



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option: OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

**ÉTUDE D'AUN AMÉNAGEMENT PAR UN SYSTÈME
D'ENDIGUEMENT SUR L'EMBOUCHURE DE L'OUED
EL-HAMIZ (W. ALGER)**

Présenté par :

GUENOUCHE AICHA HADJER

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HADJ SADOK AHMED	M.C.A	Président
ZEROUAL AYOUB	M.C.A	Examineur
BOUZIANE MAMAR	M.A.A	Examineur
MIHOUBI MUSTAPHA KAMEL	Professeur	Promoteur

Session : Décembre 2020

Remerciements

Au terme de ce travail je remercie le bon dieu de m'avoir donné la force et la sagesse de mener ce travail à son achèvement.

Mon respect au président et aux membres du jury qui me feront l'honneur d'Apprécier et de corriger mon travail.

Une grande reconnaissance envers mon promoteur Mr MIHOUBI MUSTAPHA KAMEL, pour ses judicieux conseils, sa disponibilité et sa confiance en mon travail, merci Monsieur.

À tout le corps enseignant et le personnel de l'ENSH qui veillent sur notre bonne formation.

Aux ingénieurs ZITOUN Youcef et AIT HAFID AIT AMIR qui m'ont été d'une immense aide dans l'élaboration de ce travail.

Au chef de projet MIR OMAR et au personnel de MEDITRAM.

À tous mes camarades de l'ENSH surtout à Wassim, Mohamed, Meriem, Sara et Abderrahmane ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.

Merci

Aicha Hadjer LPB

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma mère qui m'a soutenue et encouragée durant ces années d'études et sans laquelle je ne serais la femme que je suis maintenant

À mes frères Reda et Mehdi, ma sœur de cœur Farah, ma nièce Lyn qui m'ont chaleureusement apporté chacun à sa façon un soutien et un bonheur inégalé.

À mes tantes Wassila, Bachira, Samia, Djaouida, Doulel et à tout le reste de ma famille

À mes copines, mes sœurs Amina, Lydia, Meriem, Nouha, Amira et Tanya qui ont toujours été là pour moi et qui ont su me remonter le moral quand j'en avais besoin

À mes amis Walid, Saadi, Ramzi, Anis et Soheib

À Julien Geleon

À tous mes camarades de l'ENSH et de l'EPSTA

À tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation.

Aicha Hadjer LPB

ص خلم

يتعرض مصب واد الحمير الواقع ببلدية برج البحري للطمي بفعل الامواج، مما يؤدي إلى احتمال وقوع فيضانات في المنطقة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة إذا هو تهيئة المصب من خلال نظام السد للتعامل مع هذه الظاهرة وبالتالي حماية السكان من عواقبها. أتاحت معالجة بيانات الامواج في عرض البحر وقياس الأعماق بواسطة حزمة برامج مايك ٢١ من الحصول على خصائص الأمواج في الشاطئ وبالتالي عرض متغيرين وحجمهما. الأول يتكون من حاجزين، طول كل واحد منهما ٣٢٣ م، والثاني من حاجزين طول كل واحد منهما ٢٨٠ م. وبناء على معايير تقنية اقتصادية، اتضح أن المتغير الأول هو الأنسب.

Résumé

L'embouchure de l'Oued El Hamiz, située dans la commune de Bordj El Bahri, est soumise à un ensablement causé par des effets hydrodynamiques, occasionnant un risque d'inondation dans la région. Le but principal de notre étude est alors d'aménager l'embouchure par un système d'endiguement afin de faire face à ce phénomène, et donc de protéger les habitants de ses conséquences.

Le traitement des données de la houle au large et de la bathymétrie par le progiciel MIKE 21 a permis d'obtenir les caractéristiques de la houle à la côte et donc de projeter et de dimensionner deux variantes, la première est constituée de deux épis de 323 m chacun et la deuxième de deux épis de 280m chacun. En se basant sur des critères technico-économiques, il en ressort que la première variante d'aménagement est la plus adéquate.

Abstract

The mouth of Oued El Hamiz, which is located in the commune of Bordj El Bahri, is subject to silting up caused by hydrodynamic effects, causing a risk of flooding in the region. The main goal of our study is therefore to develop the mouth with a diking system in order to deal with this phenomenon and protect people from its consequences. The processing of offshore swell and bathymetry data by the Mike 21 software package made it possible to obtain the characteristics of the swell at the coast and therefore to design and size two variants, the first consisting of two groynes of 323 m each and the second of two groynes of 280 m each. Based on technical and economic criteria, it emerges that the first development variant is the most adequate.

Table des matières

Listes des Figures	i
Liste des Tableaux	iii
Liste des annexes	Error! Bookmark not defined.
Liste des Abréviations	vi
Introduction générale	viii
Chapitre I : Généralités sur les ouvrages maritimes	1
Introduction.....	1
I.1 Les embouchures	1
I.1.1 Définition d'une embouchure	1
I.1.2 Types d'embouchures.....	1
I.2 Hydrodynamique côtière	3
I.2.1 La houle	3
I.2.2 La marée	5
I.2.3 Le courant	7
I.3 Ouvrages de protection et de défense.....	7
I.3.1 Les murs de soutènement.....	7
I.3.2 Les épis	8
I.3.3 Brise-lame	9
I.3.4 Les digues	10
Conclusion	11
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	12
Introduction.....	12
II.1 Situation géographique du site d'étude	12
II.2 Présentation de l'Oued El Hamiz	12
II.3 État actuel du site d'étude	13
II.4 Aspect géologique de la région	14
II.5 Aspect sédimentologique de la zone d'étude	15
II.6 Bathymétrie du site d'étude.....	16
II.7 Sismicité de la zone d'étude	19
II.8 Données climatologiques	20
II.8.1 Les températures	20
II.8.2 Les précipitations	21

II.8.3 Les vents	22
II.9 Données hydrologiques	23
II.10 Données océanographiques	24
II.10.1 La marée et les variations du niveau marin	24
II.10.2 Les courants	26
II.10.3 Les houles au large	27
Conclusion	33
Chapitre III : Étude de la réfraction de la houle	36
Introduction.....	36
III.1 Présentation du modèle Mike 21	36
III.2 Analyse des données de base	38
III.2.1 Données de la houle au large	38
III.2.2 Données bathymétriques	42
III.3 Étude en modèle numérique de la transformation des vagues	42
III.3.1 Les principales étapes de la modélisation par le MIKE 21	42
III.3.2 Données d'entrée du modèle MIKE 21/SW	43
III.3.3 Interprétions des résultats.....	48
III.4 choix de la houle de dimensionnement	55
Conclusion	55
Chapitre IV : Variantes d'aménagement hydraulique et prédimensionnement.....	57
Introduction.....	57
IV.1 Pourquoi et comment aménager.....	57
IV.2 L'épi, ses composants et ses outils de dimensionnement	57
IV.2.1 Les composants d'un épi.....	58
IV.2.2 Outils de dimensionnement.....	59
IV.3 Variantes d'aménagement hydraulique	61
IV.3.1 Variante d'aménagement numéro° 1	61
IV.3.2 Variante d'aménagement numéro° 2 :	78
IV.4 Choix de la variante d'endiguement de l'embouchure :.....	91
IV.4.1 Devis estimatif des variantes d'endiguement.....	91
IV.4.2 Avantage et inconvénients de la variante 1.....	93
IV.4.3 Avantage et inconvénients de la variante 2.....	93
IV.4.4 Comparaison finale des variantes	94
IV.4.5 Résultat et discussion.....	94
Conclusion	95

Chapitre V : Organisation de chantier et estimation quantitative	98
Introduction.....	98
V.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier	98
V.1.1 Maitre de l’ouvrage.....	98
V.1.2 Maitre d’œuvre	99
V.1.3 L’entrepreneur	99
V.2 Travaux de réalisation.....	100
V.2.1 Installation du chantier	100
V.2.2 Approvisionnement des matériaux	101
V.2.3 Réalisation des deux épis	101
V.3 Personnel et matériel nécessaires	102
V.3.1 Personnel nécessaire	102
V.3.2 Matériel nécessaire	103
V.4 La planification.....	103
V.4.1 Techniques de planification.....	104
V.4.1.2. Méthodes basées sur le graphique :	105
V.4.2 Les étapes de la planification	105
V.4.3 Estimation des durées.....	106
V.4.4 Choix de la méthode de calcul.....	106
V.4.4.2 Chemin critique (C.C) :.....	107
V.4.4.3 Le diagramme de Gantt	107
V.4.5 Élaboration du réseau selon la méthode CPM.....	108
V.5 Devis quantitatif et estimatif	110
Conclusion	111
Conclusion générale	112
Bibliographie	Error! Bookmark not defined.
Annexe	115

Listes des Figures

Figure I.1 Organisation de l'embouchure d'un delta dominé par le fleuve (Wright, 1977).....	2
Figure I.1 – Organisation de l'embouchure d'un delta dominé par le fleuve (Wright, 1977) ...	3
Figure I.2 – Modèle d'embouchure dominée par les houles (Wright, 1977).....	5
Figure I.3 – Profils des types de déferlement et leur représentation graphique (Kampion, 1991)	6
Figure I.4 – Exemple de différentes géométries de murs de soutènement (CETMEF, 2009) ..	8
Figure I.5– Principe de fonctionnement d'une batterie d'épis (viguier,2001)	8
Figure I.6 – Différentes géométries en plan des épis (CETMEF, 2009)	9
Figure I.7 – Exemple d'un brise-lame en enrochement (Valras plage, Occitanie, France)	10
Figure I.8 – Schéma représentatif d'une digue à talus (Bonnefille.2010)	10
Figure II.1 – Situation géographique de la zone d'étude (Google Earth,2020).....	12
Figure II.2 – Situation géographique de Oued El Hamiz	13
Figure II.3 – Photo montrant la sortie de l'oued vers la mer (Juillet 2020)	14
Figure II.4 – Photo montrant les habitations à proximité et les déchets (Juillet 2020).....	14
Figure II.5 – Carte géologique de la Mitidja (Bennie et Partners, 1983)	15
Figure II.6 – Coupe interprétative de la Mitidja dans le bassin du Mazafran (archie 1970)...	15
Figure II.7 – Carte de positionnement des points de prélèvements de sédiments (LEM,2014)	16
Figure II.8 – Carte bathymétrique de la zone d'étude (LEM,2014)	17
Figure II.13 – Localisation du séisme de Boumerdes et ses alentours (Mai 2003)	19
Figure II.14 – Graphe représentatif des températures maximales et minimales (station de Dar El Beida (1996-2008).....	20
Figure II.15 – Diagramme ombrothermique de la région d'étude (station de Dar el Beida) (1996-2008)	21
Figure II.16 – Graphe des précipitations annuelles de la zone (Station de Dar El Beida (1996-2008)	22
Figure II.17 – Rose trimestrielle et annuelle des vents (S.S.M.O (1914-1970)	23
Figure II.18 – Correspondance entre les systèmes altimétriques à Alger.	25
Figure II.19 – Schéma probable de la dynamique sédimentaire dans la baie d'Alger.....	27
Figure II.20 – Rose trimestrielle et annuelle des houles au large (SSMO,1963-1970)	30
Figure III.1 – Schéma représentatif des différents modèles de MIKE21 et de leurs domaines d'utilisation.....	37
Figure III.2 – Emprise et maillage du modèle côtier de la baie d'Alger.....	45
Figure III.3 – Emprise et maillage du modèle côtier de la zone d'étude	46
Figure III.4 – Carte bathymétrique de la baie d'Alger.....	47
Tableau III.6 – Coordonnées des points d'extraction	48
Figure III.5 – Positionnement des points d'extraction	49
Figure III.6 – Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 270° avec une période de retour de 50 ans.....	50
Figure III.7 – Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 315° avec une période de retour de 50 ans.....	51
Figure III.8 – Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 345° avec une période de retour de 50 ans.....	52

Figure V.1– Emplacement du chantier et de l’aire de stockage (Google map,2020)	100
Figure V.2– Emplacement de la carrière d’approvisionnement des matériaux (Google map,2020)	101
Figure V.3– Vue en plan et de côté et coupe transversale de la construction d’une digue par moyen terrestre (CETMEF,2009)	102

Liste des Tableaux

Tableau II.1 – Moyenne mensuelle des précipitations (en mm) (station Dar El Beida	21
Tableau II.2 – Caractéristiques générales de Oued El Harrach et Oued El Hamiz (ANRH,2014)	24
Tableau II.3 – Fréquences mensuelles de la houle du large par direction (1 mois= 100%)....	30
Tableau II.4 – Fréquences des différents états de la mer au large par période (SSMO 1963 – 1970)	31
Tableau II.5– Relation état de mer – Hauteur de l’agitation (SSMO 1963 – 1970).....	32
Tableau II.6 – fréquences des différents états de la mer au large par direction (SSMO 1963 – 1970)	32
Tableau II.7 – Hauteurs des houles extrêmes par secteur de provenance au large	33
Tableau III.1 – Périodes de retour pour la région de type 2 (TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN).....	39
Tableau III.2 – Classification de l’ouvrage selon sa période de retour (TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN)	40
Tableau III.3 – Durée de vie de l’ouvrage selon sa classe (TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN).....	40
Tableau III.4 – Hauteur significative de la houle au large par période de retour	41
Tableau III.5 – Caractéristiques de la houle au large par période de retour et par direction ..	42
Tableau III.7 – Climat de la houle près de l’embouchure pour la direction N270°	53
Tableau III.8 – Climat de la houle près de l’embouchure pour la direction N315°	53
Tableau III.9 – Climat de la houle près de l’embouchure pour la direction N345°	54
Tableau IV.1 Coefficients de stabilité de Hudson pour un dommage nul et un franchissement léger (CETMEF, 2009)	60
Tableau IV-2 Différents paramètres de calcul des couches et des carapaces (Caminade, 1995)	61
Tableau IV.3 – Paramètres de la formule de Hudson pour les trois profils de la partie courante	63
Tableau IV.4 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l’épaisseur de la carapace et du nombre de blocs	65
Tableau IV.5 – Poids des blocs de la sous couche.....	67
Tableau IV.6 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l’épaisseur de la sous couche et du nombre de blocs.....	68
Tableau IV.7 – Caractéristiques des deux épis de la variante numéro 1.....	78
Tableau IV.8 – Paramètres de la formule de Hudson pour les trois profils de la partie courante	80
Tableau IV.9 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l’épaisseur de la carapace et du nombre de blocs	82
Tableau IV.10 – Poids des blocs de la sous couche.....	83
Tableau IV.11 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l’épaisseur de la sous couche et du nombre de blocs.....	85
Tableau IV.12 – Caractéristiques des deux épis de la variante numéro 2.....	91
Tableau IV.13- Devis quantitatif et estimatif de la variante numéro 1	92

Tableau IV.14- Devis quantitatif et estimatif de la variante numéro 2.....	92
Tableau IV.15- Comparaison entre les deux variantes d'endiguement.....	94
Tableau V.1- Élaboration d'un réseau selon la méthode CPM	108
Tableau V.2- Devis quantitatif et estimatif du projet.....	110

Liste des annexes

Tableau Annexe.1- Moyenne mensuelle des températures moyennes (en °C)

Tableau Annexe.2- Moyenne mensuelle des températures minimales (en °C)

Tableau Annexe.3- Moyenne mensuelle des températures maximales (en °C)

Figure Annexe.1- Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 270° avec une période de retour de 50 ans

Figure Annexe.2- Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 315° avec une période de retour de 50 ans

Figure Annexe.3- Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 345° avec une période de retour de 50 ans

Tableau Annexe.4- Valeur du coefficient de réduction de régosité (Taw,2002)

Tableau Annexe.5- Valeurs des coefficients a et b pour des talus lisses et de pente constante (CETMEF,2009)

Tableau Annexe.6- Débits et volumes franchissants critiques (Allsop et al.,2005)

Figure Annexe.4- Tétrapodes de 10 t

Figure Annexe.5- Enrochements de catégorie (1-3t)

Figure Annexe.6- Approvisionnement des enrochements

Figure Annexe.7- Mise en place des enrochements

Liste des abréviations

AGREGAL Agrégats D'Algérie
CETMEF Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
DHI Danish Hydraulics Institute
DRE Direction des Ressources en Eau
JONSWAP Joint North Sea Wave Observation Project
LEM Laboratoire d'Études Maritimes
MEDITRAM Méditerranéenne des Travaux Maritimes
NGA Niveau Général Algérien
ONM Office National de Météorologie
PMA Plan d'Action pour la Méditerranée
PNUE Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SHOM Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SPM Shore Protection Manual
SSMO Summary of Synoptic Meteorological Observations
ST Sediment Transport
SW Short Wave
SWAN Simulating Waves Near Shore
TVC Tout Venant Carrière

Introduction générale

La zone côtière méditerranéenne est parmi les plus urbanisées au monde avec un taux de près de 66 % comme le révèle le rapport publié en 2012 dans le Programme des Nations Unies pour l'Environnement/Plan d'action pour la méditerranée (PNUE/PMA,2012).

La baie d'Alger est spécifiquement dans la région, l'une des plus peuplées. En raison des aléas naturels tels que l'érosion côtière, l'intrusion marine ou encore les inondations, combinés à d'autres facteurs d'origine anthropique comme l'étalement urbain, la pollution et la valeur économique, cette zone côtière est devenue l'une des plus vulnérables du pays.

La commune de Bordj El Bahri, qui elle, se situe à l'est de la baie d'Alger est sujette de deux phénomènes naturels. Pendant que ses plages subissent une érosion du trait de côte, l'embouchure de l'Oued El Hamiz, qui s'y trouve, est le siège d'un dépôt de sable important principalement causé par des effets hydrodynamiques, occasionnant une diminution de son passage hydraulique et un risque d'inondation.

En vue du danger que représente l'ensablement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour les habitants de la région, la Direction des Ressources en Eau (DRE) a donc décidé d'envisager un aménagement.

Afin de traiter ce sujet, une démarche a été établie. Elle consiste tout d'abord à prendre connaissance des caractéristiques géologiques, océanographiques et bathymétriques constituant la zone d'étude. Ensuite à l'exploration de la documentation concernant le génie côtier, nous citons par exemple le guide d'enrochement publié par le Centre d'Études Techniques Maritimes et fluviales (CETMEF).

L'objectif de notre étude est donc d'aménager l'embouchure de l'oued El Hamiz, et ce par un système d'endiguement, afin de protéger les citoyens et les infrastructures contre une éventuelle inondation. Pour ce faire nous allons suivre le plan suivant ; nous entamerons notre étude par un premier chapitre qui regroupera des généralités sur les ouvrages maritimes, nous poursuivrons avec une présentation de la zone d'étude, qui constituera notre deuxième chapitre. Puis un troisième qui portera sur l'étude de la réfraction de la houle, ensuite avec les variantes d'aménagement hydraulique et leur pré dimensionnement en quatrième chapitre, avant de terminer avec l'organisation de chantier et l'estimation quantitative et financière du projet.

Chapitre I

Généralités sur les ouvrages maritimes

Chapitre I Généralités sur les ouvrages maritimes

Introduction

Avant de débiter notre étude, il est nécessaire de faire une présentation du milieu marin et de donner des notions fondamentales relatives aux caractéristiques générales des aménagements côtiers, ainsi que les phénomènes naturels pouvant influencer sur une structure quelconque.

I.1 Les embouchures

I.1.1 Définition d'une embouchure

L'embouchure souvent confondue avec l'estuaire, est le lieu où un cours d'eau se jette dans un lac, un réservoir, une mer ou un océan. Elle se distingue d'une confluence qui correspond à la rencontre avec un autre cours d'eau.

I.1.2 Types d'embouchures

Il existe deux types d'embouchures selon les paramètres hydrodynamiques : Embouchure dominée par les apports fluviaux et embouchures dominées par les vagues.

a) Embouchure dominée par les apports fluviaux

Ce type d'embouchures reflète des conditions où l'énergie constructive du fleuve l'emporte sur les dynamiques marines, d'où la forme de pattes d'oiseau. Ces morphologies résultent de deux phénomènes (**Figure I.1**).

- Le dépôt de sédiments grossiers en levées subaquatiques parallèles au chenal, qui participent à l'allongement rapide du profil en long du chenal.
- La formation d'une barre d'embouchure au front de l'exutoire, qui limite l'action des houles et la remontée d'eaux de mer dans le fleuve (coin salé).

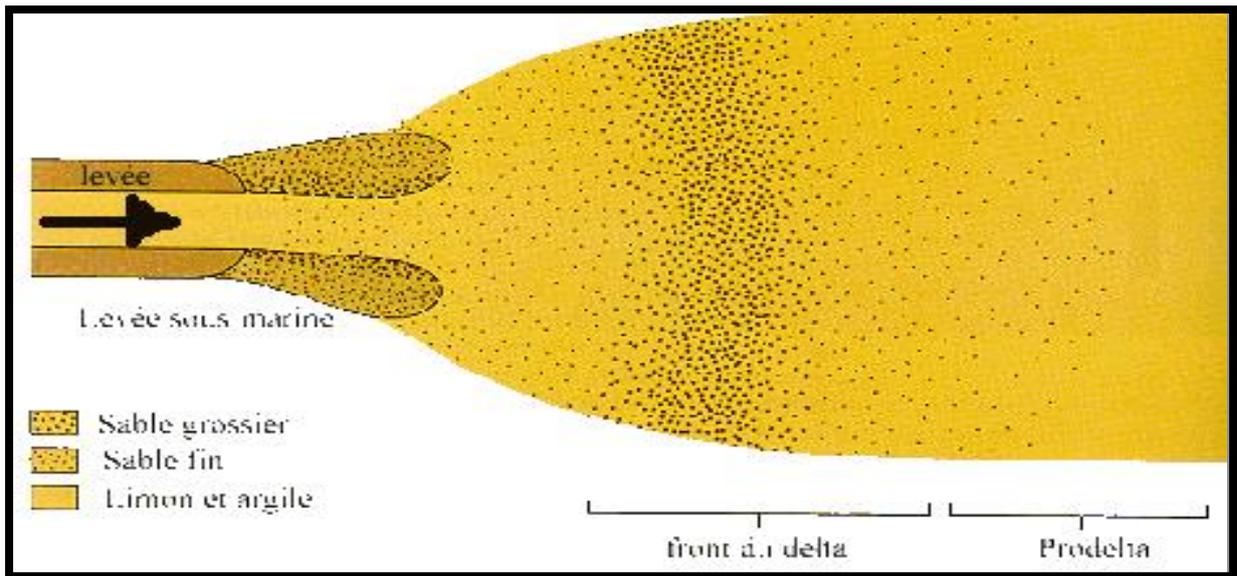


Figure I.1 Organisation de l'embouchure d'un delta dominé par le fleuve (Wright, 1977)

b) Embouchures dominées par les houles

Les vagues approchant de l'embouchure sont confrontées à l'effet du courant fluvial contraire. Elles sont alors ralenties et réfractées sur le sommet du front deltaïque (**Figure I.2**), provoquant un retroussement de la barre d'embouchure sur elle-même. Cette barre est la morphologie distinctive des embouchures dominées par les houles (Wright, 1977). Elle se présente sous la forme d'un large croissant sub-affleurant, caractérisé par un profil transverse asymétrique, avec une pente amont assez faible, mais en contre-pente par rapport au sens d'écoulement du fleuve, et une pente aval très inclinée.

Elle obstrue totalement le fleuve, qui doit creuser un chenal au travers pour arriver jusqu'à la mer. Cette réfraction a ainsi pour effet déconcentré l'énergie des houles sur le sommet de la barre d'embouchure, empêchant la sédimentation de particules fines (Mulder et Syvitski, 1995).

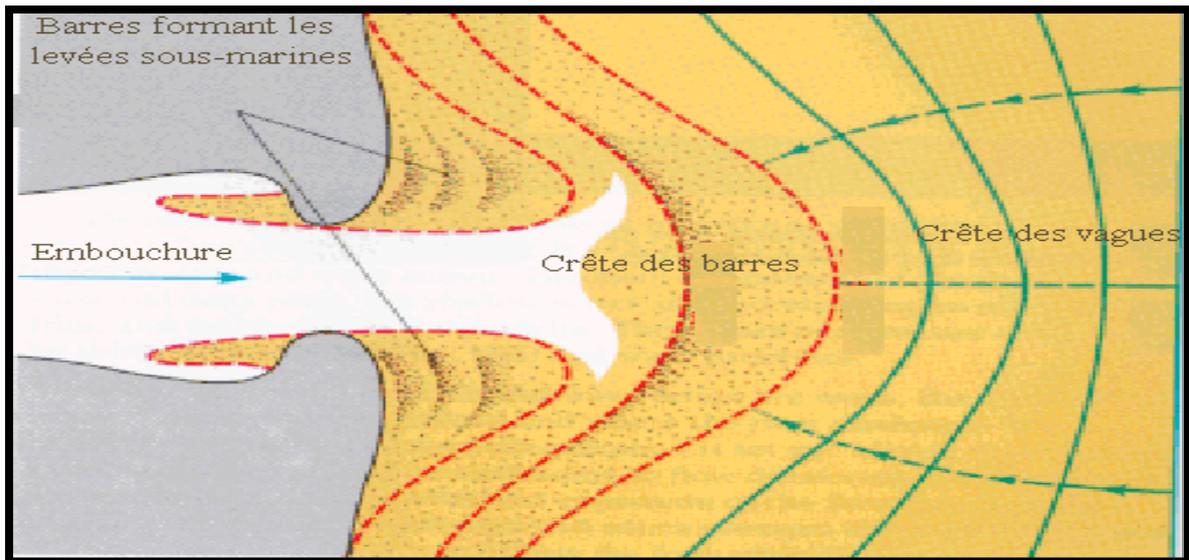


Figure I.1 – Organisation de l'embouchure d'un delta dominé par le fleuve (Wright, 1977)

I.2 Hydrodynamique côtière

La mer est un milieu liquide toujours agité dont le mouvement est la résultante d'ondulations de diverses périodes et de courants généraux plus au moins uniformes.

Un mouvement ondulatoire est tout mouvement caractérisé par une période, une amplitude, une célérité et une longueur d'onde, parmi ces mouvements on retrouve

- La houle ;
- La marée ;
- Les courants.

I.2.1 La houle

On appelle houle, l'ensemble d'une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage. La houle est donc une onde correspondant à une agitation quasi-permanente de la surface de la mer, avec des périodes comprises entre 1 et 30 secondes. Elle se produit au large des côtes et ne présente pas de déplacement mais un simple mouvement d'ondulation de la surface de l'eau. La houle pure, décrite comme un phénomène ondulatoire monochromatique n'est que très rarement observée. Généralement, la houle est polychromatique, c'est-à-dire résultant de la superposition de plusieurs ondes sinusoïdales pures de différentes longueurs d'ondes.

La dynamique de la houle est caractérisée par les paramètres suivants :

- **H** : la hauteur de houle (dénivellation maximale entre une crête et un creux successifs)
- **L** : la longueur d'onde (distance séparant deux crêtes successives)
- **T** : la période de la houle (temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe).
- **a** : l'amplitude de la houle (correspond à la distance entre la crête de la vague et le niveau moyen au repos).

- **d** : la profondeur (la profondeur au repos).

La houle est affectée, au cours de sa propagation, par des nombreux processus et phénomènes physiques, l'étude de ces processus est nécessaire et très importante pour la connaissance du comportement des vagues et leur influence sur le rivage, on cite les principaux processus :

- La réfraction** : Lorsque la houle se propage dans un milieu à profondeur variable, sa célérité n'est plus la même tout le long du front d'onde. Les crêtes se déforment en plan : la houle réfracte. L'étude de la réfraction de la houle permet de déterminer les caractéristiques de la houle (direction et hauteur) au cours de sa propagation, depuis le large jusqu'à l'approche du rivage et plus particulièrement au droit de l'aménagement projeté.
- La diffraction** : Lorsqu'une houle ne se propage plus en ligne droite ou régulière, comme c'est le cas par exemple au contact d'un ouvrage à l'approche duquel une partie du front d'onde seulement est arrêtée, des oscillations se manifestent derrière l'extrémité de cet ouvrage en le contournant : On dit que la houle diffracte.
- La réflexion** : La réflexion se produit quand la houle rencontre un obstacle vertical ou incliné. Une des conséquences importantes de la réflexion est l'apparition du « clapotis », mouvement de l'eau résultant de la rencontre de deux houles se propageant en sens inverse.

La réflexion est totale sur un parement vertical (avec un accroissement parfois important de l'amplitude de la houle résultante) et, partielle dans le cas d'une digue à talus ou protection en enrochements.

- Le déferlement** : Le déferlement se produit quand les lames d'eau atteignent une certaine cambrure limite, au-delà de laquelle le profil devient instable. Il se produit alors une brisure de la partie haute de la houle.

Différents types de déferlement sont observés. D'une part, le déferlement au large causé soit par une barre au niveau de laquelle le fond remonte brusquement, soit en hauts-fonds avec deux vagues se superposant, soit par le vent.

D'autre part, le déferlement se produit lorsque la houle arrive sur la côte. Ce dernier peut être décomposé en trois types (**Figure I.3**) :

- Le déferlement glissant ou déversant par pente faible ;
- Le déferlement plongeant par pente forte ;
- Le déferlement gonflant ou frontal par pente plus forte.

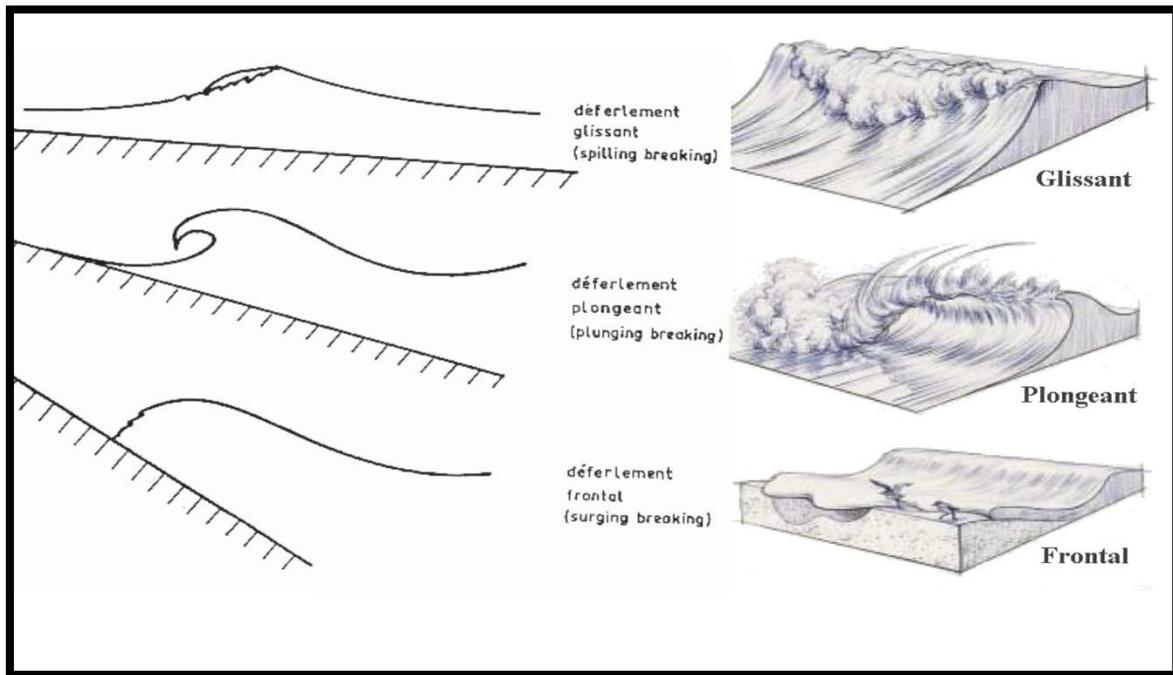


Figure I.2 – Modèle d'embouchure dominée par les houles (Wright, 1977)

I.2.2 La marée

D'après SHOM (Le service hydrographique et océanographique de la Marine) la marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil, astres dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des périodes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années. L'un des buts principaux de l'étude des marées est la recherche des relations existant entre le mouvement des astres et la réponse des océans à l'action de ces forces gravitationnelles afin d'établir des formules de prédiction. A ces mouvements d'allure régulière se superposent des variations de hauteur d'eau d'origine météorologique, appelées surcotes-décotes, dont l'étude relève essentiellement de méthodes statistiques. Les surcotes-décotes, différence entre les hauteurs d'eau observées et la marée prédite, ne font pas partie de la marée à proprement parler. Il est cependant légitime de s'y intéresser car leur étude permet d'obtenir des résultats importants dans de nombreux domaines (navigation, hydrographie, aménagements portuaires, études climatiques).

On observe à certaines périodes en comparant un calendrier des marées et un calendrier lunaire que l'intensité des marées subit de grands changements. Les marées les plus grandes correspondent aux périodes de pleine et de nouvelle lune. Les plus faibles marées correspondent aux périodes du premier et du dernier quartier.

