



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Ecole nationale polytechnique d'Alger
Département hydraulique

**Projet de Fin d'Etudes pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur
d'Etat en Hydraulique**

Réalisé et présenté par

Fadhéla BOUSSAIDI

Khadidja SEKAKEN

Sujet

Etude d'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de
pêche (wilaya de Tipasa) :

Etude sur modèle réduit physique

Proposé par : Mr BENAÏSSA Zouhair

Chef du Centre d'Essais sur Modèles L.E.M

Dirigé par : Dr BENMAMAR Saadia

Maitre de conférence (A) E .N.P

Mme BAKRI Lila

Ingénieur chef de projet

- Promotion Juin 2015 -

A la mémoire de mon oncle Mohamed alias Hamoud et mes deux grand pères

A mes deux grand mères que dieu les protège : Manini Fatma et Yema Baya

A ma maman, mon papa

A ma sœur Ryma, mes frères Mohamed alias Abdou, Abdellah et mon petit Sofiane alias

Stoufi

A ma tante Amouma Houria

A mes très chères cousines Zineb « Zinouba », Asma « Ismi » et Lilya « Lili », Narimane

« nounou »

A tous mes cousins et cousines

A mes oncles

A mes très chères amies Kahina « Kahiche », Drifa « Drifti » et mon ami Madjid

A mon binôme Khadidja

Et a tous mes amis et amies que j'aime

Je dédie ce modeste travail

Fadhéla

*A mes chers parents,
A qui je dois ce que je suis,
Qu'ils trouvent dans ce travail, le fruit de leurs sacrifices consentis pour
mon éducation, et l'expression de mon amour et de ma gratitude pour la
bienveillance avec laquelle ils m'ont toujours entouré.*

Que Dieu leur prête longue vie et bonne santé.

A mon frère Moaouiya,

A mes sœurs Nawel et Ryma,

A mon fiancé Ayoub,

A mon neveu Nabil,

A toute ma famille,

A tous mes professeurs durant ma formation

A tous mes amis(es),

A mon binôme Fadhéla.

Je dédie ce modeste travail

Khadija.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la chance et le courage pour réaliser ce travail.

Merci à notre promotrice de mémoire, Docteur S. BENMAMAR, pour son aide et son soutien, et tout l'intérêt qu'elle nous a accordé, pour tous les conseils qu'elle nous a donné, et les remarques qu'elle nous a fait.

Nous remercions très vivement Mr Z. BENAÏSSA qui nous a accueillies, et qui nous a proposé ce sujet.

Nous ne saurions comment remercier notre encadreur Mme L. BAKRI, Ingénieur Chef du Projet, de nous avoir suivies et encadrées depuis le point de départ de notre thèse.

Nous remercions vivement l'ensemble du personnel du LEM : Mme A. FISSAH, Melle N. MAHDID, Mme M. BELKESSA Mr et A. SOUFARI.

Nous remercions très spécialement Melle Y. YTOUI qui a su être disponible quand nous en avons besoin et avec qui nous partageons le bureau.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail.

Enfin, nous remercions cordialement l'ensemble de nos professeurs du département hydraulique à l'école nationale polytechnique.

Nous remercions très chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

Merci.

Résumé

Dans le cadre de l'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche, des essais en modèle réduit physique ont été exécutés par le laboratoire d'étude maritime : des essais en canal à houle à fond fixe pour déterminer la stabilité de chaque profil de la jetée principale face aux houles de tempête et des essais en bassin à houle à fond fixe aussi pour assurer la stabilité et éviter l'agitation au niveau du port maritime.

Mots Clés : Houle – Maritime – Modèle – Canal à houle – Bassin à houle.

ملخص

في إطار توسيع مخابأ الصيد خميستي إلى ميناء صيد، إختبارات على نماذج مصغرة تم تنفيذها من طرف مختبر الدراسات البحرية : إختبارات في قناة الموجة بقاع ثابتة لتحديد إستقرار كل الجوانب من الركيزة الأساسية أمام أمواج العاصفة و إختبارات في حوض الموجة بقاع ثابتة أيضا لضمان الإستقرار و تجنب الإضطراب على مستوى الميناء.

الكلمات الرئيسية : الحولة – البحرية – نموذج – قناة الموجة – حوض الموجة.

Abstrac

Under the extension of haven of peach Khemisti into port of peach, the physical model tests were performed by the Laboratory of Maritime Studies : tests in channel wave with fixed bottom to determine the stability of every profile of the principal jetty face to waves of strom and the tests in wave basin with fixed bottom too for assure a stability and avoid the agitation in maritime port.

Keywords: Wave – Maritime – Model – Channel wave – Wave basin.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les ports et la théorie de la houle	
I. Définition d'un port	3
II. Types de ports en fonction de leur rôle, activités et localisation	3
1) Les ports militaires	3
2) Les ports commerciaux	4
3) Les ports fluviaux	5
4) Les ports lacustres	5
5) Les ports à sec	5
6) Les ports des travaux	5
7) Les ports de pêche	5
8) Les ports de plaisance	6
III. Principales composantes d'un port	6
1) Les ouvrages de protection et d'accès	6
2) Les plans d'eau	6
3) Les ouvrages d'accostage	7
4) Les aires de stockage de marchandises	7
5) Les ouvrages pour la construction, la réparation et l'entretien des navires	7
6) Des plans d'eau et des ouvrages d'accostage	7
IV. Théorie de la houle	9
1) Formation de la houle	9
2) Les hypothèses de la houle	10
V. Formation de la houle	12
VI. Différentes déformations de la houle	12
1) Réfraction de la houle	12
2) Diffraction de la houle	12
3) Réflexion de la houle	13
4) Déferlement de la houle	14
VII. Analyse spectrale de la houle	14
1) Spectre de Jonswap	15
Chapitre II : Description du projet, collecte et analyse des données	
I. Présentation de la zone d'étude	16

1) Description de l'abri de pêche de Khemisti	16
2) But d'implantation du port de Khemisti	17
3) Plan de masse du port de khemisti actuel et proposé pour l'extension	17
4) Objet de l'étude	18
5) Méthodologie à suivre sur l'étude de l'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche	19
II. Données de base	20
1) Données bathymétriques	20
2) Données océanographiques	20
3) Données météorologiques.....	23
4) Données hydrographiques	24
5) Réfraction de la houle du site	30
6) Besoins exprimés	31
7) Schéma d'aménagement	33

Chapitre III : Similitude hydraulique et modélisation

I. Similitude hydraulique	38
1) Introduction aux essais sur modèles réduits physiques	38
2) Lois de similitude	39
II. La modélisation	45
1) Nécessité de la modélisation	45
2) Modèle réduit physique	46
3) Les catégories de modèle réduit physique	47
4) Les modèles mathématiques	48
5) Les modèles hybrides qui sont la combinaison des deux précédents (physique et mathématique)	49

Chapitre IV : Pré-dimensionnement des ouvrages de protection

I. Etude des variantes d'aménagement	50
1) Principes d'établissement des variantes d'aménagement	50
2) Description des variantes d'aménagement	51
3. Digue à talus	53
II. Evaluation de la houle de projet	57
1) Durée de vie de l'ouvrage	57

2) Risque admissible	57
3) Critères à retenir pour l'évaluation de la houle de projet	58
4) Choix de la houle de projet	59
III. Le pré-dimensionnement de la variante d'aménagement N°3	59
1) Calcul de poids des différents matériaux formant les jetées principale et secondaire de l'extension de l'abri de pêche Khemisti	60
2) Calcul des épaisseurs différentes couches formant les jetées principale et secondaire de l'extension de l'abri de pêche de Khemist	65

Chapitre V : Essais de stabilité en canal à houle

I. Cadre des essais	66
1) Description de l'installation	66
2) Hypothèses des essais	67
II. Condition des essais	70
1) Niveau d'eau en modèle	70
2) Conduite des essais	70
3) Période de pointe	70
4) Les houles	70
5) Génération de la houle	71
6) Techniques de mesure et définitions	71
7) Calibration (réglage hydraulique du modèle)	72
III. Observations effectués et moyens mise en œuvre	72
1) Observations hydrauliques	72
2) Observations des dégâts	72
IV. Critères de stabilité	73
V. Critères de franchissements	73
VI. Construction du modèle	74
1) Choix de l'échelle	74
2) Représentation des fonds	75
3) Choix des matériaux	78
VII. Description des variantes et résultats des essais de stabilité en canal à houle	78
1) Profile B-B	78
2) Profile C-C	90

Chapitre VI : Essais de stabilité et d'agitation en bassin à houle

I. Objet d'étude en bassin à houle	102
II. Données nécessaires à la conception du modèle en bassin à houle (en 3D)	102
III. Méthodologie à suivre dans l'exécution des essais en bassin à houle	103
1) La construction des fonds en bassin à houle	103
2) Construction des ouvrages en modèle réduit en bassin à houle	103
3) Calibration du modèle	103
4) Essais de stabilité	103
5) Essais d'endurance	103
6) Etude des variantes du modèle	104
IV. Critères de stabilité	104
V. Critères d'agitation	104
VI. Construction du modèle	105
1) Choix de l'échelle	105
2) Représentation des fonds	106
3) Condition des houles	109
4) Description des variantes et résultats des essais de stabilité et d'agitation en bassin à houle	110
Conclusion générale	123
Bibliographie	124
Annexes	

Liste des figures

Figure I.1 : schéma détaillée d'un port maritime et ses ouvrages	8
Figure I.2 : schéma d'un port maritime	9
Figure I.3 : forme de la houle	10
Figure I.4 : domaine de validité des différents modèles de houle	11
Figure I.5 : réflexion de la houle sur un plan incliné	14
Figure II.1 : la zone d'étude	16
Figure II.2 : plan de masse actuel de l'abri de pêche Khemisti	17
Figure II.3 : plan de masse proposé à l'extension de l'abri de pêche de Khemisti ...	18
Figure II.4 : rose trimestrielle et annuelle des vents	25
Figure II.5 : rose trimestrielle et annuelle des houles	26
Figure IV.1 : plan de masse de l'abri de pêche de Khemisti en état actuel	51
Figure IV.2 : schéma d'une digue à talus conventionnelle avec mur de couronnement	54
Figure IV.3 : la jetée principale de l'extension de l'abri de pêche de Khemisti	60
Figure IV.4 : la jetée secondaire de l'extension de l'abri de pêche Khemisti	64
Figure V.1 : le canal à houle à houle du laboratoire d'études maritimes	67
Figure V.2 : le tronçon du profil B-B de la jetée principale pris en étude sur le canal à houle	74
Figure V.3 : méthode de traçage des pentes sur AutoCad	76
Figure V.4 : la pente des fonds relatifs au profil B-B	77
Figure V.5 : la pente des fonds relatifs au profil C-C	77
Figure V.6 : la 1 ^{ère} variante du profil B-B en canal à houle	79
Figure V.7 : vue de dessus de la variante n°1 du profil B-B (les dégâts)	81
Figure V.8 : vue de dessus de la variante n°1 du profil B-B (les dégâts)	82
Figure V.9 : la 2 ^{ème} variante du profil B-B en canal à houle.....	83
Figure V.10 : la 3 ^{ème} variante du profil B-B en canal à houle	86
Figure V.11 : la 2 ^{ème} variante du profil C-C en canal à houle	92
Figure V.12 : photo montrant la pose du bac	96
Figure V.13 : photo montrant la méthode de quantification des franchissements ...	96
Figure V.14 : la 3 ^{ème} variante du profil C-C en canal à houle	98

Figure VI.1 : traçage de carroyage sur Autocad	106
Figure VI.2 : technique de la mise des points de repère	107
Figure VI.3 : photo montrant la représentation des fonds	108
Figure VI.4 : photos montrant la construction des quais et du terre-plein	108
Figure VI.5 : photos montrant la mise en œuvre des ouvrages de protection selon les variantes retenus en canal à houle	109
Figure VI.6 : schéma montrant la variante n°1 en bassin à houle	111
Figure VI.7 : schéma montrant la contre butée au niveau du musoir	114
Figure VI.8 : comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne	116
Figure VI.9 : photo montrant l'emplacement de la jetée secondaire et les tronçons de la jetée principale de l'abri de pêche actuel	118
Figure VI.10 : photo montrant le redressement de la jetée secondaire du port de pêche étudié	118
Figure VI.11 : comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne ...	121

Liste des tableaux

Tableau II-1 : caractéristiques des houles annuelles retenues	20
Tableau II-2 : caractéristiques des houles cinquantiennale et centennale retenues ...	21
Tableau II-3 : résultats de calcul des houles de récurrence annuelle	22
Tableau II-4 : résultats de calcul (période de retour cinquantiennale)	22
Tableau II-5 : résultats de calcul (période de retour centennale)	23
Tableau II-6 : fréquences des vents à la station de Bou-Ismaïl (1956-1960)	24
Tableau II-7 : fréquences mensuelles en (s^{-1}) de la houle au large par direction	27
Tableau II-8 : valeur de Hs (m) – Données de SSMO (Larras)	28
Tableau II-9 : valeur de Hs (m) – Données de SSMO (Weibull)	28
Tableau II-10 : probabilité d'apparition de la houle associée aux périodes-direction	29
Tableau II-11 : hauteurs des houles extrêmes par secteur de provenance	29
Tableau II-12 : flottille actuelle	32
Tableau II-13 : flottille actuelle	32
Tableau II-14 : flottille prévisionnelle	32
Tableau II-15 : productions moyennes usuelles	33
Tableau II-16 : profondeur d'eau nécessaire aux sardiniers	33
Tableau II-17 : profondeur d'eau nécessaire aux petits métiers	33
Tableau II-18 : linéaire nécessaire pour l'amarrage	34
Tableau II-19 : nombre de postes de réparation	36
Tableaux II-20-21 : tableau récapitulatif des besoins.....	37
Tableau III-1 : rapports de similitudes des différentes grandeurs physiques	44
Tableau IV-1 : différents blocs artificiels trouvés au LEM	55
Tableau IV-2 : différents blocs artificiels existants au LEM	65
Tableau V-1 : caractéristiques de la houle à la profondeur -10m	71

Tableau V-2 : critères de franchissement pour la circulation des piétons	73
Tableau V-3 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante n°1 du profil B-B	79
Tableau V-4 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante	80
Tableau V-5 : observations des essais sur la variante n°1 du profil B-B	80
Tableau V-6 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante n°2 du profil B-B	83
Tableau V-7 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante	84
Tableau V-8 : observations des essais sur la variante 2 du profil B-B	85
Tableau V-9 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante 3 du profil B-B	87
Tableau V-10 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante	87
Tableau V-11 : observations des essais sur la variante 3 du profil B-B	88
Tableau V-12 : observations des essais d'endurance	89
Tableau V-13 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante 1 du profil C-C	90
Tableau V-14 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante	91
Tableau V-15 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante 2 du profil C-C	92
Tableau V-16 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante	93
Tableau V-17 : observations des essais sur la variante 2 du profil C-C	94
Tableau V-18 : observations des essais d'endurance	95
Tableau V-19 : résultats de la quantification des franchissements	97

Tableau V-20 : observations des essais sur la variante 3 du profil C-C	99
Tableau V-21 : observations des essais d'endurance	100
Tableau V-22 : résultats de la quantification des franchissements	101
Tableau VI-1 : critères admissibles d'agitation	104
Tableau VI-2 : résultats de la réfraction de la houle à la profondeur -20m	109
Tableau VI-3 : caractéristique des matériaux en nature et en modèle	110
Tableau VI-4 : observations des essais sur la variante n°1	112
Tableau VI-5 : observations des essais sur la variante n°2	114
Tableau VI-6 : les résultats des essais d'agitation sur la variante n°2	116
Tableau VI-7 : observation des essais sur la variante n°3	119
Tableau VI-8 : les résultats des essais d'agitation sur la variante n°3	120
Tableau VI-9 : observations des essais d'endurance	122

Liste des symboles

Symbole	Nom	Unité
C	Célérité	$m.s^{-1}$
d	Profondeur	m
e	Épaisseur d'une couche formant les jetées	m
F	Nombre de Froude	(Sans unité)
f	Force d'inertie	N
f_1	Force d'inertie du prototype	N
f_2	Force d'inertie du modèle	N
F_t	Force de turbulence	N
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
H	Hauteur ou creux de la houle	m
H_b	Hauteur de la houle de projet	m
H/L	Cambrure de la houle	(Sans unité)
H_i	Amplitude de la houle incidente	m
H_{max}	Creux maximale de la houle	m
H_r	Amplitude de la houle réfléchie	m
H_s	Amplitude de la houle au large	m
$H_{1/3}$	Hauteur significative des vagues de l'enregistrement	m
H_{100}	Hauteur de la houle centennale	m
K_d	Coefficient dépend de la nature du bloc	(Sans unité)
K_r	Coefficient de réfraction	(Sans unité)
K_Δ	Coefficient de couche	(Sans unité)
L	Longueur d'onde	m
L_1	Dimensions linéaires du prototype	m
L_2	Dimensions linéaires du modèle	m
m	Masse d'une particule	g
N	Durée de vie de l'ouvrage	ans
P_n	Probabilité d'apparition d'une houle	(Sans unité)

P_E	Probabilité de dommage E	(Sans unité)
Q	Débit des franchissements moyen	$m^3/s/m$
r	Coefficient de réflexion	(Sans unité)
$S(f)$	Valeur du spectre d'énergie	(Sans unité)
T	Période de la houle	s
T_p	Période du pic du spectre	s
t_1	Temps du prototype	s
t_2	Temps du modèle	s
V	Volume du bloc	m^3
V_1	Vitesse du prototype	$m.s^{-1}$
V_2	Vitesse du modèle	$m.s^{-1}$
W	Poids unitaire des blocs	T
γ_r	Densité de bloc ou de l'enrochement	T/m^3
γ_s	Densité des matériaux constitutifs du bloc	T/m^3
γ_0	Densité de l'eau de mer	T/m^3
γ	Coefficient de surélévation du pic du spectre	(sans unité)
γ_1	Accélérations du prototype	$m.s^{-2}$
γ_2	Accélérations du modèle	$m.s^{-2}$
λ	Echelle du modèle	(sans unité)
λ_γ	Echelle des accélérations	(sans unité)
λ_{fi}	Echelle des forces d'inertie	(sans unité)
λ_{fv}	Rapport des forces de viscosité	(sans unité)
λ_g	Echelle des forces de gravités	(sans unité)
λ_m	Echelle des masses	(sans unité)
λ_p	Echelle des pressions	(sans unité)
λ_q	Echelle des débits	(sans unité)
λ_t	Echelle des temps	(sans unité)
λ_v	Echelle des vitesses	(sans unité)
λ_ρ	Echelle des masses volumiques	(sans unité)

λ^3	Echelle des volumes	(sans unité)
ζ	Côte de la pression a la surface du fluide	m
α	Angle du talus	degré
ρ	Masse volumique du liquide	g.m^{-3}
Δ	Distorsion	(sans unité)
σ	Paramètre caractérise la largeur du pic du spectre	(sans unité)

Terminologie

APS : Avant-projet sommaire.

