

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT ET GRADE D'INGENIEUR EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : GESTION ET PROTECTION DU LITTORAL

**Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart
(Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique**

Présenté par :

- TAMINE Nawal
- ABDELKEBIR Nawel

Soutenu le 28/06/2020 devant le jury suivant :

M. BOUAICHA. F	Maitre-assistant A	(ENSSMAL)	Président
M. BELKESSA. R	Professeur	(ENSSMAL)	Promoteur
M^{me}. IDDIR. A	Ingénieur d'Etude	(LEM)	Co-promotrice
M^{me}. BACHARI -HOUMA. F	Professeur	(ENSSMAL)	Examinatrice
M^{me}. BOUDOUMA. Z	Ingénieur en chef	(LEM)	Examinatrice

Promotion : 2020

Remerciements

En premier lieu nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné la patience et la capacité d'achever ce mémoire ainsi que nos familles, pour leur présence de tous les instants et leur soutien moral.

Nous adressons nos remerciements à notre promoteur Mr BELKESSA Rabah, professeur à l'ENSSMAL pour ses grandes qualités humaines, de nous avoir encadrées pendant la période de la réalisation de ce travail, sa disponibilité et ses orientations nous ont permis de mener sans difficultés notre mémoire.

Nous tenons à remercier notre co-promotrice IDDIR Amina ; pour son suivi durant toute la durée du projet, son aide, ses conseils et ses encouragements.

Nous exprimons nos sincères remerciements à M. BOUAICHA Farid, maitre-assistant A à l'ENSSMAL qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Nous tenons à remercier M^{me}. BACHARI-HOUMA Fouzia, Professeur à l'ENNSMAL et M^{me} BOUDOUMA Zahia Ingénieur en chef (LEM) qui ont examiné notre travail afin qu'il puisse être un produit complet.

Nous tenons aussi à remercier du fond du cœur tous les enseignants(es) qui nous ont tant appris tout le long de notre cursus, le personnel de la bibliothèque de l'ENSSMAL, mais aussi le service documentation et tout le personnel du LEM pour leur précieuse aide.

En fin, nous remercions toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de notre travail.

Une fois encore, merci à tous.

DÉDICACE

*C'est avec un immense plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que
Je dédie ce modeste travail à :*

*A mon très cher père **Chabane** et à ma très chère mère **Rabia** :
Pour leur soutien, leur patience illimitée, leurs sacrifices et tous les efforts consentis pour
mon éducation et ma formation. Je tiens à leur témoigner ma reconnaissance, mon amour
et mon affection, que dieu les protège et les bénisse.*

A mes sœurs adorées : Lahna, Kenza et Chabha

*Qui ont toujours cru en moi, encouragée à aller de l'avant. Je leur souhaite beaucoup de
succès et de bonheur*

A mes anges, mes neveux adorés

*Amir et Walid avec tout mon amour et ma tendresse, j'espère qu'ils feront
mieux que leur tante.*

A ma douce grand-mère

Pour ses vœux de réussite, je lui dis merci setsi pour tout ton amour.

A ma binôme Nawel

Je le dédie à toute personne que je connais de près ou de loin !

Nawal

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts et de ma réussite, la flamme de mon cœur,
ma vie et mon bonheur ; **Maman** que j'adore.*

*A l'homme de ma vie mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur,
celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, je t'aime **Papa**.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération
pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Que Dieu
vous procure bonne santé et longue vie.*

A mes chères sœurs, je leur souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite.

A ma chérie binôme Nawal et toute sa famille.

A toutes personnes que je n'ai pas nommées et à tous ceux qui m'ont soutenu.

Nawal

Table des matières	
Liste des acronymes	
Liste des Tableaux	
Liste des Figures	

Introduction générale

Introduction générale.....	18
----------------------------	----

Chapitre I : Généralités

I.1. Situation géographique	22
I.1.1. Baie de Collo.....	22
I.2. Caractéristiques géographiques de Tamanart.....	22
I.3. Cadre touristique	22
I.4. Cadre géologique et morphologique	23
I.4.1. Cadre géologique	23
I.4.1.1. Géologie régionale	23
I.4.1.2. Géologie locale.....	24
I.4.2. Cadre géomorphologique.....	24
I.4.2.1 Géomorphologie régionale.....	24
I.4.2.2. Morphologie du plateau continental.....	24
I.4.2.3. Géomorphologie Cotière	25
I.4.3. Cadre sismique.....	25
I.5. La sédimentologie	25
I.5.1. Sédimentologie régionale.....	25
I.6. Cadre climatique et océanographique	26
I.6.1. Données climatologiques	26
I.6.1.1. Températures.....	26
I.6.1.2. Précipitations.....	27
I.6.1.3. Les vents	28
I.6.2. Données océanographiques.....	28
I.6.2.1. Les houles	29
I.6.2.2. La marée.....	32
I.6.2.3. Les courants	32
I.7. Le réseau hydrographique	33
I.7.1. Les aquifères	34
I.7.2. Oued Tamanart.....	35

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude et du projet

II.1. Site d'étude	37
II.2. Cadre géologique et géomorphologique	38
II.2.1. Cadre géologique	38
II.2.2. Cadre géomorphologique.....	38
II.3. Présentation du futur port de plaisance de Tamanart.....	38
II.3.1. Plan descriptif	38
II.3.2. Plan de masse du port de Tamanart	41
II.3.3. Caractéristiques et dimensions de l'aménagement du port.....	42
II.3.4. Description des ouvrages de protection	43
II.4. L'agitation et la stabilité du port.....	45
II.5. Visite du site et reportage photographique	46

Chapitre III : Matériel et Méthode

III.1. Introduction	49
III.2. Etude bathymétrique.....	49
III.2.1. Point de contrôle.....	50
III.2.2. Calibrage de l'échosondeur	51
III.2.3. Traitement des données bathymétriques	51
III.2.4. Description du logiciel Surfer 15	51
III.2.5. Manipulation des données	51
III.3. La sédimentologie	52
III.3.1. Objectif.....	52
III.3.2. Prélèvements d'échantillons.....	52
III.3.3. Etude granulométrique	53
III.3.4. Traitement des données	54
III.3.5. Les paramètres de position	54
III.3.6. Les indices granulométriques	55
III.3.6.1. Les indices de dispersion ou de classement.....	55
III.3.6.2. Les coefficients d'asymétrie	55
III.4. La modélisation numérique hydrodynamique	55
III.4.1. Définition	55
III.4.2. Principe de la modélisation	55
III.4.3. Objectifs de la modélisation	56
III.4.4. Etude de la réfraction de la houle	56
III.4.4.1. Manipulation des données	56
III.4.5. Courantologie	57

III.4.4.1. Manipulation des données	57
III.4.6. Simulation du transport sédimentaire	57
III.4.6.1. Manipulation des données	58
III.4.7. Simulation numérique de la zone de Tamanart par Mike-21	58
III.4.7.1. Principe de la simulation par Mike21-Dhi	58
III.4.7.2. Description du modèle de simulation Mike.....	58
c). Le module spectral de la houle(SW)	58
c). Le module hydrodynamique(HD)	59
c). Le module du transport de sable (ST)	59
III.4.7.3. Etape de la modélisation par le Mike21	60
III.5. Etude d'agitation au niveau du port de Tamanart.....	62
III.5.1. Présentation du modèle	62
III.5.2. Limites d'application du modèle.....	63
III.5.3. Définition des agitations admissibles	64
III.6. Modélisation physique	65
III.6.1. Introduction	65
III.6.2. Nécessité de la modélisation	65
III.6.3. Notions fondamentales	65
III.6.4. Principe et types de modèles	65
III.6.5. Fondement des modèles réduits physiques.....	66
III.6.6. La simulation physique	67
III.6.6.1. Loi de similitude.....	67
III.6.6.2. Distorsions.....	68
III.6.7. Types d'étude sur les modèles réduits physiques.....	69
III.6.7.1. Etude à deux dimensions	69
III.6.7.2. Etude à trois dimensions.....	69
III.6.7.3. Etude des évolutions des fonds : modèles sédimentologiques	69
III.6.8. Les échelles	71
III.6.8.1. Analyse dimensionnelle et système d'unités	71
III.6.8.2. Echelle non-distordue	71
III.6.8.3. Echelle distordue	71
III.6.8.4. Choix de l'échelle.....	71
III.6.8.5. Construction du modèle.....	71
III.6.8.6. Choix des matériaux de l'ouvrage	72
III.6.8.7. Calibration(réglage hydraulique du modèle).....	72
III.6.9. Conditions des essais.....	72
III.6.10. Les observation effectuées et les moyens de mise en oeuvre.....	73

III.6.10.1. Observations hydrauliques	73
III.6.10.2. Observation des dégats	74
III.6.10.3. Critères de stabilité.....	74
III.6.10.4. Moyens mis en œuvre pour les observations.....	74
III.6.10.5. Critères d'agitation	74
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. Etude bathymétrique	76
VI.1.1. Morphologie sous-marine	76
VI.1.2. Etude des profils bathymétriques.....	76
VI.2. La sédimentologie	78
VI.2.1. Paramètres de position	78
VI.2.1.1. Le grain moyen D50 (μm).....	78
VI.2.1.2. Analyse modale.....	79
VI.2.2. Indices granulométriques :.....	81
a) Indice de dispersion ou de classement.....	81
b) Coefficient d'asymétrie	81
VI.3. Modélisation numérique	83
VI.3.1. Analyse des résultats des simulations numériques (avant et après aménagement).....	84
VI.3.1.1. Action des houles de direction Nord-Ouest (335°N)	84
A. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW).....	84
B. Courantologie (Hydrodynamic, HD).....	86
C. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)	87
VI.3.1.2. Action des houles de direction Nord (15°N).....	88
A. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW).....	88
B. Courantologie (Hydrodynamic, HD).....	89
C. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)	90
VI.3.1.3. Action des houles de direction Est (70°N).....	91
A. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW).....	91
B. Courantologie (Hydrodynamic, HD).....	92
C. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)	93
Conclusion.....	94
VI.4. Etude d'agitation au niveau du port	95
Conclusion.....	97
VI.5. Modélisation physique	97
VI.5.1. Introduction.....	97
VI.5.2. Conditions de houles.....	97
VI.5.3. Conditions hydrographiques	97

VI.5.4. Choix de l'échelle	97
VI.5.5. Résultats des essais	97
VI.5.6. Construction des fonds.....	98
VI.5.6.1. Choix des matériaux.....	98
VI.5.6.2. Calibration (réglage hydraulique du modèle).....	99
VI.5.6.3. Les houles.....	99
VI.5.6.4. Génération de la houle.....	99
VI.5.6.5. Techniques de mesure et définitions	99
VI.5.7. Observations effectuées et moyens mis en œuvre.....	100
VI.5.7.1. Observations hydrauliques	100
VI.5.7.2. Observation des dégâts.....	100
VI.5.8. Critères de stabilité.....	100
VI.5.9. Critères d'agitation.....	101
VI.5.10. Critères de franchissement	101
VI.6. Solution d'aménagement contre le problème d'agitation et de stabilité du port de Tamanart ...	102
VI.6.1. Proposition des solutions d'aménagement.....	102
Variante n°1.....	102
A. Description de la variante.....	102
B. Résultats des essais.....	104
C. Conclusion.....	106
Variante n°2.....	107
A. Description de la variante.....	107
B. Résultats des essais.....	108
C. Conclusion.....	109
Variante n°3.....	110
A. Description de la variante.....	110
B. Résultats des essais.....	111
C. Conclusion.....	112
Variante n°4.....	113
A. Description de la variante.....	113
B. Résultats des essais.....	113
C. Conclusion.....	115
Variante n°5.....	116
A. Description de la variante.....	116
B. Résultats des essais.....	117
C. Conclusion.....	118
VI.6.2. La variante retenue.....	120

VI.7.Corrélation entre le modèle numérique et physique.....	121
Conclusion.....	122

Chapitre V : Gestion intégrée de zones côtières

V.1. Introduction	124
V.2 . Approche du programme GIZC dans la zone d'étude.....	125
1. Tamanart.....	127
2. Oued Tamanart.....	127
3. Port de pêche de Collo.....	127
4. Littoralisation,rejets domestiques et industriels	127
V.3. Conclusion.....	130

Conclusion générale

Conclusion générale	132
---------------------------	-----

Références bibliographiques

Bibliographies	135
----------------------	-----

Liste des acronymes

°C : degrés Celsius

µm : micromètre

AFNOR : Association française de normalisation

BCR : Blocs Cubiques Rainurés

BW : Boussineq Wave

D : dimension caractéristique

D50 : la médiane moyenne

DHI : Danish Hydraulics Institut

E : Est

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

Fig : Figure

GIZC : Gestion Intégrée de Zones Côtières

HD : Hydrodynamique

Hs : Hauteur significative

Kg : Kilogramme

KHz : Kilohertz

LEM : Laboratoire des Etudes Maritimes

m : mètre

m² : mètre carré

ml : Mètre linéaire

mm : millimètre

N : Nord

N.E : Nord –Est

N.W :Nord-Ouest

ONM : Office National de la météorologie

PAC : Plan d'Aménagement Côtier

Re : Nombre de Reynold

S : seconde

S₀ : Indice de classement

SKI: Coefficient d'asymétrie

SSMO: Sommary of Synoptic Meteorological Observation

ST : Transport Sédimentaire

SW : Spectral Wave

T : Période de la houle

t : tonne

TN : Terrain naturel

Tp : Période de pique

V : vitesse caractéristique (vitesse orbitale célérité)

W: Ouest

WGS: World Géoïde System

X.Y.Z : Extension d'un fichier au format XYZ

v : Viscosité cinématique de fluide.

Liste des Tableaux

Tab.I.1: Fréquences mensuelles et annuelles (%) de la houle au large de Skikda par direction (SSMO,1936-1970)	30
Tab. I. 2 : Statistiques de la houle au large de Skikda (SSMO 1963-1970).....	31
Tab.I.3: Répartition des états de mer par période (SSMO,1963-1970)	31
Tab.I.4: Relation état de mer –Hauteur de l’agitation	32
Tab.II.1: Fiche surfacique du futur port de Tamanart (Skikda) ,(LEM,2018)	42
Tab.III.1: Houle annuelle dans la région de Tamanart (SSMO,1970)	57
Tab.III.2: Données de houle aux limites du modèle de calcul (LEM,2018)	64
Tab.III.3: Les limites d’agitation admissibles pour le port de plaisance (LEM,2018).....	64
Tab.IV.1: Répartition des sédiments en fonction de leurs diamètres (Folk et Ward).....	78
Tab.IV.2 Interprétation des valeurs de S_0	81
Tab.IV.3 Interprétation des valeurs de S_k	82
Tab.IV.4: Conditions de houles retenues pour les essais de stabilité du port (LEM,2019).....	97
Tab.IV.5: Choix des matériaux (LEM,2019)	98
Tab.IV.6: Critères d’agitation pour un port de plaisance (AIPCN).....	101
Tab.IV.7: Limites des franchissements tolérables (LEM,2019).....	102
Tab.IV.8: Description de la variante d’aménagement n°1	102
Tab.IV.9: Résultats de stabilité par la direction 70°N.....	105
Tab.IV.10: Résultats de stabilité par la direction 25°N.....	105
Tab.IV.11: Résultats des essais d’agitation pour la direction 70°N	106
Tab.IV.12: Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N	106
Tab.IV.13: Résultats de stabilité par la direction 25°N.....	108
Tab.IV.14: Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N	109
Tab.IV.15: Résultats de stabilité par la direction 25°N.....	111
Tab.IV.16: Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N	112
Tab.IV.17: Résultats de stabilité par la direction 25°N.....	114
Tab.IV.18: Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N	114
Tab.IV.19: Résultats de stabilité par la direction 25°N.....	117
Tab.IV.20: Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N	117
Tab.IV.21: Résultats des essais d’agitation pour la direction 70°N	118
Tab.IV.22: Les valeurs de l’agitation dans les modèles numérique et physique pour la houle 25°N .	122
Tab.V.1: Définition des activités majeurs ,leurs enjeux et les acteurs clés	125
Tab.V.2: Analyse des pressions existantes sur la zone étudiée	129

Liste des Figures

Fig.I.1: Localisation de la baie de Collo (Google Earth, 2020).....	22
Fig.I.2: Géologie du Nord-Est Algérien (Harbiet ali,1999).....	23
Fig.I.3: Répartition spatiale des sédiments dans la région de Tamanart.Skikda (LEM,2018)	26
Fig.I.4 : Variations des températures maximales et minimales dans la région de Skikda (1996-2018)(ONM ,2019).....	27
Fig.I.5 : Cumuls mensuels des précipitations dans la région de Skikda période 2006-2018 (ONM, 2019).....	27
Fig.I.6: Rose des vents de Skikda sur une période annuelle(LEM, 2012)	28
Fig.I.7: Rose annuelle de la houle de la région de Skikda (LEM, 2012)	29
Fig.I.8 : Bilan des courants de dérive et dynamique sédimentaire dans la baie de Tamanart (LEM, 2018).....	33
Fig.I.9: Situation et extension des aquifères dans la baie de Skikda (LEM ,2018)	34
Fig.II.1: Localisation de la zone d'étude (Google Earth ,2020).....	37
Fig.II.2 : La baie de Tamanart avec la présence des blocs rocheux (Google Earth ,2020)	37
Fig.II.3: Géologie de Tamanart (carte géologique de l'Algérie,1952).....	38
Fig.II.4: Plan d'aménagement du port de Tamanart (LEM,2018)	39
Fig.II.5 : Plan de masse du port de plaisance de Tamanart	41
Fig.II.6: Vue panoramique du site d'étude (Tamine et Abdelkebir,2019)	46
Fig.II.7: Illustration de la plage de Tamanart(Tamine et Abdelkebir ,2019)	47
Fig.II.8: Traces de <i>Posidonia oceanica</i> (Tamine et Abdelkebir,2019)	47
Fig.III.1: Transducteur immergeable avec célérimètre de coque.....	50
Fig.III.2: Boitier RTA auquel est intégré le mesureur de cap	50
Fig.III.3: Teledyne TDS DMS 25	50
Fig.III.4: Teledyne Digibar V	50
Fig.III.5: Positionnement des stations de prélèvements des échantillons de sédiment dans la région de Tamanart(LEM,2018)	53
Fig.III.6: Modalité d'analyse granulométrique	54
Fig.III.7: Organigramme explicatif de l'approche méthodologique de la modélisation par les codes Mike 21	61
Fig.IV.1: Carte bathymétrique de la zone d'étude (Réalisée à l'aide du logiciel Surfer 15) avant et après aménagement.....	76
Fig.IV.2: Carte bathymétrique et le tracé des profils dans la zone d'étude(Surfer 15) avant et après aménagement	77
Fig.IV.3: Profil sous marin n°1	77
Fig.IV.4 : Profil sous marin n°2	77
Fig.IV.5: Profil sous marin n°3	77
Fig.IV.6 : Carte de la répartition des médianes (D ₅₀) dans la région de « Tamanart »(LEM ,2018).....	79
Fig.IV.7: Classes Modales des sédiments sous-marins de la région Tamanart.....	80
Fig.IV.8: Les indices de classement S ₀ dans les sédiments de la région de Tamanart	81

Fig.IV.9: Les indices de classement Sk dans les sédiments de la région de Tamanart	82
Fig.IV.10: Maillage et bathymétrie de Tamanart(état initial).....	83
Fig.IV.11: Maillage et bathymétrie de Tamanart(état avec aménagement)	84
Fig.IV.12: Champ de réfraction de la houle avant ouvrage ,MWD=335° ;Hs=2.76 m;T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart	84
Fig.IV.13: Champ de réfraction de la houle avec aménagement ,MWD=335° ;Hs=2.76m ;T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.....	85
Fig.IV.14: Champs des courants cotiers avant et après aménagement,MWD=335° ;Hs=2.76m,T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.....	86
Fig.IV.15: Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement,MWD=335° ;Hs=2.76m,T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.....	87
Fig.IV.16: Champ de réfraction de la houle avant et après aménagement ,MWD=15° ;Hs=2.52 m;T=8s dans le secteur Nord dans la région de Tamanart	88
Fig.IV.17: Champs des courants cotiers avant et après aménagement,MWD=15° ;Hs=2.52m,T=8s dans le secteur Nord dans la région de Tamanart	89
Fig.IV.18: Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement,MWD=15° ;Hs=2.52m,T=8s dans le secteur Nord dans la région de Tamanart	90
Fig.IV.19: Champ de réfraction de la houle avant et après aménagement ,MWD=70° ;Hs=2.60 m;T=8s dans le secteur Est dans la région de Tamanart	91
Fig.IV.20: Champs des courants cotiers avant et après aménagement,MWD=70° ;Hs=2.60m,T=8s dans le secteur Est dans la région de Tamanart..	92
Fig.IV.21: Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement,MWD=70° ;Hs=2.60m,T=8s dans le secteur Est dans la région de Tamanart..	93
Fig.IV.22: Etat d'agitation dans le futur port de Tamanart ,direction =70°N ;Hs=2.60m,T=8s	95
Fig.IV.23: Etat d'agitation dans le futur port de Tamanart ,direction =25°N ;Hs=7.03m,T=8s	96
Fig.IV.24: Variante d'aménagement n°01 avant aménagement	106
Fig.IV.25: Variante d'aménagement n°01 après aménagement	107
Fig.IV.26: Plan de masse de la variante n°02	108
Fig.IV.27: Variante d'aménagement n°02 avant aménagement	110
Fig.IV.28: Variante d'aménagement n°02 après aménagement	110
Fig.IV.29: Variante d'aménagement n°03 avant aménagement	112
Fig.IV.30: Variante d'aménagement n°03 après aménagement	113
Fig.IV.31: Variante d'aménagement n°04 avant aménagement	115
Fig.IV.32: Variante d'aménagement n°04 après aménagement	115
Fig.IV.33: Plan de masse de la variante n°05	116
Fig.IV.34: Variante d'aménagement n°05 avant aménagement	119

Fig.IV.35: Variante d'aménagement n°05 après aménagement	119
Fig.IV.36: La variante d'aménagement retenue(variante n°05)	120
Fig.IV.37: Positionnement des sondes au niveau du bassin à houle (Modèle physique)	121
Fig.IV.38: Courbe de corrélation entre la modélisation physique et numérique.....	122
Fig.V.1: Impacts des différentes pressions au niveau de la zone d'étude	126

Introduction Générale

Introduction générale

Plus de 60 % de la population mondiale vit aujourd'hui en zone côtière, ce qui représente environ 3,8 milliards d'individus dans une bande terrestre qui n'excède pas 100 kilomètres par rapport à la ligne de rivage (**Lefevre, 2011**).

Les zones littorales situées à la frontière de la mer et de la terre ont toujours présenté un grand intérêt et sont, encore aujourd'hui, le siège d'activités multiples liées à la mer (pêche, navigation, tourisme balnéaire...) mais aussi terrestres (villes, industries au bord de l'eau...).

Ces zones constituent des environnements sensibles dans lesquelles se concentrent de multiples facteurs d'évolution aux actions, interactions et rétroactions complexes. Les hommes doivent s'intégrer en respectant, préservant et mettant en valeur à long terme les ressources naturelles, culturelles et sociales de ces zones.

La compréhension de la dynamique côtière est importante du fait des enjeux associés. En effet, les côtes sont en proie à une augmentation des activités économiques, notamment lié au tourisme, entraînant urbanisation, aménagements littoraux et concentration de la population. Dans ce contexte, la caractérisation des changements et des risques est nécessaire à la gestion de ces zones sensibles. (**Hamon, 2014**). C'est aussi un milieu très dynamique, la force des vagues et la vigueur des courants en témoignent, et le rendent parfois hostile et dangereux pour l'Homme. (**Certain, 2002**).

La compréhension de l'hydrodynamique littorale, associée à une meilleure compréhension des processus de types petites échelles (physiques, biogéochimiques) et des transports particuliers et sédimentaires associées, permettra par la suite de développer des modèles sur le long terme, qui ont pour but le suivi de la morphologie du fond et de la position de la ligne de côte. Dans ce contexte, les sujets de recherche fondamentaux sur les milieux côtiers rejoignent les intérêts sociaux, économiques et stratégiques.

La modélisation est une étape indispensable dans le cadre de gestion, elle requiert des informations fiables, localisées continuellement, actualisées et intelligemment structurées dans un système d'information géographique, valant outil d'aide à la prise de décision. On doit être en mesure de connaître à l'issue de cette phase de modélisation, la pertinence (ou non) de l'aménagement projeté. Les méthodes de modélisation peuvent prendre la forme physique ou numérique.

La côte de Skikda est actuellement siège à de nombreux travaux d'aménagement qui s'inscrivent dans le cadre du projet de l'aménagement de la baie de Skikda.

Afin de répondre aux besoins touristiques, de détente et de désenclaver la zone, le port de Tamanart (présente étude) fait partie de ces projets. Néanmoins l'impact de cette artificialisation sur les équilibres naturels n'est jamais nul, même si certains aménagements sont parfois présentés comme un moyen de développement économique, il n'en demeure pas

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

moins que l'impact sur l'environnement doit être pris en considération, afin de contrer, protéger et contribuer à une gestion efficace et un développement durable des zones côtières.

Notre travail porte sur : l'étude de l'implantation d'un port de plaisance au niveau de Tamanart à Skikda en utilisant les deux types de modélisation numérique et physique afin de comprendre le fonctionnement de l'hydrodynamisme côtier ,l'agitation à l'intérieur du port après son implantation ainsi que pour vérifier sa stabilité pour mieux cerner les interactions entre les paramètres hydrauliques et les réponses structurelles des ouvrages maritimes.

Le choix du site de notre étude s'est porté sur la partie Ouest de la baie de Skikda environ 8 km à l'Ouest de Collo qui est le linéaire côtier de « Tamanart », où l'implantation d'un port de plaisance y est prévue. Cette zone totalement naturelle éloignée du centre urbain.

Les questions qui se posent dans cette étude se présentent comme suit :

- Quelles mesures peut-on prendre pour évaluer le comportement des divers phénomènes pour arriver à un diagnostic personnalisé et proposer ainsi des solutions adéquates pour résoudre le problème d'agitation et de stabilité du port de plaisance de Tamanart ?
- Pour cerner les problèmes liés à l'artificialisation humaine sur la côte, il est utile de comprendre l'impact de ces implantations sur la côte de Skikda ?

Afin de répondre aux questions précédentes, une logique d'étude doit être suivie. Pour cela, on prévoit une méthodologie de travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur la zone d'étude, à savoir, l'énumération de ses principales caractéristiques géomorphologiques, sédimentologiques, météorologiques et océanographiques.

Dans le second chapitre, nous décrivons et présentons le site d'étude, le projet d'implantation du port de plaisance à Tamanart, son plan de masse, ses caractéristiques et ses dimensions d'aménagement.

Le troisième chapitre est destiné à la méthodologie sur laquelle ce travail est, ce chapitre énumère donc les différentes méthodes et techniques d'analyse utilisées lors de cette étude.

Dans le quatrième chapitre de résultats et discussion, nous présenterons, d'une part, les résultats de la modélisation numérique faite avec le logiciel Mike21 dont l'étude de la houle, des courants, le transport sédimentaire ainsi que l'étude d'agitation à l'intérieur du port avec leurs interprétations. D'autre part, nous présenterons les résultats des différentes variantes de la modélisation physique en bassin à houle et l'interprétation des résultats obtenus avec photos à l'appui afin de dégager une variante optimale dans le but de minimiser l'agitation à l'intérieur du port et d'atteindre sa stabilité maximale .

Le dernier chapitre concernera la mise en place d'une Gestion Intégrée des Zone Côtières « GIZC » pour la partie Ouest de la baie de Skikda.

Le travail est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités

I.1. Situation géographique

I.1.1. Baie de Collo

Collo est située au nord-est de l'Algérie à 70 km à l'ouest de Skikda abritée à l'ouest par un promontoire semi-circulaire dont les sommets boisés dépassant 100 m d'altitude. Le cap Bougaroun est le point septentrional le plus avancé de toute la côte algérienne et se trouve à une vingtaine de kilomètres à l'ouest. La région est réputée par ses belles plages.

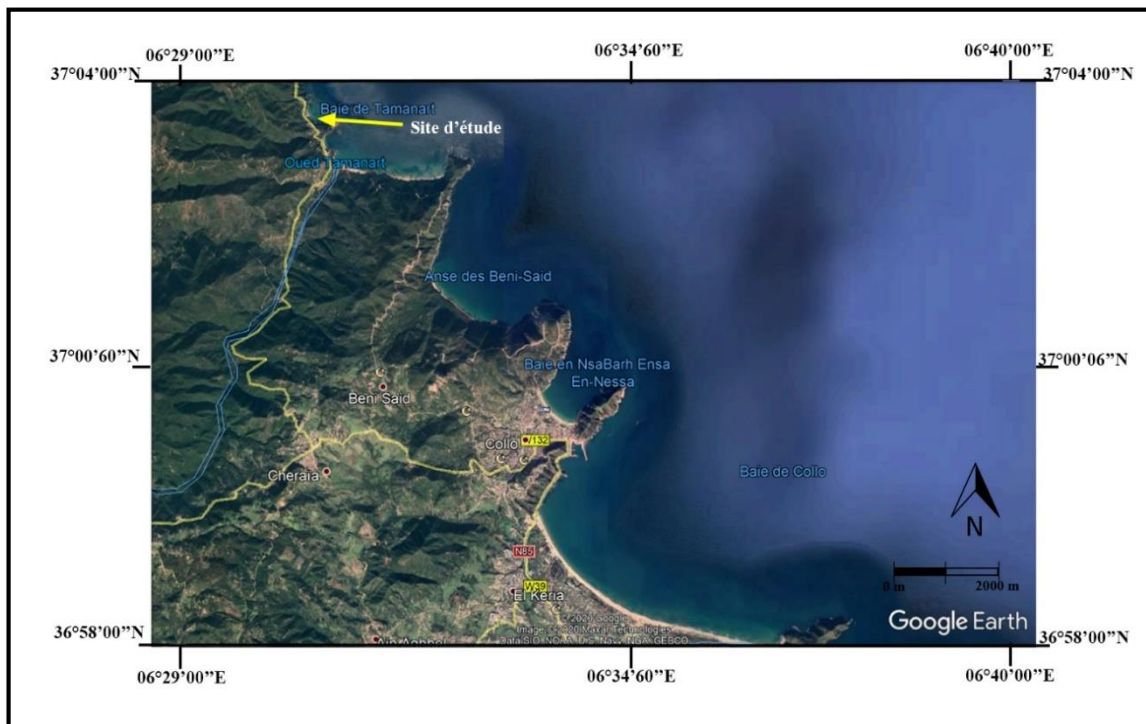


Fig. I.1 : Localisation de la baie de Collo (Google Earth, 2020)

I.2. Caractéristiques géographiques de Tamanart

Le site de Tamanart est situé derrière un cap rocheux orienté vers le Nord –Est, sur la côte on trouve des promontoires rocheux, galets et des avancés rocheuses. Il est circonscrit dans une crique rocheuse d'une étendue d'environ 400 m, avec des rochers qui affleurent en surface.

Au Sud-est, une anse accueille l'estuaire de l'Oued Tamanart, pouvant potentiellement charrier des quantités importantes de sédiments. (LEM, 2018).

I.3. Cadre touristique

La réalisation d'un port de plaisance à Tamanart intervient dans le cadre de la concrétisation de la politique de revalorisation et l'expansion des zones touristiques à travers le territoire national.

Ce projet est de dimension urbaine, il se veut porteur de croissance au niveau de la Wilaya de Skikda d'une part, et créateur d'une dynamique à l'échelle régionale (côte Est) d'une autre part.

Doté d'une flottille qui peut atteindre les 120 embarcations, il sera pourvu d'aménagements paysagers dédiés au public et aux professionnels où différentes prestations seront dispensées notamment celles en rapport avec le nautisme. (LEM, 2018).

I.4. Cadre géologique et morphologique

I.4.1. Cadre géologique

Les formations géologiques de la région d'étude appartiennent au domaine du Tell septentrional. On y distingue les terrains sédimentaires, métamorphiques et les roches ignées. Du fait de son ancienneté et de son histoire géologique, la Wilaya de Skikda est depuis le paléozoïque soumise à de fortes contraintes tectoniques.

I.4.1.1. Géologie régionale

L'édifice structural de cette région est caractérisé par un empilement de nappes de charriage. En effet, le socle, les formations appartenant au domaine des flysch, la dorsale calcaire kabyle ainsi que l'ensemble numidien se trouvent tous aujourd'hui en position allochtone.

Les limites de charriages représentent de véritables discontinuités géologiques. Ces discontinuités forment de véritables zones de faiblesses.

Du fait de leur nature rigide les roches cristallophylliennes appartenant au socle se distinguent essentiellement par des déformations cassantes.

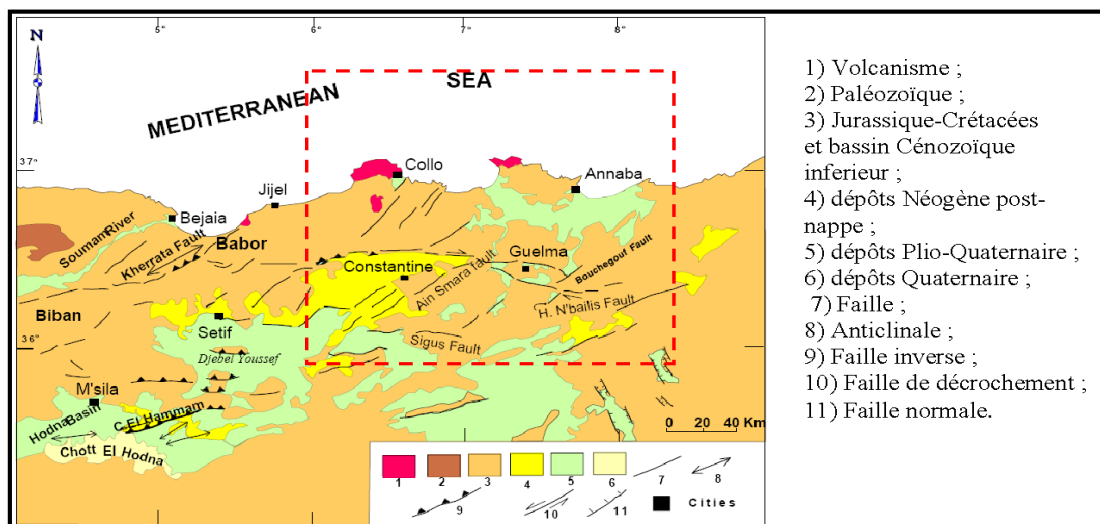


Fig. I.2 : Géologie du Nord-Est Algérien (LEM, 2018)

On relève pour les formations sédimentaires deux types de déformations :

- un style souple (déformations plicatives) ;
- un style cassant (failles, diaclases....).

I.4.1.2. Géologie locale

La wilaya de Skikda recèle un grand nombre d'affleurements carbonatés pouvant contenir des grottes et des formes karstiques, malheureusement très peu étudiés.

L'un des secteurs le plus prometteur est celui de la région d'El Kentour au niveau des Djebels Toumiets ; où on relève un réseau karstique très développé. Ce réseau karstique peut constituer un véritable parc naturel :

- Les massifs granitiques de Bougaroune.
- Les blocs chaotiques de granite.
- Les roches ultrabasiques, vestiges de croûtes océaniques (Tamanart).

En effet, cette wilaya recèle de véritables réserves naturelles géologiques (vierges et mal connues) ces richesses peuvent devenir une source de développement local. Les pistes sont nombreuses :

- Les grottes préhistoriques ou aménagées ;
- Les massifs granitiques de Bougaroune ;
- Les blocs chaotiques de granite ;
- La roche ultra basique, vestiges de croûtes océaniques (Tamanart).

I.4.2. Cadre géomorphologique

I.4.2.1 Géomorphologie régionale

Les chaînes du Tell et le massif de Collo jusqu'à Stora, avancent très près de la mer qu'ils bordent souvent en falaises à pic-nez laissant que rarement des espaces plats et sableux sur la côte. Les plus importants de ces derniers sont formés aux embouchures d'oued tel est le cas de la plage de la baie de Collo formée à l'embouchure de l'Oued El Guebli.

Ces massifs atteignant 1183m d'altitude à Djbel Goufi, sont en grande partie couverts de forêts de pins maritimes et de chênes qui ont été malheureusement ravagées par de grands incendies de forêts et qui demandent donc un programme de reboisement assez conséquent.

Les oueds qui s'écoulent vers la mer dans tous les sens géographiquement ; et entaillent cette topographie montagnaise. Le plus important d'entre eux est l'oued El Guebli qui possède une vallée relativement large.

I.4.2.2. Morphologie du plateau continental

La morphologie du plateau continental est en étroite relation avec le relief côtier. À l'Est, le plateau continental est réduit en face des Cap Kef Lekhal, Ras Bougaroun, Ras Keblba, Kef Sidi Yahia, Kef Djerba et Ras Frao. A ces endroits, la largeur du plateau continental varie de 1,8km à 4,5km.

Au large du golfe de Skikda, le plateau continental est important : du point de l'existence des embouchures de nombreux oueds, son extension varie de 11,4 à 15km. **(PAC 2004)**

I.4.2.3. Géomorphologie côtière

Les chaines côtières dont l'altitude varie entre 400m et 800m, s'allongent du Nord Est au Sud-ouest de l'Atlas tellien vers la Méditerranée et vers le Nord où se trouvent des oueds permanents qui recueillent les eaux superficielles dans les vallées alluviales de Guebli, de Bibi et de Saf-Saf.

I.4.3. Cadre sismique

La sismicité joue un rôle très important dans la tenue des ouvrages et leur stabilité du fait qu'elle a une grande influence sur ces derniers.

D'après le règlement parasismique algérien version 2003 établie par le Centre National de Recherche en génie Parasismique, la wilaya de Skikda est classée dans le Zone II « zone à sismicité moyenne ».

Cette classification reste à notre humble avis loin de la réalité et de la nature active de toute la région septentrionale d'Algérie orientale ; car les observations mettent en évidence de nombreux indices d'activité tectonique et de déformation durant le Quaternaire. **(LEM, 2018).**

I.5. La sédimentologie

La sédimentologie permet de savoir la constitution fréquentiel des différentes fractions qui composent le stock sédimentaire d'une part et de déterminer les paramètres de la dynamique : mouvement des sédiments (zone d'accumulation, zone d'érosion, sens du transit sédimentaire) d'autre part.

I.5.1. Sédimentologie régionale

Le site d'étude, partie Ouest de Collo, fait partie d'une côte sableuse. La partie Est du site d'étude est tapissée par une couverture sédimentaire composé essentiellement de sable fin et de sable moyen avec la présence d'une couverture rocheuse non négligeable à l'extrémité. Pour ce qui est du côté Ouest, la distribution est plus hétérogène, composé de sable grossier, très grossier et graviers avec une dominance rocheuse plus importante en allant de la côte vers le large. **(LEM, 2018)**

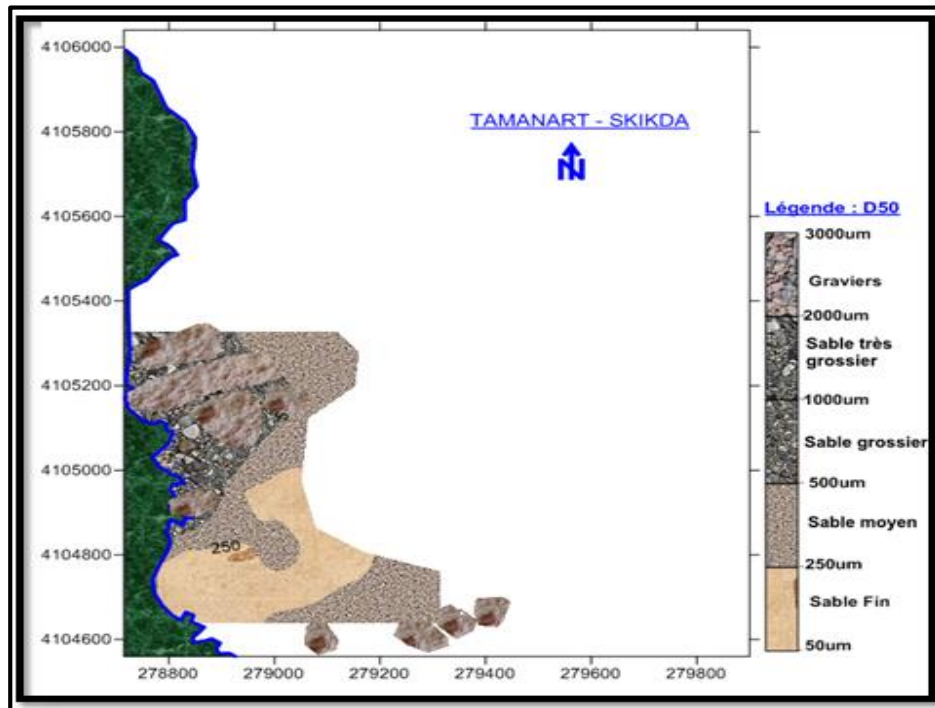


Fig. I.3 : Répartition spatiale des sédiments dans la région de Tamanart .Skikda (LEM, 2018)

I.6. Cadre climatique et océanographique

I.6.1. Données climatologiques

La détermination du caractère de climat est très importante pour mieux apprécier les régimes hydrodynamiques se déployant dans notre zone d'étude et qui sont responsables de toute transformation morfo-sédimentaire. (Otmani, 2014).

La région est caractérisée par le climat méditerranéen, semi-aride. L'été est une saison sèche et chaude et les pluies sont concentrées durant la saison froide et les saisons intermédiaires. L'altitude et les forêts à L'est et à L'ouest de Skikda promettent une fraîcheur et une pluviosité plus importantes par rapport au centre.

I.6.1.1. Températures

D'une manière générale, les températures dans les régions côtières connaissent un adoucissement dû à la proximité de la mer, c'est le cas de notre zone d'étude.

La région d'étude conçoit seulement quelques journées de chaleur excessive dépassant 30°C.

D'autre part les températures modérées même en hiver permettront la pratique de plusieurs activités en plein air toute l'année telle que les promenades, la chasse les sports ...etc. (LEM, 2018)

L'analyse des températures moyennes mensuelles du littoral présente une période estivale caractérisée par des températures qui sont relativement élevées avec 22.8°C en Juin, 25.6°C pour Juillet et 26.4°C au mois d'Août. Quant au mois le plus froid est celui de janvier avec 11.6°C.

La valeur maximale de la température est enregistrée durant le mois d’Août avec une valeur de 32.7°C, tandis que la température minimale est enregistrée durant le mois de Janvier et qui ne dépasse pas 6°C.

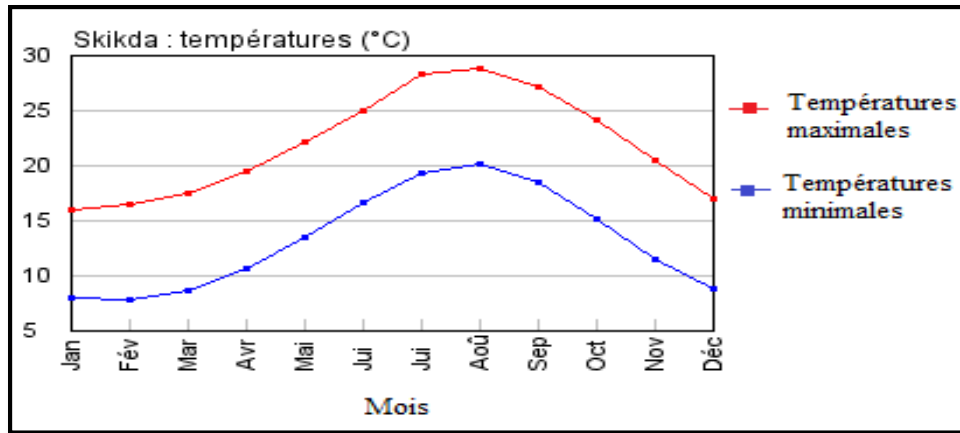


Fig. I.4 : Variations des températures maximales et minimales dans la région de Skikda (1996-2018) (ONM, 2019)

I.6.1.2. Précipitations

La wilaya de Skikda est l’une des régions les plus arrosées d’Algérie. La pluviométrie annuelle est très forte. Ces précipitations sont hivernales et ont lieu entre novembre et février. La partie Ouest reçoit une quantité de pluie relativement plus forte par rapport au centre et à l’Est. Le mois les plus pluvieux sont novembre et décembre. Les mois de juillet et août sont pratiquement secs. (LEM, 2018).

La moyenne annuelle couvrant la période qui s’étale de 2006 à 2016 est de l’ordre de 625.3mm.

Les précipitations se concentrent de Septembre à Mai, avec un maximum hivernal de 108.2 mm en Novembre ; celles-ci diminuent progressivement dès le mois de Mai pour devenir faibles de juin à août avec un minimum de 1.8 mm en juillet.

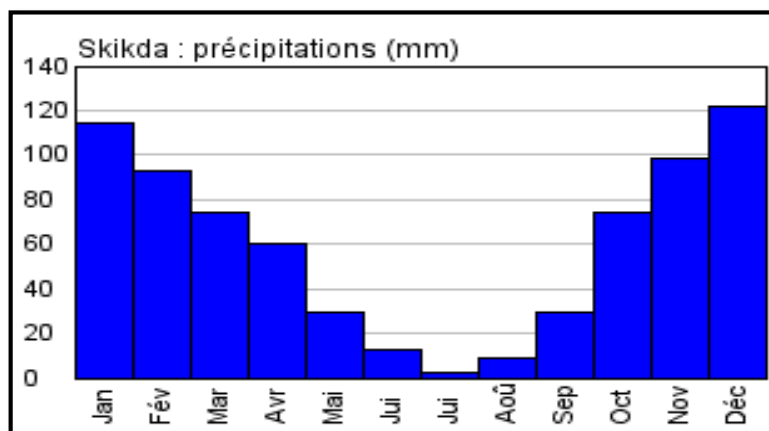


Fig. I.5 : Cumuls mensuels des précipitations dans la région de Skikda période 2006-2018(ONM, 2019)

I.6.1.3. Les vents

Pour une région côtière, la connaissance des régimes des vents est d'une extrême importance.

En effet, le vent est un générateur de vagues et de courants superficiels, son impact croît avec sa vitesse. Il joue donc un rôle important dans l'évolution géomorphologique des milieux littoraux d'une part, surtout les cotes basses d'accumulation des régions à climat sec et d'autre part dans l'évolution des forçage hydrométéorologiques responsables de la mobilité des sédiments le long des côtes (**Boutiba, 2009**).

Les vents les plus fréquents pendant la saison balnéaire sont ceux du Nord-Est et Sud-Ouest de juin à septembre. Le vent en provenance du continent provoque les remontées d'eau froide des fonds de la mer rendant la baignade difficile.

En hiver les vents dominants dans la région sont ceux du Nord-Ouest et Sud-Ouest et sont généralement chargés de pluies.

Le sirocco souffle surtout durant Août, septembre et octobre. Il est beaucoup plus rare durant les premiers mois de l'été. Le mois d'Août est le plus affecté par le sirocco.

La zone littorale de Skikda est particulièrement soumise à des vents très violents dont la vitesse peut atteindre les 130km/h en entraînant de multiples dommages tant sur la terre que sur la mer. (**LEM, 2018**)

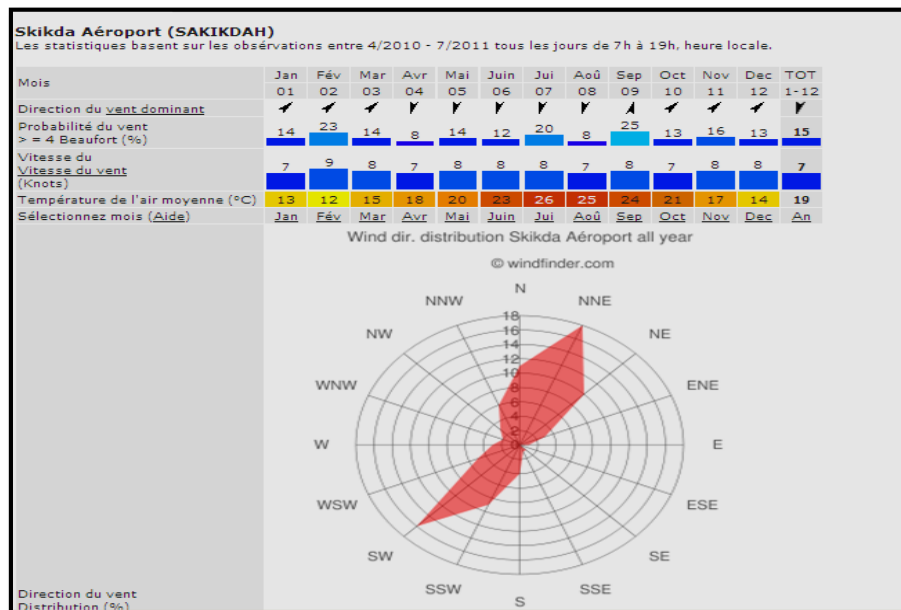


Fig. I.6 : Rose des vents de Skikda sur une période annuelle (**LEM ,2012**)

I.6.2. Données océanographiques

La dynamique sédimentaire littorale est étroitement dépendante de l'hydrodynamisme ainsi que de l'environnement hydrographique.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

Une connaissance approfondie des facteurs majeurs à savoir les houles, les courants et les débits des cours d'eau est donc nécessaire, pour déterminer leur action et leur intervention dans le remaniement des sédiments. (Otmani, 2014).

I.6.2.1. Les houles

La houle est le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds. La direction de propagation de la houle est liée à celle du vent et à la longueur d'onde de la houle.

Les houles du secteur Nord sont fréquentes toute l'année et donnent naissance à une succession de zones d'érosion et de sédimentation, ces houles sont à l'origine d'une légère résultante de dérive littorale dirigée de l'Est vers l'Ouest.

En été, les houles du Nord-Est ont pour effet la reconstitution des parties de plage érodées hiver. (LEM, 2018).

Les données de houles existantes sont celles issues :

- Des données du SSMO sur la période 1963 à 1970.
- Des observations de l'Institut Météorologique Royal Néerlandais (Knmi) de 1961 à 1980.