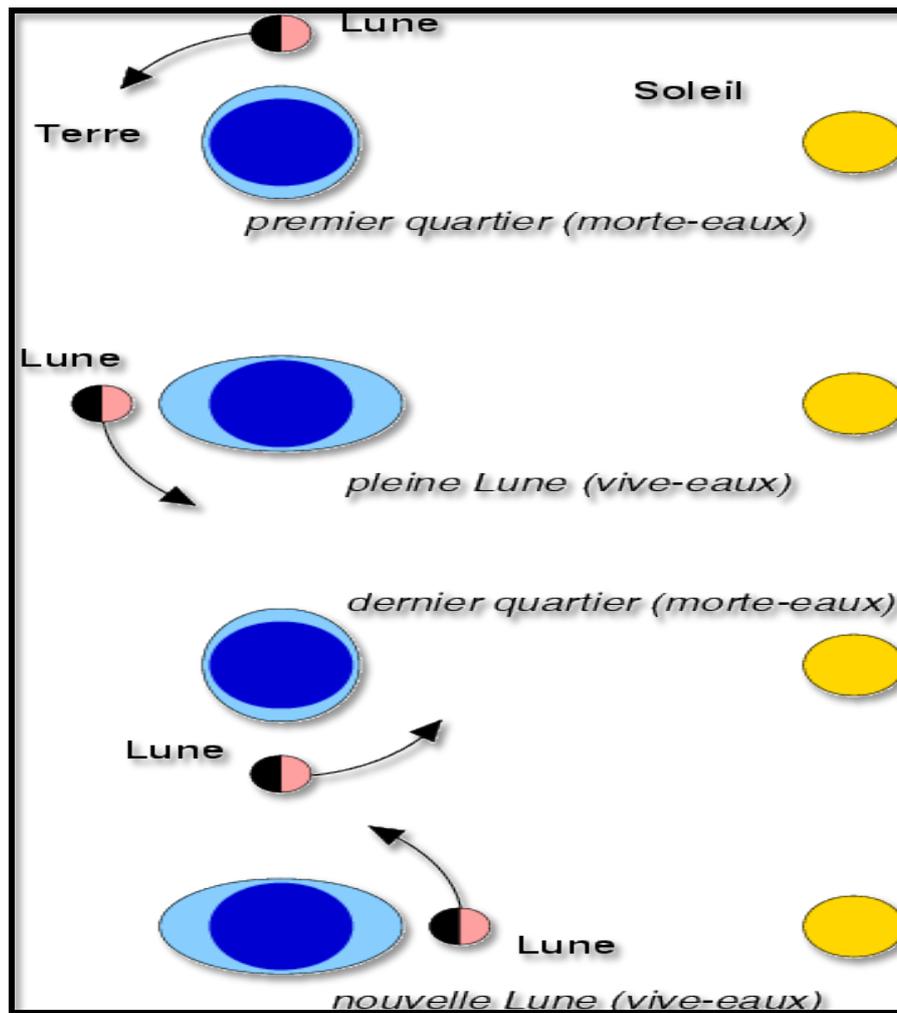


Figure I.3 – Profils des types de déferlement et leur représentation graphique (Kampion, 1991)

Il y a apparition des mortes eaux et des vives eaux.

- Vives-eaux: période pendant laquelle le marnage passe par un maximum, après une syzygie.
- Mortes-eaux: période pendant laquelle le marnage passe par un minimum, après une quadrature.
- Marnage: différence de hauteur entre une basse-mer et une pleine mer successive.
- Syzygie: position qu'occupe la lune en conjonction ou en opposition avec le Soleil (terme général pour Nouvelle Lune et Pleine Lune).
- Quadrature: position de la Lune et du Soleil quand leurs directions par rapport à la terre forment un angle droit (Premier Quartier et Dernier Quartier).

I.2.3 Le courant

Un courant marin est un déplacement de l'eau de mer caractérisé par sa direction, sa vitesse et son débit.

Parmi les types de courants, on distingue :

- Les courants généraux ou planétaires : sont très importants, car ils déplacent des millions de mètres cubes d'eau à la seconde. Véritables fleuves marins d'eau chaude ou froide, ils sillonnent les océans. Ces courants sont mis en mouvement par les vents, puis leur direction est influencée par la rotation de la Terre. Ainsi, se forme plusieurs tourbillons dans chaque océan.
- Les courants côtiers ou de débris : ils ont pour origine les vagues, les vents et les irrégularités du sol.
- Les courants de houle : sont alternatifs et très forts lors des tempêtes (plusieurs mètres par seconde). Ils affectent surtout la tranche d'eau située près de la surface (de 5 à 10 mètres d'épaisseur) ; leur importance décroît avec la profondeur.
- Les courants de marée, relativement faibles loin des côtes, peuvent atteindre des vitesses de plusieurs mètres par seconde près des côtes. Ils affectent pratiquement toute la profondeur d'eau avec la même intensité. Comme ils varient lentement dans le temps, ils peuvent être considérés comme constants à l'échelle de l'heure.

I.3 Ouvrages de protection et de défense

Les ouvrages de défense contre les aléas littoraux sont des structures côtières construites et dimensionnées dans le but de fixer le trait de côte et d'empêcher une éventuelle érosion de ce dernier, de protéger les plages, les ports de plaisance ou encore les bassins portuaires mais surtout de réduire le franchissement.

Les ouvrages de protection sont nombreux, nous citons : les digues, les murs de soutènement, les épis et les brise-lames.

I.3.1 Les murs de soutènement

Certains murs, qui ne sont pas des aménagements ou clôtures, constituent un rempart contre les submersions marines. Les ouvrages de soutènement, qui comprennent les murs (murs poids ou en béton armé) et soutènements plans (rideaux de palplanches...), servent au maintien direct du trait de côte en s'opposant à la poussée des terres ; ils permettent ainsi de lutter contre l'érosion des terres. Leurs caractéristiques principales sont une orientation longitudinale, sur le trait de côte ou en arrière-côte, et une pente verticale à légèrement inclinée. Ces ouvrages sont particulièrement sensibles aux problèmes d'affouillement à leur pied dus à leur forte réflectivité, provoquant des désordres sur l'ouvrage. Ils sont ainsi souvent accompagnés d'une protection de pied et parfois d'un couronnement de manière à éviter la projection de paquets de mer en arrière de l'ouvrage. Ils sont aussi sensibles aux infiltrations d'eau côté terre et à leur mise en charge, c'est pourquoi ils sont souvent traversés par des barbacanes.

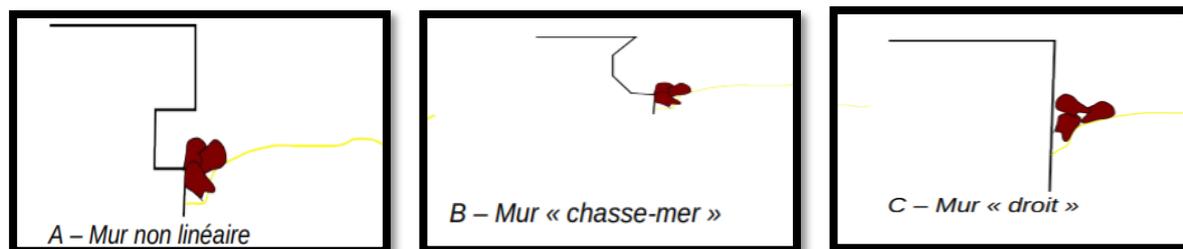


Figure I.4 – Exemple de différentes géométries de murs de soutènement (CETMEF, 2009)

I.3.2 Les épis

Les épis sont des dispositifs placés sur l'estran, de manière transversale par rapport au trait de côte. Ils jouent le rôle de barrière plus ou moins perméable, capable de piéger une partie des sédiments en transit. Ces sédiments forment alors généralement une accumulation en amont de l'ouvrage (dans le sens du transit sédimentaire) et une érosion en aval. L'accumulation peut permettre de lutter contre l'abaissement topographique de la plage ou d'augmenter l'espace récréatif. Les épis peuvent être soit isolés ou soit implantés « en batterie ». Il existe une grande diversité de géométries (droite, courbe, en "L", "T", "Y"...) (Figure I.6) et de matériaux (enrochements, maçonnerie, bois, matériaux géosynthétiques, etc.).

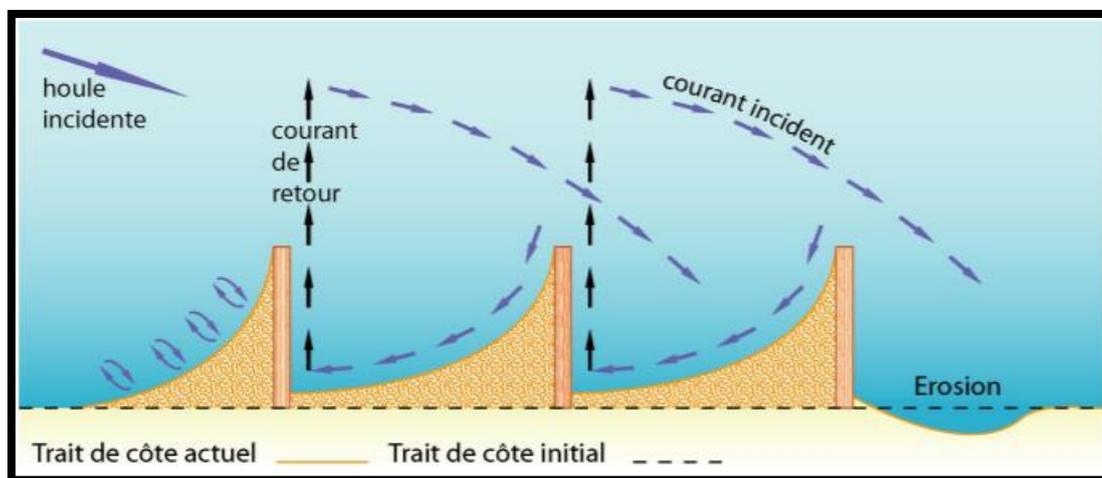


Figure I.5 – Principe de fonctionnement d'une batterie d'épis (viguier, 2001)

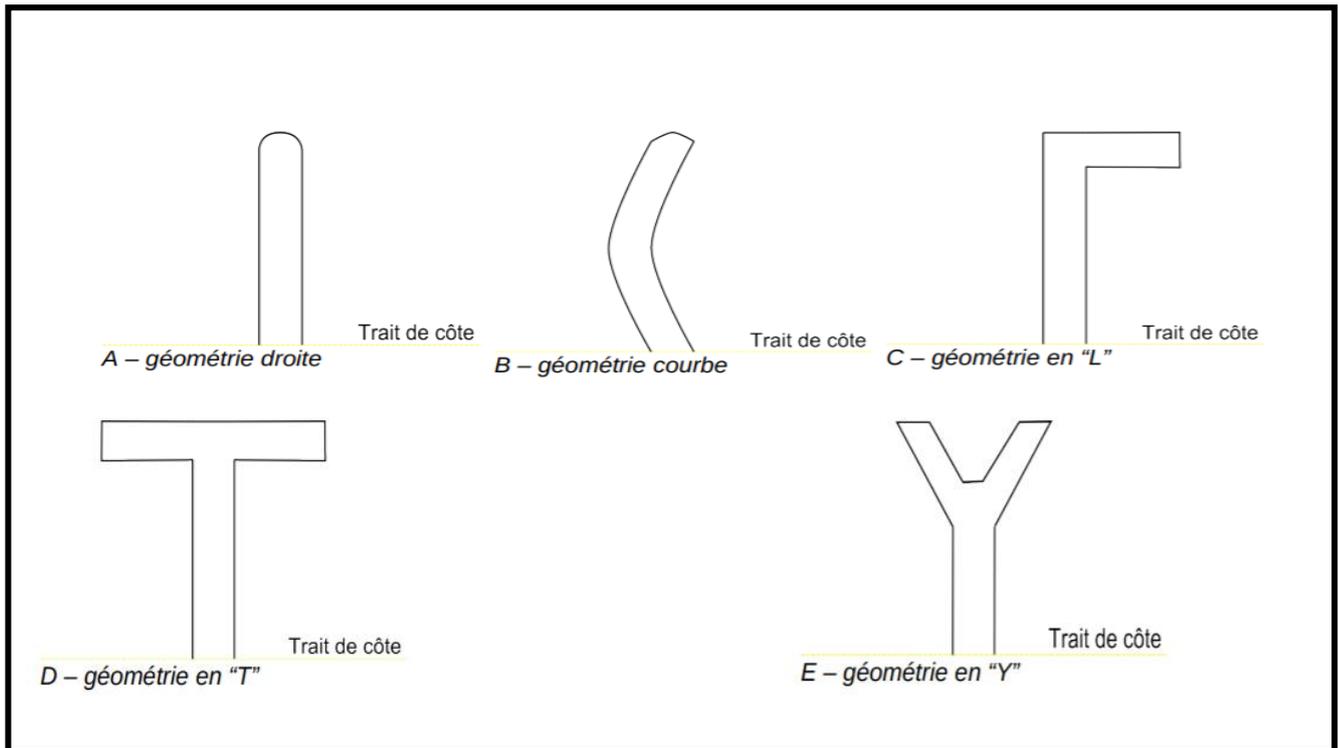


Figure I.6 – Différentes géométries en plan des épis (CETMEF, 2009)

I.3.3 Brise-lame

Les brise-lames sont des dispositifs orientés parallèlement au trait de côte (ouvrages longitudinaux), mais non rattachés à celui-ci, conçus pour diminuer l'énergie de la houle incidente en créant un déferlement en amont du trait de côte (**Figure I.7**). Cette perte d'énergie en arrière de l'ouvrage permet aux sédiments en transit de s'accumuler, créant parfois un tombolo artificiel. Le tombolo permet d'accroître l'espace récréatif d'une plage et de protéger le trait de côte, cependant un brise-lames peut aussi servir uniquement de stabilisation du trait de côte sans engraissement, selon les règles de dimensionnement choisies. Les matériaux de construction sont variables, allant d'une structure « à talus » (présence d'un cœur d'ouvrage) avec carapace en enrochements jusqu'aux caissons bétonnés posés directement sur le fond. On retrouve majoritairement les brise-lames dans les mers à faible marnage, bien que des essais soient réalisés concernant le dimensionnement de ces ouvrages dans les zones à fort marnage. Il existe également des brise-lames immergés, permettant de faire déferler la houle de manière à diminuer son énergie et donc de limiter l'érosion sur le trait de côte. Un récif artificiel sera considéré comme un brise-lames à partir du moment où son action hydraulique sera perceptible sur la côte.



Figure I.7 – Exemple d'un brise-lame en enrochement (Valras plage, Occitanie, France)

I.3.4 Les digues

Une digue est un remblai longitudinal, naturel ou artificiel, sa fonction est d'empêcher la submersion des basses-terres se trouvant le long de la digue par des eaux de la mer, lac, ou fleuve. On distingue plusieurs digues :

- Les digues verticales.
 - Les digues à talus.
 - Les digues mixtes.
 - Les digues de types spéciaux.
- Les digues à talus : Une digue à talus est une digue de forme trapézoïdale constituée d'un noyau en tout venant, et de sous couches d'enrochements puis d'une carapace et d'un couronnement en béton armé. (Figure I.9)

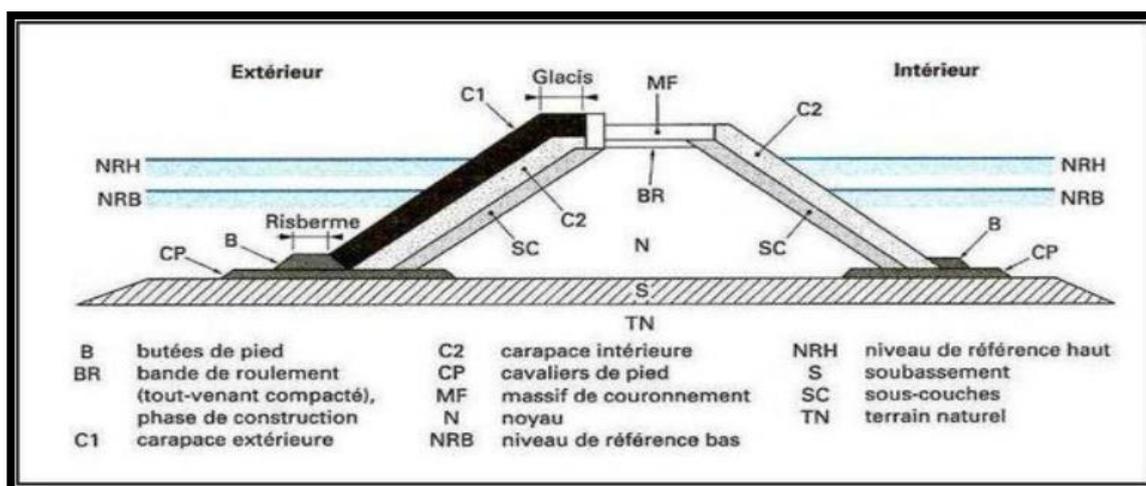


Figure I.8 – Schéma représentatif d'une digue à talus (Bonnifille,2010)

- Les digues verticales : Une digue verticale est constituée d'un mur monolithique ou d'un ensemble d'éléments assemblés entre eux pour renvoyer l'énergie de la houle.
- Les digues mixtes : Une digue mixte, comme son nom l'indique reprenne certains principes des digues à talus et des digues verticales. Elle comporte une muraille reposant sur un massif de fondation en enrochement ou sur un fond dur.
- Les digues de types spéciaux : Ces ouvrages sont employés dans des conditions spécifiques, parmi eux, on peut citer :
 - Le mur d'eau fixe.
 - Le mur d'eau oscillant.
 - Les ouvrages de pré-déferlement.
 - Les tapis d'algues synthétiques.
 - Les rideaux de bulles d'air.

Conclusion

Ce présent chapitre a permis, d'une part, de donner une perception générale de l'hydrodynamique côtière et des ouvrages de protection marins et sert d'une autre part de base de données quant à la conception de notre projet.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

Chapitre II Présentation de la zone d'étude

Introduction

Avant d'entamer l'étude de dimensionnement de notre aménagement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz, il est primordial de prendre connaissance de la situation géographique de notre projet ainsi que de ses caractéristiques générales (caractéristiques géologiques, hydrologiques, climatologiques, océanographiques...) qui nous seront nécessaires dans les prochains chapitres.

II.1 Situation géographique du site d'étude

Notre étude concerne l'embouchure de l'oued el hamiz, celle-ci se situe sur la partie orientale de la baie d'Alger (rive est), dans la commune de Bordj El Bahri qui est entourée à l'ouest par la méditerranée, à l'est par Ain Taya, au nord par El Marsa et au sud par Bordj El Kiffan (Figure II.1).



Figure II.1 – Situation géographique de la zone d'étude (Google Earth, 2020)

II.2 Présentation de l'Oued El Hamiz

Oued El Hamiz est l'un des deux cours d'eau qui alimentent la baie d'Alger, il prend source dans l'Atlas Blidéen drainant la plaine de Mitidja. Mesurant 60km de long et traversant plusieurs villes algéroises telle que Dar El Baida, Bordj El Bahri et Bab El Zouar, Cet oued est régularisé par le barrage d'El Hamiz qui a une capacité d'environ 15,53 millions de m³.

Tout au long de son parcours, oued El Hamiz reçoit plusieurs affluents, parmi eux on cite l'oued Seguia, L'oued Barek et oued l'Arbatach.

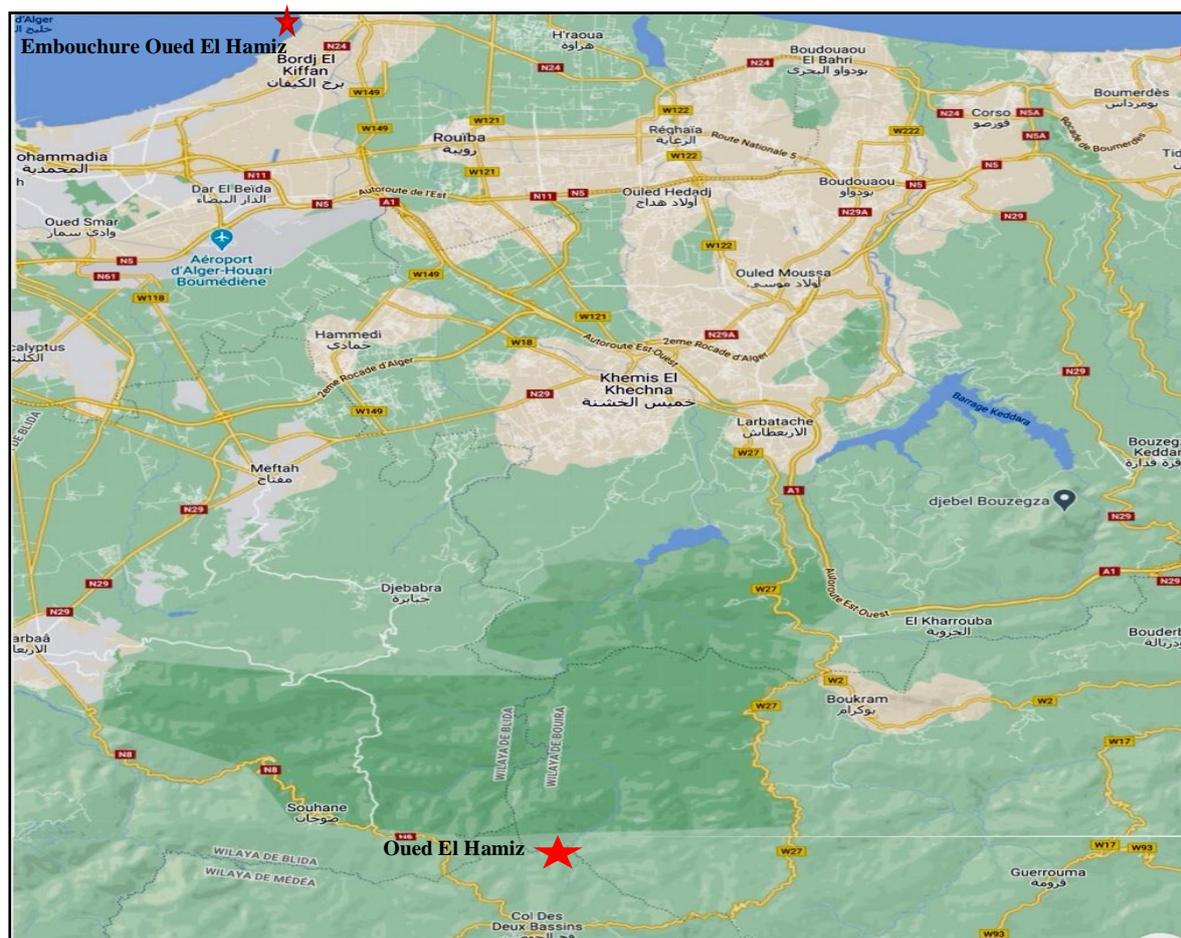


Figure II.2 – Situation géographique de Oued El Hamiz

II.3 État actuel du site d'étude

Une visite du site d'étude a été effectuée en Juillet 2020, cette dernière a été sanctionnée par une série de photos montrant l'état du site.

Sur les photos prises (**Figure II.3, II.4**) du site présumé (embouchure de l'Oued El Hamiz), on peut clairement remarquer que l'eau est stagnante et très polluée ainsi que la présence d'une barre sableuse bien apparente.

Sur les deux rives de l'Oued on note la présence de constructions illicites ainsi que l'accumulation de divers déchets.



Figure II.3 – Photo montrant la sortie de l'oued vers la mer (Juillet 2020)



Figure II.4 – Photo montrant les habitations à proximité et les déchets (Juillet 2020)

II.4 Aspect géologique de la région

Du point de vue géologique, l'embouchure de l'Oud el Hamiz se situe sur l'extrémité occidentale de la plaine de la Mitidja qui est une zone de subsidence continue (**Figure II.5**). Cette dernière a donné naissance à une sédimentation active dont les éléments proviennent du relief de l'Atlas Blidéen.

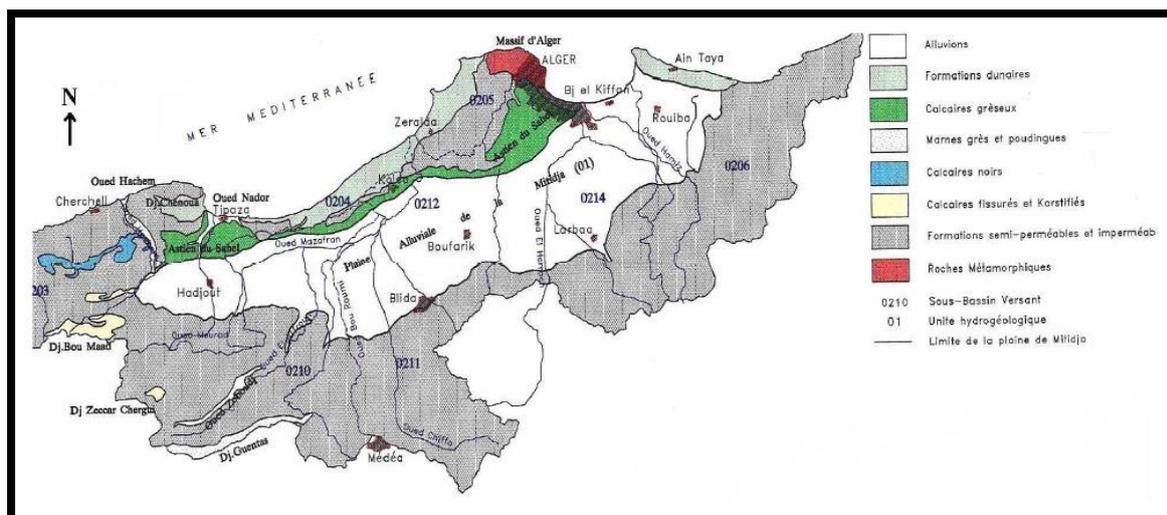


Figure II.5 – Carte géologique de la Mitidja (Bennie et Partners, 1983)

A la fin du pliocène et au quaternaire, deux réservoirs aquifères se sont individualisés. Il s'agit de l'Astien formé par des calcaires et des grès d'origine continentale. Le quaternaire alluvial constitué essentiellement de galets et de graviers.

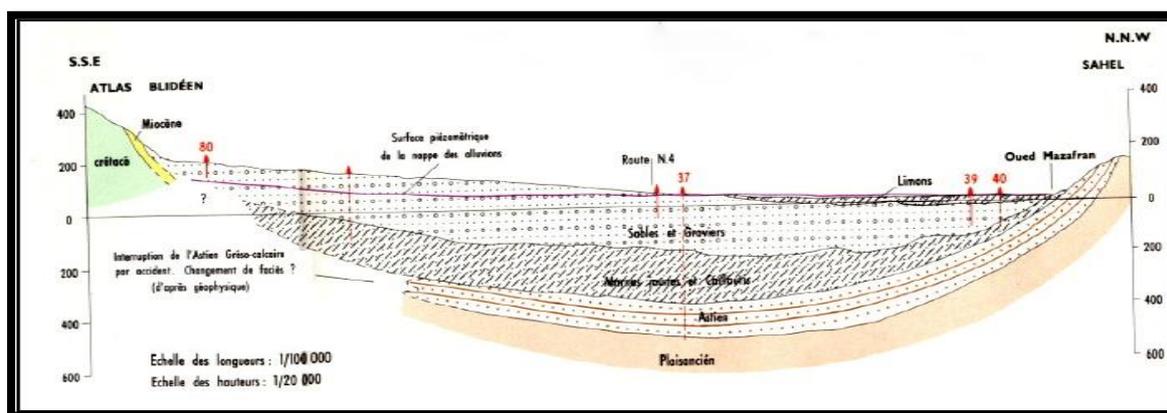


Figure II.6 – Coupe interprétative de la Mitidja dans le bassin du Mazafran (archie 1970)

Ces deux réservoirs sont séparés dans toute la plaine par des marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach (Villafranchien) sauf au niveau de la poche de Rouiba où les deux aquifères sont en contact (**Figure II.6**). Ces deux aquifères reposent sur un substratum imperméable, généralement constitué par les marnes grises et bleues du Plaisancien.

II.5 Aspect sédimentologique de la zone d'étude

Afin de connaître la répartition des sédiments en mer et leur modalité de mise en place, il est nécessaire d'effectuer une étude sédimentologique du site.

Pour ce faire le laboratoire d'études maritimes (LEM) a prélevé 44 échantillons de sédiments superficiels au niveau de la zone d'étude à l'aide d'une benne preneuse (**figure II.7**), 05 au niveau de l'embouchure de l'oued et 39 répartis depuis le trait de côte jusqu'à la profondeur de 8 m selon des radiales espacées de 50 m. Ces échantillons ont été par la suite analysés au laboratoire.

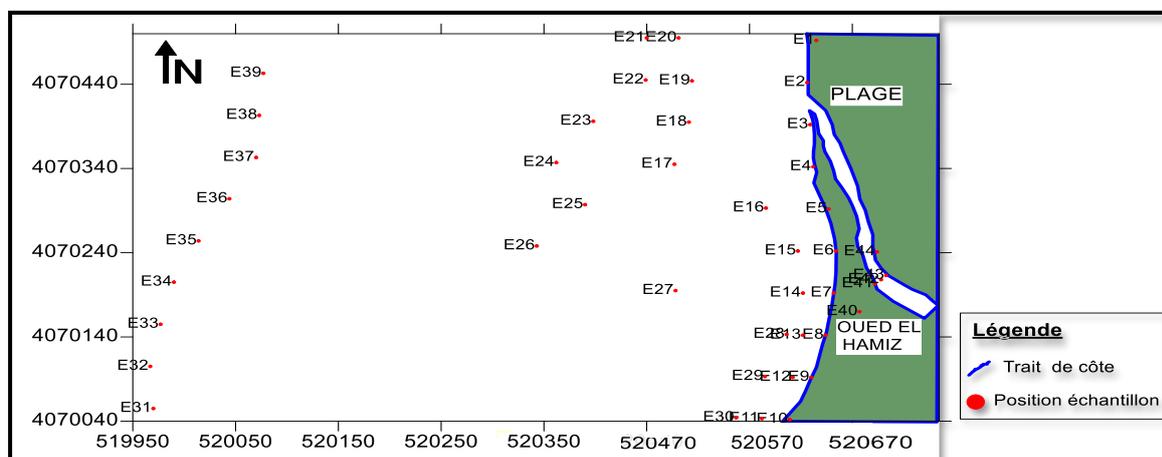


Figure II.7 – Carte de positionnement des points de prélèvements de sédiments (LEM, 2014)

Les résultats des points de sondage effectués dans le prolongement des deux rives de l'oued révèlent que l'Oued El Hamiz se prolonge en mer sur un plateau rocheux à partir de la profondeur de 2 m environ. Par ailleurs, parmi les 44 échantillons prélevés, 12 sont de nature rocheuse, deux sont représentés par de gros galets et 30 sont de nature sableuse. Ainsi l'étude granulométrique a porté sur la fraction sableuse et aux résultats suivants :

- La couverture sédimentaire du site est composée de sables allant des sables grossiers aux sables fins avec présence de très faibles teneurs en fraction fine (fraction dont le diamètre du grain est inférieur à 50 μm).
- La répartition spatiale des sables traduit un grano-classement décroissant du diamètre du grain médian (D_{50}) de la côte vers le large.
- Le transport de ce matériau sédimentaire, se fait par saltation et roulement dans des zones agitées avec évacuation des particules fines vers le large.
- L'origine des sédiments dans le secteur serait liée aux houles qui exercent une action érosive sur les affleurements rocheux du site et de ses alentours ainsi que les apports de l'Oued el Hamiz.

II.6 Bathymétrie du site d'étude

Afin de connaître la morphologie des fonds marins, un levé bathymétrique couvrant la zone d'étude a été établi par le laboratoire d'études maritimes jusqu'à des profondeurs de 7 m environ. Ce dernier a été complété par la digitalisation de la carte SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine) (n°5638).

Les résultats de ces sondages bathymétriques ont permis de représenter en premier lieu une esquisse bathymétrique mais aussi des profils bathymétriques qui reflètent la topographie sous-marine.

L'analyse de la carte bathymétrique (**Figure II.8**) révèle une morphologie sous-marine à peu près régulière de la côte jusqu'à environ 6m de profondeur. Deux parties sont alors distinguées dans cette zone, dans la première les isobathes sont assez serrées signifiant que la pente est raide, quant à la deuxième nous remarquons clairement qu'un large espacement sépare les isobathes ce qui traduit pente faible. Au-delà de cette profondeur, les isobathes sont régulières et parallèles à la pente.