Baie : Echancrure de la côte. Petit Golf.

Bassin à houle : Modèle physique (modèle réduit) à trois dimensions permettant entre autres l'étude des ouvrages soumis à l'action de houle obliques.

Bathymétrie : Les mesures des profondeurs d'eau et traitement des données correspondantes.

Canal à houle : Modèle physique (modèle réduit) à deux dimensions permettant l'étude des ouvrages à l'attaque frontale de la houle.

Carapace : C'est la partie de l'ouvrage qui reçoit directement l'attaque de la houle.

Chalutier : Pêcheur qui se sert du chalut. Bateau de pêche qui traîne le chalut.

Clapotis : Nom donné au mouvement de la mer résultant de la réflexion totale de la houle sur un mur vertical (agitation légère de l'eau produisant un bruit particulier).

Courant marin : Déplacement d'eau de mer caractérisé par sa direction, sa vitesse et son déplacement.

Ducs d'Albe : Les ducs d'albe sont des appuis isolés servant à l'accostage et l'appui, ou à l'amarrage des navires.

Fetch : Il s'agit de la zone au sein de laquelle sont générées les vagues qui constituent la houle.

Houle : Oscillation régulière de la surface de la mer, indépendant du vent local, dont la période est de l'ordre de la dizaine de seconde.

Isobathe : Lieu des points d'égale profondeur.

Marnage : La différence des hauteurs d'eau d'une pleine mer et d'une basse mer.

Marée : Mouvement à allure périodique du niveau de la mer, dû aux effets de l'attraction gravitationnelle exercée par la Lune et le Soleil sur les particules liquides.

Modèles physique : Ce sont de véritables modèles réduits hydrauliques du port à construire sur lesquels on simule divers phénomènes physiques.

Run down : Descente de la vague.

Run up : montée de la vague.

N.G.A : niveau générale d'Algérie.

INTRODUCTION GENERALE

Autrefois, les civilisations avaient besoin d'une infrastructure appelée « port » pour abriter des navires et bateaux pendant les opérations de chargement et de déchargement des marchandises, qu'elles soient à but commercial ou autres.

Situés à la jonction des axes terrestres et maritimes, les ports ont toujours été des lieux d'échanges et d'extrême activité qui abritent l'évolution et le stationnement des navires contre la houle.

Les modèles de construction des ports ont changé suivant les technologies de chaque époque et les matériaux disponibles sur place et peuvent être classés selon leur localisation, leur statut et leur activité.

Dans le mode moderne, les échanges maritimes restent le mode de transport le plus économique ; l'infrastructure portuaire diverge aujourd'hui d'après l'importance du trafic et des sortes de navires et des marchandises transportées.

La conception et la réalisation d'un port maritime constituent une tâche difficile, car elles demandent un travail d'équipe pluridisciplinaire.

Doivent ainsi être pris en compte :

- La connaissance de l'environnement naturel des sites (houles, courants, inventaires faune/flore, etc.) ;
- Les trafics potentiels et leur développement à moyen et à long terme en termes de tonnage des marchandises, mais aussi de taille de navires ;
- Les montages financiers et juridiques (partenariats publics privés, concessions, etc.) en vue de réaliser le futur port ;
- Les données techniques pour créer les ouvrages extérieurs et intérieurs du futur port.

Le but de ces études est de proposer des solutions :

- sélectionner le meilleur site;
- retenir une partie d'aménagement général se traduisant par l'exécution d'un plan de masse initial, complété par des variantes et d'autres phases;
- choisir le meilleur cadre juridique pour réaliser le futur port ;
- réaliser non seulement les infrastructures portuaires, mais aussi les autres infrastructures de transport (routes, autoroutes, voies ferrées, voies navigables, pipe-line...) nécessaires au bon fonctionnement du port ;
- Equiper le port des moyens les plus appropriés pour traiter, le plus efficacement possible, les divers trafics et les informations nécessaires au commerce national et international. (<http://www.techniques-ingenieur.fr/>)

Les ouvrages et aménagements maritimes sont généralement très coûteux, il est donc nécessaire, avant de les réaliser, de bien prévoir leur fonctionnement.

Ainsi, lors de la mise au point d'un projet, il faut :

- S'assurer que les objectifs visés seront atteints (par exemple, bassin portuaire bien abrité);
- S'assurer que les ouvrages seront capables de bien résister aux actions de la mer;
- Prévoir les risques d'ensablement d'un port, définir des impacts sur les fonds et littoraux avoisinants et proposer des mesures compensatoires si besoins;

C'est-à-dire optimiser le projet tant au point de vue économique, que technique.

Le modèle réduit physique est justement l'outil adéquat pour aboutir à cet objectif.

Afin de répondre à ces conditions, laboratoire d'études maritimes a conçu un modèle réduit physique de l'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche.

Les simulations physiques sur ce modèle feront l'objet de notre mémoire de fin d'étude qui comporte six (06) chapitres, brièvement décrits comme suit :

Le **chapitre I** comporte les généralités sur les ports maritimes et la théorie de la houle.

Dans le **chapitre II** est décrit le projet avec une collecte et analyse de ces données.

Dans le **chapitre III** sont développés les lois de similitude et les types des modèles.

Le **chapitre IV** concerne le pré-dimensionnement des ouvrages de protection en déterminant la houle de projet.

Dans le **Chapitre V** nous présentons les essais de stabilité en canal à houle en utilisant la meilleure variante.

Dans le **Chapitre VI** est donné la vérification de stabilité sur le bassin à houle et confirmer les critères d'agitation.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les
ports et la théorie de la
houle

Chapitre I

Généralités sur les ports et la théorie de la houle

I. Définition d'un port

Le port est l'ensemble des espaces terrestres, eaux maritimes ou fluviales, des infrastructures et des superstructures réunissant les conditions physiques et d'organisation physiques permettant l'accueil des navires pour qu'ils s'y abritent, y accostent, y effectuent les opérations d'embarquement et de débarquement des marchandises ou des passagers, s'y approvisionnent ou y effectuent des réparations.

Le port peut aussi être défini comme suit :

- Un bassin formant un abri naturel ou artificiel sur les rives d'une mer, d'un lac ou d'une rivière.
- Permet l'ancrage, le mouillage ou le stationnement à quai des bateaux à couvert de la houle et des grands vents.
- Port désigne aussi un plan d'eau qui inclut les digues, les jetées, les quais et les docks qui bordent le plan d'eau.
- Un ensemble complexe occupant une place privilégiée sur le plan national et international.

Le port peut être de commerce, de pêche, de plaisance ou de plusieurs de ces activités à la fois. Il fait partie du domaine public de l'état et il constitue le domaine public portuaire.

II. Types de ports en fonction de leur rôle, activités et localisation

Le port est une infrastructure, située sur le littoral maritime, sur les berges d'un lac ou sur un cours d'eau; qui doit bien, avant tout, abriter et protéger les navires contre l'action de la houle,

Au point de vue économique, un port est un établissement destiné à la réception des navires en vue d'assurer la continuité des transports entre les voies maritimes et terrestre ou fluviale.

Il peut remplir plusieurs fonctions dont :

- Stationnement des navires et bateaux ;
- Facilitation des opérations de ravitaillement et de réparations ;
- Effectuer des opérations commerciales d'embarquement et de débarquement des passagers et des marchandises ;
- Un lieu de séjour pour les équipages et les passagers.

Théoriquement, on peut différencier les divers types de ports en fonction de leurs rôles, activités et localisation (*Benidjer, 2013*) :

1) Les ports militaires

Les ports militaires doivent comprendre deux éléments très importants et essentiels :

- Une rade abritée assez vaste dans laquelle les navires sont stationnés, car elle doit permettre des manœuvres d'évitement rapide ;

- Des installations ayant les mêmes dispositions que celles d'un port commercial. (*Benidjer, 2013*)

2) Les ports commerciaux

Aujourd'hui, les ports de commerce jouent un rôle essentiel dans la mondialisation, puisque grâce à une massification toujours plus intense, les prix du transport maritime sont particulièrement faibles, si bien que 90% des échanges internationaux de marchandises passent par cette voie.

Les économies plus régionales emploient le cabotage le long des côtes et certains détroits resserrés sont très favorables aux déplacements intenses de passagers.

Les ports de commerce maritimes sont donc aujourd'hui comme des poumons de l'économie mondiale qui, tout au long de leur histoire, ont su adapter leurs équipements à la croissance des échanges et à celle de la démographie.

Ils évoluent dans un climat concurrentiel qui a formé l'unité et la diversité de leurs communautés humaines.

Ces ports peuvent assurer un trafic de voyageurs, de marchandises diverses ou spécialisées et de pondéreux en vrac (solides, liquides ou gaz liquéfiés).

Pour remplir ces diverses missions un port de commerce comporte des installations spécialisées en fonction du trafic qui doit passer par ses divers postes de réception de navires. (*Benidjer, 2013*)

a) Le trafic de voyageurs

Tous les ports de passagers doivent permettre de rapides mouvements des navires qui doivent pouvoir gagner et quitter leur poste de stationnement sans manœuvres compliquées, pour réduire autant que possible la durée des escales. Les ports têtes de ligne ou ayant de fréquentes escales doivent en outre, comporter des installations pour la réparation et l'avitaillement des navires.

Le confort, qu'offrent aux passagers les gares maritimes, est d'autant plus poussé que les passagers effectuent une navigation plus longue ; les passagers de courte et moyenne navigation attachent davantage d'importance à la rapidité de leur voyage qu'au confort des points terminaux. (*Benidjer, 2013*)

b) Trafic de marchandises diverses

Les ports de transit doivent permettre une grande rapidité de manutention et d'évacuation des marchandises.

Les ports à marchés ou la marchandise séjourne pendant une certaine durée, doivent comporter de vastes installations de magasinage, la rapidité de passage de la marchandise dans le port étant moins importante que dans le cas précédent.

Dans tous les cas, les ports à marchandises diverses doivent comporter des installations très spécialisées pour certaines catégories de marchandises. (*Benidjer, 2013*)

c) Trafic de marchandises pondéreuses solides en vrac

Les ports charbonniers et minéraliers (à l'importation ou l'exportation) se caractérisent par la nécessité de recevoir des navires dont la taille est souvent très importante. Ils doivent disposer de vastes terre-pleins de stockage.

Ces ports sont souvent liés à l'implantation d'industries lourdes. (*Benidjer, 2013*)

d) Trafic d'hydrocarbures (liquides ou gaz liquéfiés)

Les ports qui assurent un trafic d'hydrocarbures liquides ou de gaz liquéfiés doivent également permettre l'accès des navires de taille toujours très importante. Leurs dispositions doivent toujours assurer une complète sécurité des navires, éviter une dangereuse propagation du feu en cas d'incendie et permettre une rapide évacuation des navires chargés d'hydrocarbures, en cas de sinistre. (*Benidjer, 2013*)

3) Ports fluviaux

Les ports fluviaux, ou ports intérieurs, sont situés sur le bord d'un fleuve, d'une rivière ou d'un canal. Ils sont souvent aménagés sur un bras mort, une dérivation ou un élargissement naturel du cours d'eau afin d'éviter que le courant ne gêne les activités portuaires. Certains ports fluviaux sont créés artificiellement en creusant la terre pour créer des bassins accessibles depuis le fleuve.

Les grands ports fluviaux sont souvent près des embouchures de grands fleuves, accessibles à des navires venant de la mer ; on peut donc les considérer comme des ports maritimes au vu de leur trafic. (*Benidjer, 2013*)

4) Ports lacustres

Ils sont situés en bordure d'un lac. S'ils ne sont pas soumis aux aléas des marées, les ports lacustres comprennent les petites marinas, mais également des ports de commerce. (*Benidjer, 2013*)

5) Ports à sec

Les ports à sec permettent le stockage à terre de petites unités telles que les voiliers de plaisance et les yachts. Ils sont situés à proximité d'un port de plaisance ou au moins d'une cale de mise à l'eau. (*Benidjer, 2013*)

6) Ports des travaux

Ce sont des ports créés pour l'exécution de grands travaux afin de servir à abriter les engins flottants. (*Benidjer, 2013*)

7) Ports de pêche

Leurs dimensions varient selon les bateaux accueillis et l'infrastructure est plus simple que pour un port de commerce : quelque quais ou pontons, une station de ravitaillement et un moyen de vendre le produit de la pêche (marché à proximité), et éventuellement de le traiter avant la vente si cela n'a pas été fait sur le bateau.

Les ports de pêche ont des dispositions très variables avec le type de pêche pratiquée par les usagers. Les ports qui doivent recevoir de grands chalutiers ou des navires usines doivent comporter d'importantes installations au contraire ceux qui abritent ou reçoivent de petites unités. (*Benidjer, 2013*)

8) Ports de plaisance

Le développement des loisirs maritimes a entraîné la création de port spécialement aménagés pour la navigation de plaisance (touristique).

Comme la pêche, la plaisance se caractérise par une grande variété dans la taille et le type des navires et nécessite des conceptions également très variables pour l'aménagement des ports. (*Benidjer, 2013*)

III. Principales composantes d'un port

Les divers types d'ouvrages d'un port maritime sont les suivants (Benidjer, 2013) :

1) Les ouvrages de protection et d'accès

Ont pour rôle de protéger le port contre la houle et ses apports solides; pour les ports intérieurs, ces ouvrages assurent le calibrage du chenal d'accès.

Certains postes, très exposés, sont abrités du vent au moyen de murs-écrans : l'efficacité de ces ouvrages est cependant faible et il est conseillé de rechercher de préférence une orientation des postes d'accostage évitant d'exposer les navires à l'action de forts vents traversiers.

2) Les plans d'eau

Servent à l'évolution et au stationnement des navires ; ils constituent :

- Des bassins de marée, dont le niveau suit celui de la marée,
- Des bassins à flot, dont le niveau suit celui (variable) des pleines mers ou est maintenu à un niveau constant.

La communication entre des bassins de même niveau se fait par des chenaux intérieurs, de longueurs plus ou moins importantes, qu'il convient d'ailleurs de limiter en raison des difficultés de la navigation dans ces chenaux étroits.

La communication entre bassins ou plans d'eau dont les niveaux peuvent être différents, se fait par des écluses qui sont :

- Des écluses simples, permettant de faire des mouvements lorsque les niveaux sont sensiblement égaux de part et d'autre de l'ouvrage ;
- Des écluses à sas, pouvant être franchies quels que soient les niveaux des bassins qu'elles relient.