A. Principe de l'analyse de données du SSMO

Le principe de l'analyse de la houle au large est basé sur les observations faites à bord de navires. Les données sont reprises d'un document de l'U.S Naval Weather Command intitulé « Summary of Synoptic Meteorological Observation ». Ces données s'étalent sur une période de huit (8) années (1963-1970).

Une analyse statistique de ces données permet de définir les secteurs de la houle prédominant et leurs amplitudes respectives. (LEM, 2012).

Les observations de la houle sont classées par le SSMO par mois et annuellement en précisant les éléments suivant :

- Hauteurs des houles par direction, suivant la force du vent ;
- Hauteurs des houles, toutes directions confondues, suivant la force du vent ;
- Hauteurs des houles et la période, toutes directions confondues.

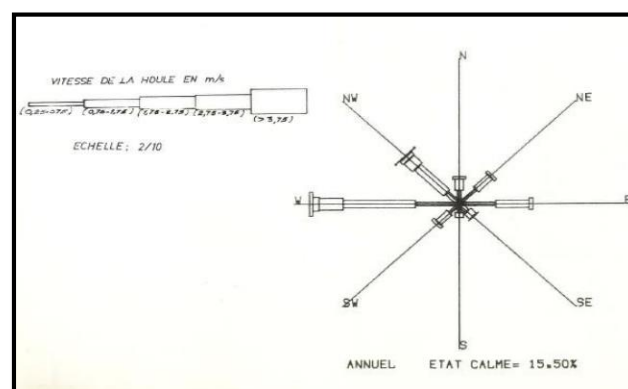


Fig. I.7 : Rose annuelle de la houle de la région de Skikda (LEM, 2012)

Tab. I. 1 : Fréquences mensuelles et annuelles (%) de la houle au large de Skikda par direction (SSMO, 1963-1970)

Mois \ Direction	W	N.W	N	N.E	E
Janvier	39.0	18.0	14	9.0	20.0
Février	48.9	17.9	10.4	7.5	15.3
Mars	43.4	24.9	10.4	6.7	14.6
Avril	44.4	21.2	7.2	10.0	17.2
Mai	36.6	15.1	9.9	18.4	20.0
Juin	33.6	16.3	11.3	17.1	21.7
Juillet	22.0	18.7	13.4	21.4	24.5
Août	20.0	18.2	13.4	21.4	26.9
Septembre	19.9	17.8	13.5	16.0	32.9
Octobre	38.2	13.9	10.3	13.7	23.9
Novembre	53.2	26.0	5.6	4.7	10.5
Décembre	51.5	25.5	8.9	6.1	8.0
Annuelle	37,60	19,50	10,70	12,60	19,60

a. Direction de la houle au large

L'analyse du tableau des fréquences d'apparition des houles par direction, par mois et par année permet de constater ce que :

- La répartition des houles sur l'année est assez régulière ;
- Les fréquences d'observation sur l'année des houles de directions Ouest, Nord-Ouest et Est sont les plus importantes ;
- La direction Ouest est dominante et notamment durant le premier, deuxième et quatrième trimestre ;
- Les directions Est et, à un degré moindre, Ouest sont plus dominantes en période estivale ;
- Les fortes houles proviennent du secteur Ouest

En conclusion :

On déduit que la répartition des houles est globalement concordante avec le régime des vents. (Otmani, 2014).

b. Les houles extrêmes du large

Les valeurs significatives des amplitudes des houles, en mètre, sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tab. I. 2 : Statistiques de la houle au large de Skikda (SSMO 1963-1970)

Période de retour	N 335° (NW) H (m) T(s)	N15° (N)	N 25° (NE)	N 70° (E)
Centennale	H = 11.56	H = 9.65	H = 6.83	H = 5.61
	T = 15.79	T = 14.76	T = 12.76	T = 11.64
Cinquantennale	H = 10.71	H = 9.06	H = 6.35	H = 5.24
	T = 15.36	T = 14.40	T = 12.34	T = 11.26
Vingtennale	H = 9.71	H = 8.05	H = 5.67	H = 4.75
	T = 14.80	T = 13.72	T = 11.70	T = 10.71
Décennale	H = 8.90	H = 7.27	H = 5.16	H = 4.38
	T = 14.30	T = 13.13	T = 11.17	T = 10.28
Biennale	H = 7.03	H = 5.46	H = 4.00	H = 3.51
	T = 12.93	T = 11.49	T = 9.80	T = 9.13

c. Relation amplitude-période de la houle au large

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

Tab. I. 3 : Répartition des états de mer par période (SSMO, 1963-1970)

Etat de la mer	Période de la houle					
	<6s	6 h7s	8 à9s	10 à11s	12 à13s	>13 s
au large (degré)						
Calme	5,10	0,10			-	
0	20,00	1,60	0,20	0,10		-
1	11,80	6,35	1,33	0,30	0,40	-
2	1,50	2,85	1,95	0,55	0,15	0,10
3	0,20	0,60	0,70	0,35	0,15	
4	0,20	0,30	4,23	0,40	0,10	-
Total	38,80%	11,80%	4,38%	1,70%	0,80%	0,10%

Les houles sont de degré inférieur ou égal à 2 (amplitudes max = 2,75 m) et ayant des périodes inférieures ou égales à 7s représentent 86% de l'ensemble des résultats. Ceci montre qu'aux houles de petites amplitudes correspondent de petites périodes.

Tab. I. 4 : Relation état de mer – Hauteur de l'agitation

Degrés	Amplitudes	Appellations
Calme	<0,25 m	calme
Degré 0	0,25 à 0.75 m	ridée ou belle
Degré 1	0,75 à 1,75 m	modérée
Degré 2	1,75 à 2,75 m	agitée
Degré 3	2,75 à 3.75 m	forte
Degré 4	>3.75 m	très forte

d. Caractéristiques de la houle au large

A partir de la relation entre les périodes et les amplitudes de la houle observées, on établit une loi de régression donnant en fonction de la hauteur de la houle sa fréquence de dépassement.

Ci-après sont données les courbes de régression statistique de la houle au large pour les différentes directions. On définit par ailleurs, les probabilités d'apparition associés aux périodes de retour ces probabilités sont définies par la relation suivante :

$$P_n = 1 / (3*365*n) \quad \dots\dots(I.1)$$

Où, n : période de retour

I.6.2.2. La marée

La marée est un mouvement périodique qui affecte le niveau général des océans et des mers. Combinée à la force d'inertie générée par les mouvements orbitale de la terre.

L'amplitude de la marée est généralement faible en Méditerranée ; elle présente d'importants écarts suivant l'époque lunaire et est le plus souvent masquée par la surélévation ou l'abaissement du niveau de l'eau engendré par des variations de conditions climatologiques. En moyenne, la marée de pleine lune est de 25 à 30 cm et celle de la nouvelle lune de 5 à 15 cm. Dans ce genre d'étude, les valeurs du marnage sont importantes pour le dimensionnement des ouvrages.

De forts vents marins locaux peuvent aussi, par action directe sur la surface de la mer, entraîner au rivage un gonflement du plan d'eau, le niveau de la surface de la mer pourrait ainsi atteindre une surélévation maximale de 1 m environ. (LEM, 2009)

I.6.2.3. Les courants

Le courant marin, par définition, est une masse d'eau qui se déplace sur de très longues distances, à la surface ou en profondeur des mers et des océans. Dans son déplacement le courant est susceptible de transporter des sédiments et de modeler le paysage littoral. (Aoudj, Bouaziz, 2014).

Les courants le long d'une côte sont en général de quatre types : les courants généraux, les courants de marée, les courants de dérive dus au vent et les courants générés par la houle.

Seuls les courants dus à la houle sont susceptibles d’agir sur le transit littoral dont :

a. Les courants de retour

Le courant de retour (ou "undertow"), aussi appelé courant de compensation, est présent sur toutes les côtes exposées aux houles. En milieu côtier la houle transporte de l’eau dans sa direction de propagation. Cela est particulièrement vrai dans la zone de déferlement. Le courant de retour permet donc de compenser cet apport de masse en transportant les masses d’eau vers le large. (Aoudj, Bouaziz, 2014).

b. Les courants de dérive littorale

Lorsque la houle arrive à la côte avec une incidence oblique. Elle donne naissance à un courant de dérive littoral, la vitesse de celui-ci est maximale pour un angle d’incidence de 50° à 60° .

Ce courant parallèle au rivage, qui se manifeste dans la zone de déferlement des vagues, joue un rôle essentiel dans le déplacement des sédiments le long de la côte et dans l’alimentation des plages en sable et en galet. (Otmani, 2014).

A proximité du fond, la vitesse de ces courants diminue très rapidement et devient pratiquement négligeable.

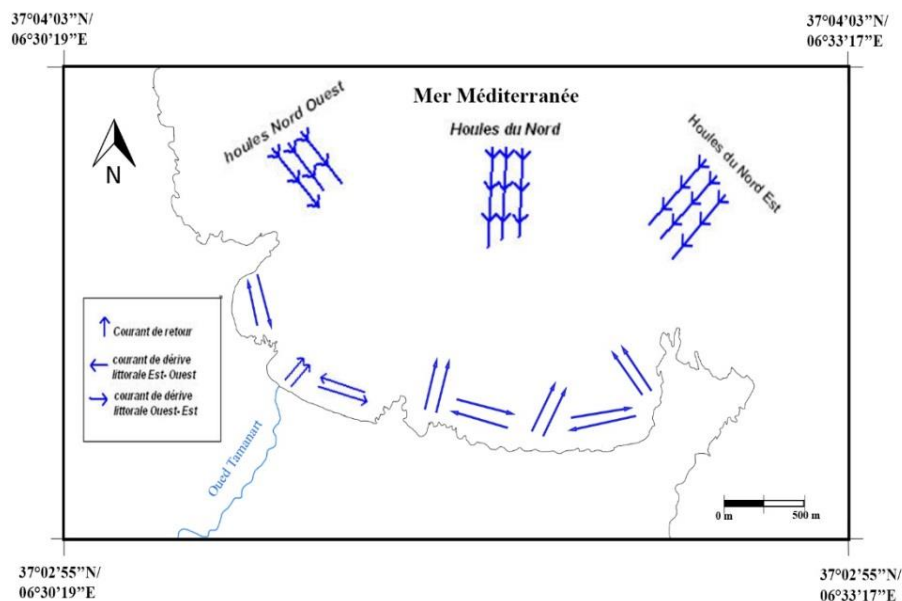


Fig. I.8 : Bilan des courants de dérive et dynamique sédimentaire dans la baie de Tamanart (LEM, 2018)

I.7. Le réseau hydrographique

La région de Tamanart puise ses ressources en eau des eaux souterraines, des eaux de surface. Une grande partie de ces ressources proviennent des eaux de surface (retenues d’eau, oueds...etc.)

Etude d’agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

L'action de la tectonique et de l'érosion a provoqué un morcellement des réservoirs, donnant des aquifères dont la puissance est limitée. De ce fait, leur exploitation intensive pose de réelles difficultés. Sur les flancs nord, la morphologie accidentée avec ses pentes raides favorise, plutôt, le ruissellement au lieu de l'infiltration. (LEM, 2018).

Les principaux aquifères situés dans la région de Skikda se trouvent dans les formations récentes des plaines alluviales côtières et intra-montagneuses. La plaine de Telezza constitue le principal aquifère de la région de Collo, l'oued Saf-Saf pour la région de Skikda et Guerbes pour celle de Ben Azzouz.



Fig. I.9 : Situation et extension des aquifères dans la baie de Skikda (LEM, 2018)

Les oueds dans la région de Skikda ont un débit assez conséquent pour alimenter les plages en sédiments. Il ne faut pas donc négliger ces apports pour le futur projet de Tamanart.

Ces aquifères côtiers sont soumis à une très forte pression hydraulique du fait de leur surexploitation. Les pompages excessifs au cours de ces dernières années ont provoqué un abaissement significatif des niveaux des nappes, en modifiant, dans certains secteurs, le transport normal de sels vers la mer et en inversant le gradient d'écoulement souterrain. Malgré l'importance du nombre de forages, les réserves en eau souterraine s'avèrent insuffisantes pour assurer les besoins toujours grandissants. (LEM, 2018).

I.7.1. Les aquifères

La construction des ouvrages lourds sur la côte et notamment sur les côtes sableuses peuvent avoir des conséquences sur les aquifères et inversement. Dans la région de Skikda, on distingue donc :

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- La nappe de l'Oued Guebli (plaine de Collo et Tamalous) ;
- La nappe du Saf-Saf ;
- La nappe de l'oued Kebir Ouest (Guerbès) ;
- La nappe d'Azzaba Zeramna (El Hadaik) (oued Zeramna) ;
- Plaine d'Emzedj Edchiche ;
- Sidi mezghiche (aquifère traversée par l'oued Ameur) ;
- Région de Sidi mezghiche (forage relativement ; aquifère profond, entre 175 et 252m.)

I.7.2.Oued de Tamanart

L'oued Tamanart n'est autre que la limite physique entre la commune de Cheraia et la commune de Collo, c'est une rivière à écoulement temporaire (il apparaît lors de la saison des pluies et disparaît après quelques mois de sécheresse), il s'écoule vers la mer qui en est l'exutoire. Il joue le rôle de « Tampon » entre la mer et la terre et protège le littoral des tempêtes et de l'érosion due aux vagues et aux courants.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude et du projet

II.1. Site d'étude

Le site de Tamanart est situé à environ 8 km à l'Ouest de Collo, dans une zone totalement naturelle éloignée du centre urbain.

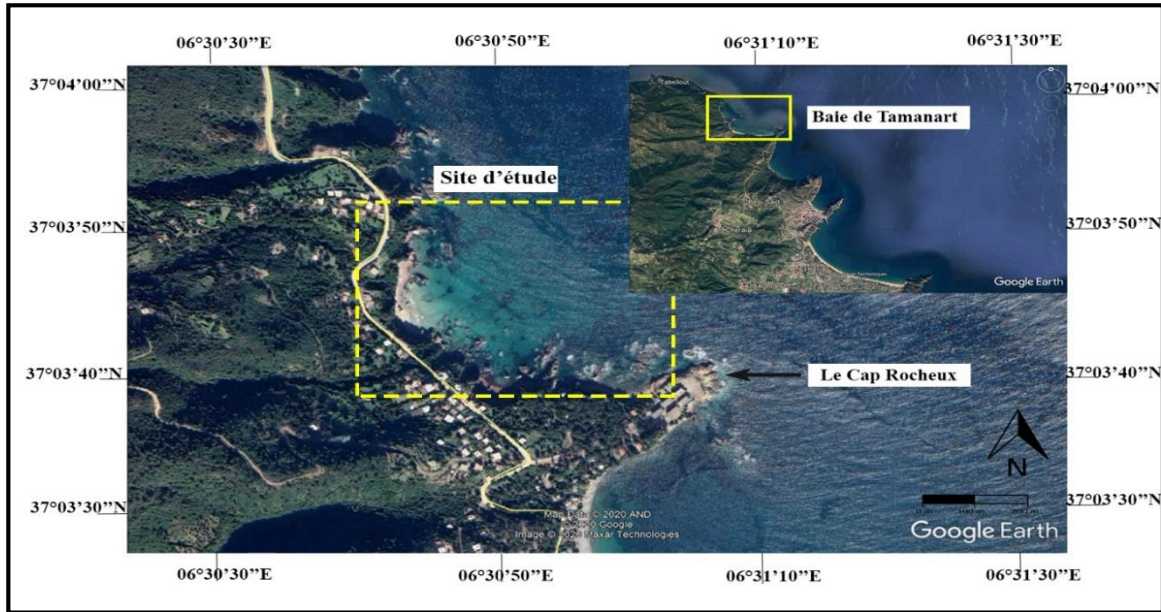


Fig. II.1 : Localisation de la zone d'étude (Google Earth, 2020)

Tamanart s'étend entre deux sites :

Tamanart 01 : 37° 03' 22'' de latitude Nord / 6° 32' 34'' de longitude Est

Tamanart 02 : 37° 03' 38'' de latitude Nord / 6° 32' 10'' de longitude Est

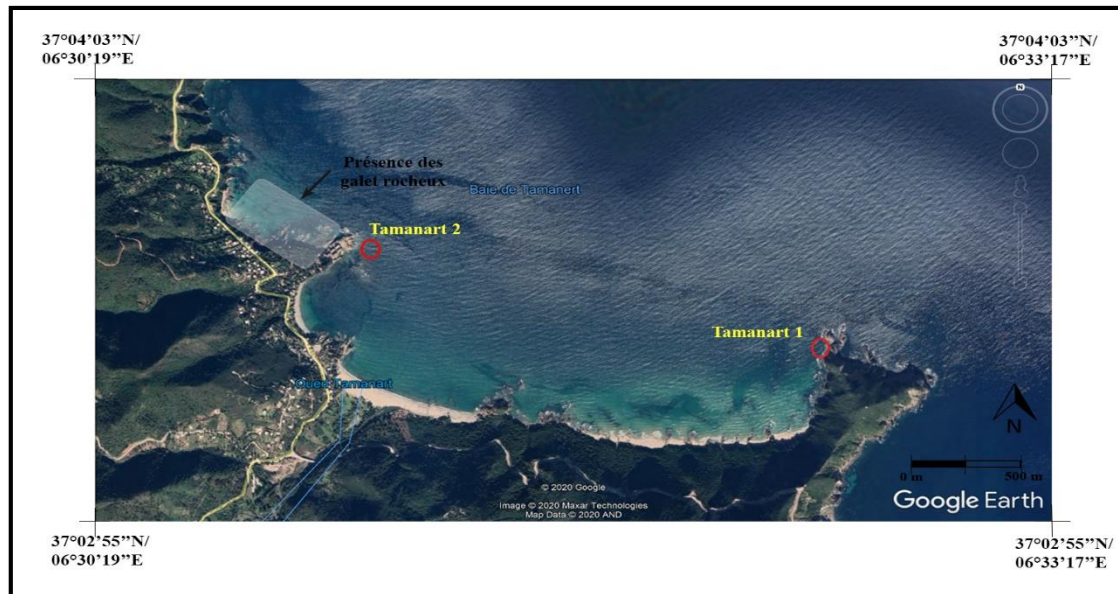


Fig. II.2 : La baie de Tamanart avec la présence des blocs rocheux (Google Earth, 2020)

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

II.2. Cadre géologique et géomorphologique :

II.2.1. Cadre géologique :

Certains segments de certains Oueds de Tamanart (Oued Guebli, Oued Saf-saf...), présentent des linéarités parfaites qui nous emprunteraient des segments de discontinuités géologiques ou accidents d'origine tectonique (fractures, failles, diaclases... etc.)

En effet, Tamanart recèle de véritables réserves naturelles géologiques. Ces richesses peuvent devenir une source de développement local, de création d'emplois et d'animation.

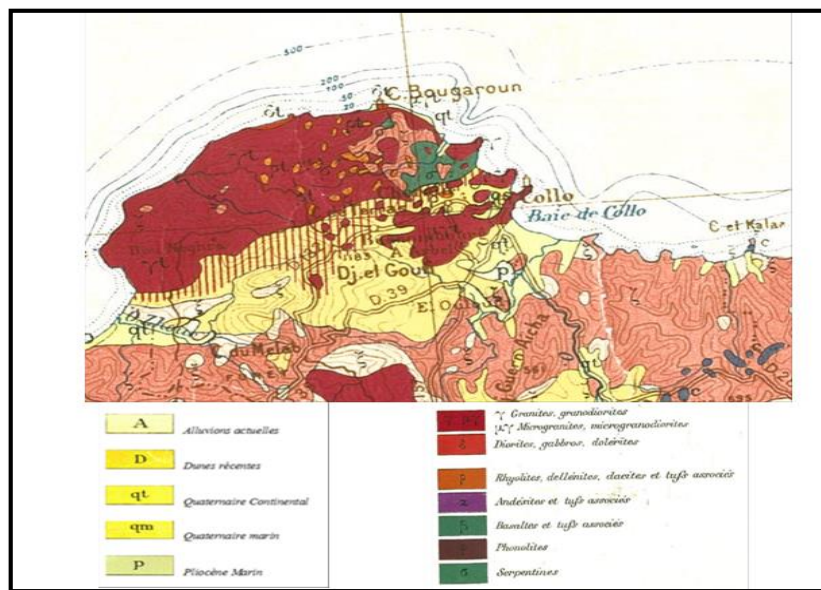


Fig. II.3 : Géologie de Tamanart (Carte géologique de l'Algérie ,1952)

II.2.2. Cadre géomorphologique :

Du point de vue géomorphologique, la zone d'étude est formée d'une accumulation de géomatériaux hétérométriques (sables, galets et blocs), au pied d'un des versants du Cap Bougaroun. Ce versant est entaillé par le talweg de l'oued Tamanart qui débouche sur la plage. La pente moyenne des versants est de 30% et la plage de Tamanart est bordée de petites falaises d'une dizaine de mètres de hauteur.

II.3. Présentation du futur port de plaisance de Tamanart (selon l'étude effectuée au sein du LEM)

II.3.1. Plan descriptif

Par décret présidentiel (N°88-232 du 05/11/1988-Jo/N°51-du 14/12/1988), 09 zones touristiques ont été créées au niveau de la wilaya de Skikda.

Le futur projet du port de plaisance s'inscrit dans la ZEST de Tamanart, celle-ci :

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- S'étend sur 67 Ha
- Est délimitée par : la mer au nord, oued Tamanart et le cap rocheux à l'Est et par le cap Bougaroune à l'ouest. Il se caractérise par une faible urbanisation en raison de ses particularités physiques, conditionnant ainsi les possibilités de développement en matière de capacité d'accueil.

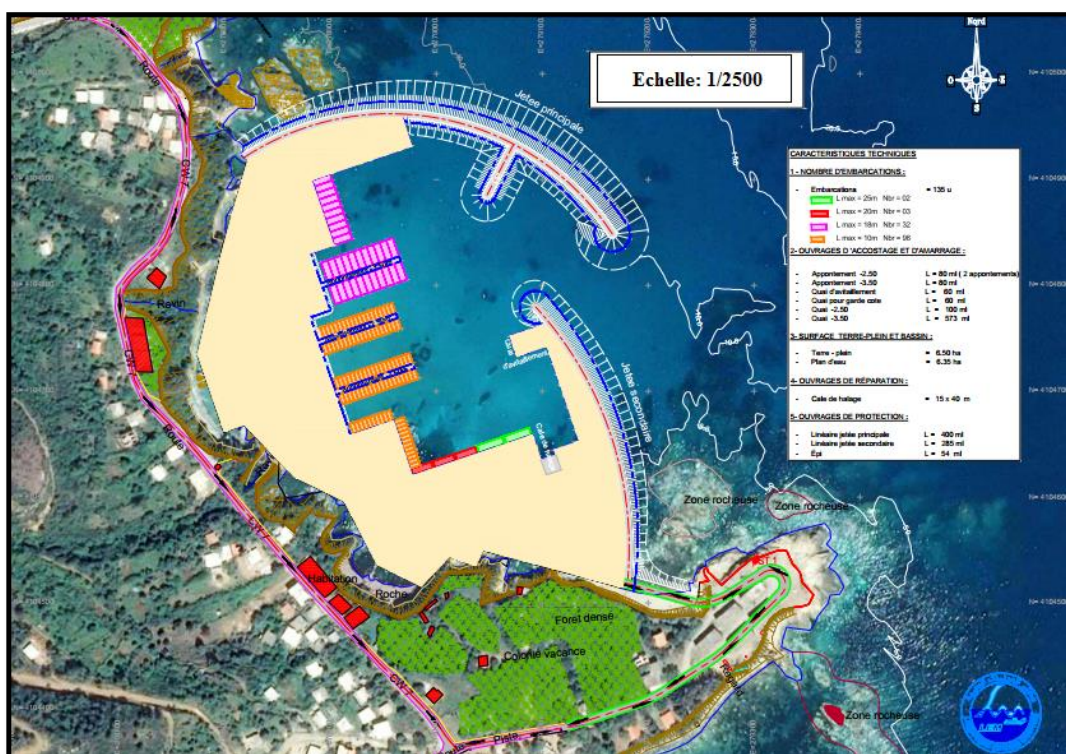


Fig. II.4 : Plan d'aménagement du port de Tamanart (LEM, 2018)

La construction d'un ouvrage portuaire peut par exemple modifier notablement le régime naturel de la côte et entraîner la réalisation d'ouvrages complémentaires onéreux pour palier à une érosion ultérieure des plages voisines.

Pour cela il faut appréhender au mieux le fonctionnement complexe du port dans toutes ses dimensions en intégrant les trois interfaces majeures définies ci-dessous :

A-L 'interface Mer / Abri nautique

Les conditions de navigation maritime étant fortement dépendantes des aléas climatiques, il est important de pouvoir offrir à tout navigateur des endroits sûrs pour s'abriter et attendre en toute sécurité une accalmie. Dans la zone de Skikda ; il faudrait se rapprocher de la baie de Skikda pour retrouver 4 ports (2 commerciaux et 2 de pêche). En dehors de cette zone ; le port de Tamanart en plus d'être un port de plaisance, offre une opportunité pour desservir certaines zones lointaines et constituer ainsi un relai pour les zones Est algérien.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

Des parties de ports de commerce ou de pêche peuvent être affectées à cet usage. Il arrive aussi que les plaisanciers se réfugient dans les quelques baies naturelles de notre littoral lorsqu'elles sont bien abritées pour les coups de vents considérés.

Des équipements modestes y sont souvent aménagés, comportant la mise en place d'une zone de mouillages sur corps-mort ou un simple balisage.

Mais le mauvais temps n'est pas la seule cause de relâche des bateaux. De graves avaries survenues en cours de route, ou le réapprovisionnement en combustible, eau ou vivres, devenus insuffisant par suite de circonstances imprévues, forçant même parfois les bateaux à changer d'itinéraire et à entrer dans un port qui n'est pas leur port de destination.

Pour répondre à ces besoins, des ouvrages d'infrastructures, généralement des digues, ont été construites, assurant alors physiquement l'interface entre la mer et les bassins portuaires, pour finalement permettre de remplir plusieurs fonctions :

- Un abri contre les mauvaises conditions de navigation au large ;
- Un refuge suite à des circonstances imprévues hors climatiques ;
- La tranquillité d'évolution et de stationnement des bateaux sur les plans d'eau intérieurs
- La régulation du transit sédimentaire le long du littoral ;
- La prévention contre les diverses pollutions accidentelles ;
- Le prolongement de la promenade piétonne offrant au promeneur un nouvel angle d'observation du port.

B-L 'interface Bassin / Terre

Le premier objectif, commun à tous les aménagements portuaires, est ici d'assurer une fonction "escale". Il s'agit d'une halte délibérément choisie par le plaisancier.

En croisière sur un littoral, diverses raisons peuvent amener le plaisancier à faire escale : souhaits de détente ou de connaissance de l'arrière-pays, conjugués le plus souvent avec des impératifs essentiels comme le ravitaillement en nourriture et autres matériels consommables, l'acquisition de combustible, la réparation sur son bateau ou le rejet des déchets.

C-La relation ville /port

Un port de plaisance devrait constituer un pôle d'aménagement majeur pour la commune qui l'héberge. Il est bien sûr un atout touristique qui ne doit pas se tourner uniquement vers le plaisancier (en témoignent les réflexions engagées dans de nombreuses régions sur ce "produit" touristique particulier). Mais il participe aussi pleinement au développement économique et culturel du territoire sur lequel il se situe. La région de Tamanart de par son *Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique*

influence touristique importante est très isolée du proche continent ; la construction d'un tel port et donc des moyens de communications et de liaison vont désenclaver cette zone.

Les ports sont des sites aménagés sur une côte pour l'exercice permanent des fonctions liées aux activités maritimes.

Le site portuaire est d'abord un abri naturel ou artificiel, il est renforcé par des défenses construites par l'homme : digues, jetées, brise-lames ...etc.

Le port doit assurer de façon permanente et efficace l'accès et les manœuvres des navires (accostage, appareillage, la manutention, des marchandises ...).

Un port de plaisance doit disposer :

- **De plans d'eau et d'ouvrages d'accostage** : susceptibles d'accueillir à flot les navires : séjournant en permanence dans le port ; en escale ou, en tout cas, n'effectuant qu'un séjour temporaire ; en réparation ;
- **D'ouvrages** : destinés au parcage et à la mise à l'eau d'unités stationnant à terre sur terre-plein ou sous hangar ;
- **De terre-pleins** : aménagés pour le stationnement des véhicules automobiles des propriétaires des navires ; pour l'entretien et la réparation des bateaux asséchés.

II.3.2. Plan de masse du port de Tamanart

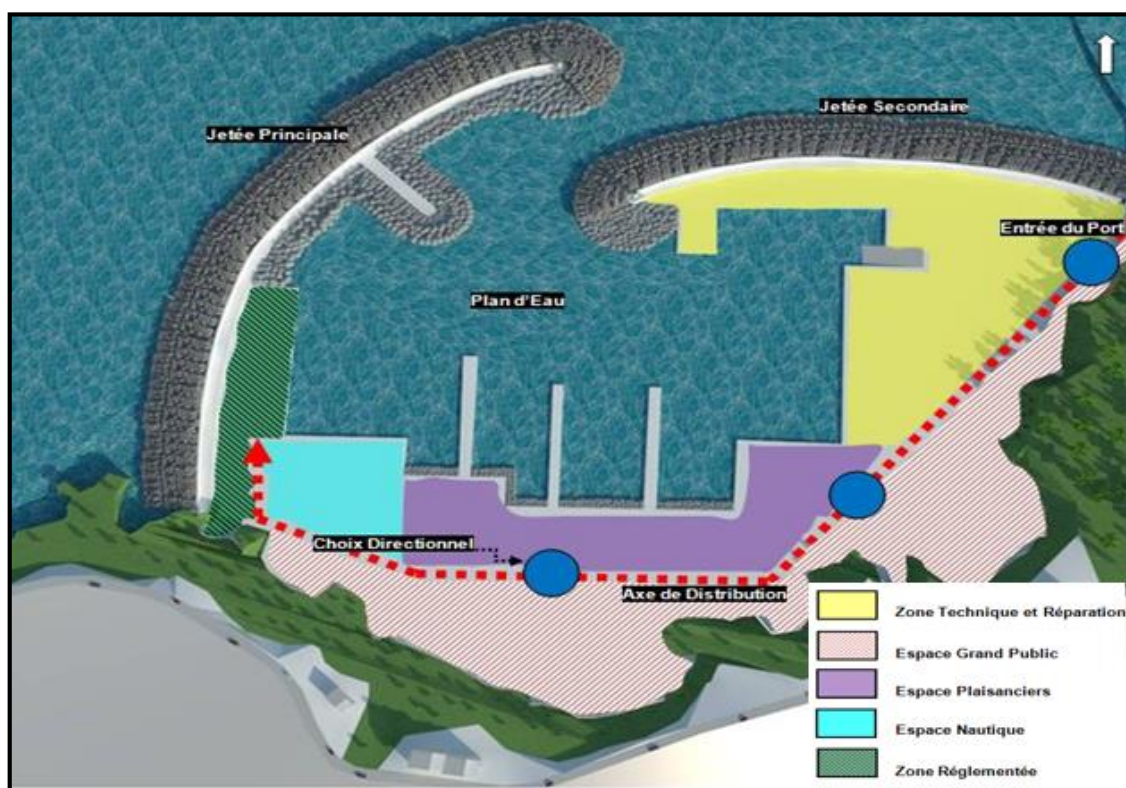


Fig. II.5 : Plan de masse du port de plaisance de Tamanart (LEM, 2018)

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

Tab. II. 1 : Fiche Surfactive du futur port de Tamanart (Skikda) (LEM ,2018)

Zone Technique et Réparation	Désignation		Surface (m ²)	Total (m ²)
	Avitaillement	Magasins lubrifiants	100	16 345
		Réservoir carburant	100	
		Cuve huile usager	100	
		Volucompteurs	-	
	Réparation	Ateliers de réparation	1080	
		Aire d'hivernage	2250	
Parking 20 places		945		

Espace Grand Public	Désignation		Surface (m ²)	Total (m ²)
	Equipement Multifonctionnel		930	17 350
	Installations saisonnières		265	
	Aménagements paysagers urbains		13 605	
	Parking 95 places		2550	

Espace Plaisanciers	Désignation		Surface (m ²)	Total (m ²)
	Magasins d'Accastillage		726	11 375
	Promenade urbaine		6879	
	Parking 60 places		1885	

Zone Réglementée	Désignation		Surface (m ²)	Total (m ²)
	Garde côte		268	16 729
	Administration /Capitainerie		150	
	Poste de Police		150	
	Unité de protection civile		150	
	Parking 40 places		1329	

II.3.3.Caractéristiques et dimensions de l'aménagement du port :

Le plan d'eau est protégé par deux jetées :

- Une jetée principale de longueur d'environ 400 ml fondée à des profondeurs variant entre 0 et -11 m.
- Une jetée secondaire de longueur d'environ 285 ml fondée à des profondeurs variant entre 0 et -7 m.

De plus :

- Un épi de longueur d'environ 54 ml fondée à des profondeurs variant entre -9 et -8 m ;
- Trois appontements de 80 ml ;
- Un linéaire de Quai 673ml ;
- Une cale de halage de 40 x 15 m pour la mise à sec des embarcations ;
- Un terre-plein ayant une superficie totale 6.50 Ha ;
- La surface totale du plan d'eau est d'environ 6.35 Ha,
- Le nombre total d'embarcation pouvant y accoster est de : 135 unités ;
- La passe d'entrée est orientée vers le Sud-Est d'une largeur d'environ 48 m.

II.3.4.Description des ouvrages de protection (selon la variante 01 proposée par le LEM)

Le pré-dimensionnement des ouvrages de protection a été effectué avec la formule d'Hudson.

A. Jetée principale

- **Profil courant : Ce profil est composé de :**

-Un noyau en tout – venant de carrière (0-200kg) arasé à la cote + 1.00m avec une pente de 3/2.

-Une première couche de transition en enrochement de catégorie (200-500kg) du côté extérieur, arasée à la côte + 2.15 m et d'une épaisseur de 1.15m. La pente de talus est de 3/2, et du côté intérieur la protection est assurée par des enrochements de catégorie (1-3t) arasée à la cote +2.50 à une pente 3/2.

-Une deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (3-6t), arasée à la cote + 4.85 m et d'une épaisseur de 2.70m. La pente de talus est de 3/2.

-Une carapace en BCR de 50t, arasée à la cote + 10.45m et d'une épaisseur de 5,60m. La pente de talus est de 3/2.

-Un couronnement en béton armé en forme de "L". Ce dernier est constitué d'un mur de garde d'épaisseur 1,50m au sommet et 2.00 m à la base, arasé à la cote +9.50m et d'une dalle arasée à +2.50m, d'épaisseur 1,50m.

-Un tapis anti affouillement en TVC (0-200kg) d'épaisseur minimum est de 1m et une risberme de largeur 5,00m.

-Une butée en enrochements naturels (3-6t) dont la risberme est de 4.00 m et d'épaisseur verticale 2,70m. La pente de talus est de 3/2.

- **Profil musoir : Ce profil est composé de :**

-Un noyau en tout – venant de carrière (0-200kg) arasé à la cote + 1.00m avec une pente de 3/2.

-Une première couche de transition en enrochement de catégorie (200-500kg), arasée à la côte + 2.15m et d'une épaisseur de 1,15m. La pente de talus est de 3/2.

-Une deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (3-6t), arasée à la côte + 4.85m et d'une épaisseur de 2.70m. La pente de talus est de 3/2.

-Une carapace en BCR de 65t, arasée à la cote + 11.00m et d'une épaisseur de 6,15m. La pente de talus est de 3/2.

-Un couronnement en béton armé en forme de "L". Ce dernier est constitué d'un mur de garde d'épaisseur 1,50m au sommet et 2.00m à la base, arasé à la cote +9.90m et d'une dalle arasée à +2.50m, d'épaisseur 1,50m.

-Une butée en enrochements naturels (3-6t) dont la risberme est de 4.00m et d'épaisseur verticale 2,70m. La pente de talus est de 3/2.

-Un tapis anti affouillement en TVC (0-200kg) d'épaisseur minimum est de 1m et une risberme de largeur 5,00m.

B. Jetée secondaire

- **Profil courant : Ce profil est composé de**

-Un noyau en tout – venant de carrière (0-200kg) arasé à la cote + 1.00m avec une pente de 3/2.

-Une première couche de transition en enrochement de catégorie (200-500kg), arasée à la côte + 2.15m et d'une épaisseur de 1.15m. La pente de talus est de 3/2.

-Une deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (1-3t), arasée à la côte + 4.35m et d'une épaisseur de 2.20m. La pente de talus est de 3/2.

-Une carapace en BCR de 20t, arasée à la cote + 8.45m et d'une épaisseur de 4,10m. La pente de talus est de 3/2.

-Un couronnement en béton armé en forme de "L". Ce dernier est constitué d'un mur de garde d'épaisseur 1,50m au sommet et 2.00 m à la base, arasé à la cote +7.50m et d'une dalle arasée à +2.50m, d'épaisseur 1,50m.

-Un tapis anti affouillement en TVC (0-200kg) d'épaisseur minimum est de 1m et une risberme de largeur 5,00m.

-Une butée en enrochements naturels (3-6t) dont la risberme est de 3.00 m et d'épaisseur verticale 2,70m. La pente de talus est de 3/2.

- **Profil Musoir : Ce profil est composé de :**

Un noyau en tout – venant de carrière (0-200kg) arasé à la cote + 1.00m avec une pente de 3/2.

Une 1^{ère} couche de transition en enrochement de catégorie (200-500t), arasée à la cote + 2.15 m et d'une épaisseur de 1,15m. La pente de talus est de 3/2.

Une 2^{ème} couche de transition en enrochement de catégorie (1-3t), arasée à la cote + 4.35m et d'une épaisseur de 2.20m. La pente de talus est de 3/2.

Une carapace en BCR de 20t, arasée à la cote + 8.45 m et d'une épaisseur de 4,10 m. La pente de talus est de 3/2

Un couronnement en béton armé en forme de "L". Ce dernier est constitué d'un mur de garde d'épaisseur 1,50m au sommet et 2.00 à la base, arasé à la cote +7.50m et d'une dalle arasée à +2.50m, d'épaisseur 1.50m.

Une butée en enrochements naturels (3-6t) dont la risberme est de 3.00m et d'épaisseur verticale 2.70m. La pente de talus est de 3/2.

Un tapis anti affouillement en TVC (0-200kg) d'épaisseur minimum est de 1m et une risberme de largeur 5.00m.

C. Epi

Cet épi est composé de :

-Un noyau en tout – venant de carrière (0-200kg) arasé à la cote + 1.00m avec une pente de 3/2.

-Une première couche de protection des enrochements de catégorie (1-3t) arasée à la côte +2.50.

II.4.L'agitation et la stabilité du port :

Avant toute implantation d'un port, il est nécessaire de définir les conditions d'agitation de la houle au niveau des quais et appontements de ce dernier.

L'agitation de houle dans les ports est basée sur un grand nombre d'hypothèses, les plus souvent retenues sont les suivantes :

- Le fluide est parfait et incompressible.

- Les sollicitations atmosphériques à la surface libre (gradient de pression et vent) sont négligées ;
- Le fond est fixe et imperméable ;
- La hauteur de la houle est faible à la fois par rapport à sa longueur d'onde et à la profondeur ;
- L'hypothèse de pente douce est appliquée afin de négliger les ondes dites évanescentes.

De plus il faut prendre en considération le critère de stabilité des blocs constitutifs les différentes parties du port ainsi que leur tenue et leur résistance face aux actions de la mer.

II.5. Visite du site et reportage photographique :

Le 29/12/2019 une visite sur le site d'étude a été effectuée. Cette visite avait pour objectif d'étudier l'état des lieux de point de vue érosion, ouvrage de protection, et rejet...etc.

La visite s'est déroulée comme suit :

- Inspection visuelle de la zone d'étude.
- Prise de photos.



Fig. II.6 : Vue panoramique du site d'étude (Tamine et Abdelkebir, 2019)



Fig.II.7 : Illustrations de la plage de Tamanart (Tamine et Abdelkebir, 2019)



Fig.II.8 : Traces de *Posidonia oceanica* (Tamine et Abdelkebir, 2019)

Chapitre III : Matériel et méthode

III.1. Introduction

Les aménagements portuaires occupent une place importante dans le littoral Est algérien, on compte 4 types différents : commercial, militaire, de pêche et de plaisance.

Avant la réalisation de tout projet, la connaissance et la maîtrise des données et de leur traitement, sont primordiales. En effet, suivre une bonne méthodologie en se basant sur des données d'entrées viables, converge vers un résultat exploitable, qui économisera du temps et de l'argent.

Cette étude consiste à relier les forçages hydrodynamiques, les processus du transport sédimentaire et le développement morphologique à toutes les échelles de temps. Ainsi cette définition schématise bien la démarche qu'on va suivre afin de comprendre et diagnostiquer le problème d'agitation et de stabilité du port de plaisance de Tamanart et contribuer à trouver des solutions.

Dans ce présent chapitre, nous exposeront la méthodologie suivie dans notre travail, ainsi que la présentation des logiciels et du matériel utilisé.

III.2. Etude bathymétrique

L'étude bathymétrique est une étape très importante dans le diagnostic et la résolution du problème d'agitation et de stabilité des ports. En effet, cette étape est impérative comme donnée d'entrée pour tout traitement de l'hydrodynamisme. Des informations si importantes, à l'échelle spatio-temporelle, peuvent être extraites à partir d'une carte bathymétrique et d'un suivi diachronique de la morphologie sous-marine.

La carte bathymétrique est une donnée de base pour la modélisation de l'hydrodynamisme dans les zones côtières. L'étude topo-bathymétrique peut aussi nous être utile dans la sélection de l'emplacement et du type de la structure pour se protéger contre la dérive littorale et les effets de la houle en générale.

Le levé bathymétrique avec multi-faisceau consiste à déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin dans le système géodésique WGS84 à l'aide d'un récepteur GPS et d'un Transducteur immergeable avec célérimètre de coque type ODOM MB1 :

- Fonctionne sur la bande de fréquence 177 KHz à 220 KHz
- Angle d'ouverture de fauchée : 120°
- Profondeur Maximale d'investigation : -240 mètres

La réalisation de cette tâche nécessite un équipement récent tel que :

- Transducteur immergeable avec célérimètre de coque
- Un boîtier RTA auquel est intégré le mesureur de cap
- Centrale d'attitude intégrée type TDS DMS 25

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- Célérimètre de coque type Tledyne Digibar V
- Logiciel d'acquisition et de traitement de données SMF Teledyne Reson PDS
- Célérimètre pour colonne d'eau Odom Gigabar Pro

Ce dispositif est interfacé par un micro-ordinateur et le logiciel de navigation et d'acquisition de données « Hypack ».

Le logiciel reçoit du récepteur GPS les coordonnées du point au niveau du plan d'eau, l'échosondeur calcule la profondeur à partir des mesures effectuées par le transducteur, le résultat de ces deux opérations aboutit à la connaissance des coordonnées du point bathymétrique mesuré.



Fig. III.1 : Transducteur immergeable avec célérimètre de coque

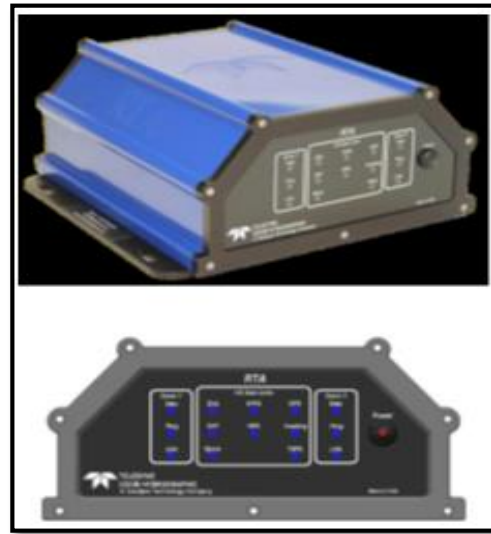


Fig. III.2 : Boitier RTA auquel est intégré le mesureur de cap

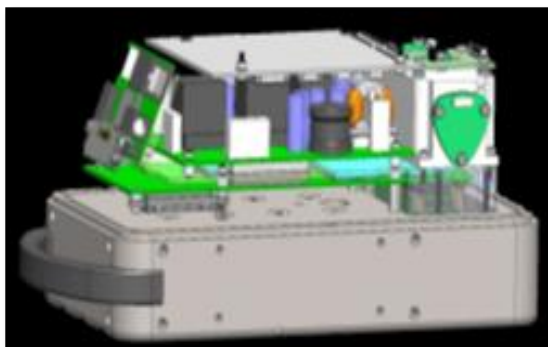


Fig. III.3: Teledyne TDS DMS 25



Fig. III.4: Teledyne Digibar V

III.2.1. Point de contrôle

Le contrôle du positionnement RTK sera effectué chaque jour, le matin, sur un point de contrôle situé à terre.

La position RTK mesurée en temps réel et enregistrée par le logiciel est comparée à la position officielle du point.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

L'altitude du point est obtenue en corrigeant l'altitude de l'antenne RTK (enregistrée par le logiciel) avec la différence d'offsets (offset embarcation - offset sur point à terre). Elle est comparée à l'altitude officielle du point à terre.

III.2.2. Calibrage de l'échosondeur

Le calibrage de l'échosondeur s'effectue en utilisant une plaque métallique suspendue à l'aide d'une chaîne graduée.

La plaque est immergée à une profondeur choisie par rapport au niveau du plan d'eau.

Le calibrage se fait en agissant sur la valeur de célérité (vitesse de propagation du signal dans l'eau), afin d'obtenir la profondeur affichée sur l'échosondeur égale à celle lue sur les graduations de la chaîne.

L'opération est répétée sur plusieurs profondeurs, avant d'entamer les levés. (LEM 2018)

III.2.3. Traitement des données bathymétriques

Après l'acquisition des données topo bathymétriques qui sont effectuées par les techniques précédemment mentionnées (LEM, 2018), ces dernières ont été exploitées à l'aide du logiciel Surfer 15, pour créer les cartes bathymétriques.

III.2.4. Description du logiciel Surfer 15

Surfer est un logiciel open source conçu par Golden Software, il permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données récoltées sur le terrain ou résultantes d'un calcul.

Son principe est de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières de nos points X, Y, Z, afin de les ordonner, c'est à partir de ces grilles qu'on pourra créer plusieurs types de cartes : basemap, contourmap, 3Dsurface, vector et bien d'autres...

Parmi les fonctionnalités de ce logiciel :

1. Création d'une grille (x, y, z) ;
2. Création des différents types de cartes, les superposer ainsi que leur mise en forme ;
3. Réalisation des profils de plage ;
4. Réalisation des calculs de volume ;
5. Calcul des longueurs et des surfaces. (Source : Tutoriel d'utilisation de Surfer 15)

III.2.5. Manipulation des données :

Le traitement de l'information passe par plusieurs étapes qui sont :

- a) Mise en forme du fichier Excel : Préparer les données bathymétriques et topographiques dans une feuille Excel dans un tableau à 3 colonnes : latitudes, longitudes et profondeurs, respecter les valeurs négatives pour la bathymétrie et positives pour la topographie, ainsi que le format (mettre des virgules non pas des

points) et surtout s'assurer de la compatibilité entre la version utilisée de l'Excel avec celle du Surfer.

- b) Préparation de la grille : la grille de calcul est préparée à partir du fichier de bathymétrie obtenue précédemment, en allant dans : Grid => Data et parcourir le fichier Excel puis cliquer sur ok.
- c) Vérifier le choix des colonnes, de sorte que le X pour les latitudes, Y pour les longitudes et Z pour la profondeur. On doit aussi vérifier le choix de la méthode d'interpolation.
- d) Une fois la grille créé, aller dans « Toolbar Options ».
- e) Pour obtenir les cartes d'isobathes en 2D cliquer sur l'icône (Contour) et là on doit parcourir le fichier Excel directement et les stations apparaissent.

III.3. La sédimentologie

III.3.1. Objectif

L'analyse granulométrique des sédiments meubles a pour but de connaître la répartition quantitative pour chaque classe dimensionnelle des particules élémentaires constituant l'échantillon et par conséquent leur modalité de mise en place. Et aussi, connaître la nature du fond marin.

Donc dans cette partie, nous verrons comment le paramètre de taille des sédiments peut nous renseigner sur les transits sédimentaires et sur leur répartition le long de la côte, afin de déterminer les mouvements sédimentaires dans la région de Tamanart.

III.3.2. Prélèvements d'échantillons

Les prélèvements d'échantillons de sédiment ont été réalisés au niveau du site, le nombre total est de quarante (40) échantillons répartis comme suit :

Quatre prélèvements par profil aux profondeurs respectives (0.00 m, -2.00 m, -5.00 m et -10.00m) pour dix profils espacés de cent mètres au maximum.

L'échantillonnage de la couche superficielle des sédiments a été réalisé au moyen d'une benne preneuse de type Van Veen. (LEM2018).