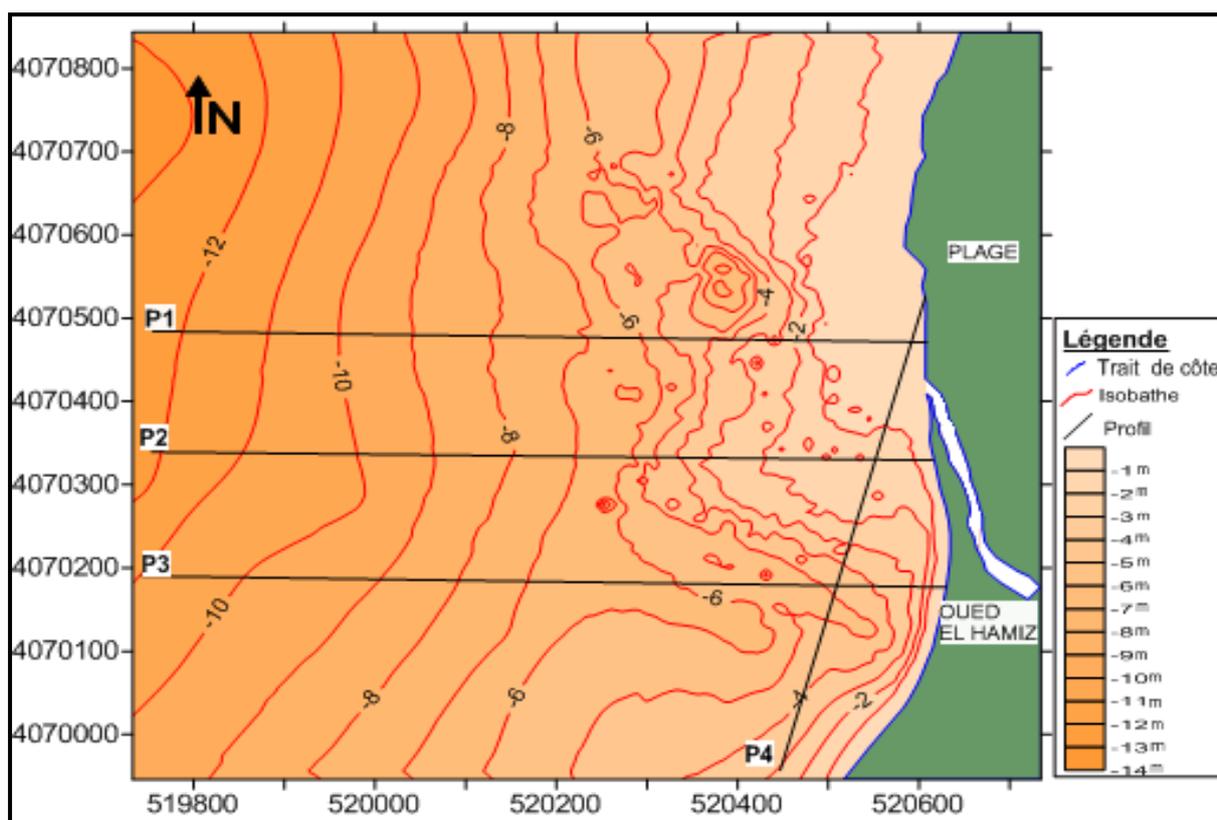


Figure II.8 – Carte bathymétrique de la zone d'étude (LEM, 2014)

À partir de l'esquisse bathymétrique (**Figure II.8**) quatre profils qui reflètent la morphologie du fond marin ont été élaborés, trois d'entre eux sont effectués perpendiculairement au trait de côte et le dernier parallèlement. Ils traduisent ce qui suit :

◆ Profil 01 : Sur une distance de 120 m, entre 0 et 1m de profondeur le fond marin est marqué par une pente très douce estimée à 0.8%. Entre cette profondeur et jusqu'à environ 6m la pente est estimée cette fois-ci à 2%, puis elle s'adoucit à nouveau pour atteindre 1% au large (**Figure II.9**).

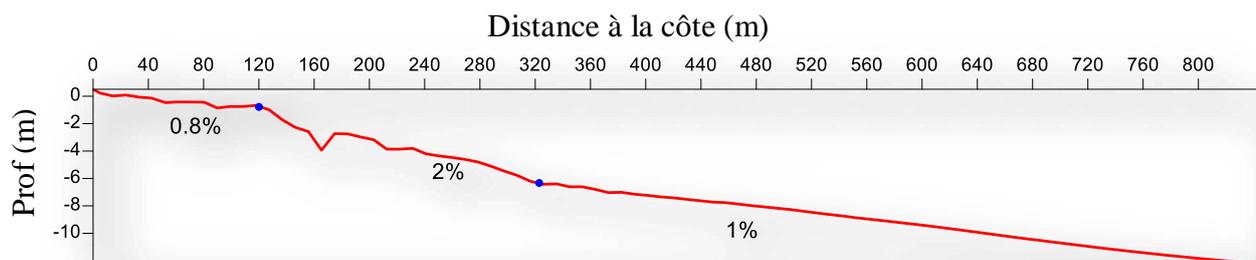


Figure II.9 – Premier profil bathymétrique

◆ Profil 02 : On remarque une descente du fond marin au large avec une pente assez douce, néanmoins un replat est observé à la profondeur de 2m sur une distance de 200m (Figure II.10).

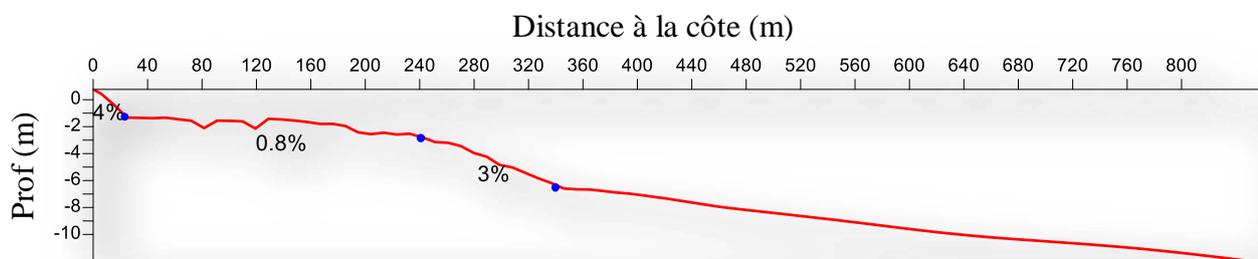


Figure II.10 – Deuxième profil bathymétrique

◆ Profil 03 : Le fond marin se caractérise avec une pente abrupte à 3.75m environ. Au-delà celui-ci poursuit sa descente avec une pente douce estimée à 1% (Figure II.11).

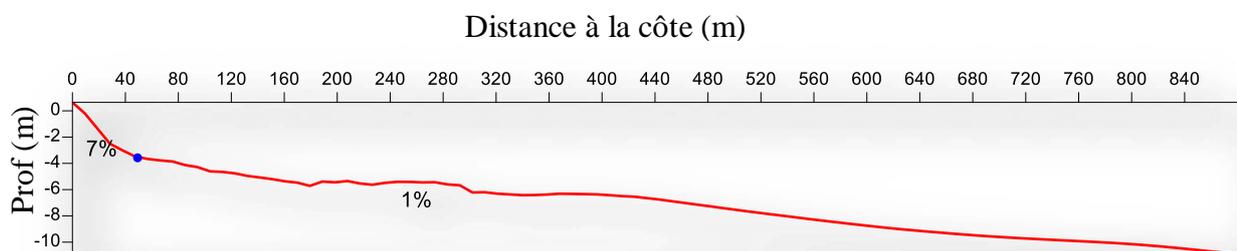


Figure II.11 – Troisième profil bathymétrique

◆ Profil 04 : Ce profil effectué parallèlement à la côte ne se situe pas loin de l'embouchure de l'Oued El Hamiz. Le fond marin s'y distingue par la présence d'un sillon qui descend jusqu'à une profondeur de 6m (**Figure II.12**).

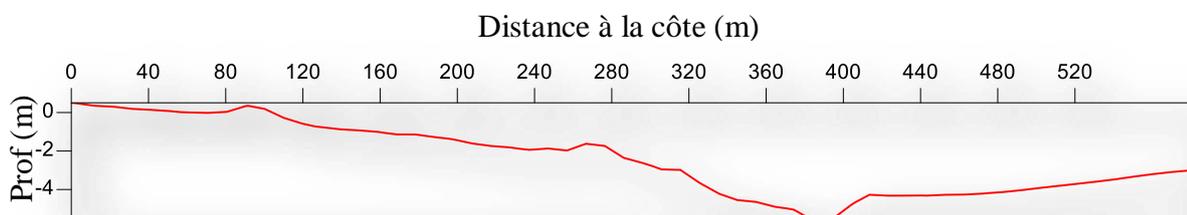


Figure II.12 – Quatrième profil bathymétrique

II.7 Sismicité de la zone d'étude

Alger est caractérisé par une activité sismique moyenne qui est liée à un contexte dynamique créée par la remontée de la plaque africaine contre la plaque eurasiatique en direction du nord-nord-ouest à une vitesse d'environ 6 mm par an. La zone d'étude est classée zone II, elle est le siège de fréquentes secousses sismiques. Le dernier séisme qu'a frappé notre zone est celui du 21/05/2003 et il a engendré de nombreux glissements localisés au niveau de plusieurs habitations.

La faille qui est à l'origine de ce séisme était jusqu'à présent inconnue puisque se situant le long de la marge algérienne. De direction nord-est-sud-ouest ($N60^\circ$), celle-ci s'étend entre Dellys et Ain Taya sur une longueur de près de 50 Km. Cette nouvelle structure active révélée par la campagne marine Maradja, par la distribution spatiale des répliques enregistrées, par les mesures de déformation, présente un mécanisme au foyer de type inverse sans composante de décrochement (**Figure II.13**).

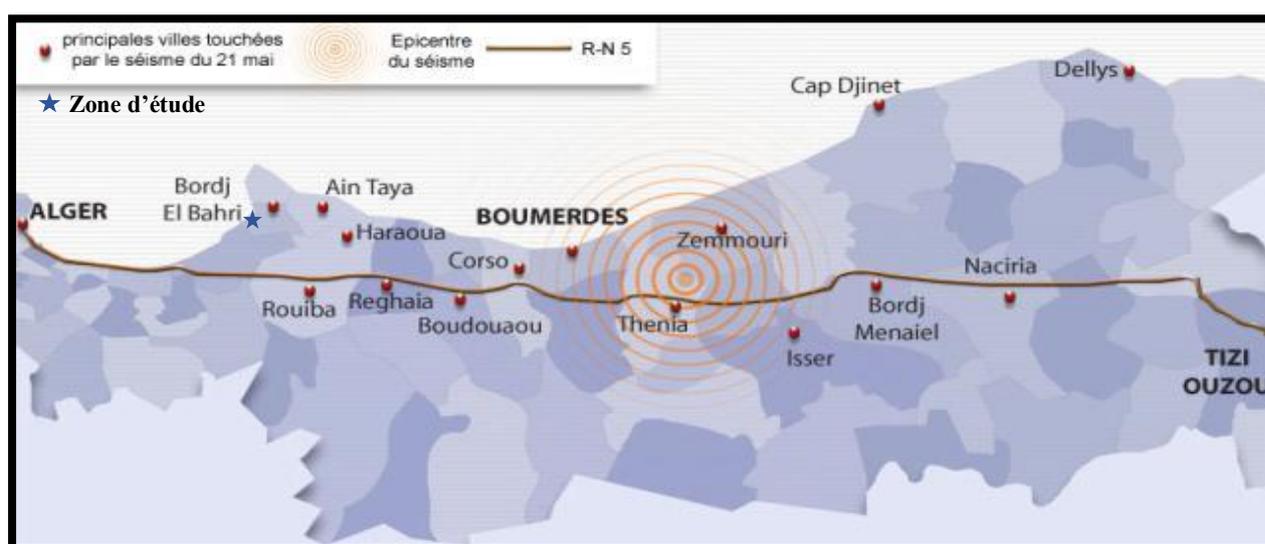


Figure II.13 – Localisation du séisme de Boumerdes et ses alentours (Mai 2003)

II.8 Données climatologiques

L'irrégularité du régime et l'alternance de deux saisons nettement contrastées constituent les éléments fondamentaux du climat des pays du Sahel.

La proximité de la mer confère à ces régions un climat remarquablement tempéré, dû à l'effet modérateur de la mer. Les données climatiques (précipitations et températures) restent à peu près voisines et uniformes sur le Sahel et dans la plaine de la Mitidja (légères variations dues à la disposition géographique de chaque ensemble).

La région d'Alger appartient au domaine méditerranéen subhumide. Le climat est de type méditerranéen, caractérisé par un été sec et chaud et un hiver doux et humide.

II.8.1 Les températures

Les mesures de température faites par la station météorologique de Dar El Beida à partir de 1996 jusqu'à 2008, ont révélé que pendant la période allant de Novembre à Mai les températures diminuent et varient entre 11 à 15°C, tandis qu'elles augmentent le restant de l'année (les mois allant de Mai à Septembre) avec des températures moyennes variant de 18 à 27°C.

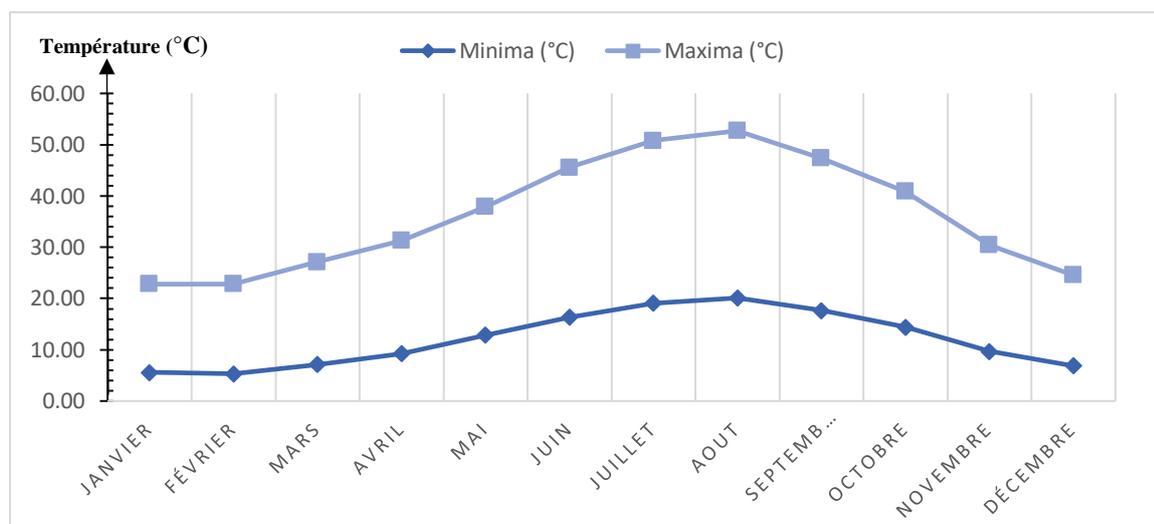


Figure II.14 – Graphe représentatif des températures maximales et minimales (station de Dar El Beida (1996-2008))

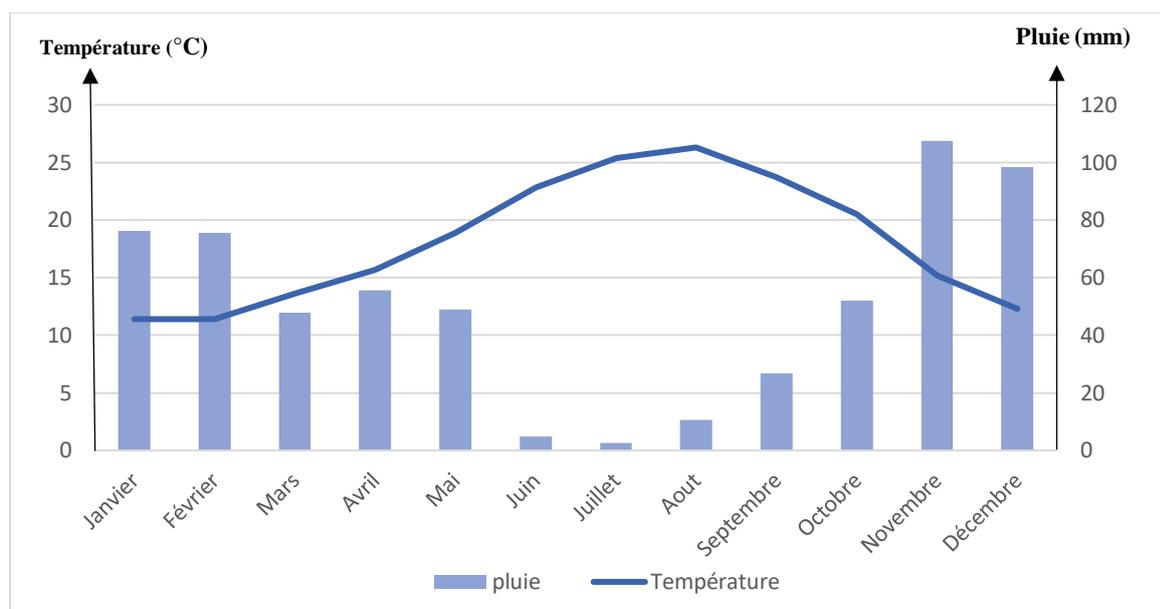


Figure II.15 – Diagramme ombrothermique de la région d'étude (station de Dar el Beida) (1996-2008)

II.8.2 Les précipitations

La pluviométrie est irrégulière et varie entre 280 mm et 800 mm/an. La moyenne annuelle donnée par la station de Dar El Beida couvrant la période qui s'étale de 1996 à 2008 est de l'ordre de 607 mm.

Les précipitations se concentrent de Septembre à Mai, avec un maximum hivernal de 107.4 mm en Novembre ; celles-ci diminuent progressivement dès le mois de Mai pour devenir faibles de juin à août avec un minimum de 2.6 mm en juillet (**Tableau II.1**).

Tableau II.1 – Moyenne mensuelle des précipitations (en mm) (station Dar El Beida)

Mois (1996-2008)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Ju	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Moyenne Mensuelle des précipitations (en mm)	76.2	75.6	47.8	55.5	48.9	4.9	2.6	10.7	26.8	52.1	107.4	98.5

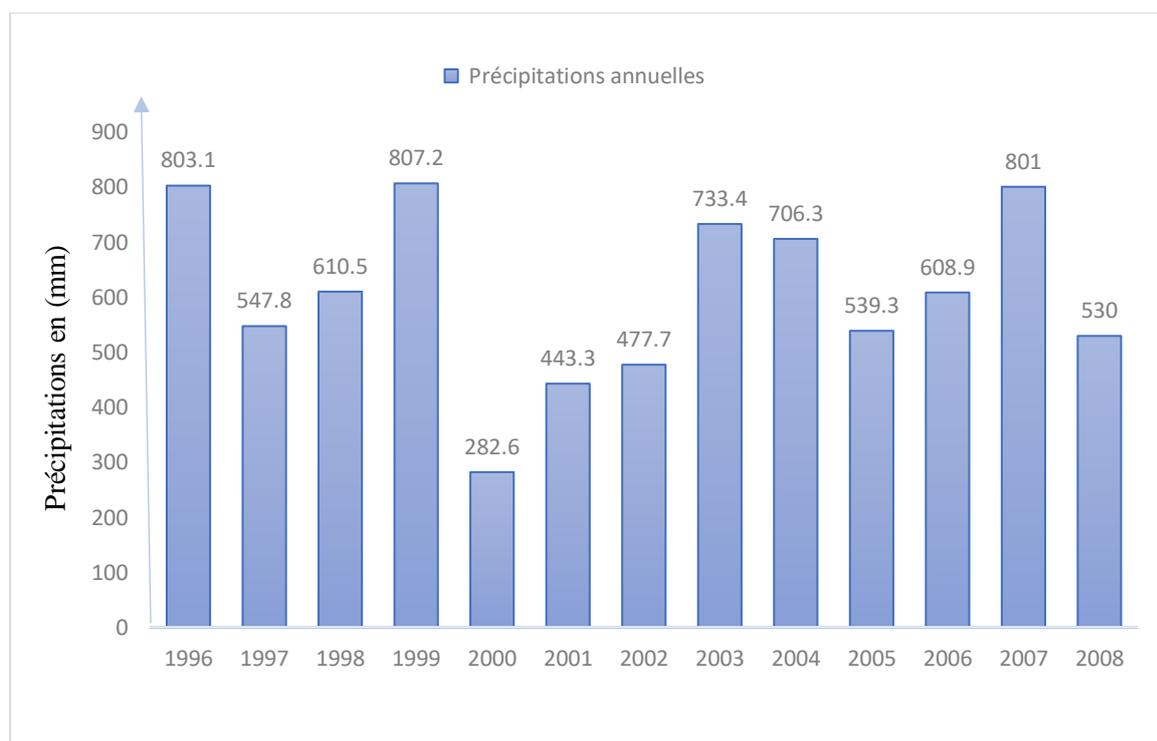


Figure II.16 – Graphe des précipitations annuelles de la zone (Station de Dar El Beida (1996-2008))

II.8.3 Les vents

Les vents sont générateurs de vagues et de courants superficiels et leur impact croît avec leur vitesse. Lorsque l'action du vent est continue, elle génère la houle.

L'analyse du régime des vents est effectuée à partir de 3 sources de données météorologiques :

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

Les résultats des observations du vent effectuées au large des côtes algériennes, sont rapportés sous forme de roses de vents pour chaque trimestre et pour toute l'année (**Figure II.17**).

Ces roses montrent, que pendant l'hiver (Octobre à Mars), les vents des secteurs Ouest et Sud-Ouest sont dominants et qu'une grande partie de ces vents présente une vitesse supérieure à 16 nœuds.

Les vents d'Est et Nord-Est dominent au cours de l'été et la majorité de ceux-ci à des vitesses inférieures à 16 nœuds.

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

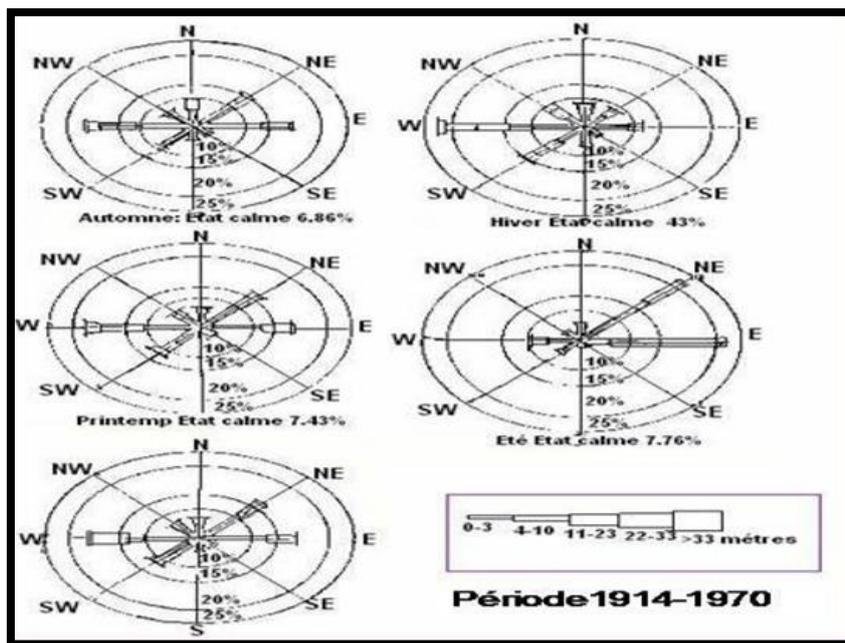


Figure II.17 – Rose trimestrielle et annuelle des vents (S.S.M.O (1914-1970))

- **Données de la station de Dar El Beida (1975-1984)**

Les enregistrements montrent que :

- Les vents de direction N 360° (fréquence 12%) présentent une répartition constante durant toute l'année.
- Les vents de direction N 45° (fréquence 10%) sont dominants en période estivale s'étalant de Mai à Septembre.
- Les vents de direction N 225° (fréquence 14.5%) et N 270° (fréquence 11.5%) sont dominants en période hivernale qui s'étale d'Octobre à Avril.

II.9 Données hydrologiques

Le réseau hydrographique dans la baie d'Alger se caractérise par la présence d'Oueds à régime temporaire et irrégulier tels Oued El Harrach, et Oued Hamiz.

En été, les lits des Oueds sont quasiment à sec ou se réduisent à de simples filets d'eau, par contre ils connaissent des crues très violentes pendant la saison hivernale.

La baie d'Alger est donc alimentée par Oued El Harrach et Oued El Hamiz, cours d'eau qui prennent leur source dans l'Atlas Blidéen drainant la plaine de la Mitidja.

Le bassin versant de l'Oued El Harrach couvre une superficie de 1.270 km² et s'étale du nord au sud sur 51 km et de l'Est en Ouest sur 31 km. Il englobe trois grands domaines physiques différents : l'Atlas Blidéen, la plaine de la Mitidja et le Sahel.

Le régime hydrographique de Oued El Harrach se caractérise par une un long étiage de 6 mois et des crues d'hiver et de printemps soudaines et rapides.

L'Oued El Harrach est formé par la confluence de deux Oueds principaux, l'Oued Akka et l'Oued Mekka sur une longueur de 67Km, il est alimenté également par six affluents (Oued Djemaâ, Oued Baba Ali, Oued Terrou, Oued Kerma, Oued Smar et Oued Ouchaïh).

Le bassin versant d'oued el hamiz a une superficie de l'ordre de 160 Km². Il est plus réduit que celui de Oued El Harrach. La présence du barrage El Hamiz en amont réduit considérablement les apports solides vers la mer. Le débit de crue (Crue centennale) de l'oued est estimé à 1000 m³/s.

Tableau II.2 – Caractéristiques générales de Oued El Harrach et Oued El Hamiz (ANRH,2014)

Oueds	El Harrach	El Hamiz
Communes traversées	Mohamadia-Mouradia-HusseinDey-El Harrach-Sidi Moussa-Birtouta-Saoula- Ouled Chbel-Ouled Fayet- Bir Mourad Rais-Guide Constantine- Echefa-Blida...	Rouiba-Dar El Beida- Oued Essamar-Bordj El Bahri- El Hamiz-Eucalyptus-Bab Ezzouar- Bordj El Kiffan-Ain Taya...
Orientations	Nord-Est	Nord-Ouest
Superficie (Km²)	378	86
Apports liquids Al (Hm³)	53	11
Apports Solides As (m³/an)	107114	100226

II.10 Données océanographiques

II.10.1 La marée et les variations du niveau marin

Les variations du niveau de la mer résultent de la combinaison de l'effet de plusieurs phénomènes :

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

Chapitre II Présentation de la zone d'étude

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

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

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

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

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

Le nivellement Général Algérien (niveau NGA) se trouve à +0,34 m par rapport au Zéro Hydrographique (Zéro Carte Marine), comme présenté sur la figure ci-après.

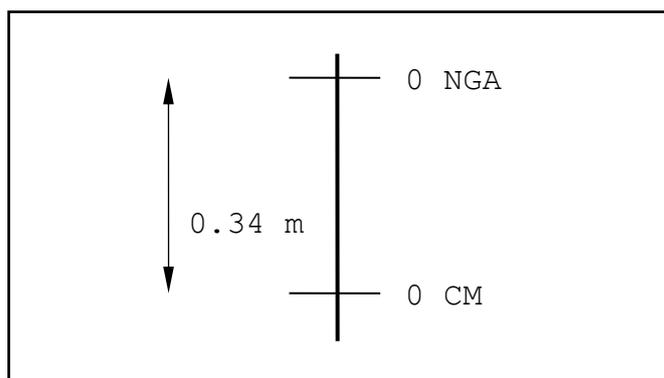


Figure II.18 – Correspondance entre les systèmes altimétriques à Alger.

Les données altimétriques ont été homogénéisées dans un système unique prenant comme référence le Zéro NGA.

II.10.2 Les courants

II.10.2.1 Le courant général :

La mer méditerranéenne est connue par son excès d'évaporation par rapport aux apports fluviaux et aux précipitations, ceci est responsable d'une baisse de niveau de la mer estimée à 1m/an, ce déficit est compensé par un flux entrant (de 31 600 Km³/an) d'eau atlantique, par le détroit de Gibraltar.

Le courant Atlantique (pénétration des eaux par le détroit de Gibraltar) longe, d'Ouest en Est, les côtes d'Afrique du nord ; sa vitesse est de l'ordre de 1,5 à 2 nœuds. Ce courant s'étale sur plusieurs milles nautiques et son action se fait sentir jusqu'à une profondeur de 200 m. Encore très sensible au large de l'Algérois (vitesse = 0,7 nœud), son action va en diminuant vers l'Est du bassin occidental de la Méditerranée.

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

II.10.2.2 Les courants côtiers :

a) Les courants de dérive littorale :

Lorsque la houle arrive à la côte avec une incidence oblique celle-ci donne naissance à un courant de dérive littorale. La vitesse de ce courant est maximale pour un angle d'incidence de 45% à 50%. La dérive littorale prend naissance au niveau de la zone de déferlement où l'énergie est maximale (Millot, 1987). Cette énergie permet la remise en suspension et le transit des particules sédimentaires le long de la côte.

b) Le courant de retour ou rip-current :

Le courant de ce type aborde la côte avec une incidence frontale. Ces courants possèdent une vitesse qui dépend de l'énergie de la houle et de la pente de la plage. Ces courants sont responsables de la dispersion d'une partie des sédiments côtiers vers le large.

Au niveau de la baie d'Alger la répartition des sédiments est conditionnée par la combinaison de l'action des houles des secteurs Ouest et Est avec celles du secteur Nord. (**Figure II.19**)

Les houles de l'Ouest présentent les amplitudes les plus importantes et dominantes en période hivernale, abordent la côte avec une incidence oblique créant ainsi un courant de dérive littorale assurant le transit des sédiments dans la même direction.

Les houles de l'Est aussi fréquentes mais moins importantes sont dominantes en période estivale abordent également la côte avec une incidence oblique créant un courant de dérive littorale assurant la dissémination des sédiments dans le même sens de la réflexion.

Les houles du nord régulières sur toute l'année arrivent à la côte avec une incidence frontale créant un courant de retour assurant la répartition des sédiments dans le profil. Ces houles sont à l'origine de l'érosion de la côte.

Les éléments déplacés par charriage sur le fond se répartissent en fonction du rapport existant entre la taille et la compétence des agents éventuels de transport à les remanier.

Les éléments les plus grossiers se trouvent donc généralement dans la zone où l'agitation est la plus importante, qu'elle provienne des effets des houles ou des courants. c'est ainsi que l'avant côte est fréquemment tapissée de sables plus grossiers que ceux des parties déprimées.

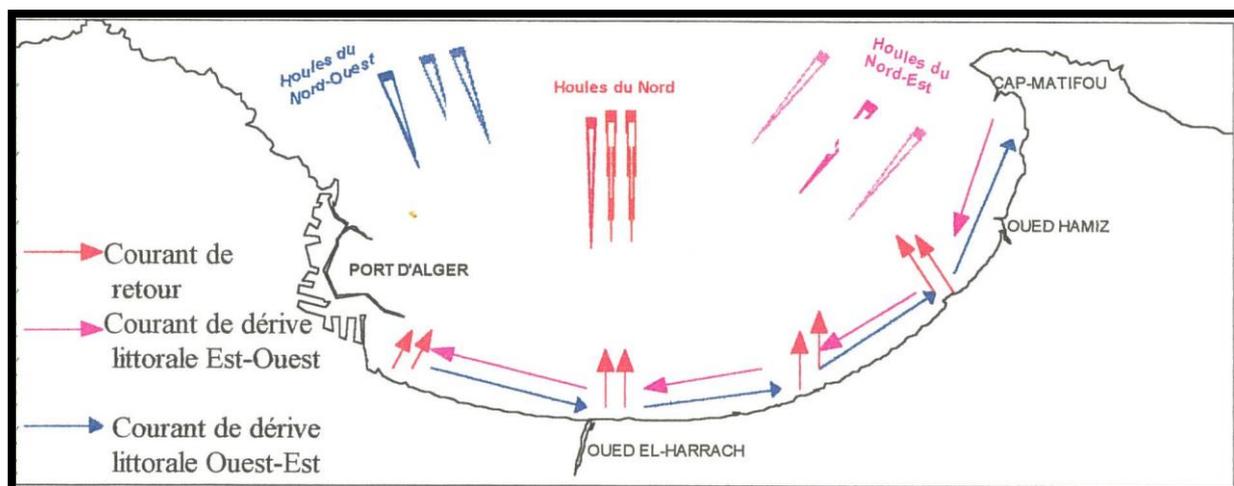


Figure II.19 – Schéma probable de la dynamique sédimentaire dans la baie d'Alger

II.10.3 Les houles au large

II.10.3.1 principe de l'analyse statistique et Observations du SSMO :

a) Principe de l'analyse statistique :

Connaitre les conditions de houle à la côte suppose généralement de récupérer les données de houle au large, puis de faire propager les houles d'intérêt jusqu'au rivage à l'aide d'outils numériques. Or les conditions de houle au large peuvent être issues de différentes sources : bouées de mesures, satellites ou encore modèles numériques de prévisions d'état de mer. Les bouées de mesures de la houle sont certainement le moyen le plus fiable et efficace de connaître les conditions de houle à un endroit donné. Le signal brut provenant des bouées de mesures demande néanmoins un traitement et une analyse. (Jarry 2009)

A partir de considérations théoriques et d'ajustements empiriques, des formes analytiques de spectres de houles ont été développées. Basés sur la vitesse du vent, la longueur de fetch ou encore sur la hauteur significative et une des périodes caractéristiques, ils permettent de représenter le type de houle à un endroit donné. On trouve parmi eux, par exemple les spectres de Pierson-Moskovitz et le spectre de Jonswap.

Le spectre de JONSWAP (JOint North Sea WAve Project, Hasselman et al. 1973) résulte de campagnes de mesures en mer du Nord. Sa forme est plus générale et englobe le spectre de Pierson-Moskovitz comme cas particulier, il s'écrit :

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp[-1.25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4] \times \gamma^a \quad \text{II.1}$$

Où ;

- f : La fréquence de la houle en Hertz ou s^{-1} .
- f_p : fréquence de pic qui correspond à $1/T_p$ (période de pic).
- g : accélération de la gravité en (m/s^2).
- α : coefficient adimensionnel en fonction de U_{10} et le Fetch (F).
- γ : paramètre de pic.
- F : est la distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle, en mètre.
- U_{10} : défini comme la vitesse dominante du vent, elle doit être mesurée sur une hauteur de 10 m par rapport au plan d'eau, sinon un ajustement de la valeur est envisageable en (m/s).