3) Les ouvrages d'accostage

Sont les quais, appontements, ducs d'Albe.

- Les quais ont un triple rôle :
 - Permettre l'accostage et l'amarrage des navires ;
 - Retenir les terres au contact des plans d'eau ;
 - Assurer la liaison entre le navire et la terre : dans ce cas, les ouvrages de liaison supportent les engins de manutention et les aires de stockage, qui peuvent comporter des hangars, des terres pleins, des chaussées et des voies ferrées.
- Certains ouvrages d'accostage ne soutiennent pas les terres qui restent inclinés en talus, le plus souvent revêtus d'enrochement, ou sont isolés de la terre à laquelle ils sont reliés par une passerelle ; on les désigne en général en sous le nom d'appontements.
- D'autres ouvrages permettent seulement l'amarrage des navires (ducs d'Albe, coffres d'amarrage) ou l'accostage (ducs d'Albe) ; sans aucun rôle de support de l'outillage ni de retenue des terres.

4) Les aires de stockage des marchandises

Sont couvertes ou non ; les postes sont desservis par des voies ferrées et des chaussées situées en arrière des installations établies immédiatement en bordure des plans d'eau.

Dans les ports industriels, on trouve également les usines établies à proximité des postes de réception de navires : les aires de stockage primaire (pré-stock) sont établies en bordure immédiate des plans d'eau.

5) Les ouvrages pour la construction, la réparation et l'entretien des navires

Sont les cales de lancement, forme de radoub, cales de halage, docks flottants, grils de carénage et ateliers.

6) Des plans d'eau et des ouvrages d'accostage

Sont réservés aux navires désarmés ou en attente d'un poste d'opération. Ce sont, en général, des ouvrages anciens, qui ne sont plus utilisés pour des opérations commerciales, de simples ducs d'Albe ou même des coffres d'amarrage.

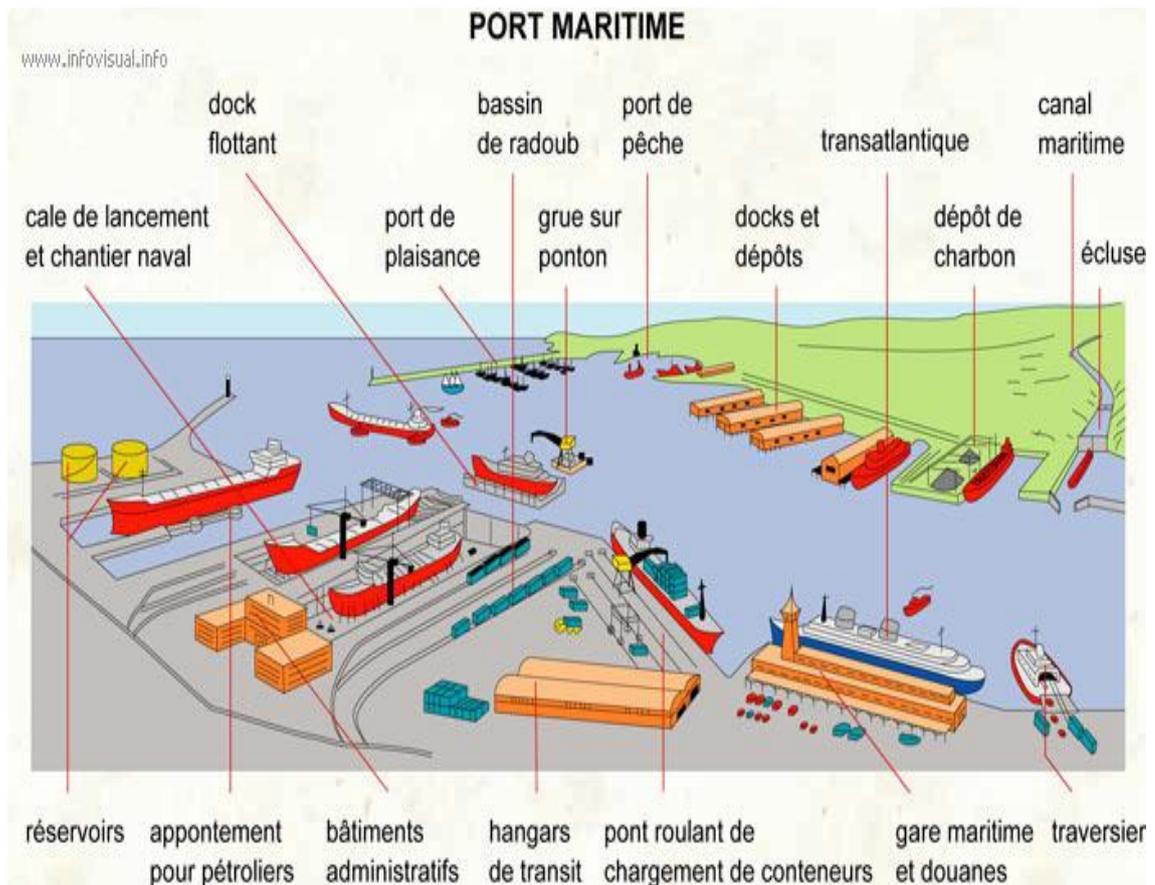


Figure I.1 : schéma détaillé d'un port maritime et ses ouvrages. (www.infovisual.info)

On d'autres termes l'enceinte portuaire est une zone terrestre clôturée, attenante aux bassins et aménagée pour les opérations d'embarquement, de débarquement et d'entreposage des marchandises ainsi que pour l'embarquement et le débarquement des passagers, (www.infovisual.info)

- La rade, zone maritime ou fluviale du port est constituée de :
 - la zone de pilotage obligatoire ;
 - la zone de mouillage, dans laquelle le stationnement des navires est soumis au contrôle de l'Agence nationale des ports.
- Le chenal d'accès est l'espace maritime ou fluvial réservé à la navigation pour les opérations d'entrée ou de sortie du port ;
- Les infrastructures portuaires sont l'ensemble des ouvrages terrestres, maritimes et fluviaux construits et aménagés pour l'accueil des navires. Elles comprennent notamment :
 - les ouvrages de protection tels que les digues et les jetées ;
 - les ouvrages d'accostage tels que les quais et les appontements ;
 - les bassins ;
 - les terre-pleins.
- Les superstructures portuaires qui sont l'ensemble des constructions, installations et aménagements affectés au service des navires, des marchandises ou des passagers.

Le schéma ci-dessous donne les différentes composantes d'un port maritime :

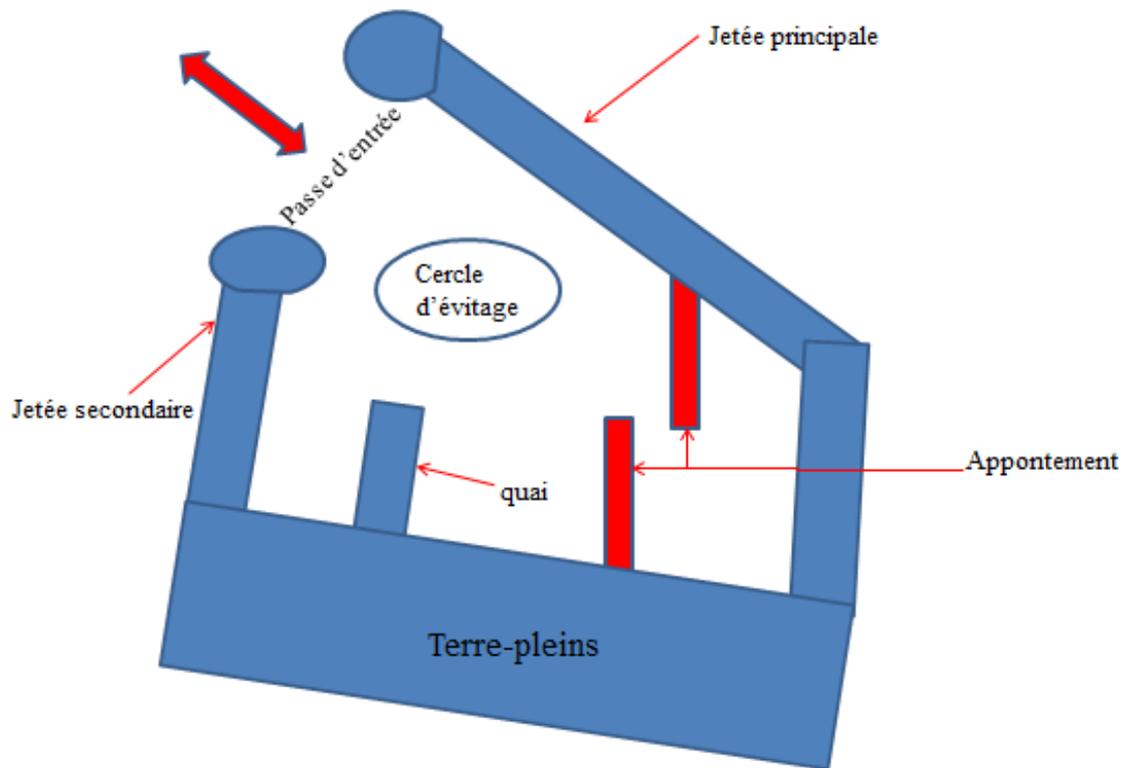


Figure I.2 : schéma d'un port maritime

Les ports sont des ouvrages maritimes qui subissent souvent des tempêtes qui peuvent les endommager, c'est pour cela qu'on les aménage d'une manière que leur stabilité soit durable pour une protection efficace des côtes. Et pour pouvoir faire un aménagement fiable de ces ports on doit avoir des connaissances sur la houle et sa théorie ainsi que ses déformations : réflexion, diffraction, réfraction et déferlement qui ont une grande influence sur les ouvrages qui constituent le port.

IV. Théorie de la houle

1) Formation de la houle

La surface des mers et des océans présente globalement des oscillations successives parallèles pratiquement identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage.

La houle est une suite ou ensemble d'ondulations ou de vagues qui se propagent du large vers nos côtes, elle est définie par sa direction et sa hauteur H ainsi que sa longueur L .

D'où le creux ou hauteur H est la dénivellation maximale entre une crête et un creux successif, longueur d'onde L est la distance entre deux crêtes qui se suivent, cambrure le rapport H/L . T est la période de la houle c'est à dire le temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe. La vitesse moyenne de la propagation des crêtes, c'est-à-dire L/T , est appelée célérité C . d désigne la profondeur. (*Bonnefille, 1980*)

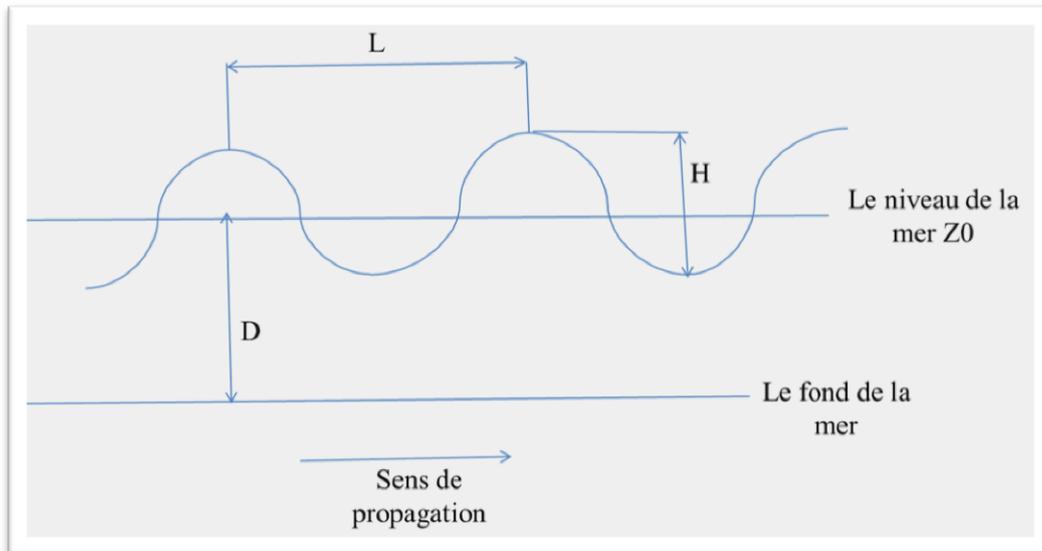


Figure I.3 : forme de la houle

En période de tempête la hauteur de la houle est de quelques mètres ; elle ne dépasse pas les vingtaines de mètres sur le globe terrestre. Sa longueur d'onde, L , varie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Et sa période, T , varie de 3 s à 20 s selon les dimensions de la mer. La cambrure (H/L) de la houle ne peut théoriquement pas dépasser 14 %, mais elle est toujours plus faible, car la houle déferle avant qu'elle atteigne cette valeur.

De diverses théories mathématiques ont été mise en place pour l'explication et le calcul de la houle régulière. Mais on sait très bien que la houle ne peut être régulière car la surface de la mer est plus complexe que celle décrite par la théorie. La houle réelle (non régulière) résulte d'une suite d'ondulations diverses qui chacune d'elles s'apparentent à la houle théorique. La houle est une oscillation qui n'intéresse que la partie superficielle du fluide. Tant que la profondeur est grande la houle continue sa propagation sans aucune déformation dès qu'elle s'approche de la cote ou bien rencontre des ouvrage artificiels sa propagation est modifiée par réflexion, diffraction, réflexion ou déferlement. (*Bonnefille, 1980*)

2) Les hypothèses de la houle

Les hypothèses de base sont le fluide parfait, homogène et pesant, et le mouvement cylindrique. Le problème est plan ; l'axe des x est horizontal, l'axe des z vertical ascendant: l'origine des coordonnées est prise sur la surface de repos du fluide. La pression à la surface est agitée, de cote ζ , est la pression atmosphérique supposée partout constante ; il n'y a pas d'autres contraintes agissant sur la surface libre ; le vent a donc cessé de souffler. Le fond imperméable, à la distance d sous la surface libre, est supposé horizontal ; mais les théories, qui ne sont qu'approchées, restent valables dans une certaine mesure même si la profondeur varie très lentement. Le problème à résoudre est de déterminer le ou les mouvements des particules fluides telle que la surface libre présente une suite d'oscillation périodique se propageant dans une direction donnée, ici celle des x positifs.

La théorie potentielle, la base des modèles de houle, est déduite des équations de Navier-Stokes par l'hypothèse d'écoulement irrotationnel. La houle linéaire (houle de Stokes

d'ordre 1) est obtenue suivant l'hypothèse d'onde de petite cambrure, c'est-à-dire négliger les termes non-linéaires. (Bonnefille, 1980)

Ces différents modèles de houle ont des domaines de validité limités (figure. I.3). La théorie de Stokes est plutôt valide en eaux profondes. Plus l'ordre de développement augmente, et la théorie peut rendre compte de la propagation des ondes de grande cambrure.

