_n} \left(\frac{t_n^2}{t_m^2} \right) = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

III. 2. 3. La similitude hydrodynamique

Dans le prototype comme au niveau du modèle, le mouvement de l'eau est gouverné par les mêmes forces. Ainsi, pour qu'il y ait une similitude dynamique, il est donc nécessaire que toutes les forces agissant en des points homologues du modèle et du prototype soient dans le même rapport. En hydraulique, ces forces sont essentiellement :

- Les forces d'inertie.
- Les forces de pesanteur.
- Les forces de turbulence.
- Les forces de viscosité.
- Les forces de capillarité.

Ces forces n'étant pas de même nature, les lois de similitude dynamique ne permettent pas d'avoir un rapport constant entre toutes celles-ci. Par conséquent, nous sommes contraints de négliger certaines de ces forces par rapport à d'autres. Dans les écoulements que nous traitons, les forces de gravité et d'inertie sont dominantes et on peut en général négliger les forces de viscosité et de capillarité.

a) Forces d'inertie

La force d'inertie agissant sur une particule de masse m et de vitesse V , sur une trajectoire dont le rayon de courbure est r , est exprimée par :

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

Dans un point donné du prototype, on aura alors:

$$F_n = m_n \frac{v_n^2}{r_n}$$

Et au point homologue du modèle :

$$F_m = m_m \frac{v_m^2}{r_m}$$

Le rapport des forces d'inertie donne :

$$\frac{F_m}{F_n} = \frac{m_m}{m_n} \left(\frac{v_m}{v_n} \right)^2 \frac{r_n}{r_m}$$

En définissant les rapports suivants :

- L'échelle des forces d'inertie $\longrightarrow \lambda_{FI} = \frac{F_m}{F_n}$

- L'échelle des masses $\longrightarrow \lambda_m = \frac{m_m}{m_n}$

On obtient :

$$\lambda_{FI} = \frac{\lambda_m \lambda_v^2}{\lambda} = \frac{\lambda_m}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\lambda_t} \right)^2 = \frac{\lambda_m \lambda}{\lambda_t^2}$$

D'autre part, on introduit le rapport des masses volumiques :

$$\frac{\rho_m}{\rho_n} = \frac{m_m V_n}{m_n V_m} \Rightarrow \lambda_\rho = \frac{\lambda_m}{\lambda_v}$$

Par analyse dimensionnelle, on a :

$$\lambda_v = \lambda^3$$

On en tire que :

$$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda^3$$

Le résultat final est donc :

$$\lambda_{FI} = \frac{\lambda_\rho \lambda^4}{\lambda_t^2}$$

b) Forces de pesanteur

La force de pesanteur agissant sur une particule de masse m est donné par :

$$P = mg$$

Le rapport des forces de pesanteur appliquées sur le modèle et le prototype est :

$$\frac{P_m}{P_n} = \frac{m_m g_m}{m_n g_n} \Rightarrow \lambda_{FP} = \lambda_m \lambda_g$$

Sachant que :

$$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda^3$$

Le rapport devient au final :

$$\lambda_{FP} = \lambda_\rho \lambda^3 \lambda_g$$

c) Forces de turbulence

La force tangentielle créée par la turbulence d'un écoulement est donnée comme suit :

$$F_T = \rho S \overline{uv}$$

ρ : Masse volumique du liquide.

S : Surface où se produit l'échange latéral de quantité de mouvement.

\overline{uv} : La moyenne du produit des fluctuations de la vitesse instantanée dans le sens longitudinal (u) et dans le sens transversal (v).

On calcule le rapport des forces de turbulence :

$$\lambda_{FT} = \frac{\rho_m S_m \overline{u_m v_m}}{\rho_n S_n \overline{u_n v_n}} = \lambda_\rho \lambda^2 \lambda_v^2 = \lambda_\rho \lambda^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_t}\right)^2 = \frac{\lambda_\rho \lambda^4}{\lambda_t^2}$$

Le résultat final est donc :

$$\lambda_{FT} = \frac{\lambda_\rho \lambda^4}{\lambda_t^2}$$

C'est la même expression que le rapport des forces d'inertie.

III. 2. 4. La similitude de Froude

Les forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur étant essentiellement les seules à intervenir, la condition de similitude impose que les trois rapports de force soient égaux :

$$\lambda_{FI} = \lambda_{FP} = \lambda_{FT}$$

On a déjà $\lambda_{FI} = \lambda_{FT}$ donc effectuons le développement mathématique suivant :

$$\frac{\lambda_\rho \lambda^4}{\lambda_t^2} = \lambda_\rho \lambda^3 \lambda_g$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_t^2} = \lambda_g$$

L'accélération de la pesanteur g est une constante universelle qu'on ne peut modifier sur le modèle, par conséquent $\lambda_g = 1$. On obtient donc :

$$\frac{\lambda}{\left(\frac{\lambda}{\lambda_v}\right)^2} = 1$$

$$\frac{\lambda_v^2}{\lambda} = 1 \Rightarrow \lambda = \lambda_v^2 \Rightarrow \sqrt{\lambda} = \lambda_v$$

Nous sommes donc arrivés à la conclusion que l'égalité des rapports des forces dominantes impose que le quotient des vitesses soit égal à la racine du quotient des longueurs.

$$\sqrt{\frac{L_n}{L_m}} = \frac{v_n}{v_m}$$

C'est la loi de similitude de **Froude** qui peut aussi être exprimée par :

$$\boxed{\frac{v_n}{\sqrt{gL_n}} = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} = F_R}$$

Vitesse et longueur en nature $\rightarrow v_n$ et L_n

Vitesse et longueur en modèle $\rightarrow v_m$ et L_m

Cette dernière condition, jointe avec les similitudes géométrique, cinématique, dynamique et avec l'hypothèse que le même liquide est utilisé en prototype qu'en modèle ($\lambda_\rho = 1$), permet d'établir les rapports pour toutes les grandeurs physiques caractéristiques :

Tableau III-1 : Rapports de similitude des différentes grandeurs physiques.

Grandeur	Rapport
Longueur	λ
Temps	$\lambda_t = \sqrt{\lambda}$
Vitesse	$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$
Accélération	$\lambda_a = 1$
Force	$\lambda_F = \lambda^3$
Volume	$\lambda_V = \lambda^3$
Débit	$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$

III. 3. Construction du modèle

L'étape suivante sera la conception du modèle réduit conformément aux lois de similitude avec lesquelles nous nous sommes familiarisés plus haut, tout en suivant les diverses normes qui nous permettront de conduire une simulation physique crédible.

III. 3. 1. Choix de l'échelle géométrique

L'échelle doit nous rapprocher autant que possible de la réalité. Pour cela, il faut que toutes les conditions hydrodynamiques pouvant avoir un impact sur l'aménagement côtier soient prises en considération et représentées d'une manière convenable.

Si elle est trop petite, il ne sera plus possible d'ignorer les forces de viscosité et la règle de similitude de Froude ne sera plus valable. Il est donc conseillé, afin d'éviter ces effets indésirables, d'adopter des profondeurs supérieures à 2 cm et de mener les essais avec des houles dont la hauteur minimale varie entre 2 et 5 cm et dont la période est entre 0,5 et 0,75 s. L'échelle dépend également du matériel disponible et des capacités du laboratoire. Compte tenu des dimensions du bassin, ceux des ouvrages et leur disposition, l'échelle choisie en première approche avec AutoCAD est de **1/50**.

Nous devons cependant nous assurer qu'elle vérifie les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \lambda < 3L_b \\ \frac{h_{max}}{\lambda} < 50 \\ 3l < X < 5l \end{cases}$$

La longueur du bassin : $L_b = 26$ mètres

La profondeur maximale dans le prototype : $h_{max} = 11$ mètres

La distance entre le batteur et le pied de l'ouvrage : $X = 490$ mètres

La longueur d'onde générée par le batteur : $l = 156$ mètres

Condition 1 —→ Vérifiée.

$$3L_b = 3(26) = 78 > 50$$

Condition 2 —→ Vérifiée.

$$\frac{h_{max}}{\lambda} = \frac{1100}{50} = 22 < 50$$

Condition 3 —→ Vérifiée.

$$\begin{cases} 3L = 3(156) = 468 \text{ mètres} \\ 5L = 5(156) = 780 \text{ mètres} \end{cases} \Rightarrow 3l < X = 490 \text{ mètres} < 5l$$

L'échelle choisie est donc bien valide.

III. 3. 2. Choix du matériau mobile

La couverture sédimentaire de la zone d'étude est constituée de sable fin ($100 \mu\text{m} < D_{50} < 250 \mu\text{m}$) et de sable moyen ($250 \mu\text{m} < D_{50} < 500 \mu\text{m}$).

Etant donné que le projet entier doit être exécuté dans un même bassin, nous ne pouvons pas avoir recours à une échelle distordue afin d'assurer la similitude des sédiments. En appliquant l'échelle de similitude géométrique (1/50), on obtient un matériau destiné à représenter le sable, mais tellement fin qu'il se transformerait au contact avec l'eau en vase ; un élément cohésif dont les propriétés physiques sont entièrement différentes de celles du sable. L'étude prend alors un aspect assez qualitatif. Afin de simuler le sable, il a été choisi un matériau de nature plastique, « le polychlorure de vinyle », connu sous l'acronyme « **PVC** ». Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Diamètre : $400 \mu\text{m} < D_{50} < 500 \mu\text{m}$
- Masse volumique : $1,38 \text{ t/m}^3$



Photo III.1 : Le PVC (photo prise au LEM).

III. 3. 3. Construction des fonds

Les fonds du modèle ont été construits conformément au plan représentant la bathymétrie de la zone d'étude, établi suite au levé effectué par l'équipe de reconnaissance sur site du LEM en 2019.

Les fonds sont composés d'une partie mobile et d'une partie fixe :

- **Partie mobile**

Située entre la côte, y compris la plage, et -7,00 m de profondeur. C'est une couche mobile d'une épaisseur de 2,50 m, constituée du matériau mobile (PVC) analogue au sable de mer. Elle repose sur une base fixe.

- **Partie fixe**

Elle couvre la surface comprise entre -7,00 et -11,00 m de profondeur. Cette partie a été construite avec du sable fini par une couche de ciment lissé afin d'économiser le matériau mobile utilisé. En effet, la dynamique sédimentaire étant principalement active près de la côte, il n'est pas nécessaire de transformer toute la superficie du bassin en un fond mobile.



Photo III.2 : Construction des fonds du modèle réduit.

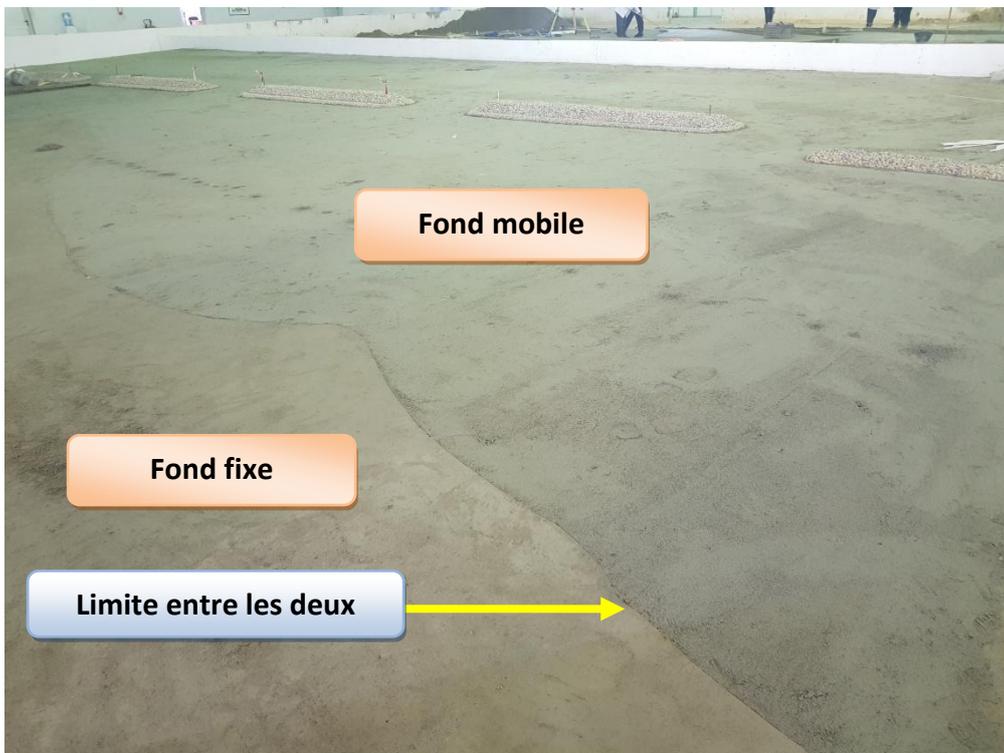


Photo III.3 : Les fonds à l'état final.

III. 3. 4. Densité de l'eau

L'eau utilisée lors des essais est douce ($\rho_{douce} = 1000 \text{ kg/m}^3$) tandis qu'elle est salée en réalité, et par conséquent plus dense ($\rho_{mer} = 1028 \text{ kg/m}^3$). La masse volumique de l'eau influe directement sur les forces d'inertie, proportionnelles aux volumes et aux accélérations, ainsi que sur les poussées d'Archimède. Ce paramètre intervient aussi sur la stabilité du modèle et du prototype suivant une relation empirique, la formule d'**Hudson**, vue dans le chapitre précédent.

$$W = \frac{\rho_s * H_s^3}{K_d * \left(\frac{\rho_s}{\rho_\omega} - 1\right)^3 * \text{Cotg } \alpha}$$

Pour compenser la distorsion qu'entraîne l'utilisation de l'eau douce dans le modèle réduit, il suffit d'adopter pour les blocs miniatures du modèle, un matériau de densité inférieure à celle des blocs du prototype de manière à ce que le terme $\left(\frac{\rho_s}{\rho_\omega} - 1\right)$ reste constant.

Ainsi, la masse volumique du matériau à utiliser pour simuler les blocs artificiels de béton ($\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$) est :

$$\rho_{bloc} = \frac{\rho_{douce} \rho_b}{\rho_{mer}} = \frac{1000 (2400)}{1028} = 2341 \text{ kg/m}^3$$

Pour les enrochements naturels, un facteur de correction égal à 0,87 intervient sur leur poids.



Photo III.4 : Les enrochements utilisés au LEM.

III. 3. 5. Construction des brise-lames

Les matériaux employés pour la construction des brise-lames sont sélectionnés en fonction de leur poids et leur taille. Les caractéristiques de ceux qui ont été utilisés sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-2 : Caractéristiques des enrochements du brise-lame en prototype et en modèle.

	Caractéristiques en prototype		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité	Poids (g)	Densité
Enrochements	0,5 – 1	2,650	3,48 – 6,96	2,650
	2 – 5		13,9 – 34,8	

Le nombre de bloc d'enrochements nécessaire pour couvrir une surface A est donné par la relation suivante :

$$N_r = A n K (1 - e) V^{-2/3}$$

A : Surface en cm².

n : Nombre de rangées.

K : Coefficient de couche dépendant de la forme du matériau.

V : Volume de l'enrochement en modèle (cm³).

e : L'indice des vides.

Application sur la carapace du brise-lame

Sachant que pour les enrochements :

- K = 1,15.
- P = 35%

On obtient les résultats suivants :

Tableau III-3 : Estimation du nombre d'enrochements de la carapace.

A	n	K	P	V	N _r
6160	2	1,15	0,35	0,11	2100

La carapace nécessite donc de placer 2100 petits enrochements afin de la représenter sur le modèle.

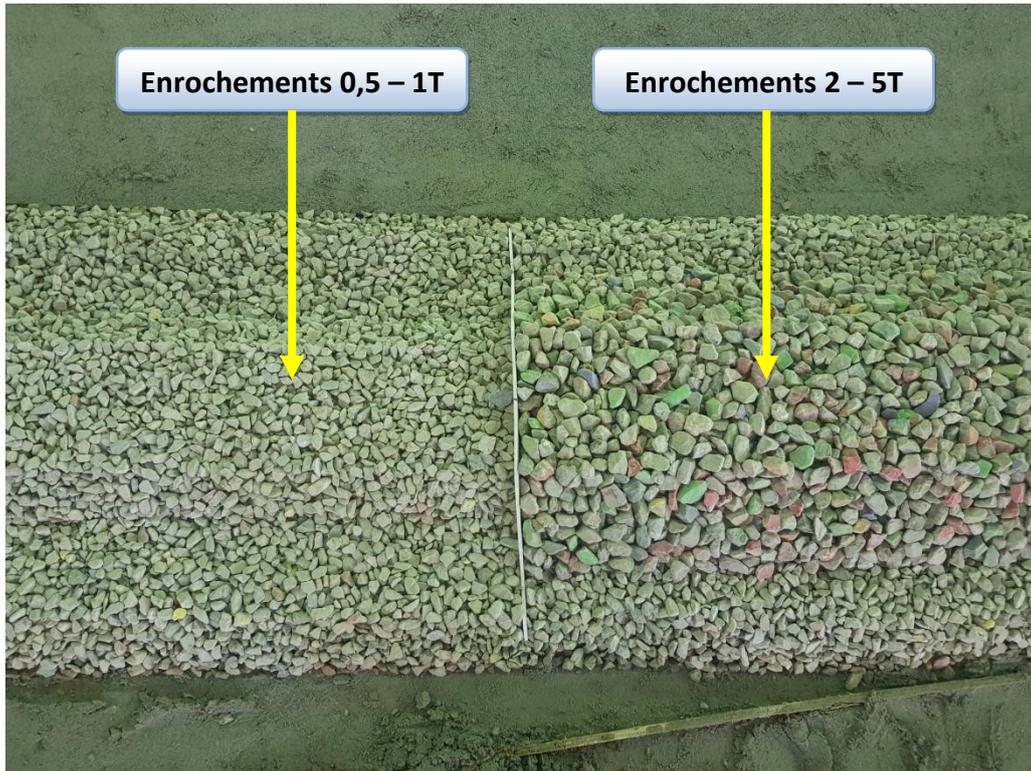


Photo III.5 : Modèle du brise-lame en cours de construction.