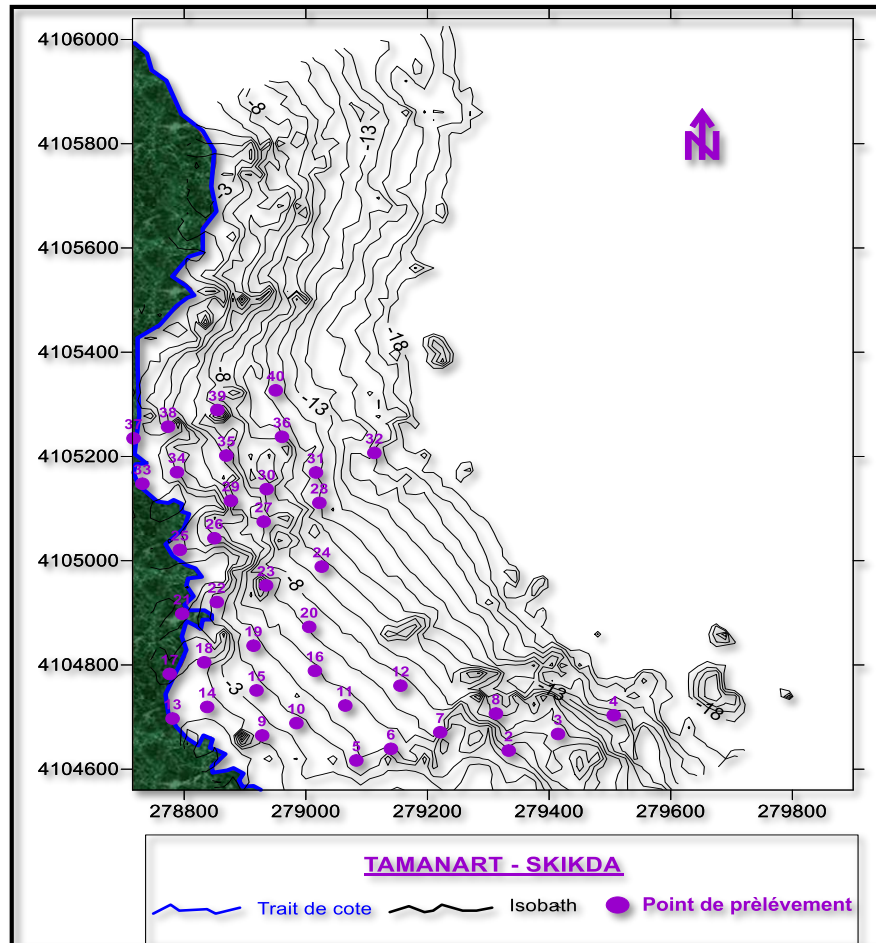


Fig. III.5 : Positionnement des stations de prélèvements des échantillons de sédiment dans la région de Tamanart (LEM, 2018)

III.3.3. Etude granulométrique

L'étude des sédiments est réalisée par granulométrie sur une colonne de tamis Afnor. La granulométrie est définie sur le matériel brut simplement débarrassé, par tamisage à 40 μm sous l'eau de la fraction fine. Cette dernière opération conduit à caractériser chaque sédiment par un indice de teneur en fraction inférieure à 40 μm : l'indice pélitique. Par complémentarité à 100 % on peut, par cet indice, connaître la teneur en sable (fraction supérieure à 40 μm) : l'indice arénique.

Il sera ensuite procédé à un tamisage à sec de la fraction grossière (> 40 μm) sur une série de tamis de type «Afnor ». Les diamètres du tamis varient entre 50 μm et 8000 μm .

Pour chaque échantillon, il est établi une courbe granulométrique sur un diagramme semi-logarithmique dans lequel l'ordonnée représente le pourcentage cumulé de refus et l'abscisse le diamètre correspondant.

L'analyse granulométrique, résumée graphiquement, est présentée ci-après :

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

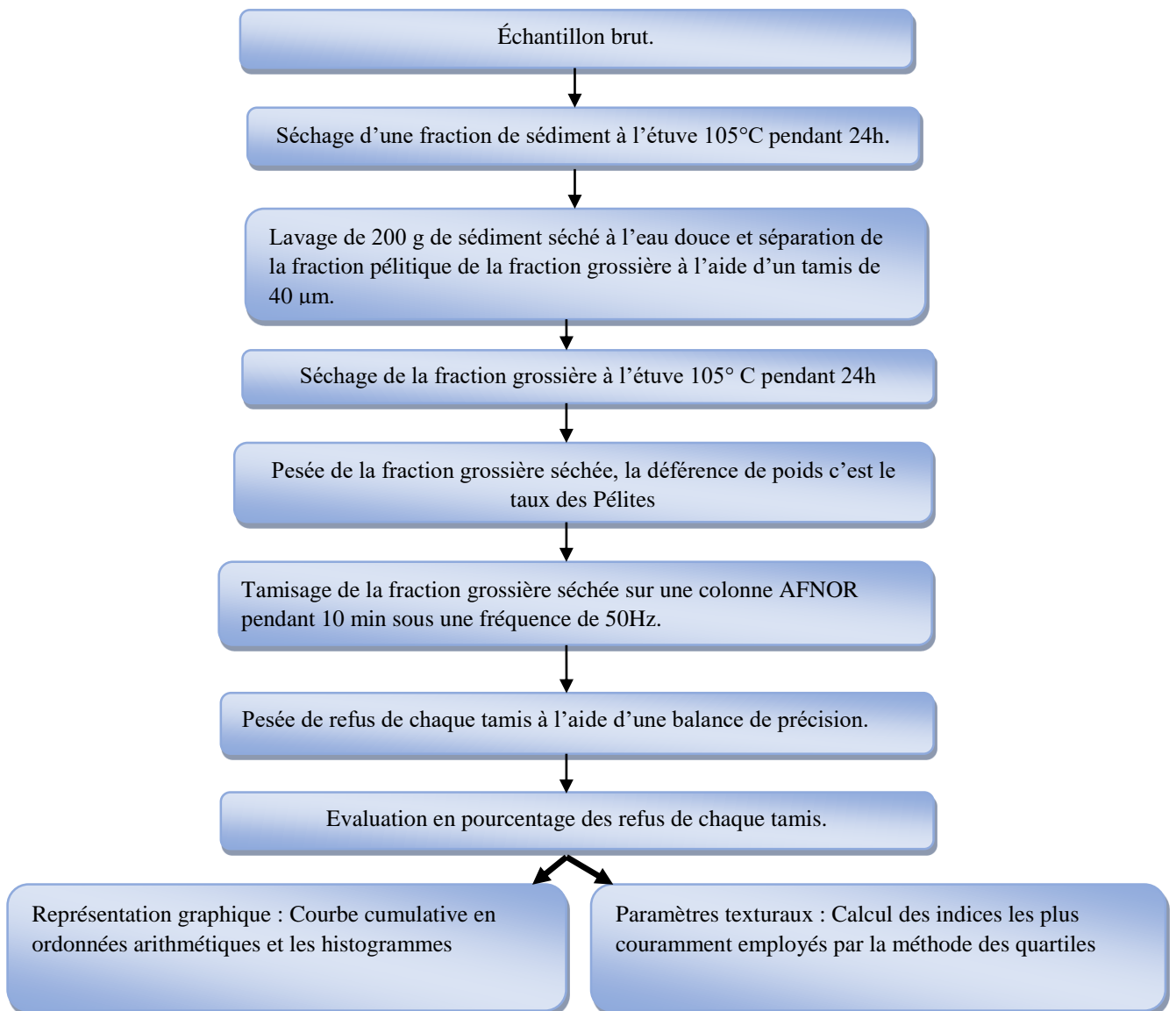


Fig. III.6 : Modalité d'analyse granulométrique

III.3.4. Traitement des données

Le traitement graphique ou numérique des résultats bruts fournis par le tamisage a pour but de définir des paramètres spécifiques (position, dispersion, asymétrie et acuité) de l'échantillon étudié.

III.3.5. Les paramètres de position

- La médiane ou Q50 est l'indice de position le plus fréquemment employé car il donne en intégrant toutes les classes granulométriques une estimation de la grossièreté moyenne du sédiment,
- Le mode qui correspond au point d'inflexion de la courbe cumulative. Il représente la dimension la plus significative de la distribution granulométrique.

Il est déduit à partir de l'histogramme de fréquences. Rivière (1977) distingue trois types :

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- Courbe (ou histogramme) uni modale : dominance d'un seul stock sédimentaire ;
- Courbe (ou histogramme) bimodale : dominance de deux stocks sédimentaires ;
- Courbe (ou histogramme) plurimodale : dominance de plusieurs stocks sédimentaires.

III.3.6. Les indices granulométriques :

III.3.6.1. Les indices de dispersion ou de classement :

Ils donnent une idée sur l'étalement de la courbe au tour de son grain moyen, et nous renseignent sur le degré de classement du sédiment.

- Le Sorting de Trasck : $S_0 = (Q75 / Q25)^{(1/2)}$
- Folk et Ward: $S_0 = [(\phi 84 - \phi 16) / 4] + [(\phi 95 - \phi 5) / 6, 6]$

III.3.6.2. Les coefficients d'asymétrie :

Ils indiquent la prédominance des sédiments fins ou des sédiments grossiers. Ils caractérisent le degré de symétrie de la courbe granulométrique par rapport à la médiane.

- Le Skewness de Trasck : $S_k = (Q25 * Q75) / (D50)^2$
- Folk et Ward : $S_k = ((\phi 16 + \phi 84 - 2\phi 50) / 2 (\phi 84 + \phi 16)) + ((\phi 5 + \phi 95 - 2\phi 50) / 2 (\phi 95 + \phi 5))$.

III.4. La modélisation numérique hydrodynamique

III.4.1. Définition

La modélisation en tant qu'outil de dimensionnement peut être définie comme une représentation de la réalité sous une forme qui permet d'effectuer une observation des mesures précises de phénomènes présentant un intérêt pour la performance de l'ouvrage et de son environnement.

La représentation des phénomènes hydrauliques s'effectue :

- Matériellement, sous forme de modèles réduits ou physiques ;
- Numériquement, sous forme de modèles numériques ;
- Les modèles hybrides qui sont la combinaison des deux précédents.

Les modèles numériques reposent sur la description des phénomènes physiques à l'aide de systèmes d'équations mathématiques. Celles-ci sont ensuite résolues numériquement pour chaque paramètre étudié, par un programme informatique.

Un modèle numérique ne prend en compte qu'un nombre limité de phénomènes : Marée, courant, houle, run-up, franchissement de la houle et morphologie.

III.4.2. Principe de la modélisation

La modélisation numérique d'un processus physique est basée sur la mise en équations du processus impliqué puis sur la résolution, par code informatique, de ces équations.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

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

Cette simplification s'effectue à différents niveaux :

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

D'autre part, le modèle ne reproduit généralement qu'une portion isolée du milieu naturel,

L'action de l'extérieur du domaine est appliquée par l'intermédiaire de conditions que l'on impose aux limites de la zone simulée. **(Boudab, Hadjdilani, 2019).**

III.4.3. Objectifs de la modélisation

Schématiquement, la modélisation peut avoir trois objectifs :

- Décrire (résumer) les données ;
 - Prédire (simuler), c'est-à-dire faire des inférences ;
 - Expliquer (comprendre) c'est-à-dire avoir des objectifs mécanistiques.
- Particulièrement utilisée dans les différents métiers de l'environnement, la modélisation permet de :
- Prédire les performances des ouvrages avant construction ou réhabilitation ;
 - Réduire le nombre, la durée et les coûts des essais expérimentaux ;
 - Réduire les coûts de construction et d'exploitation des procédés.

L'avantage principal de la modélisation est qu'elle permet de tester différents scénarios sans contrainte d'échelles (pilote, prototype, ouvrage industriel) et de faisabilité. **(Boudab, Hadjdilani, 2019).**

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le MIKE 21 qui est un logiciel professionnelle de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre, développé par DHI Water & Environnement.

III.4.4. Etude de la réfraction de la houle

L'étude de la réfraction de la houle a pour objet l'exploitation des caractéristiques de la houle au large pour définir les caractéristiques de la houle à la côte (direction et hauteur).

La connaissance des caractéristiques de la houle (Direction, amplitude, période) permet d'apprécier et de comprendre les phénomènes qui se produisent dans la zone de déferlement et serviront de données d'entrée pour le dimensionnement des ouvrages maritimes. **(Dahmani, 2016)**

III.4.4.1. Manipulation des données :

La réalisation de cette étude se fait à l'aide d'un Modèle MIKE 21-SW (Spectral Waves Flexible Mesh).

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

Il est nécessaire de connaître les conditions de la houle pour la simulation de sa propagation. Plusieurs données ont été insérées en entrée du modèle de MIKE 21 Spectral Waves :

- Bathymétrie ;
- Période des houles (T_p) ;
- Hauteur significative des houles (H_s) ;
- Directions des houles dominantes.

Vu que notre zone est exposée aux houles de secteurs Nord, Nord-Est, Nord-Ouest et Est. Nous avons utilisé toutes ces directions Nord (15°), Nord-Est (25°), Nord-Ouest (335°) et Est (70°) pour la simulation du SW, HD et ST avec la hauteur significative moyenne qui est de 8s.

Les secteurs et les périodes les plus significatifs à utiliser comme données d'entrée pour l'étude sur modèle numérique sont choisis comme illustré sur le **Tab. III. 1**.

III.4.5. Courantologie :

En bordure de la plage de Tamanart on peut observer le déplacement des masses d'eau, plus au moins chargées de sable, sous l'action des déferlements, déplacements accentués par l'effet du vent orienté dans la même direction que la houle. L'influence des très faibles marées locales étant négligeable, il est certain que les caractéristiques de ces courants et leurs fluctuations seront très étroitement liées au régime des vents et des houles.

III.4.5.1. Manipulation des données :

Pour modéliser ce phénomène on utilise le modèle HD (Hydrodynamic model) de la suite MIKE 21. Ce modèle est utilisé principalement pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont les courants induits par la houle ainsi que les surcôtes. Pour les conditions du **Tab. III. 1**, les courants sont calculés à partir des contraintes de radiation issues du modèle PMS. 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.

Tab. III. 1 : Houle annuelle dans la région de Tamanart (SSMO ; 1970)

Période	Direction houle au large			
	N 335° (NW)	N15° (N)	N 25°(NE)	N 70°(E)
6 s	1.18	1.03	0.99	1.03
8 s	2.76	2.52	2.63	2.60
10 s	5.46	6.40	5.05	5.38

III.4.6. Simulation du transport sédimentaire :

Les systèmes côtiers ont été analysés selon leurs caractéristiques hydro-sédimentaires. Les dérives littorales principales et secondaires et les courants de retour ont été déterminés par l'analyse des zones d'accumulation et de reculs récents et historiques.

Les courants de dérive littorale sont responsables de la dérive littorale des sédiments, ils déplacent les sédiments dans la zone de déferlement ils créent des chenaux d'érosion longitudinaux, parallèles au rivage et aux isobathes, ces chenaux peuvent déplacer les sédiments enlevés du fond jusqu'à des distances supérieures 2,5 kilomètres. La dérive littorale peut, selon les cas, apporter ou exporter des sédiments et influencer sur le bilan sédimentaire. La dynamique côtière est donc essentiellement contrôlée par : la propagation de la houle à la côte, la dérive littorale parallèle au trait de côte, les courants de retour et aussi l'action éolienne qui a un effet sur le trait de côte.

III.4.6.1. Manipulation des données :

Afin de déterminer la trajectoire des particules sédimentaires dans notre zone d'étude, on a simulé les tendances aux transports par le modèle ST (Non-Cohesive Sediment Transport) de la suite MIKE 21 qui calcule le transport sédimentaire sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et de la houle.

Les taux de transport de sédiments sont calculés à partir de données bathymétriques, des profondeurs instantanées de l'eau, les tailles et la gradation spatiale des sédiments et les variations spatio-temporelles des courants et des vagues dans la région étudiée.

III.4.7. Simulation numérique de la zone de Tamanart par Mike-21

III.4.7.1. Principe de la simulation par Mike21-Dhi

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le **Mike21-Dhi de l'Institut Hydraulique Danois** qui est un puissant système de modélisation numérique des phénomènes physiques (houle, courant et transport sédimentaire), il permet de faire des simulations à grande échelle et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées.

III.4.7.2. Description du modèle de simulation Mike :

Le MIKE 21 est un progiciel destiné aux professionnels du génie côtier, il comporte plusieurs codes de calculs et de modélisation numérique en 2D, il est développé par le Danish Hydraulics Institut et se base sur un maillage structuré (grille rectangulaire ou curviligne) ou, pour certains modules, sur un maillage non structuré (grille triangulaire) (**DHI, 2014**).

L'approche modélisatrice doit faire appel à un système de modélisation intégré comprenant 3 modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de houle et un modèle de transport sédimentaire de particules non-cohésifs, sous l'effet de l'action combinée des vagues et des courants.

Dans ce contexte, le module MIKE21, comprend des différents calculs qui répondant à une problématique précise :

- Mike 21-SW (Spectral Waves Flexible Mesh) ;
- Mike 21-HD (Hydrodynamic model) ;

- Mike 21-ST (Non-Cohesive Sediment Transport).

A). Le module spectral de la houle (SW)

Modèle spectral de vague de 3ème génération similaire au SWAN, avec certaines améliorations. Il simule :

- La croissance des vagues en présence du vent ;
- L'interaction vague-vague non-linéaire ;
- La dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond ;
- La réfraction par les changements de profondeur et l'interaction vague-courant.

Les calculs du modèle Mike21-SW utilisent une grille à maillage flexible. Le modèle équivalent sur maillage en différence finie est le modèle Mike21-NSW.

B). Le module hydrodynamique (HD)

Le modèle hydrodynamique Mike21 HD résout les équations bidimensionnelles classiques de Navier Stokes par la méthode en volume fini sur une grille à maillage flexible et par la méthode des différences finies sur une grille à maillage rectangulaire. Il traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vent et pression atmosphérique), la force de Coriolis, etc. Il nous permet de simuler les courants côtiers dû à l'action de la houle dans la zone de déferlement (**DHI, 2014**). 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.

C). Le module du transport de sable (ST) :

Le modèle du transport sédimentaire ST 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. Ce modèle n'utilise que le modèle STPQ3D en cas de houle et des courants combinés, il est couplé au modèle hydrodynamique Mike21/3-HD et au modèle de vagues Mike21-SW.

Les transports de sables sont déterminés par l'interpolation dans les tableaux de transport (**DHI, 2014**). Ces tableaux doivent être générés au préalable par « Mike 21 Toolbox » avec le choix de « génération of Q3D sédiment tables ». Ils doivent intégrer une condition quelconque de bathymétrie, courant, houle, ou sédiment prédite par le module intégré. (**DHI, 2014**).

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

III.4.7.3. Etape de la modélisation par le Mike21

A l'aide du module « Mesh Generator » dans le Mike21, nous pouvons :

- Importer le trait de côte à partir des données transformées précédemment (XYZ) ;
- Importer les données bathymétriques (fichier XYZ) dans le fichier de maillage.

Système de projection : Il faut choisir le système de projection pour la conception du maillage. Ce choix influence le format de l'affichage sur la carte. Les systèmes de projection des données de trait de côte et de bathymétrie peuvent être différents. Il nous faut uniformiser ces données par rapport au système choisi lors de l'importation des données dans le MIKE21.

Système utilisé et coordonnées :

- Système géode
- Ellipsoïde : WGS84
- Projection : UTM zone 32 Nord

Avant d'entamer la simulation il est indispensable de créer un Mesh File, ce dernier relie la profondeur des eaux, extraite de données bathymétriques avec le système de référence ZH, à chaque point du domaine. Il contient donc les informations concernant la profondeur, les limites du mesh file (Boundary) et les éléments du maillage qui sont de type triangulaire plus serrés à la côte.

Après la création du mesh file, on passe à la réalisation du paramétrage qui contient les données de base de la simulation :

- En premier lieu, on renseigne notre domaine d'étude (mesh file), puis on précise la durée de simulation qui est de 24h avec un intervalle d'une heure, c'est-à-dire qu'à la fin de chaque heure, on obtient un résultat (Output) ;
- Puis on effectue la prédiction des séries temporelles des hauteurs de marées (ou niveaux d'eau) en utilisant l'outil du Mike 21-Toolbox, cette prédiction est basée sur les constituants dérivés d'un modèle global de la marée, le fichier du résultat obtenu est utilisé comme données d'entrées pour le modèle hydrodynamique (Mike 21-HD) ;
- Puis on génère la table sédimentaire (Q3D Sediment Transport Table) qui permet de calculer les taux de transport des sédiments non cohésifs ($m^3/s/m$) en utilisant l'effet combiné des vagues et du courant, ceci pour le modèle numérique de transport de sable Mike 21-ST ;
- Enfin on termine la préparation des données de simulation en insérant la hauteur, la direction et la période des différentes houles au niveau du modèle numérique Spectral Waves (Mike 21-SW).

L'organigramme ci-après illustre l'approche méthodologique de la simulation des trois modules intégrés :

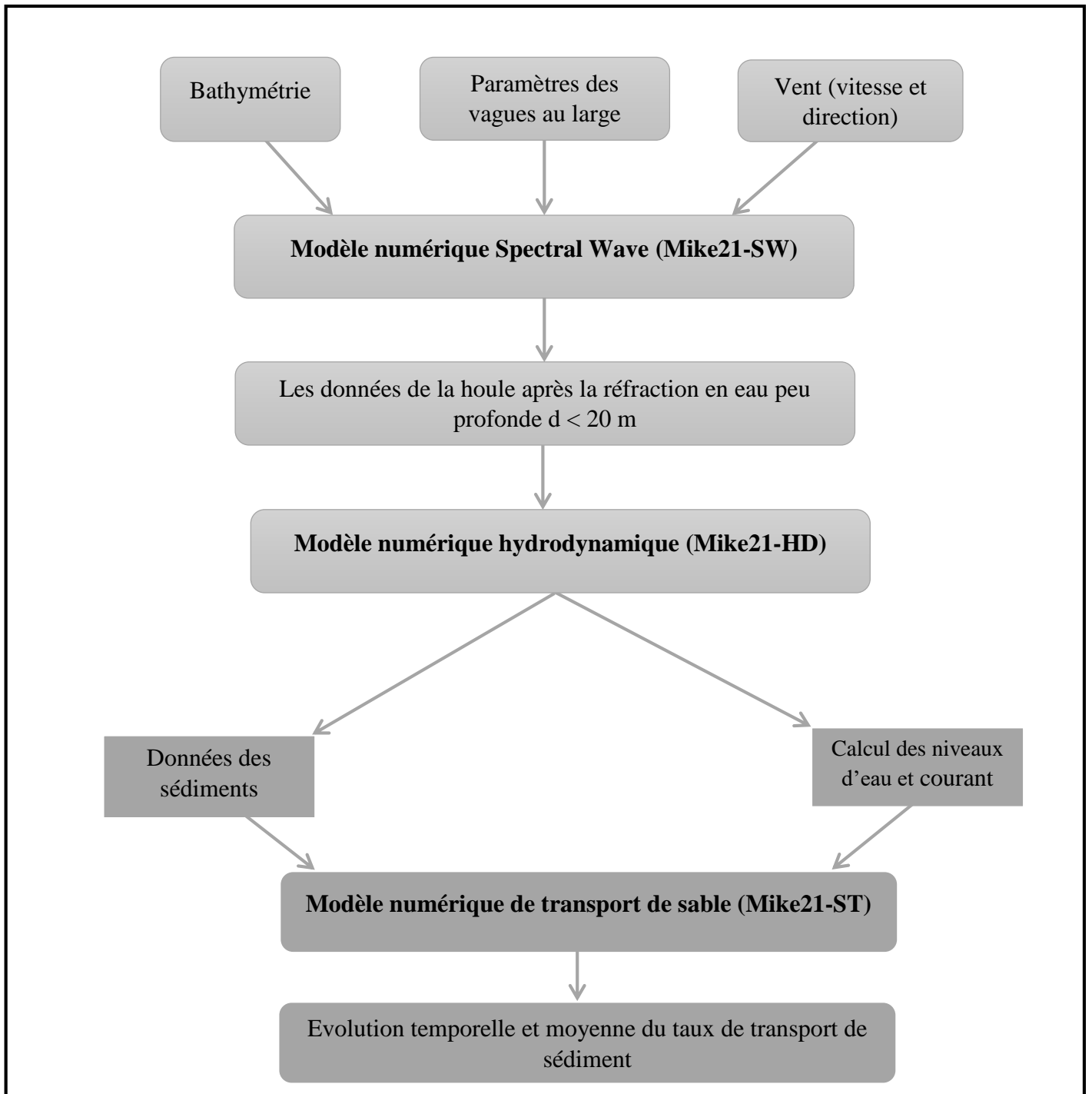


Fig. III.8 : Organigramme explicatif de l'approche méthodologique de la modélisation par les codes Mike21.

III.5. Etude d'agitation au niveau du port de Tamanart

L'agitation de la houle dans les ports est basée sur un grand nombre d'hypothèses sur le fluide afin de faciliter la modélisation sur des domaines de calcul qui restent grands (de l'ordre du kilomètre carré). Les hypothèses les plus souvent retenues sont les suivantes :

- le fluide est parfait et incompressible.
- les sollicitations atmosphériques à la surface libre (gradient de pression et vent) sont négligées ;
- le fond est fixe et imperméable ;
- la hauteur de la houle est faible à la fois par rapport à sa longueur d'onde et à la profondeur ;
- la théorie spectrale de la houle est applicable de telle sorte que le problème peut se ramener à des calculs de houle monochromatique.
- l'hypothèse de pente douce est appliquée afin de négliger les ondes dites évanescentes.

Les travaux de modélisation numérique seront réalisés à l'aide du module BW du package MIKE 21. Ce modèle 2D, conçu au Danemark par la firme DHI Water & Environnement, jouit d'une réputation internationale et a été utilisé avec succès dans de nombreux projets impliquant la simulation des agitations portuaires.

Pour une configuration d'aménagement donnée, il s'agit d'évaluer l'agitation résiduelle à l'intérieur d'un port et de vérifier la conformité de l'agitation vis à vis des normes admissibles. Des modifications de configuration peuvent éventuellement être proposées de manière à réduire l'agitation résiduelle.

Dans notre cas, on va vérifier l'agitation au niveau du port de plaisance projeté à Tamanart.

III.5.1. Présentation du modèle

La modélisation numérique de l'agitation au niveau du port de plaisance projeté à Tamanart dans la wilaya de Skikda se réalisera avec le modèle de calcul BW de Mike 21 développé par l'institut hydraulique Danois (DHI).

Le modèle de vagues Mike21 Boussinesq (BW) est principalement utilisé pour étudier la dynamique des vagues (amplitude d'onde significative, coefficient de perturbation de la vague, élévation de la surface de l'eau et vitesse moyenne en profondeur des particules) dans les ports et les petits secteurs côtiers.

Le modèle est capable de reproduire les effets combinés de la plupart des phénomènes de vague intéressants l'ingénierie côtière et portuaire, y compris le rapprochement des vagues, la réfraction, la diffraction et la réflexion partielle de l'amplitude finie irrégulière des vagues à crête longue ou à crête courte se propageant sur des bathymétries complexes, ainsi que des phénomènes tels que le groupement de vagues, la génération de bornes subharmoniques et superharmoniques et les interactions quasi-résonnantes de triade.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

III.5.2.Limites d'application du modèle

Le modèle a été principalement conçu pour les ports côtiers, mais il peut aussi être utilisé pour des petites baies côtières complexes. Il ne fonctionne pas sur les côtes ouvertes.

La modélisation numérique de l'agitation à l'intérieur du domaine d'étude nécessite au préalable de spécifier les paramètres suivants :

a-Discretisation spatio-temporelle

Afin d'assurer la convergence et la stabilité des calculs numériques, un calcul par le Mike 21 BW Model Setup Planner sera établi pour définir la discrétisation des pas de calcul de l'espace et du temps. Dont :

Le pas d'espace : $\Delta x = \Delta y = 01 \text{ m}$

Le pas de temps : $\Delta t = 0.04$

b-Effets de réflexion et de dissipation des ouvrages portuaires

Coefficient de porosité (ε) (inversement proportionnel à la réflexion) :

Le « Toolbox de Mike 21 » permet d'estimer le coefficient de porosité en fonction de la profondeur d'implantation des ouvrages, de la période de la houle ainsi que de la hauteur de houle considérée. Dans le cas présent nous allons considérer une porosité moyenne $\varepsilon = 0.83$ à 0.90 pour les ouvrages à talus et est égal à 0.5 pour les appontements en caissons et une porosité nulle (réflexion totale) pour les quais en blocs.

Coefficient de dissipation C (amortisseur numérique 'sponge') :

Cet artifice numérique permet de prendre en considération la dissipation d'énergie de la houle à l'approche d'un ouvrage à talus, plage, etc...ainsi qu'aux limites du modèle de calcul. Afin d'assurer la dissipation de l'énergie de la houle aux limites du modèle, et assurer ainsi la stabilité numérique, 20 couches de 'sponges' (amortisseurs numériques) seront utilisées aux limites du modèle.

c-Données d'entrée du modèle numérique

- **Données bathymétriques**

Les données bathymétriques sont issues du levé bathymétrique réalisé par le LEM en juin 2018 dans le cadre de l'étude de la réalisation du port de plaisance à Tamanart.

- **Données de houles**

Les données de houles utilisées sont reprises du document de l'U.S Naval Weather Command (S.S.M.O). Ces observations s'étalent sur la période de 8 ans (1963 à 1970) et couvrent la zone au large des côtes Algériennes. Les données utilisées sont résumées dans **le tableau.I.2**

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

présenté dans le premier chapitre. La direction de la houle la plus défavorable pour l'agitation du port de plaisance projeté est la N70°. Les caractéristiques de cette houle aux limites du modèle de calcul sont données dans le tableau suivant :

Tab. III. 2 : Données de houle aux limites du modèle de calcul (LEM, 2018)

Direction de la houle au large (en degrés)	Période de la houle (en secondes)	Amplitude de la houle (en mètres) aux limites du modèle
Houle annuelle N70°	8	2.60
Houle décennale N25°	12.93	7.03

III.5.3. Définition des agitations admissibles

Il est très difficile de définir dans l'absolu des valeurs d'agitations admissibles pour deux raisons :

- Le comportement d'un navire soumis à la houle résiduelle dépend de nombreux facteurs : dimensions, chargements, longueur d'onde, période propre de roulis, tangage, ... etc.
- La complexité des états de mers réels à l'intérieur d'un port résulte de l'interférence entre les multiples ondes. Ces aspects irréguliers de l'agitation influent sur les mouvements du navire.

Le critère $H_s=30\text{cm}$ en occurrence annuelle est considéré comme un standard de confort selon le guide des pontons de plaisance, édité par le Secrétariat d'Etat à la Mer suivant le Conseil Supérieur de la Navigation de Plaisance et des Sports Nautiques. La Commission Scientifique et Technique du ministère français de l'équipement mentionne jusqu'à 40cm admissible. Elle conclut sur des agitations résiduelles de 20cm à 30cm synonymes de confort, allant jusqu'à 60cm en termes de sécurité.

Le critère de sécurité de 60cm est recommandé par les standards Nord-Américains en occurrence cinquantennale. De telles valeurs peuvent en effet être acceptables même pour les petits navires, en particulier si elles correspondent à des ondes relativement longues devant la taille des navires.

On retiendra en conclusion les critères suivants pour un port de plaisance :

Tab. III. 3 : des limites d'agitation admissibles pour le port de plaisance (LEM, 2018)

Occurrence	Hauteur significative HS	Notion de
Annuelle	0.3m	Confort
Décennale	0.4m à 0.5m	Sécurité
Cinquantennale	0.6m	Sécurité pour navires <20m

Compte tenu des limites d'agitation admissibles définies ci-dessus, nous allons dans notre cas adopté la valeur de 0.3 pour la notion de confort pour les houles annuelles et 0.5 pour la notion de sécurité pour les houles décennales afin de garantir le confort et la sécurité des navires lors de l'accostage et leur séjour à quai dans notre port de plaisance .

III.6. Modélisation physique

III.6.1. Introduction

A la lumière de toutes les définitions établies auparavant, l'idée de base de la modélisation physique est de réduire la taille du domaine physique et l'ampleur des facteurs dynamiques, et d'accélérer la marche du temps dans des proportions spécialement déterminées pour que les mouvements et les évolutions soient homologues.

III.6.2. Nécessité de la modélisation

Les ouvrages et aménagements maritimes sont généralement très coûteux, il est donc nécessaire, avant de les réaliser, de bien prévoir leur fonctionnement (**Viguié, 1992**). Lors de la mise au point du projet, il faut :

- S'assurer que les objectifs visés seront atteints (bassin portuaire bien abrité, pérennité d'une plage et / ou de l'urbanisation située en arrière par un aménagement du littoral, etc....)
- S'assurer que les ouvrages seront capables de bien résister aux actions de la mer.
- Prévoir les risques d'ensablement (et/ou d'envasement) d'un port, définir les impacts sur les fonds et littoraux avoisinants et proposer des mesures compensatoires si besoins, c'est-à-dire optimiser le projet tant au point de vue économiques, que technique, que de son impact sur l'environnement.

Les phénomènes en jeu étant très complexes, des outils ont été développés pour améliorer la connaissance des processus hydrodynamiques et sédimentologiques et pouvoir mieux étudier la conception et les impacts des aménagements maritimes. Les modèles constituent l'essentiel de ces outils. (**Al Sid Chikh, 2011**).

Une bonne modélisation physique repose sur la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels, un bon choix des échelles de réduction et la pratique d'un bon réglage. Ces deux derniers sont essentiellement fonction de l'expérience du laboratoire. Une fois le modèle réglé, il simule de lui-même les phénomènes induits sans exiger la connaissance théorique fine des phénomènes. On peut reprocher au modèle réduit physique (**Mignot et al, 2002**) :

- Une emprise forcément limitée de la zone couverte.
- Son encombrement qui nécessite des halls d'essais de grande superficie et un appareillage spécifique.
- Sa durée de vie limitée, car il est généralement détruit après son exploitation.

Le coût des études sur ces modèles dépend de leur nature (simple vérification, optimisation), du type d'essai réalisé (canal ou cuve) et de l'importance de l'ouvrage (**Caminade, 1995**).

III.6.3. Notions fondamentales

Le modèle : c'est une représentation de la réalité abstraite à petite échelle. Pour un projet d'aménagement du littoral, les modèles physiques sont restés le seul outil efficace pour définir correctement leur comportement, vu qu'il a bénéficié d'une longue et fructueuse expérience.

Le prototype : Domaine physique naturel et dynamique, sujet à la modélisation.

Echelle de réduction : c'est le rapport des grandeurs entre le prototype et le modèle.

III.6.4. Principe et types de modèles

La modélisation a pour but la compréhension d'un phénomène naturel, physique à travers sa représentation en modèle, la tâche la plus complexe et la plus importante est la construction du modèle en lui-même. Si on veut résumer cette démarche, les étapes à suivre seront comme suit :

Dans le cas d'une étude hydro-sédimentaire, le facteur « grain » est un élément clé dans la réussite de la modélisation, sa représentation en modèle doit respecter un certain nombre de conditions afin que celui-ci puissent représenter fidèlement le comportement du sédiment naturel, il sera souvent remplacé par un matériau moins dense au diamètre plus important (mais équivalent) tel que le plastique broyé (PVC), la sciure de bois, ou encore le (plexiglas).

A la base, les modèles reposent donc nécessairement sur une analyse des facteurs en présence et une évaluation de l'importance de chacun d'eux dans le processus général à étudier (**Dalrymple, 1985**). Cela est fondamental pour définir les facteurs à simuler correctement et ceux qui peuvent, dans une certaine mesure, être négligés. En effet, un modèle est forcément restrictif, il ne peut reproduire toute la complexité des phénomènes naturels. Parmi les types de modèles, on distingue (**Viguié, 1992**) :

- Les modèles réduits physiques.
- Les modèles mathématiques.
- Les modèles hybrides qui sont la combinaison des deux précédents.

Les modèles réduits sont historiquement les plus anciens (**Viguié, 1992**) et les premiers à avoir été utilisés il y a maintenant plus d'un demi-siècle (**Mignot, 1973**). Une bonne modélisation physique repose sur la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels, un bon choix des échelles de réduction et la pratique d'un bon réglage (**Viguié, 2002**).

III.6.5. Fondement des modèles réduits physiques

Un modèle physique est la reproduction d'un système physique (généralement à taille réduite) conçue de telle sorte que les forces prépondérantes qui agissent sur le système sont représentées sur le modèle en proportion convenable par rapport au système physique lui-même (**Caude, 2003**).

Pour résumer, on rappelle que le modèle réduit physique vient au secours du concepteur pour valider son projet, vérifier les problèmes, mais aussi mettre en évidence les éventuels points faibles. Ces points concernent essentiellement l'implantation et le dimensionnement des

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

ouvrages de protection contre l'action de la houle et des courants marins (**Al Sid Chikh, 2011**).

III.6.6. La simulation physique

Dans le domaine de la construction, la simulation physique est appliquée pour la résolution des problèmes de type (**Samat, 2007**)

- Hydraulique des barrages : dimensionnement des évacuateurs de crue, ouvrages annexes, ouvrages de vidange de fond, de dérivation....
- Hydraulique fluviale : stabilité des berges, impact d'ouvrages sur les lits des rivières...
- Hydraulique maritimes : optimisation d'aménagements portuaires, stabilité des ouvrages de protection contre la houle et les courants.

On parle ainsi de similitude :

- géométrique quand les rapports entre dimensions linéaires du modèle et de la nature sont constants.
- cinématique quand les composantes des vecteurs 'vitesse' du modèle et de la nature sont identiques pour chaque particule du fluide et dans le temps.
- dynamique quand les rapports des forces vectorielles sont constants, ce qui est généralement impossible sauf à l'échelle 1.

C'est là qu'intervient l'expérience du modélisateur qui identifie les forces prépondérantes, avec deux d'entre elles dans la plupart des cas. Leur rapport adimensionnel par construction permet de retrouver aisément les grands critères de similitude hydraulique (**SGH, 1973**) :

- le nombre de Froude : rapport des forces d'inertie et de gravité.
- le nombre de Reynolds : rapport des forces d'inertie et de viscosité.
- le nombre d'Euler : rapport des forces de pression et d'inertie utilisé pour le cas des navires.

III.6.6.1. Loi de similitude

Il est à rappeler que les modèles réduits physiques doivent satisfaire à une similitude géométrique, cinématique et dynamique.

En effet, le but de tels modèles est de reproduire la propagation de l'énergie de la houle et son action sur des obstacles (ouvrages).

Le choix de similitude consiste à définir une relation de réduction géométrique et les échelles de représentation des autres grandeurs, pour ce type d'essai, la nature des principaux phénomènes mis en jeu (propagation d'une onde de gravité, équilibre de corps solide, etc.) suggère de privilégier la représentation des forces déterminantes que sont les forces liées aux accélérations (gravité, inertie).

Pour cela, il est nécessaire que la similitude adoptée laisse invariant le nombre de Froude :

$$F = V/\sqrt{gD}$$

Avec :

V : vitesse caractéristique (vitesse orbitale, célérité, etc.)

g : accélération de la pesanteur

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

En opérant dans le même champ de pesanteur que celui du prototype et en adoptant une représentation invariante des accélérations, le respect de ce critère détermine les échelles des vitesses, donc des temps d'une part, et des volumes, donc des masses et des poids d'autre part :

Vitesse, temps : $\sqrt{\lambda}$

Volumes, masse, poids : λ^3

Pour des relations de simplicité pratique, on se contente de ne respecter que cette similitude dite similitude de Froude. Il en résulte quelques distorsions sur certains phénomènes généralement secondaires pour la dynamique du modèle.

III.6.6.2. Distorsions

III.6.6.2.1. Distorsion due à la viscosité

Pour que la représentation des forces des viscosités soit correcte, il est théoriquement nécessaire que la similitude adoptée laisse invariante le nombre de Reynolds :

$$\text{Re} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{D} / \nu$$

Avec :

V : vitesse caractéristique (vitesse orbitale célérité)

ν : Viscosité cinématique de fluide.

D : dimension caractéristique (dimension d'un bloc, hauteur d'eau,)

Or, l'adoption à priori de la similitude de Froude impose une échelle de $\lambda^{3/2}$ pour le groupement VD.

Pour satisfaire à la fois aux critères de similitude de Froude et de Reynolds, il serait donc théoriquement nécessaire d'utiliser pour le modèle, un fluide de très faible viscosité : **1/189.57** fois celle de l'eau dans ce cas, cette impossibilité pratique conduit généralement à préférer le simple choix de l'eau pour le modèle et donc à accepter une distorsion sur la représentation du nombre de Reynolds, distorsion d'autant plus importante que l'échelle de réduction des longueurs soit plus grande.

Cependant, pour une échelle donnée, les conséquences pratiques de cette distorsion (distorsion des seules forces de viscosité) restent relativement négligeables tant que le modèle fonctionne dans des conditions d'écoulement telles que les forces de viscosité restent négligeables.

III.6.6.2.2. Distorsion due à la densité de l'eau

L'eau utilisée dans le modèle est douce ($\delta_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) alors qu'elle est salée en nature, donc plus dense, dans la réalité ($\delta_w = 1025 \text{ kg/m}^3$). La masse spécifique de l'eau intervient directement dans les forces de nature inertielle, proportionnelle aux volumes et aux accélérations, ainsi que dans les poussées d'Archimède.

En fait, cette caractéristique intervient globalement sur la stabilité suivant une relation empirique (formule de stabilité d'Hudson) qui traduit les conditions d'apparition d'un certain degré de dommage.

Pour compenser de manière simple la distorsion qu'entraîne l'emploi de l'eau douce, il suffit donc d'adopter pour les modèles de blocs (réduit à l'échelle) un matériau de densité inférieure à celle des blocs du prototype de manière à ce que le groupement :

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)$$

Avec :

$\rho_s = 1025 \text{ kg/m}^3$ pour le prototype et $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ pour le modèle. Les valeurs de la masse spécifique des matériaux à utiliser pour représenter les blocs artificiels de béton sont : **2341 kg/m³** au lieu de **2400kg/m³**, pour les enrochements naturels, un facteur de correction égal à **0.87** intervient directement sur leur poids.

III.6.7. Types d'étude sur les modèles réduits physiques

De très nombreuses études expérimentales ont permis d'observer les processus d'action de la houle sur différents types d'ouvrages et de dégager des formules utilisables pour pré-dimensionner un ouvrage au stade d'avant-projet. Ces formules empiriques sont insuffisantes pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Aussi, le coût élevé de ces ouvrages maritimes justifie-t-il toujours le recours à une modélisation qui, étant donné la complexité des interactions houle-ouvrage, est pour l'instant et probablement pour longtemps en cours du domaine des modèles réduits physiques (**Caude, 2003**).

III.6.7.1. Etude à deux dimensions

Elle se fait en canal à houle, pour déterminer le profil transversal de l'ouvrage, et s'assure de sa stabilité face aux phénomènes de franchissements, transmission et de la résistance mécanique des matériaux.

Le profil est soumis à des houles qui ont généralement des périodes de retour allant de 20 à 100 ans suivant le type d'ouvrage concerné. Certains phénomènes ne sont pas reproduits de façon rigoureuse, comme la transmission de la houle dans le massif. D'autres ne peuvent l'être, comme la résistance des blocs. Il serait nécessaire d'utiliser sur le modèle des blocs présentant aux échelles de réduction la même résistance mécanique (**Richard et al, 2003**).

III.6.7.2. Etude à trois dimensions

Elle se fait en bassin à houle de grande superficie afin d'examiner certains problèmes particuliers :

- l'influence des fonds sur les caractéristiques de la houle et une appréciation des phénomènes de réfraction, diffraction et réflexion.
- une vue générale des ouvrages et la différence de résistance des points singuliers tels que les musoirs d'extrémité, les points angleux (coudes).
- de tels essais peuvent également être utiles pour apprécier les risques de dommages en cas de tempêtes survenant pendant les phases de travaux et pour rechercher les protections provisoires à prévoir en cas d'annonce de tempête et/ou d'arrêt du chantier.

III.6.7.3. Etude des évolutions des fonds : modèles sédimentologiques

Cette catégorie d'étude concerne l'action de la houle et des courants sur les sédiments marins

et l'évolution des fonds qui en découle.

Elle recouvre un grand nombre de problèmes, comme (**Caude, 2004**) :

- L'ensablement et/ou l'envasement des ports et de leurs accès.
- L'érosion et la protection du littoral.
- L'impact d'ouvrages sur les fonds et sur le littoral.
- La création ou la restauration de plages.

Ces modèles, véritablement opérationnels, ont près d'un demi-siècle d'existence. Ils ne nécessitent pas la connaissance fine des phénomènes. Le fait que le modèle, une fois bien réglé, simule de lui-même les phénomènes suffit à valider son exploitation, à condition que les essais soient réalisés dans le même domaine (par exemple un modèle étalonné uniquement sur des processus de sédimentation ne peut, en toute rigueur, être utilisé pour examiner des processus d'érosion) (**Delouis, 2001**).

Ces modèles doivent simuler la dynamique hydrosédimentaire d'un site donné, c'est-à-dire qu'ils doivent reproduire à la fois les phénomènes hydrauliques (houles, marées, courants) et les phénomènes sédimentologiques (la reprise, le transport et le dépôt des sédiments).

La similitude de Froude doit être complétée par une similitude sédimentologique, qui permet entre autres de définir le matériau (densité et granulométrie) et de simuler le sédiment naturel et l'échelle des temps sédimentologiques (rapport entre les durées modèle et nature pendant lesquelles, sous des actions hydrauliques homologues, se produisent des évolutions de fond analogues) (**Migniot, 1973**).

La similitude hydrodynamique repose sur des lois physiques universelles découlant de la mécanique des fluides. Par contre, la similitude sédimentologique repose sur des formules empiriques (critères de début d'entraînement, transport et dépôt de sédiments) ayant des caractéristiques spécifiques suivant le type d'action hydraulique (courants, houles), la nature du sédiment (sable, galet, vase) (**Mignot et al, 2002**).

Par ailleurs, il n'existe, pour simuler le sédiment naturel, qu'une gamme limitée de matériaux techniquement et économiquement utilisables (matières plastiques, bakélite, nacre artificielle, poudre de bois, vase naturelle traitée, sable). Ainsi, il n'y a pas une, mais des similitudes sédimentologiques, et chaque laboratoire a développé ses méthodes propres basées sur son expérience, mais elles sont finalement peu différentes (**Viguié, 1992**).

Les modèles à fonds mobiles doivent permettre d'étudier des longueurs de côte généralement comprises entre 3 et 6 km et s'étendant vers le large sur 2 à 4 km. Ces modèles sont construits en maçonnerie à partir des levés des fonds dans des cuves à houle ayant 700 à 1500 m² de surface. Ces cuves sont équipées de l'appareillage de reproduction des phénomènes naturels (générateurs de houle, de marée et de courant) (**Delouis, 2001**).

Une étude sur modèle réduit sédimentologique comprend les phases successives suivantes (**Migniot, 1973**) :

- Construction du modèle.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- Réglage hydraulique : reproduction des phénomènes hydrodynamiques du site (houles, marées, courants,...).
- Réglage sédimentologique : mise au point d'un cycle annuel qui est la succession schématique des houles naturelles (hauteurs, périodes et directions) telle qu'elle a pu être observée sur le site lors d'une année moyenne, c'est-à-dire avec des périodes de tempête et des périodes de beau temps.
- Reproduction des évolutions des fonds observées par le passé (méthode historique), cette phase est la plus importante, car elle va valider le modèle quant à sa capacité à reproduire la dynamique du site.
- Essais, avec généralement des essais de recherche qui permettent de tester les aménagements étudiés sur des périodes de 3 à 5 ans, et un essai final au cours duquel l'aménagement retenu à l'issue des différents essais de recherche est étudié sur une longue période (8 à 10 ans ou plus).

III.6.8. Les échelles

Une échelle est le rapport entre une dimension réelle, du prototype et celle du modèle utilisé. Lors d'une modélisation physique les échelles sont nombreuses et leur choix dépend d'un certain nombre de paramètres.

III.6.8.1. Analyse dimensionnelle et système d'unités

Le système international d'unité se base sur les trois grandeurs fondamentales : longueur L (m), masse M (kg) et temps T (s), on pourra donc exprimer toutes autres dimensions physiques de la majorité des paramètres hydrauliques en fonction de ces trois grandeurs principales.

III.6.8.2. Echelle non-distordue

C'est l'échelle la plus fréquemment utilisée dont les rapports horizontaux sont égaux aux rapports verticaux. Elle est utilisée dans la planimétrie.

III.6.8.3. échelle distordue

La distorsion est une forme de déformation importante des modèles réduits, elle réside dans le fait que les échelles géométriques diffèrent c'est-à-dire que l'échelle horizontale sera différente de la verticale, en effet on peut distordre non seulement les échelles géométriques mais aussi les caractéristiques hydraulique tels que les nombres de Froude et de Reynolds relatifs aux grains.

III.6.8.4. Choix de l'échelle

Le choix de l'échelle est une étape décisive qui oriente la suite de la démarche de modélisation, il doit être entrepris avec un maximum de rationalisme afin de nous rapprocher le plus possible de la réalité. Pour cela il faut que toutes les conditions hydrauliques importantes soient prises en considération.

Le choix de l'échelle est souvent contrôlé par les dimensions de la zone à étudier, du bassin, des ouvrages, ainsi des conditions hydrographiques du modèle (la hauteur d'eau, hauteurs de houles).

III.6.8.5. Construction du modèle :

La construction du modèle est faite suivant les phases suivantes :

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- Carroyage du bassin pour le repérage =Echelle en nature/Echelle en modèle.
- Dessin sur la dalle du bassin, des contours du site et des isobathes.
- Calage et matérialisation des niveaux des contours du site et isobathes grâce à un niveau topographique et à des fers plats façonnés suivant le dessin reporté sur la dalle.
- Le remplissage du fond du modèle avec du sable.
- Lissage de finition avec une chape en mortier de ciment de « 5 cm » d'épaisseur arasée au niveau des fers plats représentant les isobathes.
- La maquette du port est construite dans son état initial, avec différents matériaux de construction (mortier, enrochements,...), dans le bassin vide par simple mise en place manuelle des différents éléments suivant le tracé des ouvrages.
- Et pour minimiser la création des houles parasites dues à la réflexion, les limites du bassin à houles sont couvertes d'un filtre absorbant en briques trouées de maçonnerie.

III.6.8.6. Choix des matériaux de l'ouvrage

Les matériaux constituant les différentes parties de l'ouvrage, sont sélectionnés en fonction de leurs poids et de leurs tailles.

Chaque catégorie d'enrochements fait l'objet d'un tri soigné. En ce qui concerne le tout-venant de carrière, il est soumis à un lavage préliminaire afin d'éliminer les éléments fins susceptibles de déformer la représentation de la perméabilité de l'ouvrage.

Les caractéristiques des matériaux constituant l'ouvrage ont été déjà évoquées. Pour les matériaux du modèle, on appliquera la relation suivante :

$$P_{\text{modèle}} (g) = P_{\text{nature}} (g) / \gamma^3 * 0.87$$

III.6.8.7. Calibration (réglage hydraulique du modèle)

Après la construction des fonds et le remplissage en eau, une calibration du modèle s'effectue. Elle a pour but d'une part de faire la mise au point de l'appareillage, et d'autre part d'ajuster les conditions expérimentales de manière à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques soit reproduits conformément à la nature. On procède donc à la calibration des sondes d'enregistrement, vérification de leurs emplacements, vérification du niveau d'eau, ...etc.