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{gF}{U_{10}}\right)^{-0.22} \quad \text{II.2}$$

$$f_p = \frac{3.5g}{U_{10}} \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0.33} \quad \text{II.3}$$

$$\gamma = 7 \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0.143} \quad : \quad 1 < \gamma < 7 \quad \text{II.4}$$

$$a = \exp\left[-\frac{f - f_p}{2\sigma^2 f_p^2}\right] \quad \text{II.5}$$

- σ : paramètre de forme tel que ;
- $\sigma = 0.07$ quand $f < f_p$
- $\sigma = 0.09$ quand $f > f_p$

Ainsi le spectre de JONSWAP est exprimé avec trois données d'entrée :

- La fréquence de la houle correspondant à $1/T$.
- La vitesse des vent U_{10}
- Le Fetch.

Pour déterminer les caractéristiques de la houle, ce qui est le but de l'analyse spectrale il impératif de calculer le moment d'ordre zéro; tel que :

$$m_0 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) df \quad \text{II.6}$$

Donc m_0 représente l'aire sous la courbe de $S(f)$. Cette relation est tirée est simplifiée par la relation du moment générale d'ordre n :

$$m_n = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) f^n df \quad \text{II.7}$$

La hauteur significative de la houle calculée à partir du spectre deviens :

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad \text{II.8}$$

On peut tirer aussi la période moyenne du spectre :

$$T_{m0} = T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad \text{II.9}$$

Et aussi, l'indice de largeur du spectre :

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \quad \text{II.10}$$

b) Les données de la SSMO :

Les données de la houle au large sont reprises d'un document intitulé "SUMMARY OF SYNOPTIC METEOROLOGICAL OBSERVATIONS" (S.S.M.O Tome 2, zone Algiers). Ces données s'étalent sur une période de 8 ans de 1963 à 1970.

Les données couvrent une zone au large des côtes algériennes qui se situe entre 2° et 5° de longitude Est et entre $36^\circ 5'$ et 38° de latitude Nord.

L'analyse statistique de ces données de base a permis de définir les secteurs de la houle prédominants et leurs amplitudes respectives. Des roses de houles au large de la baie d'Alger sont établies trimestriellement et annuellement (Figure **II.20**).

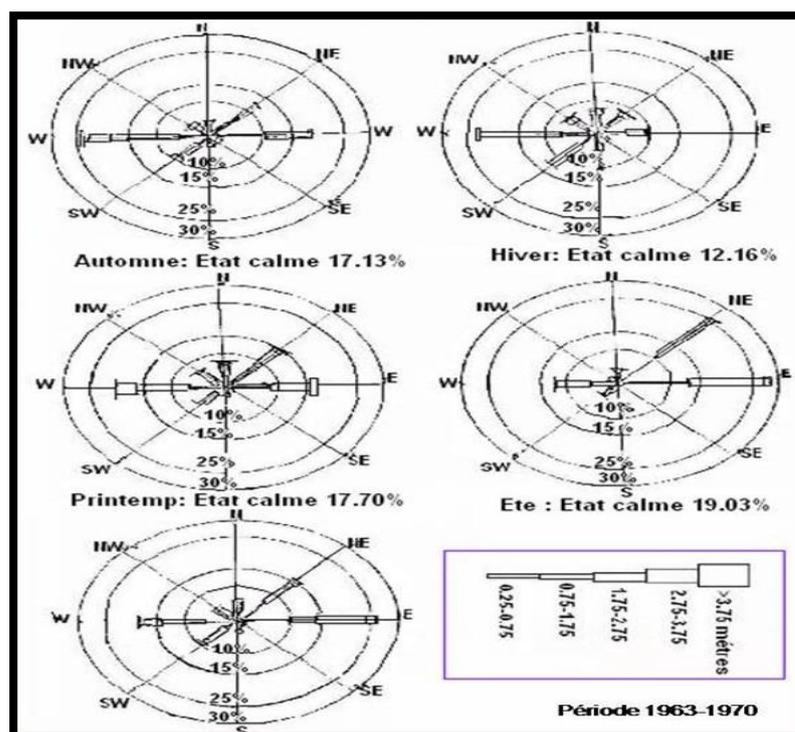


Figure II.20 – Rose trimestrielle et annuelle des houles au large (SSMO, 1963-1970)

II.10.3.2 Fréquences mensuelles de la houle au large :

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

Tableau II.3 – Fréquences mensuelles de la houle du large par direction (1 mois= 100%)

Mois	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Janvier	8.10	12.90	18.20	5.00	6.50	13.20	28.80	7.30
Février	8.80	10.30	12.60	4.00	6.10	16.90	35.60	5.80
Mars	11.30	12.60	15.80	3.60	4.50	12.30	30.50	9.20
Avril	11.70	15.40	16.00	2.00	4.40	13.70	26.70	10.20
Mai	8.20	26.30	31.90	3.00	3.30	7.20	13.90	6.20
Juin	9.20	29.10	29.80	1.80	1.40	8.20	16.40	4.20
Juillet	5.90	32.50	35.10	1.40	1.00	5.90	16.30	2.00
Août	8.80	27.70	37.30	1.90	1.10	5.00	13.40	4.90
Septembre	6.70	26.40	40.50	2.20	2.30	4.60	14.80	2.50
Octobre	7.80	14.10	20.30	3.20	4.20	14.80	28.80	6.80
Novembre	5.50	5.80	10.00	5.10	8.00	15.90	40.40	9.40
Décembre	10.20	6.20	9.40	4.60	7.50	15.00	37.10	10.00

Les résultats de cette analyse groupés dans le tableau ci-dessus dénotent ce qui suit :

- Les houles les plus fréquemment observées appartiennent aux secteurs Ouest, Est et Nord Est.
- La fréquence d'observations sur l'année des houles d'Est et d'Ouest sont sensiblement identiques avec toutefois une légère prédominance du secteur Ouest.

- En été, les houles d'Est prédominent.
- En hiver, les houles d'Ouest prédominent.
- Le secteur Nord a une répartition assez régulière durant l'année.

On en conclue alors que :

- L'agitation provenant du secteur Ouest et Est sont les plus fréquentes, néanmoins pour les fortes houles, le secteur Ouest prédomine.
- Les houles de tempêtes proviennent essentiellement du secteur Ouest aussi.

II.10.3.3 Relation amplitude et période de la houle au large :

Les observations du SSMO font ressortir les fréquences des houles au large par période indiquée dans le tableau ci-dessous ;

Tableau II.4 – Fréquences des différents états de la mer au large par période (SSMO 1963 – 1970)

Etat de la Mer	PERIODE DE LA HOULE					
	< à 6 s	6 à 7s	8 à 9s	10 à 11s	11 à 12 s	13 s
Calme	5.20	0.10	-	-	-	-
0	20.80	1.90	0.40	-	-	-
1	24.60	13.10	2.70	0.50	0.20	-
2	2.60	5.40	3.10	0.90	0.20	-
3	0.40	1.10	1.00	0.60	0.20	-
4	0.10	0.50	0.30	0.30	0.30	-
Total	53.70%	22.10%	7.50%	2.30%	0.90%	-

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

II.10.3.4 Relation amplitude et direction de la houle au large :

La relation entre état de mer et hauteur de l'agitation fait l'objet du tableau ci-après.

Tableau II.5– Relation état de mer – Hauteur de l'agitation (SSMO 1963 – 1970)

Degré	Amplitude (mètre)	État de la mer
Calme	< 0.25	Ridée ou belle
Degré 0	0.25-0.75	Ridée ou belle
Degré 1	0.75-1.75	Modérée
Degré 2	1.75-2.75	Agitée
Degré 3	2.75-3.75	Forte
Degré 4	> 3.75	Très forte ou supérieure

Les fréquences d'apparition des différents degrés d'agitation par direction sont déterminées à partir du SSMO (**Tableau II.6**).

Tableau II.6 – fréquences des différents états de la mer au large par direction (SSMO 1963 – 1970)

Etat de la mer	Direction				
	W	NW	N	NE	E
Calme	2.90	1.10	2.00	2.70	4.00
0	6.20	2.00	2.90	7.00	9.30
1	10.90	2.70	2.60	7.50	9.10
2	4.30	0.60	0.70	1.20	0.90
3	0.90	0.10	0.10	0.00	0.10
4	0.30	-	0.00	0.00	-
Total	25.50	6.50	8.30	18.40	23.40

Les constatations tirées sont les suivantes :

- L'agitation provenant des secteurs Est et Ouest est la plus fréquente ;
- L'agitation provenant des secteurs Nord et Nord-Ouest est la moins fréquente ;
- Les fortes houles et les houles de tempêtes proviennent du secteur Ouest.

II.10.3.5 Caractéristiques de la houle au large :

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

Tableau II.7 – Hauteurs des houles extrêmes par secteur de provenance au large

DIRECTION DE HOULE	EST	NORD EST	NORD	NORD OUEST	OUEST	TOUTES DIRECTIONS
Biennale	4,12 m	4,93 m	4,90 m	4,16 m	7,36 m	7,44 m
Quinquennale	4,70 m	5,67 m	5,75 m	4,87 m	8,43 m	8,34 m
Décennale	5,14 m	6,23 m	6,38 m	5,40 m	9,22 m	9,02 m
Vingtennale	5,59 m	6,79 m	7,02 m	5,94 m	10,02 m	9,70 m
Cinquantennale	6,17 m	7,53 m	7,87 m	6,65 m	11,08 m	10,60 m
Centennale	6,62 m	8,08 m	8,50 m	7,18 m	11,88 m	11,27 m

Conclusion

Il est clair qu'une bonne présentation de la zone d'étude est nécessaire dans l'étude d'un projet, vu le taux et l'importance des informations qu'elle nous fournit, ce qui permet de bien évoluer les risques qui peuvent être engendrés par des phénomènes naturels tels que l'ensablement et l'érosion.

Ce chapitre fait la synthèse des éléments recueillis sur l'ensemble des facteurs météorologiques, océanographiques qui ont une influence sur la dynamique du littoral.

Le climat de la baie d'Alger est de type méditerranéen, il se caractérise par un été sec et chaud et un hiver humide et froid.

Les données océanographiques notamment les données de houles au large montrent que les houles les plus couramment observées durant l'année sont celles appartenant aux secteurs Ouest, Est et Nord Est. Les houles du secteur Nord présentent une répartition assez régulière. Quant aux houles de tempête, celles-ci, proviennent essentiellement du secteur Ouest.

Enfin l'étude sédimentologique nous a permis de savoir que notre site est constitué d'une partie rocheuse, que sa couverture sédimentaire est composée de sables allant des sables grossiers aux sables fins et que le transport de ce matériau sédimentaire, se fait par saltation et roulement dans des zones agitées avec évacuation des particules fines vers le large.

Chapitre III

Étude de la réfraction de la houle

Chapitre III Étude de la réfraction de la houle

Introduction

L'étude de la réfraction de la houle a pour objet l'exploitation et le transfert des caractéristiques de la houle au large pour définir les caractéristiques de la houle à la côte.

Les données de la houle à la côte serviront de données d'entrée pour le dimensionnement des ouvrages maritimes.

Il existe de nombreux modèles de modélisations de la houle, tel que SWAN (*Simulating Waves Near shore*), Xbeach ainsi que Mike 21. Dans ce présent chapitre nous allons utiliser le progiciel Mike 21 afin d'étudier la propagation de la houle entre le large et la côte, pour ce faire nous allons nous baser sur la bathymétrie de la baie d'Alger ainsi que sur les caractéristiques de la houle au large préalablement déterminées grâce à une analyse spectrale.

III.1 Présentation du modèle Mike 21

Mike 21 est un progiciel de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre, développé par DHI Water and Environnement (*Danish Hydraulics Institute*).

Il permet la simulation des phénomènes hydrauliques et ceux qui y sont reliés dans les estuaires, les lacs, les rivières, les zones côtières et les océans. Mike 21 est particulièrement adapté pour traiter des problèmes relevant des principaux domaines d'application suivants :

- L'hydraulique fluviale ;
- L'hydraulique environnementale ;
- Les processus sédimentaires ;
- L'hydraulique côtière et l'océanographie ;
- Les houles.

La suite logiciel Mike 21 est composée de plusieurs modèles répondant à une problématique précise (**Figure III.1**) : le module MIKE 21 AD, MIKE 21 HD, MIKE 21 EU, MIKE 21 SW... Ces divers modules communiquant entre eux, différents processus à simuler peuvent être ainsi combinés et superposés de manière souple.

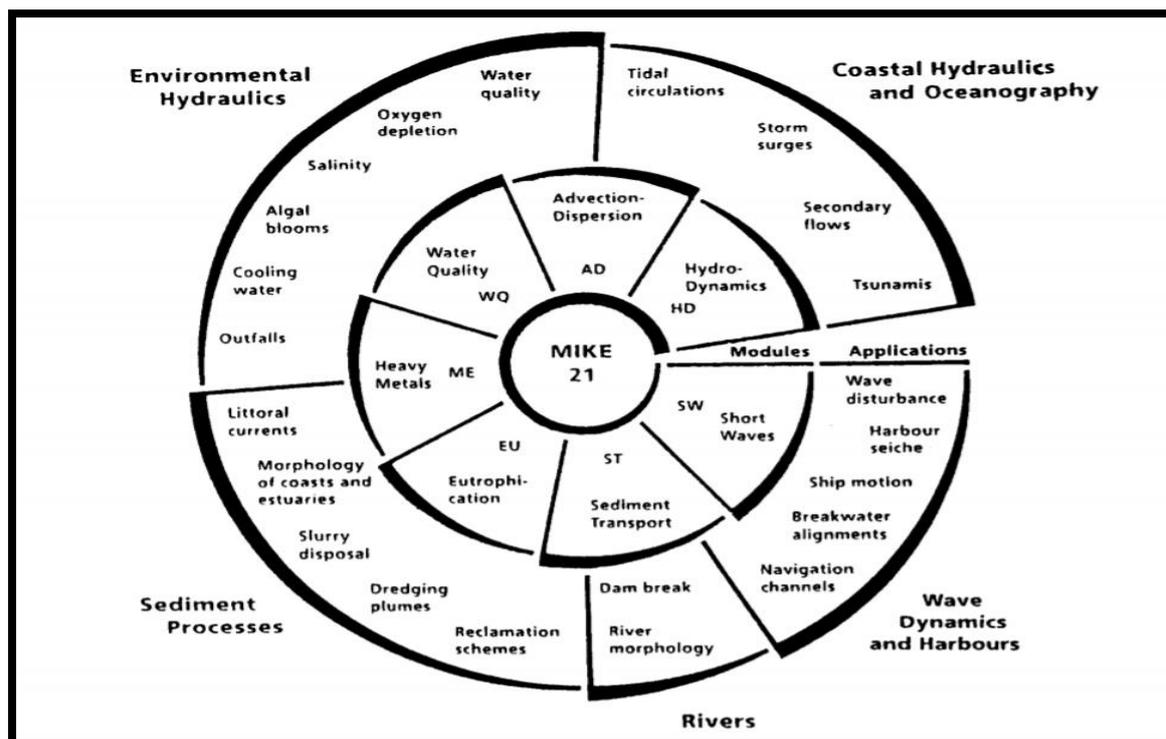


Figure III.1 – Schéma représentatif des différents modèles de MIKE21 et de leurs domaines d'utilisation (Warren, 1992)

Le modèle hydrodynamique basique MIKE 21/3 HD :

Modèles hydrodynamiques en 2D ou en 3D, respectivement. Chaque modèle peut être utilisé seul ou en mode couplé avec un ou plusieurs modèles de transport de matières dissoute et/ou particulaire. Un exemple de couplage typique en zone côtière est celui du modèle MIKE21-HD avec le modèle de réfraction de vague MIKE21-SW et le modèle de transport de sable MIKE21-ST et cela pour l'étude du transport de sable autour d'un port.

Le choix d'un modèle en 3D (MIKE 3) est conseillé pour un environnement stratifié en densité (ex. estuaire) et/ou dans un domaine semi-renfermé (ex. lagune, baie, etc.) où la direction des courants de gradient en profondeur est généralement opposée à celle des courants de dérive en surface causés par les vents.

Sur le plan vertical, le modèle MIKE3-HD offre une version non-hydrostatique qui permet un meilleur calcul des vitesses verticales dans des régions où celle-ci deviennent significatives. Un exemple est celui de la remontée rapide d'eau douce en milieu marin à partir d'une source située sur le fond ou d'un diffuseur sous-marin d'eaux usées.

Les principales applications du modèle MIKE 21/3 HD sont :

- Étude et prévision des courants et marées.
- Conception et analyse des structures côtières.
- Étude d'impact environnemental d'infrastructures marines.

Le modèle MIKE 21-SW (THE SHORT WAVE MODULE) :

Modèle spectral de vague de 3^{ème} 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.

Les principales applications du modèle MIKE21-SW sont :

- Conception et optimisation des structures de défense des ports et marinas contre les vagues ;
- Établissement du climat des vagues dans une région côtière en fonction des vagues du large ;
- Génération des cisaillements de radiations des vagues pour le calcul des courants côtiers par MIKE21/3 ;
- Couplage avec les modèles de transport de sable et de boues dans les zones littorales.

Le modèle MIKE 21/3 ST(THE SEDIMENT TRANSPORT MODULE) :

Modèle de transport de sédiment non-cohésif (sable). Il est normalement couplé au modèle hydrodynamique MIKE21/3-HD et au modèle de vagues MIKE21-SW.

Il offre deux formulations pour le calcul du transport sédimentaire : la formulation de Bijker (courants seuls) et la formulation STP du DHI (courants et vagues). Cette méthode STP dite « intra-vague » permet de prendre en compte l'influence des différences de phase de l'écoulement oscillatoire, de la tension du cisaillement sur le fond et de la concentration de sédiment en suspension sur le transport du sédiment. Les taux de transport sont calculés (au choix) selon (I) une approche de plan bidimensionnel horizontal (2DH) dans lequel les taux sont calculés dans la direction du courant moyen, avec une composante transversale résultante de la pente du fond, ou (II) par la description quasi-tridimensionnelle (Q3D) de l'hydrodynamique et du transport de sédiment qui résout le transport dans ses directions perpendiculaire et parallèle au courant et, au rivage, celles du déferlement des vagues. Ce modèle peut être appliqué à tous les endroits où les courants et les vagues déplacent le sable.

Les principales applications du modèle MIKE21/3-ST sont :

- La gestion du littoral ;
- L'optimisation de l'entrée d'un port ou d'une marina ;
- La conception des ouvrages de protection côtière ;
- L'étude de la stabilité des passes d'entrée tidales ;
- L'étude de la morphologie côtière et fluviale ;

III.2 Analyse des données de base

III.2.1 Données de la houle au large

Le traitement statistique des données du Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO) nous a permis de déterminer les caractéristiques des houles extrêmes au large et ce pour plusieurs secteurs de provenance (Tableau II.7).

Chapitre III Étude de la réfraction de la houle

Le choix des secteurs angulaires prédominants ainsi que de la période de retour est à présent nécessaire pour définir la hauteur et la période significative qui serviront de données d'entrée pour la modélisation sur le progiciel MIKE 21.

Tableau III.1 – Périodes de retour pour la région de type 2 (TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN)

Caractéristiques de la zone protégée	Période de retour (années)
Zone urbaine industrielle : Superficie : > 100 000 ha Population : > 200 000 habitants	50
Zone rurale ayant développée une activité industrielle et agricole : Superficie : 50.000 ÷ 100 000 ha Population : 100.000 ÷ 200 000 habitants	20
Zone rurale agricole développée : Superficie : 10 000 ÷ 50 000 ha Population : 50 000 ÷ 100 000 habitants	10
Zone rurale agricole moyennement développée : Superficie : 5 000 ÷ 10 000 ha Population : 10 000 ÷ 50 000 habitants	5

III.2.2.1 Choix de la période de retour :

L'élection de la période de retour pour le dimensionnement d'ouvrage est considérablement liée au nombre de vies potentiellement mises en danger dans la zone protégée ainsi qu'à la capacité d'investissement considérée.

D'après le TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN publié en 2011 par le Ministère de l'agriculture et du développement rural vietnamien, il existe deux types de régions et pour chacune une classification des périodes de retour selon les caractéristiques de la zone à protéger.

La région de Bordj El Bahri a connu de nombreuses inondations, ce qui d'après le TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN la classe parmi les régions de type 2. Elle est l'une des régions les plus peuplées de la capitale algérienne, puisqu'elle héberge plus de 100 000 habitants. Cette commune abrite depuis quelques années des terrains agricoles mais aussi une activité industrielle naissante. Donc d'après le (Tableau III.1) la période de retour adéquate pour le dimensionnement de notre ouvrage est de 20 ans.

Chapitre III Étude de la réfraction de la houle

Borgman, 1963 a énoncé un concept de probabilité pour la sélection de la période de retour, qui relie la période de retour T à la durée de vie de l'ouvrage L . La probabilité du risque de dommage P_E , c'est à dire l'occurrence d'au moins un évènement $H > H_T$ pendant la durée de vie L de l'ouvrage est alors obtenue comme suit ;

$$P_E = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T}\right) \quad \text{III.1}$$

Selon le TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN, notre ouvrage est de la classe V (Tableau III.2). Donc d'après le même guide sa durée de vie L est de 30 ans (Tableau III.3).

Tableau III.2 – Classification de l'ouvrage selon sa période de retour (TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN)

Classe de l'ouvrage	I	II	III	IV	V
Période de retour T	150	100	50	30	$10 < T < 30$

Tableau III.3 – Durée de vie de l'ouvrage selon sa classe (TECHNICAL GUIDELINES ON SEA DIKE DESIGN)

Classe de l'ouvrage	Durée de vie de l'ouvrage (années)
I-II	100
III-IV	50
V	30

Application numérique : sur l'équation III.1, $T = 20$ ans, $L = 30$ ans.

$$P_E = 1 - e^{-\left(\frac{30}{20}\right)} = 0.776 = 77.6 \%$$

Donc pour une période de retour de 20 ans et une durée de vie de l'ouvrage de 30 ans, on obtient une probabilité du risque de dommage P_E égale à 77.6%, ce qui est considéré d'un point de vue technique non acceptable.

Chapitre III Étude de la réfraction de la houle

C'est pourquoi il est impératif de sélectionner une autre période de retour et vérifier si cette dernière nous offre un taux de dommage moins important que le précédent.

D'après (Bonnefile,2012) pour limiter le risque de dommage à un niveau acceptable, il faut que la période de retour de la houle soit égale à la durée de vie de l'ouvrage ou alors à plusieurs fois cette durée.

Prenons une période de retour $T = 50$ ans, d'après le tableau III.2 notre ouvrage sera alors de classe III et en suivant les données du tableau III.3 sa durée de vie sera égale à 50 ans.

Recalculons à présent la probabilité du risque de dommage pour $T = 50$ ans et $L = 50$ ans;

Application numérique : sur l'équation III.1, $T = 50$ ans, $L = 50$ ans.

$$P_E = 1 - e^{-\left(\frac{50}{50}\right)} = 0.632 = 63.2 \%$$

Une probabilité de dommage égale à 63 % est cette fois ci, d'un point de vue technique raisonnable et plutôt acceptable.

III.2.2.2 Choix du secteur angulaire :

Le choix du secteur angulaire se fait généralement selon deux critères, la configuration géographique de la zone d'étude et le secteur des houles au large.

En prenant en compte les limites naturelles imposées de notre site ainsi que le tableau des fréquences par direction des houles au large (**Tableau II.2**), trois directions sont retenues :

- Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (270°N).
- Deux directions de houle à incidence oblique (345°N et 315°N), houles représentatives des agitations du large pouvant pénétrer en fond de la baie d'Alger.

III.2.2.3 Caractéristiques de la houle au large :

Après avoir préalablement fait le choix de la période de retour et des secteurs angulaires, nous allons définir les caractéristiques de la houle au large qui serviront de données de base pour la modélisation.

Tableau III.4 – Hauteur significative de la houle au large par période de retour et par direction

Période de retour	Direction de la houle au large		
	Nord (N345°)	Nord-Ouest (N315°)	Ouest (N270°)
Cinquantennale	Hs = 7.87 m	Hs = 6.65 m	Hs = 11.08 m

Pour le calcul de la période significative, on va utiliser la relation donnée par (Callaghan et al., 2008) reliant la période à sa hauteur significative comme suit :

$$T_s = 3.3 \times H_s^{0.63}. \quad \text{III.2}$$

Après calcul numérique, on trouve :

Tableau III.5 – Caractéristiques de la houle au large par période de retour et par direction

Période de retour	Direction de la houle au large		
	Nord (N345°)	Nord-Ouest (N315°)	Ouest (N270°)
Cinquantennale	Hs = 7.87 m	Hs = 6.65 m	Hs = 11.08 m
	Ts = 12.10 s	Ts = 10.88 s	Ts = 15.01 s

III.2.2 Données bathymétriques

Pour l'étude de la réfraction de la houle du large vers la côte, on a utilisé :

- Le levé topo-bathymétrique de la zone d'étude réalisé par l'entreprise la méditerranéenne des travaux Maritimes (MEDITRAM), sur une surface d'environ 5 Ha allant jusqu'à la profondeur de 8m.
- La carte marine de la baie d'Alger (Mer méditerranée côte d'Algérie).
- La carte marine numérique de l'application Navionics, afin de combler le manque d'informations.

III.3 Étude en modèle numérique de la transformation des vagues

III.3.1 Les principales étapes de la modélisation par le MIKE 21

Le modèle numérique spectral wave (MIKE 21-SW) est celui qui répond aux besoins de notre étude, puisqu'il permet la simulation de la propagation de la houle de courte période dans les eaux peu profondes à profondes, il est capable de reproduire les effets combinés de la plupart des phénomènes liés à la houle. Tels que le shoaling, la réfraction, la diffraction et la réflexion partielles des houles directionnelles, irrégulières, d'amplitude finie se propageant sur des bathymétries complexes.

Avant d'entamer la simulation il est important de créer un mesh file à l'aide du module Mesh generator, ce dernier relie la profondeur des eaux, extraite des données bathymétriques, à chaque point du domaine. Il contient donc les informations concernant la profondeur des eaux, les boundary (les limites du mesh file) et les éléments du maillage qui sont de type triangulaire. Après la création du mesh file, on passe à la réalisation du SETUP qui contient les données de base de la simulation ;

On commence par faire rentrer notre domaine d'étude (Mesh file), puis on précise la durée de la simulation qui est de 16 heures avec un intervalle d'une heure, ce qui signifie qu'on obtiendra un résultat chaque une heure (output).

Ensuite, on fait entrer les caractéristiques de la houle au large, qui sont la hauteur, la période et la direction.

Enfin, on finit par choisir les paramètres de sortie qu'on souhaite obtenir.

III.3.2 Données d'entrée du modèle MIKE 21/SW

III.3.2.1 Emprise du modèle et création du mesh file :

L'emprise du modèle Mike 21 couvre une zone s'étendant de Cap Matifou à l'est jusqu'à La pointe-Pescade à l'ouest, sur la Baie d'Alger. La limite du modèle au large va jusqu'à la profondeur de 150m environ.

Le module "*Mesh Generator*" nous offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. "*Mesh Generator*" génère un format souple de maillage (*.MESH).

Le programme nous fournit les utilitaires pour importer des données du trait de côte, notamment les bathymétries. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques, des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques.

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en les phases suivantes : le choix du système de projection, le traitement des données bathymétriques XYZ, la génération du maillage et l'interpolation des valeurs bathymétriques sur le maillage.

Le maillage est composé d'éléments triangulaires non structurés, la taille des mailles a été ajustée suivant la morphologie des fonds et la précision souhaitée.

- Au large, par grande profondeur, les mailles ont des arêtes qui atteignent 150 m au maximum.
- Localement, le maillage a été affiné près de la côte, où la taille des mailles est d'environ 10m.

La bathymétrie et les maillages utilisés sont illustrés dans les figures ci-dessous.