III. 4. Déroulement des essais

III. 4. 1. Cadre des essais

Les essais se sont déroulés dans le bassin à houle n°3 du centre d'essais sur modèle (CEM) du Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM). Exceptionnellement, ce bassin a été conçu à l'intérieur d'un grand hall dont les dimensions sont les suivantes :

- Longueur : 26,00 mètres.
- Largeur 16,00 mètres.
- Profondeur : 1,00 mètre.

III. 4. 2. Hypothèses des essais

En hydraulique maritime, les deux principaux phénomènes à prendre en considération sont la marée et la houle. Etant donné que notre zone d'étude est située sur une côte algérienne, seule l'action de la houle sera prise en considération, du au faible marnage de la marée dans la mer méditerranée. Ce dernier est rendu complètement insignifiant sur une échelle de 1/50.

Les problèmes liés à la propagation de la houle, qui sont étudiés sur le modèle réduit, sont surtout ceux liés à la réfraction et à la diffraction.

III. 4. 3. Génération de la houle

La houle exercée sur le modèle réduit est créée par un batteur fonctionnant dans un plan horizontal, dont le fonctionnement est semblable à celui d'un piston.

Le déplacement du volet est assuré par un vérin, actionné à son tour par un groupe de puissance hydraulique à 110 bars. Le tout est piloté par un générateur électronique qui est lié par ordinateur à un logiciel informatique (Wavegen). Ce dernier convertit un train de houle réel observé en nature en un train de houle en modèle.

Dans le cas d'une houle aléatoire (utilisée pour la globalité de cette étude), le signal généré est réellement aléatoire, selon une durée de tempête fixée au préalable.

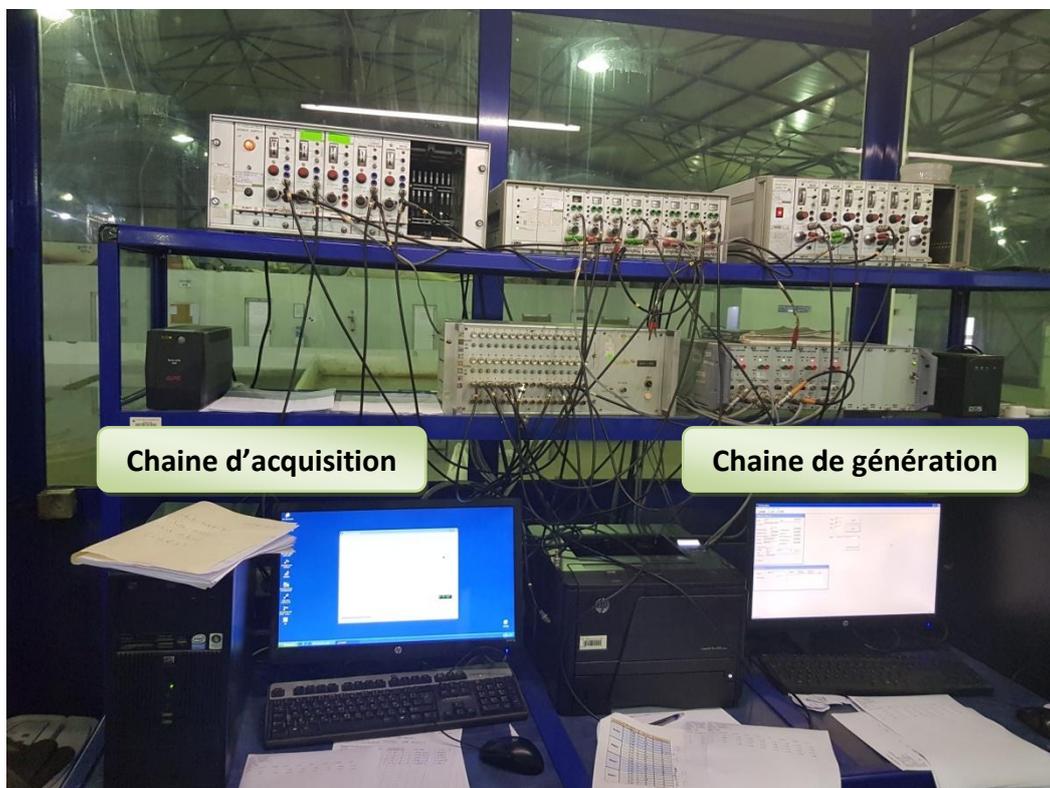


Photo III.6 : A l'intérieur de la cabine de commande des essais.

III. 4. 4. Méthodes et matériel de mesure

Les essais sont pilotés et supervisés au sein d'une cabine située au centre du hangar d'essais. On y trouve deux systèmes informatiques qui assurent séparément les opérations de génération et d'acquisition.

L'acquisition des données de houle est assurée au niveau du bassin par des capteurs appelés « sondes de houle », basés sur le principe de la conductance électrique entre deux électrodes.

Les signaux de houles sont enregistrés de manière continue et analysés par une chaîne de mesure informatisée.

Afin d'interpréter les résultats obtenus, les définitions suivantes ont été établies :

- **Hauteur significative (H_s)**

Elle est définie comme la moyenne du tiers des vagues les plus hautes dans un train de houle.

- **Hauteur moyenne (H_m)**

Elle correspond à la moyenne de toutes les vagues enregistrées dans un train de houle.

- **Période de pointe (T_p)**

C'est la période qui correspond à la plus grande densité d'énergie spectrale.

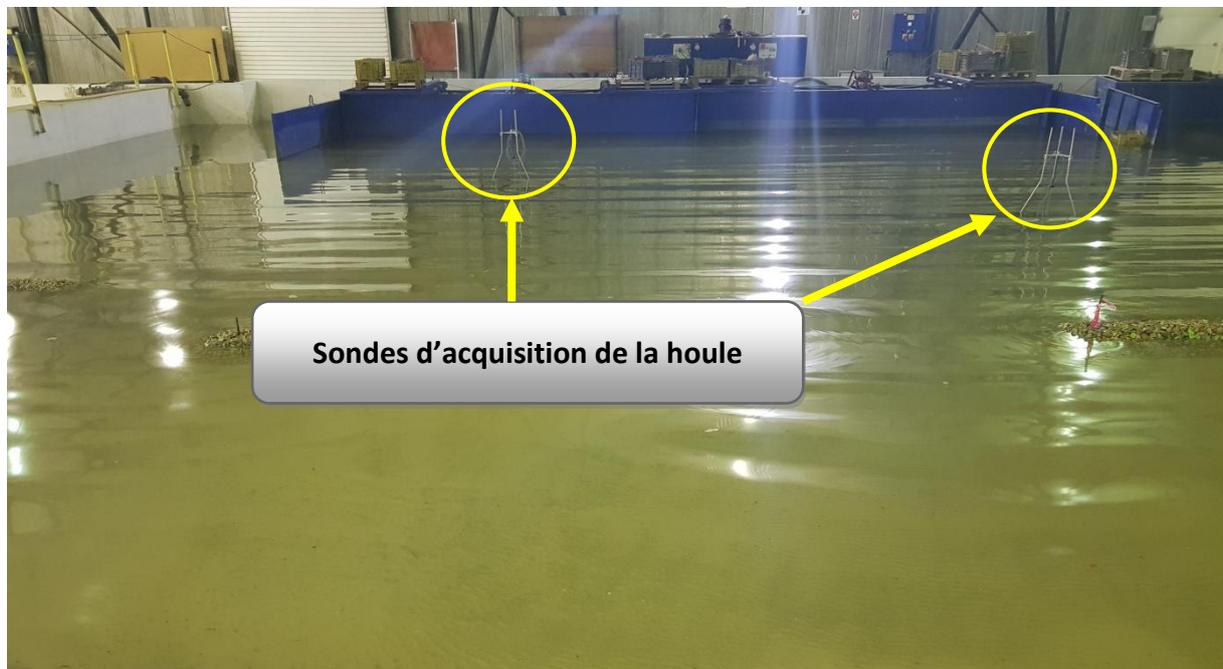


Photo III.7 : Les sondes ou capteurs de houle.

III. 4. 5. Observations effectuées et moyens mis en œuvre

Au cours de chaque essai, nous prêtons une attention particulière au mode d'attaque de la houle. Pour chaque configuration, il sera noté:

- Les franchissements : nature, localisation, importance.
- Les déferlements.

Pour préserver ces observations et pouvoir les exploiter plus tard, trois types de support de sont utilisés. L'emploi de ces modes d'observation permet une analyse objective et plus approfondie de la simulation.

- **Support écrit**

Lors du déroulement des essais, les observations sont inscrites au fur et à mesure sur papier (un cahier par exemple), permettant ainsi d'y ajouter des commentaires si nécessaire.

- **Support photographique**

Pendant la durée de tout l'essai, multiples photos sont prises permettant ainsi de comparer les dégâts résultants de chaque essai (lors des études de stabilité) et de capturer des événements exceptionnels ou inattendus.

- **Appareil topographique – Laser 3D**

Le laser permet de faire un scan des fonds du modèle et d'obtenir sa bathymétrie actuelle. Il est généralement effectué un levé avant les essais et un deuxième après les essais afin de voir l'évolution qui s'est produite entre ces deux états.

- **Support vidéo**

Un enregistrement vidéo est souvent effectué afin de pouvoir visualiser de manière effective et plus réaliste le mode d'attaque de la houle sur les ouvrages.



Photo III.8 : Le laser 3D.

III. 5. Conditions de houles

Pour les besoins de l'étude sur modèle réduit, il a été effectué, au préalable, une étude de réfraction. Celle-ci a fait ressortir les caractéristiques de la houle selon les directions de provenance prédominantes qui parviennent au site depuis le large.

Le tableau suivant montre l'amplitude (en mètres) de la houle réfractée à une profondeur de -7.00 mètres, selon sa période de retour et sa direction.

Tableau III-4 : Statistiques de la houle à -7.00 mètres de profondeur.

Période de retour	H _s		
	N20°	N45°	N60°
1 an	3,00	3,05	2,88
5 ans	3,17	3,20	3,08
10 ans	3,21	3,23	3,12
20 ans	3,28	3,33	3,20
50 ans	3,29	3,33	3,23

Pour les essais sédimentologiques, uniquement les houles annuelles provenant des directions Nord 45° et Nord 60°, dont les caractéristiques sont résumées ci-dessous, sont générées car ce sont les plus fréquentes et ont la plus grande influence sur la dynamique sédimentaire. En effet, les houles Nord 20° n'ont pas d'impact sur le site, les courants générés par celles-ci sont très faibles et le transport des sédiments est quasi-inexistant.

Tableau III-5 : Caractéristiques des houles annuelles concernées par l'étude sédimentologique.

Direction de la houle	Période (s)	H _s à -7,00 m
Nord 45°	6	0,96
	8	2,26
	10	3,15
Nord 60°	6	0,93
	8	2,17
	10	3,31

➤ **Détermination du cycle de houle annuel**

En essayant de reproduire la dynamique exacte qui se produit en nature, on définit un cycle de houle dans lequel chaque direction de provenance possède un temps d'action précis qui reflète la fréquence d'apparition de chacune d'entre elles. Ce cycle vaut 120 minutes et représente sur le modèle l'équivalent d'une année moyenne dans la réalité.

Le cycle annuel de houle est décrit par le tableau suivant :

Tableau III-6 : La répartition temporelle du cycle annuel selon la direction et la période (s).

Direction	H _s (m) à -7.00 m	Période (s)	Temps (min)
N45°	0,96	6	7
	2,26	8	7
	3,15	10	3
	2,26	8	6
	0,96	6	7
N60°	0,93	6	7
	2,17	8	7
	3,31	10	7
	2,17	8	3
	0,93	6	6
N45°	0,96	6	7
	2,26	8	7
	3,15	10	3
	2,26	8	6
	0,96	6	7
N60°	0,93	6	7
	2,17	8	7
	3,31	10	3
	2,17	8	6
	0,93	6	7

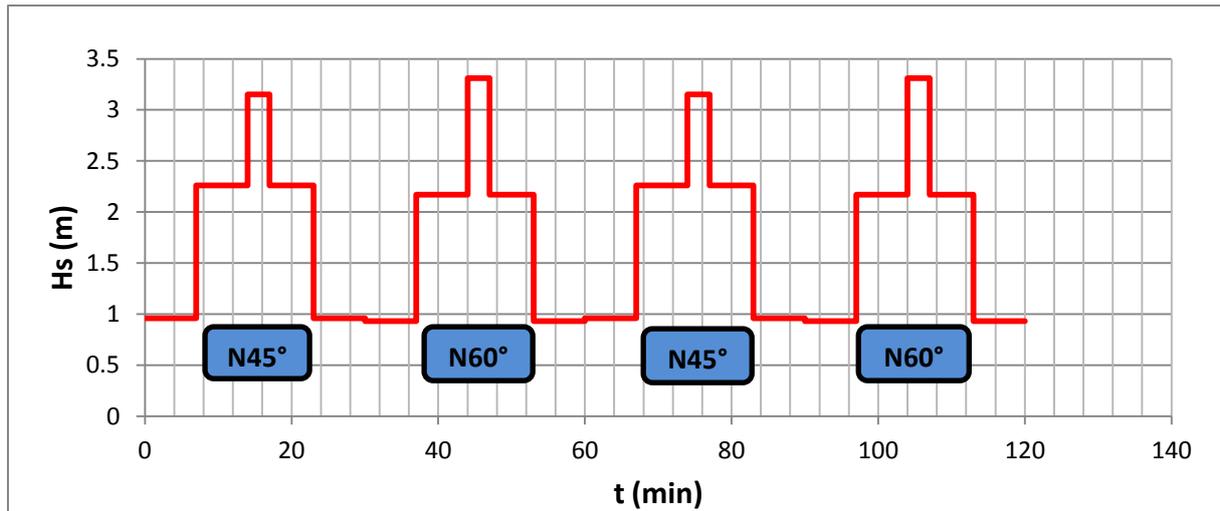


Figure III.1 : Représentation graphique du cycle de houle.

III. 6. Essais sédimentologiques

III. 6. 1. Calibration sédimentologique

La calibration ou bien le « réglage hydraulique » du modèle est une opération essentielle qui précède chaque série d'essais. Elle permet à la fois de mettre au point l'appareillage et d'ajuster les conditions expérimentales de façon à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques soient simulés de manière conforme à la nature.

III. 6. 1. 1. Déroulement

L'approche usuelle pour effectuer la calibration sédimentologique est de démarrer à partir d'une bathymétrie X et tenter d'aboutir une bathymétrie Y plus récente, après un certain nombre de cycles. En l'absence de levés sédimentologiques du site d'étude antérieurs à celui de 2019, on se contente d'effectuer une appréciation qualitative de la tendance évolutive des fonds. Autrement dit, on essaye d'obtenir une tendance d'évolution future des fonds qui soit similaire à l'évolution passée qu'a connu le site, à savoir :

- Erosion sur les petits fonds.
- Recul du trait de côte.

Comme il a été déjà cité plus haut, les fonds ont été construits sur l'appui d'un levé bathymétrique qui a été réalisé en 2019. Celui-ci est considéré comme l'état initial (**T0**) pour les essais de calibration sédimentologique.

A partir de cet état initial, une première série d'essais est effectuée pour tenter de reproduire les phénomènes sédimentologiques observés en nature. Dans notre cas, il s'agit d'obtenir un recul du trait de côte. A la fin du premier cycle, un levé bathymétrique est réalisé grâce au laser 3D pour évaluer la tendance d'évolution des fonds.



Photo III.9 : Houles de la direction Nord 60°.

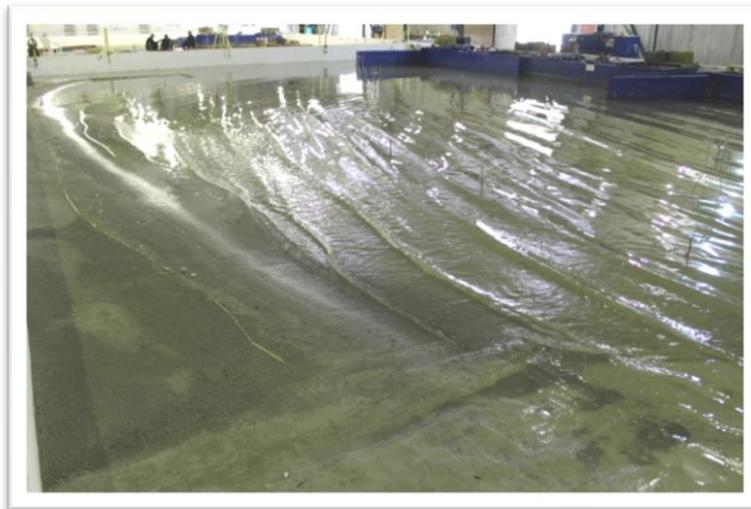


Photo III.10 : Houles de la direction Nord 45°.