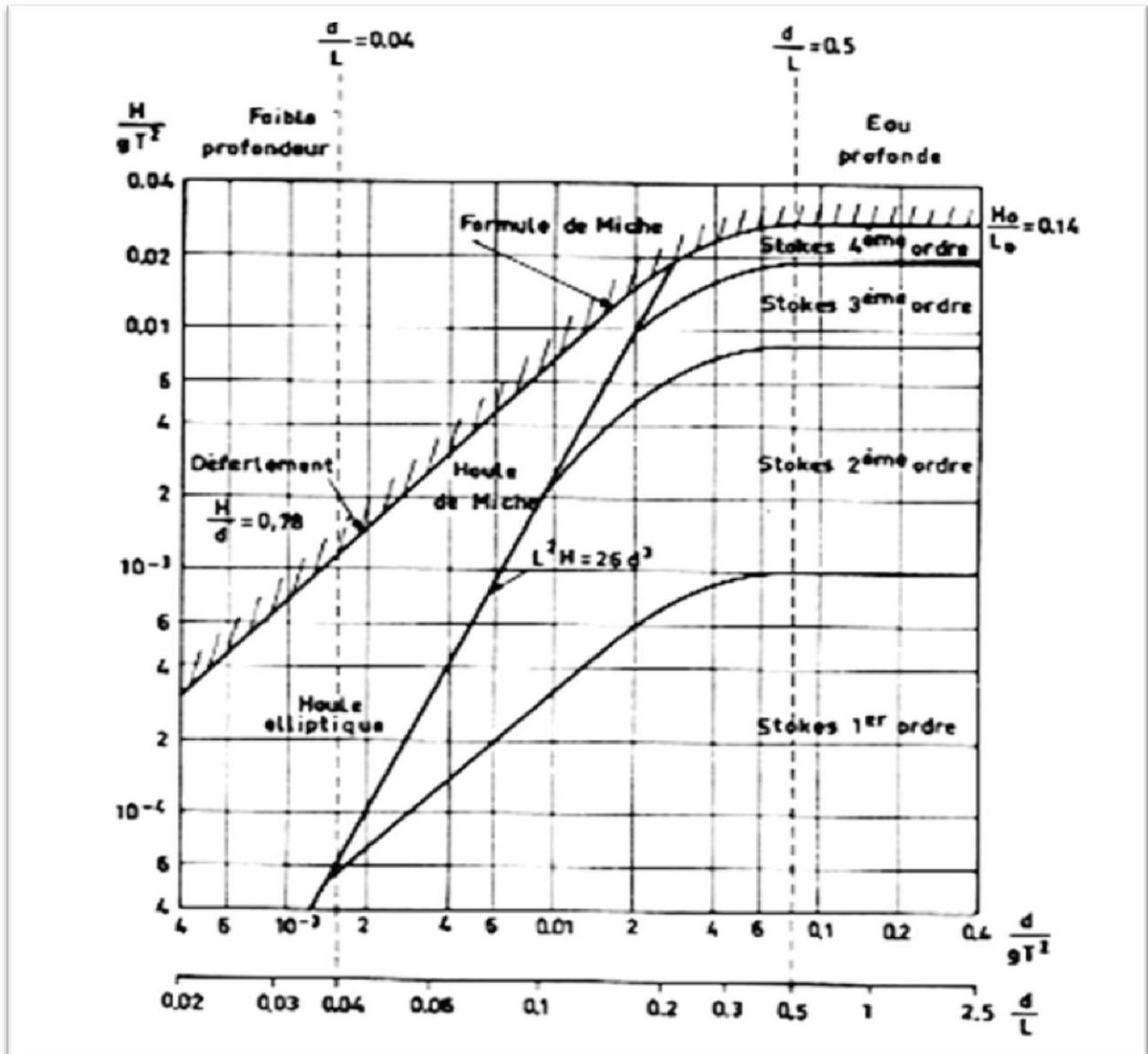


Figure I.4 : domaine de validité des différents modèles de houle, (Duval, 2007)

La théorie de Stokes peut s'appliquer au milieu peu profond correspondant au rapport $L/d < 25$, tel que d est la profondeur et L est longueur d'onde, pour les cambrures les plus petites. La théorie des ondes conoïdales s'applique aux eaux peu profondes et de profondeurs intermédiaires avec des limites variant entre $L/d \sim 8$ pour les vagues infiniment petites et $L/d \sim 7$ pour les ondes de fortes cambrures. (Bonnefille, 1980)

V. Formation de la houle

La surface des océans est perturbée par de nombreux phénomènes physiques tels l'action du vent, les mouvements du plancher océanique dus aux séismes et glissements de terrains se répercutant dans la colonne d'eau, l'interaction entre la Terre et les astres, ou encore les différences de pressions atmosphériques. Les forces mises en jeu déforment la surface libre et entraînent un transfert d'énergie mécanique qui se manifeste par la formation et la propagation d'ondes. L'apparition d'un mouvement oscillant suite à ces perturbations n'est possible que s'il existe des forces de rappel qui tendent à ramener le fluide à sa position d'équilibre. Toutes les ondes présentes en mer sont soumises à plusieurs forces de rappel parmi lesquelles on trouve la gravité, la force de Coriolis, les tensions superficielles et la compressibilité du fluide. On distingue donc les forces génératrices (forces éoliennes, tectoniques, astronomiques...) qui contribuent à la déformation de la surface libre des océans, et les forces de rappel qui permettent leur propagation. La diversité de ces phénomènes entraîne ainsi pour l'ensemble des oscillations, une plage de périodes possibles extrêmement large. (*Jarry, 2009*)

VI. Différentes déformations de la houle

La houle se crée sous l'action du vent sur la surface de la mer formant des ondulations qui se propagent du large (du point de leur formation) vers les côtes et cela sous différents aspects causés par des déformations résultant de la variation des profondeurs, les courants marins ainsi que les différentes directions du vent.

1) Réfraction de la houle

Lorsque la houle cylindrique se propage par des profondeurs variables, sa longueur d'onde, son amplitude et sa direction subissent des modifications, alors que sa période reste constante ; c'est le phénomène de réfraction. Si la propagation s'effectue vers une cote faiblement inclinée, dont les lignes de niveau sont sensiblement parallèles aux crêtes de la houle, on constate une diminution de la longueur d'onde, et en général de l'amplitude ; les vagues se déforment avec augmentation de la cambrure au fur et à mesure que la profondeur diminue. Si les lignes de niveau du fond ne sont pas parallèles aux crêtes, les vagues subissent une rotation qui tend à la rendre parallèles aux crêtes et aux lignes de fond. C'est ainsi que la houle subit des concentrations au voisinage d'une pointe ou d'une île, pouvant augmenter considérablement son amplitude ; au contraire la propagation dans une baie provoque un épanouissement des crêtes avec diminution de l'amplitude. (*Chapon, 1971*)

2) Diffraction de la houle

Le passage de la houle à travers une passe ou à proximité d'une digue unique entraîne la rotation des crêtes et une réduction de l'amplitude par diffraction ; d'une façon générale l'amplitude des vagues décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne des musoirs et des digues, dans l'ombre géométrique de la houle incidente. La longueur d'onde et la période ne sont pas modifiés par la diffraction.

Dans un milieu d'indice constant (célérité de la houle ou profondeur constante), la houle peut ne pas suivre les lois de propagation rectiligne. C'est à dire que la houle est capable de contourner les obstacles, comme par exemple l'extrémité d'une jetée le musoir.

La diffraction d'une houle par une jetée unique ou une brèche se calcule de façon analogue à la méthode employée en optique. Pour compléter l'analogie avec la lumière, on reconnaît souvent, notamment sur des photos aériennes, une véritable diffusion de l'agitation marine par de très petits obstacles (rochers isolés) qui rayonnent cette agitation en cercles dont les obstacles occupent le centre. (*Chapon, 1971*)

3) Réflexion de la houle

Lorsque la houle atteint une paroi verticale, elle se réfléchit en formant un système d'ondes stationnaires appelé « clapotis » ; l'amplitude de ces ondes est sensiblement le double de celle de la houle incidente, leur longueur d'onde et leur période restant celles de la houle incidente.

Si la houle aborde l'écran sur un certain angle, la réflexion s'effectue de la même façon que pour les ondes lumineuses; la composition de la houle incidente et de la houle réfléchie donne aux abords de l'obstacle un phénomène stationnaire compliqué appelé gaufrage.

Une paroi fortement inclinée donne une réflexion partielle avec formation d'un clapotis partiel d'amplitude inférieure à celle due à la réflexion totale.

L'énergie transportée par la houle se fractionne à la rencontre d'un obstacle selon le principe suivant (*Chapon, 1971*) :

- Le déferlement dissipe une partie de l'énergie par turbulence,
- La rugosité de la paroi rencontrée crée des frottements dissipateurs d'énergie,
- Une partie se transmet soit à travers l'obstacle s'il est perméable, soit au-dessus de lui s'il est franchissable,
- Enfin, l'obstacle réfléchit une partie de l'énergie qui se propage en sens inverse de la houle incidente en se superposant à celle-ci.

Nous allons examiner la réflexion dans le cas d'une paroi verticale et d'un plan incliné (*Chapon, 1971*) :

a) **Réflexion de la houle sur un mur vertical**

Lorsque une houle rencontre, sans déferlement, un mur vertical normal à sa direction de propagation, la vitesse de chaque particule d'eau se réfléchit sur la paroi imperméable. L'onde réfléchie est identique à l'onde incidente mais de direction opposée.

b) **Réflexion de la houle sur un plan incliné**

Considérons une paroi réfléchissante composée d'un plan incliné d'un angle α avec l'horizontale. Dans ce cas la réflexion est partielle. Pour une cambrure forte, une partie de l'énergie est détruite par déferlement.

Miche (1944) donne la cambrure maximale d'une houle non déferlante qui se propage sur un plan incliné par la formule suivante:

$$\gamma = \sqrt{2\alpha/\pi} \cdot \sin^2 \alpha / \pi = 1.254 \sqrt{\alpha \cdot \sin^2 \alpha}$$

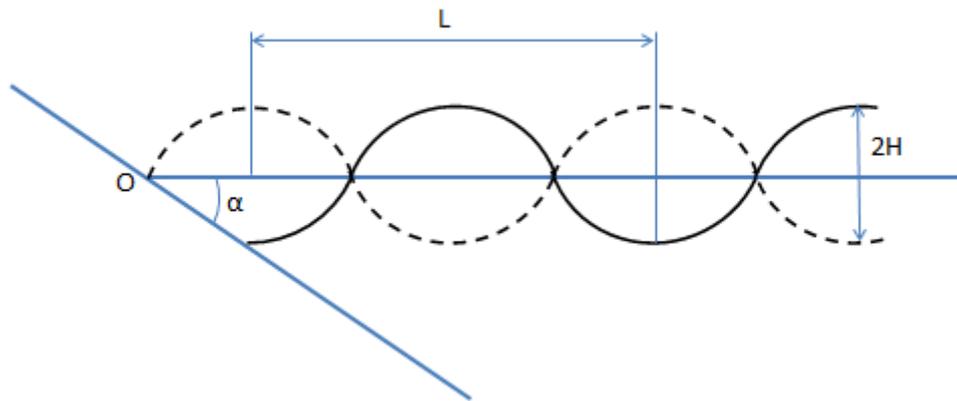


Figure I.5 : réflexion de la houle sur un plan incliné

Les houles moins cambrées se réfléchissent totalement ou partiellement ; le rapport entre le creux réfléchi et le creux incident $r = \frac{H_r}{H_i}$ (coefficient de réflexion) est fonction de :

- l'angle α du talus, tel que le rapport r diminue très vite avec cet angle.
- la cambrure au large, tel que le rapport r diminue lors de l'augmentation de γ (la cambrure).
- la nature de la surface du talus.

4) Déferlement de la houle

Lorsque la houle atteint une cote inclinée, la cambrure des lames augmente jusqu'au déferlement qui se traduit par un effondrement de la vague avec formation d'un bouillonnement (écume) sur la face antérieure; sur un fond à faible pente, les lames déferlantes progressent sans perdre beaucoup de leur symétrie, en produisant vers la crête un point anguleux de l'ordre de 120° qui dépasse le niveau de repos des $\frac{3}{4}$ de l'amplitude.

Au contraire, sur un fond raide le profil devient très dissymétrique et le déferlement s'effectue avec projection d'eau qui retombe en nappe.

Les lames déferlent en général plusieurs fois avant d'atteindre la cote en formant plusieurs lignes de rouleaux, particulièrement dangereux lors des grandes tempêtes. Le déferlement des lames s'accompagne en effet, d'une brutale libération de l'énergie de la houle, qui a d'importantes conséquences pour la tenue des ouvrages ou des rivages et pour les embarcations qui les franchissent. (*Chapon, 1971*)

VII. Analyse spectrale de la houle

Avec l'apparition de moyens de calculs de plus en plus performants, il a été possible de procéder à l'analyse spectrale d'enregistrement de houle et ainsi d'obtenir une représentation de la densité d'énergie en fonction de la fréquence.

Cette méthode présente l'avantage de mettre en évidence de façon directe les fréquences prédominantes de la houle considérée.

Une houle irrégulière est définie par un spectre, représentant la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence. On parle de fréquence ou période pic, la fréquence ou période pour laquelle l'énergie est maximale.

Les formules de spectres les plus couramment rencontrées lors de l'analyse spectrale des enregistrements sont peu nombreuses, le spectre le plus couramment utilisés est (*Schmied, 1993*) :

1) Spectre de Jonswap

Goda a proposé une expression analytique du spectre de Jonswap qui ne dépend que des paramètres internes. On oppose les paramètres internes qui caractérisent les vagues, comme les hauteurs significatives et la période du pic du spectre, aux paramètres externes qui caractérisent le champ de vent, comme la vitesse du vent et la longueur du fetch.

Cette formulation est la suivante :

$$S(f) = \alpha_G \left[\frac{H_{1/3}}{T_p^2} \right] f^{-5} \left\{ -\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right\} \gamma \exp \left[\frac{T_p f - 1}{2\alpha^2} \right]^2$$

Où,

$S(f)$: la valeur du spectre d'énergie associée à la fréquence f ; $H_{1/3}$: la hauteur significative des vagues de l'enregistrement appelée H_s ; T_p : la période du pic du spectre ; γ : le coefficient de surélévation du pic du spectre ; il varie entre 1 et 7 et sa valeur moyenne est 3,3 ; σ est le paramètre qui caractérise la largeur du pic du spectre :

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07, & f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09, & f > f_p \end{cases}$$

et α_G est le paramètre de Goda qu'est donné par la formule suivante :

$$\alpha_G = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$$

Au final, le spectre de Jonswap ne dépend que de trois paramètres : $H_{1/3}$, T_p et γ .

Conclusion

Ce chapitre a permis d'avoir une idée générale sur les ports et leur rôle et de comprendre le phénomène de la houle.

Chapitre II

Description du projet,
collecte et nalyse des
données

Chapitre II

Description du projet, collecte et analyse des données

I. Présentation de la zone d'étude

Chiffalo est un petit village de pêcheurs qui s'étend le long de la côte. Il est accessible par une petite route qui descend de la route nationale reliant Alger à Tipasa.

La zone d'étude « L'abri de pêche de Khemisti » (ex Chiffalo) situé à 45 Km à l'ouest d'Alger, fait partie de la commune de Khemisti. Il se trouve à 35 Km du chef-lieu de Tipasa et est distant de 3 Km du port de Bou Haroun,

Il se trouve inscrit dans une zone rocheuse. Au niveau de l'enracinement de la jetée principale se jette oued Gherbi qui draine un bassin versant non négligeable.



Figure II.1 : la zone d'étude (Google Maps, 2015).

1) Description de l'abri de pêche de Khemisti

L'abri de pêche de Khemisti est protégé par une jetée principale au nord et par une jetée secondaire à l'ouest. La jetée principale de 200 m où l'oued Ghrib se jette à son enracinement. La jetée secondaire de 120 m environ est constituée d'une dalle avec un mur de garde en béton.

L'extension de la digue principale (faite en 1990), parachève la protection des bassins portuaires de l'abri de pêche contre l'agitation.

2) But d'implantation du port de Khemisti

L'extension de cet abri de pêche en port de pêche va modifier de façon positive l'économie de cette région, en contribuant au développement de cette activité et à la création d'emplois directs et indirects.

3) Plan de masse du port de Khemisti actuel et proposé pour l'extension

a) Plan de masse actuel

Le plan de masse actuel du port révèle qu'il manque plusieurs services et constructions nécessaires pour le bon déroulement de l'activité de pêche et un manque d'équipements et d'effectifs nécessaires pour l'amélioration de ces services. Le plan d'occupation de la zone portuaire prévue nécessite une étude détaillée de ces différentes installations. Leur répartition dans l'espace doit être justifiée afin de faire une meilleure exploitation des différents trafics.

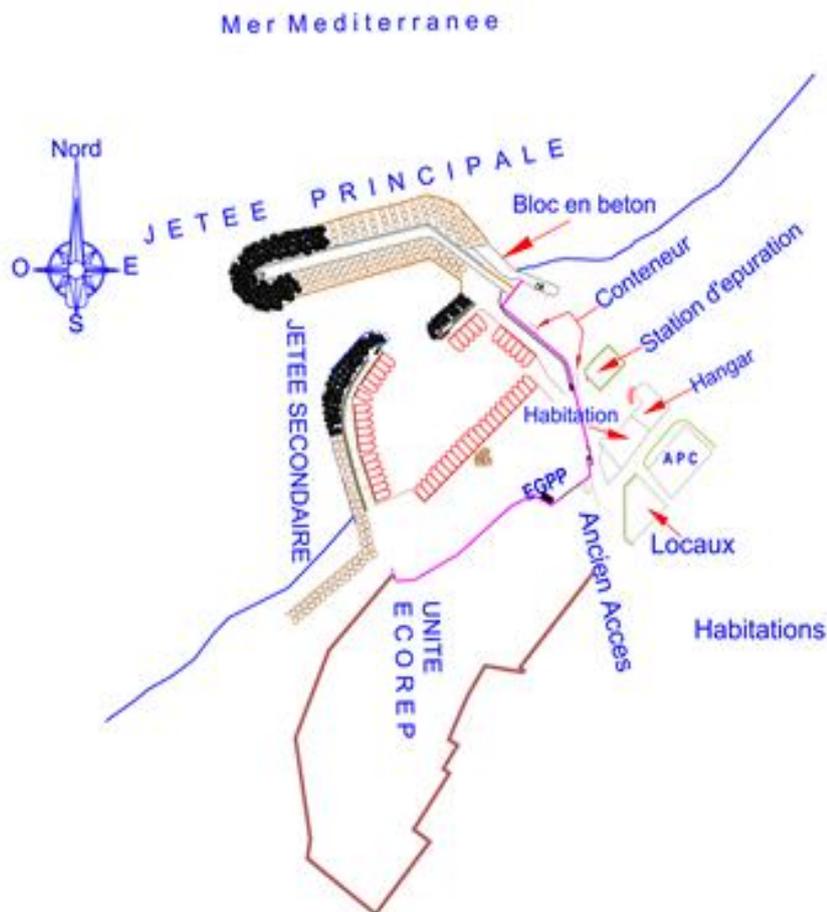


Figure II.2 : plan de masse actuel de l'abri de pêche khemisti.