III.6.9. Conditions des essais

Les conditions de chaque essai sont les suivants :

A-Les conditions hydrographiques

Les conditions hydrographiques seront pris en considération afin d'étudier les conditions de houles les plus défavorables (surcôte, tempête...etc.).

b- Les houles

Les conditions de houles retenues pour la modélisation sont celles issues de l'étude des houles au large.

c-Période de pointe

Pour les besoins de l'étude en modèle, il est demandé de faire correspondre à chaque hauteur de houle une période de pointe y afférente. Le modèle est équipé d'un logiciel acquis récemment par le LEM du laboratoire Anglais Wallingford. Celui-ci impose le choix du spectre devant être choisi pour la génération en modèle. Dans le cadre de cette étude, le spectre choisi étant celui de Jonswap.

Ainsi la période correspondante pour chaque hauteur de houle est donnée par la relation :

$$T_p(s) = \frac{2\pi}{0,25 + \frac{1,80}{Hs + 0,60}}$$

d-Génération de la houle

La houle appliquée sur la maquette est générée par un batteur.

Tout est piloté par un générateur électronique qui est lié à un logiciel informatique dénommé Wavegen représentant un train de houle théorique en nature et converti en train de houle en modèle.

Cette fonction est introduite dans un système "Servo" qui contrôle le mouvement du vérin. Le générateur reproduit des houles aléatoires relevant du spectre d'énergie déterminé. Les périodes et amplitudes simulées en modèle sont obtenues respectivement par variation de la vitesse et par amplification du signal de puissance (Out-Put) du générateur électronique. (Al Sid Chikh, 2011).

e-Mesure de la houle

La houle générée dans le modèle est enregistrée par des capteurs de houle (sondes) basés sur le principe de conductance électrique entre deux électrodes.

Les signaux des capteurs de houle sont enregistrés en continu et analysés par une chaîne de mesure informatisée préprogrammé " **Multi Chanel Wave Analyser** " qui peut traiter jusqu'à 32 canaux. A la fin de chaque essai, la chaîne de mesure transmet à l'imprimante les répartitions statistiques de tous les signaux enregistrés. (Al Sid Chikh, 2011).

III.6.10. Les observations effectuées et les moyens de mis en œuvre

III.6.10.1.Observations hydrauliques

Lors de chaque essai, le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage est étudié avec attention. Ainsi, pour chaque configuration d'essai sont notés :

- les franchissements : nature, localisation, importance.

- les déferlements.

Ces observations sont ensuite corrélées avec les dégâts pour une analyse complète.

III.6.10.2. Observation des dégâts

L'observation des dégâts est principalement faite dans les zones sensibles de l'ouvrage, notamment la berme supérieure et les contrebutees intérieure et extérieure : stabilité des enrochements et estimation des dégâts.

Les observations des dégâts sont réalisées pendant le déroulement des essais (mode de dégradation) et à la fin des essais, après vidange (évaluation des dégâts).

III.6.10.3. Critères de stabilité

Il convient, pour tout ouvrage maritime, de s'assurer de la tenue de l'ouvrage qui doit résister à l'action dynamique de la houle pour les tempêtes les plus fortes.

La finalité de cette étude est de définir une conception optimale du point de vue technico-économique en se basant sur les critères de dommages acceptables.

Le dommage est défini comme dommage relatif, qui est égal au rapport entre le nombre des blocs déplacés et le nombre de blocs posés, dont les dégâts admissibles sont fixés à 5% maximum pour la houle cinquantennale.

III.6.10.4. Moyens mis en œuvre pour les observations

Toutes les observations sont notées au fur et à mesure des essais. Ainsi, de nombreux clichés sont réalisés permettant en outre de comparer les dégâts propres à chaque essai, et éventuellement, un enregistrement vidéo est aussi effectué pour visualiser de manière plus concrète le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage.

III.6.10.5. Critères d'agitation

De nombreux ports connaissent des problèmes d'agitation du plan d'eau. Cela a pour conséquences des dégâts sur les bateaux et les amarrages. Pour pouvoir prendre des mesures compensatoires, il est nécessaire de bien caractériser ces phénomènes. Le recours à la modélisation physique nous permet non seulement de quantifier l'agitation à l'intérieur du port, mais aussi de voir les phénomènes qui sont responsable de cette dernière.

L'agitation résiduelle admissible dépend des paramètres suivants :

- Le navire (type, dimensions) ;
- La cargaison (type) ;
- Equipement de chargement et de déchargement ;
- Expérience de la main d'œuvre disponible pour le chargement / déchargement.

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV.1. Etude bathymétrique

IV.1.1. Morphologie sous-marine

Les données des levés bathymétriques issues de la campagne de reconnaissance du LEM (2018), sont exploitées par le logiciel Surfer 15, afin de réaliser la carte bathymétrique suivante :

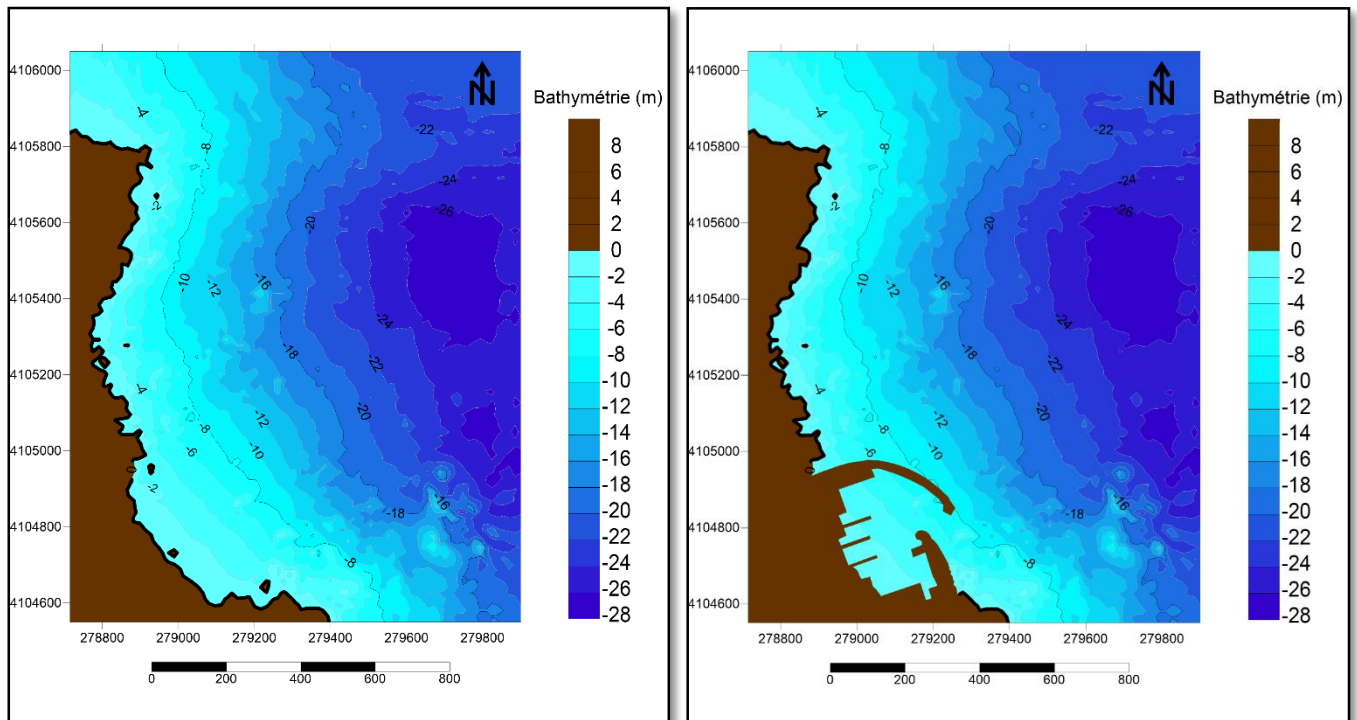


Fig. IV.1 : Carte bathymétrique de la zone d'étude (Réalisée à l'aide du logiciel Surfer 15) avant et après aménagement

L'analyse de la carte bathymétrique (**Fig. IV.1**) révèle une morphologie sous-marine irrégulière, les isobathes sont plus au moins parallèles à la côte. Les isobathes qui se situent entre le trait de côte et -20m de profondeur sont serrées ce qui montre une pente raide. Au-delà de -20m de profondeur, les équidistances entre les isobathes augmentent traduisant une pente plus douce.

IV.1.2. Etude des profils bathymétriques

L'étude des profils bathymétriques consiste à étudier au mieux la géomorphologie sous-marine ce qui permet de donner une idée sur la forme du plateau continental, pour cela on a réalisé 3 profils perpendiculaires à la côte (**Fig. IV.2**). Pour chaque profil, une courbe illustre respectivement les observations de l'année 2018.

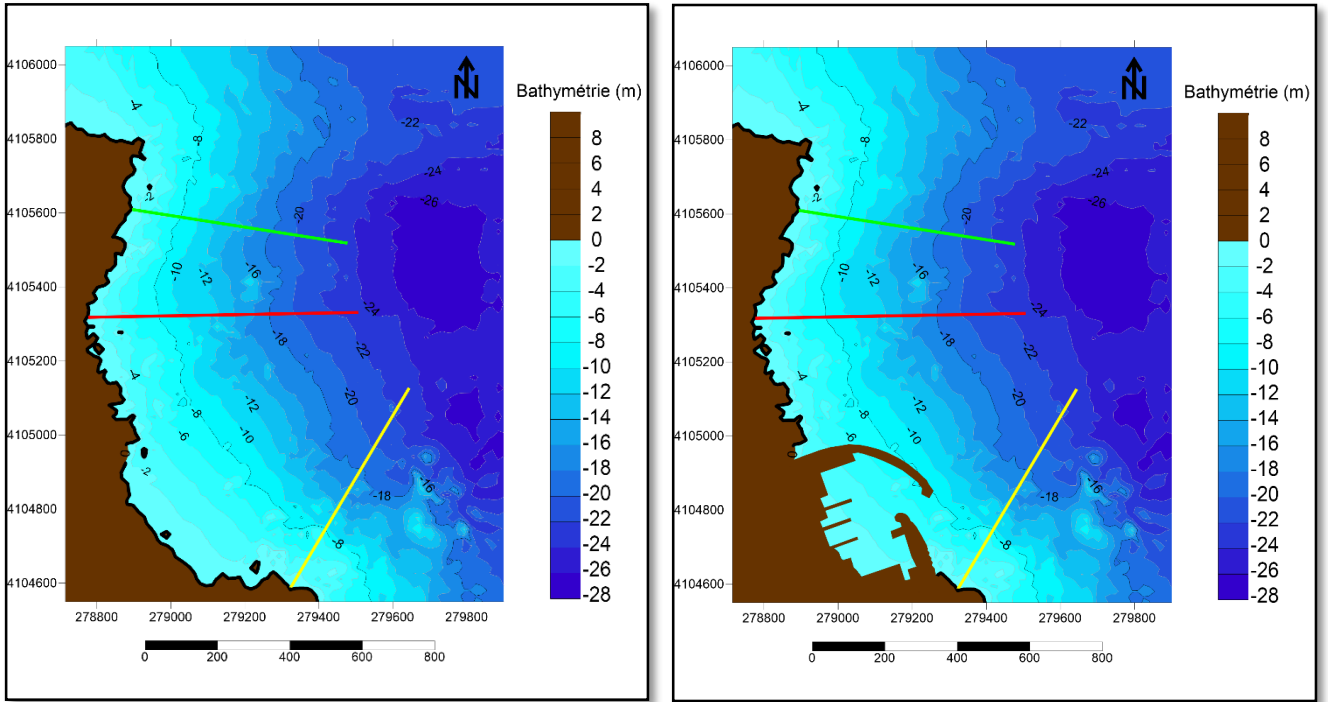


Fig. IV.2 : Carte bathymétrique et le tracé des profils dans la zone d'étude (Surfer 15) avant et après aménagement

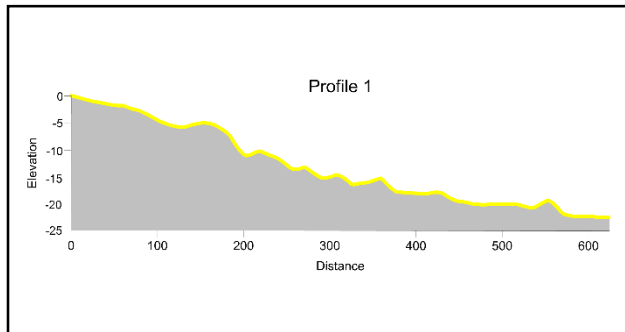


Fig. IV.3 : Profil sous marin n°1

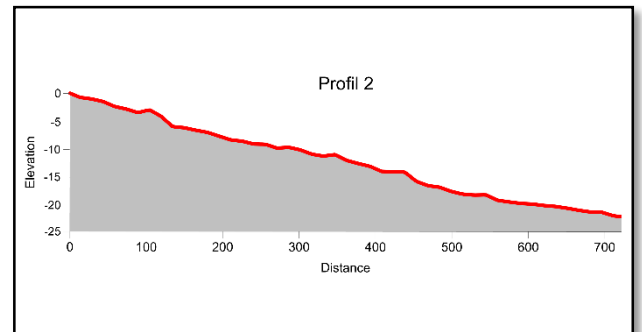


Fig. IV.4 : Profil sous marin n°2

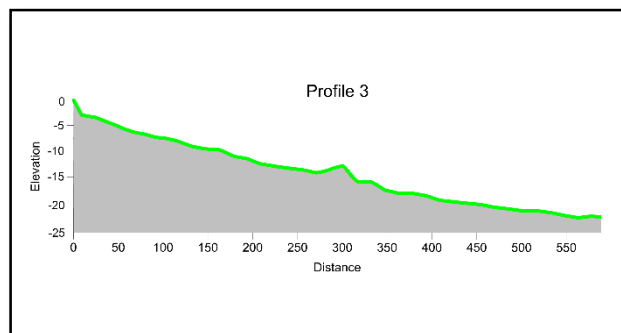


Fig. IV.5 : Profil sous marin n°3

Commentaire

D'une manière générale, le fond marin de notre zone d'étude se caractérise par un relief irrégulier. L'étude des profils a mis la lumière sur une morphologie particulière caractérisée par une pente raide et à partir de -20 m de profondeur elle devient douce.

Profil 01 : Représente l'extrémité Est, qui semble être la partie la plus perturbée du site, caractérisée par un tracé très irrégulier preuve de la nature rocheuse et accidentée des fonds.

Profil 02 : Représente la partie centre du site, formée par une pente abrupte jusqu'à -20m puis continue en pente douce jusqu'au large et caractérisée par un tracé perturbé.

Profil 03 : Représente la partie Ouest du site, caractérisée par une pente raide, ce tracé semble plus ou moins régulier traduit par des courbes de niveau serrées.

IV.2. La sédimentologie

IV.2.1. Paramètres de position

IV.2.1.1. Le grain moyen D50 (μm)

Le diamètre moyen D50 est le diamètre du grain à l'ordonnée 50%, c'est la médiane :

$$D50 = \frac{\varphi 16 + \varphi 50 + \varphi 84}{3}$$

Tab.IV.1. Répartition des sédiments en fonction de leurs diamètres (**Folk et Ward**)

Sédiments	Diamètre
sables fins	40 - 200 μm
sables moyens	200 - 500 μm
sables grossiers	500 - 2000 μm
sables très grossiers	> 2000 μm

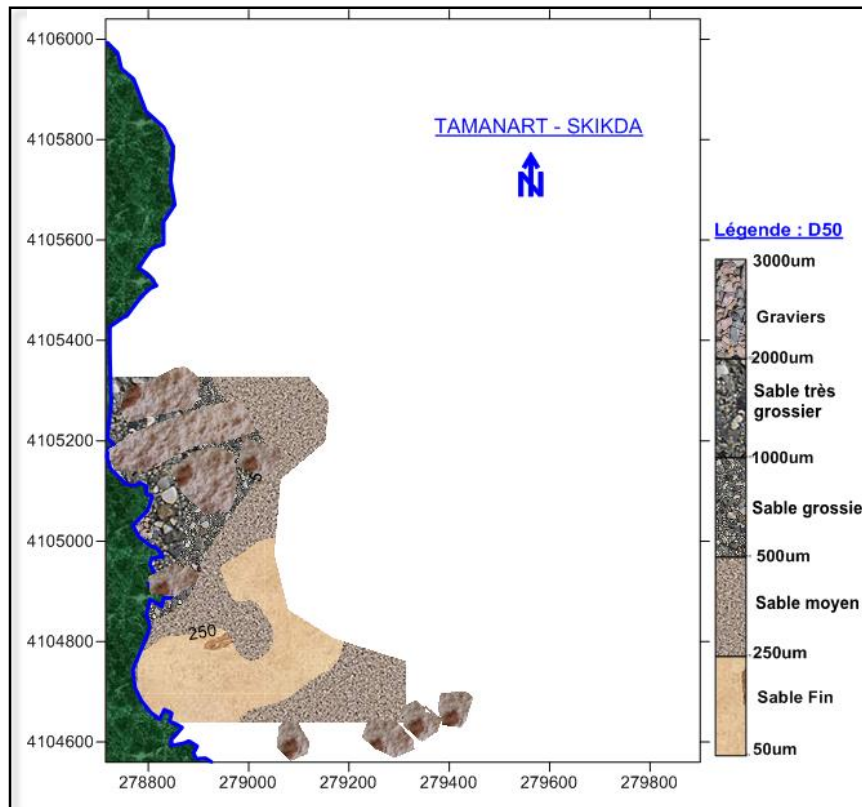


Fig. IV.6 : Carte de la répartition des médianes (D_{50}) dans la région de « Tamanart» (LEM, 2018)

La carte ci-dessus (**Fig.IV.6**) représente la répartition spatiale du diamètre moyen D_{50} obtenue sur l'ensemble des 40 échantillons.

Conformément à ce qui est observé dans cette carte, on remarque que la partie Est du site d'étude est tapissée par une couverture sédimentaire composée essentiellement de sable fin et de sable moyen avec la présence d'une couverture rocheuse non négligeable à l'extrémité. Pour ce qui est du côté Ouest, la distribution est plus hétérogène, elle est composée de sable grossier, très grossier et graviers avec une dominance rocheuse plus importante qui va de la côte jusqu'aux profondeurs de 12 m environ.

IV.2.1.2. Analyse modale

Les histogrammes de fréquence des répartitions dimensionnelles des refus cumulés permettent de donner des indications sur le mode ou le diamètre des grains le plus rencontré dans notre zone d'étude. L'Analyse des 40 échantillons a permis de distinguer deux modes qui se répètent soit dans le même échantillon, ou bien dans des échantillons différents comme indiqué dans les échantillons témoins, N° 07 N° 12 et N° 26.

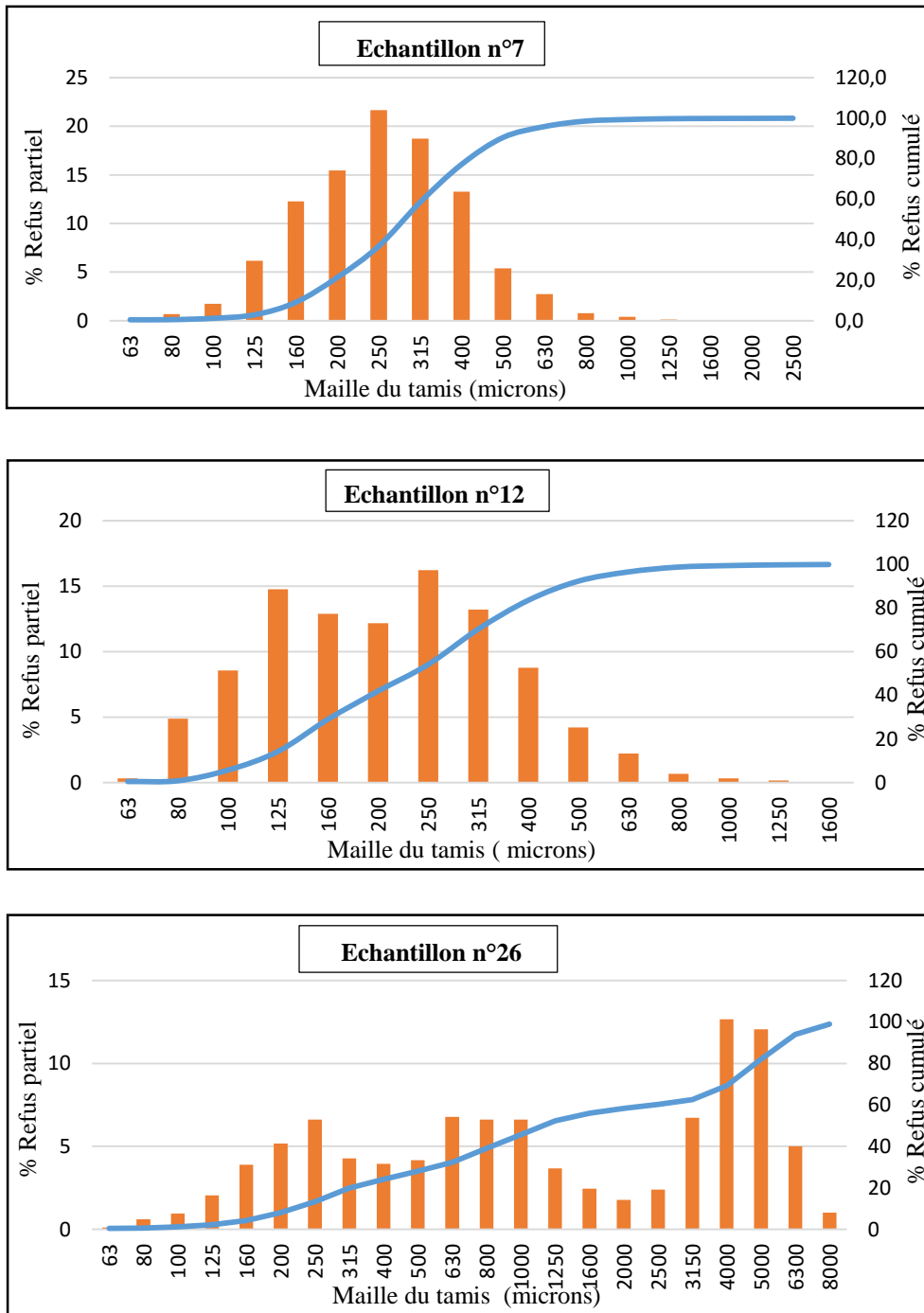


Fig. IV.7 : Classes Modales des sédiments sous-marins de la région de Tamanart

- Mode M1 : Il est compris entre 125 μm et 200 μm avec un maximum à 160 μm . Le mode M1 occupe un nombre important de prélèvements. Il représente le sable fin.
- Mode M2 : Le mode M2, est plus fréquent que le premier mode, il est compris entre 200 μm et 630 μm , avec un maximum à 250 μm . Il représente le sable moyen.

- Mode M3 : Contrairement aux deux modes précédents, le mode M3 est moins fréquent. Il est compris entre 630 μm et 4000 μm avec maximum à 2000 μm et représente le sable grossier à très grossier.

IV.2.2. Indices granulométriques :

a) Indice de dispersion ou de classement

Le calcul de l'indice de classement S_0 se fait selon la formule suivante, le résultat obtenu est expliqué selon les différentes classes mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Ces classes sont intéressantes car elles constituent un indice d'hydrodynamisme fort lorsque le classement est bon et définissent des aires de décharge ou de dépôt lorsqu'il est mauvais.

$$S_0 = [(\phi_{84} - \phi_{16}) / 4] + [(\phi_{95} - \phi_5) / 6.6]$$

Tab.IV.2 : Interprétation des valeurs de S_0

Valeur	Classement	Interprétation (courant)
$1.00 < S_0 < 1.20$	sédiment très bien classé (homogène)	très régulier
$1.20 < S_0 < 1.60$	sédiment bien classé	régulier
$1.60 < S_0 < 2.00$	sédiment moyennement classé	peu régulier
$S_0 > 2.00$	sédiment mal classé (hétérogène)	irrégulier

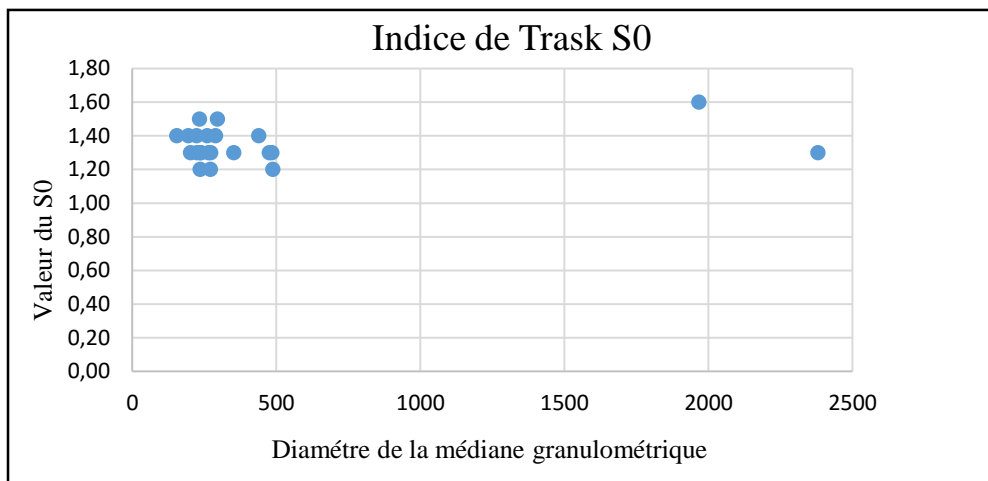


Fig. IV.8 : Les indices de classement S_0 dans les sédiments de la région de Tamanart.

Commentaire

Dans notre cas d'étude, les valeurs de S_0 pour les échantillons traités varient entre 1.2 et 1.6 ce qui indique un bon classement du sédiment au niveau du site de Tamanart et donc un courant régulier selon la classification de Folk (1966).

b) Coefficient d'asymétrie

L'indice d'asymétrie S_k caractérise le degré de symétrie de la courbe par rapport à la médiane. Il indique la prépondérance, ou non, des particules fines ou grossières par rapport à la moyenne de l'échantillon. L'indice d'asymétrie (S_k) est défini par la relation suivante :

$$SK = ((\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{84} + \phi_{16})) + ((\phi_{5} + \phi_{95} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{95} + \phi_{5}))$$

Tab.IV.3 : Interprétation des valeurs de S_k .

Pour ce coefficient d'asymétrie ou de Skewness, les valeurs adoptées sont les suivantes :

Valeur	Asymétrie	Signification	Interprétation (intensité du courant)
$S_k = 1$	nulle	courbe à tendance symétrique	courant modéré
$S_k < 1$	positive	décalage et classement maximum vers les particules grossières.	courant fort
$S_k > 1$	négative	décalage et classement maximum vers les particules fines.	courant faible

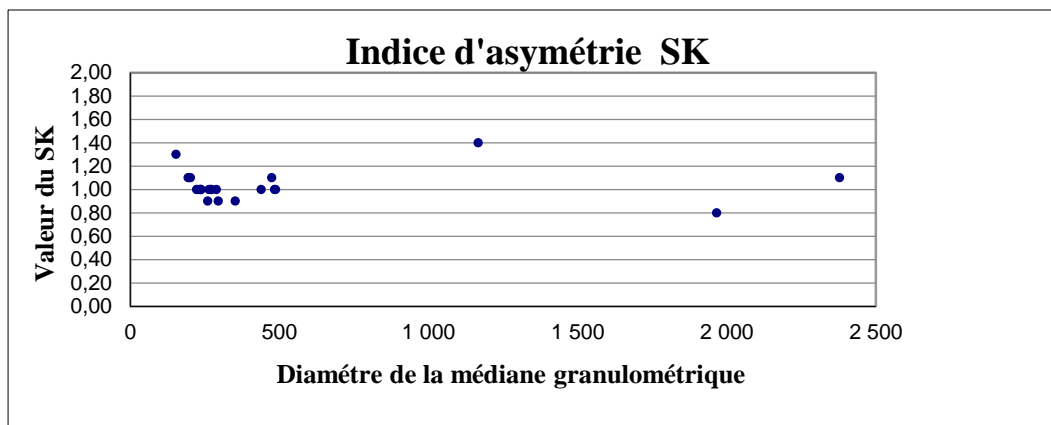


Fig. IV.9 : Les indices de classement SK dans les sédiments de la région de Tamanart.

Commentaire

Les valeurs de cet indice sont pour la plus part proche de 1. Les sédiments présentent un même classement aussi bien du côté fin que du côté grossier, ce qui se traduit par un granoclassement régulier dans notre zone d'étude (Folk 1966). Il indique également l'énergie du courant responsable du dépôt, une asymétrie négative montre un transport de haute énergie, tandis qu'une asymétrie positive montre un transport de faible énergie.

IV.3.Modélisation numérique :

Le résultat obtenu après avoir générer le Mesh est représenté dans les figures suivantes (Fig.IV.10 et Fig.IV.11) :

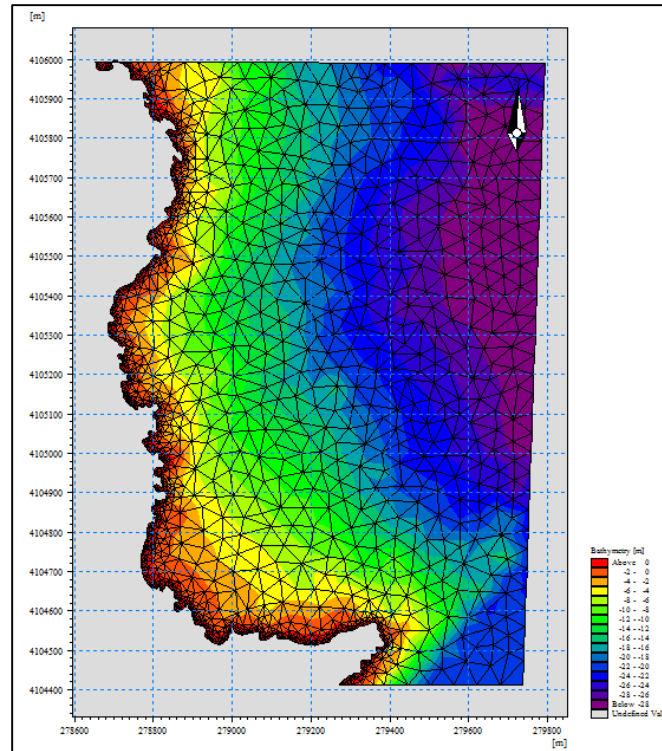


Fig. IV.10 : Maillage et bathymétrie de Tamanart (état initial)

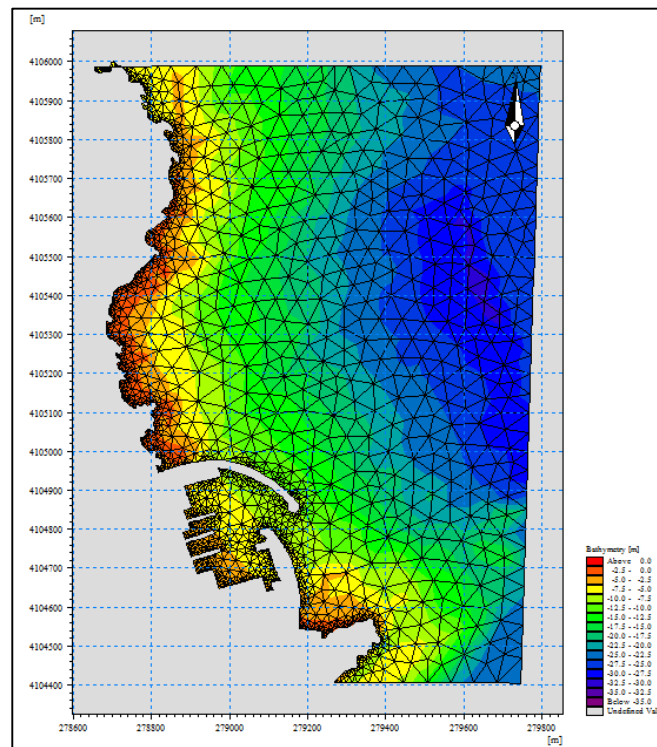


Fig.IV.11 : Maillage et bathymétrie de Tamanart (état avec aménagement)

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

IV.3.1 : Analyse des résultats des simulations numériques (avant et après aménagement)

IV.3.1.1 : Action des houles de direction Nord-Ouest (335°N) :

A. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW)

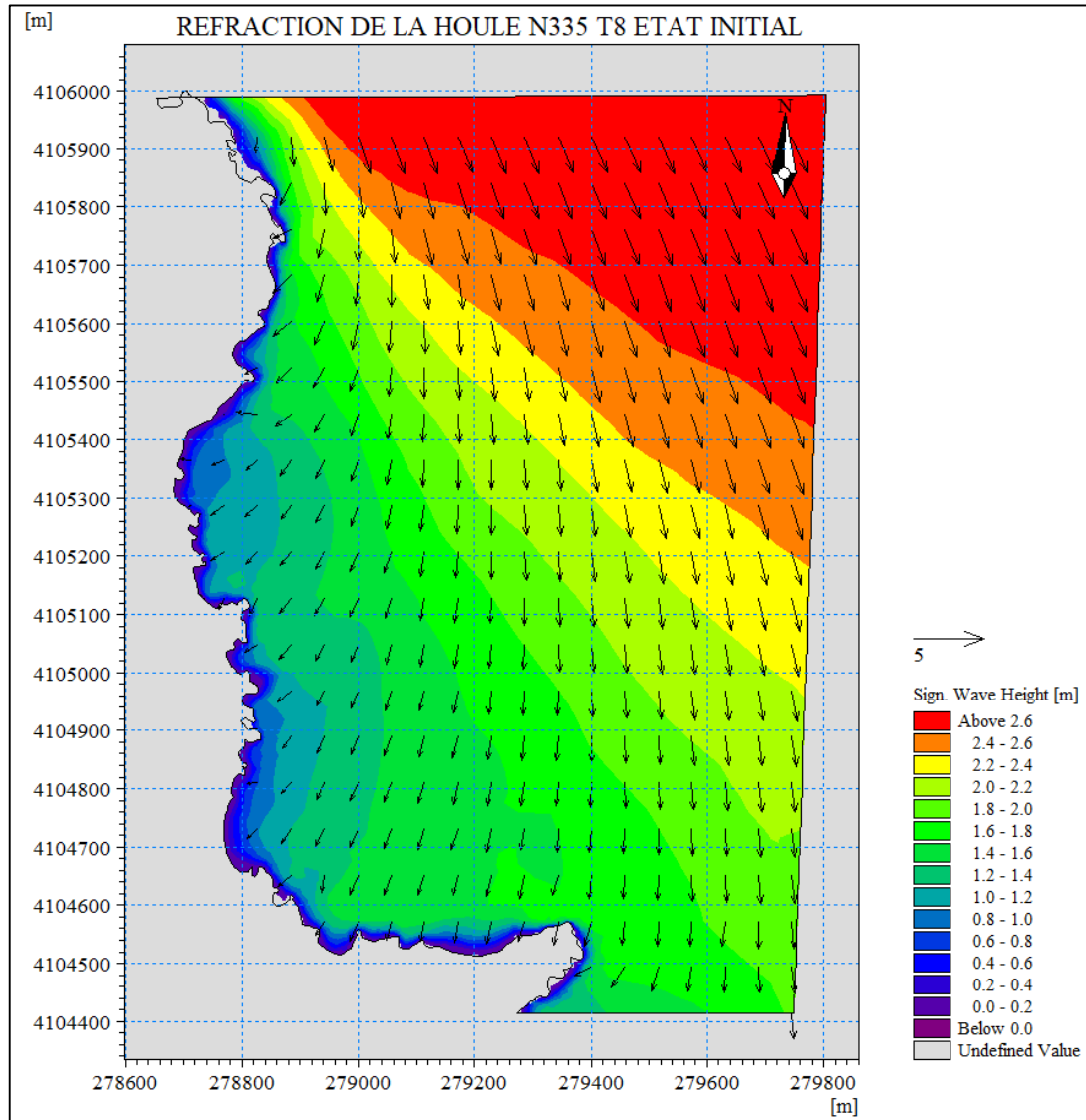


Fig.IV.12 : Champ de réfraction de la houle avant ouvrage, MWD=335° ; Hs=2.76 m ; T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.

L'étude de la réfraction réalisée grâce au logiciel Mike 21, à partir d'une houle annuelle du Secteur Nord-Ouest, démontre une diminution de l'énergie de la houle par réfraction. En effet, les hauteurs annuelles de cette houle atteignent les 2.60m au large pour une période T=8s, la propagation de cette dernière se traduit à l'approche du rivage par une modification de ses caractéristiques à savoir une diminution de la hauteur de la houle qui atteint les 1.4 m ainsi qu'une déviation de l'angle d'incidence (phénomène de réfraction).

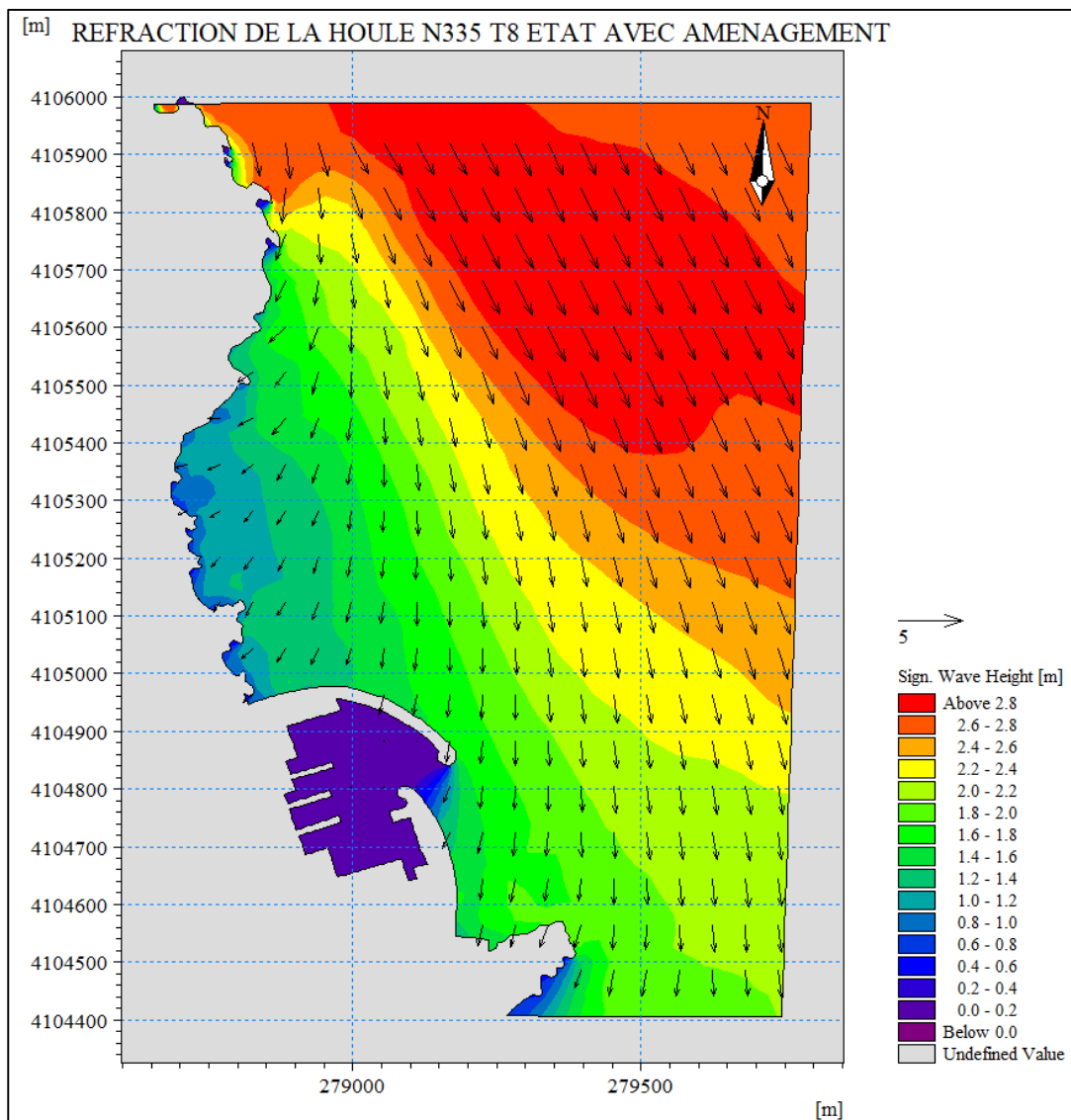


Fig.IV.13 : Champ de réfraction de la houle avec aménagement, MWD=335° ; Hs=2.76 m ; T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.

Le résultat de l'étude de la réfraction de la houle du Nord-Ouest (**Fig.IV.13**) montre que les orthogonales sont très réfractés à l'Ouest contrairement à l'Est avec une diminution de la hauteur de la houle en allant vers la côte.

Après aménagement, l'étude montre une diminution de la hauteur Hs à l'approche de la côte comparée à l'état initial.

La propagation pivote légèrement à proximité du port de Tamanart avec une hauteur de l'ordre de 1m au niveau de la passe d'entrée ce qui pourra générer un obstacle pour la manœuvrabilité des bateaux.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

B. Courantologie (Hydrodynamic, HD)

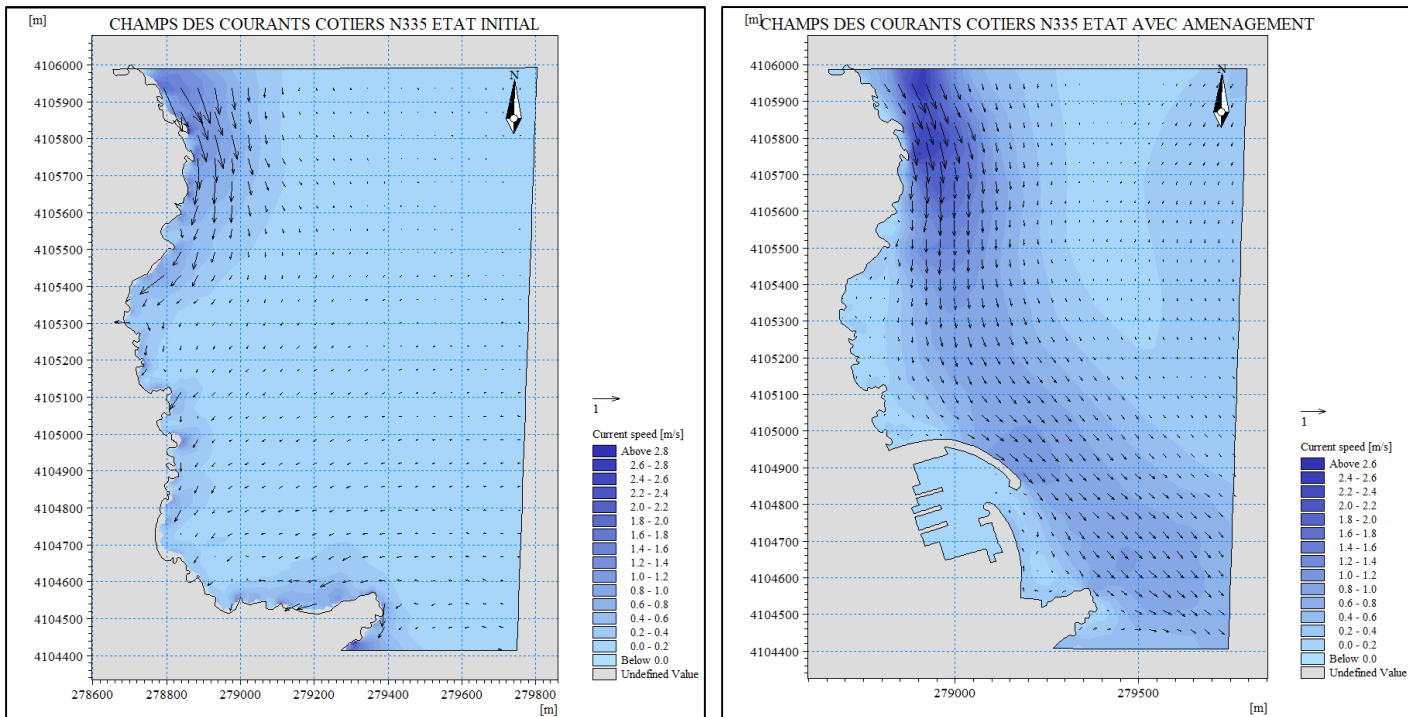


Fig.IV.14 : Champs des courants côtiers avant et après aménagement, $MWD=335^\circ$; $HS = 2.76$ m ; $T=8$ s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.

Dans la représentation graphique, les vecteurs symbolisent par leur sens la direction du courant, leurs longueurs étant proportionnelles au gradient de vitesse.

La houle $335^\circ N$ génère des courants de dérive littorale qui proviennent du Nord-Ouest vers le Sud -Est.

L'intensité des courants à l'approche de la côte varie entre 0.1 et 1 m/s.

- On remarque ainsi que dans la zone de l'implantation du port de plaisance, les vitesses de courant ne dépassent pas les 0.1m/s.

C. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)

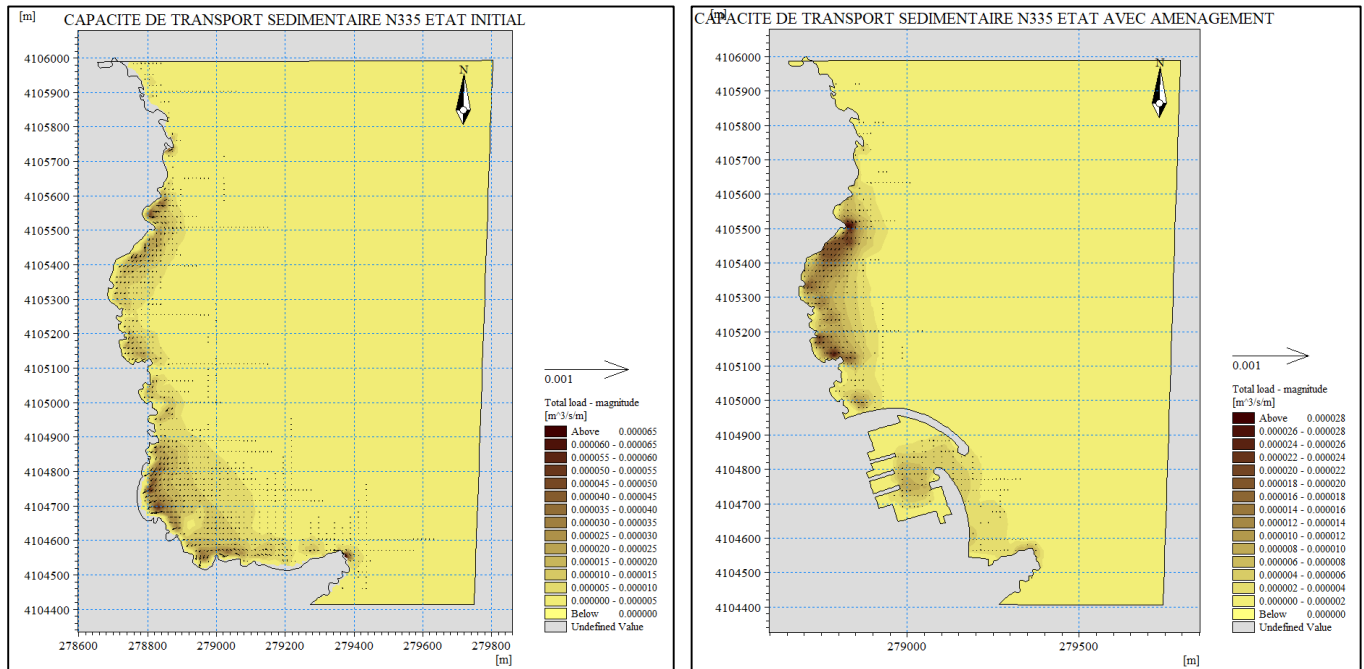


Fig.IV.15 : Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement, MWD=335° ; Hs=2,76 m ; T=8s dans le secteur Nord-Ouest dans la région de Tamanart.

Sur le plan sédimentologique la capacité de transport sédimentaire est exprimée en m³/s/m (convertie en m³/an/m) elle est définie comme étant la capacité des courants à mettre en mouvement les particules sédimentaires.

- La capacité du transport sédimentaire engendré sous l'effet des houles de 335°N se traduit par un transit des sédiments engendré par un courant Nord-Ouest.

On remarque que la zone de l'implantation du port de Tamanart est sujette à un transport sédimentaire de faible quantité uniquement au niveau de la jetée secondaire on observe que le transport sédimentaire est un peu élevé mais ceci ne devrait pas affecter le port projeté vu que l'implantation de la passe d'entrée par des profondeurs de 10m environ.