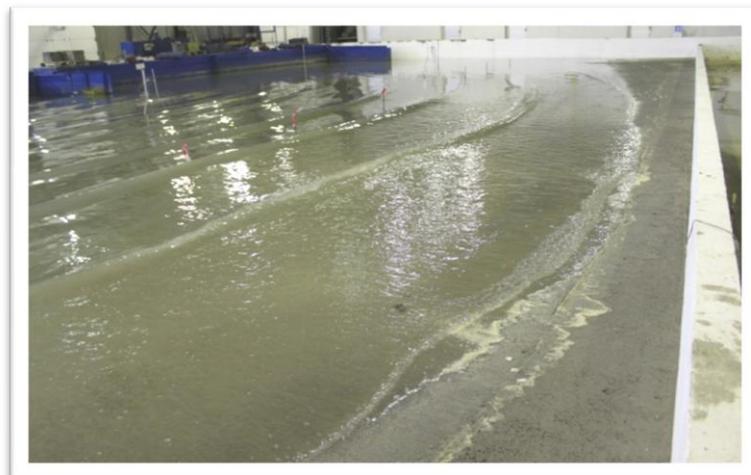


Photo III.11 : Houles de la direction Nord 60° (vues d'un autre angle).

III. 6. 1. 2. Résultats des essais de calibration sédimentologique

L'analyse du levé bathymétrique représentant l'état T1 (obtenu après 01 cycle de houles) a permis de dégager les premières tendances d'évolution des fonds. On a notamment retrouvé :

- Une érosion sur les petits fonds, entre 0 et -5 m N.G.A. Cependant, on a constaté un léger engraissement à l'est de l'épi en T.
- Un recul d'environ 8 mètres du trait de côte.

La calibration ayant été jugée satisfaisante, les ouvrages de protection de la plage du club hippique contre l'érosion peuvent maintenant être mis à l'épreuve.

Figure III.2: Levé initial T0

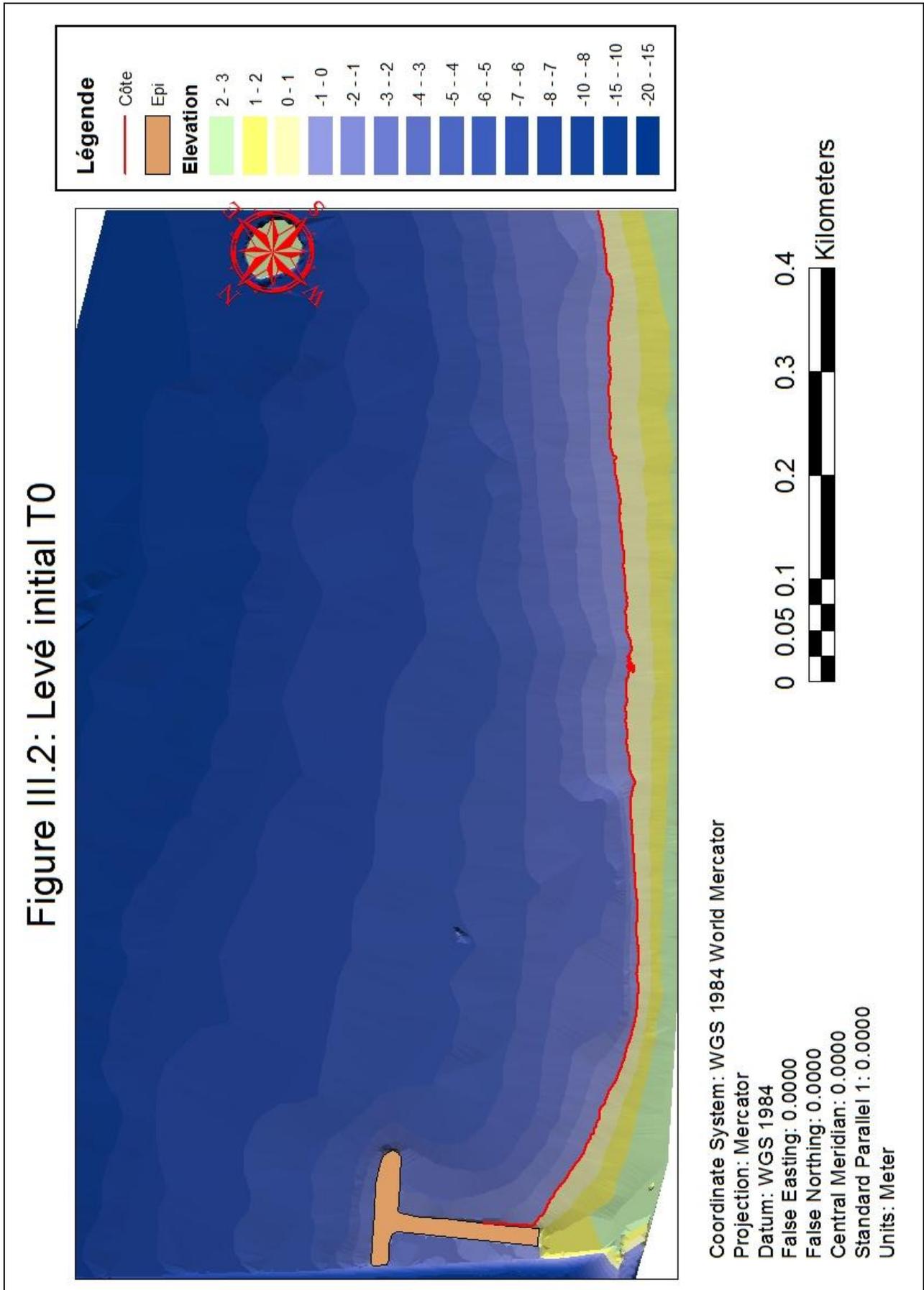
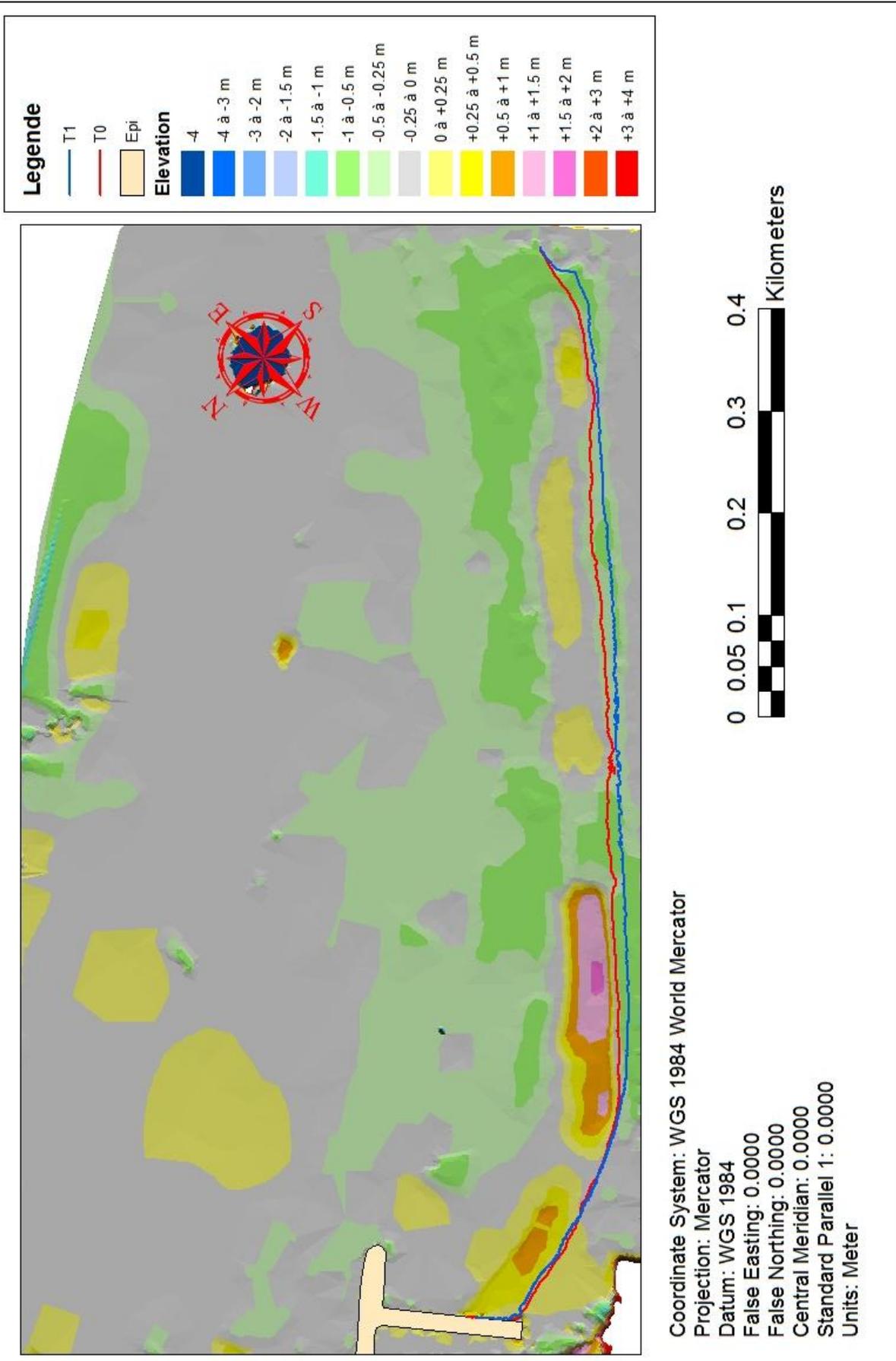


Figure III.3: Evolution des fonds entre T1 et T0



III. 6. 2. Essais sédimentologiques sur la solution

Le modèle maintenant calibré, nous pouvons maintenant procéder à une seconde série d'essais, celle-ci aura pour but de déterminer l'efficacité de la solution vis-à-vis du problème d'érosion de la plage.

III. 6. 2. 1. Déroulement

Avant de démarrer les essais, un nouveau nivellement des fonds mobiles a été effectué conformément à la bathymétrie datant de 2019 pour retourner à l'état initial. Les 4 brise-lames ont ensuite été mis en place et un levé T0 été effectué.

Un premier cycle de houles a été générée, suivi d'un levé T1.

Ensuite, deux (02) autres cycles sont produits et un levé final des fonds (T3) est réalisé.

III. 6. 2. 2. Résultats

L'analyse des levés T1 et T3 une fois traités par S.I.G (MapInfo puis ArcGIS) permet de tirer les observations ci-dessous.

Suite au premier cycle, du sable s'est accumulé derrière les brise-lames.

Après le 3^{ème} cycle, il a été constaté :

- Un dépôt sédimentaire en forme de tombolo derrière les brise-lames.
- Une érosion au niveau des petits fonds près des extrémités des brise-lames, ceci est du à la diffraction de la houle et à l'accélération des courants créée par le rétrécissement de la zone de passage de la mer. Les houles diffractées par les musoirs du brise-lames transportent alors les sédiments du pied de l'ouvrage vers la zone centrale qui le sépare de la plage.
- Une érosion importante au niveau de la plage, face à l'espacement entre les deux brise-lames côté ouest (BL1 et BL2).
- Un avancement du trait de côte.

III. 6. 2. 3. Conclusion

La solution d'implantation des brise-lames a montré des résultats positifs en termes de stabilité de la plage et d'engraissement du trait de côte, néanmoins elle requiert des modifications afin de remédier à l'érosion observée entre les brise-lames BL1 et BL2 au niveau de la plage.



Photo III.12 : Photo des brise-lames avant le démarrage des essais.

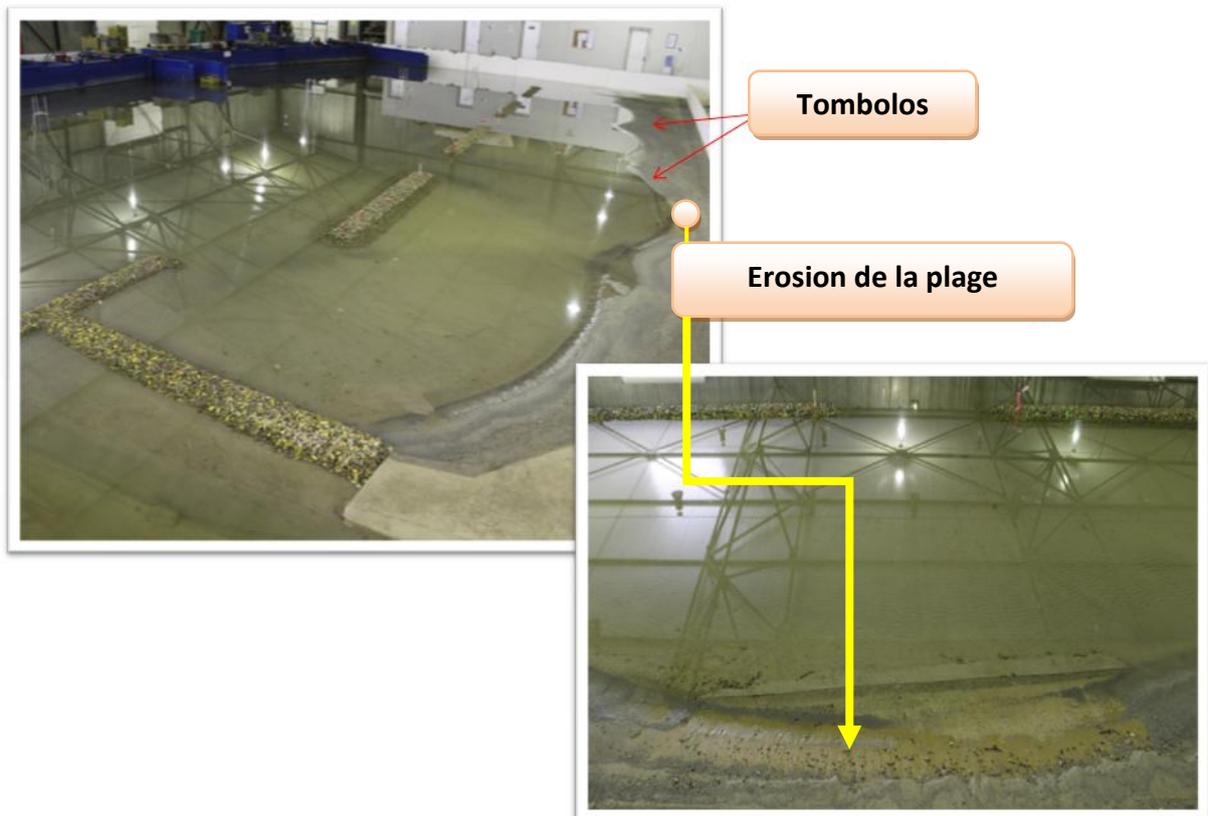


Photo III.13 : Les résultats obtenus après le cycle 3.

Figure III.4: Levé initial T0 (avec solution)

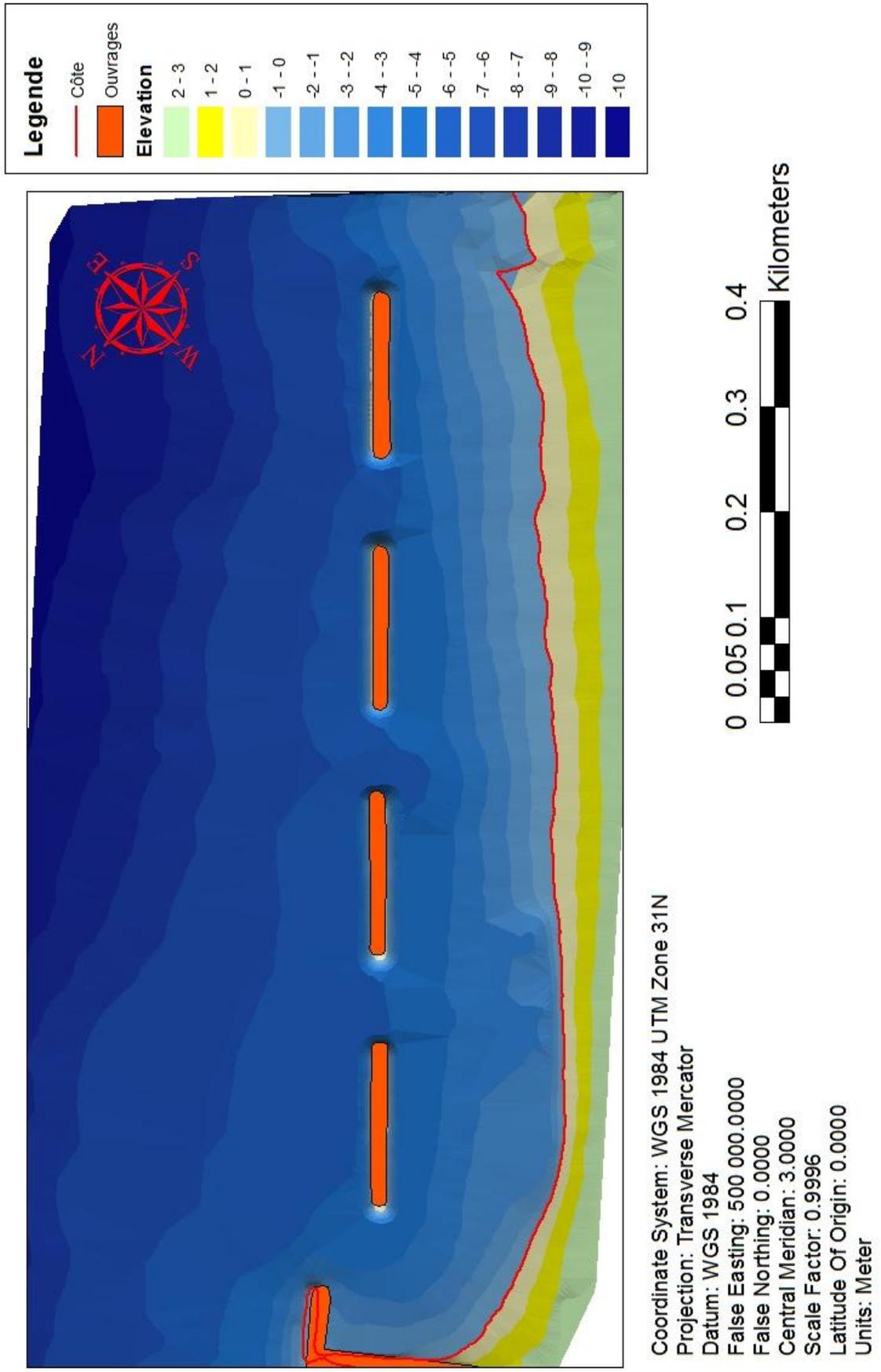


Figure III.5: Evolution entre T1 et T0 (avec solution)