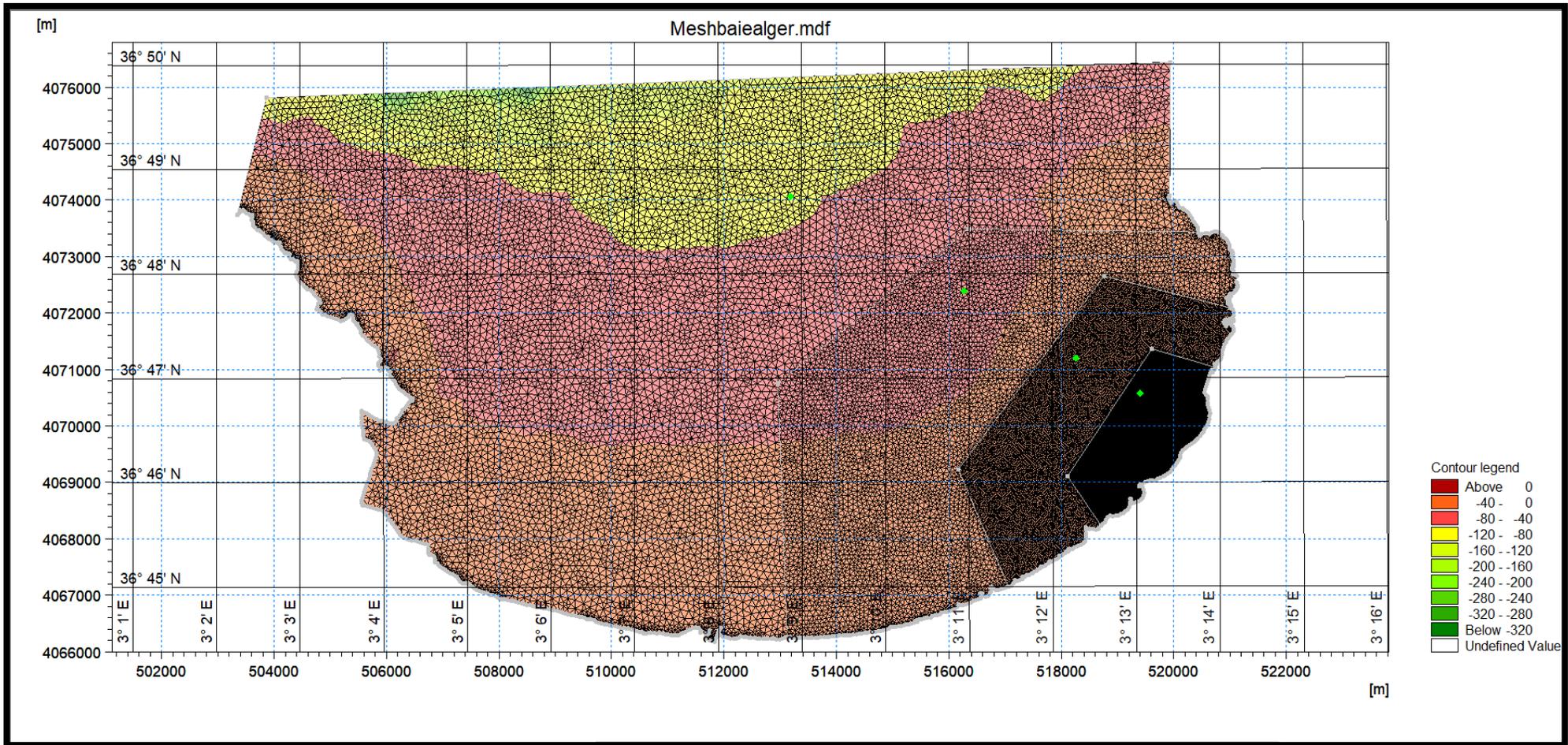


Figure III.2 – Emprise et maillage du modèle côtier de la baie d’Alger

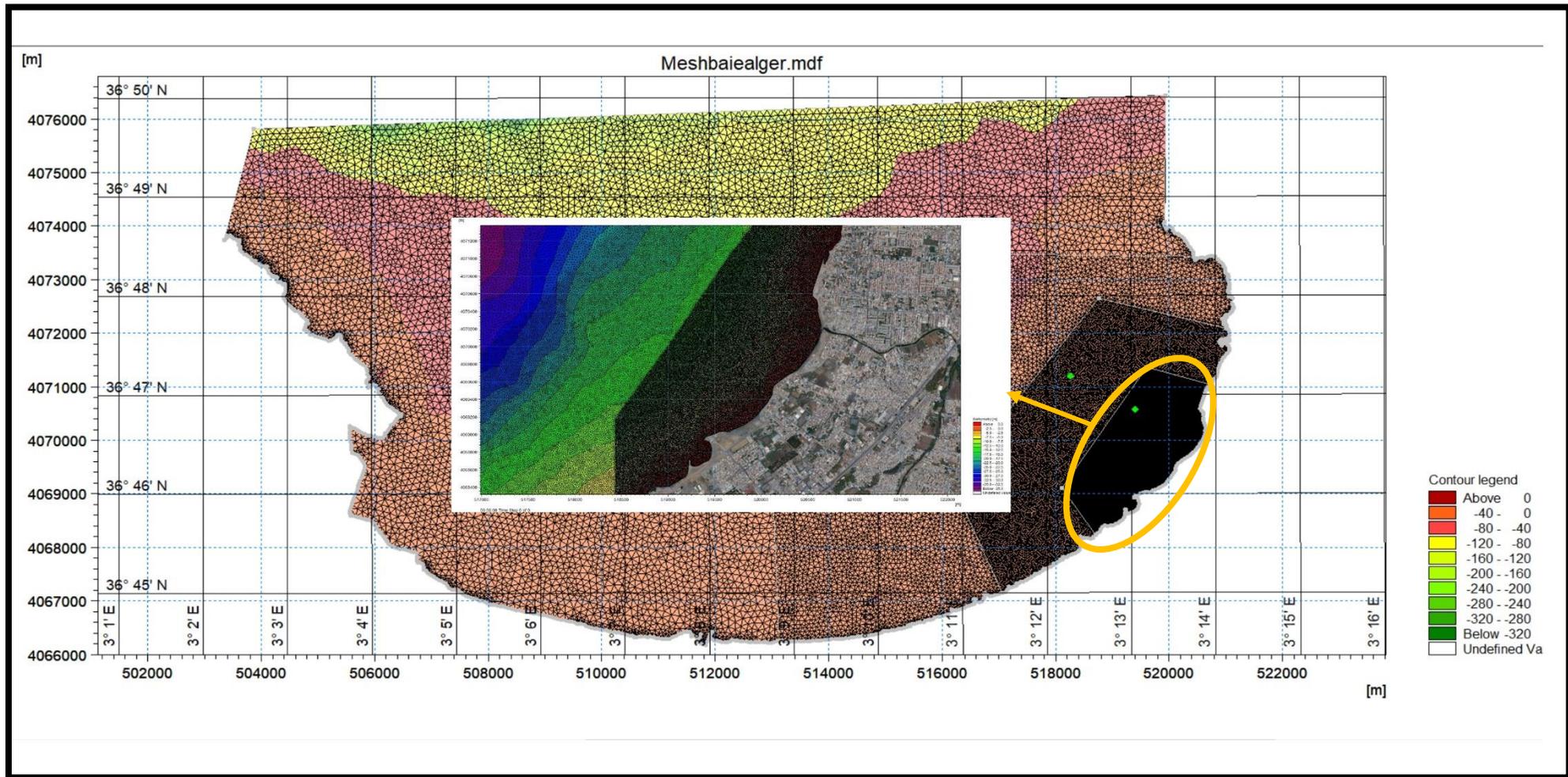


Figure III.3 – Emprise et maillage du modèle côtier de la zone d'étude

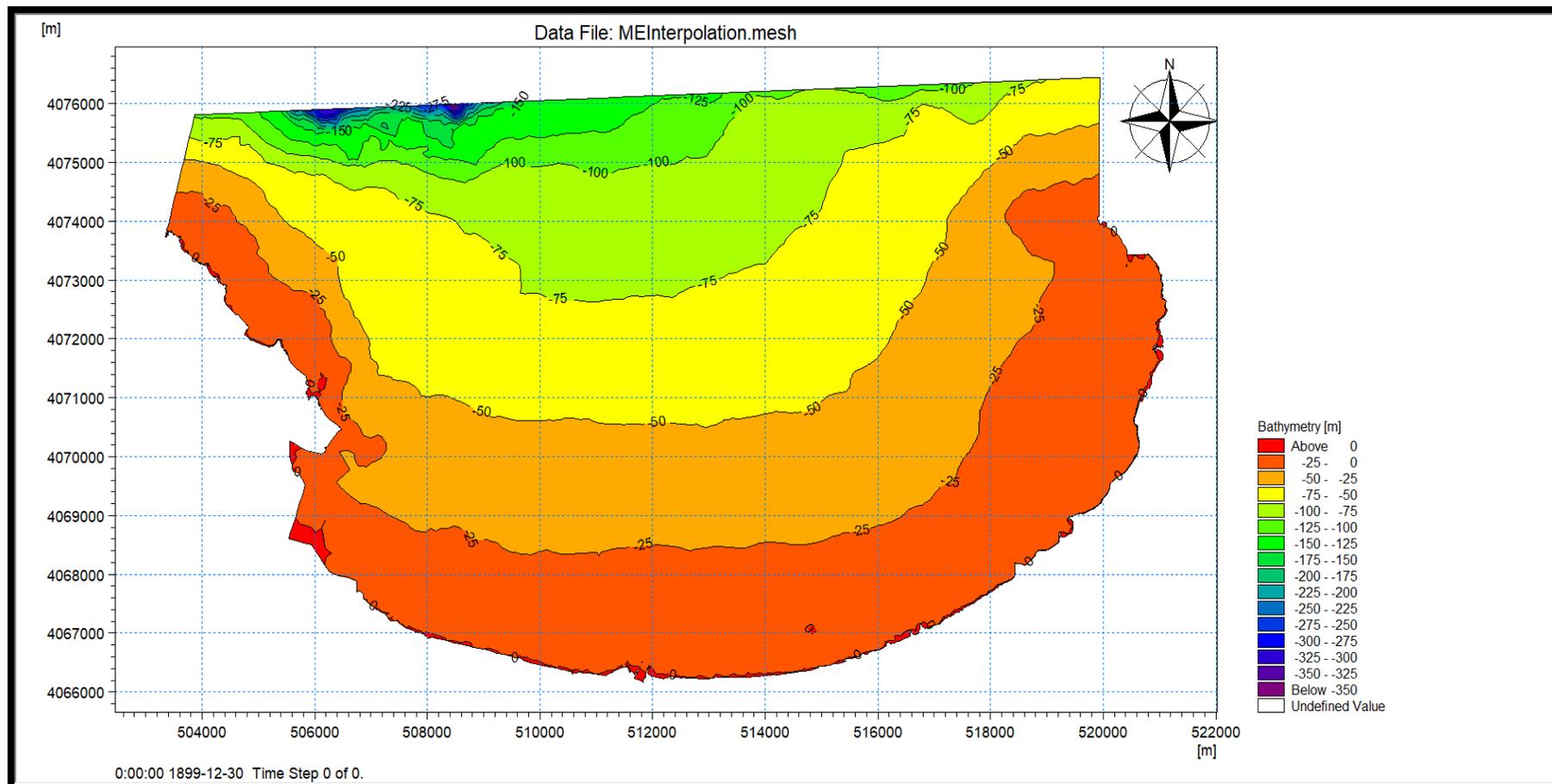


Figure III.4 – Carte bathymétrique de la baie d’Alger

III.3.2 Houles et directions :

Les données de houles au large et leurs directions utilisées dans ce modèle sont celles décrites dans le **tableau III.5**.

III.3.3 Interprétions des résultats

Le climat de houles transformées près de la côte est présenté de deux manières : qualitative et quantitative. L'interprétation qualitative est présentée par l'intermédiaire des épures de la répartition spatiale en 2D, de la hauteur significative de houle H_s et de la direction des vagues, tandis que la description quantitative est présentée par l'extraction du climat de houles (H_s , T_p et Dir) transformées à des endroits prédéfinis. Ces endroits ont été choisis suivant la situation où l'aménagement sera projeté.

Pour chaque direction étudiée, huit points d'extraction du climat de houle ont été présentés. Les coordonnées exactes des points d'extraction sont exprimées en UTM 31 et illustrées dans le Tableau suivant.

Tableau III.6 – Coordonnées des points d'extraction

	X (UTM)	Y (UTM)	Z (NGA)
Point 1	520401.798	4070366.856	2.64
Point 2	520490.604	4070337.758	1.03
Point 3	520563.085	4070314.179	0.95
Point 4	520324.275	4070372.440	5.35
Point 5	520373.454	4070306.939	4.03
Point 6	520307.570	4070303.150	3.5
Point 7	520527.620	4070210.390	2.02
Point 8	520449.794	4070238.440	1.6



Figure III.5 – Positionnement des points d'extraction

III.3.3.1 Distribution spatiale des paramètres de vagues :

La distribution spatiale des paramètres de houle (H_s et direction des vagues) pour la période de retour de 50 ans, est représentée sur l'épure 2D dans les figures ci-dessous.

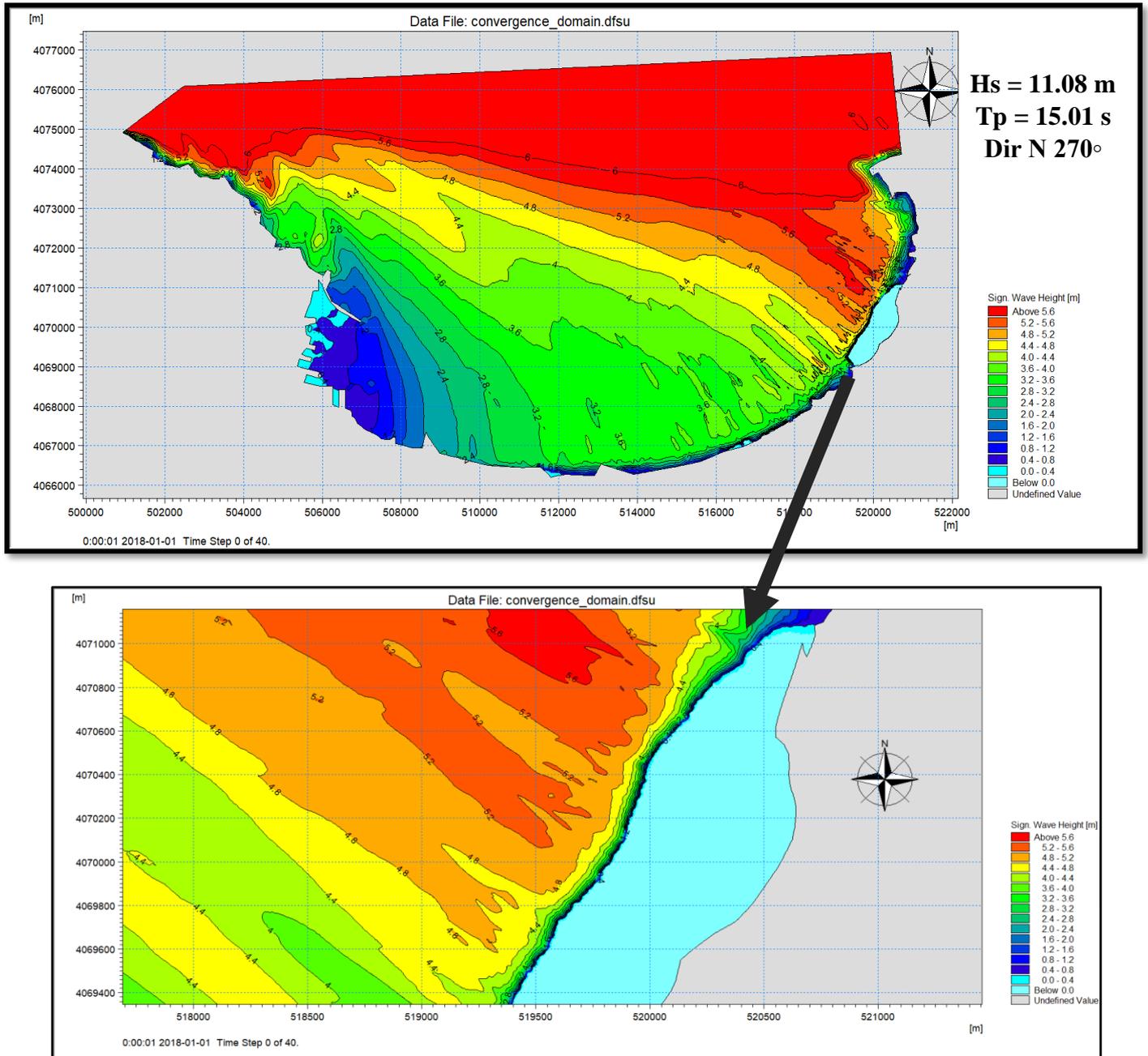


Figure III.6 – Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 270° avec une période de retour de 50 ans

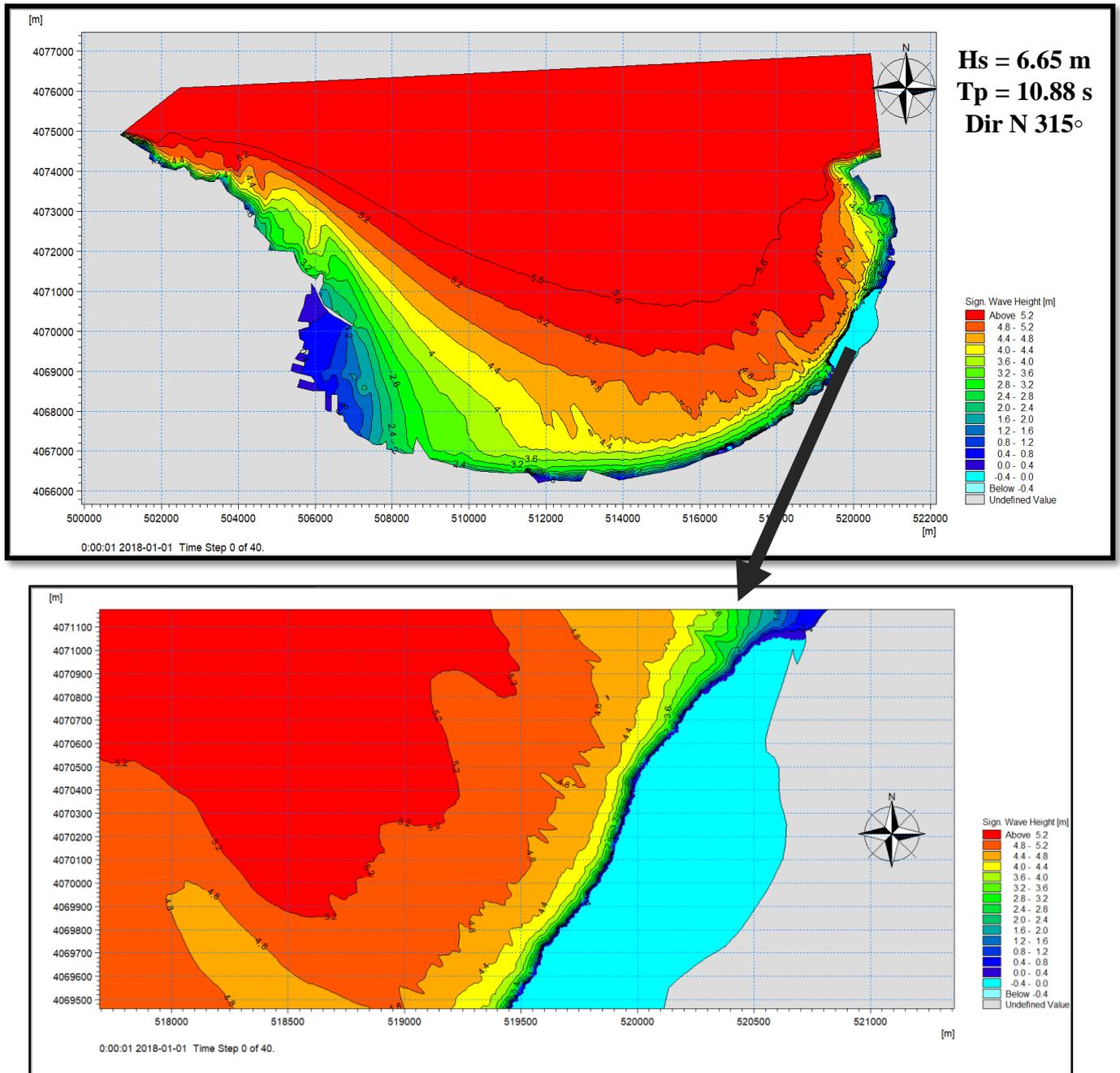


Figure III.7 – Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 315° avec une période de retour de 50 ans

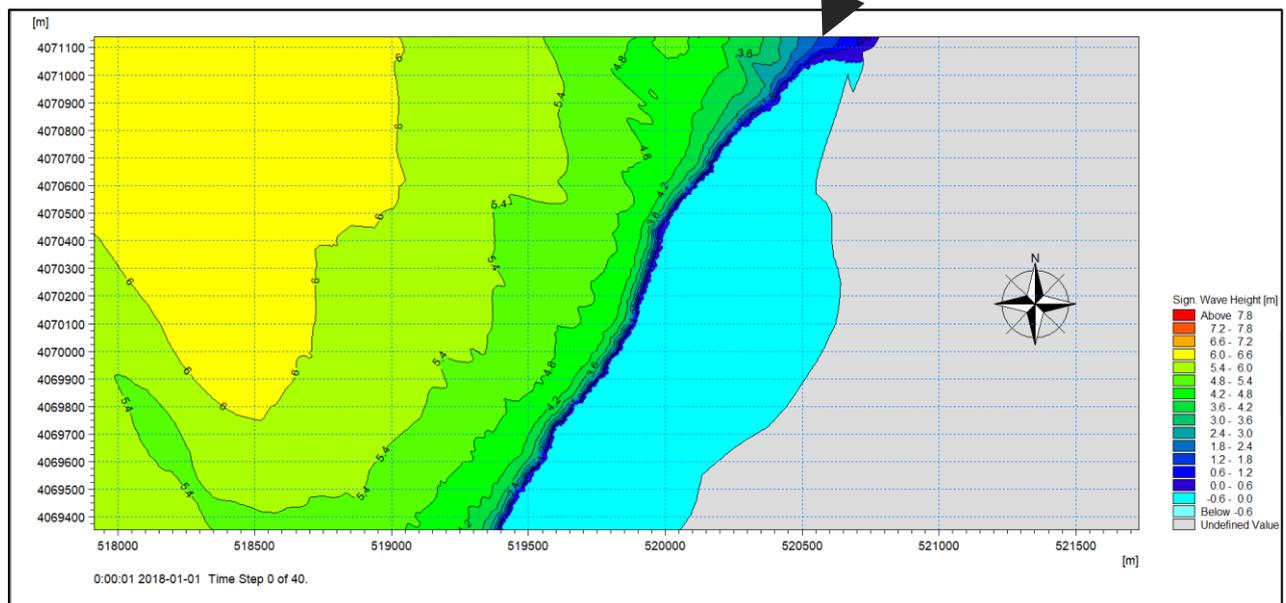
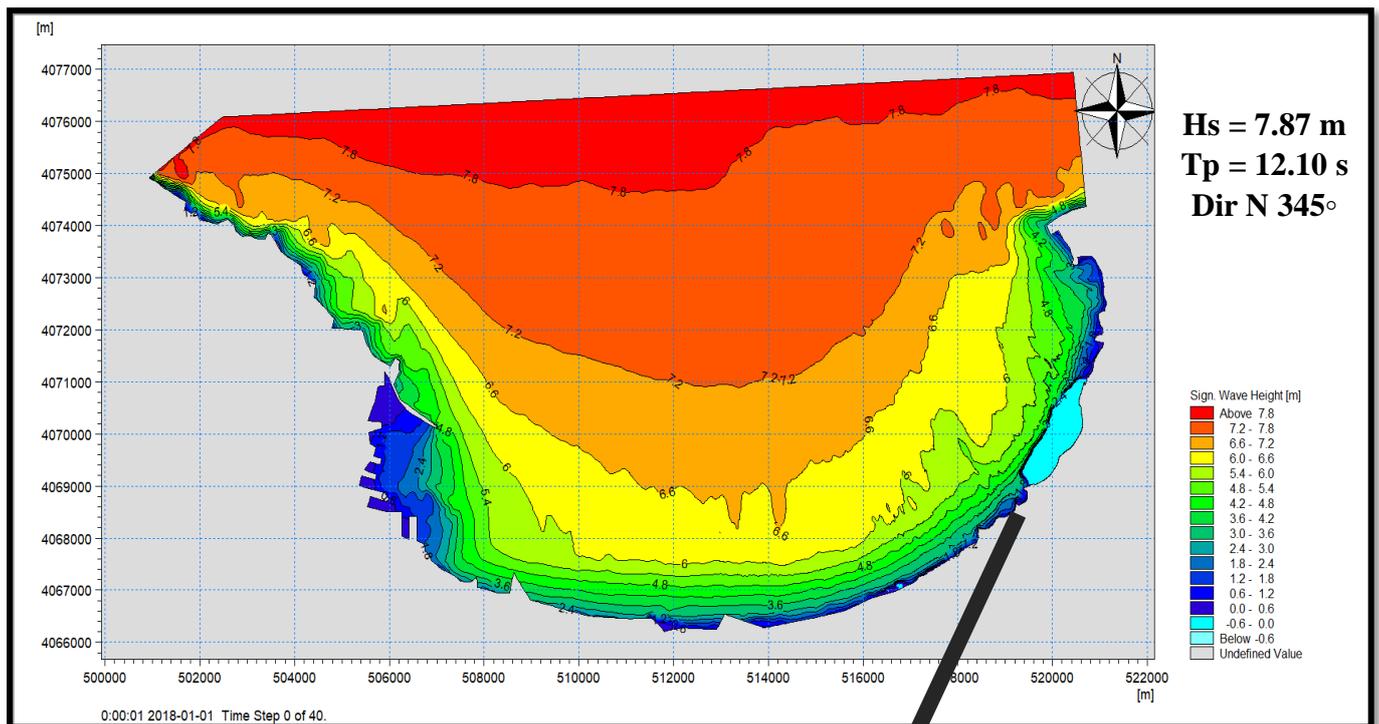


Figure III.8 – Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 345° avec une période de retour de 50 ans

III.3.3.1 Paramètres de la houle aux points d'extraction :

Les paramètres de la houle (Hs, Tp et direction) extraits des huit points, pour la période de retour de 50 ans et les trois directions de houle étudiées sont présentées ci-dessous.

Tableau III.7 – Climat de la houle près de l'embouchure pour la direction N270°

Points	Hs = 11.08 m Tp = 15.01 s Dir N 270° T =50 ans					
	X (UTM)	Y (UTM)	Z (NGA)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
1	520401.798	4070366.856	2.64	2.85	12.49	296
2	520490.604	4070337.758	1.03	1.78	11.85	305
3	520563.085	4070314.179	0.95	1.11	10.86	292
4	520324.275	4070372.440	5.35	3.39	12.81	295
5	520373.454	4070306.939	4.03	2.80	12.74	299
6	520307.570	4070303.150	3.5	2.20	12.50	299
7	520527.620	4070210.390	2.02	1.77	11.77	288
8	520449.794	4070238.440	1.6	1.32	11.27	263

Tableau III.8 – Climat de la houle près de l'embouchure pour la direction N315°

Points	Hs = 6.65 m Tp = 10.88 s Dir N 315° T =50 ans					
	X (UTM)	Y (UTM)	Z (NGA)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
1	520401.798	4070366.856	2.64	2.51	9.26	298
2	520490.604	4070337.758	1.03	1.59	8.78	307
3	520563.085	4070314.179	0.95	1.01	8.01	294
4	520324.275	4070372.440	5.35	3.01	9.49	299
5	520373.454	4070306.939	4.03	2.97	9.44	303
6	520307.570	4070303.150	3.5	2.16	9.26	301
7	520527.620	4070210.390	2.02	1.58	8.70	291
8	520449.794	4070238.440	1.6	1.21	8.30	266

Tableau III.9 – Climat de la houle près de l’embouchure pour la direction N345°

Points	Hs = 7.87 m Tp = 12.10 s Dir N 345° T =50 ans					
	X (UTM)	Y (UTM)	Z (NGA)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
1	520401.798	4070366.856	2.64	2.60	10.70	301
2	520490.604	4070337.758	1.03	1.64	9.58	309
3	520563.085	4070314.179	0.95	1.03	8.77	296
4	520324.275	4070372.440	5.35	3.10	10.35	303
5	520373.454	4070306.939	4.03	3.08	10.29	307
6	520307.570	4070303.150	3.5	2.23	10.09	304
7	520527.620	4070210.390	2.02	1.61	9.49	293
8	520449.794	4070238.440	1.6	1.23	9.04	267

D’après les trois tableaux représentatifs du climat de la houle près de l’embouchure de l’Oued El Hamiz (**tableau III.7, III.8 et III.9**), pour les trois directions (N270°, N315° et N345°) et pour une période de retour de 50 ans, on déduit que :

- Les hauteurs de houles enregistrées au niveau des huit points d’extraction varient entre 1.01 m et 3.39m, avec des périodes de pointe variant entre 8.01 s et 12.81 s, arrivant à la côte avec une direction Nord-Ouest.
- L’état de mer le plus élevé des houles est enregistré au point numéro 4, pour la direction 270°, avec les paramètres de vague suivants : Hs = 3,39 m, Tp = 12.81 s et Dir = 295°.
- Les houles du secteur Ouest sont toutes transformées en quadrant Nord.
- Les directions de houle au large N315° et N345° donnent approximativement les mêmes valeurs au rivage à quelques centimètres près.
- Les houles provenant de la direction N270° sont les plus hautes.

III.4 choix de la houle de dimensionnement

D'après les résultats obtenus de la transformation des vagues du large vers la côte, il est clair que les houles provenant du secteur Ouest N270° sont les plus fortes en intensité puisqu'à une profondeur de 5m nous avons enregistré une hauteur de 3.39 m avec une période de pointe de 12.81 s.

Donc pour le dimensionnement de notre système d'endigement nous allons considérer les houles provenant du secteur Ouest avec les valeurs indiquées ci-dessous.

Tableau III.10 – Paramètres de la houle de dimensionnement

Points	Profondeur (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
1	2.64	2.08	12.49	296
2	1.03	1.78	11.85	305
3	0.95	1.11	10.86	292
4	5.35	3.39	12.81	295
5	4.03	2.80	12.74	299
6	3.5	2.20	12.50	299
7	2.02	1.77	11.77	288
8	1.6	1.32	11.27	263

Conclusion

L'analyse des données au large indique que la période de retour retenue est la cinquantennale pour une probabilité du risque de dommage modérée mais aussi que les directions de houles dominantes sont celles du su secteur N270°, N315° et N 345°.

La transformation des caractéristiques des vagues du large vers la coté (Embouchure de l'Oued El Hamiz) en modèle numérique Mike 21 SW indique que les houles du secteur Ouest sont toutes transformées en quadrant Nord, que les houles provenant de la direction N270° sont les plus hautes avec une hauteur pique de 3.39 m au point 4.

Les houles de direction N270° sont celles qui seront prises pour le dimensionnement de notre aménagement.

Chapitre IV
Variantes
d'aménagement
hydraulique et
prédimensionnement

Chapitre IV Variantes d'aménagement hydraulique et prédimensionnement

Introduction

Afin de faire face à l'ensablement de l'embouchure de l'oued El Hamiz, il est impératif de projeter un système d'endiguement qui puisse stopper ou bien ralentir ce phénomène puisqu'un simple dragage ne peut être suffisant.

Dans ce présent chapitre, nous allons proposer deux variantes, qu'on pré-dimensionnera et enfin en se basant sur certains critères on choisira celle qui conviendra le plus.

IV.1 Pourquoi et comment aménager

L'estuaire est un lieu géographique où se mêle les actions de la mer (Houle et courant) avec l'oued. Suivant la force relative de chacun, l'estuaire va fonctionner différemment.

Dans le cas d'un estuaire stratifié qui, généralement, correspond à un débit fluvial important comparé à celui engendré par la marée, on constate un coin salé par lequel s'écoule le fleuve. En eau douce calme, les particules isolées d'argile ont une vitesse de chute de l'ordre de 0.3 mm/h et restent donc en suspension. Dès que la concentration en sel avoisine 3 g/L, ces argiles flocculent et la vitesse de chute est, alors, multipliée par un facteur de 1000. Causant dans ce cas-là, un dépôt des sédiments en amont de l'embouchure.

Par ailleurs, lorsque les houles normales à l'embouchure se réfractent, elles donnent un courant assurant un important transport solide vers la côte.

Étant donné que la marée est considérée comme étant faible dans notre zone d'Étude, puisque le marnage n'atteint pas 1 mètre, notre embouchure est alors le siège de dépôt de sédiments fluviaux. Entre autres, les courants transportent avec eux des sédiments du large vers la côte. Tout ceci engendre alors l'ensablement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz.

Afin de lutter contre le phénomène d'ensablement de l'embouchure, on va projeter de deux épis qui seront raccordés à l'aménagement de l'oued El Hamiz par la suite. Ce qui réduira le transport sédimentaire du large vers la côte.

IV.2 L'épi, ses composants et ses outils de dimensionnement

L'aménagement des estuaires et embouchures consiste généralement à mettre en œuvre un système d'épis puisque comme nous l'avons vu dans le **chapitre I**, sa fonction principale est de ralentir le transit sédimentaire.

Voyons voir maintenant, quels sont les composants de cet ouvrage et son principe de dimensionnement.

IV.2.1 Les composants d'un épi

Les composants d'un épi sont les mêmes que ceux d'une digue à talus, c'est-à-dire;

- La carapace ;
- La première sous couche ;
- La deuxième sous couche ;
- Noyau ;
- Butée de pieds ;
- Musoir.

IV.2.1.1 La carapace :

De tous les éléments constitutifs d'une digue à talus, la carapace est certainement celui qui a fait l'objet des études les plus approfondies. Toutefois, son comportement sous l'action de la houle n'est pas totalement connu et bien des incertitudes subsistent (Caminade, 1995). De nombreuses méthodes empiriques d'estimation de la taille de l'enrochement naturel requise pour garantir la stabilité face à l'attaque de la houle ont été proposées au cours des 60 dernières années. Les travaux de recherche d'Iribarren (1938), Hudson (1953, 1959), Hedar (1960, 1986) et de Van der Meer (1988) ont donné les méthodes de dimensionnement les plus fréquemment utilisées en génie civil.

IV.2.1.2 La sous couche :

Le noyau réalisé avec des éléments de petite taille ne peut en général pas résister à la houle venant frapper l'ouvrage. Il devra être défendu par une carapace dont les éléments peuvent atteindre plusieurs dizaines de tonnes. Entre les deux, il est nécessaire de disposer des éléments de transition : la ou les sous-couches qui ont un rôle multiple.

Le premier rôle que doivent assurer les sous-couches est un rôle de filtre granulométrique permettant de retenir les matériaux les plus fins. On pourra à cet effet vérifier que les règles énoncées par Terzaghi sont bien respectées. (Caminade, 1995)

Les règles de Terzaghi établies pour des matériaux de faible dimension (sables, graviers ou cailloux) sont :

$$D_{15}(\text{filtre}) \leq 5 D_{85}(\text{noyau})$$

$$D_{50}(\text{filtre}) \leq 25 D_{50}(\text{noyau})$$

$$4 \leq \frac{D_{15}(\text{filtre})}{D_{15}(\text{noyau})} \leq 20$$

D_x : la dimension du tamis pour lequel on observe x % de passant. D'une manière pratique, le *Shore Protection Manual*, 1984 préconisent que les poids moyens respectifs des enrochements des diverses couches soient :

- W : poids moyen de la carapace ;
- W/10 : poids moyen de la première sous-couche ;
- W/200 : poids moyen de la deuxième sous-couche ;
- W/4000 a W/6000 : poids moyen des éléments du noyau.

IV.2.1.3 Le noyau :

Une attention particulière doit être apportée à la réalisation du noyau car cela conditionne la qualité de l'ouvrage. Le noyau devra être non poreux pour arrêter les ondes longues contenues dans la houle et donc comporter des éléments fins en quantité suffisante.

Pour qu'il puisse être mis en œuvre et résister à la houle lors de la construction ainsi qu'aux pressions transmises dans l'ouvrage fini, il devra être bien charpenté. On recourra donc à un tout-venant bien graduée de 0 à 500 kg ou 0 à 1 t. (Caminade, 1995)

IV.2.1.4 La butée de pied :

De façon à éviter que les carapaces ne glissent trop en partie basse, il est souvent utile d'en bloquer le pied par un massif d'encrochements.

Lorsque cette butée de pied est directement soumise à l'action de la houle, c'est-à-dire que la hauteur d'eau h disponible au-dessus de celle-ci est inférieure à 1,3 fois le creux de la houle de projet, elle sera constituée de blocs identiques à ceux de la carapace.

IV.2.1.5 Le musoir :

L'extrémité d'une digue, le musoir, est soumise à une action renforcée de la houle qui l'attaque directement mais aussi « par derrière » grâce à la diffraction et à la réfraction sur le massif de pied. Il en résulte que la zone la plus sollicitée se situe approximativement à 45° de la direction de la houle incidente et à peu près au niveau de l'eau (niveau de référence du moment).

Du fait de la diffraction autour du musoir, on peut considérer que le côté intérieur de la digue est soumis à une action de la houle équivalente à celle de la houle extérieure sur environ un quart de longueur d'onde puis diminue progressivement pour atteindre les caractéristiques de la houle intérieure à environ une longueur d'onde de celui-ci.

Les aménagements propres au musoir seront donc fonction de nombreux paramètres dont l'un d'entre eux, particulièrement important, est le choix du type de bloc retenu pour la carapace. On considère généralement que, toutes choses égales par ailleurs, l'agressivité accrue des lames sur un musoir peut se traduire en moyenne par une diminution de 20 % du coefficient de stabilité K_D de la formule d'Hudson. Cette valeur moyenne est à pondérer car il est nécessaire de tenir compte de la plus ou moins grande aptitude du bloc à résister aux attaques latérales de la houle.