IV.3.1.2 : Action des houles de direction Nord ($15^{\circ}N$) :

A. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW)

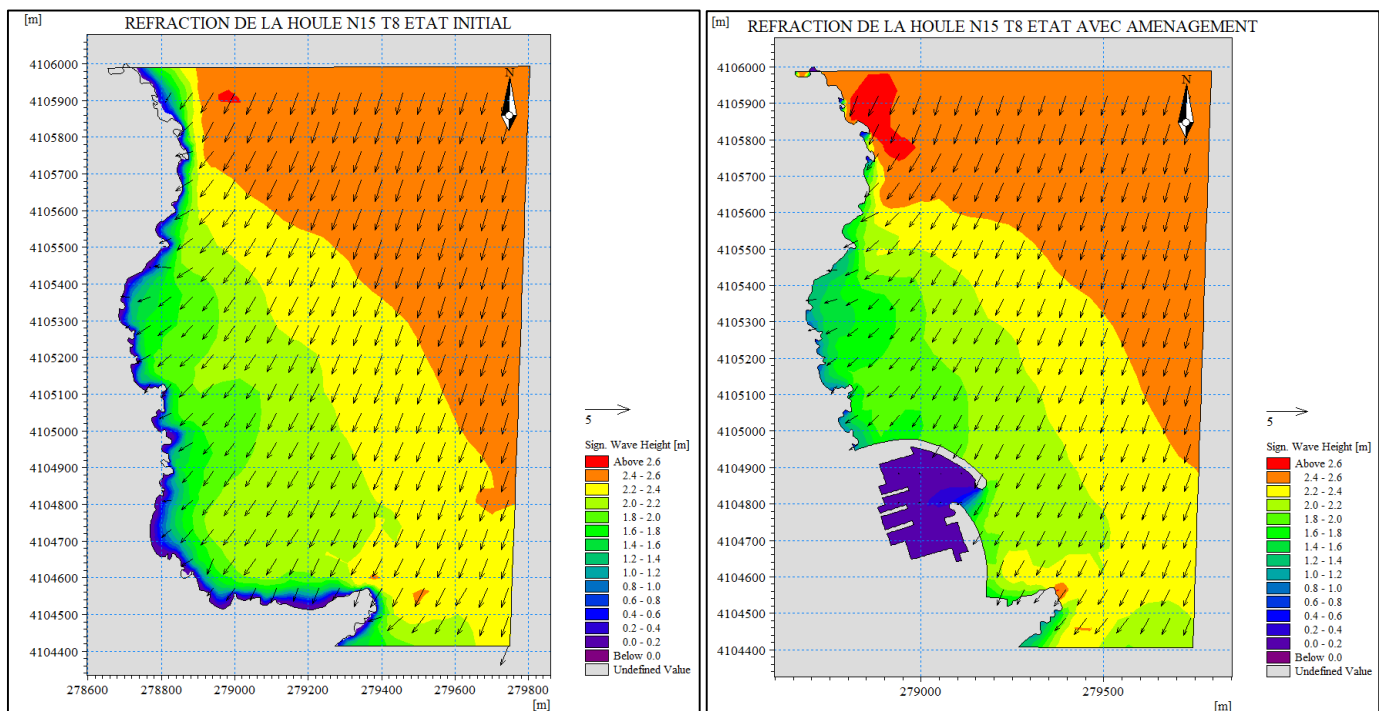


Fig.IV.16 : Champ de réfraction de la houle avant e après aménagement, MWD= 15° ; Hs=2.52 m ; T=8s dans le secteur Nord dans la région de Tamanart.

A l'état initial la houle $15^{\circ}N$ arrive réfractée à la côte ce qui est marquée par une diminution de la hauteur de la houle atteignant les 0.8m et une déviation de l'angle d'incidence (phénomène de réfraction).

On constate une nette diminution dans la hauteur de la houle au niveau de la zone d'implantation du port, ce qui peut être expliqué par une bonne protection face à la houle.

B. Courantologie (Hydrodynamic, HD)

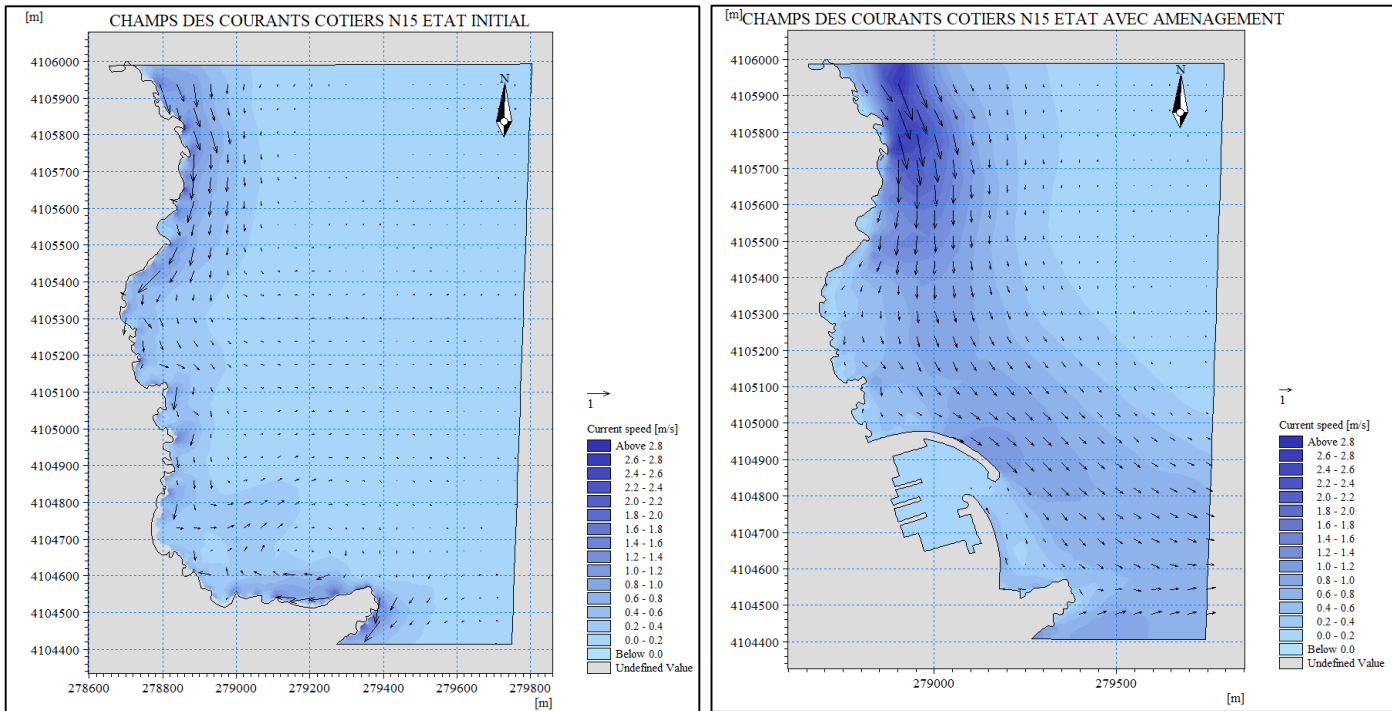


Fig.IV.17 : Champs des courants côtiers avant et après aménagement, MWD=15° ; HS =2.52 m ; T=8s dans le secteur Nord dans la région de Tamanart.

Les courants induits par les houles 15°N sont de direction Nord-Ouest Sud-est On note près des promontoires rocheux la formation de courant tourbillonnaires indiquant une forte agitation.

Après l’installation de l’ouvrage, on observe que les courants pivotent à proximité de l’ouvrage, cependant, à l’intérieur du port les courants pénètrent avec une intensité très faible qui ne dépasse pas les 0.1m/s.

C. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)

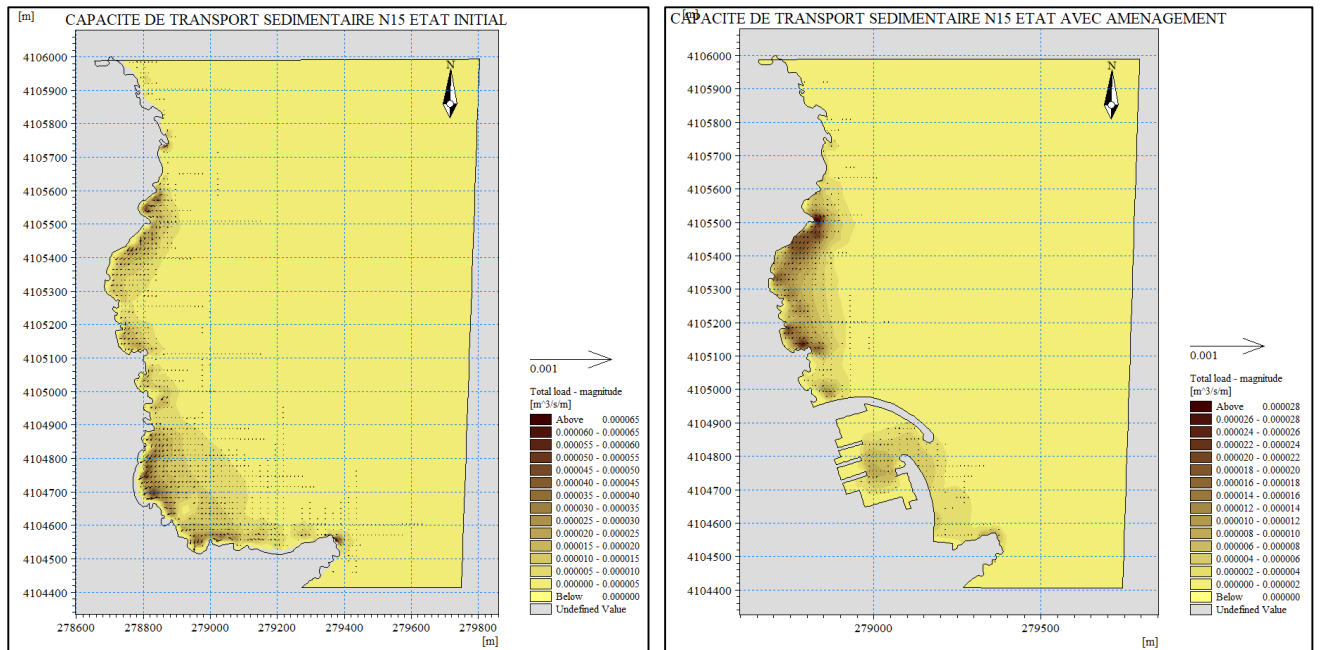


Fig.IV.18 : Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement, $MWD=15^\circ$; $H_s=2,52$ m ; $T=8$ dans le secteur Nord dans la région de Tamanart.

Sur le plan sédimentologique la capacité du transport solide montre que le transport sédimentaire est de direction Nord-ouest Sud-est ce qui est en parfaite analogie avec les courants.

L'implantation du port a nettement fait diminuer l'intensité du transit sédimentaire, mais on observe la présence de zones d'ombres à l'intérieur du port surtout au niveau de la passe d'entrée, ce qui peut désigner un faible remaniement de sédiments.

Un calcul de volume de sédiments pouvant se déposer au niveau de la passe d'entrée du port de plaisance projeté a été établi avec le module ST de Mike 21 (Discharge calculation). L'épaisseur des sédiments pouvant s'y déposer est très faible, et est de l'ordre de 5 mm / an.

IV.3.1.3 : Action des houles de direction Est (70°N) :

A. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW)

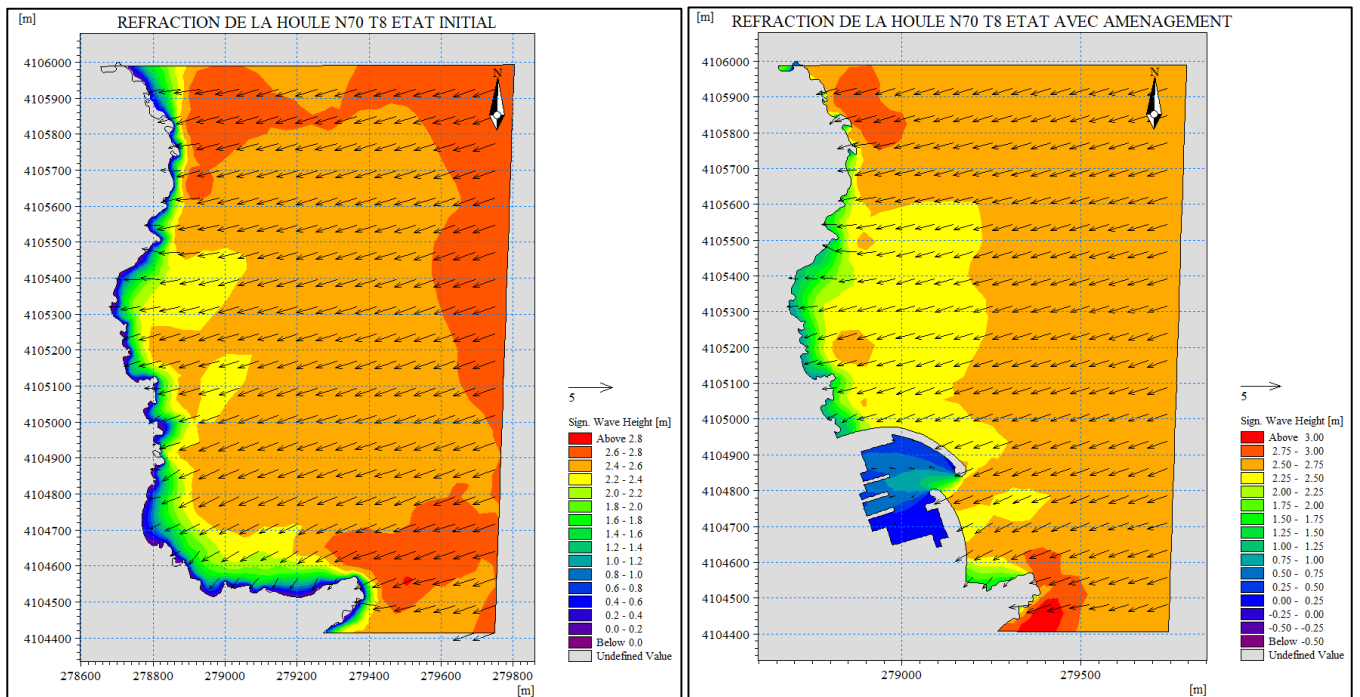


Fig.IV.19 : Champ de réfraction de la houle avant et après aménagement, $\text{MWD}=70^{\circ}$; $H_s=2.60\text{ m}$; $T=8\text{s}$ dans le secteur Est dans la région de Tamanart.

La propagation de la houle du secteur Est se traduit à l'approche du rivage avec une diminution relative de la hauteur de la houle et une légère déviation de l'angle d'incidence (phénomène de réfraction). Le paramètre H_s représente la hauteur de la houle en mètre qui varie globalement entre 0.2 et 2.4 m au niveau du site d'étude. La houle garde la presque totalité de son énergie du large et arrive sur la côte de la zone d'implantation du port projeté presque frontalement. Cette incidence frontale aura pour conséquence la formation des courants de retour dissipant les sédiments dans le profil, c'est à dire de la côte vers le large.

Après l'installation de l'ouvrage, Les houles arrivent sur le port de plaisance projeté avec une énergie importante. Ceci est d'autant plus marqué pour les houles de direction 70°N et $\text{N}25^{\circ}\text{N}$.

B. Courantologie (Hydrodynamic, HD)

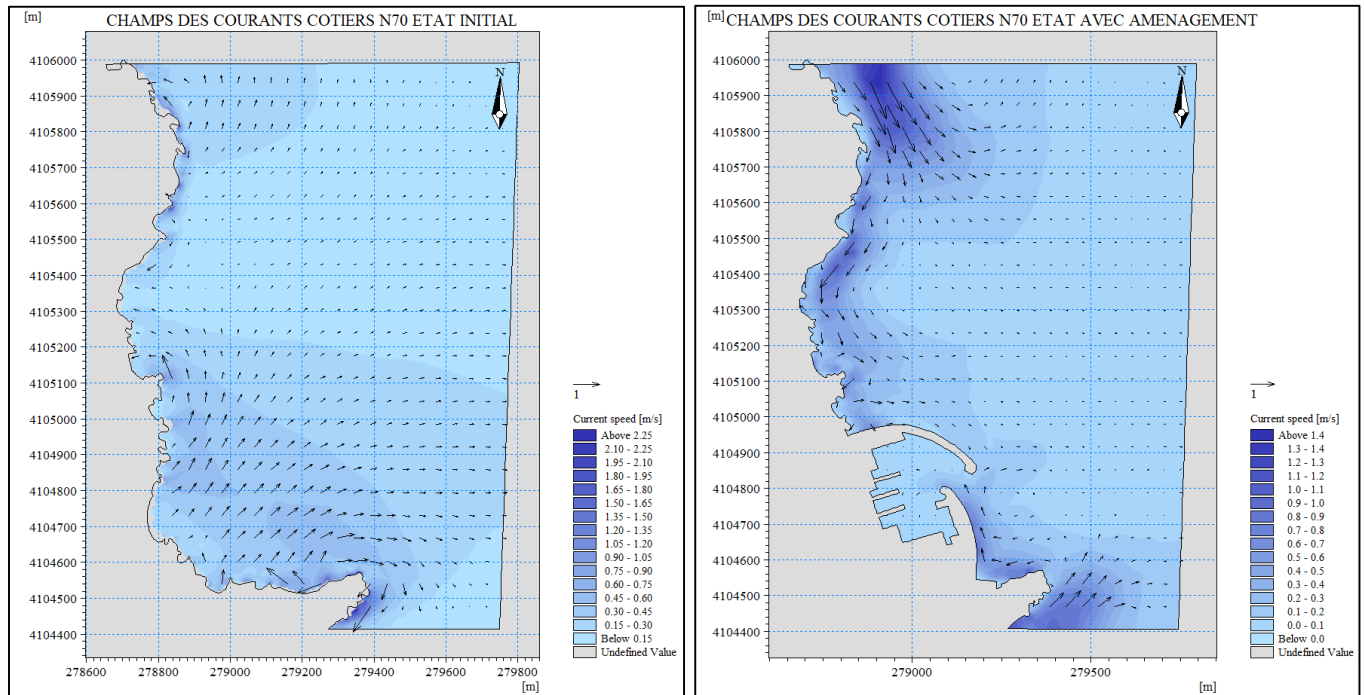


Fig.IV.20 : Champs des courants côtiers avant et après aménagement, MWD=70° ; HS =2.60 m ; T=8s dans le secteur Est dans la région de Tamanart.

Les courants littoraux induits par la houle de direction 70°N sont complexes. Il y a formation de courants tourbillonnaires qui donnent naissance à deux branches de courant, la première est de direction Nord-ouest Sud-est et la seconde branche longeant la côte est de direction contraire c'est à dire Sud-est Nord-ouest. Ces deux branches de courants se rejoignent pour former un courant de retour vers le large.

Après l'implantation du port, on observe que les courants littoraux générés par les houles de la direction 70°N forment deux branches d'écoulement, l'une venant du Nord-Ouest et l'autre venant du Sud-Est, elles se rejoignent au niveau de l'extrémité de la jetée principale du port pour former un courant dirigé vers le large.

C. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)

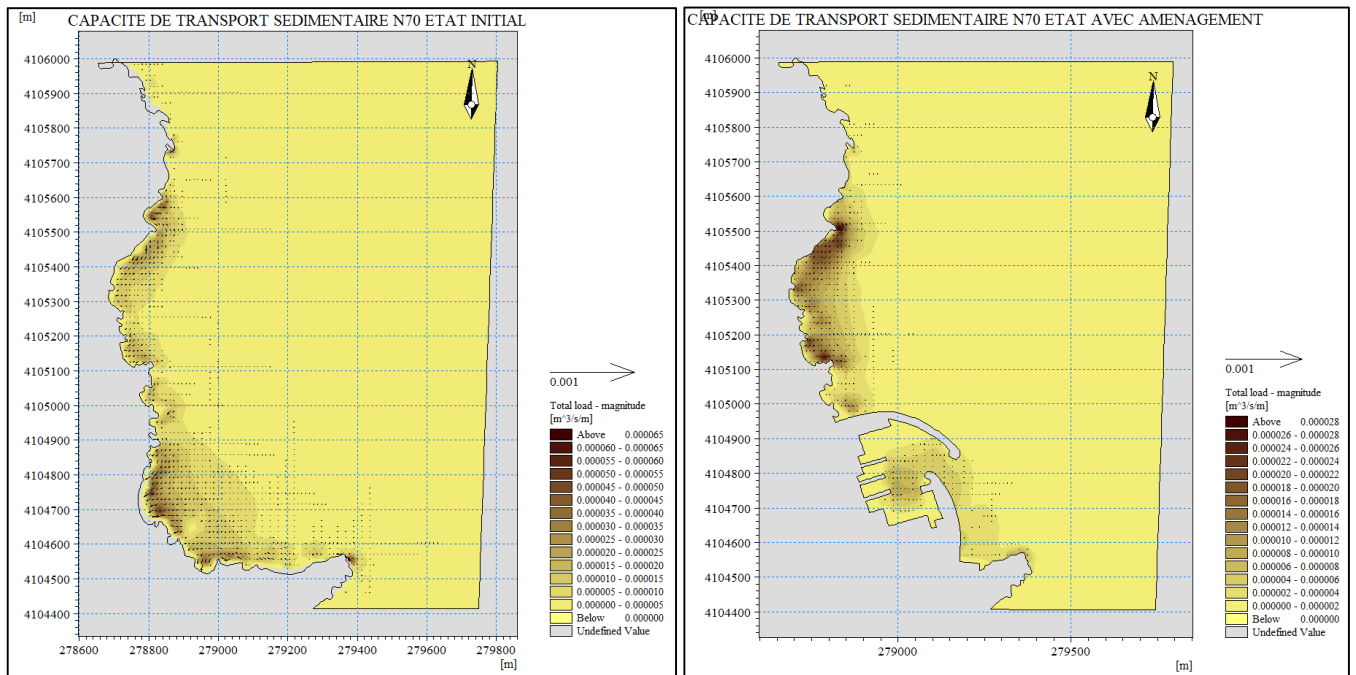


Fig.IV.21 : Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement, MWD=70° ; Hs=2,60 m ; T=8s dans le secteur Est dans la région de Tamanart.

Sur le plan sédimentologique la capacité de transport solide exprimée en $m^3/an/m$ (**Fig.IV.21**) montre que le transport sédimentaire dans la zone d'étude se fait vers le large ce qui est en parfaite analogie avec les courants. Il s'agit de sédiments moyens à grossiers avec une très faible teneur en pélites ce qui témoigne de la forte énergie de la houle dans la zone.

On remarque ainsi que la zone de l'implantation du port est sujette à un transport sédimentaire de faible quantité mais elle est sujette à un transport sédimentaire un peu élevé (couleur sombre) longeant la jetée secondaire du port dans le sens Sud-est Nord-ouest dans les conditions de houle de direction 70°N. Ceci ne devrait pas affecter le port projeté vu que l'implantation de la passe d'entrée par des profondeurs de 10m environ et vu que le courant prend naissance au niveau du Cap (zone rocheuse).

Conclusion

L'éventuel impact de la création d'un port sur les équilibres naturels ne serait jamais nul, même si certains aménagements sont parfois présentés comme un moyen de développement économique, il n'en demeure pas moins que l'impact sur l'environnement doit être pris en considération.

La mise en œuvre de la modélisation numérique véritablement bidimensionnelle permet la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire de la zone d'étude et l'appréciation des modifications de ces paramètres physiques.

Les résultats des simulations numériques établies pour l'état initial du site (sans aménagement), ont mis en évidence l'écoulement des courants de dérive littorale générés par l'action des houles du secteur Nord-Ouest, Nord et Est. Ces courants génèrent un transit sédimentaire bidirectionnel Nord-ouest Sud-Est et Sud-Est Nord-Ouest qui semblent assurer l'équilibre de la côte de la zone en question.

Ces courants seraient à l'origine du transport des sédiments issus de l'érosion des affleurements rocheux présents dans la zone d'étude.

La mise en place du port projeté indique qu'il y aurait modification des paramètres physiques du site. Cette modification porterait sur la réorientation des courants et la formation de courants tourbillonnaire à proximité de la passe d'entrée du port. Ces modifications dans le sens de l'écoulement des courants serait sans conséquences néfastes sur le port projeté et ceci en raison de son implantation par des profondeurs de 10m et de la nature rocheuse du site.

Nous pouvons conclure que sur le plan hydro- sédimentaire que le port ne montrerait aucun signe de risque pour qu'il soit soumis au phénomène d'ensablement.

IV.4. Etude d'agitation au niveau du port

Les résultats des simulations numériques de l'agitation sont illustrés par les figures présentées ci-dessous donnant l'agitation résiduelle (H_{m0}) au niveau des quais et des appontements par direction et par période des houles considérées.

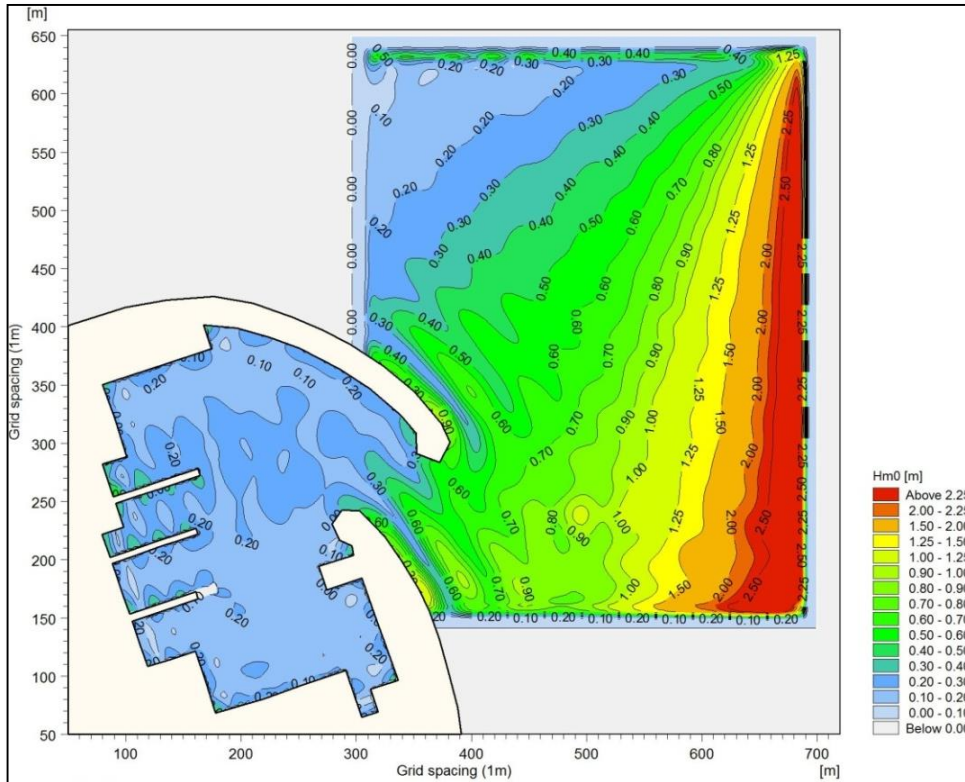


Fig. IV.22 : Etat d'agitation dans le futur port de Tamanart,
direction= 70° N ; HS=2.60 m ; T=8s

Les résultats de l'agitation du port de plaisance projeté sont satisfaisants .L'agitation à l'intérieur du port oscille entre 0.1 et 0.3m, des valeurs conformes au standard de confort selon le guide des pontons de plaisance, édité par le Secrétariat d'Etat à la Mer suivant le Conseil Supérieur de la Navigation de Plaisance et des Sports Nautiques en France.

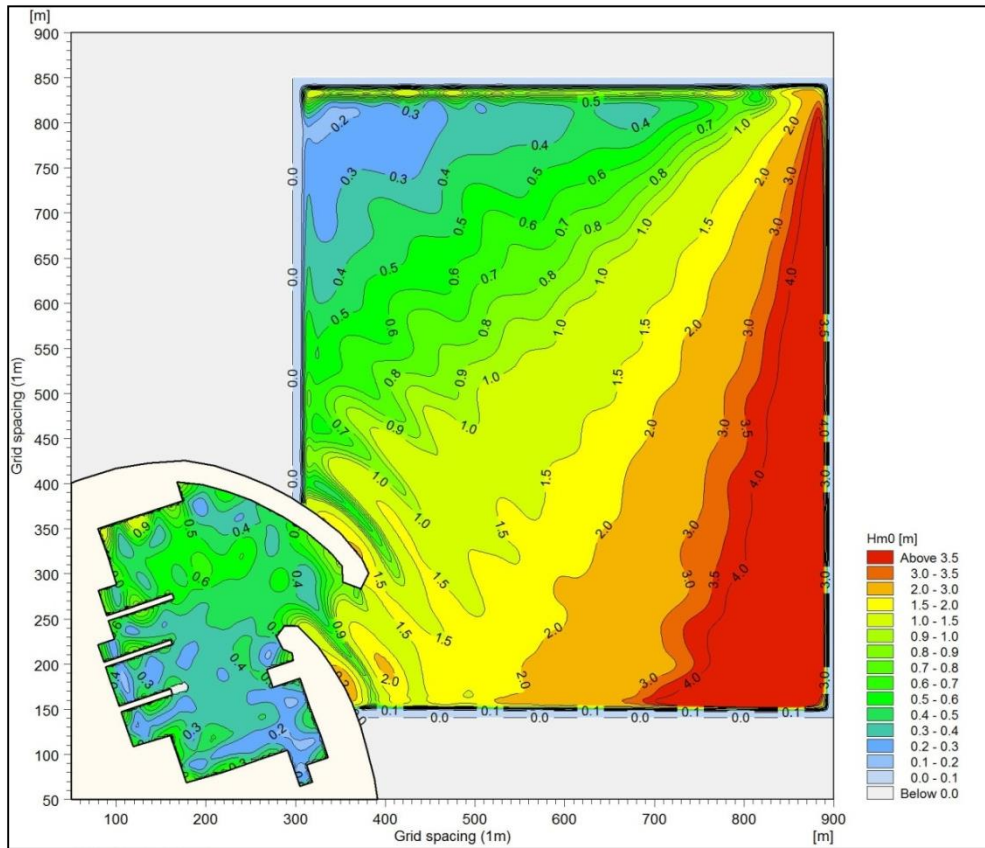


Fig. IV.23 : Etat d'agitation dans le futur port de Tamanart,
direction=25° N ; HS=7.03 m ; T=12.93s

Les résultats de l'agitation du port de plaisance projetés ne sont pas satisfaisants .L'agitation à l'intérieur du port oscille entre 0.1 et 0.4m pour la partie sud du port alors que dans la partie nord on notera des pics d'agitation de 1.25m au niveau du quai faisant face à la passe d'entrée du port alors que les valeurs admises en terme de sécurité pour houles exceptionnelles ne doivent pas dépasser les 0.5m selon le critère de sécurité du guide des pontons de plaisance, édité par le Secrétariat d'Etat à la Mer suivant le Conseil Supérieur de la Navigation de Plaisance et des Sports Nautiques en France.

Conclusion

La présente étude vient apporter les résultats de l'agitation au niveau du port de plaisance projeté à Tamanart mais les essais d'agitation en modèle réduit physique 3D permettront de mieux apprécier et de mieux préciser les valeurs de l'agitation résiduelle.

IV.5. Modélisation physique

IV.5.1. Introduction

La construction en bassin est la deuxième étape de l'étude, cette dernière permet de voir en temps réel le comportement de notre ouvrage vis à vis les houles générées. Cette phase consiste à procéder à la réalisation du port de plaisance de Tamanart en présentant les différentes variantes afin de trouver une solution pour le problème d'agitation et de stabilité.

IV.5.2. Conditions de houles

Les conditions de houles retenues pour les essais d'agitation et de stabilité du port sont tirées à partir des points d'extractions relevés à -25.0m de profondeur (**Tab.IV.4**) pour la série progressive, elles sont résumées comme suit :

Tab.IV.4 : Conditions de houles retenues pour les essais d'agitation et de stabilité du port (LEM, 2019)

Période de retour	Directions N 25°				Directions N 70°			
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)
1 an	4.76	10.73	2.63	8	3.14	8.59	2,60	8
10 ans	7.27	13.13	7.03	12.93	4.38	10.28	3,81	9,55
20 ans	8.05	13.72	7.98	13.67	4.75	10.71	4,08	9,90
50 ans	9.06	14.4	9.16	14.46	5.24	11.26	4,45	10,36
100 ans	9.65	14.76	9.83	14.87	5.61	11.64	4,71	10,67

IV.5.3. Conditions hydrographiques

Les conditions hydrographiques considérées lors de cette étude en modèle réduit physique sont comme suit :

- Niveau $\pm 0,00$ NGA : pour les essais de la série progressive.
- Niveau + 1.00 NGA : pour les essais de la série d'endurance.
- Hauteur significative à -25m : 2.60 m à 9.83 m.
- Période de pointe à : 8s à 14.87s.

IV.5.4. Choix de l'échelle

Compte tenu des dimensions du bassin à houles et l'étendue de la zone d'étude, de l'ouvrage ainsi que son implantation, l'échelle retenue est 1/70.

IV.5.5. Résultats des essais

Les essais se sont déroulés dans le bassin à houle du centre d'essais sur modèle du Laboratoire d'Études Maritimes : Les dimensions principales du bassin sont :

- Longueur : 26,0 m.
- Largeur : 16.0 m.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

- Profondeur : 1,00 m.

Ce bassin est équipé d'un générateur de houle régulière et aléatoire constitué :

- d'un volet plan ;
- d'un vérin hydraulique asservi en position sur un signal de commande continu ;
- d'un générateur électronique qui élabore le signal de commande lié à un programme de génération à l'aide d'un ordinateur, représentant un train de houle réel enregistré en nature et converti en train de houle en modèle.

Dans le cas de la houle aléatoire (houle utilisée pour l'ensemble de l'étude), le signal est effectivement aléatoire suivant une durée de tempête qui est fixée par le logiciel (cycle time).

IV.5.6. Construction des fonds

Les fonds du modèle ont été simulés à partir de l'isobathe -28 m afin de générer des houles les moins déformées possibles, ces derniers sont considérés comme fixes et sont constitués par du sable et recouverts par une chape de ciment.

IV.5.6.1. Choix des matériaux

Les matériaux constituant les différentes parties de l'ouvrage, sont sélectionnés en fonction de leurs poids et leurs tailles. Chaque catégorie d'enrochements fait l'objet d'un tri soigné. En ce qui concerne le tout-venant de carrière, il est soumis à un lavage préliminaire afin d'éliminer les éléments fins susceptibles de déformer la représentation de la perméabilité de l'ouvrage. Les matériaux de construction utilisés dans cette étude sont résumés dans le **Tab.IV.5** ci-après.

Tab.IV.5 : Choix des matériaux (LEM, 2019)

Désignation	Caractéristiques TN		Caractéristiques MRP	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
BCR	10	2.4	28	2.3
	20		57	
	40		114	
	50		142	
	60		171	
ENR	0-0.5	2.6	0 – 1.3	2.6
	0.5-2		1.3 – 5	
	2-5		5 - 13	
	1-3		2.5-7.6	

L'épaisseur de la couche d'enrochements du soubassement est estimée par la formule suivante :

$$e = \eta \cdot K_{\Delta} \cdot \frac{W}{\gamma_s}$$

η : Nombre de couches.

K_{Δ} : Coefficient de couche tenant compte de la nature des blocs.

- Enrochements : $K_{\Delta} = 1,15$.
- BCR : $K_{\Delta} = 1,02$.

W : Poids du bloc (t).

γ_s : Densité du bloc de béton (t/m^3).

- Le nombre de blocs à mettre en œuvre pour couvrir « $1.m^2$ » de talus est donné par la relation suivante :

$$N = \eta \cdot K_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{\delta_s}{W}\right)^{2/3}$$

P : Etant la porosité exprimé en (%), et qui est de :

- $P = 35\%$ pour les enrochements.
- $P = 44\%$ pour les blocs Antifer.

IV.5.6.2. Calibration (réglage hydraulique du modèle)

Après la construction des fonds et du modèle de protection, il fût procédé à la calibration du modèle. Ce réglage a pour but d'une part de procéder à la mise au point de l'appareillage, et d'autre part d'ajuster les conditions expérimentales de manière que l'ensemble des paramètres hydrauliques soit reproduit conformément à la nature.

IV.5.6.3. Les houles

Les conditions de houles retenues pour les essais d'agitation et de stabilité sont obtenues à partir des points d'extractions relevés à -25.0m de profondeur par le LEM, elles sont résumés respectivement dans le **Tab.IV.4** : 02 directions de houles seront testées en bassin à savoir les directions $25^{\circ}N$ et $70^{\circ}N$.

IV.5.6.4. Génération de la houle

La houle appliquée sur la maquette est générée par un batteur fonctionnant dans un plan horizontal, dont le placement est comparable à un piston.

Le déplacement du volet est assuré par un vérin, lui-même actionné par un groupe de puissance hydraulique à 110 bars. Le tout est piloté par un générateur électronique qui est lié à un logiciel informatique dénommé représentant un train de houle théorique en nature et converti en train de houle en modèle. Cette fonction est introduite dans un système "Servo" qui contrôle le mouvement du vérin.

IV.5.6.5. Techniques de mesure et définitions

La houle dans le modèle est enregistrée par des capteurs de houles, appelés sondes, basés sur le principe de conductance électrique entre deux électrodes.

A la fin de chaque essai, la chaîne de mesure affiche et transmet à l'imprimante les répartitions statistiques de toutes les mesures enregistrées.

Pour l'interprétation des résultats des essais, les définitions suivantes furent considérées :

Hauteur significative (H_s) : Elle est définie comme la moyenne du 1/3 des vagues les plus hautes dans un train de houle, en modèle.

Hauteur moyenne (H) : Elle est définie comme la moyenne des 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.

IV.5.7. Observations, mesures et moyens mis en œuvre

IV.5.7.1. Observations hydrauliques

Lors de l'essai de stabilité le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage est étudié avec attention. Ainsi, pour chaque configuration d'essai sont notés :

- les déferlements.
- Possibilité de dégradation de l'ouvrage.

Ces observations sont ensuite corrélées avec les dégâts pour une analyse complète

IV.5.7.2. Observation des dégâts

L'observation faite sur les ouvrages est basée surtout sur l'évolution de la stabilité contre les houles agressives : stabilité des enrochements et estimation des dégâts. Les observations des dégâts sont réalisées pendant le déroulement des essais (mode de dégradation) et à la fin des essais, après vidange (évaluation des dégâts).

IV.5.7.3. Mesure des franchissements :

Les débits moyens de franchissements sont mesurés, lors d'un certain nombre d'essais spécifiques, à l'aide d'un bac collecteur posé derrière la crête de l'ouvrage. Le volume d'eau dans le bac après l'essai est mesuré par pesée, et le débit moyen de franchissements est calculé en rapportant ce volume à la durée de la mesure.

Cette approche quantitative est complétée d'une approche qualitative basée sur l'observation pendant les essais du comportement des lames affranchissantes et de leur effet sur l'ouvrage.

IV.5.8. Critères de stabilité

Pour les essais, l'appréciation de la stabilité des BCR est faite sur la base des critères suivants :

- (a) Pas d'extraction (chute),
- (b) Tassements limités,
- (c) Oscillations limitées.

Pour la partie courante de l'ouvrage, le critère de dommage est fixé comme suit :

- ✓ 0 à 5% de dommage pour la houle centennale.
- ✓ De 0 à 2% pour les points singuliers « musoir, coude ».

IV.5.9. Critères d'agitation

Les hauteurs significatives acceptables à l'intérieur d'un port de plaisance abritant des navires de 4 m à 20 m ont été estimées par l'Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation (A.I.P.C.N). Les hauteurs significatives suivantes ont été associées à diverses classes de navires comme étant représentatives de critères de confort pouvant être dépassés une à deux fois par an.

On retiendra en conclusion les critères suivants pour un port de plaisance :

Tab.IV.6 : Critères d'agitation pour un port de plaisance (AIPCN)

Occurrence	Hauteur significative H_s	Notion de
Annuelle	≈ 0.3 à $0,4$ m	Confort
Décennale	≈ 0.5 à $0,6$ m	Sécurité

IV.5.10. Critères de franchissement

En matière de critères sur les débits de franchissement admissibles, nous nous sommes référés aux séries des tableaux du Manuel Eurotop élaboré par une équipe d'auteurs experts dans le domaine maritime de plusieurs pays européens à leur tête Van der Mer , qui donnent les dégâts probables pour une échelle de débits moyens de franchissement par mètre linéaire d'ouvrage en l/s/m.

Nous avons extrait de ces tableaux les différents critères relatifs à la sécurité des piétons, des véhicules, des bâtiments, des navires à quai et des revêtements de terre-plein (Voir **Tab.IV.7**).

Les critères de franchissements sont adoptés par cette étude concernent :

- L'exploitation et la sécurité des terres plein,
- La sécurité des bâtiments face à l'impact directe des franchissements,
- La circulation des personnes et des véhicules derrière le mur de garde.

Les débits de franchissement admissibles adoptés pour cette étude, en se basant sur les critères du "MANUEL EUROTOP", sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.IV.7 : Limites des franchissements tolérables (LEM, 2019)

Houle	Houle annuelle	Houle décennale	Houle centennale
Débats moyen des franchissements admissibles (l/s/m)	≤ 0.1	≤ 1	≤ 10

IV.6. Solution d'aménagement contre le problème d'agitation et de stabilité du port de plaisance de Tamanart

IV.6.1. Proposition des variantes d'aménagement

La solution de protection du port de plaisance de Tamanart contre le problème d'agitation et de stabilité dépend de dimensionnement de chaque partie du port ainsi que du poids des matériaux de construction et de réalisation.

Cinq variantes ont été étudiées en modèle réduit physique et se présentent comme suit :

Variante n°01 :

A-Description de la variante

La variante d'aménagement 01 est décrite comme suit :

Tab.IV.8 : Description de la variante d'aménagement n°1

Profil	Jetée principale (Longueur totale = 423 ml)
Musoir	<p>Noyau en tout – venant de carrière (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Première couche de transition en enrochement de catégorie (0.5-2t), arasée à la côte +2.8m.</p> <p>Deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (2-5t), arasée à la côte +4.05m.</p> <p>Carapace en BCR de 40t, arasée à la côte + 6.60m.</p> <p>Couronnement en béton armé en forme de "L" arasé à la cote +7.50m et d'une dalle arasée à +2.50m, d'épaisseur 1,50m.</p> <p>Contre butée en enrochements naturels (2-5t) dont la risberme est de 8.00 m.</p> <p>Tapis anti affouillement en TVC (0-500kg).</p>

<p>Avant musoir</p>	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Première couche de transition en enrochement de catégorie (0.5-2t), arasée à la côte +2.8m.</p> <p>Couronnement en béton armé arasé à la cote +7.50m et d'une dalle arasée à+2.50m.</p> <p>Tapis anti affouillement en TVC (0-500kg) de bermes de 5m de chaque côté.</p> <p style="text-align: center;">Côté extérieur :</p> <p>Deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (2-5t), arasée à la côte +4.05m.</p> <p>Carapace en BCR de 40t, arasée à la côte + 6.60m.</p> <p>Contre butée en enrochements naturels (2-5t) dont la risberme est de 8.00 m.</p>
<p>Courant A</p>	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Première couche de transition en enrochement catégorie (0.5-2t) arasée à la côte + 2.8 m,</p> <p>Couronnement en BA arasé à la côte +7.50m et d'une dalle arasée à +2.50m.</p> <p>Tapis anti affouillement en TVC (0-500kg) de bermes de 5m de chaque côté.</p> <p style="text-align: center;">Côté extérieur :</p> <p>Deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (2-5t) avec prolongement de l'assise sur 20 ml.</p> <p>Carapace en BCR de 40t arasée à la côte + 6.60 m.</p> <p>Contre butée en enrochements naturels (2-5t) dont la risberme est de 8.00 m.</p>
<p>Epi</p>	<p>Noyau en tout – venant de carrière (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m.</p> <p>Une couche de protection en enrochements de catégorie (0.5-2t) arasée à la côte +2.50m.</p>
<p>Enracinement</p>	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Couche de transition en enrochement de catégorie (0.5-2t), arasée à la côte +2.8m.</p> <p>Carapace en BCR de 10t, arasée à la cote + 4.45 m.</p>

Profil	Jetée secondaire (Longueur totale = 280 ml)
musoir	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la cote + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Première couche de transition en enrochement de catégorie (0.5-2t), arasée à la côte +2.8m.</p> <p>Deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (2-5t), arasée à la côte +4.05m avec prolongement de l'assise sur 20 ml.</p> <p>Carapace en BCR de 20t, arasée à la côte + 6.15m.</p> <p>Couronnement en béton armé en forme de "L" arasé à la cote +7.50m et d'une dalle arasée à +2.50m, d'épaisseur 1,50m.</p> <p>Tapis anti affouillement en TVC (0-500kg).</p>
Courant B	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Première couche de transition en enrochement catégorie (0.5-2t), arasée à la côte + 2.8 m.</p> <p>Deuxième couche de transition en enrochement de catégorie (2-5t).</p> <p>Carapace en BCR de 20t arasée à la côte + 6.15 m avec une pente de 3/2.</p> <p>Couronnement en BA arasé à la côte +7.50m et d'une dalle arasée à +2.50m.</p> <p>Tapis anti affouillement en TVC (0-500kg) de 5m de berme.</p>
Enracinement	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Couche de transition en enrochement de catégorie (0.5-2t), arasée à la côte +2.8m.</p> <p>Carapace en BCR de 10t, arasée à la côte + 4.45 m.</p>
Route	<p>Noyau en TVC (0-500kg) arasé à la côte + 1.00m avec une pente de 3/2.</p> <p>Couche de transition en enrochement de catégorie (0.5-1t), arasée à la côte +4.8m.</p> <p>Carapace en enrochements de catégorie (1-3t) arasée à la côte +4.8m.</p>

B-Résultats des essais

- **Essais de stabilité**

Les résultats de stabilité sur les deux directions, sont présentés dans les tableaux suivants :

Tab.IV.9 : Résultats de stabilité pour la direction 70°N

Direction 70°N					
Test N°	Hs (m) Désirée à -25m	Tp (s)	Hs (m) obtenue à -25m		Observations
			HS1	HS2	
Houle annuelle	2,60	8	2.20	2.36	-De légers embruns sur les deux jetées ont commencé à partir de la houle annuelle s'intensifiant à partir de la houle vingtennale et devenant plus important durant la houle centennale. -Etalement de quelques enrochements de la contre butée de la jetée secondaire. -Pas de franchissements Les résultats sont jugés acceptables, l'ensemble de l'ouvrage est resté stable
Houle décennale	3,81	9,55	3.77	3.79	
Houle vingtennale	4,08	9,90	4.03	3.80	
Houle cinquanteennale	4,45	10,36	4.63	4.59	
Houle centennale	4,71	10,67	4.94	4.97	

Tab.IV.10 : Résultats de stabilité pour la direction 25°N

Direction 25°N					
Test N°	Hs (m) Désirée à - 25m	Tp (s)	Hs (m) obtenue à - 25m		Observations
			HS1	HS2	
Houle annuelle	2.63	8	3.81	3.79	Jetée principale : chute importante des BCR du musoir, avant musoir, des enrochements du talus intérieur, de l'enracinement ainsi que la berme de l'épi due aux franchissements importants. Jetée secondaire : Etalement de la contre butée de l'enracinement, et déplacement des BCR au niveau du profil B et de la jonction entre les deux catégories de BCR.
Houle décennale	7.03	12.93	6.62	6.67	
Houle vingtennale	7.98	13.67	7.61	7.50	
Houle cinquanteennale	9.16	14.46	8.09	7.71	

- **Essais d'agitation**

Les résultats des essais d'agitation sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.IV.11 : Résultats des essais d’agitation pour la direction 70°N

Direction 70°N															
N° sonde	Critère	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
1 an (H _s =2.60m)	0.3	2.20	2.36	1.47	1.76	1.33	0.43	0.28	0.27	0.34	0.27	0.23	0.16	0.16	0.23
10 ans (H _s =3.77m)	0.5	3.77	3.79	2.41	2.89	2.28	0.66	0.57	0.62	0.44	0.43	0.42	0.40	0.43	0.32

Tab.IV.12 : Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N

Direction 25°N															
N° sonde	Critère	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
1 an (H_s=2.63m)	0.3	3.81	3.79	4.11	3.58	1.37	0.72	0.55	0.52	0.37	0.39	0.39	0.37	0.43	0.28
10 ans (H_s=7.03m)	0.5	6.94	6.94	8.94	5.27	2.20	1.03	1.07	0.89	0.72	0.72	0.89	0.93	1.34	0.92

L’analyse des essais d’agitation pour la variante testée pour les deux directions est comme suit :

Direction 70°N :

Les résultats sont ± admissibles, le pic d’agitation au niveau de la sonde 8 est dû à la réflexion produite par le quai vertical à l’intérieur du bassin et l’épi.

Direction 25°N :

Les résultats ne sont pas admissibles, les hauteurs de houles dépassent les critères d’agitation pour les deux périodes de retour (annuelle et décennale).

C-Conclusion

Au vu des résultats d’agitation et de stabilité sur la direction 25°N qui s’avèrent non **acceptables**, il y a lieu de procéder à des modifications du plan de masse.

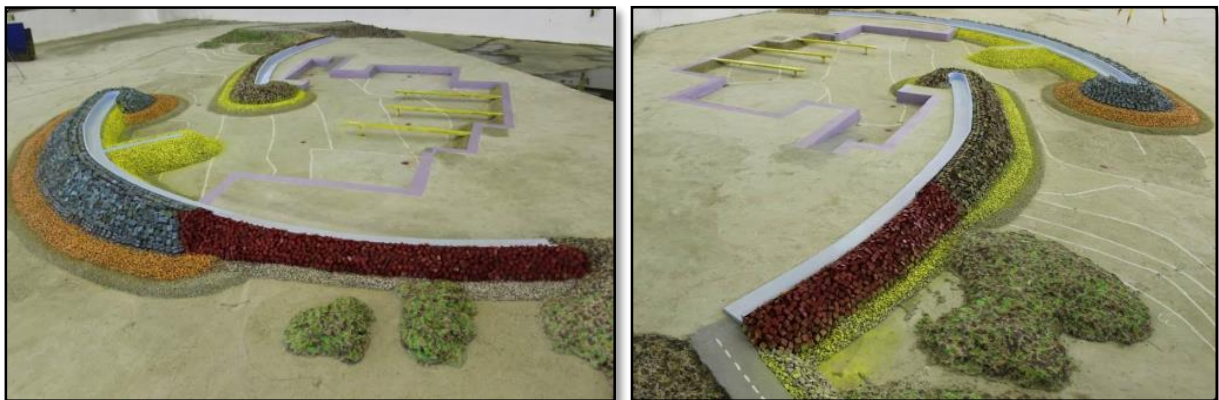


Fig. IV.24 : Variante d’aménagement n°01 avant essai



Fig. IV. 25 : Variante d'aménagement n°01 après essai

Variante n°02 :

A-Description de la variante

Dans cette variante les modifications ont été apportées aux sections suivantes :

Jetée principale :

- Prolongement du linéaire de 50 ml pour atténuer l'agitation à l'intérieur du bassin.
- Modification de la géométrie de la dalle de roulement qui sera en porte-à-faux avec 2 m de largeur en plus.
- Modification du pied de la carapace du profil enracinement, en remplaçant le tapis anti-affouillement par une contre butée en enrochement de catégorie (2-5 T) pour une meilleure protection et stabilité.
- Placer deux rangées de BCR 40 T au pied de la carapace du musoir et de l'avant musoir, pour une meilleure protection du pied.