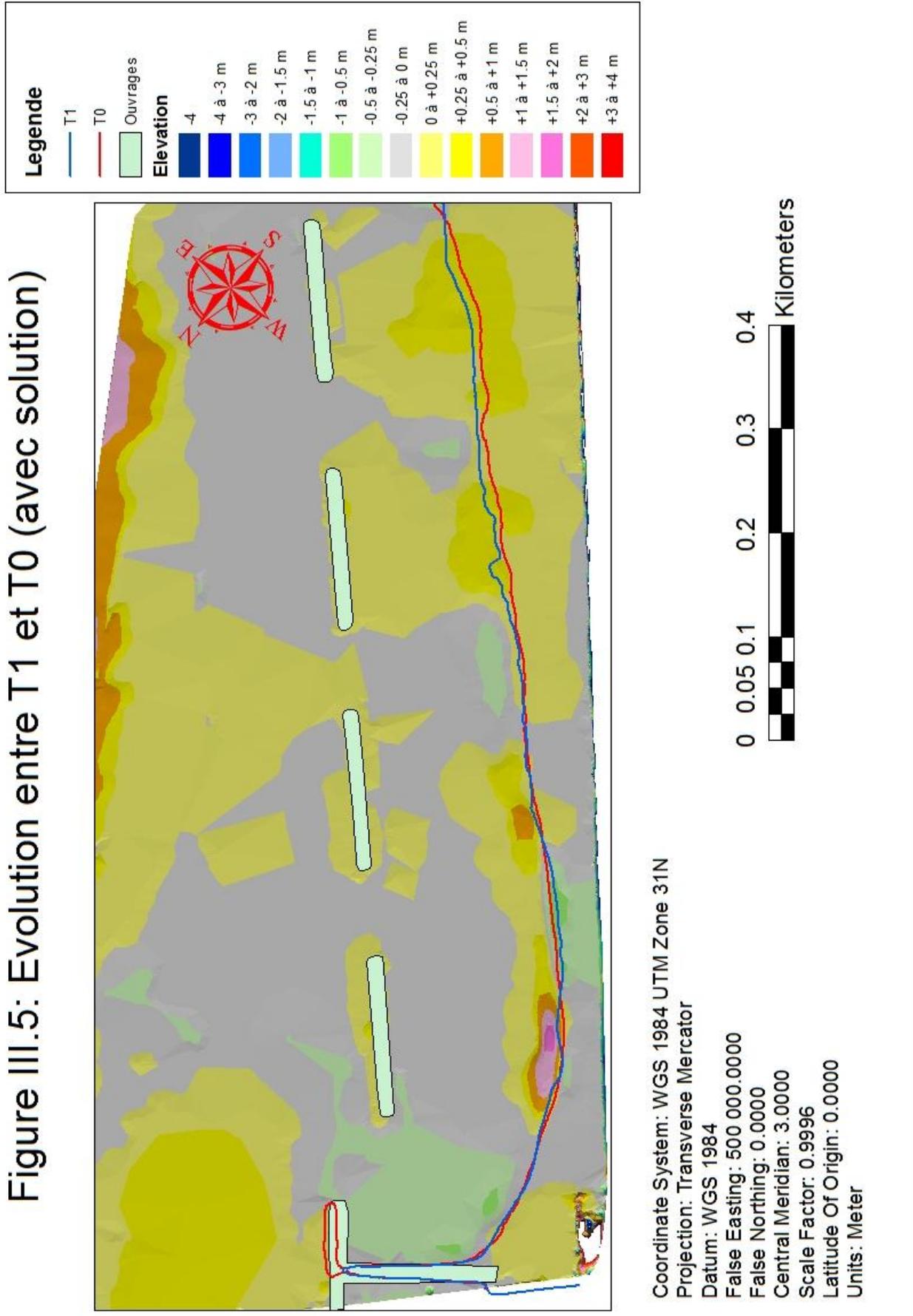


Figure III.6: Levé bathymétrique T3

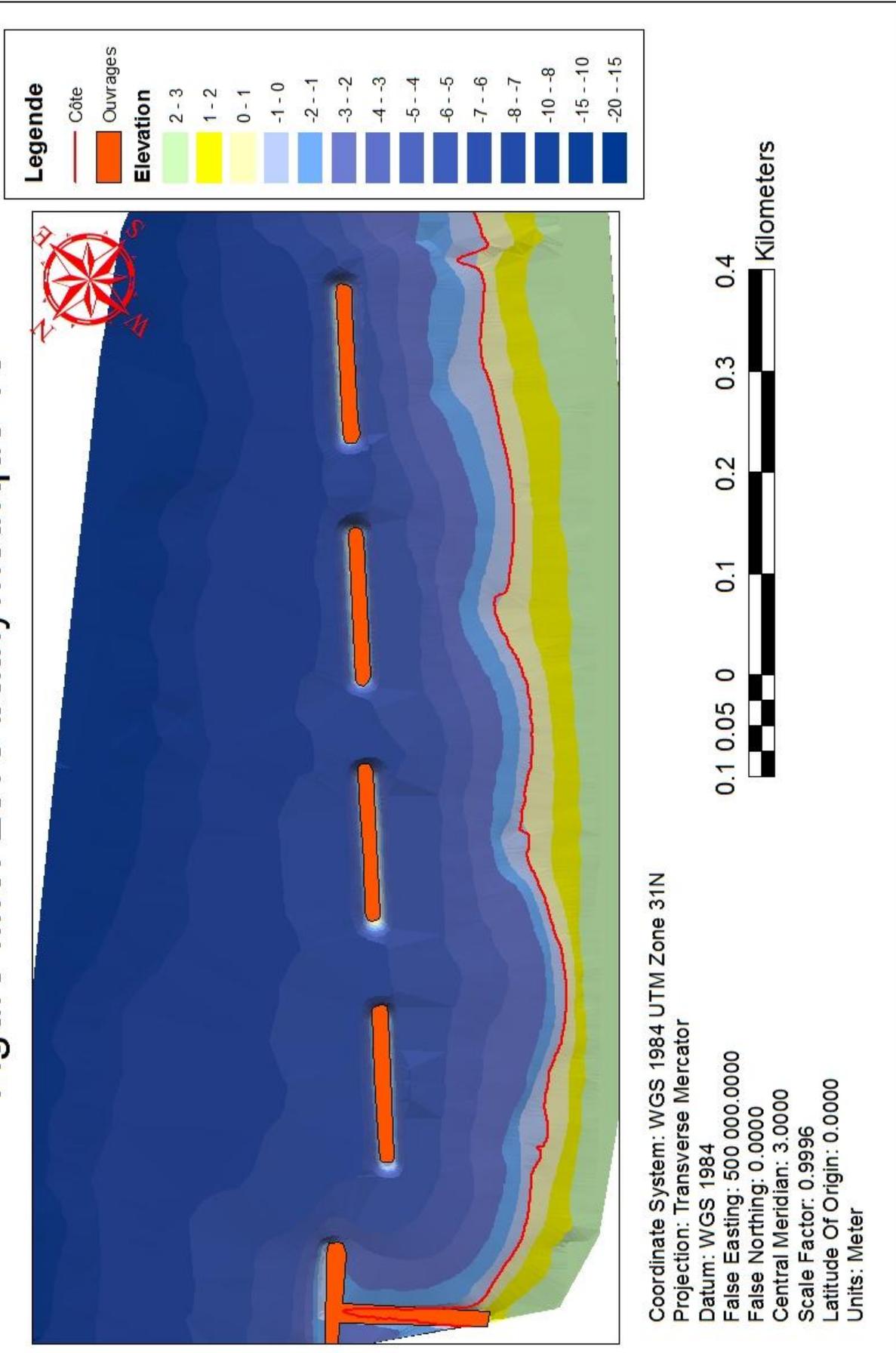
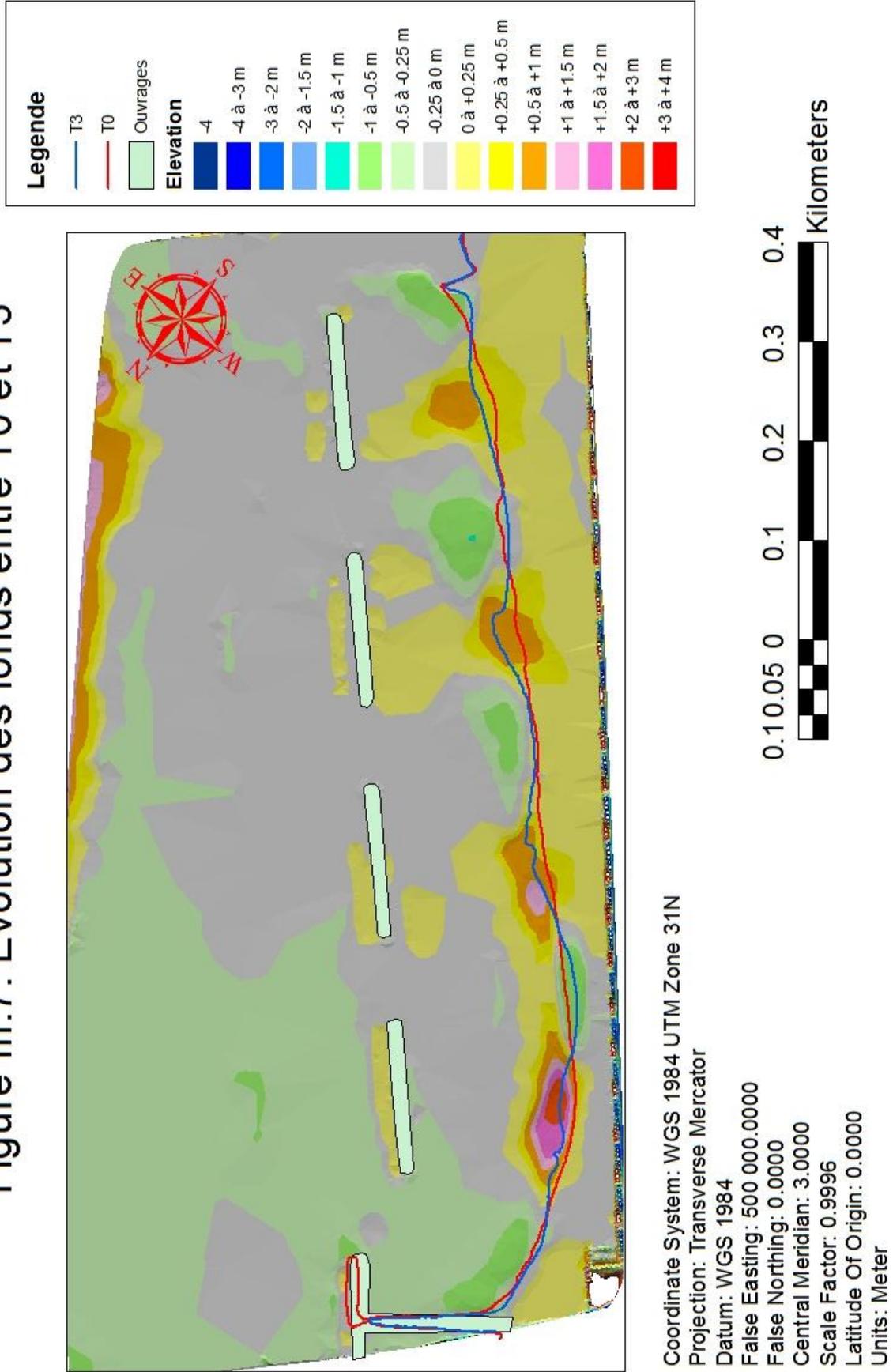


Figure III.7: Evolution des fonds entre T0 et T3



III. 6. 3. Essais sédimentologiques sur la variante 2

Pour résoudre le problème d'érosion constaté au niveau de la plage face à l'espacement entre les deux brise-lames BL1 et BL2, une modification a été faite en raccourcissant l'espacement entre ces deux derniers. Ceci se traduit par un prolongement de 10 mètres dans leur longueur.

Après la génération d'un cycle de houle, un levé T4 a été effectué.

L'évolution des fonds après ce 4^{ème} cycle montre que l'érosion dans la zone entre les brise-lames a seulement légèrement diminué. Une autre modification doit donc être apportée à cette variante.

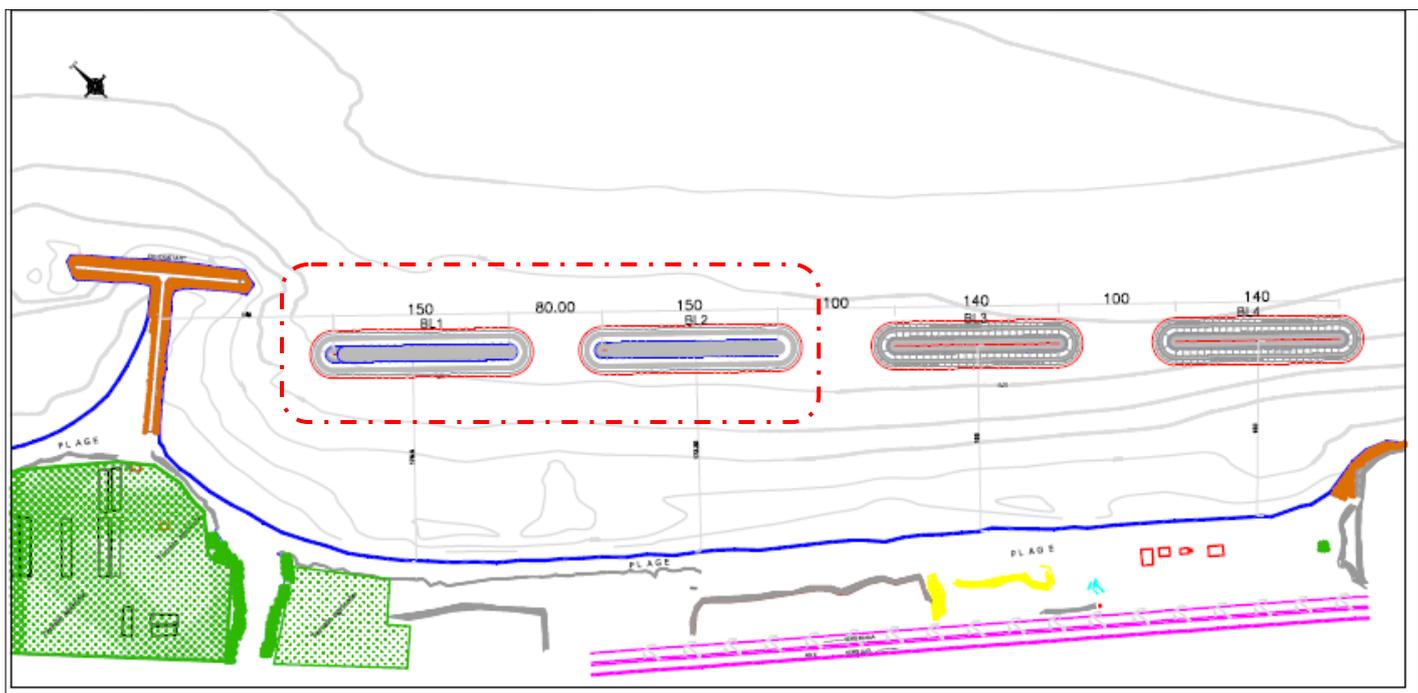


Figure III.8 : Plan masse de la variante 2.
Echelle : 1/5000.



Photo III.14 : Essais du cycle 4 : houles de la direction N60°.



Photo III.15 : Vue de la plage après le cycle 4.



Photo III.16 : L'érosion de la plage persiste au même endroit.