IV.2.2 Outils de dimensionnement

IV.2.2.1 Poids des blocs de la carapace :

Hudson (1959) a mis au point l'Équation III., qui repose sur des essais sur modèles dans des conditions de houle régulière sur des ouvrages en encrochement non-franchis et à noyau perméable. Elle donne la relation entre le poids médian de l'encrochement W_{50} (N), la hauteur de la houle en pied d'ouvrage, H (m), et les différents paramètres structurels pertinents. Cette formule de stabilité, bien connue sous le nom de formule de Hudson, est présentée ici en unités SI, qui ont remplacé les unités d'origine et symboles associés.

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad \text{IV.1}$$

- W_{50} : poids médian des blocs en tonne ;
- γ_s : masse volumique des blocs ;
- γ_0 : masse volumique de l'eau de mer = 1.028 t/m³ ;
- K_D : coefficient de stabilité lié au type de blocs (**Tableau IV.1**) ;
- H : la hauteur de la houle de dimensionnement, selon le *Shore Protection Manuel* (SPM,1984), il est conseillé de prendre $H_{1/10}$ (=1.27Hs) comme hauteur de dimensionnement ;
- $\cot(\alpha)$: fruit du talus de l'ouvrage.

Tableau IV.1 Coefficients de stabilité de Hudson pour un dommage nul et un franchissement léger (CETMEF, 2009)

Matériaux	Pente	Section courante		Musoir	
		Houle déferlante	Houle non déferlante	Houle déferlante	Houle non déferlante
Enrochement	3/2	3.5	4.0	2.9	3.2
	2/1			2.5	2.8
	3/1	-	-	2.0	2.3
Tétrapode	3/2	7.2	8.3	5.9	6.6
	2/1			5.5	6.1
Dolos	2/1	22.0	25.0	15.0	15.5
	3/1			13.5	15
Blocs cubiques rainurés	3/2	6.8	7.8	6.5	7.0
	2/1				

IV.2.2.2 Épaisseur de la couche et le nombre de blocs :

Pour le calcul de l'épaisseur de la carapace et de la sous couche, on utilise une formule extraite du « Shore manuel protection, Coastal Engineering Research Center » C.E.R.C- Us army, suivante :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \text{IV.2}$$

Où :

- e : épaisseur de la sous-couche ;
- n : nombre de lits ;
- k_{Δ} : coefficient tenant compte de la nature de la carapace voir (Tableau IV-2) ;
- W_{50} : poids des éléments constitutifs.

Le nombre N d'éléments à mettre en œuvre pour couvrir 1 m^2 de talus est alors :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{\gamma_s}{W_{50}}\right)^{2/3} \quad \text{IV.3}$$

Où :

- n : nombre de lits ;
- k_{Δ} : coefficient tenant compte de la nature de la carapace (Tableau IV-2) ;
- W_{50} : poids des éléments constitutifs ;
- P : la porosité exprimée en % voir (Tableau IV-2).

Tableau IV-2 Différents paramètres de calcul des couches et des carapaces (Caminade, 1995)

Nature	Nombre de couche	k_{Δ}	P (%)
Enrochement	2	1.15	37
Bloc cubique Antifer	2	1.02	46
Tétrapode	2	1.04	50
Dolos	2	1	63
Acropode	1	1.3	/

IV.3 Variantes d'aménagement hydraulique

IV.3.1 Variante d'aménagement numéro° 1

La première variante d'endiguement envisagée est composée de deux épis parallèles, inclinés par rapport à la côte, orientés vers la direction 295° Nord, qui a été choisie de façon à ce qu'elle soit avoisinante de la direction de la houle prédominante. Et une distance entre axes d'environ 73 m.

Les épis se prolongent en mer jusqu'à une profondeur d'environ 5 m NGA. Quant à leur longueur, elle est égale à 323 m chacun.

Chaque épi sera constitué de deux parties, une partie musoir (Profil A-A) et une partie courante.

La partie courante à son tour sera composée de trois profils, qui sont comme suit :

- Profil B₁-B₁ : qui s'étalera sur 39 m, pour une profondeur allant de 4 à 5 m ;
- Profil C₁-C₁ : qui s'étalera sur 54 m, pour une profondeur allant de 3 à 4 m ;
- Profil D₁-D₁ : qui s'étalera sur 230 m, pour une profondeur allant de 2 à 3 m.

IV.3.1.1 Prédimensionnement de la carapace des deux épis :

A. Poids des blocs :

Pour le calcul des poids des blocs de la carapace des deux épis, nous allons utiliser la formule IV.1 dite la formule de Hudson.

• La partie du musoir :

Définissons d'abord la valeur des différents paramètres :

- $H_s = 3.39$ m (profondeur = 5 m) ;
- $\gamma_s = 2.65$ t/m³ ; poids volumique moyen des enrochements ;
- $\gamma_w = 1.028$ t/m³
- $K_D = 2.9$, pour les houles déferlantes ;
- $\cot(\alpha) = 3/2$.

En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (3.39 \times 1.27)^3}{2.9 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

$$W_{50} = 12.37 \text{ t}$$

Puisqu'il n'existe pas dans le marché des enrochements naturels dont le poids est égale à 12 tonnes, nous devons donc opter pour des blocs artificiels, le type choisit est les blocs de tétrapodes.

On obtiendra alors pour les mêmes paramètres que pour les enrochements naturels, sauf que $\gamma_s = 2.4$ t/m³ pour les tétrapodes et $K_D = 5.9$:

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.4 \times (3.39 \times 1.27)^3}{5.9 \times \left(\frac{2.4}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

$$W_{50} = 9.10 \text{ t}$$

La carapace du musoir sera donc composée de tétrapodes d'un poids de 10 tonnes.

- **La partie courante :**

Pour la partie courante nous définissons les valeurs des paramètres comme suit :

Tableau IV.3 – Paramètres de la formule de Hudson pour les trois profils de la partie courante

	Profil B ₁ -B ₁	Profil C ₁ -C ₁	Profil D ₁ -D ₁
H _s (m)	2.80	2.20	1.77
Profondeur (m)	4	3	2
γ _s (t/m ³)	2.65	2.65	2.65
γ _w (t/m ³)	1.028	1.028	1.028
K _D	3.5	3.5	3.5
Cot (α)	3/2	3/2	3/2

❖ **Profil B₁-B₁ :** En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (2.8 \times 1.27)^3}{3.5 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

$$W_{50} = 5.70 \text{ t}$$

La carapace du profil B₁-B₁ sera composée d'enrochements naturels d'un poids allant de 3 à 6 tonnes.

❖ **Profil C₁-C₁** : En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (2.2 \times 1.27)^3}{3.5 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

W₅₀ = 2.80 t

Pour le profil C₁-C₁ de la partie courante, on prendra des enrochements naturels d'un poids allant de 1 à 3 tonnes.

❖ **Profil D₁-D₁** : En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (1.77 \times 1.27)^3}{3.5 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

W₅₀ = 1.45 t

Pour la carapace du dernier profil de la partie courante (profil D₁-D₁), on optera pour des enrochements naturels d'un poids qui varie de 1 à 1.5 tonne.

B. Épaisseur de la carapace :

Pour le calcul de l'épaisseur de la carapace, on utilisera la formule IV.2 extraite du « *Shore Manuel Protection*, Coastal Engineering Research Center », et pour le nombre d'éléments la formule IV.13.

- **La partie du musoir** :

Nous prendrons comme valeurs dans l'équation IV.2, pour le calcul de l'épaisseur :

- $n = 2$;
- $k_\Delta = 1.04$;
- $W_{50} = 10$ t.
- $\gamma_s = 2.4$ t/m³.

En remplaçant dans l'équation IV.2, nous aurons :

$$e = nk_\Delta \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 1.04 \times 2 \times \left(\frac{10}{2.4} \right)^{1/3}$$

e = 3.35 m

Pour le calcul du nombre d'éléments dans 1 m³, nous prendrons :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.04$;
- $W_{50} = 10 \text{ t}$;
- $\gamma_s = 2.4 \text{ t/m}^3$;
- $P = 50 \%$.

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.04 \left(1 - \frac{50}{100}\right) \left(\frac{2.4}{10}\right)^{2/3}$$

$$N = 0.40$$

donc 40 bloc/100 m²

• **La partie courante :**

Les valeurs des différents paramètres pour le calcul de l'épaisseur de la carapace et du nombre de blocs de la partie courante sont prescrites dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l'épaisseur de la carapace et du nombre de blocs

	Profil B ₁ -B ₁	Profil C ₁ -C ₁	Profil D ₁ -D ₁
n	2	2	2
k_{Δ}	1.15	1.15	1.15
W_{50} (t)	4.5	2	1.25
γ_s (t/m ³)	2.65	2.65	2.65
P (%)	37	37	37

❖ **Profil B₁-B₁** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{1/3} = 2 \times 1.15 \left(\frac{4.5}{2.65}\right)^{1/3}$$

$$e = 2.75 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100}\right) \left(\frac{2.65}{4.5}\right)^{2/3}$$

$$N = 1.00$$

donc : 100 bloc/100 m²

❖ **Profil C₁-C₁** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{1/3} = 2 \times \left(\frac{2}{2.65}\right)^{1/3}$$

$$e = 1.85 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100}\right) \left(\frac{2.65}{2}\right)^{2/3}$$

$$N = 1.74$$

donc : 174 bloc/100 m²

❖ **Profil D₁-D₁** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{1/3} = 2 \times \left(\frac{1.25}{2.65}\right)^{1/3}$$

$$e = 1.55 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100}\right) \left(\frac{2.65}{1.25}\right)^{2/3}$$

$$N = 2.39$$

donc : 239 bloc/100 m²

IV.3.1.2 Prédimensionnement de la sous couche des deux épis :

A. Poids des blocs :

Le poids de la sous couche est donné par le rapport $W/10$, où W représente le poids moyen des blocs de la couche.

Le tableau ci- dessous regroupe le poids des blocs pour les différents profils de l'épi.

Tableau IV.5 – Poids des blocs de la sous couche

	W_{couche} (t)	$W/10$ (t)	$W_{\text{sous-couche}}$
Profil A ₁ -A ₁ (musoir)	10	1	1-2
Profil B ₁ -B ₁	4.5	0.45	0.5-1
Profil C ₁ -C ₁	2	0.20	0.5-1
Profil D ₁ -D ₁	1.25	0.125	0.5-1

B. Épaisseur et nombre de blocs :

Pour le calcul de l'épaisseur de la sous couche, on utilisera la formule **IV.2** extraite du « *Shore Manual Protection*, Coastal engineering Research Center », et pour le nombre d'éléments la formule **IV.13**.

- **La partie du musoir :**

Nous prendrons comme valeurs dans l'équation **IV.2**, pour le calcul de l'épaisseur :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.15$;
- $W_{50} = 1.5$ t.
- $\gamma_s = 2.65$ t/m³.

En remplaçant dans l'équation **IV.2**, nous aurons :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 1.15 \times 2 \times \left(\frac{1.5}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.90 \text{ m}$$

Pour le calcul du nombre d'éléments dans 1 m³, nous prendrons :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.15$;
- $W_{50} = 1.5$ t ;
- $\gamma_s = 2.65$ t/m³ ;
- $P = 37$ %.

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100}\right) \left(\frac{2.65}{1.5}\right)^{2/3}$$

$$N = 2.11$$

donc : 211 bloc/100 m²

- **La partie courante :**

Les valeurs des différents paramètres pour le calcul de l'épaisseur de la sous couche et du nombre de blocs de la partie courante sont prescrites dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l'épaisseur de la sous couche et du nombre de blocs

	Profil B ₁ -B ₁	Profil C ₁ -C ₁	Profil D ₁ -D ₁
n	2	2	2
k_{Δ}	1.15	1.15	1.15
W_{50} (t)	0.75	0.75	0.75
γ_s (t/m ³)	2.65	2.65	2.65
P (%)	37	37	37

❖ **Profil B₁-B₁** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times 1.15 \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.50 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{2.65}{0.75} \right)^{2/3}$$

$$N = 3.36$$

donc : 336 bloc/100 m²

❖ **Profil C₁-C₁** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.50 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{2.65}{0.75} \right)^{2/3}$$

$$N = 3.36$$

donc : 336 bloc/100 m²

❖ **Profil D₁-D₁** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.50 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100}\right) \left(\frac{2}{0.75}\right)^{2/3}$$

$$N = 3.36$$

donc : 336 bloc/100 m²

IV.3.1.3 Prédimensionnement du noyau des deux épis :

Pour le noyau on optera pour un tout-venant carrière dont le poids varie entre 1 et 500 Kg.

IV.3.1.4 Vérification de Terzaghi :

Entre le noyau et la sous-couche, Afin de limiter l'entraînement des éléments fins vers les couches de matériaux plus gros, on utilise la règle de TERZAGHI.

Pour vérifier le critère de (Terzaghi ,1922) il faut calculer le plus petit et le plus grand diamètre constituant la couche :

$$\Phi_i = 2 \left(3 \frac{W_i}{4\pi\gamma_s}\right)^{1/3} \quad \text{IV-4}$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_s}{4\pi\gamma_s}\right)^{1/3} \quad \text{IV-5}$$

On calcule le pourcentage en diamètre par la formule suivante :

$$D_i = i(\Phi_s + \Phi_i) + \Phi_i \quad \text{IV-6}$$

L'indice i dans l'équation IV-21 représente le pourcentage en poids de diamètre inférieur à D.

a. la sous-couche du musoir (1 t-2 t)

$$\Phi_i = 2 \left(3 \frac{W_i}{4\pi\gamma_s}\right)^{1/3} = \Phi_i = 2 \left(3 \frac{1}{4\pi \times 2.65}\right)^{1/3}$$

$$\Phi_i = 0.89 \text{ m} = 890\text{mm}$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_s}{4\pi\gamma_s}\right)^{1/3} = 2 \left(3 \frac{2}{4\pi \times 2.65}\right)^{1/3}$$

$$\Phi_s = 1.12 \text{ m} = 1120 \text{ mm}$$

Donc pour les diamètres, on aura :

- $D_{15} = 0.15 \times (1.12 - 0.89) + 0.89 = 0.925 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 925 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.5 \times (1.12 - 0.89) + 0.89 = 1.00 \text{ m} \Rightarrow D_{50} = 1000 \text{ mm}$
- $D_{85} = 0.85 \times (1.12 - 0.89) + 0.89 = 1.08 \text{ m} \Rightarrow D_{85} = 1080 \text{ mm}$

b. Pour le noyau du musoir :

$$\Phi_i = 0$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_s}{4\pi\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \left(3 \frac{0.5}{4\pi \times 2.65} \right)^{1/3} = 0.70 \text{ m}$$

Pour les diamètres :

- $D_{15} = 0.15 \times 0.7 = 0.105 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 105 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.5 \times 0.7 = 0.35 \text{ m} \Rightarrow D_{50} = 350 \text{ mm}$
- $D_{85} = 0.85 \times 0.7 = 0.595 \text{ m} \Rightarrow D_{85} = 595 \text{ mm}$

c. Vérification :

$$\frac{D_{15}(SC)}{D_{85}(N)} = \frac{0.925}{0.595} = 1.55 < 5$$

$$\frac{D_{50}(SC)}{D_{50}(N)} = \frac{1.00}{0.350} = 2.85 < 25$$

$$4 < \frac{D_{15}(SC)}{D_{15}(N)} = \frac{0.925}{0.105} = 8.80 < 20$$

On en déduit alors que la condition de Terzaghi est vérifiée pour le musoir.

d. La sous couche de la partie courante (0.5 t- 1 t) :

$$\Phi_i = 2 \left(3 \frac{W_i}{4\pi\gamma_s} \right)^{1/3} = \Phi_i = 2 \left(3 \frac{0.5}{4\pi \times 2.65} \right)^{1/3}$$

$$\Phi_i = 0.71 \text{ m} = 710 \text{ mm}$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_i}{4\pi\gamma_s} \right)^{1/3} = \Phi_i = 2 \left(3 \frac{1}{4\pi \times 2.65} \right)^{1/3}$$

$$\Phi_s = 0.89 \text{ m} = 890 \text{ mm}$$

Donc pour les diamètres, on aura :

- $D_{15} = 0.15 \times (0.89 - 0.71) + 0.71 = 0.737 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 737 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.5 \times (0.89 - 0.71) + 0.71 = 0.8 \text{ m} \Rightarrow D_{50} = 800 \text{ mm}$
- $D_{85} = 0.85 \times (0.89 - 0.71) + 0.71 = 0.863 \text{ m} \Rightarrow D_{85} = 863 \text{ mm}$

e. Pour le noyau de la partie courante :

$$\Phi_i = 0$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_s}{4\pi\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \left(3 \frac{0.5}{4\pi \times 2.65} \right)^{1/3} = 0.70 \text{ m}$$

Pour les diamètres :

- $D_{15} = 0.15 \times 0.7 = 0.105 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 105 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.5 \times 0.7 = 0.35 \text{ m} \Rightarrow D_{50} = 350 \text{ mm}$
- $D_{85} = 0.85 \times 0.7 = 0.595 \text{ m} \Rightarrow D_{85} = 595 \text{ mm}$

f. Vérification :

$$\frac{D_{15}(SC)}{D_{85}(N)} = \frac{0.737}{0.595} = 1.23 < 5$$

$$\frac{D_{50}(SC)}{D_{50}(N)} = \frac{0.8}{0.350} = 2.28 < 25$$

$$4 < \frac{D_{15}(SC)}{D_{15}(N)} = \frac{0.737}{0.105} = 7.01 < 20$$

On en déduit alors que la condition de Terzaghi est vérifiée pour la partie courante aussi.

IV.3.1.5 Calcul de la largeur de la crête :

Il n'y a pas de formule précise pour le calcul de la largeur de la crête d'une digue, néanmoins sa largeur doit être déterminée en fonction des possibilités d'établissement d'une route de construction suffisamment large pour permettre aux engins qui déversent les blocs de dépasser la grue et de faire demi-tour.

Donc notre choix se porte arbitrairement sur une largeur de 16m.

IV.3.1.6 Calcul de la cote d'arase des deux épis :

Pour la hauteur de la revanche, on prendra une revanche qui est de 1.4 fois la hauteur maximal (Caminade, 1995) donc pour une hauteur de houle maximale égale à 2.80 m, on aura :

$$H_c = 1.4 \times 2.8$$

$$H_c = 3.92 \text{ m} = 4 \text{ m}$$

IV.3.1.7 Calcul du franchissement :

Le franchissement de la houle fait partie des interactions hydrauliques, il sert à déterminer le niveau de la crête et se repose sur l'estimation du débit spécifique.

Dans notre cas en calculant le débit spécifique de franchissement, nous verrons si la hauteur des épis choisie préalablement nous garantie un débit de franchissement acceptable.

Méthode d'Owen (1980)

Pour calculer le débit franchissant moyenner sur le temps pour des talus lisses, la revanche adimensionnelle, R^* , et le débit franchissant spécifique adimensionnel Q^* , ont été déterminés par Owen ,1980 grâce aux Équations **IV-7** et **IV-8** et en utilisant la période moyenne de la houle T_m (s), et la hauteur significative de la houle, H_s (m), au pied de l'ouvrage :

$$R^* = \frac{R_c}{T_m \sqrt{g H_s}} \quad \text{IV.7}$$

$$Q^* = \frac{q}{T_m g H_s} \quad \text{IV.8}$$

Où R_c représente la revanche, c à d la hauteur de la crête par rapport au niveau d'eau au repos, q est le débit franchissant spécifique moyen ($\text{m}^3/\text{s}/\text{ml}$).

L'Équation **IV-9** donne la relation entre les paramètres adimensionnels définis dans les Équations IV-4 et IV-5. Elle est valable pour $0.05 < R^* < 0.6$.

$$Q^* = a \exp(-b R^* / \gamma_f) \quad \text{IV-9}$$

- a : coefficient en relation avec le talus (voir tableau) ;
- b : coefficient en relation avec le talus (voir tableau) ;
- R^* : Revanche adimensionnel ;
- γ_f : facteur de correction de rugosité (voir tableau).

Application numérique :

On a :

- $H_s = 2.8 \text{ m}$;
- $T_m = 10.58 \text{ s}$;
- $R_c = 4 \text{ m}$;

- $\cot \alpha = 3/2$;
- $\gamma_f = 0.4$;
- $a = 8.84 \cdot 10^{-3}$, $b = 19.9$.

En remplaçant dans la formule **IV.4**, on trouve :

$$R^* = \frac{R_c}{T_m \sqrt{gH_s}} = \frac{4}{10.58 \sqrt{9.81 \times 2.80}}$$
$$R^* = 0.072$$

Puisque $0.05 < 0.072 < 0.6$ donc on peut appliquer l'équation **IV-6** :

$$Q^* = a \exp(-b R^* / \gamma) = 8.84 \cdot 10^{-3} \exp(-19.9 \times 0.072 / 0.4)$$
$$Q^* = 2.4 \cdot 10^{-4}$$

En remplaçant dans l'équation **IV-8**, on trouve :

$$Q^* = \frac{q}{T_m \sqrt{gH_s}} \Rightarrow q = Q^* \times T_m \sqrt{gH_s} = 2.4 \cdot 10^{-4} \times 10.58 \times \sqrt{9.81 \times 2.8}$$

$$q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

D'après le tableau (X) dans l'annexe, pour une crête non protégée un débit spécifique de franchissement d'une valeur de $0.013 \text{ m}^3/\text{s/ml}$ est tolérable.

IV.3.1.8 Prédimensionnement de la butée de pied :

Pour le poids de la butée de pieds il suffit de calculer le poids suivant l'équation **IV.10**, (Caminade, 1995) :

$$W_b = \frac{0.1}{K_D} \frac{\gamma_s H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3 \cot \alpha} \frac{h}{H} \quad \text{IV.10}$$

Où :

- h : représente la hauteur au pied de l'ouvrage ;
- H : $H_{1/10} = 1.27 H_s$.

Donc, pour :

- $h = 5 \text{ m}$;
- $H = 1.27 \times 3.39$;
- $K_D = 3.5$;

- $\gamma_b = 2.65 \text{ t/m}^3$;
- $\gamma_0 = 1.028 \text{ t/m}^3$;
- $\cot \alpha = 3/2$.

On aura :

$$W_b = \frac{0.1}{3.5} \frac{2.65(3.39 \times 1.27)^3}{\left(\frac{2.65}{1.028} - 1\right)^3 \times \frac{3}{2}} \frac{5}{(3.39 \times 1.27)}$$

$$W_b = 1.19 \text{ t}$$

Pour la butée de pied on prendra des enrochements naturels d'un poids variant de 1 à 2 tonnes.

En utilisant les formules **IV.2** et **IV.3** pour le calcul de l'épaisseur de la butée de pied et du nombre de blocs, on trouvera :

$$e = 1.90 \text{ m}$$

$$N = 2.11 ; \text{ donc } 211 \text{ bloc}/100 \text{ m}^2$$

IV.3.1.9 Vérification hydraulique :

Afin de vérifier la stabilité des matériaux du côté Oued par rapport la crue centennale mais aussi le débordement, il est nécessaire de déterminer la vitesse du courant et la hauteur d'eau entre les deux épis.

A. Détermination de la hauteur d'écoulement et de la vitesse du courant :

L'équation de l'écoulement à surface libre est formulée par Manning-Strickler comme suit :

$$Q = U.S = KR_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} . S \quad \text{IV.11}$$

Où :

- Q : Débit d'écoulement (m^3/s) ;
- U : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) ;
- S : section mouillée (m^2) ;
- R_h : rayon hydraulique (m) ;
- I : pente moyenne du cours d'eau (m/m) ;
- K : coefficient de rugosité du lit ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$).

Application numérique : On a :

- $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $M = 3/2$;
- $K = 23$ (pour la roche) ;
- $I = 1.10 \%$;
- $b = 45 \text{ m}$.

En remplaçant dans l'équation, on a :

$$Q = KR_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} . S = 23 \frac{\left(45 + \frac{3}{2}h\right) h^{5/3}}{\left(45 + 2h\sqrt{1 + \frac{3}{2}}\right)^{2/3}} \sqrt{\frac{1.10}{100}}$$

Par itération, on trouve :

$$h \cong 3.7 \text{ m et } U = 5.34 \text{ m/s}$$

B. Vérification de la taille des enrochements des épis vis-à-vis de la vitesse d'écoulement :

La formule ci-dessous donne le diamètre d'un enrochement (assimilé à une sphère) sur fond de faible pente ou plat en milieu fluvial, pouvant résister par son poids propre à la vitesse du courant :

$$d = 0.7 \frac{\gamma}{\gamma' - \gamma} \cdot \frac{V_v^2}{2g} \quad \text{IV.12}$$

Où :

- V_v : la vitesse du courant au voisinage de l'enrochement [m/s]
- γ, γ' : Poids spécifique respectivement de l'eau et du matériau [t/m³]
- R_h : rayon hydraulique [m]
- g : accélération de la pesanteur [m/s²].

On suppose que le poids spécifique des enrochements est d'au moins 2.6 t/m³.

D'où le diamètre :

$$d = 0.7 \left(\frac{1.03}{2.6 - 1.03} \right) \cdot \frac{5.34^2}{2 \times 9.81}$$

$$d = 0.66 \text{ m}$$

Lorsque les enrochements sont placés en talus, l'angle réduit la stabilité de l'enrochement. LANE a défini le rapport des forces nécessaires pour mettre en mouvement des enrochements identiques placés dans les mêmes conditions d'écoulement, les uns sur des talus, les autres sur un fond horizontal. Ce rapport est formulé comme suit :

$$\lambda = \cos \phi \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi}{\text{tg}^2 \theta}} \quad \text{IV.13}$$

Où :

- ϕ : est l'angle avec l'horizontale de la pente du perré [$^\circ$] ($\phi = 34^\circ$)
- θ : est l'angle avec l'horizontale du talus d'équilibre du matériau [$^\circ$], on admet pour les enrochements un angle moyen $\theta = 40^\circ$.

Par conséquent :

$$D \text{ enrochement sur talus} = \frac{d \text{ enrochement sur fond horizontal}}{\lambda} \quad \text{IV.14}$$

Dans ces conditions :

$$\lambda = \cos 34 \sqrt{1 - \frac{(\tan 34)^2}{(\tan 40)^2}}$$
$$\lambda = 0.49$$

et donc :

$$D = \frac{d}{\lambda} = \frac{0.66}{0.49}$$
$$D = 1.30 \text{ m}$$

Le poids correspondant à une sphère de diamètre $D = 1.30 \text{ m}$ est donné par la relation suivante :

$$W = V \cdot \gamma_s = \frac{4}{3} \pi (r)^3 \cdot \gamma_s \quad \text{IV.15}$$

Où :

- W : le poids des enrochements (t) ;
- r : le rayon $= \frac{D}{2} = 0.65 \text{ m}$;
- V : le volume d'une sphère.

Application numérique :

$$w = \frac{4}{3} \pi \times (0.65)^3 \times 2.6$$

$$W = 2.90 \text{ t}$$

C. Conclusion :

Sur la base de ces résultats obtenus, on peut conclure que la catégorie d'enrochements de (1-1.5) tonne proposée initialement pour le profil D₁-D₁ avec une côte d'arase de 4m, ne convient pas pour la partie oued de l'embouchure puisque la stabilité des enrochements est menacée. Il est nécessaire alors les substituer avec des enrochements d'un poids allant de 1 à 3 tonnes. Puisqu'il n'y a pas risque de débordement (submersion), la hauteur de la crête reste inchangée.

Tableau IV.7 – Caractéristiques des deux épis de la variante numéro 1

						La carapace			Le sous-couche			Le noyau
		Long (m)	Haut (m)	Lar (m)	Fruit Du talus	W _{carapace} (t)	Escarapace (m)	N _{blocs.c} bloc/100m ²	W _{sc} (t)	e _{sc} (m)	N _{blocs.sc} bloc/100m ²	W _{noyau} (t)
Musoir	Profil A ₁ -A ₁	15	-	16	3/2	Tétrapodes 10	3.35	40	Enrochements 1-2	1.9	211	TVC 0-0.5
Partie Courante	Profil B ₁ -B ₁	24	4	16	3/2	Enrochements 3-6	2.75	100	Enrochements 0.5-1	1.50	336	TVC 0-0.5
	Profil C ₁ -C ₁	54	4	16	3/2	Enrochements 1-3	1.85	174	Enrochements 0.5-1	1.50	336	TVC 0-0.5
	Profil D ₁ -D ₁	230	4	16	3/2	Enrochements 1-1.5 (Partie mer)	1.55	239	Enrochements 0.5-1	1.50	336	TVC 0-0.5
	Enrochements 1-3 (Partie Oued)											
Butée de pied		-	-	-	-	Enrochements 1-2	1.90	211	-	-	-	-

IV.3.2 Variante d'aménagement numéro 2 :

La deuxième variante d'endiguement envisagée est composée de deux épis parallèles, inclinés par rapport à la côte, orientés vers la direction 295° Nord et une distance entre axes d'environ 73 m.

Les épis se prolongent en mer jusqu'à la profondeur de 4 m NGA. Quant à leurs longueurs, les deux s'étalent sur 280 m.

Chaque épi sera constitué de deux parties, une partie musoir (Profil A₂-A₂) et une partie courante.

La partie courante à son tour sera composée de trois profils, qui sont comme suit :

- Profil B₂-B₂ : qui s'étalera sur 50 m, pour une profondeur allant jusqu'à 3 m ;
- Profil C₂-C₂ : qui s'étalera sur 230 m, pour une profondeur allant à 2 m.

IV.3.2.1 Prédimensionnement de la carapace des deux épis :

A. Poids des blocs :

Pour le calcul des poids des blocs de la carapace des deux épis, nous allons utiliser la formule IV.1 dite la formule de Hudson.

- **La partie du musoir :**

Définissons d'abord la valeur des différents paramètres :

- H_s = 2.80 m ;
- γ_s = 2.65 t/m³ ; poids volumique moyen des enrochements ;
- γ_w = 1.028 t/m³
- K_D = 2.5, pour les houles déferlantes ;
- cot (α) = 2/1.

En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (2.80 \times 1.27)^3}{2.5 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{2}{1}}$$

$$W_{50} = 6.6 \text{ t}$$

Les enrochements naturels dont le poids est supérieur à 6t sont quasiment introuvables sur le marché, nous devons donc opter pour des blocs artificiels, pour cette variante nous allons choisir des blocs de type blocs cubiques rainurés (BCR).

On obtiendra alors pour les paramètres que pour les enrochements naturels, sauf que γ_s = 2.4 t/m³ pour les BCR et K_D = 6.5 :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.4 \times (2.80 \times 1.27)^3}{6.5 \times \left(\frac{2.4}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

$$W_{50} = 3.49 \text{ t}$$

La carapace du musoir est donc composée de BCR d'un poids de 4 tonnes.

- **La partie courante :**

Pour la partie courante nous définissons les valeurs des paramètres comme suit :

Tableau IV.8 – Paramètres de la formule de Hudson pour les trois profils de la partie courante

	Profil B ₂ -B ₂	Profil C ₂ -C ₂
H _s (m)	2.20	1.77
Profondeur (m)	3	2
γ _s (t/m ³)	2.65	2.65
γ _w (t/m ³)	1.028	1.028
K _D	3.5	3.5
Cot (α)	2/1	2/1

❖ **Profil B₂-B₂ :** En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (2.20 \times 1.27)^3}{3.5 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1\right)^3 \times \frac{2}{1}}$$

$$W_{50} = 2.10 \text{ t}$$

La carapace du profil B₂-B₂ sera composée d'encrochements naturels d'un poids allant de 1 à 3 tonnes.

❖ **Profil C₂-C₂ :** En remplaçant dans l'équation IV.1, on aura :

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{2.65 \times (1.77 \times 1.27)^3}{3.5 \times \left(\frac{2.65}{1.028} - 1 \right)^3 \times \frac{3}{2}}$$

$$W_{50} = 1.10 \text{ t}$$

Pour le profil C₂-C₂ de la partie courante, on prendra des enrochements naturels d'un poids allant de 1 à 1.5 tonnes.

B. Épaisseur de la carapace :

Pour le calcul de l'épaisseur de la carapace, on utilisera la formule **IV.2** extraite du « *Shore Manuel Protection, Coastal engineering Research Center* », et pour le nombre d'éléments la formule **IV.13**.

• **La partie du musoir** :

Nous prendrons comme valeurs dans l'équation **IV.2**, pour le calcul de l'épaisseur :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.02$;
- $W_{50} = 4 \text{ t}$.
- $\gamma_s = 2.4 \text{ t/m}^3$.

En remplaçant dans l'équation **IV.2**, nous aurons :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 1.02 \times 2 \times \left(\frac{4}{2.4} \right)^{1/3}$$

$$e = 2.40 \text{ m}$$

Pour le calcul du nombre d'éléments dans 1 m^3 , nous prendrons :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.02$;
- $W_{50} = 4 \text{ t}$;
- $\gamma_s = 2.4 \text{ t/m}^3$;
- $P = 46 \%$.