Epi :

Changement de son emplacement en raison du prolongement de la jetée principale ainsi que sa configuration par soucis d'optimisation.

Jetée secondaire :

Modifier le profil B entre les profondeurs -4 et - 7m en remplaçant le tapis anti-affouillement et l'assise en enrochement de catégorie (2 – 5T) par une contre butée en enrochements de catégorie (2 - 5 T).

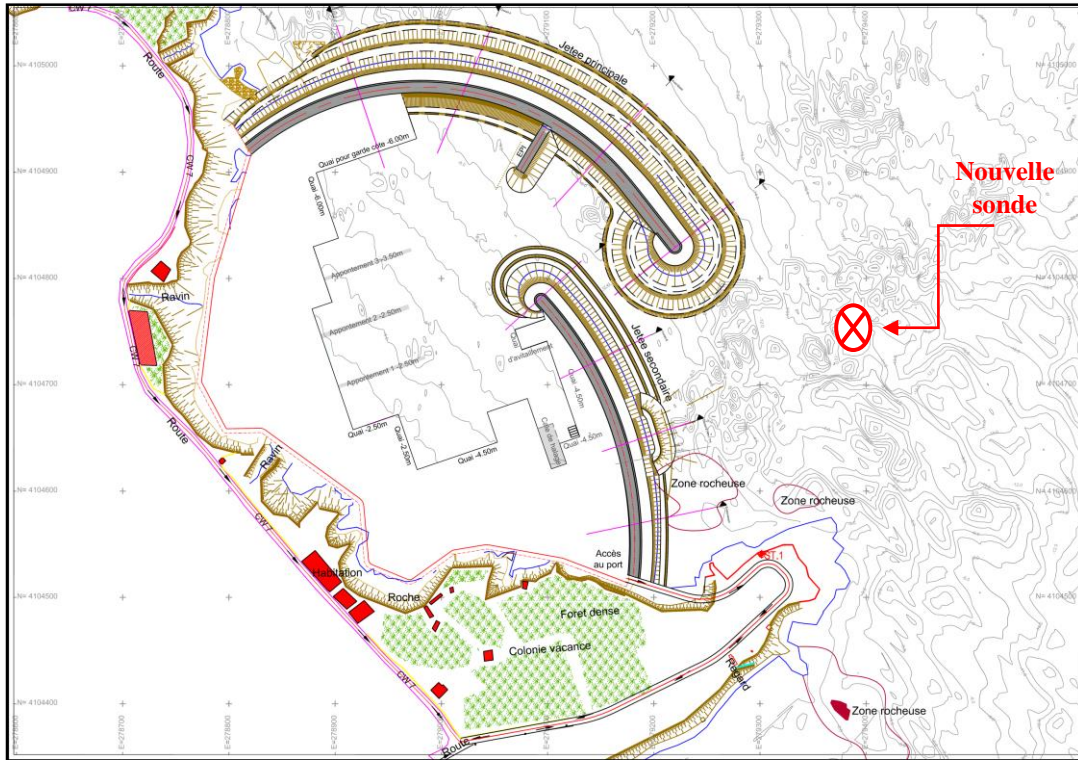


Fig. IV.26 : Plan de masse de la variante n°02

B-Résultats des essais

• **Essais de stabilité**

Les résultats de stabilité sur la direction 25°N, sont présentés dans le tableau suivant :

Tab.IV.13 : Résultats de stabilité pour la direction 25°N

Direction 25°N					
Test N°	Hs (m) Désirée à -25m	Tp (s)	Hs (m) obtenue à -25m		Observations
			HS1	HS2	
Houle annuelle	2.63	8	4.73	4.07	Jetée principale : -Légers embruns à partir de la houle annuelle s'intensifiant durant la houle quinquennale avec quelques franchissements sur la partie avant musoir qui deviennent importants à partir de la houle décennale. -Déplacement des enrochements de la contre butée de l'enracinement à partir de la houle vingtennale, et étalement de la contre butée du profil courant A. -Le déplacement des BCR 40T au niveau du pied du
Houle décennale	7.03	12.93	7.01	5.80	
Houle vingtennale	7.98	13.67	7.89	6.91	
Houle cinquantennale	9.16	14.46	9.11	8.60	
Houle centennale	9.83	14.87	9.94	9.18	

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

					<p>musoir a commencé à partir de la houle vingtennale et au niveau de la partie avant musoir à partir de la houle quinquennale.</p> <p>-Projection de quelques enrochements du talus intérieur de la partie avant musoir sur la dalle de roulement par l'effet des franchissements importants durant la houle cinquantennale.</p> <p>Jetée secondaire :</p> <p>-Déplacement de quelques enrochements de la contre butée au niveau de la jonction durant la houle quinquennale.</p> <p>-Quelques franchissements ont été constatés au niveau de la route à partir de la houle cinquantennale.</p>
--	--	--	--	--	---

• **Essais d'agitation**

Les résultats des essais d'agitation sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.IV.14 : Résultats des essais d'agitation pour la direction 25°N

Direction N°25															
N° sonde	Critère	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12'	S13	S14
1 an H_s=2.63m	0.3	4.73	4.07	3.34	3.00	0.72	0.80	0.41	0.35	0.27	0.29	0.31	4.86	0.55	0.33
10 ans H_s=7.03	0.5	7.01	5.80	5.41	3.91	0.94	1.01	0.57	0.44	0.43	0.53	0.47	6.22	1.10	0.69

L'analyse des essais sur la variante n°02 se fait pour la direction 25°N comme suit :

-Amélioration de l'agitation pratiquement sur la totalité des quais, des valeurs d'agitations non admissibles ont été enregistrées au niveau du quai d'avitaillement (sonde 13) durant la houle annuelle et du poste à quai – 4.5 m à proximité de la cale de halage (sonde 14) durant la houle décennale.

C-Conclusion

Des dégâts importants ont été constatés pendant les essais de la série progressive, pour cela le test d'endurance n'a pas été effectué et nous avons décidé d'arrêter les essais et de tester une autre variante.



Fig. IV.27 : Variante d'aménagement n°02 avant essai

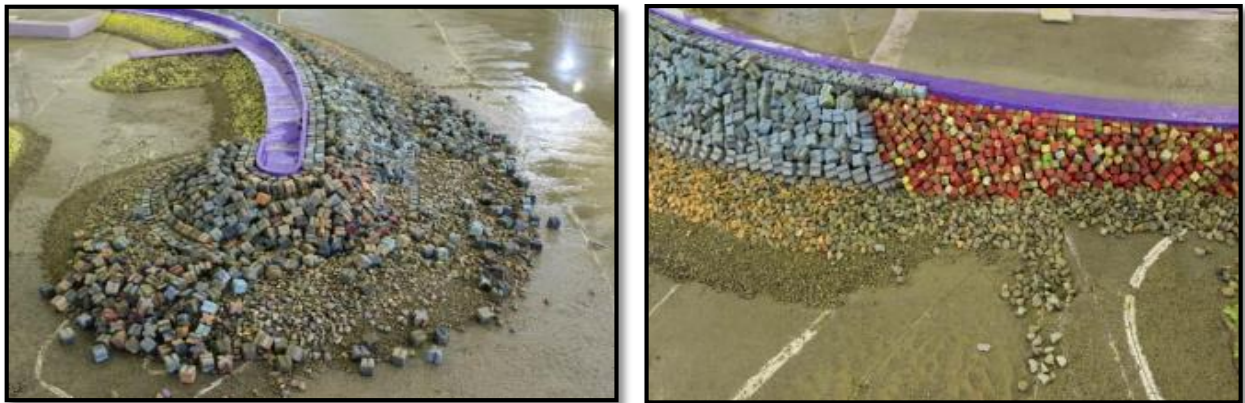


Fig. IV.28 : Variante d'aménagement n°02 après essai

Variante n°03 :

A-Description de la variante

Dans cette variante les modifications ont été apportées aux sections suivantes :

- Mise en place d'un talus amortissant à côté de la cale de halage, pour atténuer l'agitation au niveau de la sonde 13.
- Augmentation de la largeur de la berme de la protection de la route de 6,24 à 8,24 m dans le but d'atténuer les franchissements.

Jetée principale :

- Les deux rangées de BCR 40 T au pied du musoir et avant musoir sont remplacées par des BCR 50T avec suppression de l'assise en enrochements pour abaisser la cote de la contre butée.

Etude d'agitation et de stabilité du futur port de Tamanart (Skikda) : Recours à la modélisation physique et numérique

-Remplacement de la carapace du musoir par des BCR 50T au lieu de 40T.

B-Résultats des essais

- **Essais de stabilité**

Les résultats de stabilité sur la direction 25°N, sont présentés dans le tableau suivant :

Tab.IV.15 : Résultats de stabilité pour la direction 25°N

Direction 25°N					
Test N°	Hs (m) Désirée à -25m	Tp (s)	Hs (m) obtenue à -25m		Observations
			HS1	HS2	
Houle annuelle	2.63	8	4.69	3.51	Jetée principale : -Légers embruns à partir de la houle annuelle s'intensifiant durant la houle quinquennale avec quelques franchissements sur la partie avant musoir qui deviennent importants à partir de la houle décennale. -Déplacement des enrochements de la contre butée de l'enracinement à partir de la houle vingtennale, et étalement de la contre butée du profil courant A durant la houle cinquantennale. -Le déplacement des BCR 40T au niveau du pied du profil avant musoir a commencé à partir de la houle vingtennale et au niveau du musoir à partir de la houle centennale.
Houle décennale	7.03	12.93	7.06	5.37	
Houle vingtennale	7.98	13.67	8.59	6.59	
Houle cinquantennale	9.16	14.46	9.11	7.76	
Houle centennale	9.83	14.87	9.97	8.27	Jetée secondaire : -Déplacement de quelques enrochements de la contre butée au niveau de la jonction durant la houle décennale. -Étalement de la contre butée au niveau du rocher. Quelques franchissements ont été constatés au niveau de la route à partir de la houle centennale. Vu les dégâts constatés la série d'endurance a été arrêté après 30minutes.

- **Essais d'agitation**

Les résultats des essais d'agitation sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.IV.16 : Résultats des essais d’agitation pour la direction 25°N

N° sonde	Critère	Direction N°25														
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S12''
1 an H_s=2.63m	0.3	4.69	3.51	2.62	2.98	0.75	0.41	0.37	0.37	0.27	0.28	0.3	0.38	0.49	0.32	4.39
10 ans H_s=7.03m	0.5	7.06	5.37	5.03	3.79	1.00	0.52	0.57	0.51	0.44	0.53	0.48	0.71	1.06	0.73	5.71

L’analyse des essais sur la variante n°03 se fait pour la direction N25° comme suit :

-Amélioration de l’agitation pratiquement sur la totalité des quais, des valeurs d’agitation non admissibles ont été enregistrées au niveau du quai d’avitaillement (sonde 13 et 14) et du poste à quai – 4.5 m au niveau de la sonde 12 durant la houle décennale.

C-Conclusion

A l’issue des essais effectués sur la variante 03, les dégâts constatés et les résultats d’agitation au niveau de la sonde 13 et 14 demeurent non acceptable.



Fig. IV.29 : Variante d’aménagement n°03 avant essai

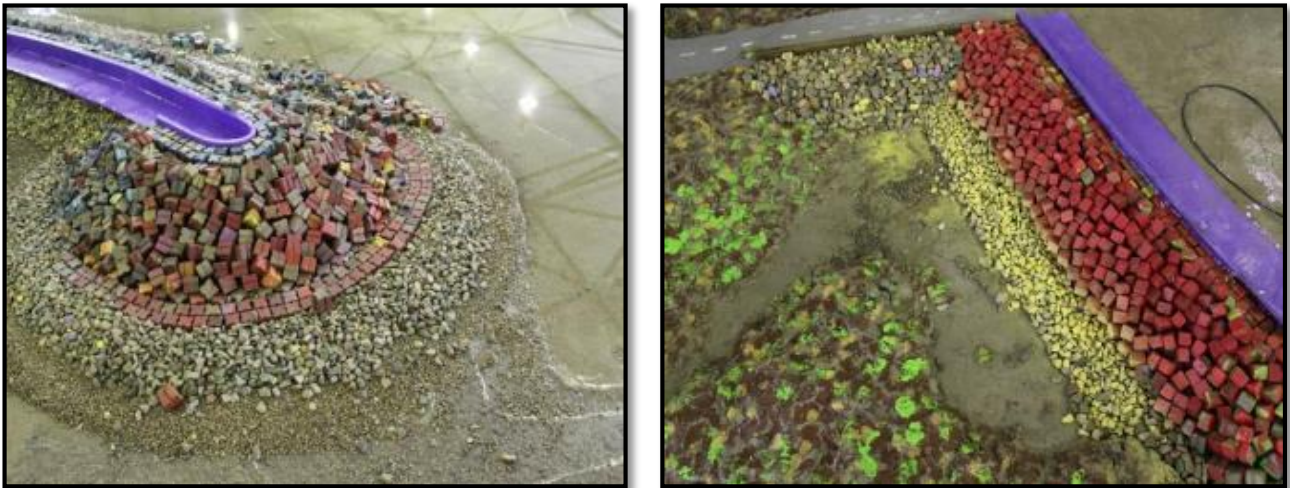


Fig. IV.30 : Variante d'aménagement n°03 après essai

Variante n°04 :

A-Description de la variante

Dans cette variante les modifications ont été apportées aux sections suivantes :

Jetée principale : continuité des BCR 50 T au niveau du profil avant musoir sur 112 ml.

Jetée secondaire : optimisation par des BCR 10T au lieu de 20 T au niveau du musoir et toute la partie protégée par la jetée principale.

Pour atténuer l'agitation : adoption d'un quai amortissant au niveau des sondes 12 et 13 correspondants au quai d'avitaillement et au quai - 4,5 m (l'un pour les embarcations 25 m et l'autre pour les embarcations de 8m).

B-Résultats des essais

- **Essais de stabilité**

Les résultats de stabilité sur la direction 25°N, sont présentés dans le tableau suivant :

Tab.IV.17 : Résultats de stabilité pour la direction 25°N

Direction 25°N					
Test N°	Hs (m) Désirée à -25m	Tp (s)	Hs (m) obtenue à -25m		Observations
			HS1	HS2	
Houle annuelle	2.63	8	4.67	4.42	<p>Jetée principale :</p> <p>-Légers embruns à partir de la houle annuelle s'intensifiant durant la houle quinquennale avec quelques franchissements sur la partie avant musoir qui deviennent importants à partir de la houle décennale.</p> <p>-Remontée de quelques enrochements de la contre butée au niveau du profil avant musoir sur les BCR 50T durant la houle décennale.</p> <p>-Déplacement de quelques enrochements de la contre butée de l'enracinement.</p> <p>-Le déplacement des BCR 50T au niveau du profil avant musoir a commencé à partir de la houle vingtennale.</p> <p>-Les mêmes dégâts que la variante précédente ont été constatés.</p> <p>Jetée secondaire :</p> <p>-Rien à signaler.</p>
Houle décennale	7.03	12.93	7.16	6.42	
Houle vingtennale	7.98	13.67	8.27	7.53	
Houle cinquanteennale	9.16	14.46	8.92	8.96	

- Essais d'agitation

Les résultats des essais d'agitation sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.IV.18 : Résultats des essais d'agitation pour la direction 25°N

Direction 25°N																
N° sonde	Critère	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S12''
1 an (H_s=2.63m)	0.3	4.67	4.42	3.68	2.78	0.68	0.35	0.35	0.34	0.24	0.27	0.31	0.33	0.54	0.28	4.81
10 ans (H_s=7.03m)	0.5	7.16	6.42	6.32	3.83	0.97	0.52	0.55	0.52	0.47	0.53	0.55	0.84	1.3	0.79	6.4

L'analyse des essais sur la variante 04 se fait pour la direction 25°N comme suit :

-Les résultats de l'agitation demeurent non acceptables au niveau des sondes 12, 13 et 14.

C-Conclusion

A l'issue des essais effectués sur la variante n°04, les dégâts constatés au niveau de la jetée principale et les résultats d'agitation au niveau des sondes 12, 13 et 14 demeurent non acceptables, pour cela une autre variante sera testée en bassin à houles.

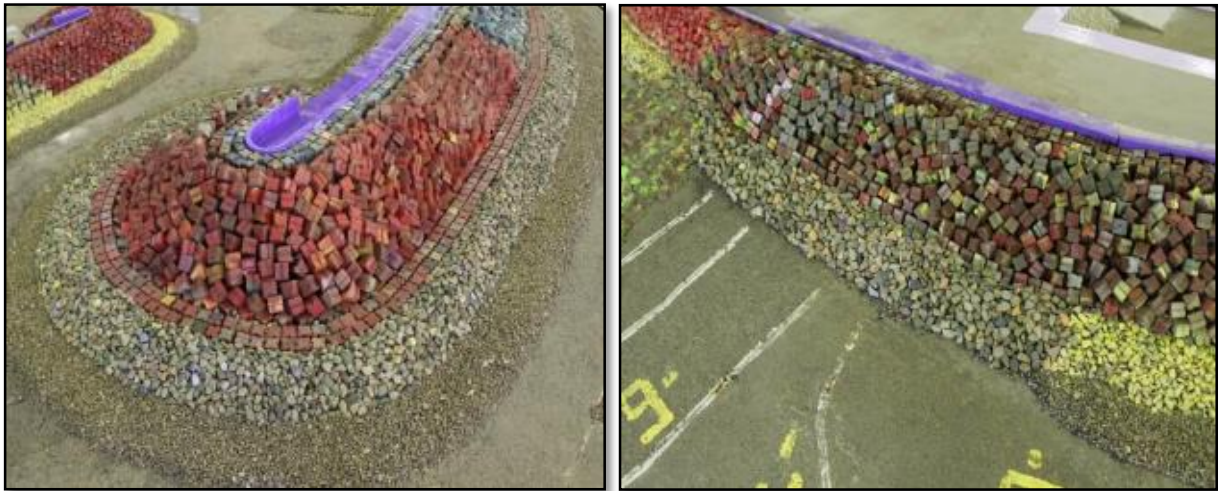


Fig. IV.31 : Variante d'aménagement n°04 avant essai



Fig. IV.32 : Variante d'aménagement n°04 après essai

Variante n°05 :**A-Description de la variante**

Dans cette variante les modifications ont été apportées aux sections suivantes :

Jetée principale :

Remplacement des BCR 50 T au niveau du profil avant musoir jusqu'au niveau de l'épi par des BCR 60T pour une meilleure stabilité.

Epi : Changement de sa géométrie qui deviendra en forme de L avec une longueur totale de 95.5 ml dans le but de créer un bassin amortissant qui permettra de dissiper l'énergie de la houle et diminuer l'agitation à l'intérieur du port. Cet épi est constitué de :

- **Noyau** en tout – venant de carrière (0-500 kg).
- **Une carapace** en enrochements de catégorie (0.5-2t) avec une épaisseur en talus de 1.8 m et de 0.9m sur la crête, arasée à +1.9 m.

La suppression du mole dans la variante précédente n'a pas permis d'améliorer les résultats d'agitation, donc cette variante sera testée avec le mole.

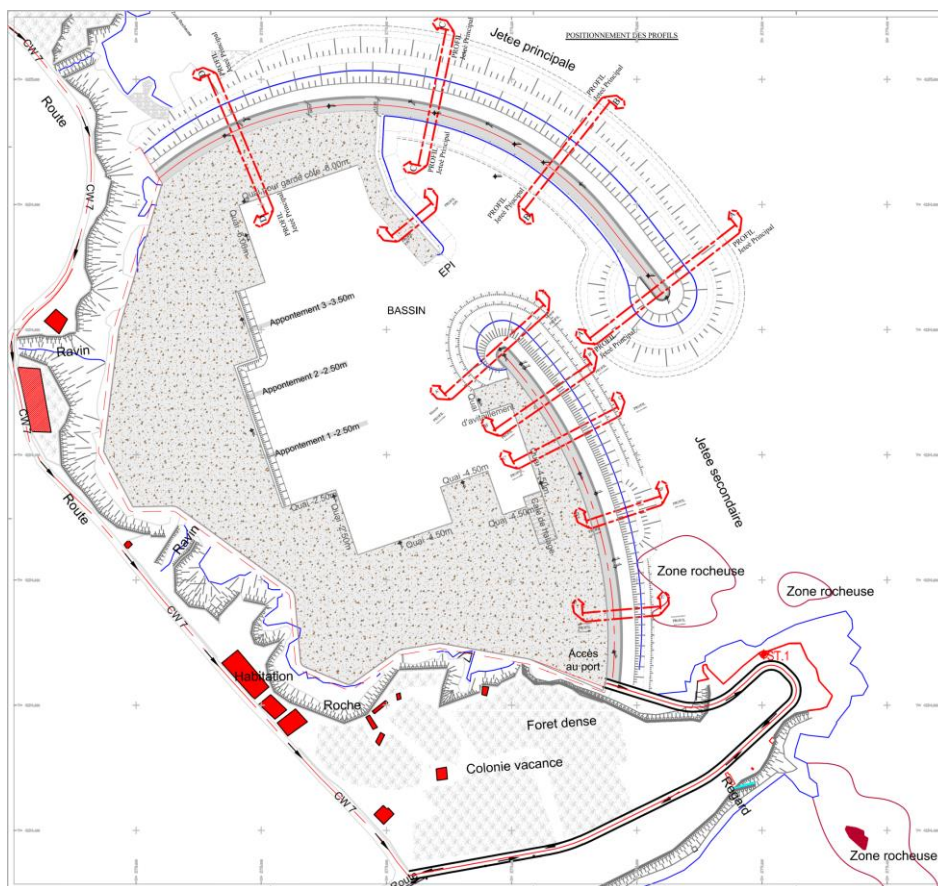


Fig. IV.33 : Plan de masse de la variante n°05

B-Résultats des essais

- **Essais de stabilité**

Les résultats de stabilité sur la direction 25°N, sont présentés dans le tableau suivant :

Tab.IV.19 : Résultats de stabilité pour la direction 25°N

Direction 25°N					
Test N°	Hs (m) Désirée à -25m	Tp (s)	Hs (m) obtenue à -25m		Observations
			HS1	HS2	
Houle annuelle	2.63	8	4.44	3.87	Légers embruns à partir de la houle annuelle sur la jetée principale (avant musoir-musoir) s'intensifiant durant la houle décennale -Déplacement de quelques enrochements de la contre butée de l'enracinement au niveau de la jetée principale. -Déplacement de 07 BCR 60T au niveau de la jetée principale (profil avant musoir) lors des essais d'endurance. - Les dégâts constatés sont jugés admissibles.
Houle décennale	7.03	12.93	7.37	6.08	
Houle cinquantennale	9.16	14.46	9.03	7.63	
Houle cinquantennale (Endurance)	9.16	14.46	9.08	8.58	

Nb : Pour cet essais l'endurance a été exécutée avec une houle cinquantennale au lieu de la centennale, vu que la fréquence d'apparition de cette houle est très faible.

Il y a lieu de noter que la houle cinquantennale est déjà importante et avoisine 9 m.

- **Essais d'agitation**

Les résultats des essais d'agitation sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.IV.20 : Résultats des essais d'agitation pour la direction 25°N

Direction 25°N																
N° sonde	Critère	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
1 an (H_s=4.42m)	0.3	4.44	3.87	4.12	2.45	0.62	0.24	0.34	0.29	0.23	0.18	0.23	0.22	0.22	0.22	0.28
10 ans (H_s=7.03m)	0.5	7.37	6.08	7.46	3.61	0.88	0.37	0.41	0.42	0.35	0.38	0.36	0.52	0.6	0.42	0.49

Tab.IV.21 : Résultats des essais d'agitation pour la direction 70°N

Direction 70°N																
N° sonde	Critère	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
1 an (Hs=2.36m)	0.3	2.75	2.62	2.00	1.25	0.57	/	0.15	0.14	0.15	0.12	0.12	0.09	0.07	0.08	0.08
10 ans (Hs=3.77m)	0.5	4.23	3.99	3.79	2.61	0.69	0.07	0.42	0.37	0.27	0.22	0.21	0.21	0.22	0.18	0.21

C-Conclusion

L'analyse des essais d'agitation sur la variante 05 se fait pour la direction 25°N et 70°N comme suit :

La modification de la géométrie et l'emplacement de l'épi nous a permis d'avoir des résultats satisfaisant. En effet, l'épi se trouve juste en face de la passe d'entrée, sa forme et son talus en enrochement constitue un bassin de dissipation de la houle ce qui a permis d'avoir de meilleurs résultats d'agitation au niveau de tous les postes à quais.



Fig. IV.34 : Variante d'aménagement n°05 avant essai



Fig. IV.35 : Variante d'aménagement n°05 après essai

IV.6.2. La variante retenue

A l'issue des essais de stabilité et d'agitation effectués en bassin à houle pour les Cinq variantes, il a été constaté que la direction Nord 25° demeure la plus pénalisante et la plus défavorable du point de vue stabilité des ouvrages et agitation à l'intérieur du bassin portuaire.

Il y a lieu de noter que la direction 25° N au large a une intensité importante. Cependant, son taux d'occurrence annuelle demeure faible. A l'inverse, la direction 70° N présente des valeurs de houles moins importantes mais plus fréquentes.

L'analyse des résultats a montré que la variante N°05 présente les meilleurs résultats du point de vue d'agitation et de stabilité, cette variante est caractérisée par l'épi qui absorbe l'énergie de la houle avec son talus en enrochement et sa géométrie qui constitue un bassin de dissipation qui est en face de la passe d'entrée, donc la variante retenue pour cette étude est la variante n°05.



Fig. IV.36 : La variante d'aménagement retenue (variante n°05)

III.7. Corrélation entre le modèle numérique et physique

Afin de pouvoir comparer entre les résultats obtenus lors de la modélisation numérique et la modélisation physique, nous avons suivi les étapes suivantes :

-On a choisi 04 points à partir des résultats de l'agitation du port, pour la houle 25°N dont la hauteur significative $H_s=7.03\text{m}$ (houle décennale) et $T=12.93\text{s}$.

Ces 4 points sont répartis comme suit :

- A : Passe d'entrée du port avec agitation maximum dans le port
- B et C : Zone de l'avant-port avec agitation moyenne
- D : Zone de l'arrière port avec la plus faible agitation

-On a comparé les résultats obtenus par la modélisation numérique et ceux obtenus par la modélisation physique avec les valeurs enregistrées par les sondes au niveau du bassin à houle, également pour les mêmes conditions de houle.

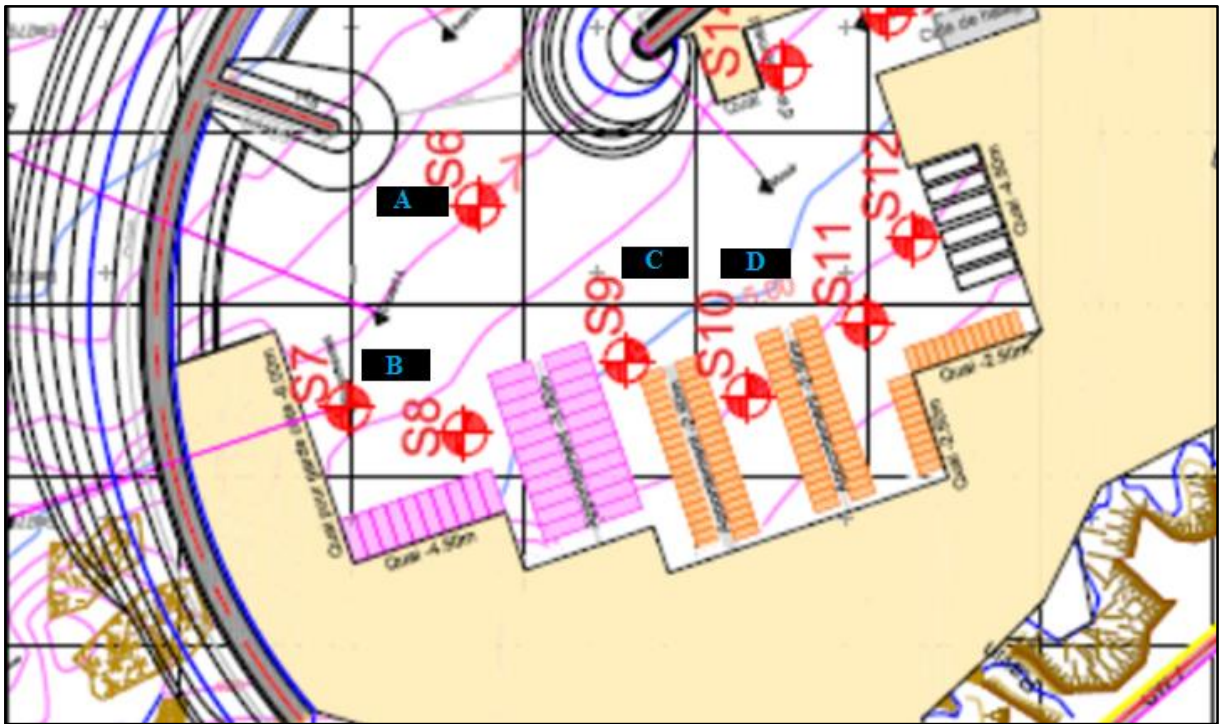
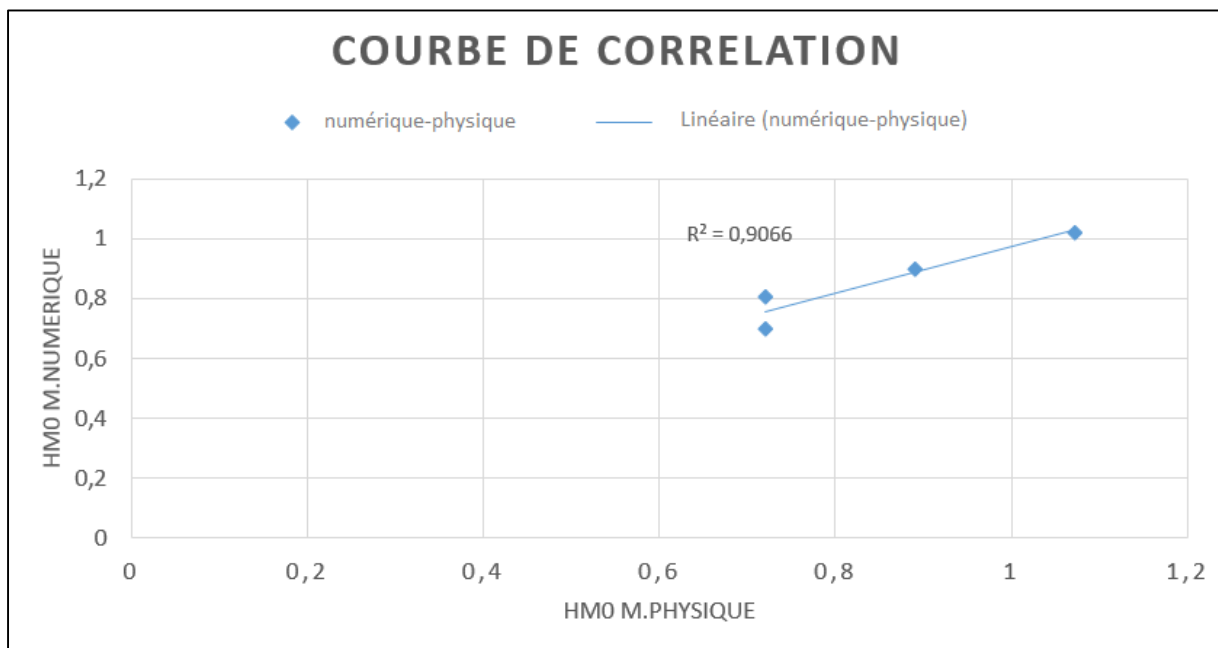


Fig. IV.37 : Positionnement des sondes au niveau du bassin à houle (Modèle physique)

Tab.IV.22 : Les valeurs de l'agitation dans les modèles numérique et physique pour la houle 25°N

Modélisation	Période de retour	A	B	C	D
Numérique	décennale	1.02	0.9	0.8	0.7
physique	décennale	1.07	0.89	0.72	0.72

**Fig. IV.38** : Courbe de corrélation entre la modélisation physique et numérique

Conclusion

D'après les résultats du **Tab.IV.22** montrant les comparaisons des résultats des agitations dans le futur port de Tamanart, le coefficient de corrélation $R^2 = 0.9066$, une valeur très proche de 1 ce qui reflète une bonne corrélation entre les deux méthodes de modélisation.

Chapitre V : Gestion Intégrée de Zones Côtières

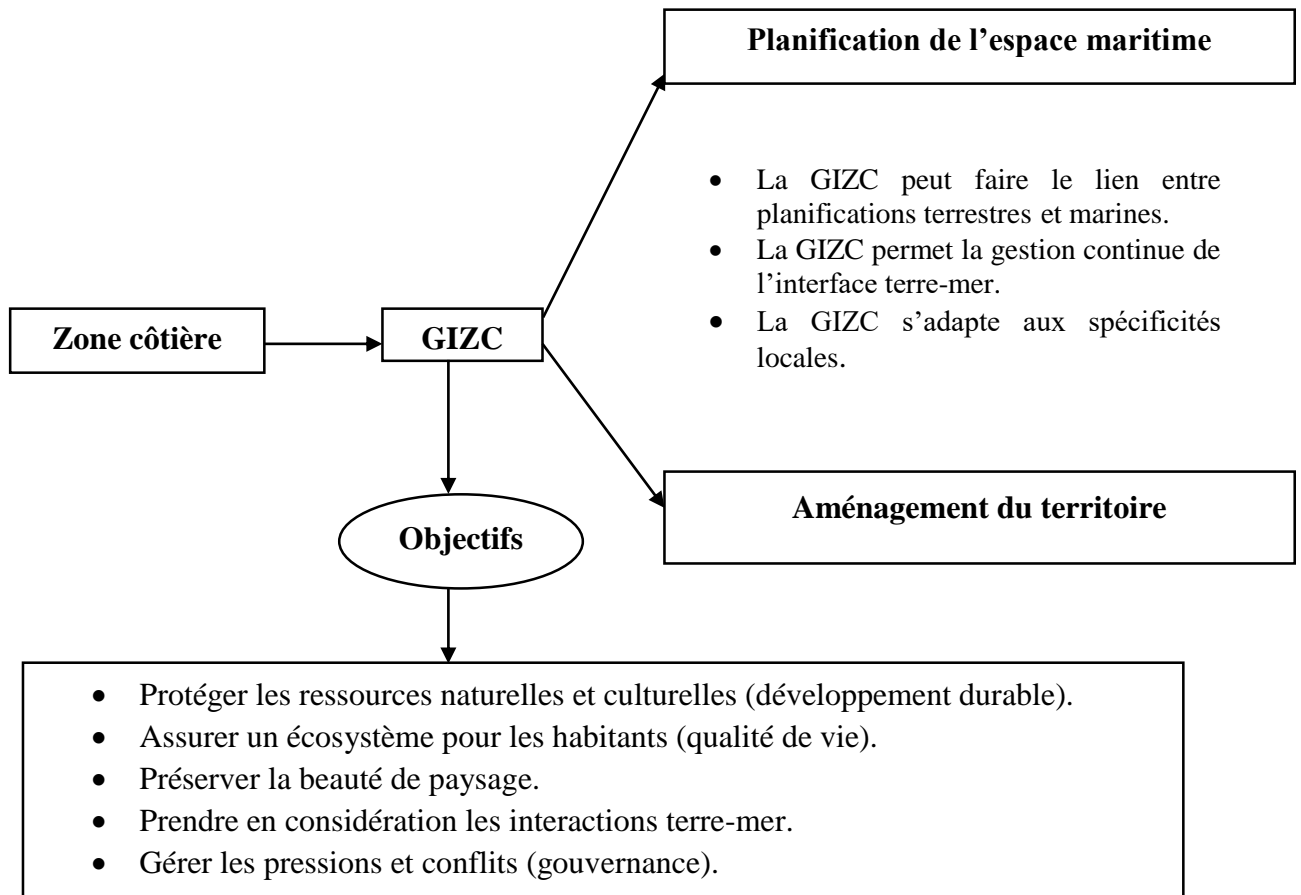
V.1. Introduction :

Le milieu littoral est un espace très convoité du fait de son importance que ce soit naturelle, sociale, culturelle ou économique, et très fragile car la moindre modification dans ce milieu entraîne plus ou moins des répercussions sur sa naturalité. De plus les divers intérêts qu'il suscite ne sont pas compatibles entre eux, et ne respectent pas sa véritable vocation. Donc il semble primordial que des lois spécifiques au littoral viennent compléter le vide juridique en matière de protection de l'environnement côtier.

Dans notre pays, les pressions sur le milieu et ses ressources et les impacts qui en résultent, caractérisent encore l'état de beaucoup de nos régions littorales. De nombreux travaux et comptes rendus indiquent un état des lieux de nos zones côtières qui nécessite la conduite et la mise en œuvre d'une politique authentique de leur développement durable.

La Gestion Intégrée Côtière est un cadre et un processus pour formuler et mettre en œuvre des plans et des stratégies de gestion pour promouvoir l'utilisation avisée et durable des ressources des zones côtières, avec des contributions de la science (connaissance) et des pouvoirs décisionnels.

Ce processus vise à optimiser les choix à long terme privilégiant les ressources et leur usage raisonné et raisonnable donc la gestion intégrée de la zone côtière s'impose aujourd'hui comme une solution responsable et durable.



La baie de Skikda connaît un développement économique et démographique très important. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, le plus souvent de manière anarchique qui a vu la fréquentation des côtes. L'installation d'infrastructures côtière (ports, ouvrages de défense ...), l'artificialisation accrue du linéaire côtier, le déversement d'eaux usées ne se font pas sans impacts sur l'environnement. De ce fait, une gestion intégrée de la zone côtière (GIZC) est indispensable pour permettre à la fois la préservation de cet espace et la gestion durable de ses ressources.

V.2.Approche du programme GIZC dans la zone d'étude

L'évaluation de cette portion côtière nous permet d'identifier et de hiérarchiser les enjeux et les priorités, les activités ainsi que les acteurs afin de proposer une démarche intégrée pour l'élaboration d'un plan d'action logique qui englobe les différentes composantes du site dans un contexte du développement durable.

Tab.V.1 : Définition des activités majeurs, leurs enjeux et les acteurs clés

Enjeux	Activités majeures	Acteurs clés
Lutte contre l'érosion	Préservation du territoire	Direction de l'environnement
Lutte contre la pollution	Pêche et aquaculture	Directions de la pêche et des ressources halieutiques (DPRH)
Elimination des constructions illégales	Activité industrielle	Les collectivités territoriales compétentes
Protection et préservation de la nature et du patrimoine culturel	Activités portuaires	
Développement d'une pêche artisanale durable	Agriculture	Commissariat National du littoral (CNL)
	Production d'électricité	Promoteurs aquacoles
Maitrise de l'agriculture		Gardes côtes
Lutte contre l'extraction illicite de sable des plages		
Application de la loi littorale		

Plusieurs paramètres interviennent dans l'évolution de cette zone et d'une manière directe ou indirecte sur le milieu et les ressources dont il recèle. Les différentes pressions naturelles et anthropiques qu'on a pu recenser dans notre zone d'étude, sont résumées comme suit :

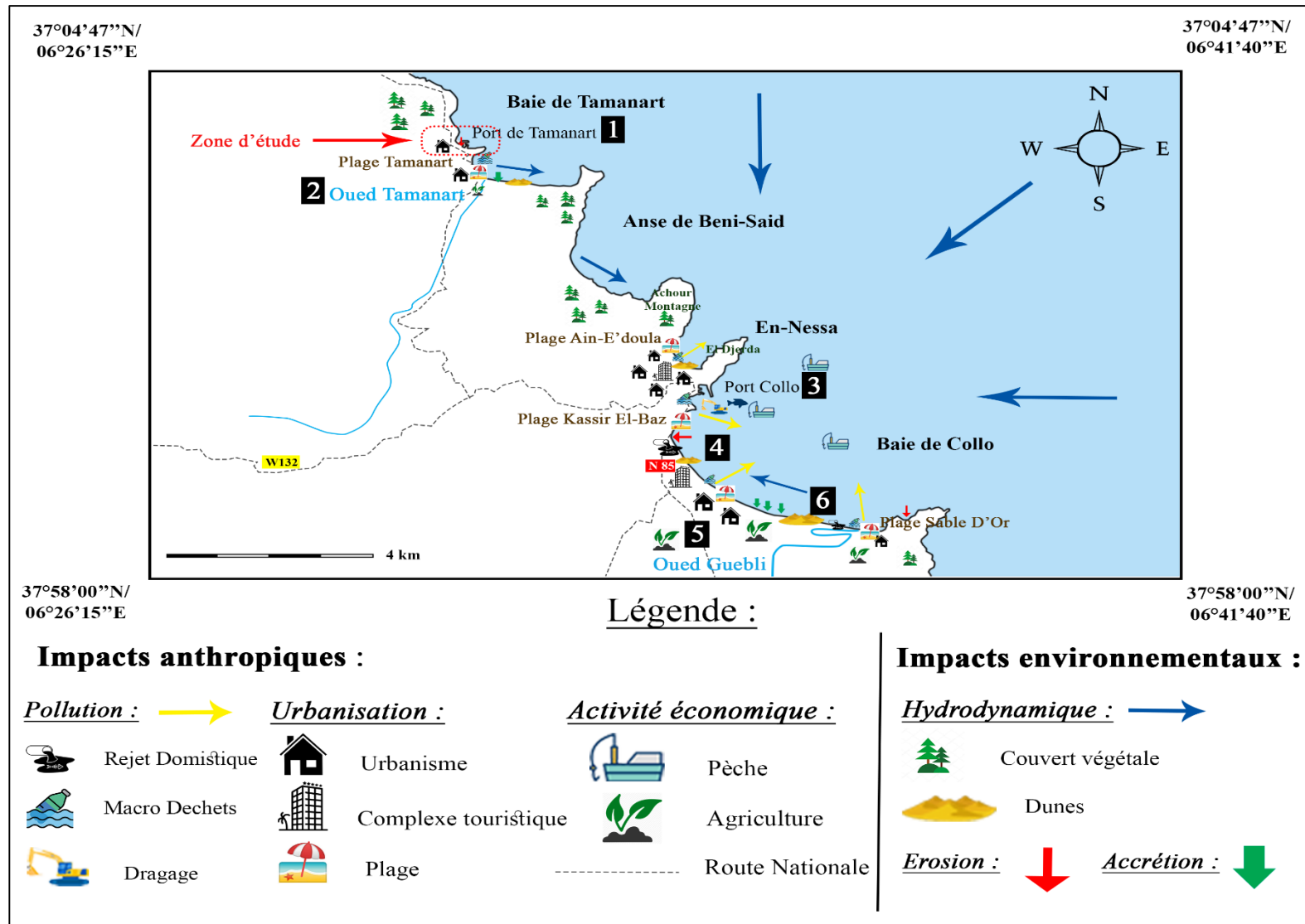


Fig.V.1 : Impacts des différentes pressions au niveau de la zone étude (Tamine et Abdelkebir, 2020)

1. Tamanart

Le site Tamanart demeure le plus important de la région Ouest de Skikda, de la daïra de Collo précisément. La beauté du lieu est également accrue par le magnifique oued qui descend des hauteurs de la région de Tamanart jusqu'à la mer, en plus de l'abondance de zones rocheuses et d'eaux limpides et très salines.

Cette zone est totalement naturelle. Les différentes infrastructures existantes au niveau de la baie de Collo peuvent influencer sur la qualité des eaux ainsi que sur la dynamique hydro sédimentaire de cette zone.

2. Oued Tamanart

L'embouchure de l'oued Tamanart ou la zone humide ne présente aucun signe de pollution, il s'agit d'une eau très claire en revanche on marque la présence de poissons. Il joue le rôle de tampon entre la mer et la terre et il protège le littoral des tempêtes et de l'érosion due aux vagues et aux courants.

3. Port de pêche de Collo

Situé à l'Ouest de Skikda, sa construction a impacté la région de Collo sur plusieurs plans :

- Les travaux maritimes engendrent une modification du trait de côte, des dragages et le rejet de leurs produits.
- Panaches et changement de la dynamique sédimentaire.
- Modification de la géomorphologie et de la bathymétrie de la zone.
- Pêche artisanale non contrôlée.
- Rejets de macro-déchets polluants les bassins d'accostage.
- Activités portuaires polluantes : entretien, navigation.
- Impact visuel remarquable (esthétique de la zone).

4. Littoralisation, rejets domestiques et industriels :

La concentration de la population et la forte urbanisation anarchique de la façade maritime de Skikda, ont engendré une véritable détérioration du littoral, dont les glissements de terrain constaté tout le long sont l'expression la plus visible de cette dégradation. Un phénomène qui résume à lui seul l'échec de l'urbanisation aux abords de la mer, sans réelle mise en place des mesures adéquates de protection de cet espace très convoité et très fragile surtout.

« Les effets induits sur le milieu côtier et ses ressources par la littoralisation dénotent des dégradations certes encore localisées mais parfois irréversibles ».

Skikda, s'est développée anarchiquement au détriment du foncier agricole littoral et au prix d'une sur occupation anarchique du rivage marin.

La zone industrielle et l'absence de station d'épuration pour les déchets liquides urbains qui déversent directement dans la mer, polluent la baie et les rades portuaires.

Les concentrations estivales provoquent des pressions sur la côte, les besoins de plus en plus importants en matériaux de construction provoquent des extractions abusives de sable au détriment de l'équilibre des dunes littorales et des plages.

Cette tendance à la littoralisation du pays a eu plusieurs effets pervers au plan écologique et du point de vue de l'économie :

- Les côtes sableuses ont considérablement reculées, particulièrement dans les plages situées en zones urbaines telles que la corniche de Stora.
- Les plages d'extraction de sable et les zones d'embouchures d'oued où la sédimentation est ralentie ; les plages Ben M'hidi notamment.
- Les ensembles dunaires se sont dégradés avec de graves conséquences sur la diversité biologique et la stabilisation des sols à l'image de la plage d'Oued Righa.
- Les cordons sableux littoraux disparaissent et ne protègent plus, dans les zones côtières basses, l'arrière-pays contre l'invasion marine.
- Les niveaux de pollution marine augmentent de jour en jour, particulièrement dans les zones côtières adjacentes aux villes comme c'est le cas de la plage de l'îlot des chèvres, où l'évacuation des eaux usées s'est faite de tout temps en mer sans traitement, ou voisines aux complexes industriels comme les rejets dans l'embouchure de l'oued Saf-Saf au niveau toujours de l'îlot des chèvres.

Ces effets auront pour conséquences directes : une baisse sensible des ressources halieutiques et augmentation inquiétante du nombre de plages interdites à la baignade.

Tab.V.2 : Analyse des pressions existantes sur la zone étudiée

N°	Composantes	Nature de pressions	Indicateurs	Solutions alternatives
1	Plage Tamanart	<ul style="list-style-type: none"> - Fréquentation intensive des visiteurs pendant la période estivale. - Dynamique de la ligne de rivage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de touristes / linéaire côtier. - Recul du trait de côte m/an 	<ul style="list-style-type: none"> - Conservation et préservation du potentiel touristique. - Maitrise de l'urbanisation et de l'artificialisation.
2	Oued Tamanart	<ul style="list-style-type: none"> -Prélèvement excessif et illicite du sable des oueds. 	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité de sédiments piégée, m³/an 	<ul style="list-style-type: none"> - Préservation des sites naturels et leur mise en valeur par des aménagements intégrés.
3	Port de pêche de Collo	<ul style="list-style-type: none"> - Activités portuaires polluantes : entretien, navigation. - Déversement des eaux de cales et des huiles de vidange en mer. - Effet sur la dérive et le transport sédimentaire. - Modification de la géomorphologie et de la bathymétrie de la zone. - Travaux de dragage qui perturbe le milieu (panache de vases, turbidité) - Rejets de macro-déchets polluants les bassins d'accostage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Métaux lourds µg/g des espèces. - Quantité de déchet solide, tonnes/an. - Quantité de sédiments dragués, -m³ 	<ul style="list-style-type: none"> - Renforcer les ouvrages de défense. -Mise en place des stations de déballastage. - Collecte des déchets solide. - Dragages en dehors de la saison hivernale, - traitement des produits de dragage.
4	Littoralisation	<ul style="list-style-type: none"> - Construction illicite sur la zone non aedificandi. - Propagation des décharges non contrôlées - Urbanisation non réglementée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre total des constructions sur la côte. - Taux d'urbanisation, nombre d'habitants/km. 	<ul style="list-style-type: none"> - Promulgation des règlements de protection, surveillance et contrôle. - La maitrise de l'occupation du sol en mettant en conformité les instruments d'urbanisme et de gestion avec les dispositions de la loi littorale 02-02.
5	Terres agricoles	<ul style="list-style-type: none"> - Construction illicite qui menace les espaces agricoles. - Pollution marine induite par les pesticides lors du lessivage des terres agricoles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Espace vert urbain, m² 	<ul style="list-style-type: none"> - Recours aux fertilisants naturels. - Réglementer les pesticides utilisés.
6	Dune	<ul style="list-style-type: none"> - Occupation (construction des bâtis, route) - Sur-fréquentation sur tout durant la saison estival (piétinement). - Passage répéter des véhicules. 	<ul style="list-style-type: none"> -Cartographie de la surface dunaire. - Rapport élévation /surface. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fixation des dunes (végétation, brise vent) - Interdire la construction sur les dunes. - Prohiber l'exploitation du sable des dunes. - interdire les accès des véhicules par la mise en place des parkings éloignés.