Figure III.9: Levé bathymétrique T4

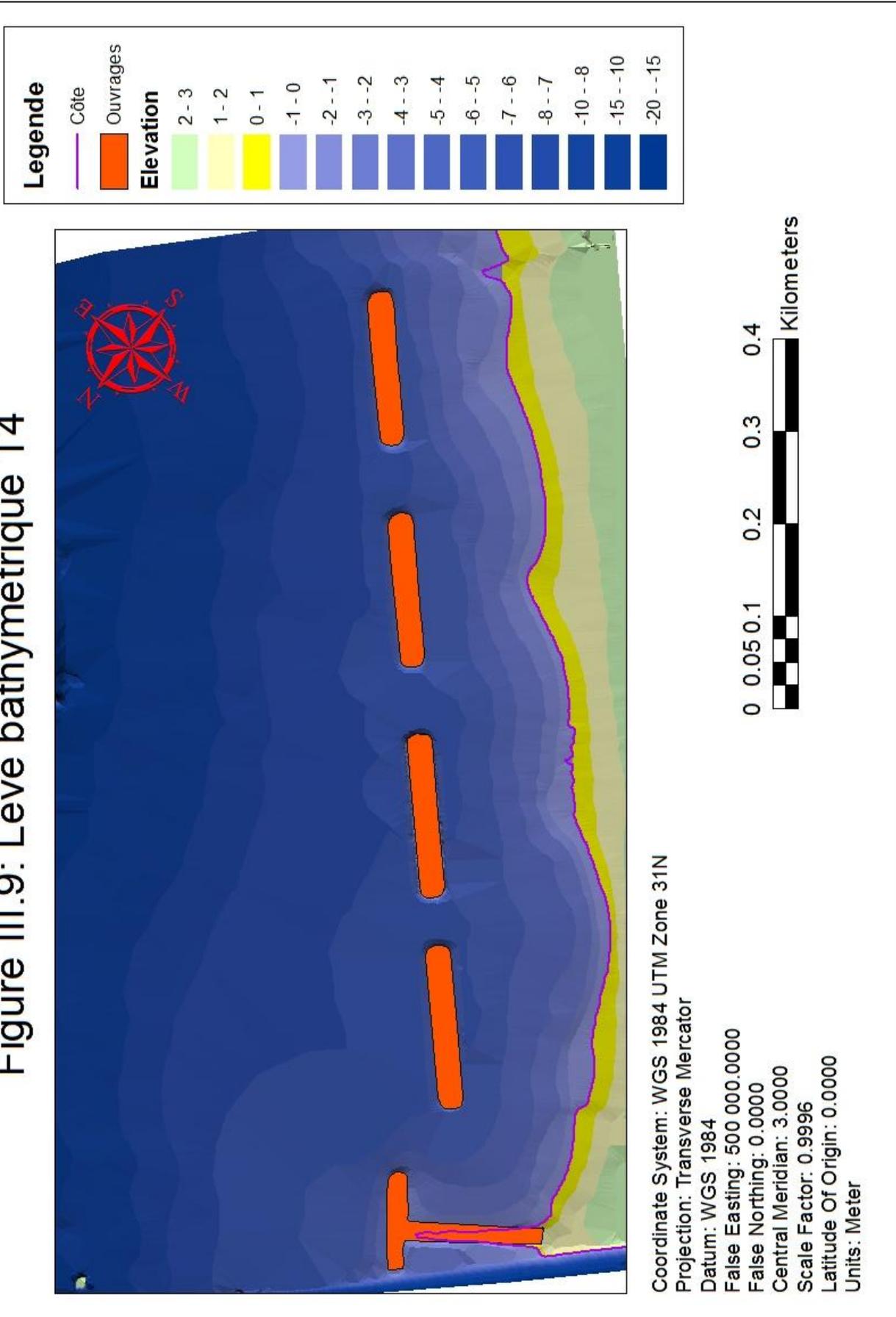
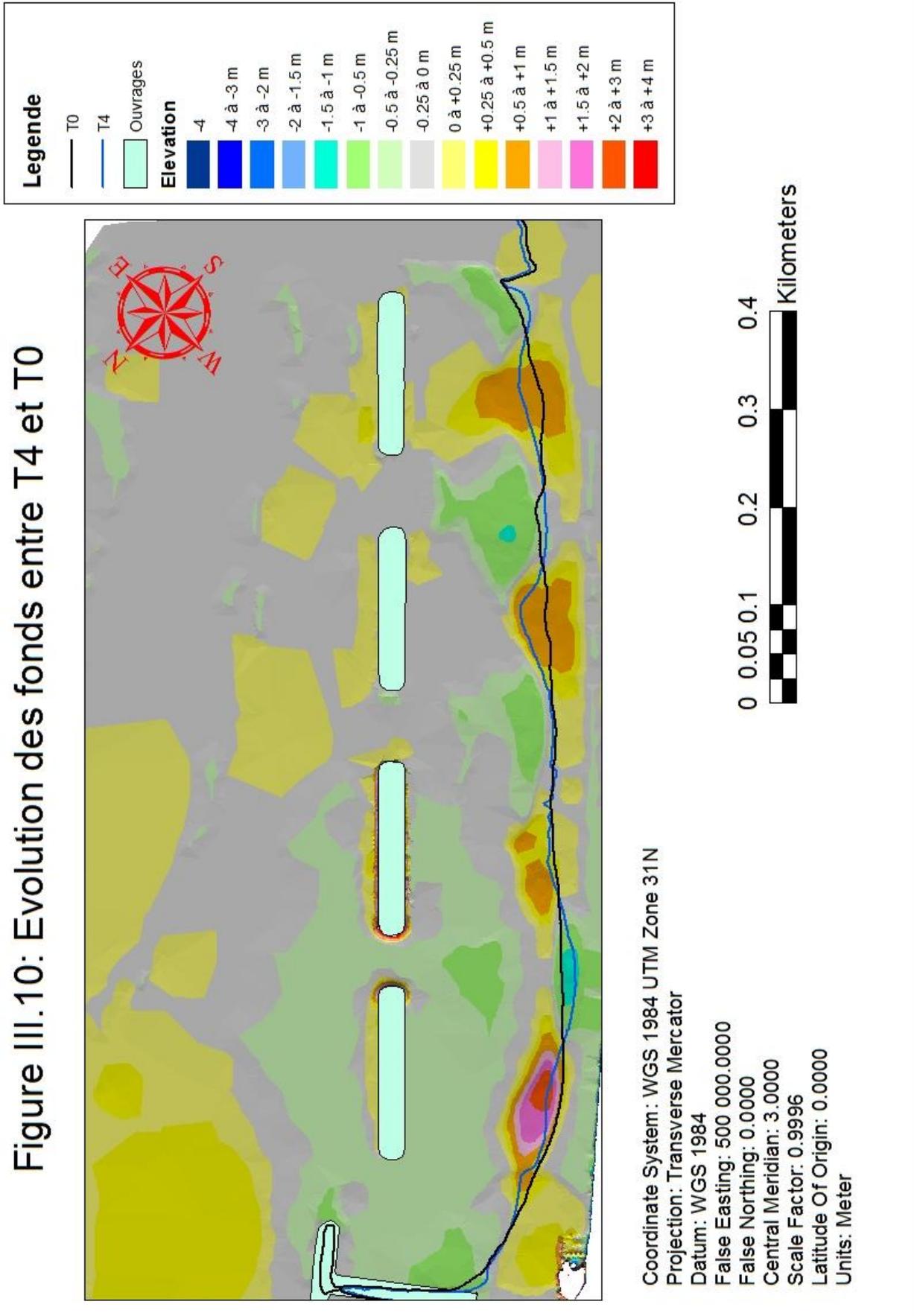


Figure III.10: Evolution des fonds entre T4 et T0



III. 6. 4. Essais sédimentologiques sur la variante 3

Pour mieux protéger la zone située face à l'espacement entre les deux brise-lames côté ouest, un autre prolongement de 10 mètres a été effectué, portant ainsi le prolongement total à 20 mètres pour chacun des deux brise-lames.

Une 5^{ème} série d'essais a été menée, suivie par un levé T5.

L'analyse de l'évolution des fonds après le 5^{ème} cycle de houle a fait ressortir les constatations suivantes :

- Progression importante du trait de côte.
- Engraissement des tombolos derrière les brise-lames.
- L'érosion face aux deux brise-lames BL1 et BL2 a nettement diminué.

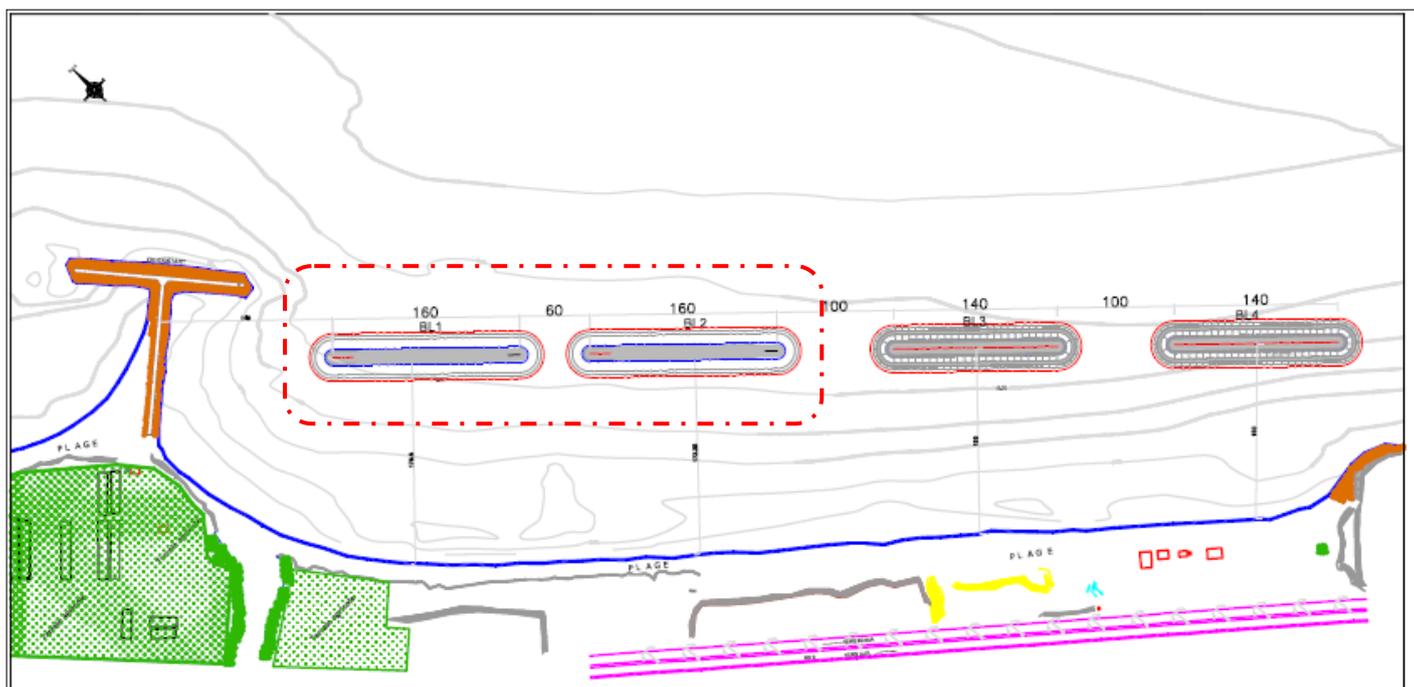


Figure III.11 : Plan masse de la variante 3.
Echelle : 1/5000.

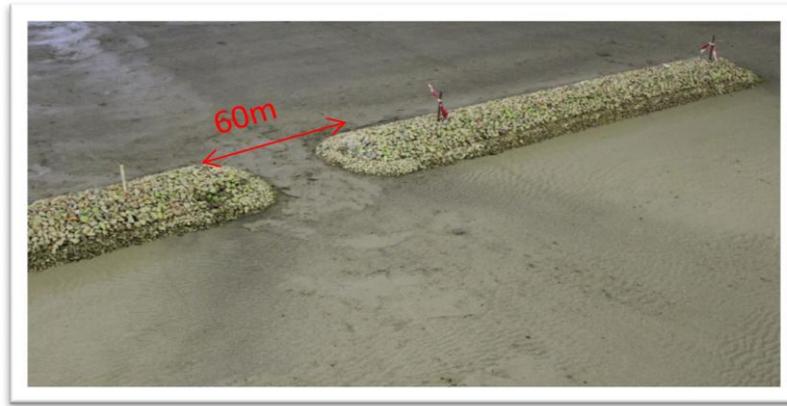


Photo III.17 : Photo de la variante n°3 avant les essais.

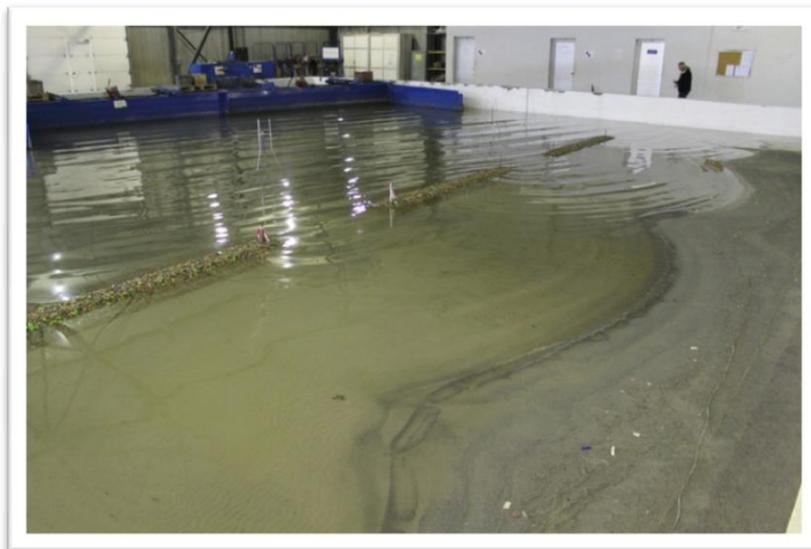


Photo III.18 : Essais du cycle 5 : houle de la direction N60°.

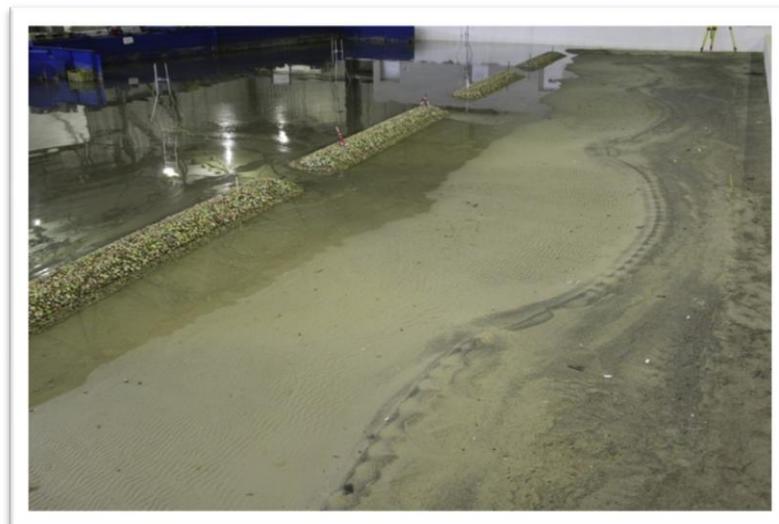


Photo III.19 : Vue de la plage après le cycle 5.