5) Méthodologie à suivre dans l'étude de l'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche

Dans l'étude d'un port, la méthode de procédure diffère selon la demande du client et selon la fonction du port.

Dans le cadre de notre projet d'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche, le client à demander un allongement du port afin d'élargir son bassin et de faire un réaménagement de ce dernier. Et pour satisfaire ces besoins, nous procéderons dans notre étude comme suit.

a) Collecte et analyse des données de base

Afin d'entamer l'étude d'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche, il faut avoir les données suivantes :

- i. Données bathymétriques* : levés de mesure des profondeurs marines.
- ii. Données océanographique* : ce sont toutes les données ayant rapport avec la réfraction de la houle et sa propagation du large vers la cote.
- iii. Données météorologiques* : elles se résument à la température de la surface de la mer, les données de la marée et les données de vent au niveau du site.
- iv. Données hydrographique* : ce sont toutes les données ayant rapport avec la houle au large et avec les courants marins.
- v. Données topographique* : faire le levé topographique du site et des ouvrages se trouvant déjà sur site.
- vi. Les résultats de la réfraction de la houle* : les données de houle près de la cote.

b) Etude des variantes d'aménagement

Afin de choisir la bonne variante d'aménagement, on fait :

- une expertise sédimentologique y compris l'analyse granulométrique des échantillons : elle se fait au sein du LEM avec le logiciel **MIKE 21** pour estimer le transit sédimentaire de chaque variante.
- une étude des variantes d'aménagements,
- une étude de l'agitation en modèle mathématique,
- une estimation des couts de construction et comparaison des variantes,

c) Faire une visite du site

Afin de voir l'état réel du port actuel, il y'a lieu de faire une visite du site.

d) Etude des ouvrages, pré dimensionnement et stabilité

Dans cette étape, on fait une optimisation du dimensionnement de l'ouvrage avec des formules empiriques ensuite on passe à la modélisation physique, à la similitude des interactions entre la houle et cet ouvrage afin d'avoir le bon dimensionnement de ce dernier qui assure sa bonne stabilité.

II. Données de base

Afin de bien entamer la partie pratique de l'étude de stabilité et d'agitation de l'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche, on est dans l'obligation de faire une approche analytique qui se résume à la collecte et l'analyse de données de base de ce site.

1) Données bathymétriques

Le levé bathymétrie utilisé dans cette étude est l'addition de la bathymétrie issue de la digitalisation de la carte SHOM n°3030 intitulée « septentrionale d'Afrique -partie comprise entre Alger Cherchell- à l'échelle : 1/100720 » et celle issue de la campagne de reconnaissances sur site réalisé en Octobre par le LEM dans le cadre de « l'étude en phase d'Avant-Projet Sommaire de l'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche ».

La figure en annexe A donne le levé bathymétrique utilisé dans l'étude de l'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche

2) Données océanographiques

Les données océanographiques sont les suivants :

a) **Données de houle au large**

Les données de houles utilisées pour l'étude de la réfraction sont ceux du Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO).

Les données du (SSMO) consistent en des observations de navire sur les houles du site pendant une durée de 7ans (de 1963 à 1970).

Un traitement statistique de ces données permettra de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période, ainsi que la détermination de la probabilité de retour des houles (cinquantennale).

Le choix des périodes de la houle est fait en fonction de la répartition des probabilités de son dépassement à une amplitude donnée. Les houles de fortes amplitudes ont une probabilité d'apparition relativement faible ($T > 10s$).

Les périodes de houle considérées dans le cadre de cette étude sont : 6; 8 et 10 secondes pour les houles annuelles.

Dans le tableau ci-dessous, on donne les conditions des houles retenues pour cette étude.

Tableau II-1 : caractéristiques des houles annuelles retenues.

Période de la houle (s)	Direction de la houle au large			
	N 30°	N 360°	N 310°	N 270°
6	Hs = 1.09m	Hs = 1.00m	Hs = 1.10m	Hs = 1.19m
8	Hs = 2.56m	Hs = 2.67m	Hs = 2.64m	Hs = 2.67m
10	Hs = 5.05m	Hs = 4.92m	Hs = 4.53m	Hs = 5.54m

Les résultats de calcul de réfraction de la houle de récurrence annuelle seront utilisés pour la détermination de la capacité de transport des sédiments.

Le tableau II-2 ci-dessous présente les fréquences des houles extrêmes retenues dans les différentes directions pour la détermination des conditions de houles au pied des ouvrages de protection à projeter (dimensionnement des ouvrages).

Tableau II-2 : fréquences des houles cinquantennale et centennale retenues.

Période de retour de la houle (ans)	Nord Est (30°N)	Nord (360°)	Nord-Ouest (310°)	Ouest (270°N)
Cinquantennale	7.53	7.87	6.65	11.08
	13.36	13.65	12.61	15.70
Centennale	8.08	8.50	7.18	11.88
	13.36	13.60	12.56	9.66

b) Choix du secteur angulaire

Le secteur angulaire considéré correspond aux limites naturelles imposées d'une part par la configuration géographique du site d'étude et, d'autre part, par le secteur d'intérêt des houles du large.

Ainsi quatre (04) directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que de l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude :

- Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (360°N)
- Trois (03) directions de houle à incidence oblique (30°N, 310°N, et 270°N)

c) Résultats de propagation de la houle

Les résultats de l'étude de propagation de la houle sont illustrés par :

- Les épures de réfraction qui montrent qualitativement comment la hauteur de houle et sa direction changent au cours de la propagation de la houle ;
- La détermination quantitative des conditions de la houle en quelques points situés sur les isobathes : (-1, -2, -3, -6, -7, -10), permet l'établissement de la statistique locale de la houle à ces profondeurs et sera utilisée pour l'estimation de la capacité de transport sédimentaire.

Le coefficient de réfraction (K_r) a été calculé pour chaque direction retenue à une profondeur d'environ 10m, profondeur limite de la dynamique sédimentaire, et aux profondeurs : 1, 2, 3, 6 et 7 m pour les houles cinquantennale et centennale.

Le coefficient de réfraction est présenté dans le tableau II-3 pour chaque cas considéré.

Tableau II-3 : résultats de calcul des houles de récurrence annuelle.

Direction de la houle	Période en (s)	Amplitude de la houle au large Hs (m)	Amplitude de la houle en (m) à -10 m	Coefficient de réfraction Kr à -10 m	Angle d'arrivée en degré
N30°	6	1.09	0.90	0.83	17.25
	8	2.56	2.15	0.84	37.71
	10	5.05	4.23	0.83	359.50
N360°	6	1.00	0.90	0.90	354.00
	8	2.67	2.38	0.89	348.00
	10	4.92	4.22	0.86	342.00
N310°	6	1.10	1.03	0.94	310.00
	8	2.64	2.51	0.95	310.00
	10	4.53	4.29	0.95	310.00
N270°	6	1.19	1.09	0.91	276.00
	8	2.67	2.49	0.93	280.00
	10	5.54	4.82	0.87	284.00

On constate qu'à travers les résultats de la réfraction que les houles des quatre directions considérées (N30°, N360°, N 310° et N270°) sont faiblement réfractées ; néanmoins celles du secteur Ouest (N270°) et du secteur Nord-Ouest (N310°) restent les moins réfractées ; elles gardent presque la totalité de leur énergie au large (Kr est compris entre 0.91 et 0.95).

Tableau II-4 : résultats de calcul (période de retour cinquantennale).

	Direction de la houle	N30°	N360°	N310°	N270°
	Période de retour (ans)	50	50	50	50
	Hs (m) au large	7.53	7.87	6.65	11.08
Profondeur 1m	Hs (m)	1.53	1.50	1.42	1.58
	Kr	0.20	0.19	0.21	0.14
Profondeur 2m	Hs (m)	2.01	2.15	1.93	2.00
	Kr	0.27	0.27	0.29	0.18
Profondeur 3m	Hs (m)	2.65	2.66	2.49	2.74
	Kr	0.35	0.34	0.37	0.25
Profondeur 6m	Hs (m)	3.92	4.31	4.24	4.88
	Kr	0.52	0.55	0.64	0.44
Profondeur 7m	Hs (m)	4.58	4.58	4.45	5.08
	Kr	0.61	0.58	0.67	0.46
Profondeur 10m	Hs (m)	5.42	5.60	5.45	6.36
	Kr	0.72	0.71	0.82	0.57

Tableau II-5 : résultats de calcul (période de retour centennale).

	Direction de la houle	N30°	N360°	N310°	N270°
	Période de retour (ans)	100	100	100	100
	Hs (m) au large	8.08	8.50	7.18	11.88
Profondeur 1m	Hs (m)	1.55	1.52	1.46	1.43
	Kr	0.19	0.18	0.20	0.12
Profondeur 2m	Hs (m)	2.19	2.19	2.15	2.13
	Kr	0.27	0.26	0.30	0.18
Profondeur 3m	Hs (m)	2.70	2.71	2.56	2.56
	Kr	0.33	0.32	0.36	0.22
Profondeur 6m	Hs (m)	4.20	4.32	4.28	4.39
	Kr	0.52	0.51	0.60	0.37
Profondeur 7m	Hs (m)	4.51	4.74	4.72	4.91
	Kr	0.56	0.56	0.66	0.41
Profondeur 10m	Hs (m)	5.57	5.76	5.66	5.97
	Kr	0.69	0.68	0.79	0.50

Il ressort à partir des résultats de calcul que pour les périodes de retour cinquantennale et centennale, les houles de direction N 270° se réfractent le plus à la profondeur de 10 m par rapport aux autres directions où le coefficient de réfraction Kr atteint 0.57, c'est-à-dire que les houles perdent 43% de leur énergie durant leurs propagations du large vers la côte -10m.

Par contre, celles des autres directions (N30°, N360°, N 310°) à 10m de profondeur perdent peu de leur énergie (18 à 32%), (Kr compris entre 0.82 et 0.68). La réfraction se fait sentir à partir de 7m de fond; le Kr oscille entre 0.56 et 0.67. Celui-ci continue à diminuer jusqu'à atteindre 0.21 à -1m.

3) Données météorologiques

a) Climat et température

Le climat de Khemisti est un climat de type méditerranéen caractérisé par un été sec et chaud et un hiver humide et froid. Les températures sont comprises entre 0° et 40°.

b) Marée

Toutes les côtes sont données par rapport au zéro N.G.A sur la base des différentes informations, on estime les niveaux de la mer à Khemisti comme suit :

- Niveau maximal est de : +0.60 (N.G.A)
- Moyenne des hautes mers de vive eau est de : 0.10 (N.G.A)
- Moyenne des basses mers de vive eau est de : -0.10 (N.G.A)
- La plus basse mer est de : -0.34 (N.G.A)

c) Vents

Le port de Khemisti est orienté suivant le Nord à Nord-Ouest.

L'analyse du régime des vents est effectuée à partir de deux (02) sources de données météorologiques de :

- La station de Bou-Ismaïl pour la période 1956-1960.
- Les observations faites au large des côtes algériennes entre 37° et 40° de latitude Nord et 0° et 5° de longitude Est, par l'US Naval Weather Service pour la période 1914-1970.

i. La station météorologique de Bou-Ismaïl (1956-1960)

Les directions de vents sont présentées sous la forme de trois (03) roses récapitulatives : annuelle, hivernale et estivale. Les fréquences des vents sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau II-6 : fréquences des vents à la station de Bou-Ismaïl (1956-1960)

Direction	Annuelle %	Hivernale %	Estivale %
Nord Est à Est	18.8	12.2	23.4
Nord à Nord-Ouest	23.3	27.5	19.0
Ouest	8.4	8.5	8.2
Sud à Sud-Ouest	5.5	2.2	3.6

L'analyse globale des cinq (05) années d'observations montre une prédominance des vents des secteurs : Nord à Nord-Ouest et Nord – Est à Est.

ii. Observations des vents au large (données du 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-4).

Ces roses montrent, que pendant le 4ème et le 1er trimestre, les vents des secteurs Ouest et Sud-Ouest sont dominants et qu'une grande partie de ces vents présentent une vitesse supérieure à 8 m/sec.

Pour les 2ème et 3ème trimestres, on observe que les vents d'Est et Nord. Est dominant, mais la majorité de ceux-ci sont des vents faibles.

Ce sont les vents du secteur Ouest à Nord-Ouest qui sont défavorables pour le port.

4) Données hydrographiques

a) Les Houles au large

Le principe de l'analyse de la houle au large est basé sur les observations faites par le Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO) à bord des navires s'étalant sur une période de 8 ans (1963 à 1970).

Une analyse statistique de ces données de base permet de définir les secteurs des houles dominants.