Pour mieux appréhender et gérer l'impact des pressions naturelles et anthropiques, on a représenté l'état actuel des milieux côtiers dans la baie de Collo . Il est donc essentiel de connaître cet état vers lequel la côte tend à devenir ,pour adapter nos aménagements à un équilibre naturel, soit qu'on veuille le mettre à profit, soit, au contraire, qu'on veuille créer consciemment et raisonnablement un autre équilibre.

- **Scénario tendanciel :**

Il ne faut pas omettre de rappeler que si la situation reste telle qu'elle, les déchéances vont s'intensifier et auront un impact plus grave et irréversible sur les plages et les paysages côtiers, la qualité des eaux de baignade, le rendement des ports, l'activité de pêche et du tourisme.

- **Scénario alternatif :**

Des efforts doivent être orientés vers l'arrière-pays, axés sur la conquête de nouveaux espaces, ce qui permettra d'introduire le progrès et le développement afin de mettre fin définitivement à l'anthropisation déjà catastrophique, surtout quand elle se fait au détriment de nos meilleurs sites côtiers ce qui constitue une aberration impardonnable, aussi bien d'un point de vue écologique qu'économique.

V.3. Conclusion

La gestion de la zone côtière, l'atteinte d'un développement durable, assurer la préservation de toutes les ressources marines et côtière de la zone, sont des taches essentiellement inséparables qui nécessite une approche participative.

Aujourd'hui, on s'aperçoit que ce développement n'est possible que s'il tient pleinement tenu compte des considérations écologiques, environnementales et socio-économiques pour cela il est nécessaire de passer par des formes de gouvernance plus démocratiques, participatives et transparentes.

La GIZC est donc un cadre et un processus pour formuler et mettre en œuvre des plans et des stratégies de gestion pour promouvoir l'utilisation avisée et durable des ressources des zones côtières, avec des contributions de la science (connaissance) et des pouvoirs décisionnels (gouvernance).

« Mieux vaut prendre le changement par la main avant qu'il ne nous prenne par la gorge »

Conclusion Générale

Conclusion générale

La place du littoral dans les politiques publiques d'aménagement touristique est très importante. En Algérie, la politique en matière de développement de l'activité touristique est restée en décalage par rapport aux pays voisins de la rive sud de la méditerranée (Maroc et Tunisie) malgré les fortes potentialités naturelles et patrimoniales des différentes régions algériennes.

La mise en place du port de plaisance à Tamanart comme abordé lors de ce mémoire nécessite une panoplie d'études à réaliser (sédimentologique, bathymétriques, évolution des fonds, étude du climat de houle, étude d'agitation...etc.) afin de comprendre et diagnostiquer le problème d'agitation et de stabilité du port et contribuer à trouver des solutions. Les résultats de ces études représentent des données de base pour pouvoir modéliser numériquement et physiquement notre projet.

Le premier et le deuxième chapitre, consacrés à l'identification des principales caractéristiques du site de Tamanart et du port à construire combinés à la maîtrise des différentes méthodologies expliquées dans le troisième chapitre ont permis de faire ressortir des résultats concluants comme suit :

L'analyse bathymétrique du site d'étude, a révélé une topographie sous-marine assez complexe et chaotique, caractérisée par la présence de dépressions, signe d'un relief accidenté de dominance rocheuse, aussi bien du côté Est que du côté Ouest.

L'étude sédimentologique indique que notre zone d'étude est caractérisée par un fond marin d'une couverture sédimentaire hétérogène (sable fin, sable moyen à grossiers) avec des teneurs en pélites quasiment nulle mettant en exergue l'intense hydrodynamisme qui y règne ne permettant pas le dépôt des particules fines. Les sédiments proviendraient des affleurements rocheux ainsi que des sédiments véhiculés à travers les talwegs par les eaux de pluie.

La modélisation numérique a démontré l'impact de l'implantation du port de Tamanart sur l'équilibre de la dynamique sédimentaire de la zone, d'estimer les risques d'ensablement qui pourraient en découler qui pourraient rendre le port non opérationnel. Cette modélisation permet aussi de voir les impacts sur le milieu physique environnant ainsi que de vérifier l'agitation de ce port de plaisance. Sur le plan hydro-sédimentaire, le port ne montre aucun signe de risque qu'il soit soumis au phénomène d'ensablement. En revanche, pour l'étude de l'agitation on note des pics de 1.25m au niveau du quai faisant face à la passe d'entrée pour la houle de direction Nord-Est 25°N.

La modélisation dans le bassin a permis d'observer le comportement de l'ouvrage vis-à-vis des houles dominantes. La réalisation de l'ouvrage en modèle réduit physique, a permis d'avoir une confirmation qualitative sur l'agitation du port de plaisance tel qu'observé dans le logiciel.

Par ailleurs, la comparaison entre les résultats de l'agitation du port dans les deux modèles sont proches et converge vers le même résultat, cette observation nous confirme la fiabilité des deux méthodes.

Ainsi les résultats obtenus lors de notre travail ont permis de mettre l'accent sur l'aide que peuvent apporter les puissants logiciels à l'instar de Mike 21, la modélisation physique permet quant à elle non seulement de confirmer les résultats de la modélisation numérique mais permet également de compléter l'étude numérique par des données sur la stabilité des ouvrages, les franchissements et ainsi de déterminer la variable la plus stable à adopter.

Enfin, l'approche sur la Gestion Intégrée des Zones Côtières évoquée à la fin de notre mémoire, a permis de mettre l'accent sur les principaux impacts des ouvrages et installations présents au niveau de la baie de Collo. Ces approches sont indispensables pour une gestion durable de la côte ouest de Skikda, notamment pour le contrôle et le suivi des impacts sur l'environnement (pollution, urbanisation, surexploitation, érosion...etc.)

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances en termes de techniques de modélisation, d'analyse de situations et de résolution de problématiques.

Références bibliographiques

Bibliographies

Al Sid Chikh, S.2011. Etude de protection de la plage de palm Beach-Azur contre l'érosion : Recours à la modélisation numérique et physique. *Diplôme de Magister, Surveillance et Gestion de l'environnement marin et littoral, ENSSMAL. Algérie. 132p*

Aoudj .C - Bouaziz .T, 2014. Fonctionnement et dynamique morpho-sédimentaire du littoral Est de Béjaïa. *Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral, ENSSMAL. Algérie . 34-35p*

Boudab .C – Hadj Djilani .A, 2019. Apport de la modélisation physique et numérique dans l'étude de l'hydrodynamisme sédimentaire : cas de l'aménagement d'une plage artificielle au niveau des sablettes. *Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral, ENSSMAL. Algérie 25p*

Boutiba, M. (2009). Analyse par ondelettes des variations historiques de la ligne de rivage entre l'Oued Reghaia et l'Oued Mazafran (Willaya d'Alger). Vol 20, n°2, 144p

Caminade. D, 1995. Ouvrages de protection contre la houle. Université du Havre. © Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/genie-civil-ti254/ouvrages-de-protection-contre-la-houle-c4631/>, 28 p.

Caude. G, 2003. Modélisation physique au XXI^{ème} siècle. *Colloque SHF « Quels modèles physiques pour le XXI^{ème} siècle ? », Lyon, 08-09 octobre 2003, Cetmef, pp 01-09.*

Caude. G, 2004. La modélisation physique au XXI^{ème} siècle. *La Houille Blanche, N°3 (mai-juin 2004). DOI : 10.1051/lhb : 200403001, p 17-24.*

Dahmani, H. (2012). Utilisation de la modélisation physique et numérique pour l'étude des paramètres hydrodynamiques dans la zone centre Algéroise « Le site des Sablettes ». *Thèse de Magister .Science de la mer, ENSSMAL. Algérie .57p*

Dalrymple. R A, 1985. Physical modeling in coastal engineering. *Department of Civil Engineering & College of Marine Studies University of Delaware, Newark, USA. P 03-09.*

Delouis. A, 2001. Transfert des sédiments et modélisation à fond mobile. Sédiments et navigation en estuaire. *La Houille Blanche, N°8 (décembre 2001). DOI : 10.1051/lhb/2001092, p 62-67.*

DHI (2014) a. Mike 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation .Denmark: Horshom, p.385.

DHI (2014) b. Mike ZERO: Creating 2D Bathymetries .Bathymetry Editor & MeshGenerator. Denmak: Horshom, p.114.

LEM, (2012). Etude de protection de Collo, collecte et analyse des données de base (wilaya de Skikda). Document non publié : LEM.

LEM, (2018). Etude de réalisation d'un port de plaisance à Tamanart, collecte et analyse des données de base (wilaya de Skikda). Document non publié. LEM.

LEM, (2019). Etude de réalisation d'un port de plaisance à Tamanart en modèle réduit physique (wilaya de Skikda). Document non publié. LEM.

Migniot. C, 1973. Modèles à fonds mobiles, Facteurs hydrodynamiques intervenant sur les modèles sédimentologiques, Cours sur les techniques de l'hydraulique expérimentale. *Publication du Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 47 p.*

Mignot. E, Tanguy. J M et Pons. F, 2002. Modélisation morpho-dynamique des fonds autour des brise-lames. *VII^{ème} Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Anglet, France, 15-17 mai 2002, ISBN 2-9505787-6-4, pp 179-186.*

ONM, (2019). Statistique des données météorologiques dans la région de Skikda de la période (2006-2018). Données non publiées : ONM

Othmani, H. (2014). Impacts des infrastructures maritimes sur le littoral : Cas du port de cap Djinet. *Thèse de Magister. Géorisque, ENSSMAL .Algérie .107 p*

PAC. (2004). Programme d'aménagement côtier : zone côtière de Skikda .Document non publié. MATE : PAC

Richard. P et Pestour. J L, 2003. Le modèle physique, outil privilégié de communication avec les riverains pour les projets d'aménagement torrentiel. *Colloque SHF « Quels modèles physiques pour le XXI^{ème} siècle ? ». Lyon, 08-09 octobre 2003, 08 p.*

S.S.M.O (1970). Summary of synoptic meteorological observations: Mediterranean marine areas. Document non-publié .Etats-Unis d'Amérique : NWSC Washington ds.

Samat. O, 2007. Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Université Aix-Marseille I – Université de Provence. UFR des Sciences Géographiques et de l'Aménagement. *Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (UMR 6635-CNRS). Thèse de Doctorat, 264 p.*

SOGREAH, 1973. Protection du complexe touristique de Tipaza-Matares. Campagne d'observations en nature. *Rapport général, R_74014, pp 15-56.*

Viguiet. J, 2001. Notions de dynamiques sédimentaires. Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie. © *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, 10 p.*

Viguiet. J, 1992. Modèles en hydraulique maritime. Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie. © *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, p 01-11.*

Web :

<http://rp5.ru/metar.php?metar=DAAV&lang=fr>

Annexes

Annexe(I) :

A.

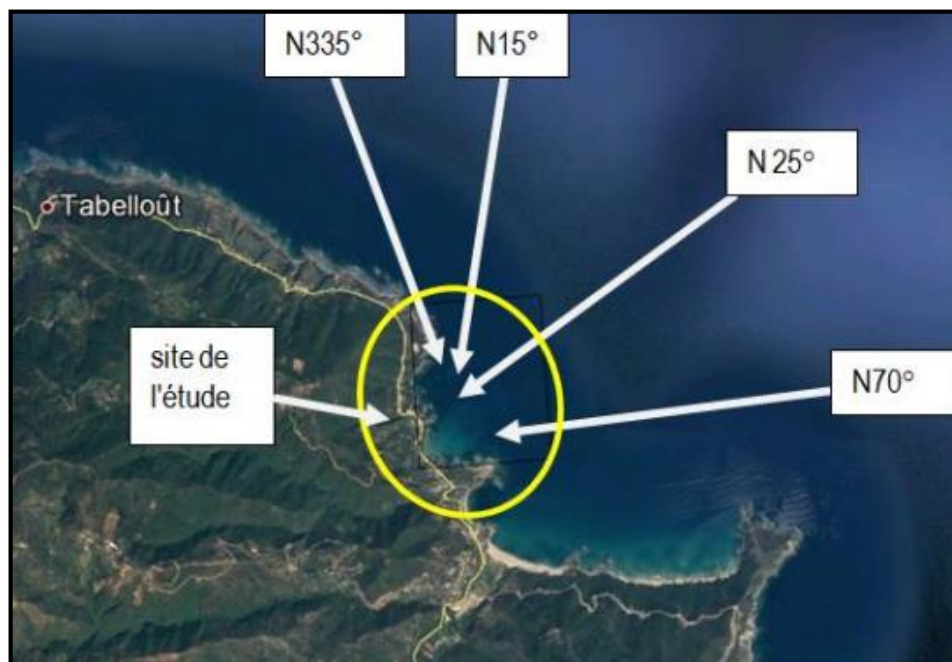


Figure 01 : Les houles pouvant atteindre le site Tamanart

B.

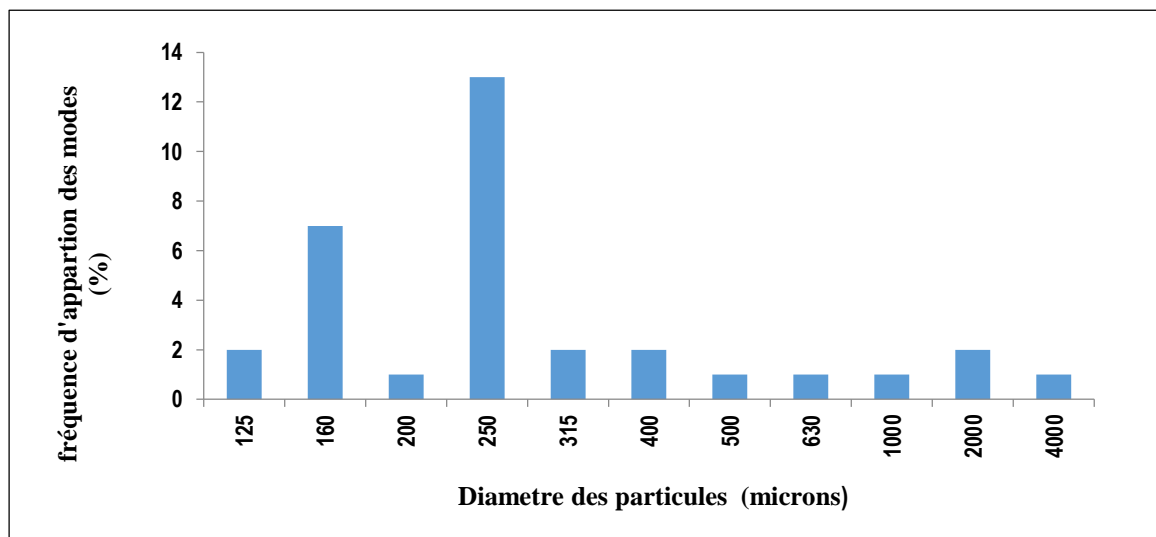


Figure 02 : Histogramme de fréquence des modes

C. Résultats de la simulation numérique (avant et après aménagement) pour la houle de direction Nord-Est (25°N)

a. Réfraction de la houle (Spectral Wave, SW)

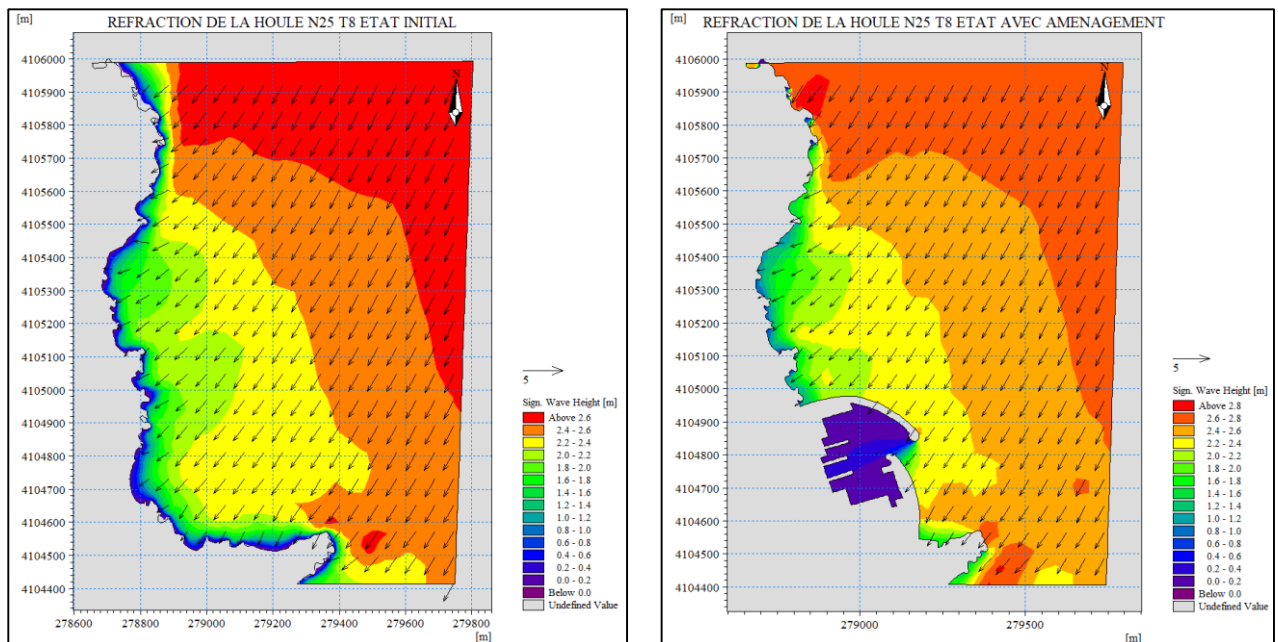


Figure 03 : Champ de réfraction de la houle avant e après aménagement, MWD=25° ; Hs=2.63 ; T=8s dans le secteur Nord-Est dans la région de Tamanart.

b. Courantologie (Hydrodynamic, HD)

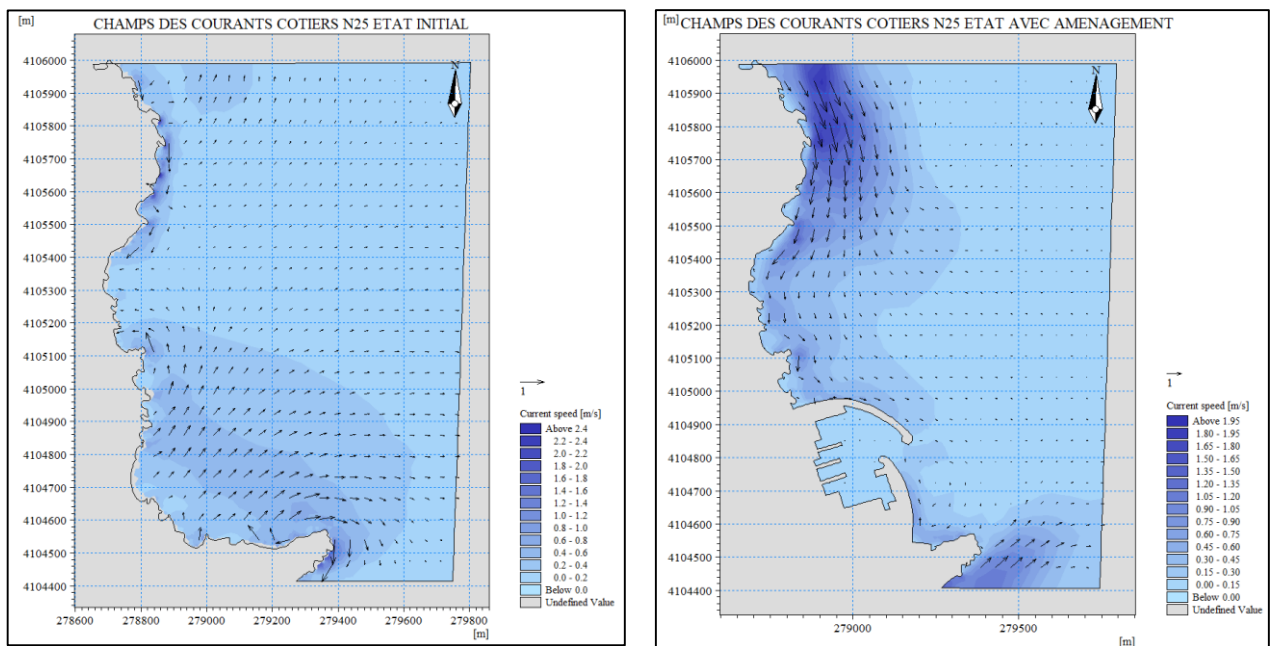


Figure 04 : Champs des courants côtiers avant et après aménagement, MWD=25° ; HS=2.63m ; T=8s dans le secteur Nord-Est dans la région de Tamanart.

c. Transport sédimentaire (Sand Transport, ST)

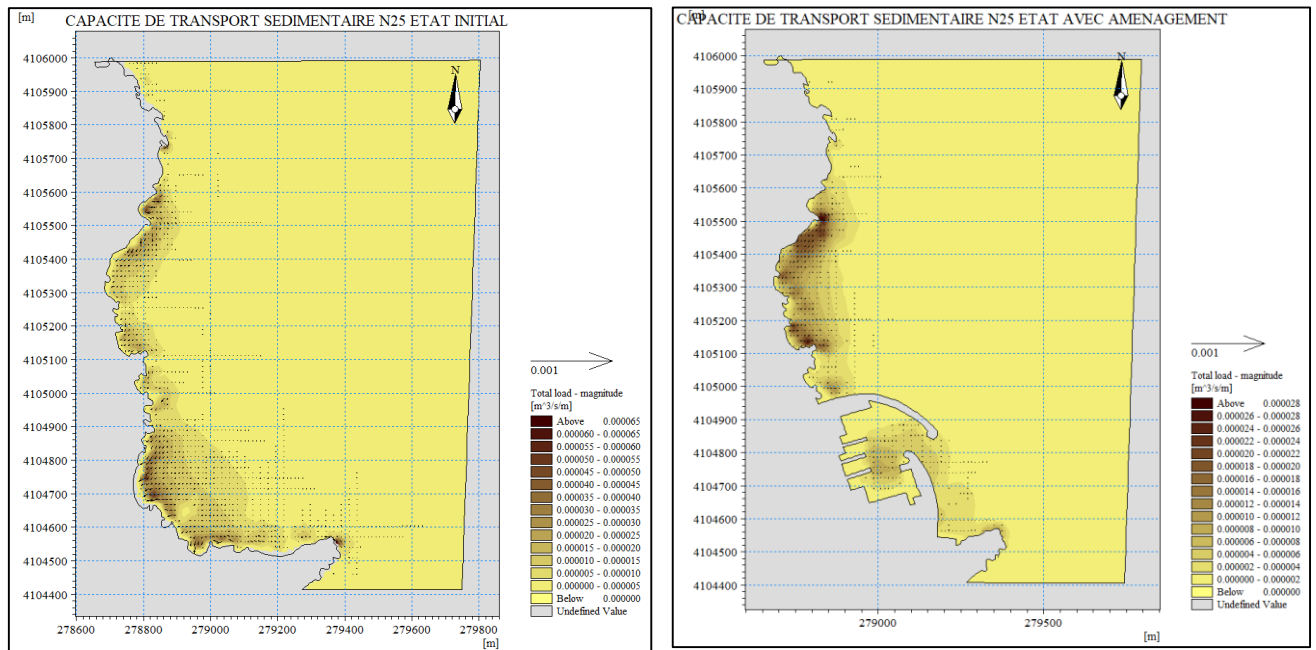


Figure 05 : Capacité du transport sédimentaire avant et après aménagement, $MWD=25^\circ$; $H_s=2,63m$; $T=8s$ dans le secteur Nord-Est dans la région de Tamanart.

Annexe(II) :

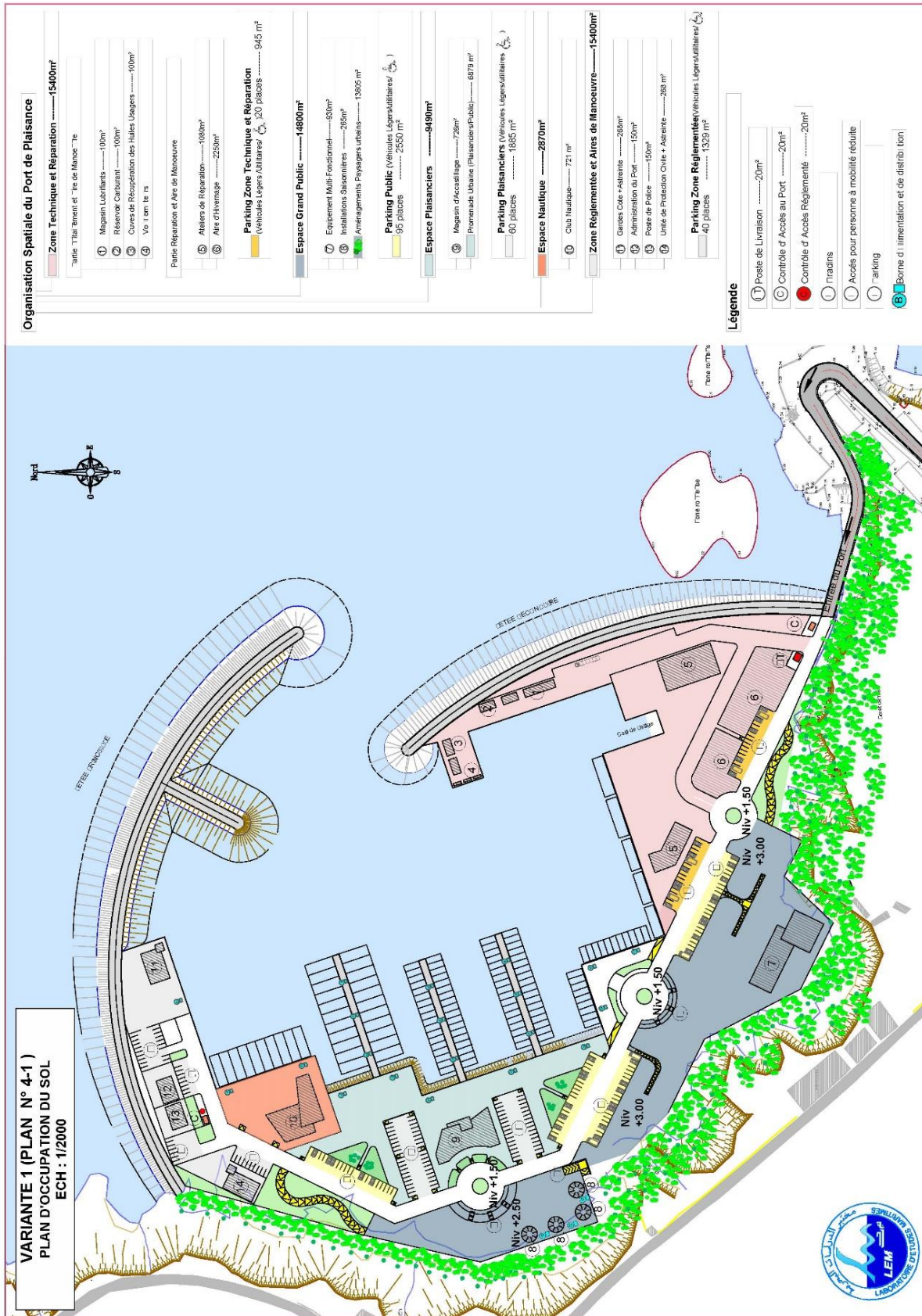


Figure n°06 : Plan d'occupation du sol du port de plaisance de Tamanart

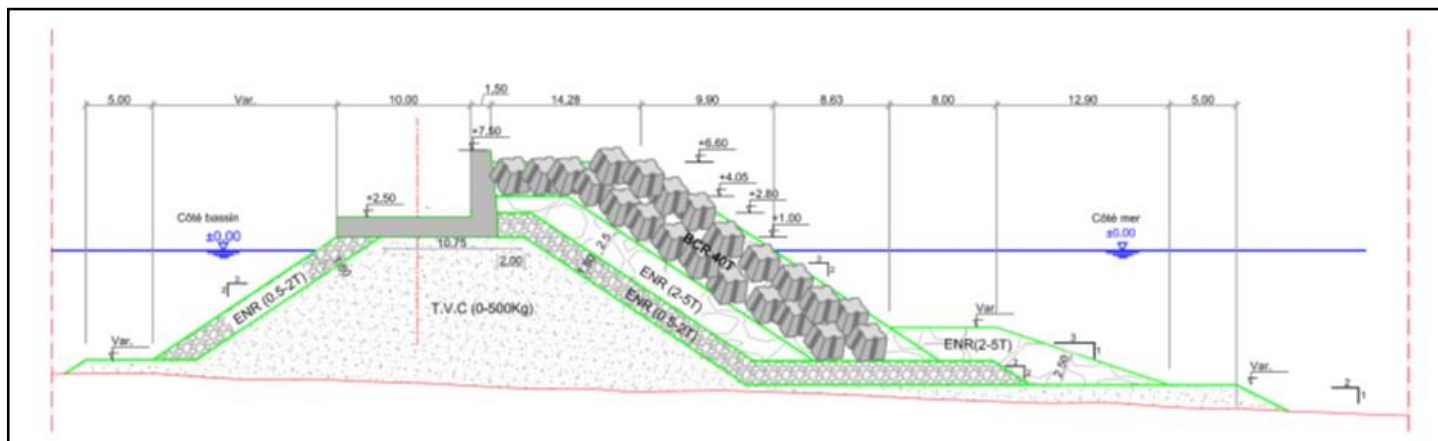


Figure n°9 : Variante 01 – jetée principale – profil courant avant musoir (echelle 1/400)

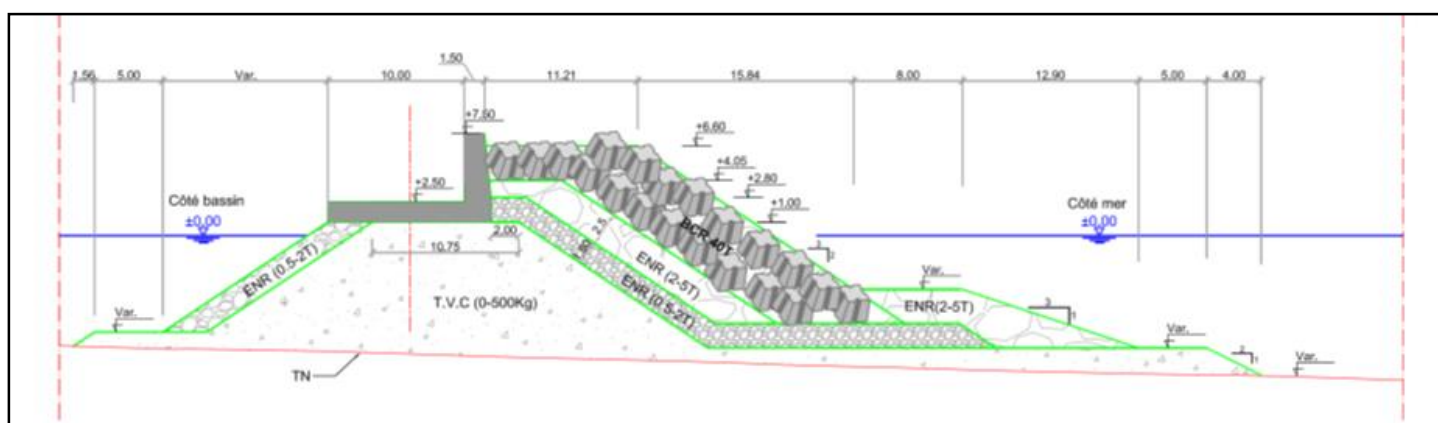


Figure n°10 : Variante 01 – jetée principale – profil courant A (echelle 1/400)

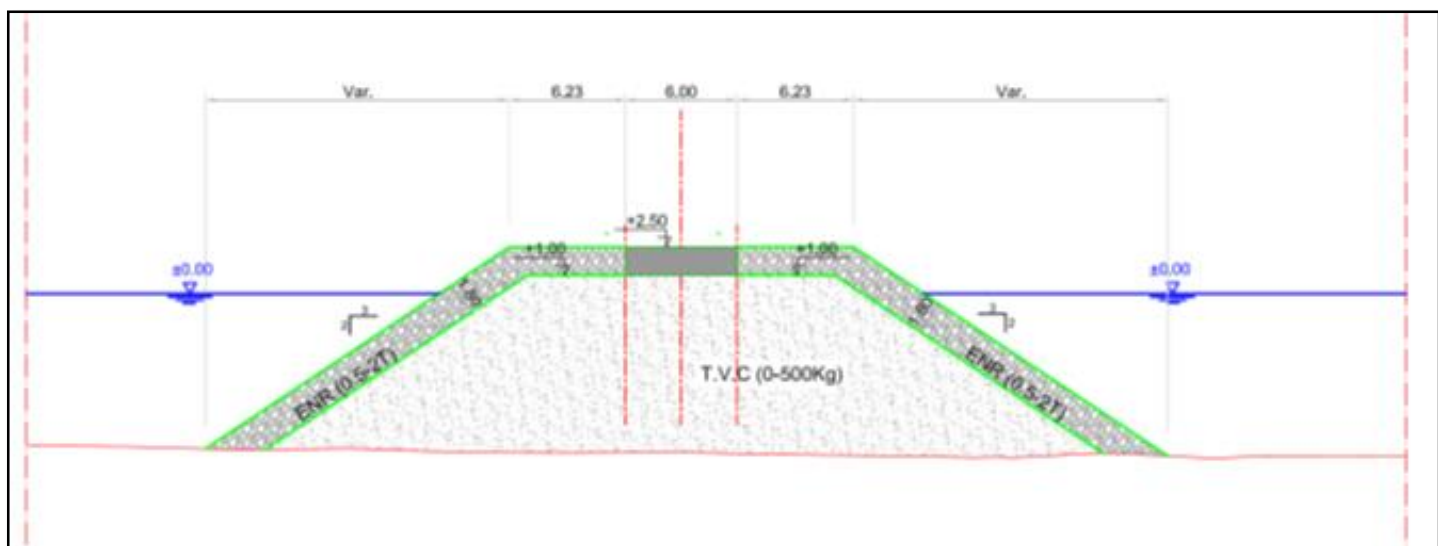


Figure n°11 : Variante 01 – jetée principale – profil épi (echelle 1/400)

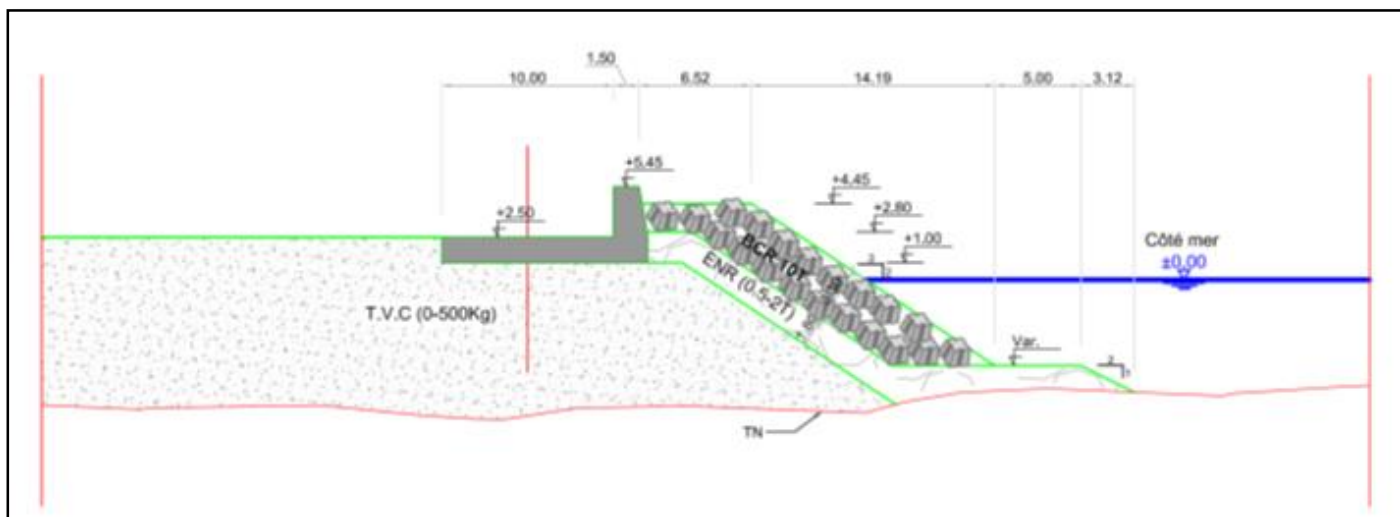


Figure n°12 : Variante 01 – jetée principale – profil enracinement

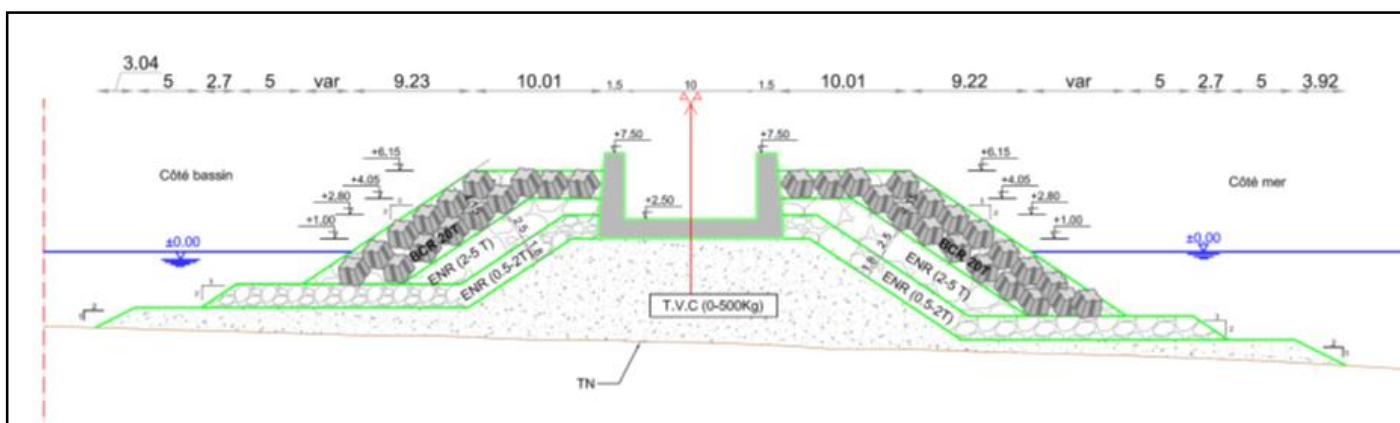


Figure n°13 : Variante 01 – jetée secondaire – profil musoir

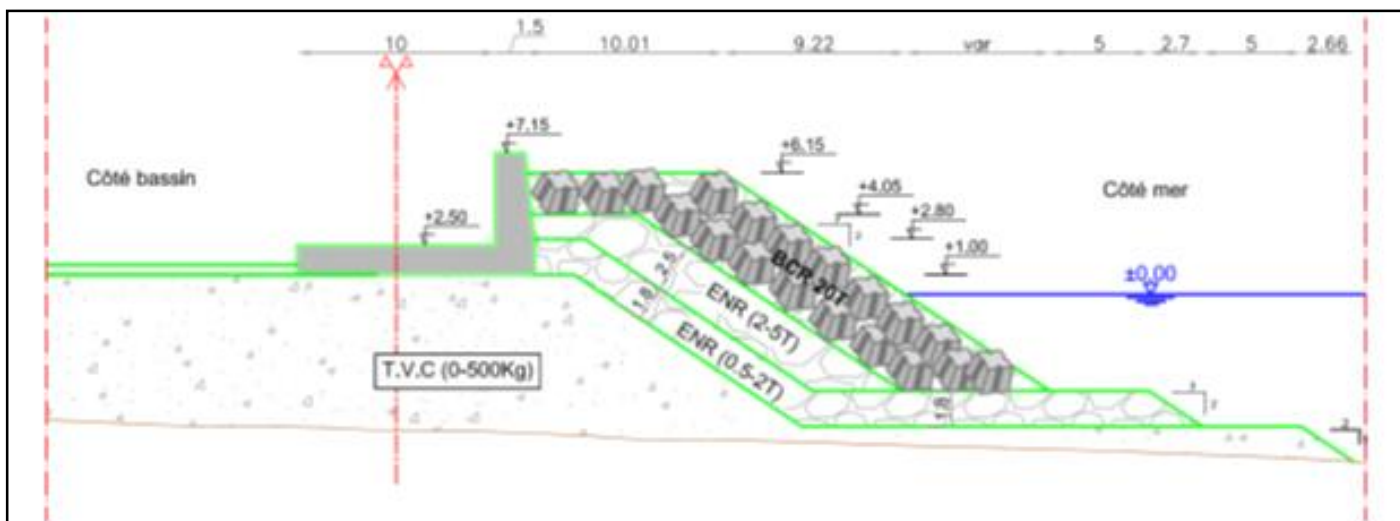


Figure n°14 : Variante 01 – jetée secondaire – profil courant B

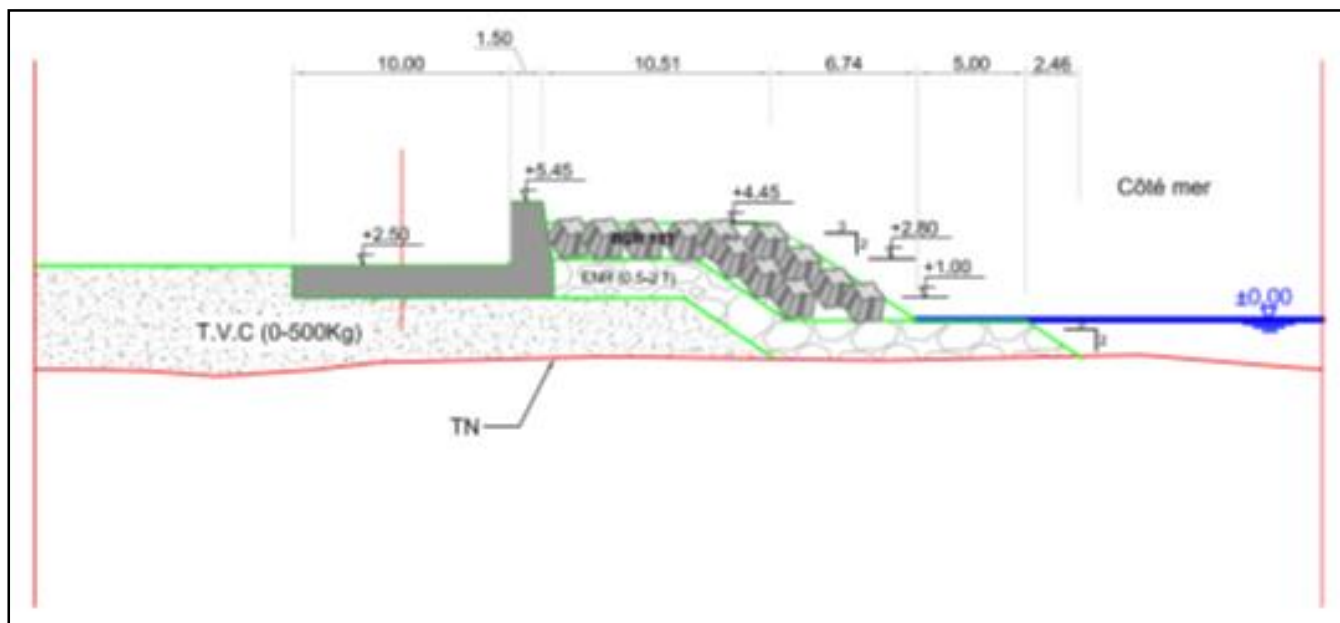


Figure n°15 : Variante 01 – jetée secondaire – profil enracinement

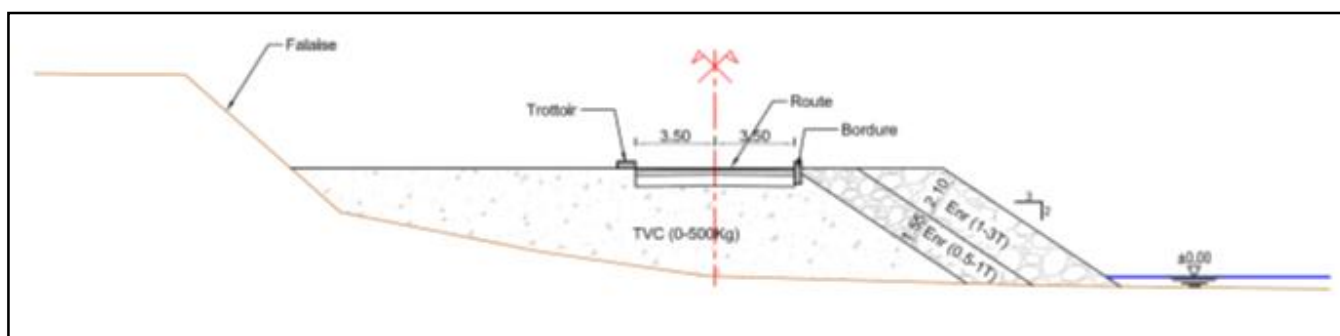


Figure n°16 : Variante 01 - profil route

Variante n°2 :

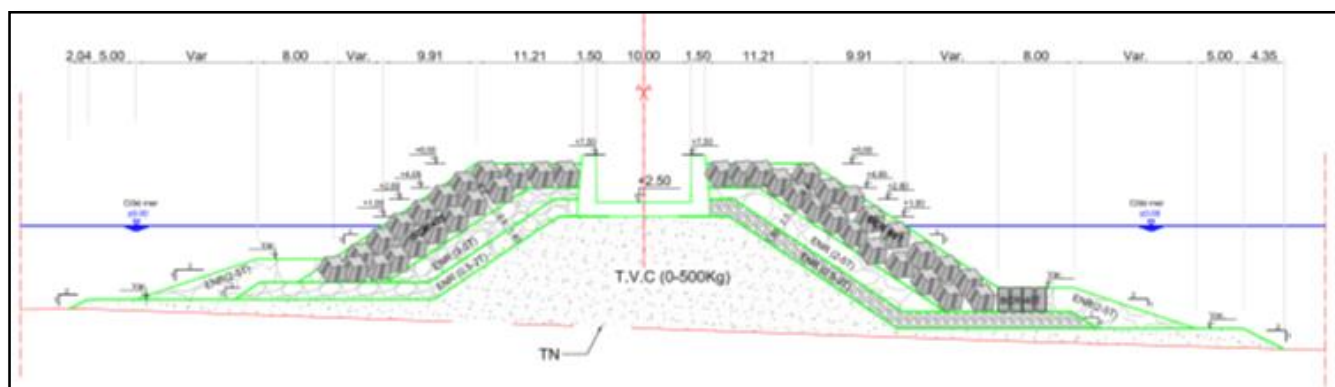


Figure n°17 : Variante 02 – jetée principale-profil musoir

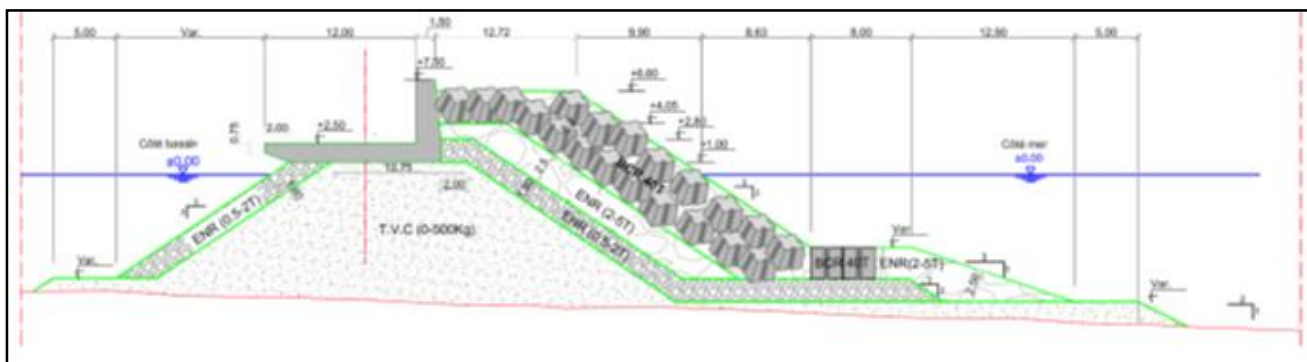


Figure n°18 : Variante 02 – jetée principale-profil courant avant musoir

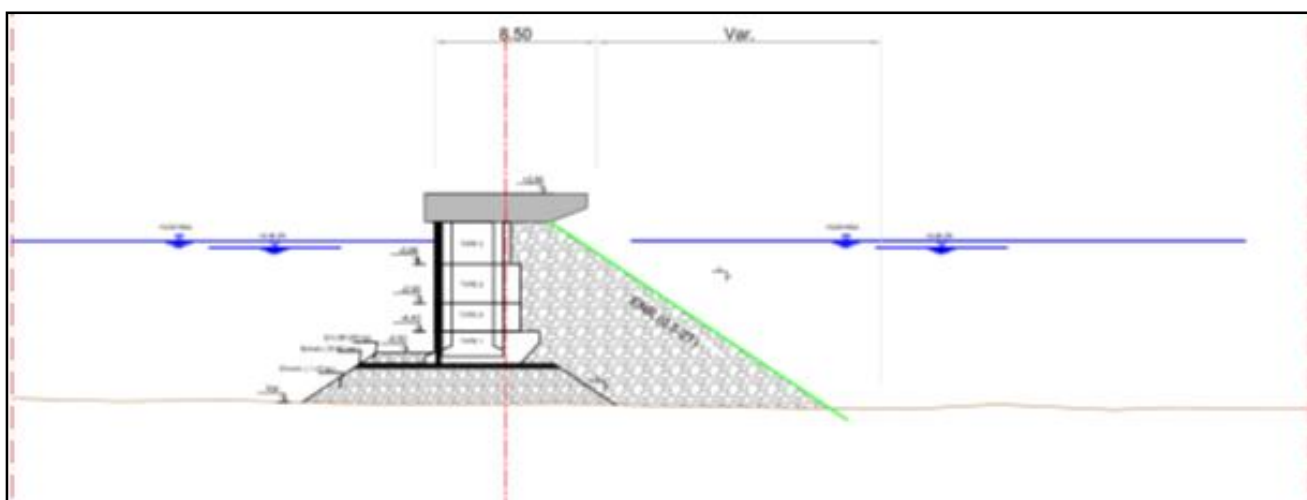


Figure n°19 : Variante 02 – profil épi

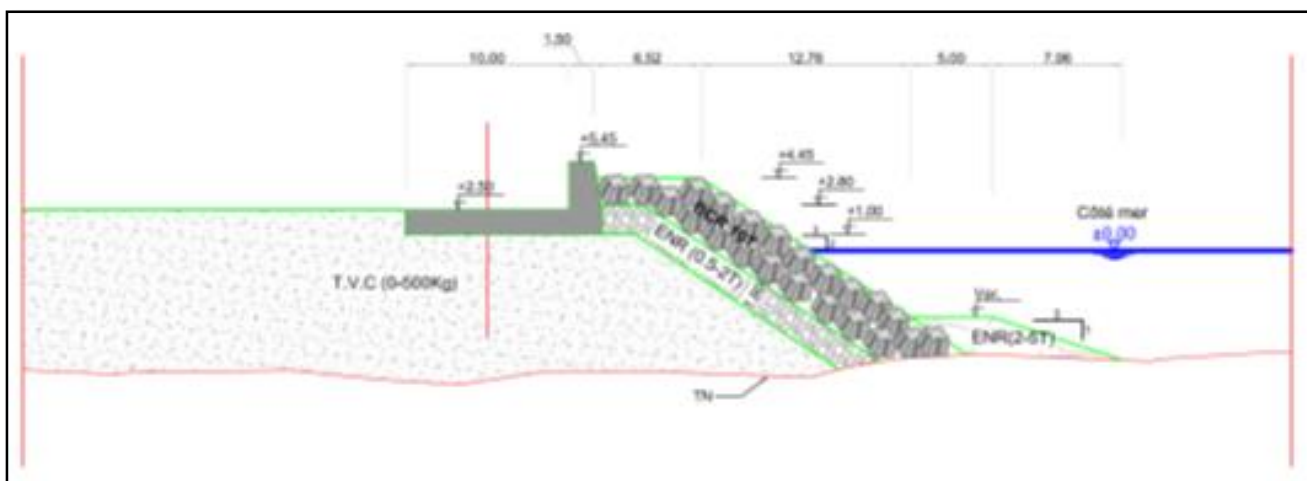


Figure n°20 : Variante 02 – jetée principale- profil enracinement

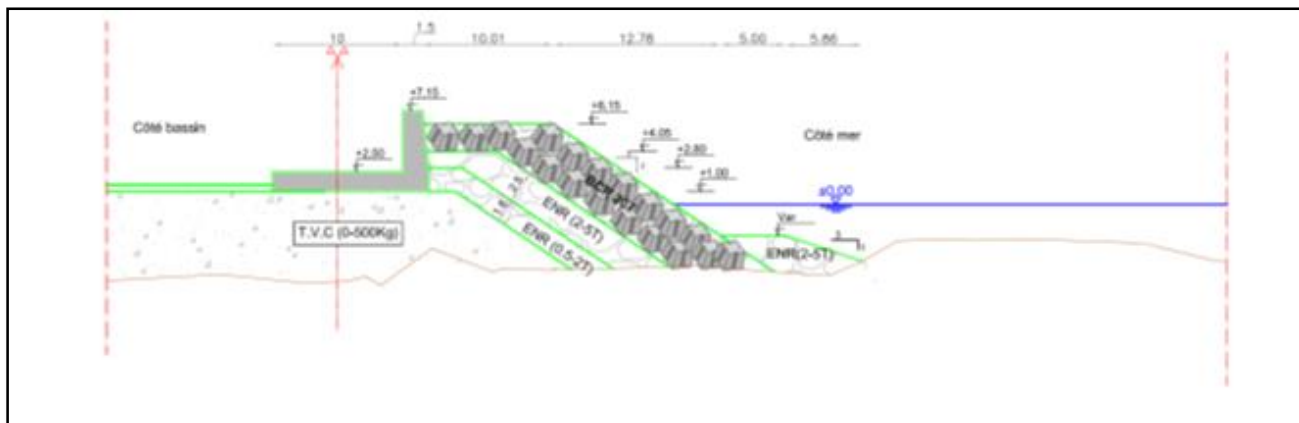


Figure n°21 : Variante 02 – jetée secondaire- profil courant B (-4m...-7 m)