Figure III.12: Levé bathymétrique T5

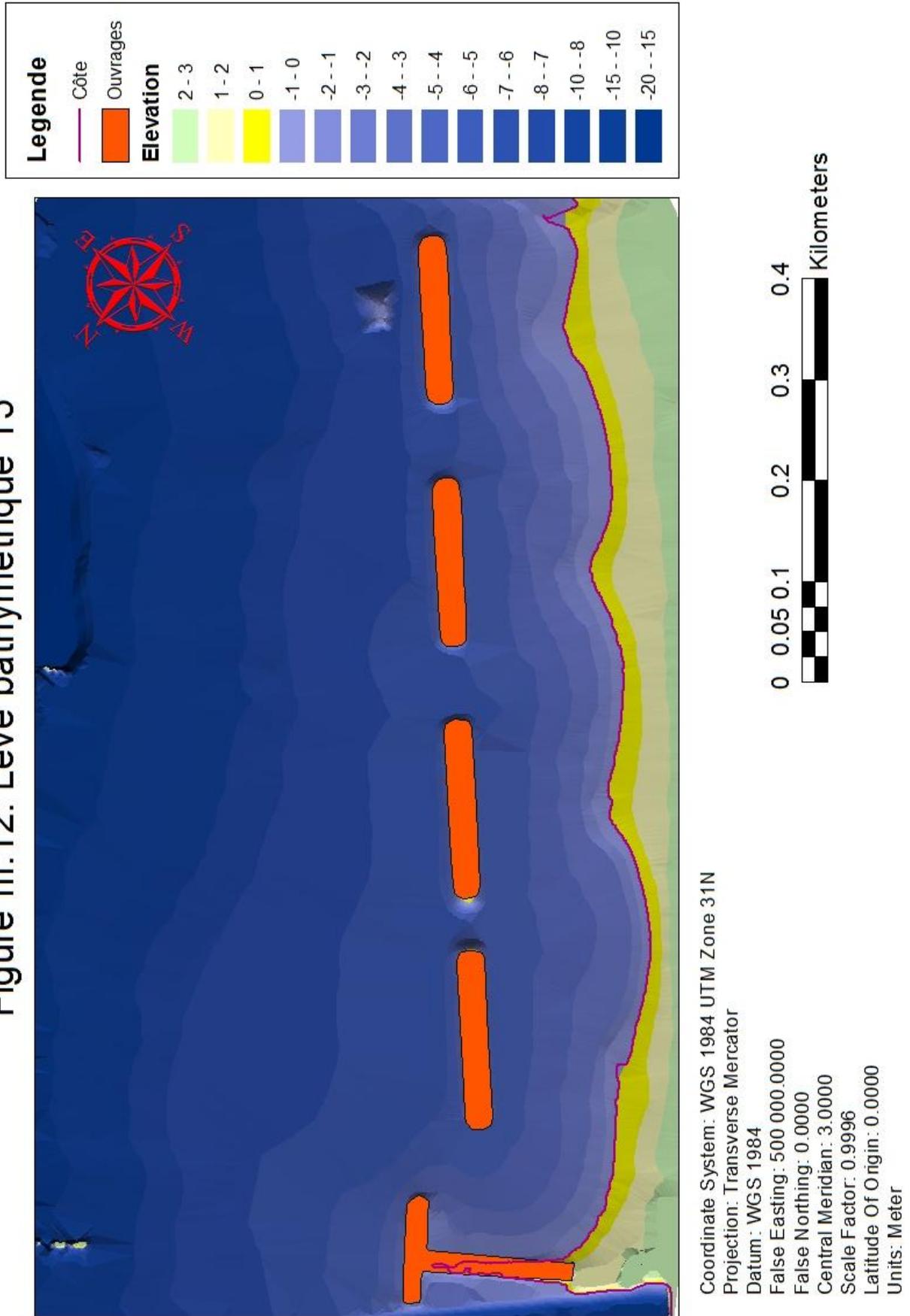
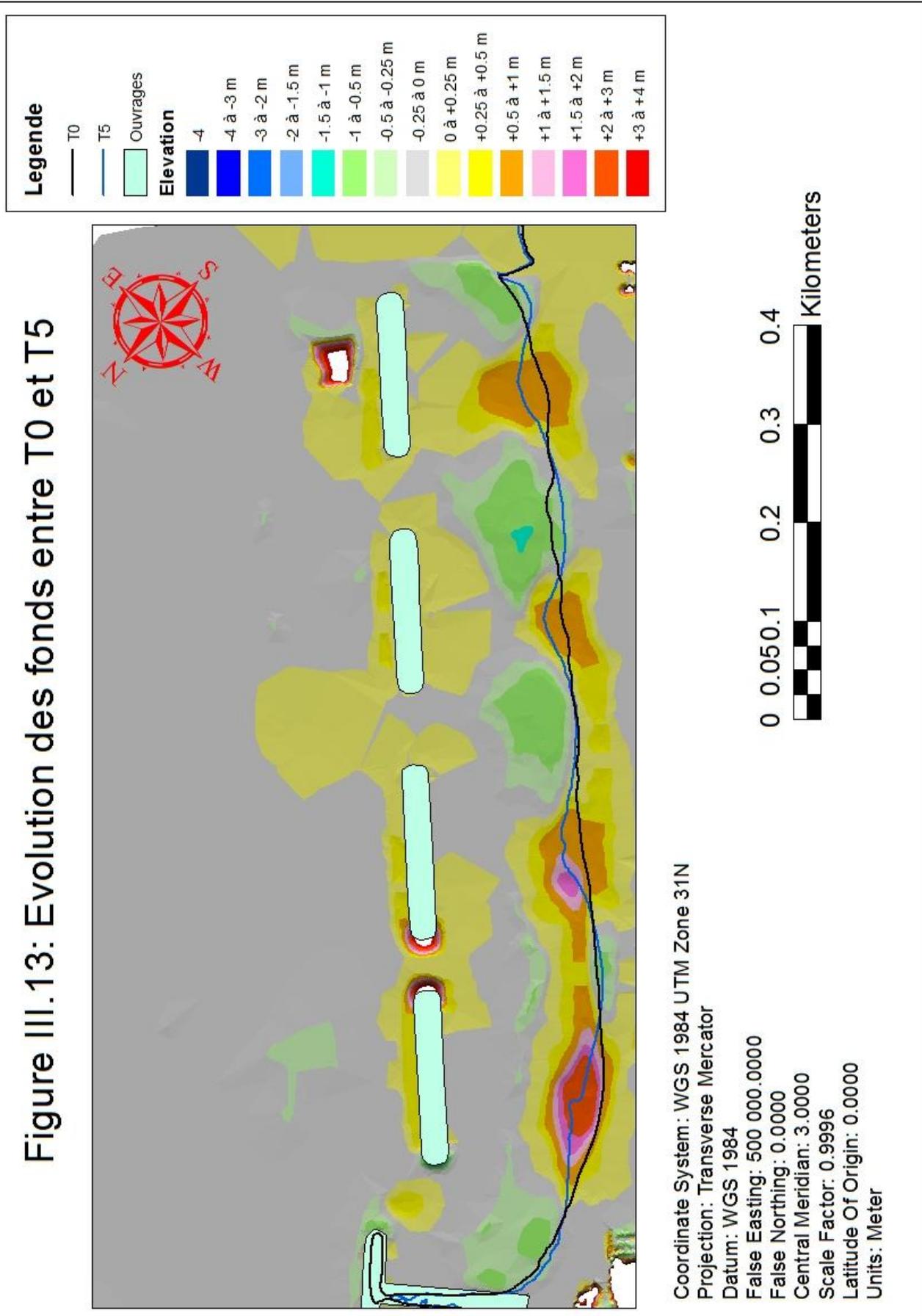


Figure III.13: Evolution des fonds entre T0 et T5



III. 7. Essais de stabilité

A l'issu des essais sédimentologiques, une deuxième campagne d'essais a été menée, celle-ci visant à tester la stabilité des ouvrages face aux houles extrêmes.

III. 7. 1. Essais de stabilité avec la direction N60°

Les résultats des essais de stabilité de la direction N60° sont résumés dans ces deux tableaux :

Tableau III-7 : Résultats des essais de stabilité pour la N60°.

Série progressive ; niveau d'eau +0,00 N.G.A.			
Période de retour	Hs voulue à -7,00	Hs obtenue à -7,00	Hs obtenue à -5,00
1 an	2,88	3,11	-
10 ans	3,12	3,29	-
50 ans	3,23	3,45	-
Série d'endurance ; niveau d'eau +0,70 N.G.A.			
50 ans	3,23	3,32	3,62

Tableau III-8 : Observations issues des essais de stabilité pour la N60°.

Série progressive	
Période de retour (T)	Observations
1 an	Quelques franchissements sur BL3 et BL4.
10 ans	Déplacement de quelques enrochements de (2 – 5T) des carapaces extérieures de BL3 et BL4.
50 ans	Franchissements importants Déplacement de quelques enrochements de (2 – 5T) des carapaces extérieures de BL3 et BL4. Glissement de deux enrochements de (2 – 5T) du musoir gauche de BL4.
Série d'endurance	
50 ans	Franchissements très importants Le talus intérieur des brise-lames est stable.

III. 7. 2. Essais de stabilité avec la direction N45°

Les résultats des essais de stabilité pour la direction N45° sont résumés dans les deux (02) tableaux ci-dessous.

Tableau III-9 : Résultats des essais de stabilité pour la N45°.

Série progressive ; niveau d'eau +0,00 N.G.A.			
Période de retour	Hs voulue à -7,00	Hs obtenue à -7,00	Hs obtenue à -5,00
1 an	3,05	2,96	-
10 ans	3,23	3,41	-
50 ans	3,33	3,46	3,35
Série d'endurance ; niveau d'eau +0.70 N.G.A.			
50 ans	3,33	3,38	3,25

Tableau III-10 : Observations issues des essais de stabilité pour la N45°.

Série progressive	
Période de retour (T)	Observations
1 an	Déferlement de la houle sur les brise-lames.
10 ans	Rien à signaler.
50 ans	Franchissements importants. Déplacement et glissement de quelques enrochements de (2 – 5T) de la carapace du talus extérieur des brise-lames.
Série d'endurance	
50 ans	Franchissements très importants. Le talus intérieur des brise-lames est stable.

III. 7. 3. Essais de stabilité avec la direction N20°

Les résultats des essais de stabilité pour la direction N20° sont résumés ci-dessous :

Tableau III-11 : Résultats des essais de stabilité pour la N20°.

Série progressive ; niveau d'eau +0,00 N.G.A.			
Période de retour	Hs voulue à -7,00	Hs obtenue à -7,00	Hs obtenue à -5,00
1 an	3,00	2,76	2,33
10 ans	3,21	3,31	2,38
50 ans	3,29	3,35	2,4
Série d'endurance ; niveau d'eau +0,70 N.G.A.			
50 ans	3,29	3,31	2,56

Tableau III-12 : Observations issues des essais de stabilité pour la N20°.

Série progressive	
Période de retour (T)	Observations
1 an	Déferlement de la houle sur les brise-lames.
10 ans	Déplacement de quelques enrochements de (2 – 5T) de la carapaces extérieure des brise-lames.
50 ans	Franchissements importants. Déplacement de quelques enrochements de (2 – 5T) de la carapace du côté extérieur des brise-lames BL1 et BL2.
Série d'endurance	
50 ans	Franchissements très importants. Déplacement de quelques enrochements de (2 – 5T) de la carapace du côté extérieur des brise-lames BL1 et BL2. Le talus intérieur des brise-lames est stable.

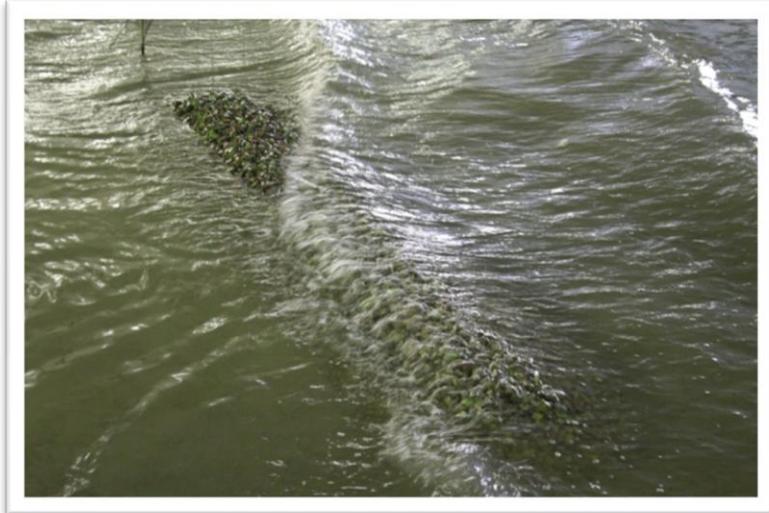


Photo III.20 : Essais de la houle cinquantennale de la direction N60°.



Photo III.21 : Essais de la houle cinquantennale de la direction N45°.



Photo III.22: Essais de la houle cinquantennale de la direction N20°.



Photo III.23: Photo du brise-lames BL1 après les essais de stabilité.



Photo III.24: Photo du brise-lames BL2 après la série d'essais de stabilité.



Photo III.25: Photo du brise-lames BL3 après les essais de stabilité.

III. 7. 4. Conclusion sur les essais de stabilité

Les essais ont démontré que les brise-lames conçus ont une stabilité satisfaisante face aux houles extrêmes de période de retour inférieure ou égale à 50 ans.

III. 8. Conclusion

Les essais sédimentologiques effectués sur la solution établie à travers le chapitre 2 confirment que la mise en place des brise-lames contribuera efficacement dans la reformation de la plage du club hippique et sa stabilité vis-à-vis des houles qui l'atteindront.

Néanmoins, suite aux essais du troisième cycle, nous avons constaté une érosion importante de la plage dans une certaine zone située face à l'espacement entre les brise-lames BL1 et BL2. Pour remédier à ce problème, une modification qui consiste à raccourcir cet espacement a été faite. Ceci s'est traduit par un prolongement de 20 mètres pour chacun des deux brise-lames.

Face aux houles extrêmes ($T < 50$ ans), les ouvrages dimensionnés ont prouvé une bonne stabilité avec des degrés de dommage acceptables même lors des tempêtes simulées par la série d'essais d'endurance.

Chapitre IV
Discussion des résultats du
modèle numérique

IV. Discussion des résultats du modèle numérique

Ce chapitre rend compte des résultats de la modélisation numérique bidimensionnelle effectuée avec la suite logicielle du **MIKE 21** en vue de définir les conditions hydro-sédimentaires de la zone d'étude avant et après la mise en place de la protection projetée.

Ayant achevé l'étude physique sur modèle réduit, il serait intéressant de comparer nos résultats avec ceux de l'étude numérique effectuée en phase d'avant-projet . Nous pourrions ainsi voir si ces deux outils convergent et apprécier la limite de chacun d'entre eux.

IV. 1. Présentation du modèle numérique

Une étude bidimensionnelle de la propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire résultant a été mise en œuvre ; celle-ci a été effectuée avec le **MIKE 21/3 Coupled Model FM** qui est un puissant système intégré combinant des modèles de houle, de courant et de transport sédimentaire dans un modèle morphologique entièrement dynamique.

Les modèles combinés sont le SW, le HD FM et le ST.

- **Le modèle SW (Spectral Waves)**

C'est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité d'action d'onde, prenant en compte les phénomènes de réfraction, de frottement sur le fond et de déferlement.

- **Le modèle HD FM (Hydrodynamic Flow Model)**

C'est un module hydrodynamique qui simule les variations du niveau d'eau et des écoulements en réponse à divers types de forçages. Ce modèle est utilisé principalement pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes.

Les courants sont calculés à partir des contraintes de radiation issues du modèle SW. Le niveau d'eau aux frontières latérales est modifié localement afin de prendre en compte la surélévation du plan d'eau dans la zone de déferlement. Les gradients de contraintes de radiations vont être à l'origine de la surélévation du plan d'eau dans la zone de déferlement et des courants de dérive littorale.

- **Le modèle ST (Sand Transport)**

Il simule le transport du sable sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et de la houle. Dans la zone de déferlement, les courants de retour sont inclus. Le modèle est déterministe et demande un minimum de calage. Les taux initiaux de

sédimentation/érosion sont calculés à l'aide de l'équation de conservation de la masse sédimentaire.

Ce modèle est utilisé pour l'optimisation morphologique des ouvrages portuaires, l'impact de protection côtière et la stabilité des estuaires.

IV. 1. 1. Le maillage

Un maillage triangulaire flexible qui offre une flexibilité maximale pour adapter la résolution au domaine de calcul a été utilisé.

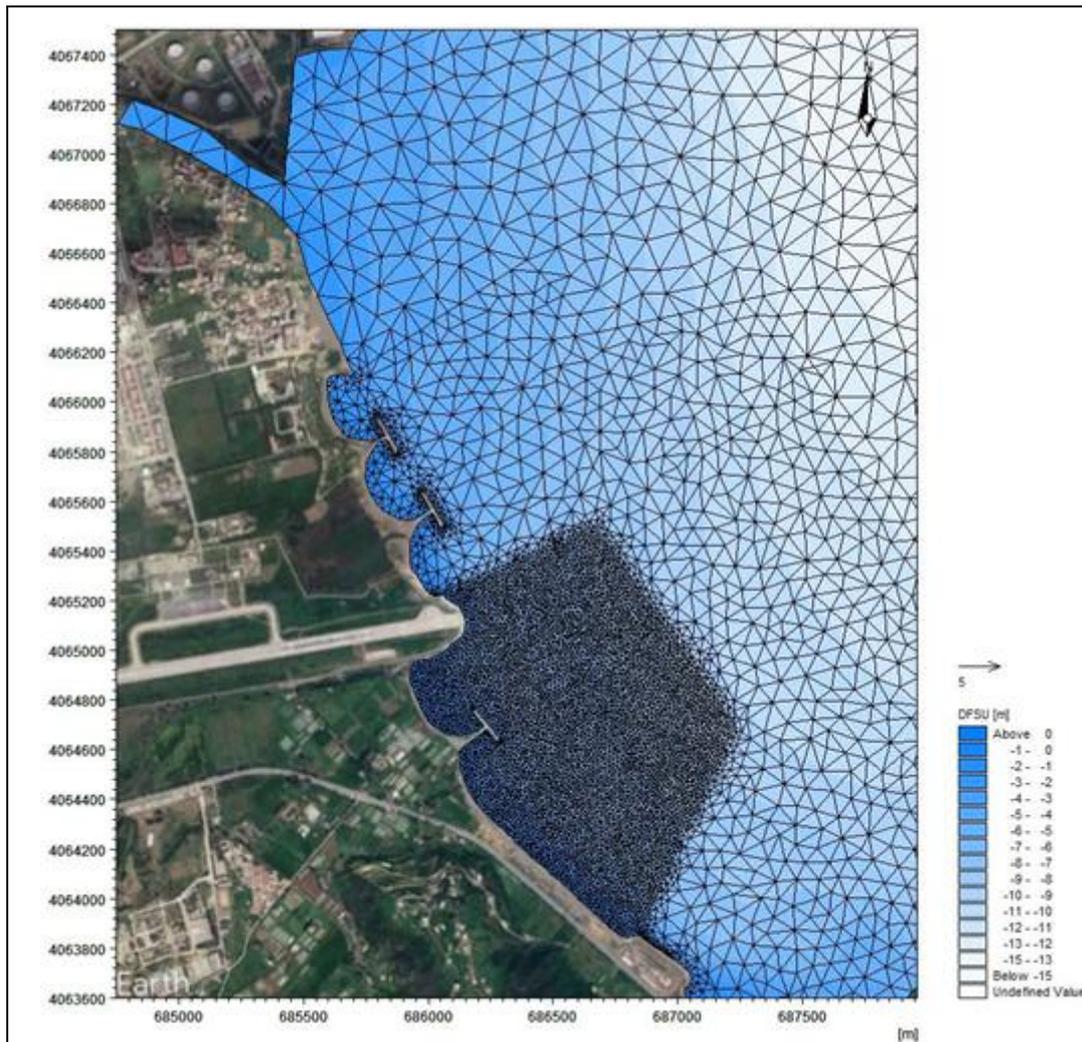


Figure IV.1 : Maillage triangulaire flexible adapté au domaine de calcul.