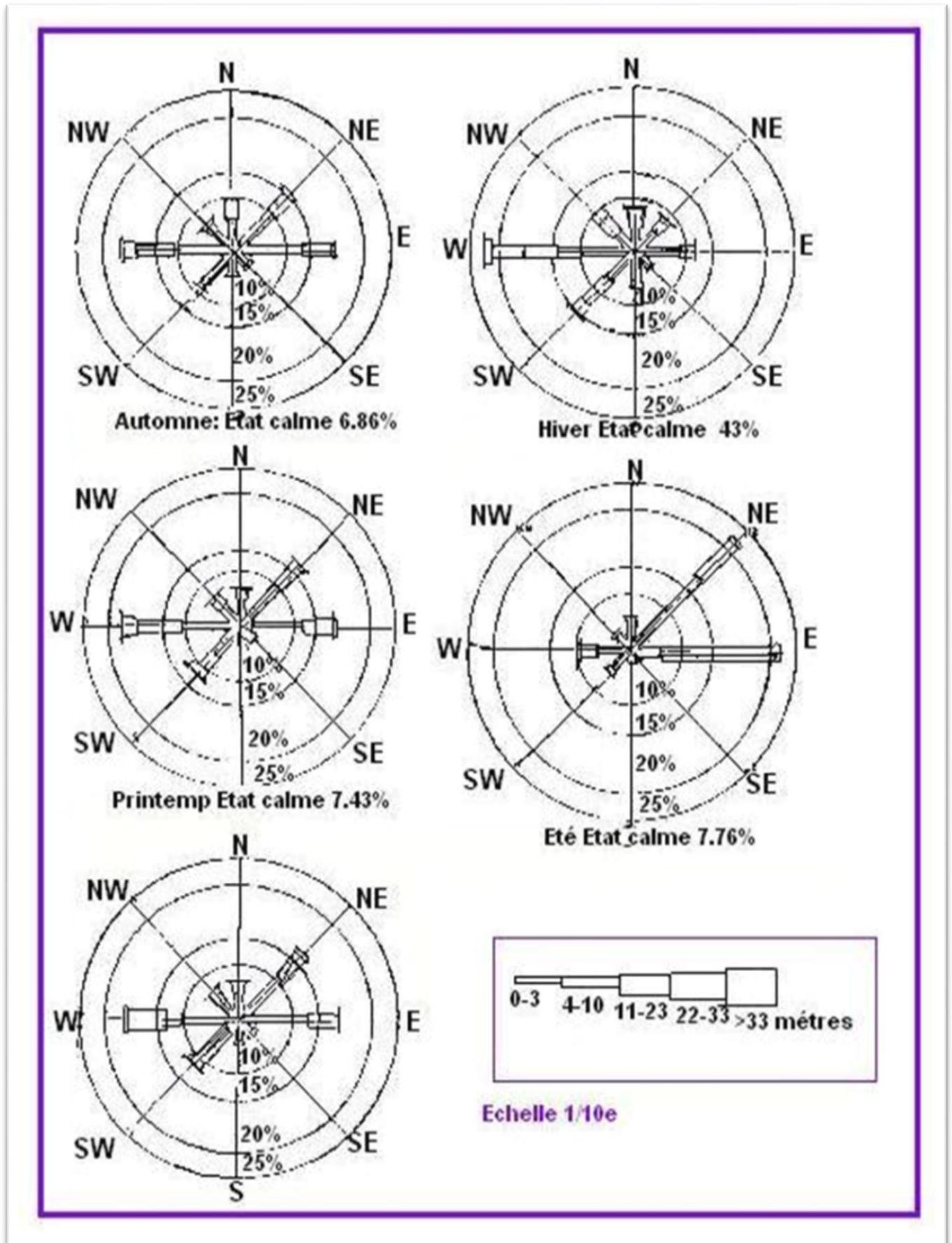


Figure II.4 : roses trimestrielle et annuelle des vents

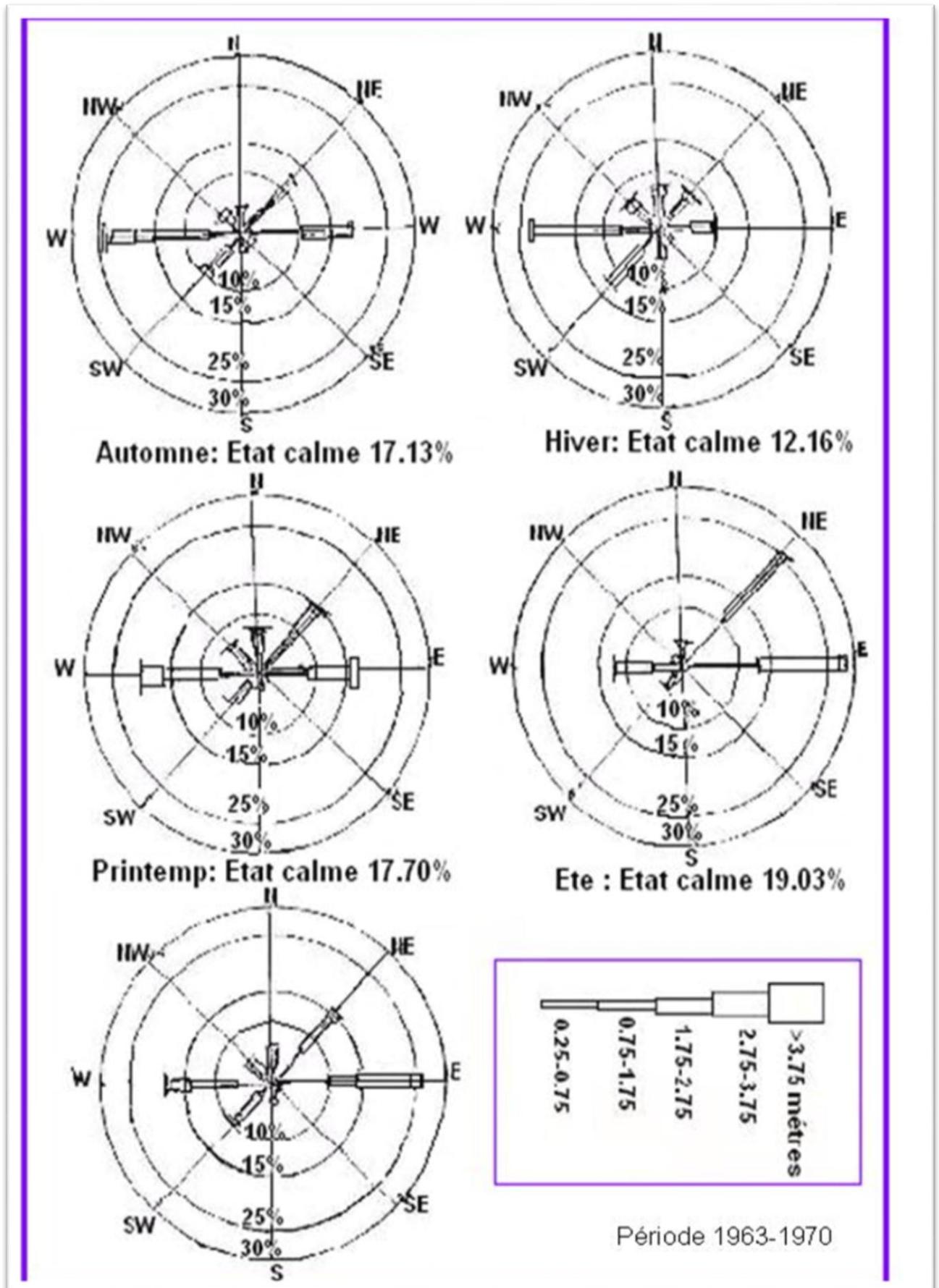


Figure II.5 : roses trimestrielle et annuelle des houles.

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

Tableau II-7 : fréquences mensuelles en (s^{-1}) de la houle au large par direction.

Mois	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
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	10.00
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 houles les plus fréquemment observées appartiennent aux secteurs Ouest, Est et Nord Est.

Les fréquences des houles d'Est et d'Ouest observées sur l'année 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.

L'agitation provenant des secteurs Ouest et Est est la plus fréquente ; néanmoins pour les fortes houles le secteur Ouest prédomine.

Pour les secteurs Nord et Nord-Ouest, les fréquences d'apparitions sont faibles.

Les houles de tempêtes proviennent essentiellement du secteur Ouest.

i. Données de l'US Naval Weather Service Command (SSMO)

Pour l'analyse statistique de ces résultats, deux (02) modèles de distribution ont été utilisés l'un de Larras et l'autre de Weibull.

Les statistiques et les informations des houles qui ont été déduites de l'U.S. Naval Weather AVALWEATHER, Service Command, permettent d'établir la valeur des houles au large pour des périodes de retour de 2 à 50 ans et différentes directions de propagation.

Les résultats de cette analyse sont résumés dans le tableau II-8 pour le modèle de distribution de Larras et dans le tableau II-9 pour la distribution de Weibull.

Tableau II-8 : valeur de Hs (m) – Données de SSMO (Larras).

Directions Hs	Ouest	Nord-Ouest	Nord	Nord-Est	Toutes directions
Biennale	6.40	3.70	4.40	4.50	6.50
Quinquennale	7.40	4.30	5.10	5.20	7.30
Décennale	8.00	4.80	5.60	5.70	7.90
Vingtennale	8.70	5.30	6.30	6.20	8.50
Cinquantennale	9.70	5.90	7.00	6.90	9.30

Tableau II-9: valeur de H s (m) – Données de SSMO (Weibull).

Directions Hs	Ouest	Nord-Ouest	Nord	Nord-Est	Toutes Directions
Biennale	6.40	3.60	4.40	4.50	6.40
Quinquennale	7.30	4.10	5.20	5.20	7.20
Décennale	8.00	4.50	5.80	5.80	7.80
Vingtennale	8.80	4.80	6.40	6.50	8.40
Cinquantennale	9.70	5.30	7.20	7.30	9.20

b) Caractéristiques de la houle au large

On définit par (Pn), la probabilité d'apparition d'une houle avec une amplitude donnée, associée à la période de retour par la relation suivante :

$$P_n = \frac{1}{3 \cdot 360 \cdot n}$$

Avec, n : période de retour.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau II-10.

Tableau II-10 : probabilité d'apparition de la houle associée aux périodes – direction.

Période de retour de la houle (ans)	Probabilité associée
Biennale	$4.57 * 10^{-4}$
Quinquennale	$1.83 * 10^{-4}$
Décennale	$9.13 * 10^{-5}$
Vingtenale	$4.57 * 10^{-5}$
Cinquantennale	$1.83 * 10^{-5}$

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

Tableau II-11: hauteurs des houles extrêmes par secteur de provenance.

Direction de houle	E	NE	N	NO	O	Toutes les directions
Biennale	4.12 m	4.93 m	4.90 m	4.16 m	7.36 m	7.44 m
Quinquennale	4.70m	5.67 m	5.75 m	4.87 m	8.43 m	8.34m
Décennale	5.14m	6.23m	6.38m	5.40m	9.22m	9.02 m
Vingtenale	5.59m	6.79m	7.02m	5.94m	10.02m	9.70m
Cinquantennale	6.17m	7.53m	7.87m	6.65m	11.08m	10.60m
Centennale	6.62m	8.08m	8.50m	7.18m	11.88m	11.27m

En conclusion, plus de 80% des houles appartenant au secteur Ouest et Nord-Ouest prédominent en hiver avec des périodes variant entre 8 et 9 secondes, et atteignent les valeurs maximales de 13s en périodes de tempêtes.

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

Pendant l'été, les houles de directions Nord – Nord-Est se distinguent par une période moyenne de 6 à 7s et une amplitude de 0.50 à 1.50 m ; près de 50% des houles ont des périodes de 6 à 9s et n'atteignent que rarement 3m d'amplitude.

Pour une période de 6 s, la longueur d'onde des houles d'été est 130m et la célérité de 10 m/s.

c) Courants

Les courants le long des côtes algériennes sont généralement faibles, et ils ont généralement une direction d'Ouest en Est. (A.P.S, 2009)

i. Les courants généraux

La vitesse du courant provenant de l'océan Atlantique traversant le détroit de Gibraltar et longeant la côte algérienne d'Ouest vers l'Est est généralement de l'ordre de 0.5 à 1.0 m/s.

Au large des côtes algériennes (Le claire 1972), ce courant général crée dans la plupart des baies un contre-courant, le long du littoral et orienté vers l'Ouest.

Ces courants ont peu d'influence sur les transports littoraux. Les transferts côtiers sont surtout conditionnés par les différentes dérives littorales engendrées par la houle. (A.P.S, 2009)

ii. Les courants de marée

Sur les côtes algériennes, les courants de marée, du fait du faible marnage des marées, sont négligeables voire même inexistantes. (A.P.S, 2009)

iii. Les courants côtiers

Les courants agissent pendant l'hiver et ont une direction Ouest - Est par houle Nord-Ouest ; le reste de l'année les courants ont une direction Est - Ouest.

Le sens et l'intensité de ce courant sont fonction de l'amplitude et de l'incidence par rapport à la côte, mais également de la topographie de la plage sous-marine et de la granulométrie.

En reprenant les informations enregistrées au large par l'Institut Hollandais de Météorologie le K.N.M.I, on remarque (A.P.S, 2009) :

- Le courant dominant (environ 75% du temps) à une vitesse inférieure à 0.25 m/sec ;
- Pendant plus de 90% du temps, la vitesse est inférieure à 0.50m/sec ;
- Dans seulement 1% du temps, on observe des courants de vitesse supérieure à 1m/sec.

5) Réfraction de la houle du site

Les données de houles à la cote sont les résultats de l'étude de réfraction sur modèle mathématiques

a) Etude de la réfraction de la houle

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

Les données de la houle à la côte serviront de données d'entrée au calcul du transit sédimentaire et / ou pour le dimensionnement des ouvrages maritimes.

La propagation de la houle entre le large et la côte, étudiée avec le modèle numérique SWAN (Simulating Waves Nearshore développé par l'université de DELFT) ou autres, est basée sur les données bathymétriques obtenues des cartes nautiques du SHOM ainsi que la bathymétrie réalisée sur terrain.

Pour l'étude de la réfraction de la houle, le domaine de calcul peut être discrétisé par une seule ou plusieurs grilles ; dans ce cas précis on parle de modèles de calcul emboîtés.

b) Principe de calcul de la réfraction de la houle

Connaissant la climatologie au large, il est possible d'établir une statistique de la houle au large. Cette statistique est ensuite propagée vers la côte en utilisant des fonctions de transfert calculées suivant la bathymétrie représentée suffisamment au large, dans les fonds où les houles ne sont pas réfractées. Le coefficient de réfraction est défini de la manière suivante:

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

Les calculs de la réfraction de la houle entre le large et la côte sont effectués par le modèle numérique SWAN (Simulating Waves Nearshore développé par l'université de DELFT) pour différentes conditions de houle au large (hauteur, période et direction). Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant notamment en compte les phénomènes de :

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

Les paramètres significatifs de la houle ont été représentés avec un spectre bidimensionnel de type Jonswap ayant un facteur d'affinement du pic (γ) et un "spreading" directionnel issus de la cambrure de la houle (formule de Wilson, 1965).

N.B : l'étude de la réfraction de la houle sera détaillée en Master.

6) Besoins exprimés

Les besoins exprimés sur le site de l'abri de pêche Khemisti sont :

a) Les principales caractéristiques de l'aménagement actuel

L'aménagement actuel des ouvrages intérieurs de l'abri de pêche de khemisti est le suivant :

- Une cale de halage de 10.0 m x 39.0 m ;
- Un linéaire d'accostage d'environ 280.0 ml pour petits métiers et sardiniers, répartis comme suit :
 - Quais à - 4.00m de profondeur et 78 ml de longueur.
 - Quais à - 2.50m de profondeur et 150 ml de longueur.
 - Quai de débarquement d'une longueur de 27 ml.
 - Quai de d'avitaillement d'une longueur de 25 ml.
- L'aménagement de terre-pleins revêtus d'une superficie d'environ 0.50 ha.
- Les profondeurs d'eau en pied des ouvrages sont 2.50 et 4.00 m, respectivement pour les petits métiers et sardiniers.
- Le plan d'eau d'une superficie d'environ 1.2 ha.

- La capacité d'accueil d'embarcations est de :

- petits métiers 40 unités.
- Sardiniers 13 unités.

b) Caractéristique de la flottille de pêche

La flottille de pêche actuelle du site est caractérisée et décomposée comme suit :

- Décomposition de la flottille de pêche d'après l'étude « actualisation des schémas d'aménagement des ports de pêche (3ème MINAPECH) » au niveau du port de Khemisti

Tableau II-12: flottille actuelle.

Types d'embarcations	Nombre d'unités
Sardiniers	13
Petits métiers	40

- Décomposition de la flottille de pêche actuelle au niveau du port de Khemisti

Tableau II-13 : flottille actuelle.

Types d'embarcations	Nombre d'unités	Longueur (m)	Largeur (m)
Sardiniers	38	12	04
Petits métiers	30	10	03

- Décomposition de la flottille de pêche prévisionnelle au niveau du port de Khemisti

Tableau II-14 : flottille prévisionnelle.

Type d'embarcation	Nombre d'unités	Longueur (m)	Largeur (m)	Tirant d'eau (m)
Sardiniers	12	14	04	1.80 - 2.20
	12	13	04	1.50 - 1.80
	08	12	04	1.20 – 1.50
	08	11	04	1.00 – 1.20
Total	40 unités			
Petits métiers	10	10	03	0.90
	10	09	03	0.80
	10	08	2.80	0.65
	10	07	2.80	0.65
Total	40 unités			

- Pêche côtière (Valeurs de la production moyennes usuelles)

Tableau II-15 : productions moyennes usuelles.

Type	Production annuelle
(T /An)	
Sardiniers	175
Petits métiers	10

c) Linéaire de quai

Les profondeurs d'eau nécessaire à la flottille de pêche sont résumées par catégorie dans les tableaux ci-dessous :

- Pour les sardiniers

Tableau II-16 : profondeur d'eau nécessaire aux sardiniers.

	Profondeur (m)
Tirant d'eau	2.20
Assiette	0.20
Vague	0.25
Pied de pilote	0.25
Plus basse mer	0.34
	Total = 3.25 => 4.00m

- Petits les métiers

Tableau II-17 : profondeur d'eau nécessaire aux petits métiers.

	Profondeur (m)
Tirant d'eau	0.90
Assiette	0.15
Vague	0.30
Pied de pilote	0.55
Plus basse mer	0.34
	Total = 2.24 => 2.50m

7) Schémas d'aménagements

Un port de pêche comprend trois zones distinctes :

- Une zone d'amarrage et d'avitaillement
- Une zone de débarquement
- Une zone de réparation et d'entretien

Pour chacune de ces zones, il convient de prévoir des quais et terre-pleins distincts.

Les installations et équipements doivent permettre un transport rapide du poisson vers le lieu de triage ou stockage, ainsi que l'évacuation du poisson destiné à la consommation.

La manipulation peut se faire à n'importe quelle heure du jour, mais doit être conduite assez rapidement pour éviter un séjour prolongé du poisson en dehors des chambres froides.

Pour l'étude et l'examen des possibilités d'adaptation de l'étude d'extension du port de pêche de Khemisti à l'accueil de navires de pêche, le schéma envisagé est comme suit :

L'accueil de ces navires et leur déchargement s'effectue au niveau du port de Khemisti et l'aménagement des ouvrages intérieurs nécessitera un quai de débarquement, des surfaces de terre-pleins utiles ainsi que des postes d'amarrage et d'accostage.