Variante n°03 :

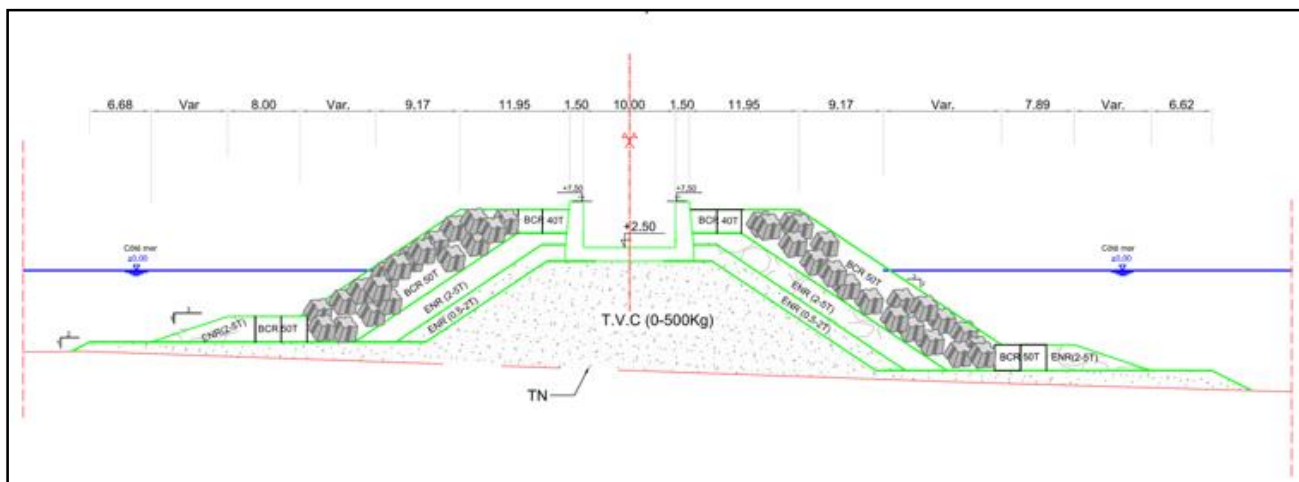


Figure n°22 : Variante 03 – jetée principale- profil musoir

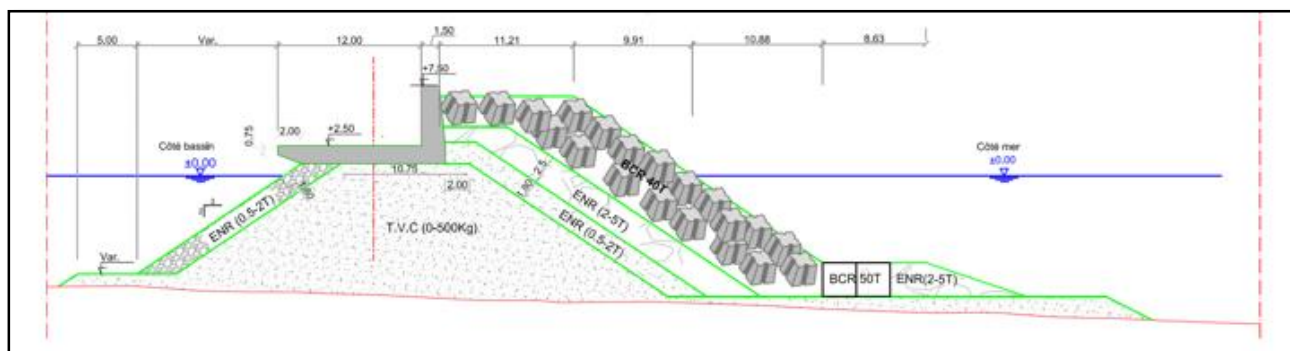


Figure n°23 : Variante 03 – jetée principale- profil courant avant musoir

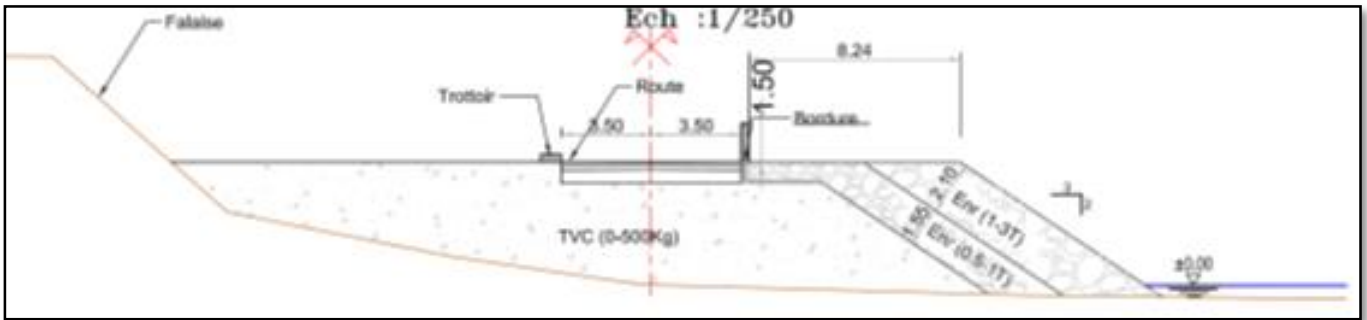


Figure n°24 : Variante 03 – profil route

Variante n°04 :

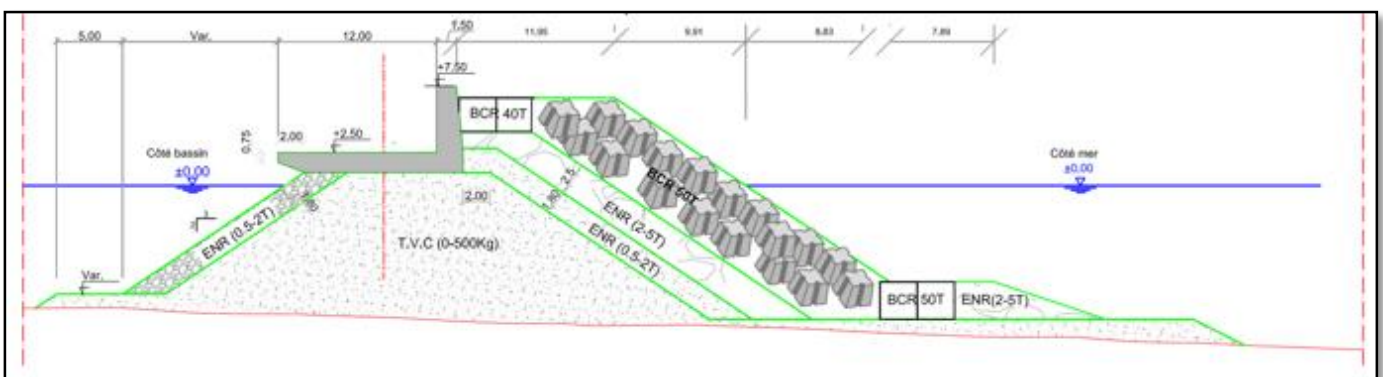


Figure n°25 : Variante 04 – jetée principale- profil avant musoir

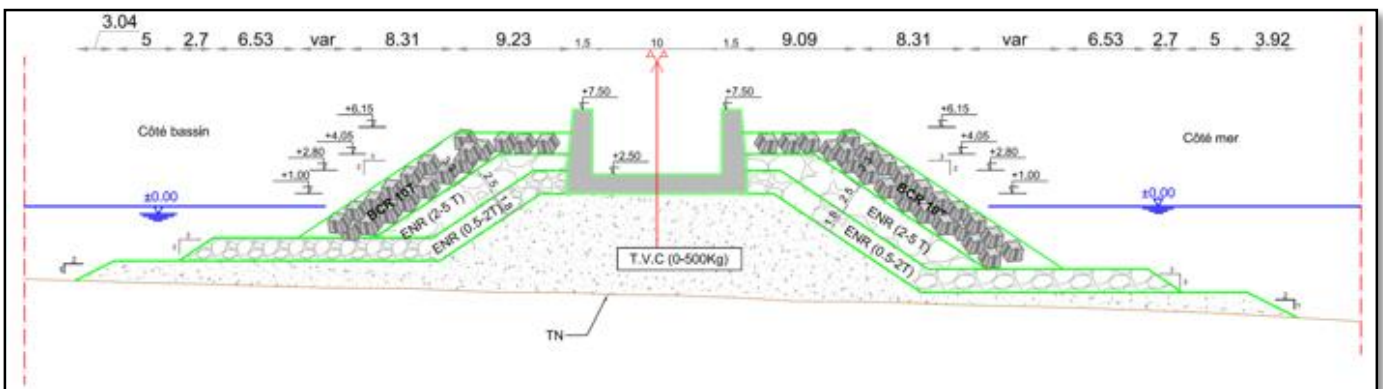


Figure n°26 : Variante 04 – jetée secondaire- profil musoir

Variante n°05 (retenue) :

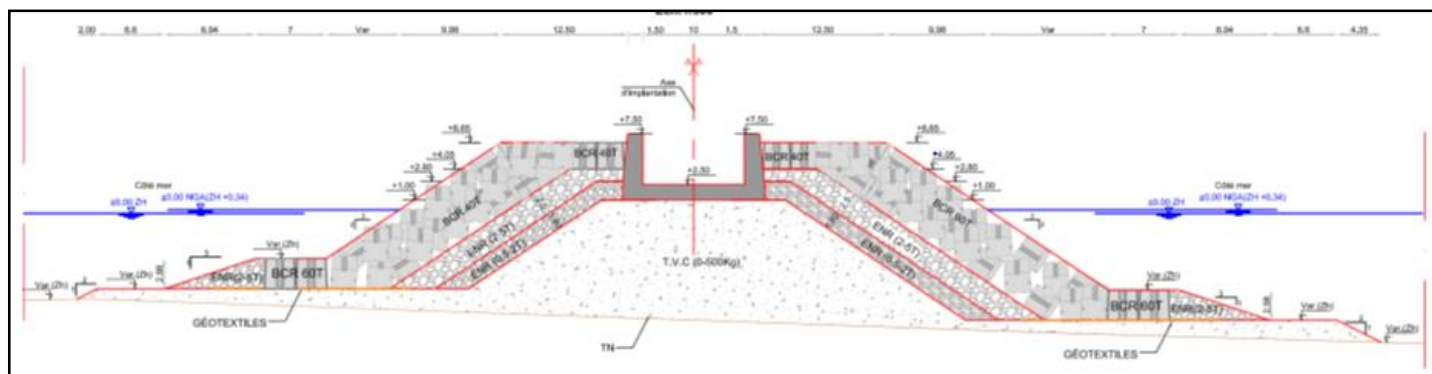


Figure n°27 : Variante 05 – jetée principale - profil musoir

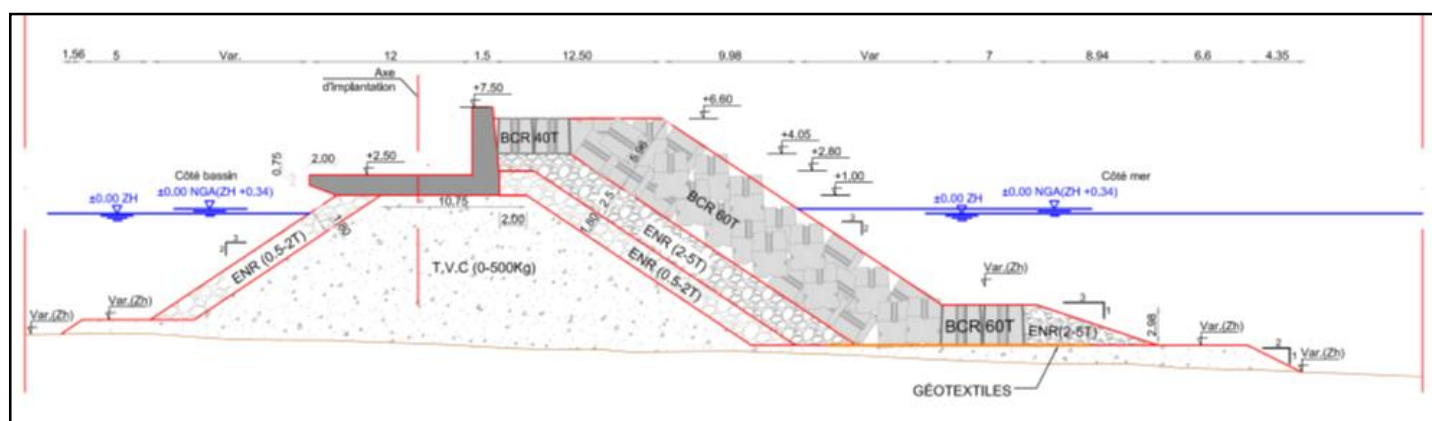


Figure n°28 : Variante 05 – jetée principale - profil courant avant musoir

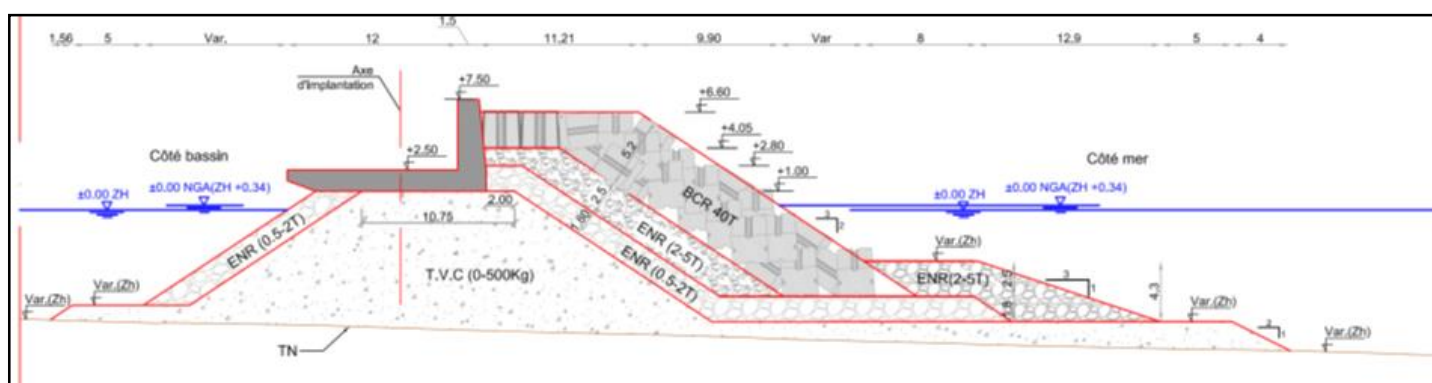


Figure n°29 : Variante 05 – jetée principale - profil courant (C-C)

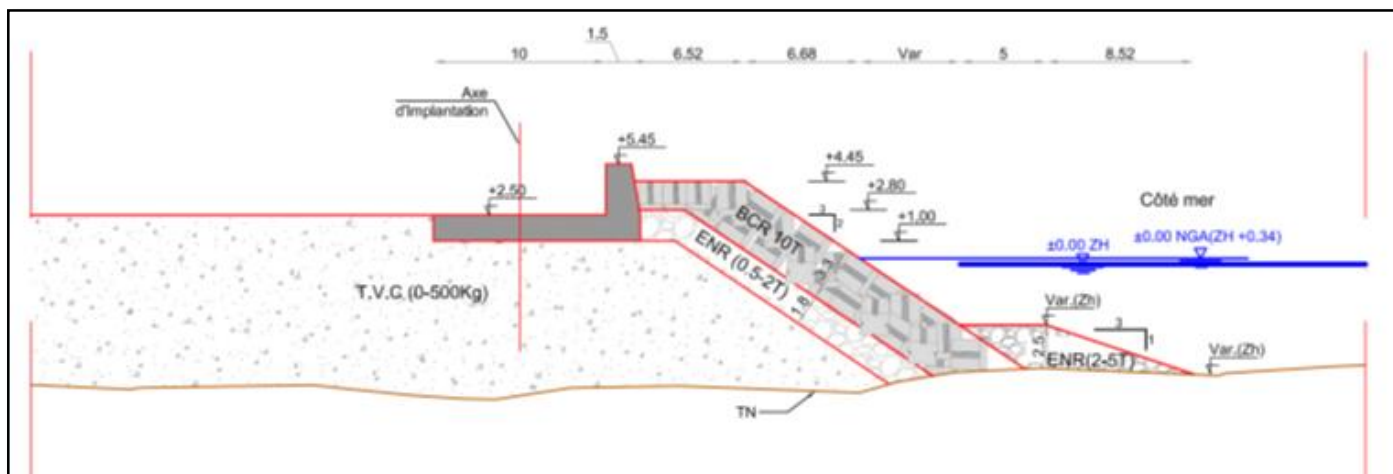


Figure n°30 : Variante 05 – jetée principale - profil enracinement (D-D)

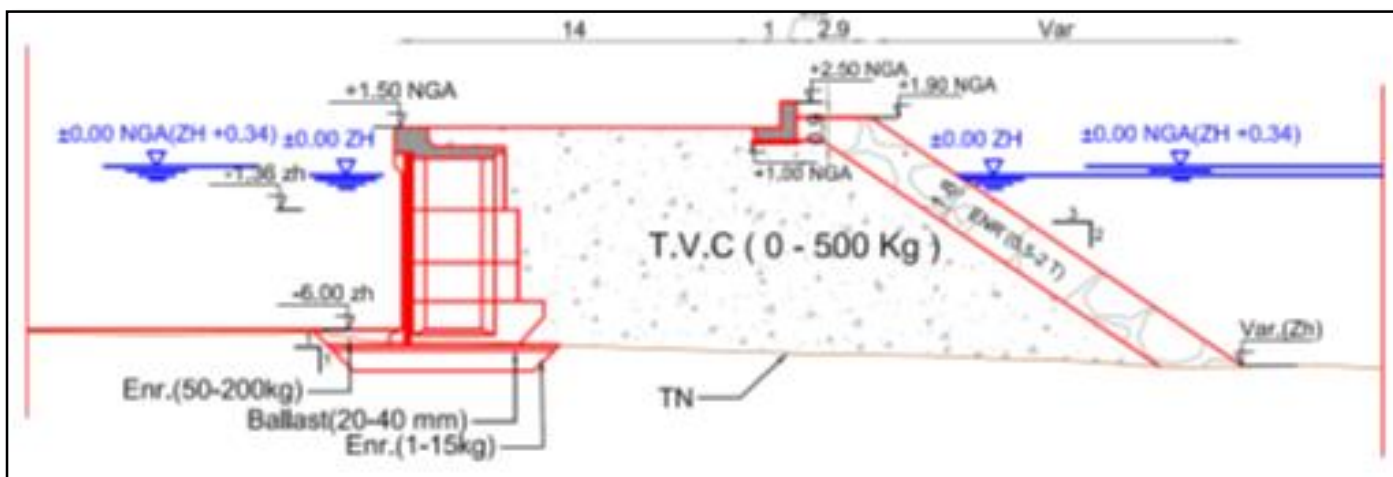


Figure n°31 : Variante 05 – jetée principale - profil épi

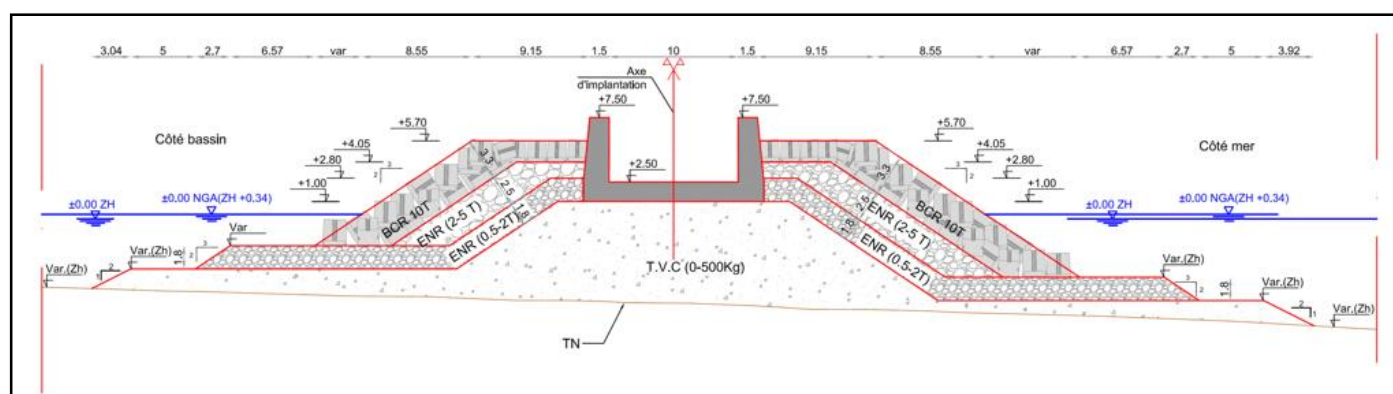


Figure n°32 : Variante 05 – jetée secondaire - profil musoir

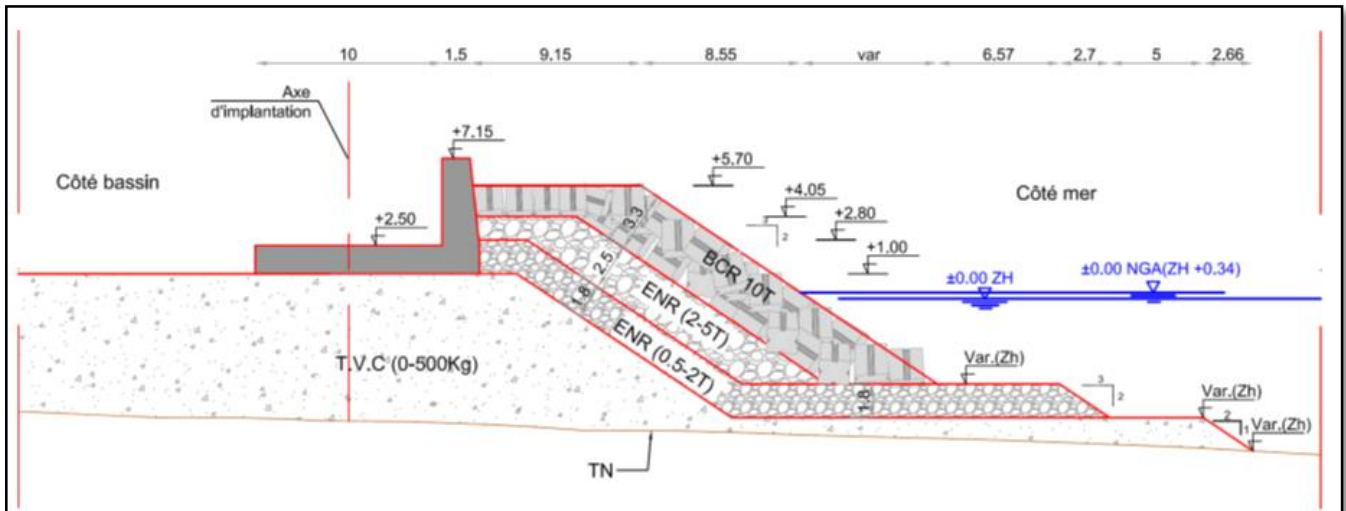


Figure n°33 : Variante 05 – jetée secondaire - profil courant B'

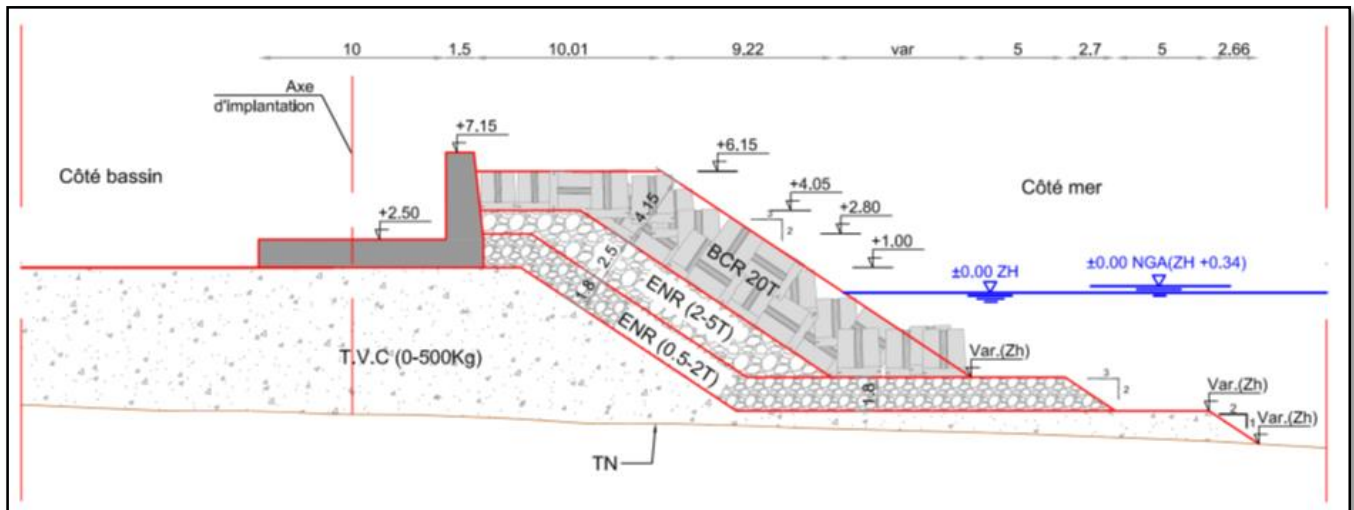


Figure n°34 : Variante 05 – jetée secondaire - profil courant C'

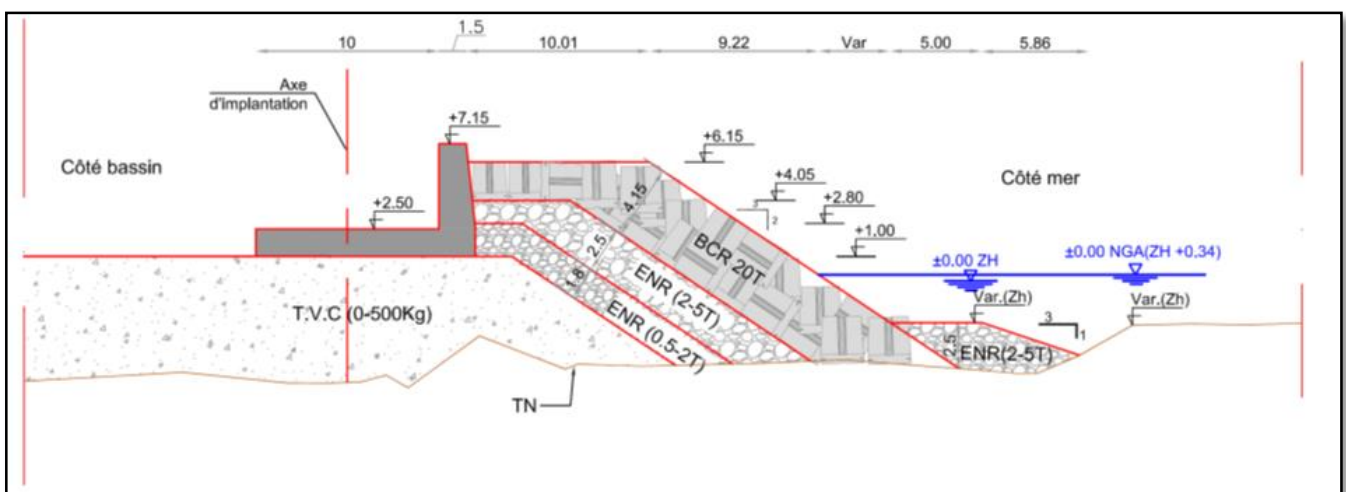


Figure n°35 : Variante 05 – jetée secondaire - profil courant D'

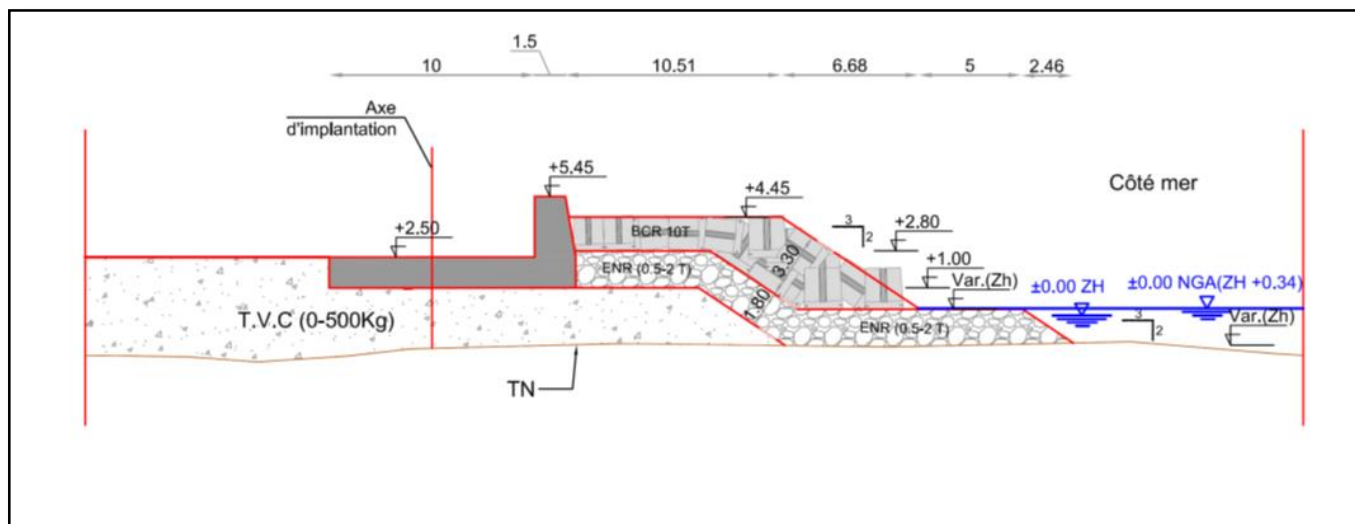
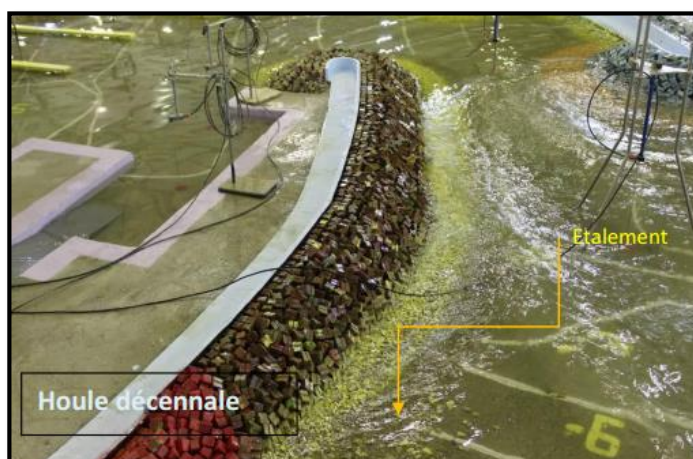
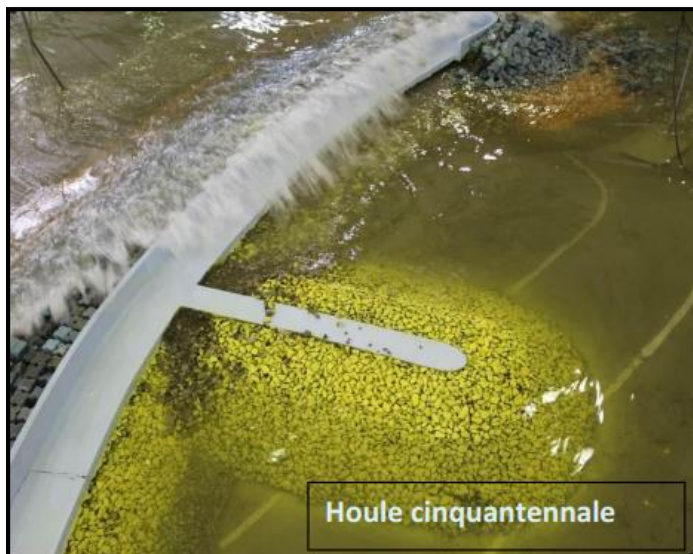


Figure n°36: Variante 05 – jetée secondaire - profil courant E' - enracinement

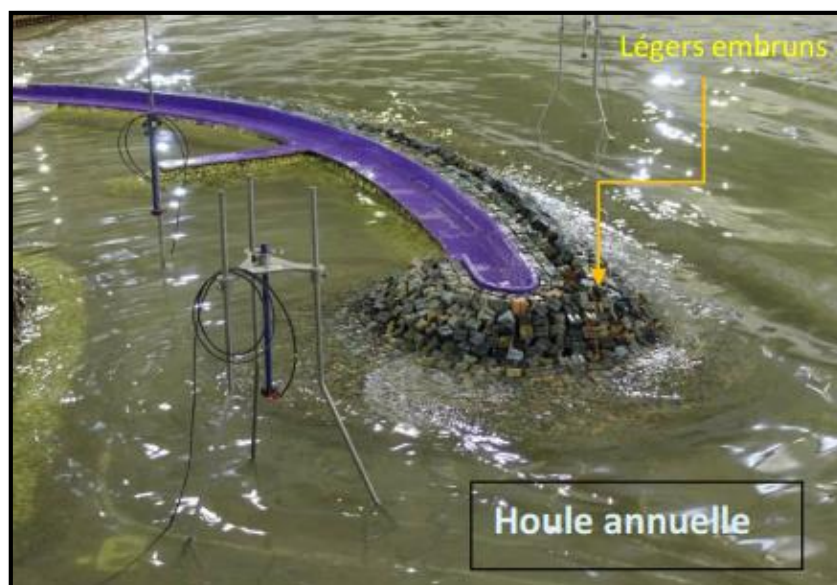
Annexe (III) : Etat de l'ouvrage pendant les différentes séries d'essais

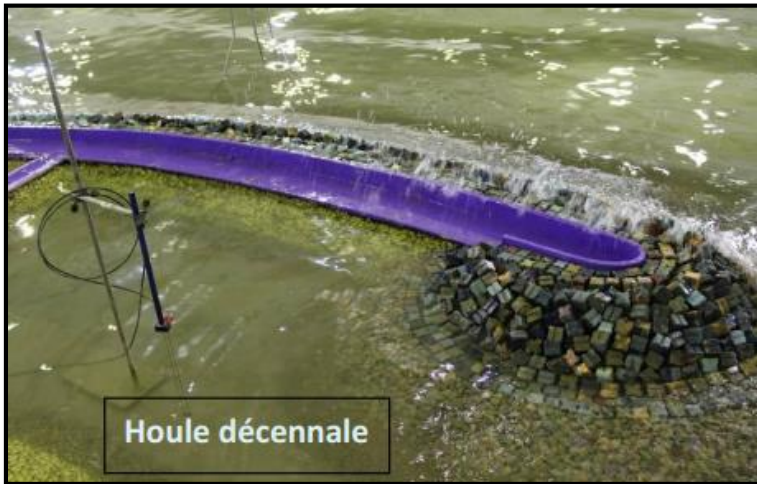
Variante n°01 :





Variante n°2 :



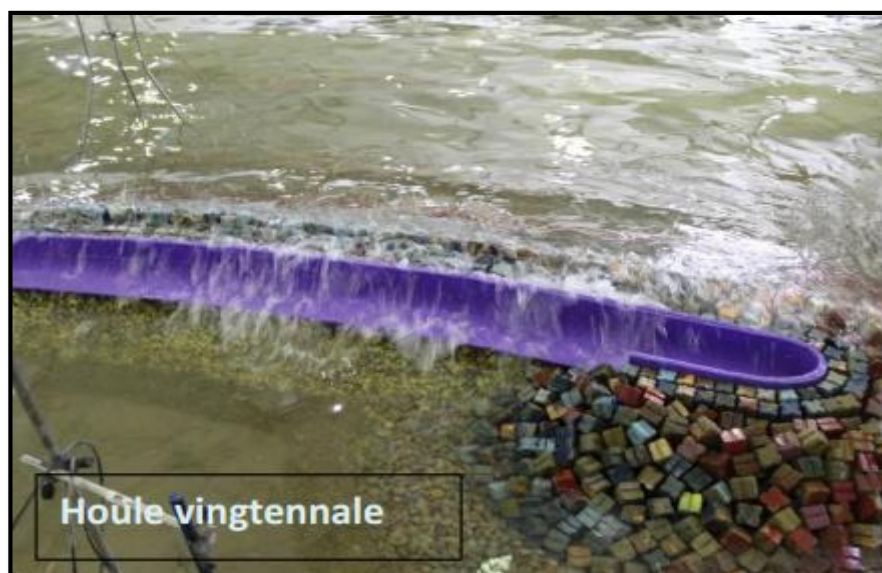


Variante n°3 :





Houle décennale

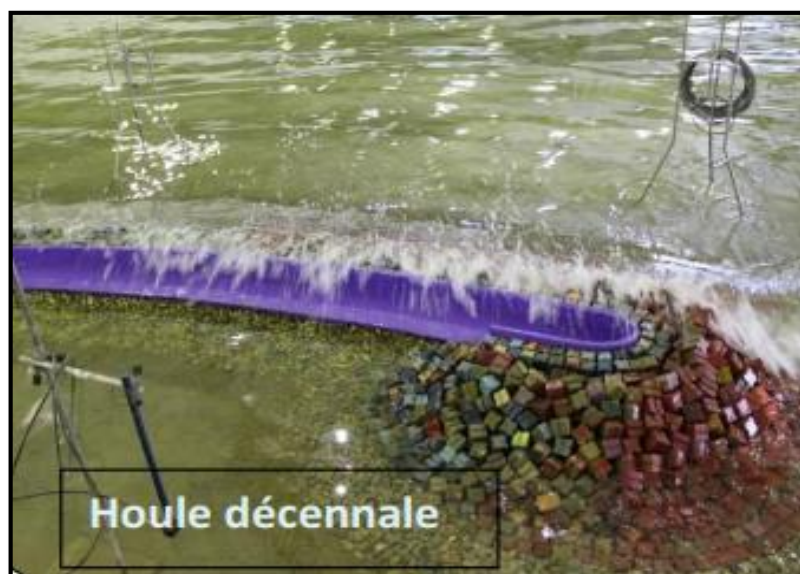


Houle vingtennale

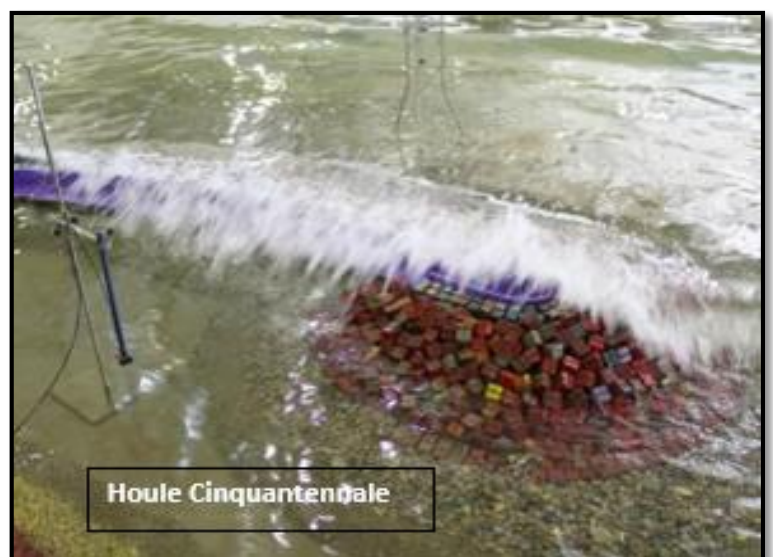
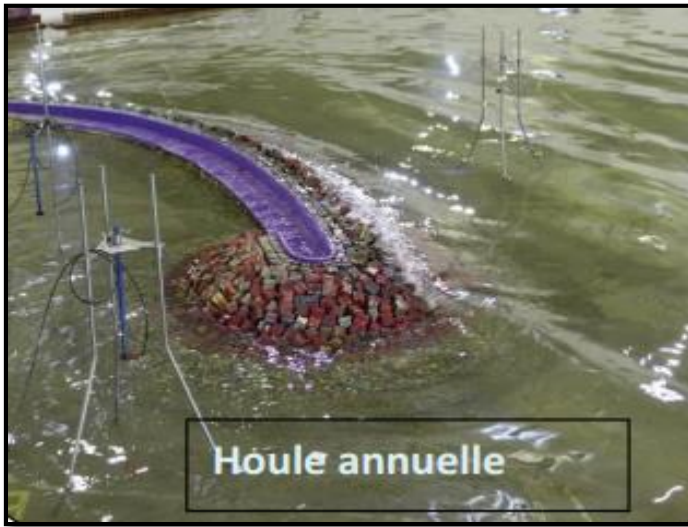


Houle cinquanteennale

Variante n°04 :



Variante n°5 :





Résumé

Le tourisme mondial est une activité contributrice au développement économique et social. Son poids économique, selon les rapports de l'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT), donne à ce secteur une importance capitale, en comparaison aux autres secteurs d'activité économique.

L'aménagement du littoral, à travers la création de plages artificielles et la réhabilitation et la construction de ports de plaisance, est le meilleur exemple à évoquer.

Le site « **Tamanart** » est situé à environ 8 km à l'Ouest de Collo derrière un cap rocheux orienté vers le Nord –Est, fait face principalement aux agitations venant du Nord, Nord-Est et du secteur Nord-Ouest. Cette zone rentre dans l'aménagement de la baie de Skikda. Un nombre important d'ouvrages est réalisé, où l'implantation d'un port de plaisance est prévue, ce qui suscite une nécessité d'étude perspective.

Dans le but de comprendre et de déterminer l'impact de l'implantation de ce port de plaisance sur l'hydrodynamisme local et de connaître l'état d'agitation et de stabilité de ce port, une modélisation numérique (sur Mike 21) et une modélisation physique (en bassin à houle sur modèle réduit physique) ont été effectuées en s'appuyant sur des études bathymétrique, sédimentologiques...etc.

Ce présent mémoire englobe 5 chapitres, présentant les généralités sur la zone d'étude, décrivant le site d'étude et le projet à réaliser, la méthodologie et le matériel utilisé, l'affichage des cartes élaborées par le logiciel Mike 21 et leur interprétation ensuite la complémentarité de la modélisation numérique par l'étude physique.

Un dernier chapitre consacré à la GIZC de la baie de Collo été abordé.

Mots Clés : Modèle réduit physique, modélisation numérique, port de plaisance, l'hydrodynamisme, agitation et stabilité du port, Mike 21, Tamanart, Collo, baie de Skikda.

Abstract

World tourism is an activity that contributes to economic and social development. Its economic weight, according to reports from the World Tourism Organization (WTO), gives this sector crucial importance in comparison to other sectors of economic activity.

Coastal planning, through the creation of artificial beaches and the rehabilitation and construction of marinas, is the best example to mention.

The "Tamanart" site is located about 8 km west of Collo behind a rocky cape oriented to the North-East, mainly facing the unrest coming from the North, North-East and the North-West sector. This area is part of the development of Skikda Bay. A significant number of works are carried out, or the establishment of a marina is planned, which creates a need for perspective study.

In order to understand and determine the impact of the establishment of this marina on local hydrodynamics and to know the state of agitation and stability of this port, numerical modeling

(on Mike 21) and physical modeling (in a swell basin on a physical reduced model) was carried out using bathymetric, sedimentological studies, etc.

This thesis includes five chapters, presenting the generalities on the study area, describing the study site and the project to be carried out, the methodology and the material used, the display of the maps produced by the Mike 21 software and their interpretation. Then the complementarity of numerical modeling by physical study.

A final chapter devoted to the ICZM of Collo Bay was discussed.

Keywords: Physical scale model, numerical modeling, marina, hydrodynamics, restlessness and stability of the port, Mike 21, Tamanart, Collo, Skikda bay.

المخلص

السياحة العالمية نشاط يساهم في التنمية الاقتصادية والاجتماعية. إن وزنه الاقتصادي، وفقاً لتقارير منظمة السياحة العالمية ، يعطي هذا القطاع أهمية حاسمة مقارنة بقطاعات أخرى من النشاط الاقتصادي

التخطيط الساحلي، من خلال إنشاء الشواطئ الاصطناعية وإعادة تأهيل وبناء المراسي، هو أفضل مثال يمكن ذكره.

على بعد حوالي 8 كيلومترات غرب كولو خلف رأس صخري موجه نحو الشمال الشرقي، "Tamanart" يقع موقع ويواجه بشكل رئيسي الاضطرابات القادمة من الشمال والشمال الشرقي والقطاع الشمالي الغربي. هذه المنطقة جزء من تطوير خليج سكيكدة. يتم تنفيذ عدد كبير من الأعمال، أو من المخطط إنشاء مرسى، مما يخلق حاجة إلى دراسة المنظور.

من أجل فهم وتحديد تأثير إنشاء هذا المرسى على الديناميكا المائية المحلية ومعرفة حالة الإثارة والاستقرار في هذا الميناء، النمذجة العددية (على مايك 21) وتم إجراء النمذجة الفيزيائية (في حوض تضخم على نموذج مخفض فيزيائي) باستخدام دراسات قياس الأعماق، الرسوبيات، إلخ.

تتضمن هذه الرسالة 5 فصول، تعرض العموميات في منطقة الدراسة، وتصف موقع الدراسة والمشروع الذي سيتم تنفيذه، والمنهجية والمواد المستخدمة، وعرض الخرائط التي أنتجها برنامج مايك 21 وتفسيرها. ثم تكامل النمذجة العددية من خلال الدراسة الفيزيائية.

نوقش الفصل الأخير المخصص للإدارة المتكاملة للمناطق الساحلية لخليج كولو.

الكلمات المفتاحية: نموذج الحجم المادي، النمذجة العددية، المرسى، الديناميكا المائية، الأرق والاستقرار للميناء، مايك 21، تامانارت، كولو، خليج سكيكدة.