IV. 1. 2. Le domaine de calcul

Le domaine de calcul est centré sur la zone du rivage de la plage du club hippique et ses abords immédiats. Il délimite une aire importante (2 km x 3 km) afin que les conditions aux

limites soient en accord avec les phénomènes physiques en présence (caractéristiques de la houle au large et les courants littoraux induits).

IV. 1. 3. La bathymétrie

La bathymétrie est essentielle pour la précision des calculs de propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire. Les données bathymétriques sont issues des levés bathymétriques réalisés en 2019 par le LEM dans le cadre de cette étude et celle issue de la carte du Service Hydrographique et Océanographique de la marine (SHOM n°3029).

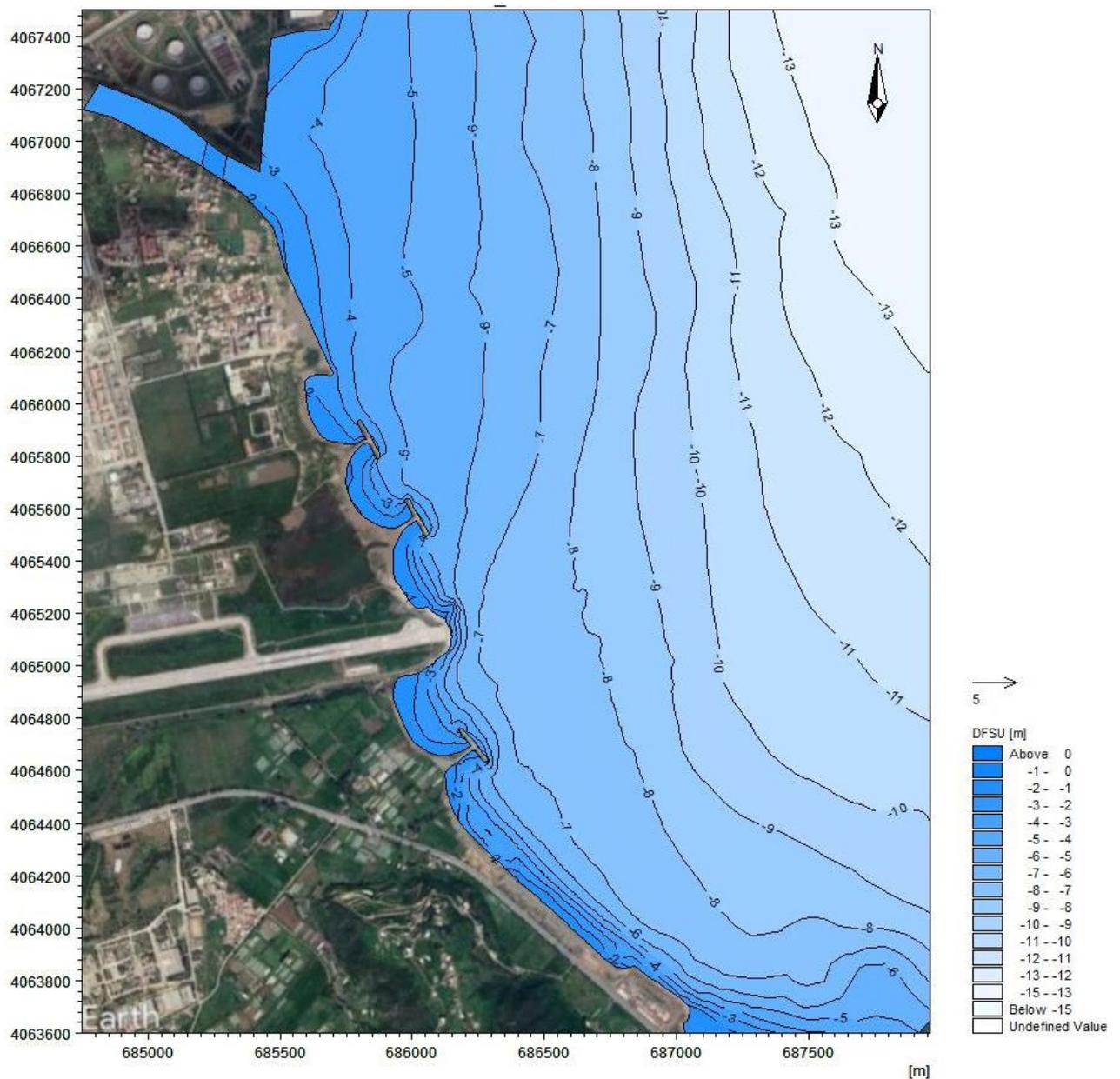


Figure IV.2 : Bathymétrie de la zone d'étude.

IV. 1. 4. Données sédimentologiques

Les données sédimentologiques utilisées sont issues des résultats des analyses granulométriques des 60 échantillons de sédiments superficiels prélevés en 2019. Les courbes et les indices granulométriques ont été établis pour chaque échantillon de sédiment ayant un pourcentage en lutites inférieur à 80%. Les résultats de cette étude sédimentologique ont été utilisés comme données d'entrée dans le modèle de calcul du transport sédimentaire (ST) de la suite logicielle de **MIKE 21**.

IV. 1. 5. Données de houle

Pour la génération des simulations numériques nous avons adopté les trois classes de houles les plus fréquentes et les plus importantes susceptibles d'atteindre la zone d'étude. Ces houles découlent des observations de navire entre 1963 et 1970 par l'US Naval Weather Command relevées du S.S.M.O Le tableau qui suit donne les caractéristiques de ces houles au large.

Tableau IV-1 : Caractéristiques des houles au large utilisées dans la simulation numérique.

Direction	Période (s)	Amplitude (m)
N20°	8	2,67
N45°	8	2,56
N60°	8	2,53

Sur la base des données ci-dessus, une analyse spectrale de type JONSWAP a été effectuée pour générer un climat de houle théorique.

Les résultats de l'étude de la réfraction de la houle entre le large et la côte qui a été réalisée avec le logiciel SWAN pour le modèle d'ensemble ont été utilisés comme conditions limites pour le module de réfraction de détail SW du **MIKE 21**. Les conditions aux limites du module SW extraites des résultats de calcul de SWAN sont résumées comme suit :

Tableau IV-2 : Forçage aux limites du modèle de calcul.

Direction	Période (s)	Conditions aux limites du modèle d'ensemble « SWAN »		Conditions aux limites du modèle de détail « SW » à 15m de profondeur	
		Hs (m)	Angle (°)	Hs (m)	Angle (°)
N20°	8	2,67	20	2,50	20
N45°	8	2,56	45	2,45	45
N60°	8	2,53	60	2,45	60

L'emprise du modèle de calcul SW étant relativement large, les effets de la réfraction ne se font pas sentir à ses limites et les caractéristiques de la houle montrent un léger changement par rapport aux données d'entrée du modèle SWAN.

IV. 2. Démarche de l'approche numérique

Le but de la modélisation numérique était de voir l'effet de la mise en place la protection côtière sur son environnement immédiat, ainsi que d'examiner et d'analyser la réponse du site.

Pour cerner l'impact de la réalisation des brise-lames sur l'hydrodynamisme de la zone d'étude en question et ses abords environnants, la démarche suivante a été suivie :

- L'examen de l'état initial (sans protection), où l'on tente de comprendre le comportement hydrodynamique du site de la plage du club hippique en simulant les phénomènes physiques régnants sur le site actuellement.
- L'examen de l'état en présence des ouvrages de protection envisagés où l'on tente également de reproduire numériquement les phénomènes hydro-sédimentaires régnant sur le site.

Ces examens consistent à restituer successivement le champ de la houle, les courants induits et la capacité théorique du transport solide pour les directions N20°, N45°, et N60° pour chacun des deux états.

- La comparaison des résultats de ces simulations numériques afin de voir le comportement hydro-sédimentaire avant et après la mise en place de la protection projetée.

IV. 3. Résultats de la simulation numérique

A travers l'analyse numérique de l'état initial du site, l'existence de deux régimes, en fonction de la provenance des houles, a été établie: les houles en provenance du Nord vont engendrer une dérive littorale vers le Sud-est, alors que les houles en provenance de l'Est et du Nord-est vont plutôt engendrer un transport vers le Nord-ouest. La résultante de cette dérive dépend du poids des houles respectives. C'est pourquoi elle est globalement orientée vers le Nord-Ouest, étant donné la dominance des régimes des houles du secteur Est.

Les houles qui impactent négativement la plage de club hippique sont celles de direction N45° et N60°. Elles génèrent des courants de dérive littorale importants Sud-est – Nord-ouest, qui sont réorientés vers le large par l'épi en T limitant la zone d'étude à l'Ouest et qui de ce fait transportent les sédiments arrachés à la plage et les petits fonds vers le large. Les sédiments transportés par la branche des courants Nord-ouest – Sud-est sont piégés par les épis situés au Nord-ouest de la piste d'atterrissage de Bejaia. Le manque d'apport en sédiments vers le site

d'étude, qui de ce fait, constitue une source et non une finalité pour les sédiments ainsi que l'effet conjugué des houles N45° et N60°, sont en faveur de l'érosion de la plage de club hippique.

Selon la simulation numérique, l'impact de l'implantation d'ouvrages de protection parallèles à la côte devrait se traduire par une diminution de l'énergie de la houle avant d'atteindre la côte. Les modifications de ces paramètres physiques ont des répercussions sur les mouvements des sédiments. Les résultats des simulations numériques montrent en effet une modification dans le régime hydro-sédimentaire de la zone d'étude après l'implantation des brise-lames.

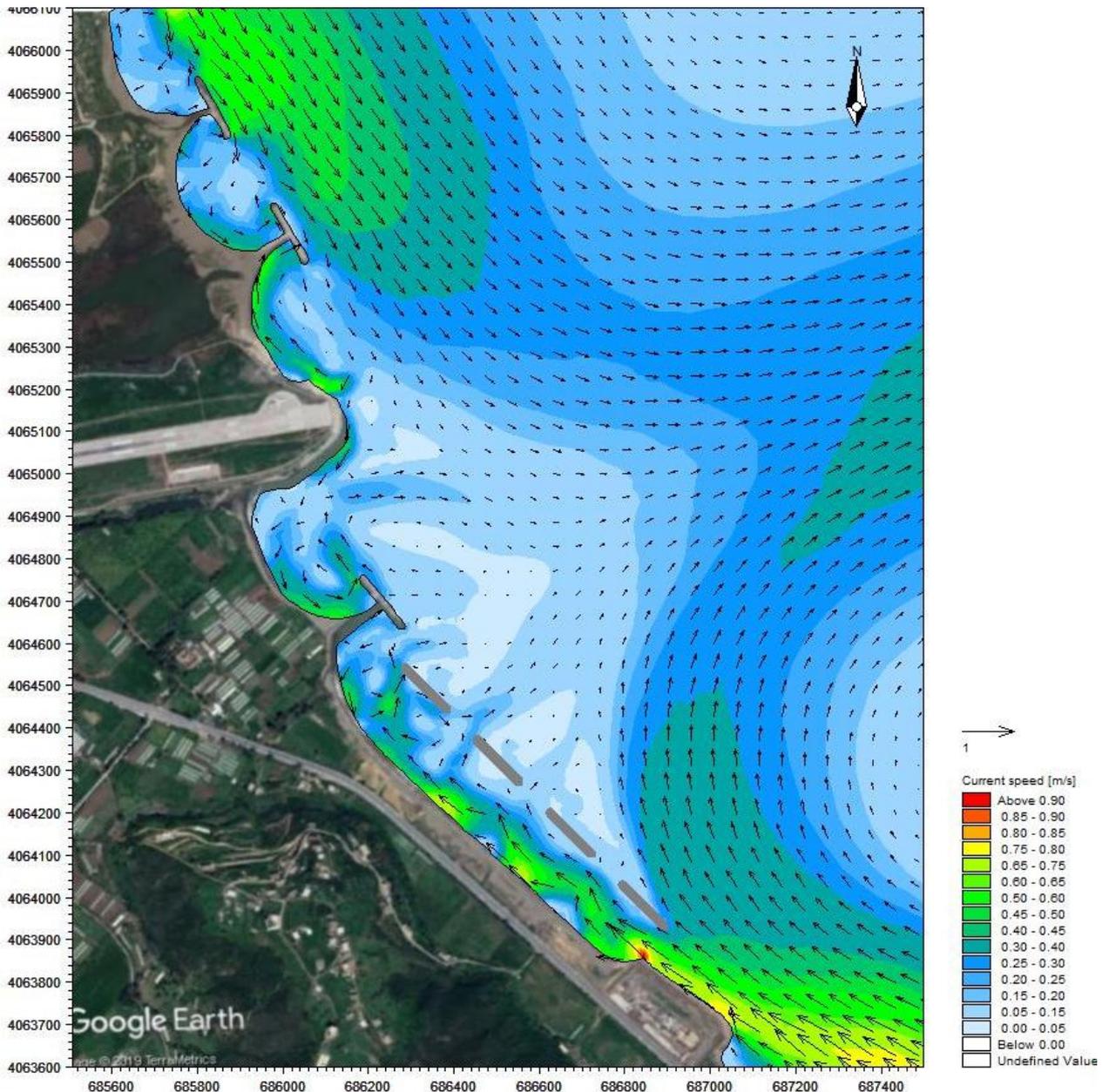


Figure IV.3 : Simulation du champ de courants générés par la houle N60° en présence des ouvrages.

En effet, le courant de dérive littoral Sud-est – Nord-ouest, actuellement réorienté vers le large, a été intercepté par les ouvrages projetés en perdant une bonne partie de sa vitesse au niveau de la plage. Il en résulte le dépôt de sédiments derrière ces ouvrages ainsi que la création de tombolos en faveur de l'élargissement de la plage.

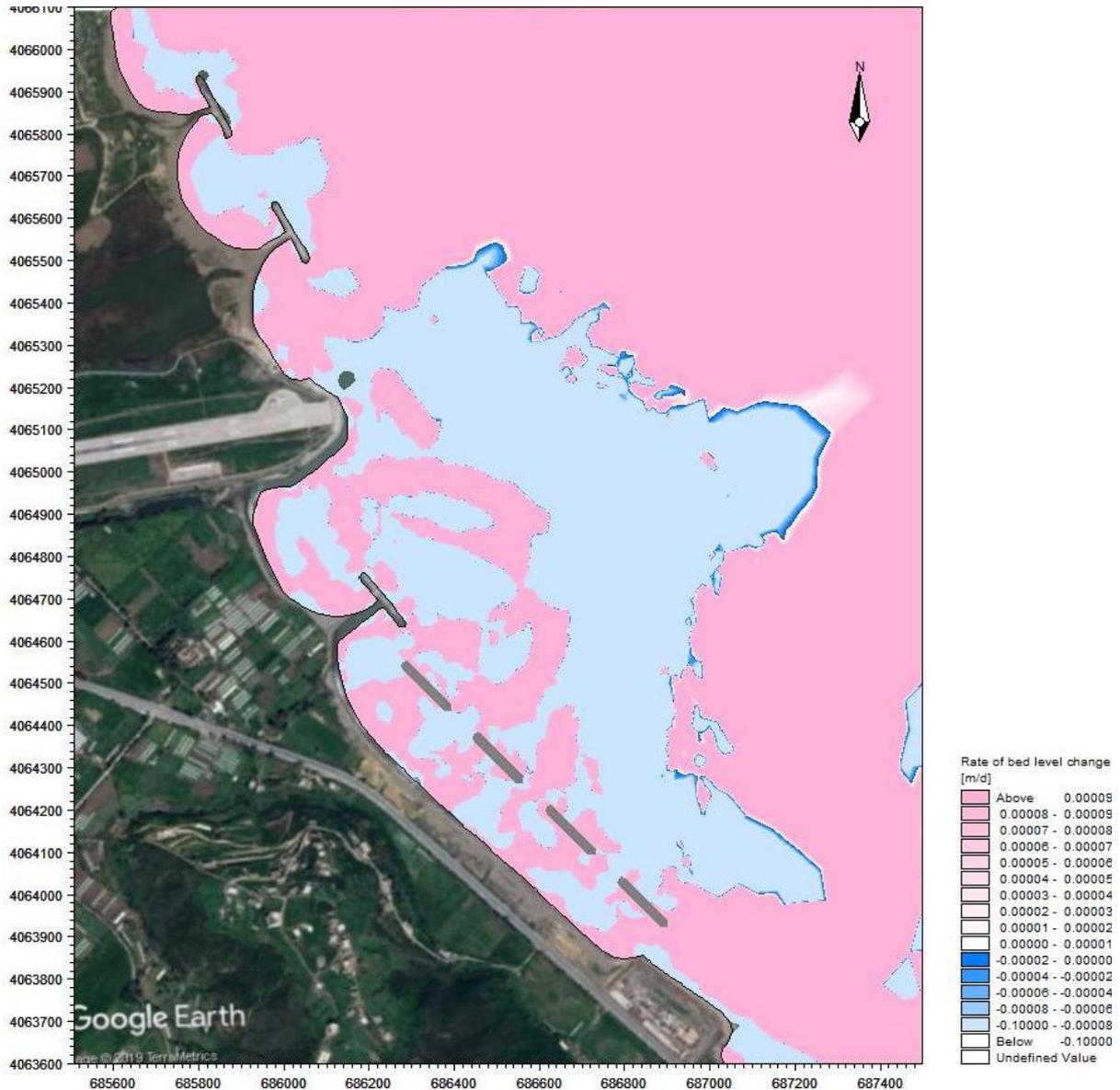


Figure IV.4 : Simulation de l'évolution des fonds en présence des ouvrages sous l'action de la houle N60°.