En remplaçant dans l'équation **IV.3**, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.02 \left(1 - \frac{46}{100} \right) \left(\frac{2.4}{4} \right)^{2/3}$$

$$N = 0.78$$

donc : 78 bloc/100 m²

- **La partie courante :**

Les valeurs des différents paramètres pour le calcul de l'épaisseur de la carapace et du nombre de blocs de la partie courante sont prescrites dans le tableau suivant :

Tableau IV.9 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l'épaisseur de la carapace et du nombre de blocs

	Profil B-B	Profil C-C
n	2	2
k_{Δ}	1.15	1.15
W_{50} (t)	2	1.25
γ_s (t/m ³)	2.65	2.65
P (%)	37	37

❖ **Profil B₂-B₂ :** En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times 1.15 \left(\frac{2}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$\mathbf{e = 2.10 \text{ m}}$$

En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{2.65}{2} \right)^{2/3}$$

$$\mathbf{N = 1.74}$$

donc : 174 bloc/100 m²

❖ **Profil C₂-C₂ :** En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times 1.15 \left(\frac{1.5}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.80 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{2.65}{1.5} \right)^{2/3}$$

$$N = 2.39$$

donc : 239 bloc/100 m²

IV.3.2.2 Prédimensionnement de la sous couche des deux épis :

A. Poids des blocs :

Le poids de la sous couche est donné par le rapport W/10, où W représente le poids moyen des blocs de la carapace.

Le tableau ci- dessous regroupe le poids des blocs pour les différents profils de l'épi.

Tableau IV.10 – Poids des blocs de la sous couche

	W _{couche} (t)	W/10 (t)	W _{sous-couche}
Profil A ₂ -A ₂ (musoir)	4	0.4	0.5-1
Profil B ₂ -B ₂	2	0.25	0.5-1
Profil C ₂ -C ₂	1.25	0.125	0.5-1

B. Épaisseur et nombre de blocs :

Pour le calcul de l'épaisseur de la couche, on utilisera la formule IV.2 extraite du « *Shore Manual Protection*, Coastal engineering Research Center », et pour le nombre d'éléments la formule IV.13.

- **La partie du musoir :**

Nous prendrons comme valeurs dans l'équation **IV.2**, pour le calcul de l'épaisseur :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.15$;
- $W_{50} = 0.75$ t.
- $\gamma_s = 2.65$ t/m³.

En remplaçant dans l'équation **IV.2**, nous aurons :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 1.15 \times 2 \times \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.50 \text{ m}$$

Pour le calcul du nombre d'éléments dans 1 m³, nous prendrons :

- $n = 2$;
- $k_{\Delta} = 1.15$;
- $W_{50} = 0.75$ t ;
- $\gamma_s = 2.65$ t/m³ ;
- $P = 37$ %.

En remplaçant dans l'équation **IV.3**, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{2.65}{0.75} \right)^{2/3}$$

$$N = 3.36$$

donc : 336 bloc/100 m²

- **La partie courante :**

Les valeurs des différents paramètres pour le calcul de l'épaisseur de la carapace et du nombre de blocs de la partie courante sont prescrites dans le tableau suivant :

Tableau IV.11 – Les paramètres des trois profils pour le calcul de l'épaisseur de la sous couche et du nombre de blocs

	Profil B ₂ -B ₂	Profil C ₂ -C ₂
n	2	2
k _Δ	1.15	1.15
W ₅₀ (t)	0.75	0.75
γ _s (t/m ³)	2.65	2.65
P (%)	37	37

❖ **Profil B₂-B₂** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times 1.15 \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.50 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{2/3}$$

$$N = 3.36$$

donc : 400 bloc/100 m²

❖ **Profil C₂-C₂** : En remplaçant dans l'équation IV.2, on aura :

$$e = nk_{\Delta} \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \times \left(\frac{0.75}{2.65} \right)^{1/3}$$

$$e = 1.50 \text{ m}$$

En remplaçant dans l'équation IV.3, on aura :

$$N = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s}\right)^{2/3} = 2 \times 1.15 \left(1 - \frac{37}{100}\right) \left(\frac{2.65}{0.75}\right)^{2/3}$$

$$N = 3.36$$

donc : 400 bloc/100 m²

IV.3.2.3 Prédimensionnement du noyau des deux épis :

Pour le noyau on optera pour un tout-venant carrière dont le poids varie entre 1 et 500 Kg.

IV.3.2.4 Vérification de Terzaghi :

Entre le noyau et la sous-couche, Afin de limiter l'entraînement des éléments fins vers les couches de matériaux plus gros, on utilise la règle de TERZAGHI.

a. La sous couche (0.5 t- 1 t) :

$$\Phi_i = 2 \left(3 \frac{W_i}{4\pi\gamma_s}\right)^{1/3} = \Phi_i = 2 \left(3 \frac{0.5}{4\pi \times 2.65}\right)^{1/3}$$

$$\Phi_i = 0.71 \text{ m} = 710\text{mm}$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_i}{4\pi\gamma_s}\right)^{1/3} = \Phi_i = 2 \left(3 \frac{1}{4\pi \times 2.65}\right)^{1/3}$$

$$\Phi_s = 0.89 \text{ m} = 890\text{mm}$$

Donc pour les diamètres, on aura :

- $D_{15} = 0.15 \times (0.89 - 0.71) + 0.71 = 0.737 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 737 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.5 \times (0.89 - 0.71) + 0.71 = 0.8 \text{ m} \Rightarrow D_{50} = 800 \text{ mm}$
- $D_{85} = 0.85 \times (0.89 - 0.71) + 0.71 = 0.863 \text{ m} \Rightarrow D_{85} = 863$

b. Pour le noyau (0 t-0.5 t) :

$$\Phi_i = 0$$

$$\Phi_s = 2 \left(3 \frac{W_s}{4\pi\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \left(3 \frac{0.5}{4\pi \times 2.65} \right)^{1/3} = 0.70 \text{ m}$$

Pour les diamètres :

- $D_{15} = 0.15 \times 0.7 = 0.105 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 105 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.5 \times 0.7 = 0.35 \text{ m} \Rightarrow D_{15} = 350 \text{ mm}$
- $D_{85} = 0.85 \times 0.7 = 0.595 \text{ m} \Rightarrow D_{85} = 595 \text{ mm}$

c. Vérification :

$$\frac{D_{15}(SC)}{D_{85}(N)} = \frac{0.737}{0.595} = 1.23 < 5$$

$$\frac{D_{50}(SC)}{D_{50}(N)} = \frac{0.8}{0.350} = 2.28 < 25$$

$$4 < \frac{D_{15}(SC)}{D_{15}(N)} = \frac{0.737}{0.105} = 7.01 < 20$$

On en déduit alors que la condition de Terzaghi est vérifiée.

IV.3.2.5 Calcul de la largeur de la crête :

La largeur de la crête des épis de la deuxième variante sera cette fois ci égale à 12m.

IV.3.2.6 Calcul de la cote d'arase des deux épis :

Pour la hauteur de la revanche, on prendra une revanche qui est de 1.4 fois la hauteur maximal (Caminade, 1995) donc pour une hauteur de houle maximale égale à 2.2 m, on aura :

$$H_c = 1.4 \times 2.2$$

$$\mathbf{H_c = 3.08 \text{ m} = 3.5 \text{ m}}$$

IV.3.2.7 Calcul du franchissement :

Le franchissement de la houle fait partie des interactions hydrauliques, il sert à déterminer le niveau de la crête et se repose sur l'estimation du débit spécifique.

Dans notre cas en calculant le débit spécifique de franchissement, nous verrons si la hauteur des épis choisie préalablement nous garantit un débit de franchissement acceptable.

- Méthode d'Owen (1980)

Application numérique : On a :

- $H_s = 2.2$ m ;
- $T_m = 9.77$ s ;
- $R_c = 3.5$ m ;
- $\cot \alpha = 2/1$;
- $\gamma_f = 0.4$;
- $a = 9.39 \cdot 10^{-3}$, $b = 21.6$.

En remplaçant dans la formule **IV.4**, on trouve :

$$R^* = \frac{R_c}{T_m \sqrt{gH_s}} = \frac{3.5}{9.77 \sqrt{9.81 \times 2.20}}$$
$$R^* = 0.077$$

Puisque $0.05 < 0.072 < 0.6$ donc on peut appliquer l'équation **IV-6** :

$$Q^* = a \exp(-b R^* / \gamma) = 9.39 \times 10^{-3} \exp(-21.6 \times 0.077 / 0.4)$$
$$Q^* = 1.46 \cdot 10^{-4}$$

En remplaçant dans l'équation **IV-8**, on trouve :

$$Q^* = \frac{q}{T_m \sqrt{gH_s}} \Rightarrow q = Q^* \times T_m \sqrt{gH_s} = 1.46 \cdot 10^{-4} \times 9.77 \times \sqrt{9.81 \times 2.2}$$

$$q = 0.006 \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

D'après le tableau (X) dans l'annexe, pour une crête non protégée un débit spécifique de franchissement d'une valeur de $0.006 \text{ m}^3/\text{s/ml}$ est tolérable.

IV.3.2.8 Prédimensionnement de la butée de pied :

Pour le poids de la butée de pieds il suffit de calculer le poids suivant l'équation **IV.10**.

Application numérique : Donc, pour :

- $h = 4$ m ;
- $H = 1.27 \times 2.8$;
- $K_D = 3.5$;
- $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$;
- $\gamma_0 = 1.028 \text{ t/m}^3$;
- $\cot \alpha = 3/2$.

On aura :

$$W_b = \frac{0.1}{3.5} \frac{2.65(2.8 \times 1.27)^3}{\left(\frac{2.65}{1.028} - 1\right)^3 \times \frac{3}{2}} \frac{4}{(2.8 \times 1.27)}$$

$$W_b = 0.64 \text{ t}$$

Pour la butée de pied on prendra des enrochements naturels d'un poids variant de 0.5 à 1 tonne.

En utilisant les formules **IV.2** et **IV.3** pour le calcul de l'épaisseur de la butée de pied et du nombre de blocs, on trouvera :

$$e = 1.50 \text{ m}$$

$$N = 3.36$$

$$\text{donc : } 336 \text{ bloc}/100 \text{ m}^2$$

IV.3.2.9 Vérification hydraulique :

Afin de vérifier la stabilité des matériaux du côté Oued par rapport la crue centennale mais aussi le débordement, il est nécessaire de déterminer la vitesse du courant et la hauteur d'eau entre les deux épis.

A. Détermination de la hauteur d'écoulement et de la vitesse du courant :

Le calcul de la hauteur d'eau et de la vitesse se fait par la formule **IV.11**
Dite la formule de Manning-Strickler.

Application numérique : On a :

- $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $M = 2/1$;
- $K = 23$ (pour la roche) ;
- $I = 1.10 \%$;
- $b = 47 \text{ m}$.

En remplaçant dans l'équation IV.11, on a :

$$Q = KR_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} . S = 23 \frac{\left(\left(47 + \frac{2}{1} h \right) h \right)^{5/3}}{\left(47 + 2h \sqrt{1 + \frac{2}{1}} \right)^{2/3}} \sqrt{\frac{1.10}{100}}$$

Par itération, on trouve :

$$\mathbf{h \cong 3.7 \text{ m et } U = 5.56 \text{ m/s}}$$

B. Vérification de la taille des enrochements des épis vis-à-vis de la vitesse d'écoulement :

On suppose que le poids spécifique des enrochements est d'au moins 2.6 t/m³.

D'où d'après l'équation IV.12 le diamètre :

$$d = 0.7 \left(\frac{1.03}{2.6 - 1.03} \right) \cdot \frac{5.56^2}{2 \times 9.81}$$

$$\mathbf{d = 0.73 \text{ m}}$$

Dans ces conditions, en utilisant la formule IV.13 :

$$\lambda = \cos 27 \sqrt{1 - \frac{(\tan 27)^2}{(\tan 40)^2}}$$

$$\mathbf{\lambda = 0.70}$$

Donc, d'après l'équation IV.14 :

$$D = \frac{d}{\lambda} = \frac{0.73}{0.70}$$

$$\mathbf{D = 1.04 \text{ m}}$$

Le poids correspondant à une sphère de diamètre **D = 1.04 m** est calculé avec la formule IV.15 :

Application numérique :

$$w = \frac{4}{3} \pi \times (0.52)^3 \times 2.6$$

$$W = 1.49 \text{ t}$$

C. Conclusion :

Sur la base de ces résultats obtenus, on peut conclure que la catégorie d'encrochements de (1-1.5) tonne proposée initialement pour le profil C₂- C₂ convient aussi pour la partie oued de l'embouchure puisque la stabilité des encrochements n'est pas menacée.

Pour ce qui de la hauteur de la revanche, celle-ci doit être augmentée puisqu'il y a risque de submersion dans le cas de crue. Donc la nouvelle côte d'arase sera de 4 m au lieu de 3.5 m.

Tableau IV.12 – Caractéristiques des deux épis de la variante numéro 2

						La carapace			La sous-couche			Le noyau
		Long (m)	Haut (m)	Lar (m)	Fruit du Talus	W _{carapace} (t)	E _{carapace} (m)	N _{blocs.c} bloc/100m ²	W _{sc} (t)	E _{sc} (m)	N _{blocs.sc} bloc/100m ²	W _{noyau} (t)
Musoir	Profil A ₂ -A ₂	10	-	12	2/1	BCR 4	2.6	67	Encrochements 0.5-1	1.50	336	TVC 0-0.5
Partie Courante	Profil B ₂ -B ₂	40	4	12	2/1	Encrochements 1-3	2.25	150	Encrochements 0.5-1	1.50	336	TVC 0-0.5
	Profil C ₂ -C ₂	230	4	12	2/1	Encrochements 1-1.5	1.65	211	Encrochements 0.5-1	1.50	336	TVC 0-0.5
Butée de pied		-	-	-	-	Encrochements 0.5-1	1.50	336	-	-	-	-

IV.4 Choix de la variante d'endiguement de l'embouchure :

IV.4.1 Devis estimatif des variantes d'endiguement

Afin de calculer le coût des deux variantes d'endiguement de l'embouchure de l'Oued El-Hamiz, il est impératif de calculer le volumes des matériaux constituant les épis (Encrochements et blocs). Pour ce faire, on a utilisé le logiciel d'aide à la conception et de dessin (Autocad). Puis pour le calcul des couts, on a considéré le prix pour chaque type de matériau comme il est estimé sur le marché en incluant la fourniture, transport et mise en place des matériaux.

Les tableaux IV.13 et IV.14 désignent respectivement le devis quantitatif et estimatif de la variante numéro 1 et la variante numéro 2.

Tableau IV.13- Devis quantitatif et estimatif de la variante numéro 1

Variante 01				
N°	Description	QTT (t)	PU (DA.Ht)	Prix total (DA)
1	Fourniture et mise en place des tétrapodes (10 t)	5 910	6 000.00	35 460 000.00
2	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (3-6t)	8 248	3 500.00	28 868 000.00
3	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-3t)	31 544	3 050.00	96 209 200.00
4	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-2t)	2 822	3 000.00	8 466 000.00
5	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-1.5t)	19 607	2 900.00	56 860 300.00
6	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (0.5-1t)	42 171	2 500.00	105 427 500.00
7	Fourniture, transport et mise en place du noyau en TVC (1-500Kg)	61 512	1 700.00	104 570 400.00
Prix total (DA)				435 861 400.00

Tableau IV.14- Devis quantitatif et estimatif de la variante numéro 2

Variante 02				
N°	Description	QTT (t)	PU (DA.Ht)	Prix total (DA)
1	Fourniture, transport et mise en place des BCR (4t)	2 811	4 500.00	12 649 500.00
2	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-3t)	10 870	3 050.00	33 153 500.00
3	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-1.5t)	42 203	2 900.00	122 388 700.00
4	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (0.5-1t)	36 596	2 500.00	91 490 000.00
5	Fourniture, transport et mise en place du noyau en TVC (1-500Kg)	42 702	1 700.00	72 593 400.00
Prix total (DA)				332 275 100.00

IV.4.2 Avantage et inconvénients de la variante 1

a. Avantages :

- Le passage sur modèle numérique sur le MIKE 21 ST montre que cette variante règle totalement la problématique de l'ensablement de l'embouchure et donc son entretien ne nécessite pas de grands moyens.
- La pente du talus de 3/2 maximise le volume des matériaux et offre alors une meilleure stabilité à la digue.
- D'un point de vue esthétique, les tétrapodes donnent un aspect esthétique favorable au développement touristique.
- Constitue un nouveau biotope rocheux qui sont colonisés rapidement par l'espèce végétale et animal.

b. Inconvénients :

- La différence des coûts entre cette variante et la deuxième est assez important.
- Le délai de réalisation est supérieur.
- La réalisation et la mise en place des matériaux sont plus difficiles que celles de la deuxième variante.

IV.4.3 Avantage et inconvénients de la variante 2

a. Avantages :

- Le coût de la réalisation est inférieur à celui de la première variante.
- La réalisation des deux épis prend moins de temps et est moins complexe que celle de la première variante.
- Constitue un nouveau biotope rocheux qui sont colonisés rapidement par l'espèce végétale et animal.

b. Inconvénients :

- Le passage par la modélisation numérique sur MIKE 21 ST, montre que la problématique de l'ensablement ne sera réglée que partiellement. Il faudrait donc envisager couramment des dragages pour l'entretien de l'endiguement, ce qui représente un coût assez conséquent en matériel et main d'œuvre.
- Le fruit du talus étant inférieur au premier, minimise le volume des matériaux et par conséquent réduit la stabilité de la digue.
- Le musoir composé de blocs cubiques rainurés se fond moins dans le paysage que les tétrapodes.

IV.4.4 Comparaison finale des variantes

Dans cette section nous allons attribuer des points pour chaque catégorie où l'ouvrages est bon ou moins bon. Tel que les lettre A, B et C désigne respectivement, favorable, peu favorable et défavorable. Le Tableau suivant développe les situations où les variantes sont favorables ou défavorables.

Tableau IV.15- Comparaison entre les deux variantes d'endiguement

Critères	Variante N° 01	Variante N° 02
Réalisation (Difficulté, délai...)	B	A
Coût de réalisation	B	A
Esthétique	A	B
Entretien	A	C
Impact	A	B
Total	3A+2B	2A+2B+C

Après avoir comparé entre les deux variantes d'endiguement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz, il est clair que la variante numéro 1 offre de meilleurs avantages par rapport à la deuxième. Même si cette dernière a un coût de réalisation assez élevé mais son entretien reste minime d'un point de vue main d'œuvre et coût, comparée à la deuxième qui, elle nécessite des dragages ce qui rendra son entretien plus couteux et plus complexe.

IV.4.5 Résultat et discussion

Après comparaison nous avons déduit que la première variante est la plus appropriée pour le projet de l'Endiguement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz. Néanmoins il faut souligner qu'un passage par le modèle physique est impératif. L'essai sur modèle réduit à fond mobile a pour but principal de vérifier la stabilité de l'ouvrage, ainsi que la vérification des taux admissibles de franchissement et enfin de s'assurer que la variante projetée règle la problématique du transport sédimentaire du large vers la côte.

Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons pu détecter les phénomènes qui ont mené à l'ensablement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz. Pour régler cette problématique, nous avons projeté deux variantes d'aménagement techniquement réalisables et économiquement faisables, toutes les deux sont composées de deux épis, la première s'étalait sur une longueur de 323 m et la deuxième quant à elle sur 280m. Le prédimensionnement de ces deux variantes s'est fait en se basant sur plusieurs formules telle que la formule de HUDSON et sur des critères telle que l'interaction entre la mer et l'ouvrage (le franchissement).

Une fois les deux variantes dimensionnées, une comparaison entre les deux a été faite, en se basant sur plusieurs critères tel que le coût ou encore l'entretien. En vue des résultats de cette dernière, nous avons conclu que la première variante est la plus appropriée. Néanmoins, il est nécessaire de passer par le modèle réduit pour vérifier la stabilité de la digue, le transport sédimentaire et le franchissement.

Chapitre V
Organisation de
chantier et estimation
quantitative et
financière du projet

Chapitre V Organisation de chantier et estimation quantitative et financière du projet

Introduction

L'organisation de chantier consiste à déterminer et à coordonner la mise en œuvre des moyens nécessaires pour accomplir les travaux d'exécution dans de meilleures conditions que possible. Elle consiste aussi à utiliser la main d'œuvre d'une façon économique, ainsi que les autres moyens mis en œuvre pour gérer le chantier.

Une reconnaissance meilleure du lieu de chantier aide énormément à dresser un planning technologique des engins et leur utilisation rationnelle dans les diverses opérations, afin de pouvoir répondre aux conditions d'espace et temps dictés par le marché.

Donc une bonne organisation de chantier intervient grossièrement dans la diminution du prix de l'ouvrage pour qu'il ne soit pas onéreux.

Ces constructions présentent des difficultés énormes, mais pour se faire, et quelques que soient les problèmes rencontrés, il est impératif d'avoir une connaissance exacte de l'organisation de chantier.

Afin d'atteindre ces objectifs, il est impératif de :

- Définir avec précision les méthodes d'exécution, les modes opératoires permettant la mise en pratique des techniques modernes de construction avec un haut rendement.
- Repartir et coordonner les tâches par la contraction d'une main d'œuvre spécialisée.
- Structurer convenablement les postes de travail stabilisés pour lesquels, on adopte une mécanisation de plus en plus poussée.
- Arrêter en quantité et en qualité le personnel à employer, le coût de la main d'œuvre ayant une influence importante sur le prix de revient.
- Une économie : synchronisation et réduction des travaux.

Ces facteurs revêtent une importance primordiale pour la réalisation de l'ouvrage dans les meilleures conditions.

V.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier

Avant d'entrer dans le vif du sujet relatif au chantier de réalisation de l'endiguement, il nous paraît indispensable de rappeler les rôles des différentes personnes amenées à intervenir dans l'acte de construction.

V.1.1 Maître de l'ouvrage

Appelé couramment le client, c'est une personne physique ou morale qui définit la commande. Son rôle est de conclure le marché, assurer le financement, réceptionner l'ouvrage

et procéder au paiement. Après la réception des ouvrages, il en est le propriétaire et parfois le gestionnaire. Généralement le maître de l'ouvrage conclut deux contrats le premier avec l'entreprise et le second avec le maître d'œuvre.

Dans le présent projet le maître de l'ouvrage est la Direction des Ressources en eau de la wilaya d'Alger.

V1.2 Maître d'œuvre

C'est le conseiller artistique et technique avec lequel le maître d'ouvrage s'adjoit pour réaliser toutes les tâches ou quelques-unes. Il peut être une personne physique ou morale chargée de recevoir l'ouvrage, d'établir le dossier de consultation des entreprises, d'assister le maître d'ouvrage dans le dépouillement des offres, de contrôler l'exécution des travaux et de proposer leur réception et leur règlement, après en avoir établi le décompte. Dans notre cas celui-ci est représenté par le Laboratoire d'Études Maritimes (LEM).

V.1.3 L'entrepreneur

Personne physique (entrepreneur personnel) ou morale (société), titulaire d'un marché de travaux conclu avec le maître d'ouvrage, chargé de l'exécution des travaux et, parfois, de la conception détaillée des ouvrages. L'entrepreneur est responsable du chantier et de l'ouvrage en cours de construction tant que celui-ci n'a pas été réceptionné.

Pour l'endiguement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz, l'entreprise chargée des travaux est La Méditerranéenne des Travaux Maritimes (MEDITRAM).

V.2 Travaux de réalisation

V.2.1 Installation du chantier

L'installation générale d'un chantier nécessite un terrain assez de large afin de ménager les diverses aires de stockages et des pistes de circulation d'engins, suivie de leur occupation progressive par les locaux, engins, poste fixes de travail.

D'après l'espace disponible aux alentours du projet, nous avons préconisé deux aires. La première consacrée aux personnels du chantier et aux engins fait 5000 m², elle comportera 3 baraques préfabriquées de trois bureaux chacune, un poste de garde, des sanitaires, une citerne à Gasoil de 14 000 L et enfin un petit abri pour stationner les engins. La deuxième quant à elle, faisant environs 1 Hectare suffira largement pour stocker les matériaux nécessaires pour l'endiguement de l'Oued El Hamiz. (**Figure V.1**)



Figure V.1 – Emplacement du chantier et de l'aire de stockage (Google map, 2020)

V.2.2 Approvisionnement des matériaux

Afin de mener à bien le projet de l'endiguement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz, il est obligatoire pour le l'entreprise de réalisation de choisir des matériaux de premier choix et ce au meilleur prix. Pour ce faire la Méditerranéenne des Travaux Maritimes a désigné la carrière de SARL AGRÉGATS D'ALGERIE (AGREGAL) comme carrière d'Approvisionnement des matériaux pour ce projet. Celle-ci se situe à 32 Km de l'embouchure de l'Oued El Hamiz, dans la commune de Keddara (**Figure V.2**), non loin de la ville de Boumerdes.



Figure V.2– Emplacement de la carrière d'approvisionnement des matériaux (Google map,2020)

V.2.3 Réalisation des deux épis

La réalisation des deux épis se fera sur plusieurs étapes qui sont les suivantes :

V.2.3.1 Mise en place du noyau :

Le noyau considéré comme étant la base de la digue, est composé d'un tout venant de carrière TVC (0-500Kg). Sa mise en place commence par le déversement des matériaux par les camions, qui seront suivis par la chargeuse sur pneu qui, elle fera avancer le TVC jusqu'à la côte voulue. Il est impératif d'envisager une protection provisoire par des enrochements contre les houles et courants, puisque ces derniers peuvent éroder le noyau avec le temps. Dans le cas de la construction à partir de la terre, la largeur de la crête du noyau est habituellement dictée par l'espace requis pour une utilisation sûre et fluide des engins sur la crête

Pour ce qui de la pente du talus, les techniciens se servent généralement d'un gabarit en acier, la pelleuse règlera par la suite la pente comme elle est voulue.

Enfin les plongeurs s'occupent d'implanter des bouées afin d'aider les conducteurs de camions et chargeurs à avancer correctement.

V.2.3.2 Pose de la sous couche et de la carapace :

Une fois le noyau mis en place, on doit enlever la protection provisoire puis régler le talus du noyau afin de passer à la pose de la sous-couche et du réglage de son talus et terminer avec la pose de la carapace et le réglage de son talus aussi.

Lorsque le musoir est composé de blocs artificiels, la présence d'un plongeur est obligatoire pour qu'il puisse guider le conducteur de la grue à grapin à la pose des blocs.

V.2.3.3 Pose de la Butée de pied :

La pose de la butée de pied se fait généralement à l'aide d'une pelleuse sur chenille ou bien d'une grue. Les limites de l'ouvrage sont faites par des indicateurs encrés disposés par les plongeurs.

V.3 Personnel et matériel nécessaires

V.3.1 Personnel nécessaire

Le nombre du personnel nécessaire au chantier varie d'une période à une autre, lors d'une période critique, le chantier peut avoir un personnel de pointe, et dans une autre un nombre important n'est plus utile.

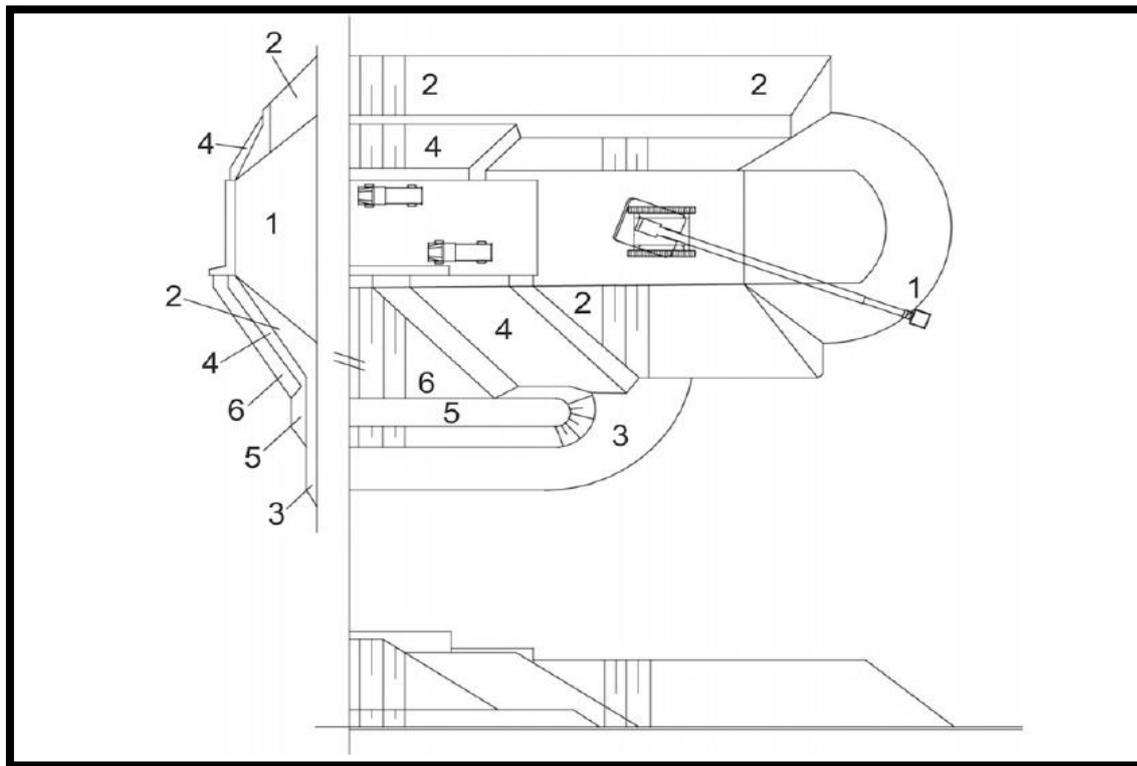


Figure V.3– Vue en plan et de côté et coupe transversale de la construction d'une digue par moyen terrestre (CETMEF,2009)

Ci-joint liste du personnel nécessaire à ce projet :

- Un chef de projet ;
- Un technicien topographe ;
- Un chargé du personnel ;
- Un comptable ;
- Un agent d'exécution polyvalent ;
- Un conducteur travaux ;
- Un magasinier ;
- Six agents ;
- Un plongeur ;
- Huit chauffeurs de camion ;
- Huit conducteurs d'engins ;
- Deux manœuvres.

V.3.2 Matériel nécessaire

Les différents engins nécessaires au chantier peuvent dans certains cas travailler simultanément, et dans d'autres d'une opération à une autre, et ceci selon le planning d'exécution des travaux.

Ci-joint liste du matériel nécessaire à ce projet :

- Huit camions bennes (26 tonnes) ;
- Deux chargeuses sur pneu (5 m³) ;
- Deux compacteurs de 26 tonnes ;
- Deux pelleteuses sur chenille ;
- Deux grues câble équipées d'un grappin mobile (130 tonnes).

V.4 La planification

C'est sans doute l'opération la plus importante du processus de réalisation d'un projet. Elle revient en tout début de la réalisation du projet et conditionne la qualité du résultat final.

Ses finalités sont :

- Pour l'équipe du projet, de traduire une stratégie de projet en logique de déroulement formalisée sous forme de tâches à réaliser dans un ordre précis (ordonnancement) ;
- Pour le chef de projet, identifier, décrire finement et distribuer tout le travail à produire et construire son support de pilotage opérationnel par les délais,

C'est une méthode dont dispose le cadre pour rendre son travail efficace, elle consiste :

- L'installation des postes de travail ;
- L'observation instantanée ;
- L'analyse des tâches ;

- Le chronométrage ;
- La définition des objectifs et attributions ;
- La simplification des méthodes ;
- La stabilisation des postes de travail.

L'opération d'analyse des tâches est considérée comme la plus importante dans la planification, elle se fait en deux grandes phases :

- Une première exclusivement dédiée au recensement des tâches et de leurs relations d'enchaînement dont il sort le premier réseau logique,
- Une seconde consacrée à la vérification du réseau et au renseignement des informations relatives aux tâches.

V.4.1 Techniques de planification

Il existe deux principales méthodes de planification à savoir :

- Méthodes basées sur le réseau ;
- Méthodes basées sur le graphique.

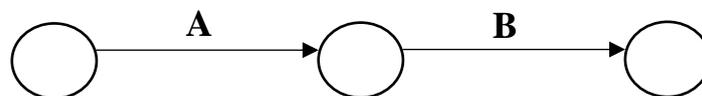
V.4.1.1 Méthodes basées sur le réseau :

A. Définition du réseau :

Le réseau est une représentation graphique d'un projet qui permet d'indiquer la relation entre les différentes opérations qui peuvent être successives, simultanées, convergentes et la durée de réalisation. On distingue deux types de réseaux :

1. Réseau à flèches :

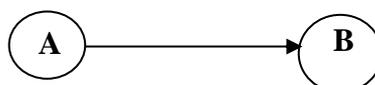
L'opération est représentée par une flèche et la succession des opérations par des nœuds.



L'opération (A) précède l'opération (B).

2. Réseau à nœuds :

L'opération est représentée par un nœud et la relation entre les opérations par des flèches.



L'opération (B) ne peut commencer que si l'opération (A) est complètement achevée.

B. Construction du réseau :

Pour construire un réseau il convient d'effectuer les six (6) opérations suivantes :

✓ **Établissement d'une liste des tâches :**

Il s'agit dans cette première phase de procéder à un inventaire très précis et détaillé de toutes les opérations indispensables à la réalisation d'un projet.

✓ **Détermination des tâches antérieures :**

Après avoir dressé la liste des tâches à effectuer, il n'est pas toujours facile de construire un réseau car il n'est pas aisé de dire si les tâches antérieures doivent être successives ou convergentes.