Un linéaire de quai pour l'avitaillement est également prévu.

a) Besoins en linéaire de quais

Les besoins en linéaire de quais seraient comme suit :

i. Linéaire de quai ou d'appontement nécessaire pour l'amarrage

Afin de permettre une utilisation optimale des linéaires disponibles, il est retenu un amarrage en perpendiculaire. Selon les différents types d'embarcation, les linéaires d'amarrages nécessaires seraient comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau II-18 : linéaire nécessaire pour l'amarrage

Sardiniers	$78 * 5.00 = 390.0$ ml
Petits métiers	$80 * 4.00 = 320.0$ ml
Total	710.0 ml

ii. Linéaire nécessaire pour le débarquement des prises

Pour l'évaluation de la production de poisson des grands et des petits métiers, les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Sardiniers produisent 175 t /an ;
- Petit métiers produisent 10 t /an.

L'évaluation de la production annuelle (flottille existante) est donc :

Pour des grands métiers (sardiniers) la production est de : $78 * 175 = 13650$ t / an.

Et pour les petits métiers la production est de : $80 * 10 = 800$ t / an.

D'où la production annuelle cumulée est de: $800 + 13650 = 14450$ t / an.

iii. Linéaire de quais pour le débarquement

La quantité annuelle de prise à débarquer au niveau de la halle de vente est estimée à 14 450t, soit sur la base de 200 j/an, une prise journalière d'environ 72 tonnes.

Afin de tenir compte des prises de pointe, on considère deux fois la prise journalière soit :

$$2*72 = 144 \text{ t/j.}$$

Sur la base d'un temps maximal de débarquement de 6h (au rythme de 6 t/h), les besoins sont de : $144/36 = 4$ postes

Dont deux (02) postes de 20 ml chacun pour les sardiniers et deux (02) poste de 15 ml pour les petits métiers, soit au total, un linéaire de quai de : $2*20.0 + 2*15 = 70$ ml.

iv. Linéaire nécessaire pour l'avitaillement en fuel

Il est retenu deux postes de 15 ml chacun pour les besoins d'avitaillement en fuel soit un linéaire de 30 ml.

b) Besoins en surface de terre-pleins

La surface de terre-pleins devra être répartie sur la fabrique de glace et la halle de vente comme suit :

i. Surface nécessaire pour fabrique de glace

Le besoin en quantités de glace exprimé est de 10t/j.

Une surface d'environ 60 m² est réservée pour la fabrique de glace.

ii. Surface nécessaire pour la halle de vente et entrepôt frigorifique

Le tonnage global annuel à débarquer est de 14 450 t environ, soit sur la base de 200 j/an, une moyenne de 72 tonnes; on dimensionne la halle de vente pour deux fois ce tonnage pour tenir compte des prises de pointe, soit 144 tonnes. Sur la base d'un ratio de 0.10 t/m², nous aurions besoin de : $144 / 0.1 = 1440$ m².

Les installations pour le froid nécessiteraient une surface de 100 m² environ,

Au total, nous avons besoin de 1540 m².

c) Besoins pour la réparation et l'entretien

La surface et linéaire de quai de réparation ainsi que d'entretien doivent être répartie comme suit :

i. Réparation des petits métiers

Pour la mise à sec des petits métiers, il est prévu une cale de halage. La surface préconisée permet la mise à sec de 2/3 des petites embarcations de pêche, soit environ 54 petits métiers.

Sur la base de 40 m² par unité, le besoin en surface de terre-pleins est de : $54*40 = 2160$ m².

iii. Réparation des sardinières

- Estimation du nombre de postes de réparation à terre

Sur la base de 10 jours à terre et 05 jours au quai de réparation par unité, les besoins seraient comme résumé dans le tableau II-9.

Tableau II-19 : nombre de postes de réparation.

A terre	10 jours
A quai	05 jours
Nombre d'unités	78 embarcations
Total à terre	780 jours
Total à quai	390 jours

Sur la base de deux carénages par an et par bateau et d'un taux d'utilisation de 80%, le nombre de jours en cale serait de : $780 \times 2 / 0.8 = 1950$ jours.

Sur la base de 340 Jours/an, le nombre de postes nécessaires pour la réparation serait de :

$1950 / 340 = 5.735$ soit 06 postes environ.

- Estimation des surfaces derrière le Roulev

Nous prévoyons aussi dans le cadre de l'aménagement du nouveau port de pêche l'utilisation d'un engin de levage sur pieux type « Roulev » d'une capacité de levage allant de 250 à 300t

La surface par poste est estimée à 250 m² soit au total des besoins en surfaces de :

$250 \times 06 = 1500$ m².

- Estimation du linéaire de quai de réparation

Pour la réparation à quai et en retenant un taux d'occupation de 80%, nous aurions :

$390 J / 0.8 \cong 488$ jours, soit $488 / 340 = 1.435$ soit 2 postes environ.

Le linéaire de quai de réparation serait de : $20m \times 2 = 40$ ml.

iii. Rangement d'outillage et accessoires

Le calcul est basé sur les normes suivantes :

- Sardinières : 10 m² /unité.
- Petit métiers : 06 m² /unité.

Soit : $78 \times 10 + 80 \times 06 = 1260$ m²

iv. Parking pour véhicules

Il est retenu une aire de 20 m² pour chaque véhicule et sur la base de un (01) véhicule par deux (02) embarcation, la surface totale à réserver est de : $\frac{1}{2} (78+80) \times 20 = 1580$ m².

d) Besoins en surfaces pour l'avitaillement

Une surface de 100 m² a été prévue pour la station d'avitaillement en carburant (Naftal).

i. Bâtiment administratif

Pour le bloc administratif, une surface estimée à 200 m², est à prévoir.

e) Tableau récapitulatif

On donne ci-dessous les tableaux résumant les besoins d'aménagement du port de pêche Khemisiti :

Tableaux II 20- 21: tableau récapitulatif des besoins.

Besoins en linéaires de quais et d'appontements		
Désignation		Linéaire (ml)
Amarrage des unités de pêche	Pour les Sardiniers	390.0
	Pour les petits métiers	320.0
	Total	710.0
Quais de débarquement		70.0
Quai d'avitaillement		30.0
Quai de réparation		40.0
Total		850 ml

Besoins en surfaces diverses (m ²)		
Désignation		Surface (m ²)
Halle de vente		1 540.0
Fabrique de glace		60.0
Surface pour réparation et entretien	Réparation des sardiniers	1500.0
	Réparation des petits métiers	2160.0
Surface pour rangement d'outillage et accessoires		1 260.0
Surface pour l'alimentation en fuel		100.0
Bâtiment administratif		200.0
Parking		1 580.0
Total		8 400.0

Chapitre III

Similitude hydraulique
et modélisation

Chapitre III

Similitude hydraulique et modélisation

Pour l'étude, les spécialistes font appels à deux types d'outils : **la modélisation physique et la modélisation mathématique**. La modélisation mathématique est assez complexe et délicate donc la modalisation physique s'avère le moyen le plus convainquant pour répondre aux questions des ingénieurs dans ce domaine.

I. Similitude hydraulique

1) Introduction aux essais sur modèles réduits physiques

Lorsqu'un ingénieur étudie le projet d'un ouvrage hydraulique, il commence par préciser l'ordre de grandeur de ses dimensions en se basant sur celles des ouvrages analogues existants et en tenant compte de l'application à l'écoulement considéré des formules théoriques ou empiriques de l'hydraulique classique, mais généralement les résultats qu'il obtient ainsi ne peuvent le satisfaire complètement.

L'idée vient tout naturellement d'essayer de voir « en petit » comment cela se passe en « grand ». C'est ce qui constitue le principe d'essai sur modèles réduits qui ont pris un développement considérable non seulement en hydraulique mais dans d'autres branches de la mécanique, notamment en aérodynamique.

La faveur dont bénéficient ces essais s'explique par les facilités qu'offrent les mesures effectuées au laboratoire, la plus grande précision qu'autorisent les appareils de mesure utilisés ; en outre les modèles réduits permettent d'effectuer aisément de nombreuses expériences, de les répéter en cas de nécessiter en faisant varier dans tel ou tel paramètre du problème. Enfin les résultats fournis par le modèle permettent souvent de réaliser des économies de temps et d'argent très importantes pour l'exécution de l'ouvrage.

Mais un problème essentiel se pose alors : dans quelle mesure et suivant quelles lois les résultats obtenus sur les modèles peuvent-ils être transposés dans l'écoulement naturel en vraie grandeur (qu'on appelle le prototype?). Autrement dit, si le modèle est géométriquement semblable au prototype, les dimensions linéaires homologues du modèle et du prototype étant dans le rapport λ (échelle du modèle) et si, en outre dans le modèle les caractéristiques de l'écoulement qui intéressent l'ingénieur (vitesse, débit, pressions, etc.) sont réduites par rapport au prototype suivant des rapports différents (λ_v , λ_q , λ_p , etc.) pour que les résultats obtenus sur le modèle soient transposables dans la réalité, il faut d'abord que les rapports susvisés (λ_v , λ_q , λ_p , etc.) soient bien déterminés et constants, qu'ils ne changent pas, par exemple, quand on modifie les conditions d'écoulement (débit, pression, tirant d'eau, etc.) ; ensuite il faut que ces rapports soient connus en fonction de l'échelle λ .

Si ces conditions sont réalisées, on a dans le modèle un écoulement semblable à l'écoulement dans le prototype.

La réalisation de ces conditions résulte de l'application des lois de similitude (*Carlier, 1972*).

2) Lois de similitude

a) Similitude géométrique

L'échelle du modèle est le rapport des dimensions linéaires homologues du modèle (L_2) et du prototype (L_1) c'est-à-dire :

$$\lambda = \frac{L_2}{L_1}$$

C'est un rapport qui nous permet d'avoir une relation entre le modèle et le prototype.

b) Similitude cinématique

La similitude cinématique exige que les vitesses et les accélérations soient dans un rapport défini et constant en tous points correspondants des deux écoulements.

Soient :

t_1 le temps mis à parcourir la distance L_1 dans le prototype,

t_2 le temps mis à parcourir la distance L_2 homologue de L_1 dans le modèle,

- λ échelle du modèle :

$$\lambda = \frac{L_2}{L_1}$$

- λ_t échelle des temps :

$$\lambda_t = \frac{t_2}{t_1}$$

- λ_v échelle des vitesses :

$$\lambda_v = \frac{V_2}{V_1}$$

- λ_γ échelle des accélérations :

$$\lambda_\gamma = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$$

On peut écrire facilement les relations suivantes :

$$v_1 = \frac{L_1}{t_1}$$

Et

$$v_2 = \frac{L_2}{t_2}$$

En divisant membre à membre, on a :

$$\lambda_v = \frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2}{L_1} * \frac{t_1}{t_2} = \frac{\lambda}{\lambda_t}$$

De même pour les accélérations :

$$\gamma_1 = \frac{L_1}{t_1^2}$$

Et

$$\gamma_2 = \frac{L_2}{t_2^2}$$

D'où on aura :

$$\lambda_\gamma = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{L_2}{L_1} * \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

$$\Rightarrow \lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

On voit donc que le choix des échelles de temps impose celle des vitesses :

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_t}$$

Et des accélérations :

$$\lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

c) Similitude dynamique

Les principales forces qui interviennent en hydraulique sont les suivantes (*Carlier, 1972*):

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

Les forces de capillarité n'interviennent que pour l'étude d'un problème très particulier qui sort du domaine habituel de l'hydraulique traditionnelle. Nous ne considérons donc que les quatre premières catégories de forces.

Pour chacune de ces catégories exprimons le rapport de similitude des forces correspondantes aux points homologues du modèle et du prototype.

i. Forces d'inertie

La force d'inertie agissant sur la particule de masse m animée d'une vitesse V sur sa trajectoire dont le rayon de courbure est r , a pour expression :

$$f = m * \frac{V^2}{r}$$

Dans le prototype, on a donc :

$$f_1 = m_1 * \frac{V_1^2}{r_1}$$

Au point homologue du modèle :

$$f_2 = m_2 * \frac{V_2^2}{r_2}$$

D'où :

$$\lambda_{fi} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{m_2}{m_1} * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 * \frac{r_1}{r_2}$$

En posant :

$$\lambda_{fi} = \frac{f_2}{f_1} \rightarrow \text{Rapport des forces d'inertie.}$$

$$\lambda_m = \frac{m_2}{m_1} \rightarrow \text{Rapport des masses.}$$

Il vient :

$$\lambda_{fi} = \lambda_m * \frac{\lambda_v^2}{\lambda} = \lambda_m * \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

Mais le rapport des masses est égal au rapport des masses volumiques (λ_ρ) multiplié par le rapport des volumes (λ^3) ;

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

On a donc, en définitive :

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

ii. Forces de turbulence

La force tangentielle résultant de la turbulence d'un écoulement peut s'exprimer comme suit :

$$F_t = \rho * S * u' v'$$

Avec, ρ : Masse volumique du liquide ; S : Surface à travers laquelle se produit l'échange latérale de quantité de mouvement résultant de l'échange des particules liquides et $u'v'$: étant la moyenne des produits des fluctuations de la vitesse instantanée dans le sens longitudinal (u') et dans le sens transversal (v').

Le rapport des forces de turbulence sera donc :

$$\lambda_{ft} = \lambda_\rho * \lambda^2 * \lambda_v^2 = \lambda_\rho * \frac{\lambda^4}{\lambda_t^2} = \lambda_{fi}$$

On constate que le rapport de similitude des forces de turbulence est le même que celui des forces d'inertie ce qui traduit le fait que ces deux catégories de forces sont de même nature.

iii. Forces de pesanteur

La force de pesanteur agissant sur la particule liquide de masse m est : $F = m g$

Le rapport des forces de pesanteur sera donc :

$$\lambda_{fp} = \lambda_\rho * \lambda^3 * \lambda_g$$

iv. Force de viscosité

La force de viscosité agissant sur l'élément de surface dS est donnée par la formule de Newton :

$$df = \mu dS * \frac{dv}{dn}$$

μ : viscosité du liquide et $\frac{dv}{dn}$: représente le gradient de vitesse dans la direction normale à dS .

Le rapport des forces de viscosité sera donc :

$$\lambda_{fv} = \lambda_\mu * \frac{\lambda^2 * \lambda_v}{\lambda} = \lambda_\mu * \frac{\lambda^2}{\lambda_t}$$

Suivant la nature de l'écoulement considéré, ces diverses catégories de forces interviennent d'une manière plus ou moins importante.

Si les forces d'inertie ne peuvent jamais être négligées puisqu'il y a toujours une masse liquide en mouvement, les conditions du problème étudié, permettront souvent, pour les autres catégories de forces, d'en négliger certain par rapport à d'autre.

Cette remarque permet d'établir les distinctions fondamentales suivantes en ce qui concerne la simulation dynamique.

Les forces de viscosité sont négligées par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur : **Similitude de Reech-Froude** Les forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur sont pratiquement seuls à intervenir et la condition de similitude des forces impose que les trois rapports λ_{fi} , λ_{ft} et λ_{fp} soient les mêmes.

Compte tenu déjà que :

$$\lambda_{fi} = \lambda_{ft}$$

Il reste que :

$$\lambda_{fi} = \lambda_{fp}$$

Il est pratiquement impossible de faire varier g entre le prototype et le modèle, donc $\lambda_g = 1$.

Il en résulte : $\lambda_v = \sqrt{\lambda}$

Le rapport des vitesses est donc égal à la racine carré du rapport des longueurs. Cette relation très importante est connue sous le nom de « **loi de similitude de Reech-Froude** » ; elle fut découverte par Reech en 1832, rendue public par lui en 1852 et tombée par la suite dans l'oubli ; elle a été retrouvée et remise en honneur par Froude vingt temps plus tard en 1872.

Cette loi de similitude de Reech-Froude peut s'exprimer d'une autre manière. La relation $\left(\lambda = \frac{L_2}{L_1}\right)$ peut en effet s'écrire :

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad \text{où : } \frac{V_2}{\sqrt{gL_2}} = \frac{V_1}{\sqrt{gL_1}} = F_r$$

La condition de similitude imposée revient donc à imposer un écoulement possédant le même nombre de Froude aux points homologues du modèle et du prototype.

En combinant la similitude géométrique, cinématique et dynamique, il est facile d'établir les rapports de toutes les grandeurs physiques caractérisant l'écoulement dans le modèle et le prototype, ce qui permet de passer des résultats observés sur le premier à ceux escomptés sur le second, voire le tableau III-1.