L'analyse des résultats de la réfraction de la houle après la mise en place des brise-lames ainsi que leur comparaison avec ceux obtenus à l'état initial du site, montre une diminution de la hauteur de la houle et donc de son énergie avant d'atteindre la côte.

Les figures (IV.5) et (IV.6) présentées ci-après montrent que la hauteur de la houle transmise derrière l'ouvrage est nettement réduite par rapport à l'état sans ouvrages et est de l'ordre de 15% à 47% de sa valeur initiale, soit une réduction comprise entre 53% et 85%. Au niveau de l'espace entre les brise-lames, par contre, la houle subit une très faible atténuation.

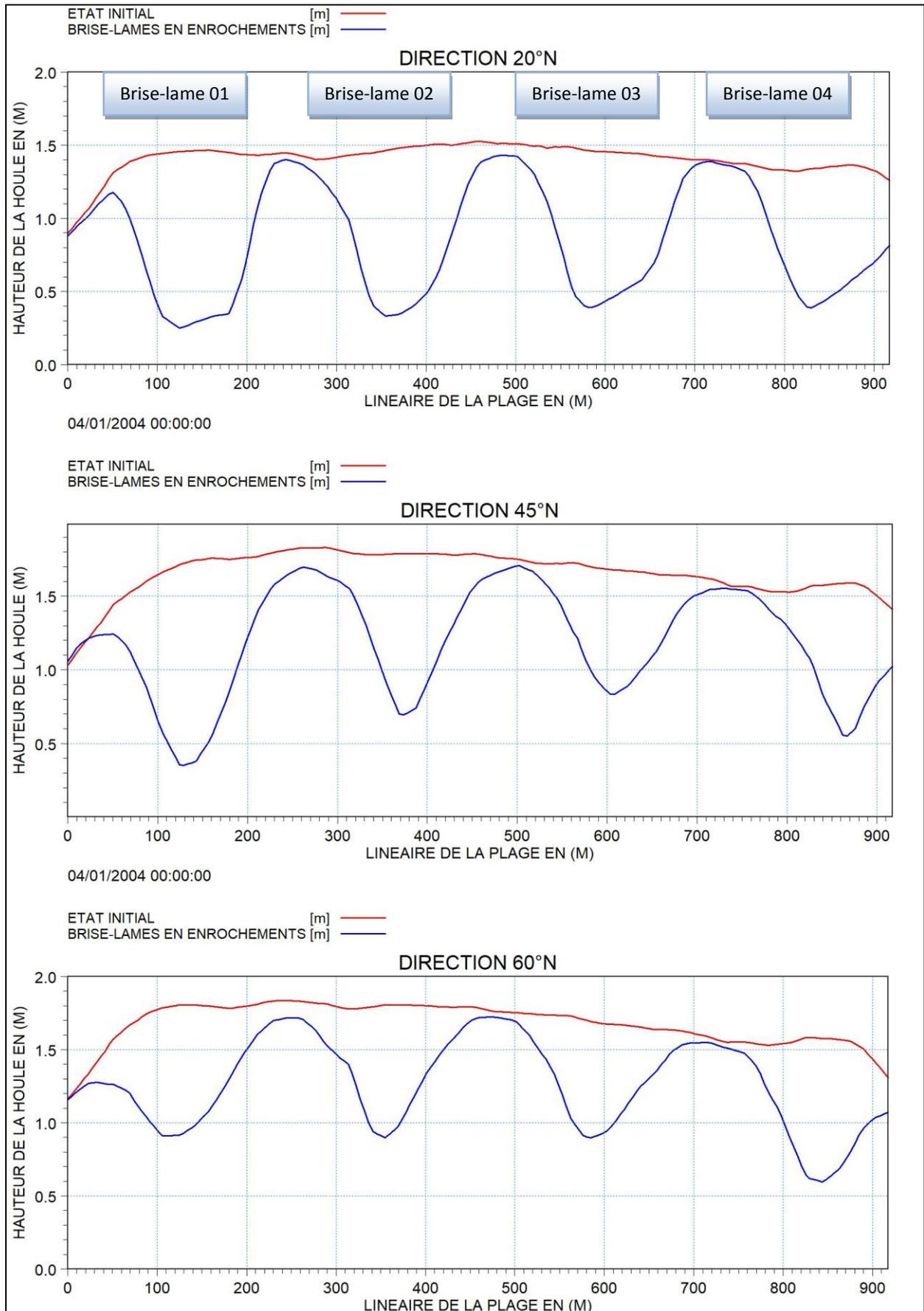


Figure IV.5 : Hauteur de la houle transmise derrière les brise-lames.

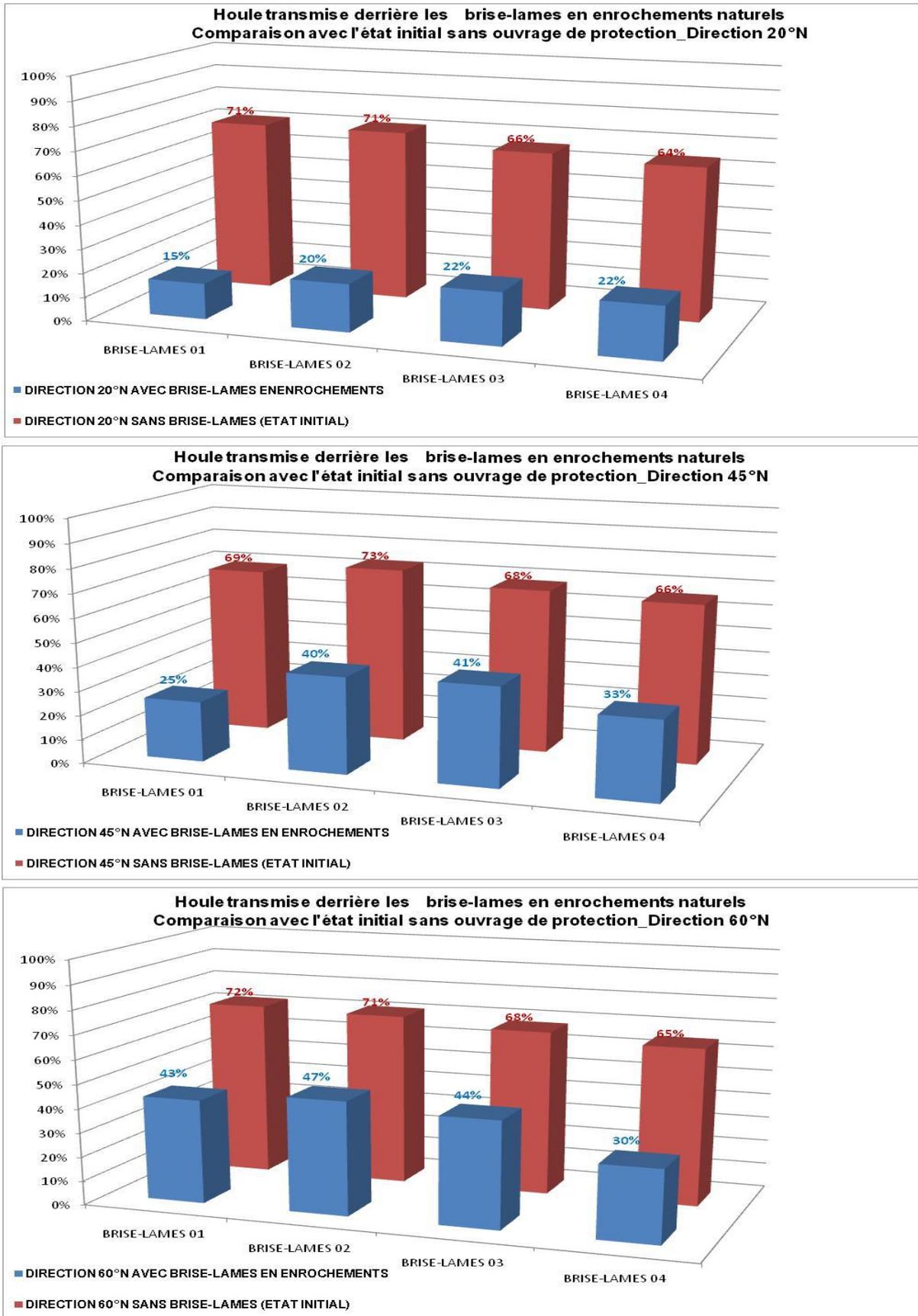


Figure IV.6 : Estimation en % de la houle transmise derrière les brise-lames.

Les figures ci-dessus indiquent en effet une nette diminution de l'énergie de la houle derrière les brise-lames en enrochements ce qui devrait permettre le dépôt des sédiments et la formation de tombolos en faveur de l'élargissement de la plage.

IV. 4. Conclusion

De manière globale, il est possible de dire que les modèles numérique et physique tout deux convergent et ont donné des résultats semblables. Cependant, le modèle numérique n'a pas pu prédire l'érosion qui s'est produite sur la plage face à l'espacement entre les brise-lames du côté ouest (BL1 et BL2) et nous a obligé à apporter des modifications à la solution validée par l'étude numérique. Ceci prouve que l'outil numérique n'est pas parfait et doit toujours être complété par une étude sur modèle physique, surtout lorsque des phénomènes hydrauliques de haute complexité sont traités.

Le tableau suivant est un commentaire sur l'utilité de chacun de ces deux outils.

Tableau IV-3 : Atouts que possède chacun des modèles.

Modélisation physique	Modélisation numérique
-Outil de référence.	-Peut compléter voir remplacer la modélisation physique pour certains sujets hydrauliques complexes.
-Plus coûteux à mettre en place. -Peut être utilisé même en l'absence d'un point de calage.	-Approche idéale pour affiner la forme et l'emprise d'ouvrages en projet. -Evaluation qualitative du comportement de plusieurs configurations différentes.
-Aspect concret. -Modifications et recherche d'optimisation faciles et peu coûteuses.	-Visualisation aisée. -Analyse de l'ensemble de la masse d'eau. -Possibilité d'archiver le modèle.

Conclusion générale

Il a été stipulé, lorsque nous avons positionné la problématique au départ, que le site de la plage du club hippique est soumis à une érosion intense, marquée surtout lors des tempêtes hivernales ayant pour conséquence la disparition de la plage existante et la dégradation de la route nationale n°09. Ceci a été confirmé par l'analyse du trait de côte à travers les images satellitaires de 2004 à 2020 qui ont révélé un recul moyen de 6 mètres par an.

Sur la base des éléments recueillis au cours du chapitre 1, sur l'ensemble des facteurs météorologiques, océanographiques, hydrodynamiques et sédimentologiques qui ont une influence sur le littoral et qui peuvent influencer l'évolution de la plage, nous avons pu cerner la dynamique du régime qui y régit actuellement. Ces données, jointes à la recherche bibliographique effectuée dans le chapitre 2 sur les ouvrages de protection côtière, ont permis de proposer une solution qui consiste à implanter quatre (04) brise-lames en série parallèlement au rivage du club hippique. Le plan de l'aménagement ainsi que le profil des brise-lames ont été pré-dimensionnés avec soin pour une houle de projet de période de retour $T = 50$ ans grâce aux différentes méthodes de calcul issues de cette même recherche bibliographique.

Conformément aux lois de la similitude de Froude établies dans le chapitre 3, une maquette de la solution a été construite et cette dernière a été soumise à un examen sur modèle réduit physique au sein du bassin n°03 du centre d'essais du modèle réduit du LEM, afin de confirmer ou réfuter sa pertinence. Le verdict est donc tombé ; une bonne résistance face aux houles extrêmes de période de retour T inférieure ou égale à 50 ans, cependant, sur le plan sédimentologique, il s'est avéré qu'elle nécessitait des ajustements car le niveau d'énergie entre les deux brise-lames ouest BL1 et BL2 était trop haut et provoquait une érosion de la plage sur la zone qui fait face à cet espacement. La variante finale retenue possède les caractéristiques suivantes :

- Profondeur approximative d'implantation : 6 m.
- Longueur unitaire de BL1 et BL2 (ouest): 160 m.
- Longueur unitaire de BL3 et BL4 (est): 140 m.
- Côte d'arase de : +1,00 m N.G.A.
- Largeur de crête : 11 m.
- Une carapace en enrochements (2 – 5 T), d'une épaisseur de 2,50 m et une pente de 3/2.
- Un noyau en enrochements (0,5 – 1 T) avec une pente de 3 pour 2, posé sur un tapis anti-affouillement en géotextile.

Toutefois, pour parer à d'éventuels tassements, il est possible de porter la côte d'arase à 1,50 N.G.A.

L'étude expérimentale en modèle réduit a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres océanographiques sur le comportement hydrodynamique et sédimentologique du littoral, et ce de manière assez explicite.

La modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire de la zone d'étude par le modèle **MIKE 21/3 Coupled Model FM** a donné des résultats plutôt satisfaisants, qui semblent converger avec ceux de l'étude sur modèle réduit pour une grande partie de la plage. Cependant l'incapacité du modèle numérique à projeter l'érosion que nous avons constaté à l'ouest de la plage en présence de la variante 1, et ce malgré les grandes avancées en termes de technologie et de matériel informatique, prouve que celui-ci ne peut, jusqu'à présent, pas remplacer l'expérimentation physique, en particulier pour des phénomènes aussi complexes que le transport sédimentaire.

Références bibliographiques

ASSASSI, Charafeddine, OTMANI, Housseyn. *Etude de protection de la zone de Club des Pins*. 92 p. Mémoire : Aménagement du littoral : Alger, Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral : 2010.

BENAISSA, Zouhair. *Le modèle réduit physique, outil de dimensionnement hydraulique*. 2015. 40 p. Document du Laboratoire d'Etudes Maritimes.

BELLESORT, B. *Recherches de solutions de protection du littoral d'un nouveau type*. Compiègne : CETMEF, 1994. 105 p. Collection de la DREAL, Hauts-de-France.

BERKENNOU, Noureddine, SALLAYE, Miloud. *Etude de protection du rivage du complexe culturel de Chenoua*. 59 p. Mémoire : Aménagement du littoral : Alger, Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral : 2012.

BONNEFILLE, René. *Cours d'hydraulique maritime*. Paris : Masson, 1980. 171 p. Collection de l'École nationale supérieure de techniques avancées. ISBN 2-225-66726-8.

BOUGIS, Jean. *Ouvrages de défense des littoraux*. 2000. 64 p. SCS Ingénierie, cours de formation continue.

Disponible sur : http://www.scs-ingenierie.com/pdf/cours/ouvrage_defense_littoraux.pdf

BOUHELLAL, Khaled. *Etude sur modèle réduit physique du port de pêche de SIDNA YOUCHAA*. Mémoire : Alger, Ecole Nationale des Travaux Publics : 2005.

CAMINADE, Daniel. *Ouvrages de protection contre la houle*. 1995. 28 p. Techniques de l'ingénieur CE, Vol. CE1, traité de construction. Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transports-th14/infrastructures-environnement-et-transport-par-voie-d-eau-42617210/ouvrages-de-protection-contre-la-houle-c4631/>

CAMINADE, Daniel. *Ouvrages de protection des côtes*. 1996. 16 p. Techniques de l'ingénieur CE, Vol. CE2, traité de construction. C 4 690.

Centre d'études techniques maritimes et fluviales (France). *Guide Enrochement: L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual (2e édition)*. Compiègne : CETMEF, 2009. 1302 p. ISBN 978-2-11-098518-7.

CHAREL, Jean-Marc. *La houle*. [en ligne]. [consulté le 08 Juin 2020].

Disponible sur : <http://jean-marc.charel.pagesperso-orange.fr/courants/oceanhoule.htm>

GRAILLOT, André. *Cours de travaux maritimes (tome 2)*. Le Havre : IPER, 1987. 246 p. Collection de l'Institut Portuaire d'Enseignement et de Recherche.

HASNAOUI, Ahlem. *Etude de la protection du rivage de la plage de Club des Pins : Etude sur modèles réduits physiques*. 99 p. Mémoire : Hydraulique : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2011.

KOFFLER, Albert, BENDRISS, Ahmed, ZENGERINK, Edwin. *Les géosynthétiques en protection contre l'érosion des berges et en construction des ouvrages d'art : 7^{ème} congrès annuel de l'A.M.P.C.R., 09 Novembre 2006, Rabat, organisé par MEZIANE BELAFKIH, A.* Disponible sur : http://www.ampcr.ma/actes/7eme_congres_national_de_la_route/CONGRE/TH5/TH5_8.pdf

LECLAIRE, Lucien. *La sédimentation holocène sur le versant méridional du Bassin algéro-baléares (précontinent algérien)*. Paris : Éditions du Muséum, 1972. 391 p. Collection du Musée national d'histoire naturelle. ISSN 0078-9763.

U.S. Naval Weather Service Command. *Summary of Synoptic Meteorological Observations: Mediterranean Marine Areas. Volume 9. Area 32 - S. Cyprus, Area 33 - Nile Delta, Area 34 - Beirut, Area 35 - Port Said*. Virginie : Defense Technical Information Center, 1970. 642 p.

VIGUIER, Jacques. *Modèles en hydraulique maritime*. 1992. 12 p. Techniques de l'ingénieur, traité de construction. Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-droit-et-organisation-generale-de-la-construction-tiacb/archive-2/modeles-en-hydraulique-maritime-c182/>

Annexe