✓ **Construction des graphes partiels.**

✓ **Regroupement des graphes partiels.**

✓ **Détermination des tâches de début de l'ouvrage et de fin de l'ouvrage.**

✓ **Construction du réseau.**

V.4.1.2. Méthodes basées sur le graphique :

a) Méthode linéaire (ligne of balance technic) :

Cette méthode est destinée à la planification des projets de construction dont les travaux sont répétitifs.

b) Méthode à barres :

Cette technique consiste à déterminer deux réseaux et un diagramme à barres (Plan de travail).

V.4.2 Les étapes de la planification

La planification est le processus de la ligne de conduite des travaux à réaliser, elle comprend les étapes suivantes :

✓ **Collection des informations :** L'établissement d'une synthèse d'analyse des informations acquises par des études comparatives permet l'usage correct du plan de réalisation du projet.

✓ **Décomposition du projet :** C'est une partie importante car chaque projet peut être analysé de diverses manières. Nous attribuons à chaque tâche un responsable et ses besoins matériels.

✓ **Relations entre les tâches :** Il existe deux relations essentielles entre les tâches lors de la réalisation. L'une porte sur un enchaînement logique et l'autre sur un enchaînement préférentiel.

V.4.3 Estimation des durées

L'estimation de la durée des tâches ne se fait que lorsque les tâches ont été analysées. L'opération d'estimation des durées a un impact important sur la qualité du planning final et elle doit être conduite dans le respect de principes rigoureux.

Au préalable, il faut faire admettre les hypothèses suivantes qui simplifient l'estimation :

Toutes les tâches se réaliseront, dans des conditions normales ;

Cette hypothèse consiste à estimer les durées des tâches sans présupposer une quelconque "criticité" ou pression particulière sur les délais. Ce sont les conditions habituelles de travail qui doivent servir d'étalon à l'estimation des durées. Cela suppose aussi que chaque durée de tâche est estimée sans qu'on se soucie de toutes les perturbations imaginables qui pourraient en déranger le bon déroulement. Par contre, "conditions normales" veut bien dire que l'environnement dans lequel la tâche se déroulera de façon tout-à-fait prévisible est bien pris en compte.

Chaque tâche se réalisera avec les moyens habituels ;

Cela signifie que la durée de la tâche est estimée sur la base des moyens habituellement affectés à ce type de tâche (qualité et quantité). Donc ne pas faire de supposition sur toute mise en œuvre de moyens exceptionnels que la criticité de la tâche pourrait justifier.

Les moyens nécessaires à l'ensemble des tâches sont infinis ;

Elle résulte tout simplement de la considération que chaque tâche est estimée en durée sans qu'on puisse à ce stade savoir si les moyens à y affecter seront disponibles puisque déjà affectés à une autre tâche. Et par voie de conséquence, supposer que chaque tâche disposera des moyens nécessaires revient à considérer provisoirement qu'ils sont illimités.

V.4.4 Choix de la méthode de calcul

Le choix de la méthode de calcul repose essentiellement sur le type d'ouvrage à construire. Il est préférable dans le cas où les opérations se suivent comme dans notre cas d'opter pour la méthode C.P.M.

V.4.4.1 Les paramètres de la méthode C.P.M :

Les paramètres indispensables dans l'exécution de cette méthode sont les suivants :

DCP	TR
DFP	DCPP
DFPP	MT

Avec : TR : temps de réalisation.
 DCP : date de commencement au plus tôt.
 DCPP : date de commencement au plus tard.
 DFP : date de finition au plus tôt.
 DFPP : date de finition au plus tard.
 MT : marge totale.

$$\text{Et : } \begin{cases} \text{DFP} = \text{DCP} + \text{TR} \\ \text{DCPP} = \text{DFPP} - \text{TR} \\ \text{MT} = \text{DFPP} - \text{DFP} \\ \text{DCP}_i + \text{TR} = \text{DFP}_i \\ \text{DFP}_i = \text{DCP}_{i+1} \end{cases}$$

V.4.4.2 Chemin critique (C.C) :

C'est le chemin qui donne la durée totale du projet (DTR) reliant les opérations possédant la marge totale nulle (0). Donc pour retrouver un chemin critique il suffit de vérifier la double condition suivante :

$$\text{C.C} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{MT} = 0 \\ \sum \text{TR}_{\text{C.C}} = \text{D.T.P} \end{cases}$$

V.4.4.3 Le diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt, couramment utilisé en gestion de projet, est l'un des outils les plus efficaces pour représenter visuellement l'état d'avancement des différentes activités qui constituent un projet. La colonne de gauche du diagramme énumère toutes les tâches à effectuer, tandis que la ligne d'en-tête représente les unités de temps les plus adaptées au projet (jours, semaines, mois etc.). Chaque tâche est matérialisée par une barre horizontale, avant la position et la longueur représentent la date de début, la durée et la date de fin. Ce diagramme permet donc de visualiser d'un seul coup d'œil :

- Les différentes tâches à envisager
- La date de début et la date de fin de chaque tâche
- La durée escomptée de chaque tâche
- Le chevauchement éventuel des tâches, et la durée de ce chevauchement

- La date de début et la date de fin du projet dans son ensemble

En résumé, un diagramme de Gantt répertorie toutes les tâches à accomplir pour mener le projet à bien, et indique la date à laquelle ces tâches doivent être effectuées (le planning).

V.4.5 Élaboration du réseau selon la méthode CPM

La méthode CPM est une méthode de planification, elle a pour objectif de déduire le temps et le coût de réalisation du projet et d'Augmenter le rendement du travail. Pour la construction du réseau il faut établir les différentes tâches. Ces dernières sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau V.1- Élaboration d'un réseau selon la méthode CPM

Travaux	Désignation	Durée (jours)
Installation du chantier	A	2
Coffrage et approvisionnement des tétrapodes	B	8
Approvisionnement des enrochements (toute catégorie confondue)	C	12
Travaux de terrassement	D	3
Mise en place de la déviation provisoire	E	3
Mise en place du noyau + protection provisoire Épi 1	F	13
Mise en place du noyau + protection provisoire Épi 2	G	13
Reprofilage et pose de la sous couche et carapace Épi 1	H	21
Reprofilage et pose de la sous couche et carapace Épi 2	I	21
La pose des blocs de tétrapodes Épi 1	J	6
La pose des blocs de tétrapodes Épi 2	K	6
La pose de la butée de pied musoir Épi 1	L	4
La pose de la butée de pied musoir Épi 2	M	4
Suppression de la déviation provisoire	N	3
Fin des travaux	O	2
Remise du projet au maître d'ouvrage	P	2

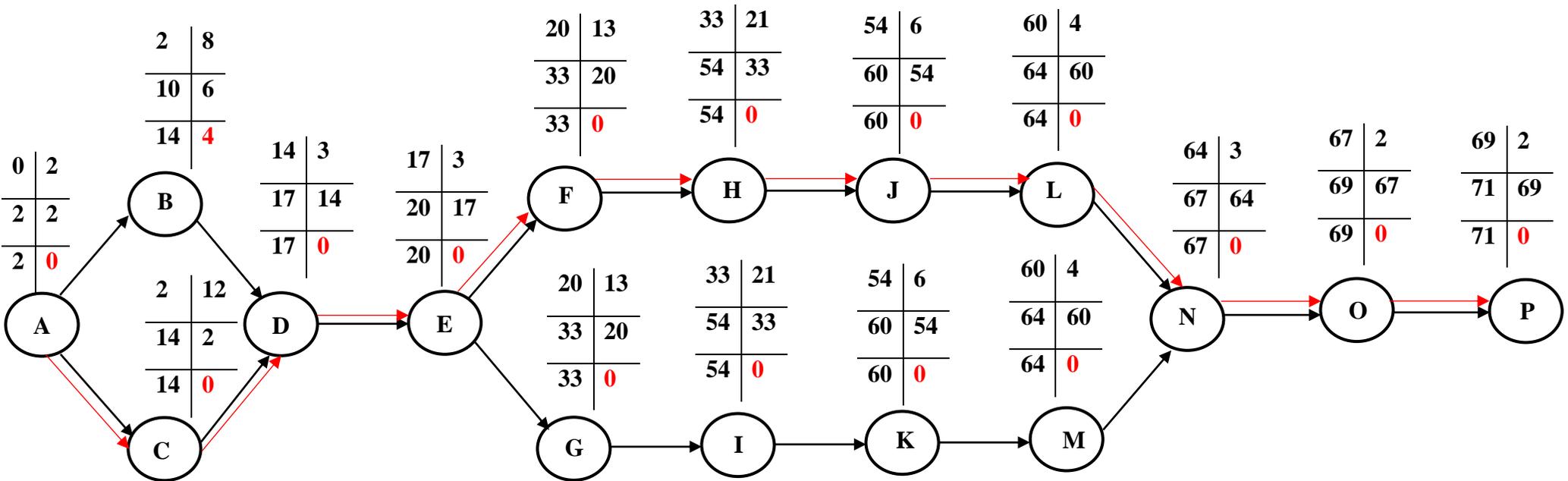


Figure V.4– Le réseau à nœud

V.5 Devis quantitatif et estimatif

Tableau V.2- Devis quantitatif et estimatif du projet

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total hors taxes (DA)
I	INSTALLATION DE CHANTIER ET REPLIEMENT				
I.1	Installation générale du chantier et montage des équipements destinés aux travaux, à l'amenée du matériel nécessaire à l'exécution des travaux et le repli du chantier et du matériel nécessaire à l'exécution des travaux et quelque soient les installations dont la réalisation se révélerait nécessaires au cours des travaux.	F	1	12 300 000.00	123 000 00.00
II	TERASSAEMENT				
II.1	Rémunère au mètre cube les produits dragués et leur évacuation vers un endroit fixé par le maître de l'ouvrage, y compris toutes sujétions.	M ³	16 000	600.00	9 600 000.00
II.2	Rémunère au mètre cube les produits du déroctage pour la création de la pente, et leur l'évacuation vers un endroit fixé par le maître de l'ouvrage, y compris toutes sujétions	M ³	20 000	1 500.00	30 000 000.00
III	ENDIGUEMENT DE L'EMBOUCHURE DE L'OUED EL-HAMIZ				
III.1	Fourniture, transport et mise en place du noyau en TVC (1-500Kg).	T	36 244	1 700.00	104 570 400.00
III.2	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (0.5-1t).	T	47 268	2 500.00	105 427 500.00
III.3	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-1.5t).	T	25 686	2 900.00	56 860 300.00
III.4	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-2t).	T	4000	3 000.00	8 466 000.00
III.5	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (1-3t).	T	41 566	3 050.00	96 209 200.00
III.6	Fourniture, transport et mise en place des enrochement (3-6t).	T	10 904	3 500.00	28 868 000.00
III.7	Fourniture et mise en place des tétrapodes (10 t).	T	7366	6 000.00	35 460 000.00

TOTAL	598 461 400.00
TVA	19 %
TOTAL TTC	712 169 066

Conclusion

L'exécution d'un chantier se traduit par la mise en œuvre d'un ensemble d'activités réparties dans le temps. La réalisation de ces activités entraîne la mise à disposition de ressources matérielles, humaines et financières. La finalité étant de réaliser entièrement un projet bien déterminé dans des conditions bien définies de délai, de coût, de qualité en sécurité.

Dans ce chapitre, on a pu élaborer un plan de déroulement des travaux nécessaires à la conception de l'endiguement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz, pour permettre un enchaînement logique et économique tout assurant une utilisation rationnelle des ressources humaines et matérielles.

Le montant total du projet a été estimé à **712 169 066DA** avec un délai d'exécution d'un an, un mois et 23 jours, mais il toutefois nécessaire de préciser que ce délai pourrait augmenter à cause des arrêts dus aux intempéries.

Conclusion générale

Le transport sédimentaire entre le large et la côte influe indirectement sur l'écoulement des eaux des Oueds. C'est effectivement ce qui se passe au niveau l'embouchure de l'Oued El Hamiz, puisque celle-ci est soumise à un ensablement, ce qui rend son passage étroit et augmente donc le risque d'inondation dans la zone avoisinante. En vue de l'importance de la concentration démographique dans la commune de Bordj El Bahri et du risque que représente ce phénomène, il a été impératif de faire une étude d'aménagement par un système d'endiguement de l'embouchure.

La première démarche de ce travail a été de faire une récolte des différentes données relatives au site d'étude (données sédimentologiques, données océanographiques...) puisque ces dernières représentent la base du transport sédimentaire.

En deuxième lieu, l'utilisation du progiciel MIKE 21 nous a permis de traiter les données de la houle au large et de simuler leur transformation vers la côte et donc de définir les caractéristiques nécessaires au dimensionnement de nos ouvrages.

Enfin, deux systèmes d'Endiguement ayant un impact sur le transport sédimentaire, ont été proposés pour l'aménagement de l'embouchure de l'Oued El Hamiz. L'étude technico-économique des deux variantes a favorisé l'aménagement par les deux épis allant jusqu'à une profondeur de 5m sur une longueur de 323 m chacun. Ainsi, nous avons pu estimer le coût de réalisation de notre aménagement et planifier sa méthode de mise en œuvre.

Afin de s'assurer de l'impact, de la stabilité et de la durabilité de notre ouvrage, il est primordial d'un point de vue optimal d'envisager une étude sur modèle physique. Celle-ci consiste à mettre en œuvre un modèle réduit de l'aménagement projeté et de simuler les différents phénomènes hydrodynamiques y agissant dessus, premièrement sur un fond fixe afin d'inspecter l'interaction houle-ouvrage puis sur fond mobile pour visualiser l'impact de l'ouvrage sur le transport sédimentaire.

Bibliographie

- Bennie & Partners, 1983. *Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger*.
- BONNEFILLE, René, 2010. Mouvements de la mer et leurs risques. *Techniques de l'ingénieur Les aménagements des voies de transport*. T. base documentaire : TIB550DUO.No ref. article : c4610.
- BORGMAN, Leon Emry, 1963. Risk Criteria. *Journal of the Waterways and Harbors Division* [online]. T. 89, no 3, p. 1-36.
- CALLAGHAN, D. P. ; NIELSEN, P. ; SHORT, A. ; RANASINGHE, R., 2008. Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering*.
- CAMINADE, Daniel, 1995. *Ouvrages de protection contre la houle. Techniques de l'ingénieur Infrastructures, environnement et transport par voie d'eau*. T. base documentaire : TIB617, no ref. Article : c4631.
- CETMEF, 2009. *Guide Enrochement : L'utilisation des enrochements dans les ouvrages. Version française du Rock manual (2e édition)*. Compiègne ; Pays-Bas ; Londres : centre d'études techniques maritimes et fluviales(france) ; CUR building Infrastructure ; CIRIA. ISBN 978-2-11-098518-7.
- HASSELMANN, Klaus et al., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North SeaWave Project (JONSWAP). *Deut. Hydrogr. Z.* T. 8, p. 1-95.
- HOAI, T. Q., 2011. Technical guidelines in sea dike design. *Vietnamese standards 14TCN130-2002*.
- HUDSON, Robert Y, 1959. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. *Reprint of the original paper as published in the Journal of the Waterways and Harbors. Division of ASCE, proceedings paper 2171*. Publisher: Citeseer.
- KAMPION, Drew, 1997. *The Book of Waves: form and beauty on the ocean*. Rinehart.
- LEM, 2014. *Mission 1 : Complément de reconnaissances sur site*, Laboratoire d'Études Maritimes.
- LEM, 2014. *Mission 2 : Étude sur modèle numérique*, Laboratoire d'Études Maritimes.
- LEM, 2017. *Dossier d'exécution du projet de protection et d'aménagement des sites de beb el oued, la piscine el kittani et de verte rive*. Laboratoire d'Etudes Maritimes.

Références bibliographiques

MILLOT, Claude,1987. *Circulation in the western Mediterranean-sea. Oceanologica Acta*, vol. 10, no 2, p. 143-149.

MULDER, Thierry et SYVITSKI, James PM,1995. *Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. The Journal of Geology*, vol. 103, no 3, p. 285-299.

JARRY, Nicolas,2009. *Études expérimentales et numériques de la propagation des vagues au-dessus de bathymétries complexes en milieu côtier. Océan, Atmosphère. Université du Sud Toulon Var.*

OWEN, MW, 1980. *Design of seawalls allowing for wave overtopping. Report Ex. T. 924*, p.39. Publisher: Hydraulics Research Wallingford, UK.

PNUE/PAM,2012. *État de l'environnement marin et côtier de la Méditerranée, PNUE/PAM – Barcelona Convention, Athènes, 96 p.*

SPM, 1984. *Shore protection manual*. Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.T.

SSMO, 1980. *Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO) vol 3 Area 11(Algiers)*. Naval Weather Service Detachment.

WARREN, I. R. et BACH, H_K_,1992. *MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. Environmental Software*, vol. 7, no 4, p. 229-240.

WRIGHT, L. D,1977. *Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis. Geological Society of America Bulletin*, vol. 88, no 6, p. 857-868

Annexes

Tableau Annexe.1- Moyenne mensuelle des températures moyennes (en °C)

Année	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuelle
1996	14.3	11.3	13.3	15.2	17.4	21	24.5	25.7	21.6	17.1	15.3	13.6	17.6
1997	13.4	12	11.8	15.5	19.7	22.9	23.9	25.7	24.3	21.2	16.3	13.3	18.4
1998	12	12.4	12.7	15.4	17.8	21.7	24.8	25.7	24.7	17.9	15	11.2	17.6
1999	11.7	10.1	13.9	15.2	20.4	23.3	25.5	27.8	24.6	22.5	14	12.1	18.5
2000	9.1	11.6	13.6	16.5	20.3	22.3	25.9	26.6	23.4	18.9	15.9	13.6	18.2
2001	12.2	11	16.6	15	18.1	23.8	25.4	26.7	23.7	22.5	14.3	10.1	18.3
2002	11.3	11.1	14.1	15.2	18.7	22.9	24.6	25.2	23.1	20	16.1	14	18.1
2003	10.9	10.4	13.7	15.6	18.4	25.4	27.8	28.5	24.1	20.7	16.3	12	18.7
2004	11.5	12.5	13.1	14.9	16.4	22.2	24.8	27.3	24.8	22.3	13.8	12.6	18
2005	8.2	8.8	13.1	15.4	19.4	23.4	25.9	25.3	22.7	20.6	14.4	11.5	17.4
2006	10.1	10.6	14	17.5	21.1	22.9	25.9	25.2	23.5	21.9	17.9	12.9	18.7
2007	11.8	13.6	12.9	16	19.3	22.5	25	26.6	23	19.7	14.3	12	18.1
2008	11.7	12.8	13.3	16.1	18.9	22.1	26.3	26	24.3	20.5	14.3	11.1	18.1
Moyenne	11.4	11.4	13.6	15.7	18.9	22.8	25.4	26.3	23.7	20.5	15.2	12.3	18.1

Tableau Annexe.2- Moyenne mensuelle des températures minimales (en °C)

Année	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuelle
1996	9.5	7	7.8	9.9	11.4	15.3	18.2	20.2	15.9	11.2	9.5	8	12
1997	8.5	5.2	4	8.9	14.4	16.8	18.8	20	18.8	15.5	11.5	8.1	12.6
1998	6.2	6	5.8	9.2	12.7	15.4	18.1	19.4	18.8	11.2	9.6	5.3	11.5
1999	6.4	4.8	8.3	7.9	14.2	17.6	18.8	22.4	18.9	16.9	9.2	7.3	12.8
2000	2.1	4.1	6.8	9.9	14.9	16.2	19.6	19.3	17.4	12.9	10.1	7.4	11.7
2001	5.7	4.2	9.2	7.3	11.5	15.5	18.4	20.2	17.6	16.1	9.2	3.7	11.6
2002	4.7	3.5	6.9	8.4	10.9	16.1	18.6	19.5	16.5	13.2	10.5	8.5	11.5
2003	6.3	5.1	7.2	9.6	12.3	18.5	21.6	22.2	18.4	15.7	10.9	6.9	12.9
2004	5.7	6.6	7.9	8.4	11	15.5	18.4	20.9	17.9	15.3	7.7	7.6	11.9
2005	1.6	3.3	7.6	9.4	12.7	16.9	19.2	18.4	16	14	8.7	6.1	11.2
2006	5.2	4.8	7.3	11	15.5	16.3	19.3	18.9	17.4	15.6	11.6	7.9	12.6
2007	5.1	7.8	7.2	11.6	12.3	16.7	18.5	20.2	17.5	14.5	8.7	6.7	12.2
2008	5.3	6.7	6.8	9.1	13.6	15.9	20.4	19.8	18.8	15	9	5.9	12.2
Moyenne	5.6	5.3	7.1	9.3	12.9	16.4	19.1	20.1	17.7	14.4	9.7	6.9	12.1

Tableau Annexe.3- Moyenne mensuelle des températures maximales (en °C)

Année	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuelle
1996	19.1	15.6	18.9	20.4	23.3	26.7	30.8	31.1	27.2	23.1	21.2	19.2	23.1
1997	18.2	18.8	19.7	22.1	25	29.1	28.9	31.5	29.8	26.9	21	18.4	24.2
1998	17.9	18.8	19.7	21.5	23	27.9	31.5	32	30.5	24.7	20.4	17.1	23.8
1999	16.9	15.4	19.4	22.5	26.6	29	32.1	33.3	30.3	28	18.8	16.9	24.2
2000	16.2	19.1	20.3	23	25.8	28.4	32.2	33.9	29.4	24.9	21.7	19.9	24.6
2001	18.8	17.8	24.1	22.8	24.7	32.1	32.3	33.2	29.7	28.9	19.4	16.5	25.1
2002	17.8	18.6	21.3	22.1	26.6	29.7	30.6	30.8	29.7	26.8	21.6	19.4	24.6
2003	15.5	15.7	20.1	21.6	24.6	32.2	34	34.8	29.9	25.7	21.6	17	24.5
2004	17.4	18.4	18.4	21.3	21.9	28.9	31.1	33.7	31.7	29.3	19.8	17.5	24.1
2005	14.9	14.3	18.5	21.5	26	30	32.6	32.3	29.3	27.1	20	16.8	23.7
2006	15	16.3	20.8	24	26.7	29.5	32.6	31.4	29.7	28.3	24.1	17.8	24.7
2007	18.5	19.4	18.7	20.4	26.3	28.3	31.5	33	28.6	24.8	19.8	17.2	23.9
2008	18.2	19	19.8	23.2	24.1	28.3	32.1	32.1	29.8	26	19.6	16.3	24.1
Moyenne	17.3	17.5	20	22	25	29.2	31.7	32.6	29.7	26.5	20.7	17.7	24.2

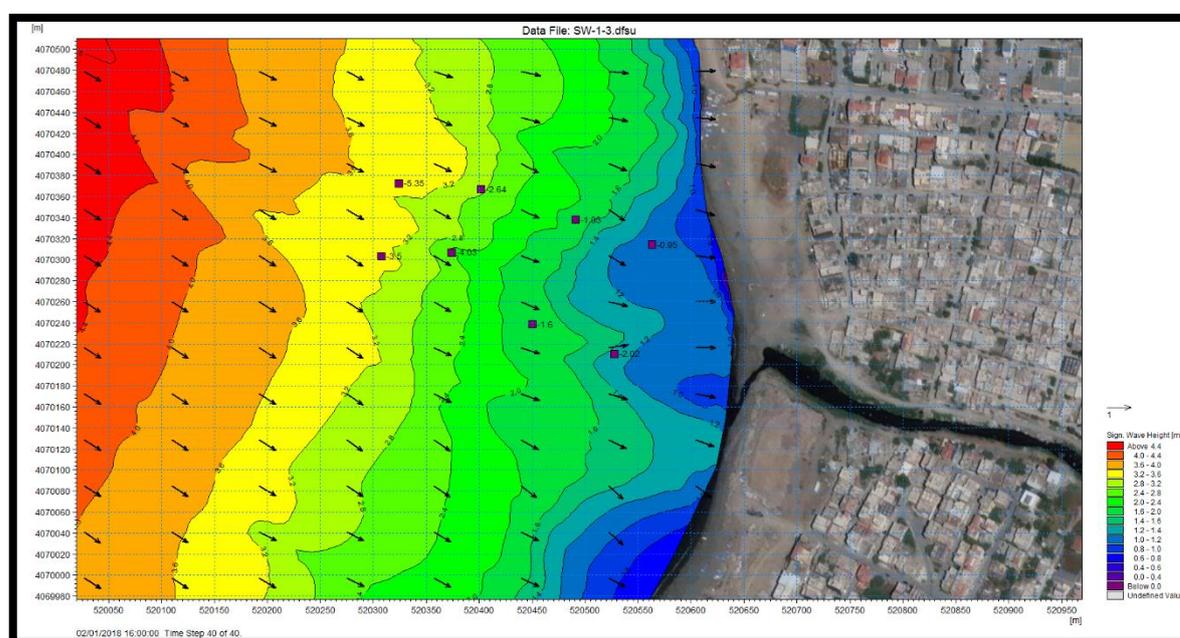


Figure Annexe.1- Épures 2D de la transformation des vagues près de l'embouchure de l'Oued El Hamiz pour la direction N 270° avec une période de retour de 50 ans

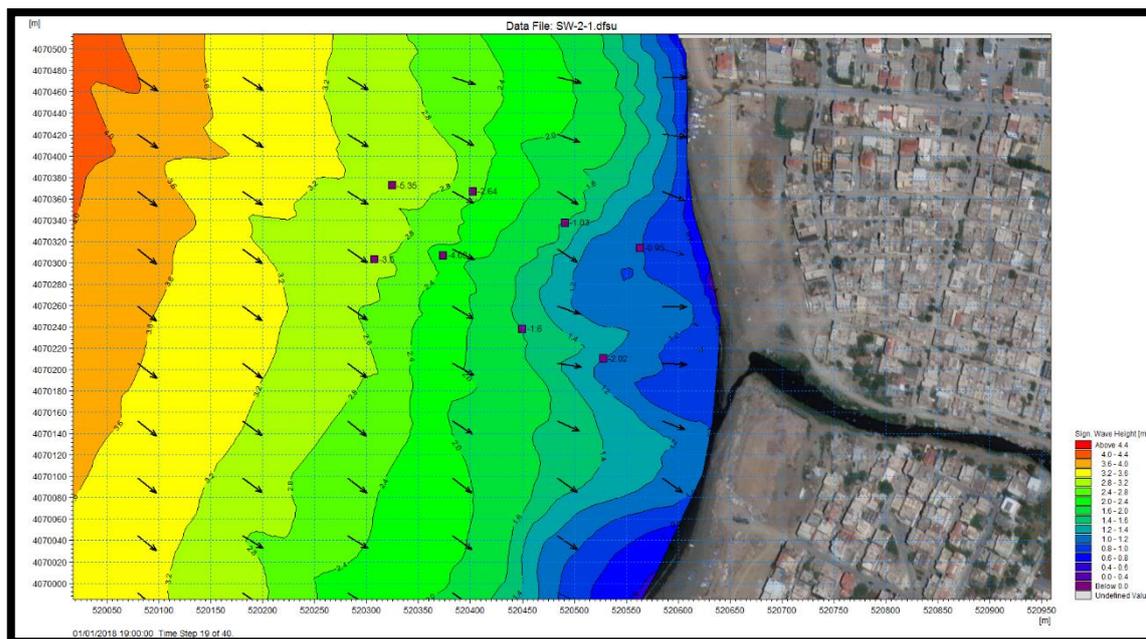


Figure Annexe.2- Épures 2D de la transformation des vagues près de l’embouchure de l’Oued El Hamiz pour la direction N 315° avec une période de retour de 50 ans

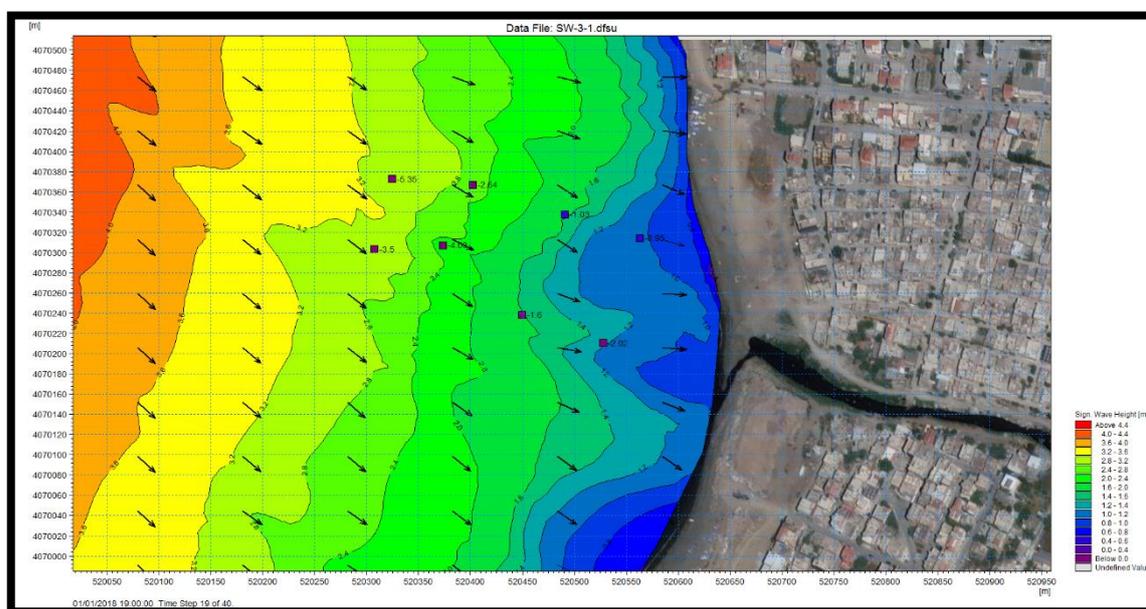


Figure Annexe.3- Épures 2D de la transformation des vagues près de l’embouchure de l’Oued El Hamiz pour la direction N 345° avec une période de retour de 50 ans

Tableau Annexe.4- Valeur du coefficient de réduction de régosité (Taw,2002)

Type d'ouvrage	γ_f
Béton, bitume et herbe	1
Enrochements appareillés	0.8-0.9
Enrochement naturel couche unique sur une base imperméable	0.7
Enrochement naturel deux couches sur une base imperméable	0.55
Enrochement naturel -base perméable	0.4

Tableau Annexe.5- Valeurs des coefficients a et b pour des talus lisses et de pente constante (CETMEF,2009)

Pente	a	b
1/1	7.74 10 ³	20.1
3/2	8.84 10 ³	19.9
2/1	9.39 10 ³	21.6

Tableau Annexe.6- Débits et volumes franchissants critiques (Allsop et al.,2005)

	q Débit franchissant moyen (m ³ /s par m)	V_{max} Volume franchissant maximum (m ³ /m)
Piétons		
Dangereux pour des piétons ignorant les risques, plutôt facilement contrariés ou effrayés ; pas de visibilité claire sur la mer, passages étroits ou bord très proche	$q > 3 \cdot 10^{-5}$	$V_{max} > 2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$
Dangereux pour des piétons conscients des risques, pas facilement contrariés ou effrayés, capables de tolérer d'être mouillés ; bonne visibilité sur la mer, passage plus large	$q > 1 \cdot 10^{-4}$	$V_{max} > 0.02 - 0.05$
Dangereux pour le personnel formé, bien chaussé et protégé, qui s'attend à être mouillé ; franchissement à des niveaux bas seulement, pas de retombées, faible risque de chute depuis le passage	$q > 1 \cdot 10^{-3} - 0.01$	$V_{max} > 0.5$
Véhicules		
Dangereux en cas de conduite à vitesse modérée ou rapide, franchissement impulsif donnant lieu à des retombées ou à des jets très rapides	$q > 1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$V_{max} > 5 \cdot 10^{-3}$
Dangereux en cas de conduite au pas, franchissement par écoulements pulsatoires à des niveaux bas seulement, pas de retombées	$q > 0.01 - 0.05$	$V_{max} > 0.1$
Marinas		
Naufrage de petits bateaux amarrés à 5-10 mètres du mur, dégâts sur les bateaux de plus grande taille	$q > 0.01$	$V_{max} > 1 - 10$
Dégâts importants sur de plus grands bateaux, voire naufrage	$q > 0.05$	$V_{max} > 5 - 50$
Bâtiments		
Aucun dégât	$q < 1 \cdot 10^{-6}$	
Dégâts mineurs sur les installations etc.	$1 \cdot 10^{-6} < q < 3 \cdot 10^{-5}$	
Dégâts structurels	$q > 3 \cdot 10^{-5}$	
Digues à talus		
Aucun dégât	$q < 2 \cdot 10^{-3}$	
Dégâts si la crête n'est pas protégée	$2 \cdot 10^{-3} < q < 0.02$	
Dégâts si le talus arrière n'est pas protégé	$0.02 < q < 0.05$	
Dégâts même si la protection est complète	$q > 0.05$	
Revêtements de haut de plage, protection de terre-plein		
Aucun dégât	$q < 0.05$	
Dégâts si l'arase n'est pas protégée	$0.05 < q < 0.2$	
Dégâts même si l'arase est protégée	$q > 0.2$	



Figure Annexe.4- Tétrapodes de 10 t



Figure Annexe.5- Enrochements de catégorie (1-3t)



Figure Annexe.6- Approvisionnement des enrochements



Figure Annexe.7- Mise en place des enrochements