Tableau III-1: rapports de similitudes des différentes grandeurs physiques

Le temps	$\lambda_t = \sqrt{\lambda}$
La vitesse	$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$
Le débit	$\lambda_q = \lambda_v * \lambda^2 = \lambda^{5/2}$
L'accélération	$\lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_t^2} = 1$
La force	$\lambda_f = \lambda_m * \lambda_\gamma = \lambda_p * \lambda^3$
La pression	$\lambda_{pr} = \frac{\lambda_f}{\lambda^2} = \lambda_p \lambda$
La puissance	$\lambda_p = \frac{\lambda_f * \lambda}{\lambda_t} = \lambda_p \lambda^{7/2}$
La pente	$\lambda_i = \frac{\lambda}{\lambda} = 1$

La similitude de Reech-Froude est très fréquemment utilisée dans les études sur modèles réduits. Elle intervient notamment pour la plupart des écoulements à surface libre qu'il s'agisse d'écoulement non turbulents sur des ouvrages courts (déversoir, seuil, chute, ressaut,...) dans lesquels les frottements visqueux à la paroi ne joue qu'un rôle très faible par rapport à la pesanteur, la pression et l'inertie ou d'écoulement très turbulent dans lesquels les forces de viscosités sont également négligeables par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur.

d) Distorsion

Dans de nombreux cas, en particulier en hydraulique fluviale ou maritime, les phénomènes à représenter comportent de très grandes dimensions transversales par rapport aux profondeurs. Comme le seuil de Reynolds impose une échelle minimale pour le modèle, on serait conduit à donner à celui-ci des dimensions considérables. On adopte alors pour les dimensions horizontales une échelle plus petite que pour les dimensions verticales (profondeurs).

Dans un modèle ainsi distordu il n'y a plus de similitude géométrique totale avec le prototype puisqu'en réalité on passe de l'un à l'autre par une similitude suivie d'une affinité.

Il existe néanmoins une correspondance entre les grandeurs homologues ce qui nécessite l'introduction d'une variable supplémentaire.

Il existe en effet deux échelles des dimensions géométriques :

- L'une pour les dimensions horizontales (longueurs et largeurs) : λ_1 ;
- L'autre pour les dimensions verticales (hauteurs) : λ_h .

Le rapport suivant s'appelle la distorsion. (*Carlier, 1972*)

$$\Delta = \frac{\lambda_h}{\lambda_1}$$

En général, on a : $1 < \Delta < 10$ et le plus souvent $1 < \Delta \leq 3$.

II. La modélisation

La complexité des phénomènes physiques rencontrés au niveau du port en nature nécessite des connaissances de modélisation afin de bien les reproduire en modèle.

1) Nécessité de la modélisation

La réalisation des projets concernant les ouvrages et les aménagements maritimes est particulièrement onéreuse, pour cela il est impératif de bien prévoir leurs fonctionnements. Ainsi, lors de la mise au point du projet, il faut :

- S'assurer que les objectifs convoités seront atteints (par exemples, bassin portuaire bien abrité, pérennité d'une plage et/ou de l'urbanisation située en arrière assurée par un aménagement du littoral, etc.) ;
- S'assurer que les ouvrages résisteront aux actions de la mer ;
- Prévoir les risques d'ensablement (et /ou d'envasement) d'un port, proposer des mesures compensatoires si nécessaire et définir les impacts sur les fonds et littoraux avoisinants ainsi que l'environnement.
- Optimiser le projet tant au point de vue économique, que technique.

L'étude de la conception des ouvrages et les impacts des aménagements maritimes nécessitent la connaissance des processus hydrodynamiques et des sédimentologiques qu'ils frauderaient améliorer en développant les outils dont les plus importants sont les modèles.

Historiquement, plus d'un demi-siècle en arrière, les modèles réduits étaient les plus anciens et les premiers à avoir été utilisés. Ils ont pour but principal l'appréhension d'une nature très perplexe et complexe en un temps très court par rapport à la durée des phénomènes en nature.

A la base, les modèles reposent donc automatiquement sur un examen des facteurs en présence d'une part et d'autre part sur une estimation de l'importance de chacun d'eux dans le processus général à étudier. Cela est radical pour définir les facteurs à simuler correctement et ceux qui peuvent, dans une certaine mesure, être négligés, une fois le modèle réglé.

Il simule de lui-même les phénomènes induits sans exiger la connaissance théorique fixe des phénomènes.

En effet, un modèle est incontestablement restrictif, il ne peut reproduire toute la complexité des phénomènes naturels.

On distingue :

- Le modèle réduit physique ;
- Le modèle mathématique ;
- Le modèle hybride.

2) **Modèle réduit physique**

Une bonne modélisation physique repose sur la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels, un bon choix des échelles de réduction et la pratique d'un bon réglage. Ces deux derniers sont liés essentiellement à l'expérience du laboratoire.

On peut résumer au modèle réduit physique :

- Une emprise forcément limitée de la zone couverte ;
- Un encombrement du modèle réduit physique, qui nécessite des halls d'essais de grande superficie et un appareillage spécifique ;
- Une durée de vie limitée, puisqu'il est généralement détruit après son exploitation.

La moindre erreur peut avoir de terribles conséquences sur les travaux réalisés ou en cours de réalisation au milieu marin ; la destruction d'une jetée peut coûter des dizaines de milliards, des vies humaines, et des années d'exploitation contrariées ou de gêne; ce qui encourage et poussé les spécialistes à rechercher d'autres méthodes plus perfectionnées et plus fiables que les formules théoriques ou empiriques de l'hydraulique classique. D'où le recours à la simulation physique sur modèle réduit qui date depuis fort longtemps, mais ce n'est qu'au début du 21ème que cette activité a connu son envol et s'est répandue vers tous les domaines de technologies. On utilise donc de plus en plus le modèle réduit pour vérifier, analyser et étudier la conduite du projet à réaliser au niveau de la mer.

a) **Définition des modèles réduits physique**

Un modèle dans sa définition la plus large est une représentation d'un objet, état de fait ou d'événement.

Un modèle réduit physique permet de voir en « petit » ce qui se passe en « grand ». L'utilité de ces modèles réside du fait que certains phénomènes mettent en jeu beaucoup de paramètres non maîtrisables sur modèle mathématique mais peuvent être observés en modèle physique (franchissement, érosion, instabilité).

En théorie, un modèle réduit physique est un domaine artificiel transformé d'un domaine naturel dans lequel évolue un fluide obéissant aux mêmes lois physiques que le fluide dans le domaine naturel.

Un modèle réduit est beaucoup moins onéreux que le prototype et se prête à une étude plus facile, les modifications éventuelles à apporter y sont moins onéreuses. On peut déterminer directement et rapidement les meilleures dispositions à adopter pour son fonctionnement, son rendement et son économie.

b) Avantages des modèles réduits physique

Les avantages des modèles réduits physiques sont décomptés comme suit :

- Les formes théoriques en hydraulique sont insuffisantes pour le dimensionnement de certains ouvrages en raison des hypothèses approximatives sur lesquelles elles reposent et les simplifications préalables à leur établissement.
- Economie du temps et d'argent.
- Réalisation de plusieurs essais en faisant varier plusieurs paramètres.
- Eviter des erreurs catastrophiques menaçantes :
 - L'environnement (pollution, érosion des cotes ...).
 - La sécurité des personnes et des biens.
 - L'économie d'un pays (fermeture d'un port).

c) Précaution à prendre

Une bonne modélisation physique repose sur :

- la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels.
- Un bon choix des échelles de reproduction (échelle convenable de telle sorte à reproduire fidèlement ce qui se passe sur la nature en vraie grandeur).
- La pratique d'un bon réglage.
- Une bonne technique d'implantation contre l'action de la houle.
- Une analyse complète des données naturelles du site.

3) Les catégories de modèles réduits physiques

Il existe deux (02) types de modèles réduits :

a) Modèle à fond fixe

Leur but est de rétorquer des questions d'hydrauliques pure qui peuvent être partagées de la sorte :

i. Modèle d'agitation

Ces modèles sont réalisés dans un bassin à houles ce qui permet :

- L'implantation optimale des ouvrages de protection en fonction des critères d'agitation résiduelle admissible au niveau des quais et de la passe d'entrée.
- La recherche des périodes de résonance des bassins afin de déterminer la géométrie définitive des bassins et éviter ainsi les causes de rupture des câbles d'amarrages des navires sensibles aux périodes longues.
- La détermination et l'étude des mouvements de navires amarrés en relation avec le problème d'exploitation portuaire. Ceci est surtout important dans le cas des navires rouliers et port conteneurs ou les mouvements ne doivent pas dépasser un seuil critique afin de préserver un rendement optimal de chargement/déchargement des marchandises.

ii. Modèle de stabilité

Ils sont deux (02) types :

Le modèle bidimensionnel réalisé dans un canal à houle, permet l'exécution d'essais sur une portion d'ouvrage de protection soumis à une houle incidente normale à son axe.

Le modèle tridimensionnel de stabilité exécuté dans un bassin à houle, permet de tester des points singuliers de digues (coudes, musoir, etc...) et la sensibilité de ces points à différentes incidentes de houle.

b) Modèle à fond mobile

Appelé aussi modèle sédimentologique, cette modalisation complexes fait appel à beaucoup d'empirisme, elle traite les problèmes d'interaction entre le fluide et les fonds mobiles en sable ou en vase, et son tarage nécessite une connaissance approfondie du site étudié.

4) Les modèles mathématiques

Il y a une vingtaine d'années sont apparus les premiers modèles mathématiques qui permettent de résoudre numériquement les équations théoriques régissant le phénomène dans un domaine donné.

Les améliorations des modèles mathématiques sont liées à trois formes imbriquées de la science :

- La connaissance physique et mathématique des phénomènes en croissance rapide sous l'impulsion des besoins et moyens mis en œuvre.
- Les techniques mathématiques (analyses numériques) apparues il y a une trentaine d'années avec l'arrivée des premiers ordinateurs.
- Les moyens de calcul qui deviennent chaque jour plus puissants avec des couts constamment en baisse, ce qui rend possible des calculs de plus en plus importants et complexes

Le modèle mathématique permet la couverture des zones géographiques très grandes, son encombrement est nul, son exploitation est plus rapide que le modèle physique et il peut être conservé, ce qui permet sa réutilisation ultérieure.

Toutefois, le modèle mathématique ne constitue pas un remède. En effet, il ne peut simuler que les phénomènes dont on connaît les lois les régissant. Ce n'est pas toujours le cas, et pour un certain nombre tel que, l'action des houles ou des courants sur les sédiments, les lois sont toujours de nature empirique et n'ont pas de caractère universel.

L'évolution de l'analyse numérique en mathématique et l'essor des outils informatiques ayant des puissances de calcul considérables, ont permis aux mathématiciens d'améliorer les logiciels de calcul permettant la modélisation mathématique des phénomènes physiques. C'est une méthode d'approche qui est rapide, à faible cout et permet de faire le choix entre les différentes variantes du projet au stade d'avant-projet.

La résolution des équations s'articule sur les lois régissant la modélisation de la houle, les équations développées dans le cadre du 2ème ordre ou même du 3ème ordre.

Les équations de propagation sont résolues en tenant compte des conditions de limites et des phénomènes de diffraction et de réfraction avec les ouvrages existants ou en projet.

D'après la nature de l'étude, le maillage adapté peut changer de quelques kilomètres à quelques mètres, si l'on veut étudier de façon plus précise une zone particulière limitée.

La résolution des équations permet donc d'avoir une vue d'ensemble des champs de vitesse (module et direction), ce qui représente un facteur capital pour porter son choix sur la position d'un ouvrage ainsi que sur son orientation et d'anticiper les incidents sur les phénomènes physiques étudiés que peut avoir le projet.

5) Les modèles hybrides qui sont la combinaison des deux précédents (physique et mathématique)

Il existe aujourd'hui tout un assortiment de modèles physiques et mathématiques. Ils sont souvent complémentaires et peuvent être combinés.

Pour les principaux cas d'étude, une analyse sera faite afin de déterminer et délimiter le choix du modèle qui pourra être mis en œuvre, en faisant apparaître ce qui est du ressort du modèle physique et ce qui peut être traité par une modélisation mathématique.

Conclusion

L'utilisation de la théorie de modélisation ainsi que les lois de similitudes sont primordial dans l'étude du projet en modèle réduit physique. Cela permet d'entamer cette étude sur de bonnes bases.

Chapitre IV

Pré-dimensionnement des
ouvrages de protection

Chapitre IV

Pré-dimensionnement des ouvrages de protection

De très nombreuses études expérimentales ont permis d'observer les processus d'action de la houle sur différents types d'ouvrages maritimes et de dégager des formules utilisables pour pré-dimensionner un ouvrage au stade d'avant-projet.

Et l'objectif du pré-dimensionnement est la détermination du poids de blocs de carapace et de la butée de pied.

I. Etude des variantes d'aménagement

Sur la base des résultats des reconnaissances générales topographiques, bathymétrique et sondages à la lance et des estimations de besoins et conformément aux termes de référence de la convention d'étude, le LEM a élaboré respectivement, trois variantes de schéma d'aménagement pour l'abri de pêche de Khemisti.

1) Principes d'établissement des variantes d'aménagement

Les trois variantes présentées répondent aux besoins exprimés en postes à quai et surfaces de terre-pleins, soit l'ensemble des infrastructures nécessaires pour la réception de produits de pêche, l'accostage, l'amarrage et la répartition des unités de pêche.

Pour le tracé du plan de masse les critères de conception suivants sont pris en compte :

a) Pour la configuration générale

L'établissement des variantes d'aménagement a été fait de sorte à répondre aux besoins exprimés.

L'orientation de la passe d'entrée vers le Nord-Est est déterminée de telle sorte à ce que le bassin soit protégé des houles dominantes.

b) Pour la configuration intérieure

- l'implantation des ouvrages d'accostage de manière à assurer une bonne accessibilité à partir des terre-pleins,
- une meilleure régularité et bonne répartition des surfaces derrière les quais,
- un minimum de dragage et déroctage,
- la cale de halage est placée dans un endroit abrité où les surfaces de terre-pleins qui s'y rattachent sont les plus disponibles.

Compte tenu de la nature des fonds marins (sol naturellement rocheux), la structure projetée la mieux adaptée pour l'aménagement des ouvrages d'amarrage et d'accostage est celle des quais en blocs de béton et d'appontements sur piles à fondations superficielles.

Sur la base de ces considérations, et compte tenu des possibilités qu'offre chaque variante, trois variantes de plan de masse ont été esquissées. Ces variantes ont servi de base pour les estimations de cout de construction.

2) Description des variantes d'aménagement

Avant d'entamer notre étude d'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche, il y a eu plusieurs variantes d'aménagement qui ont été étudiées afin de retenir la bonne variante et la plus fiable sur le plan technico-économique.

a) Les ouvrages à l'état actuel

L'abri de pêche de Khemisti est actuellement aménagé comme le montre la figure suivante :

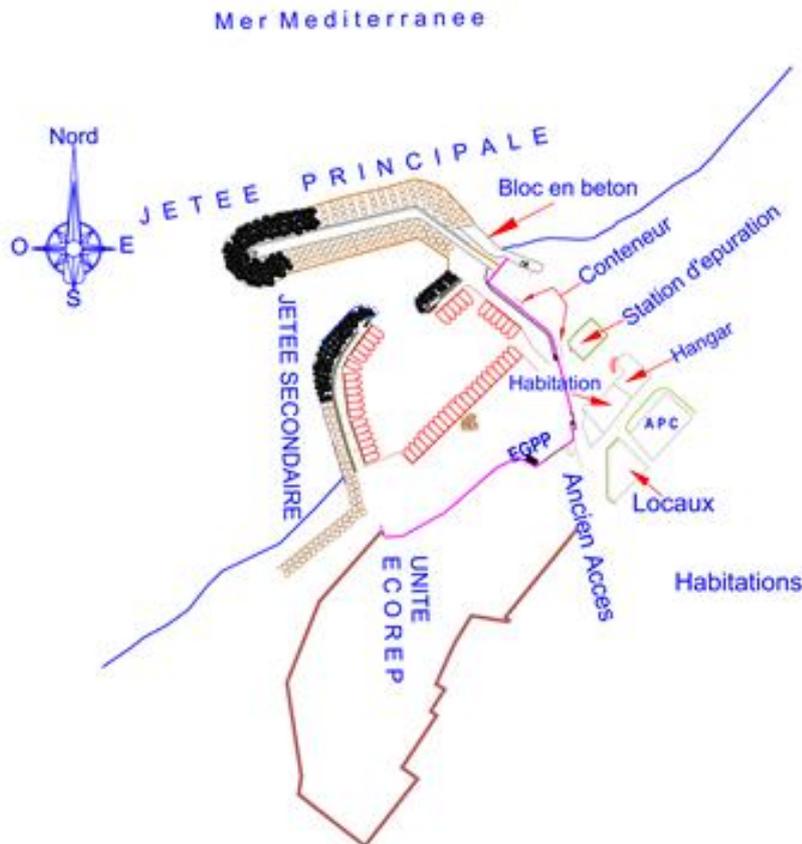


Figure IV.1 : plan de masse de l'abri de pêche de Khemisti à l'état actuel.

L'abri de pêche de Khemisti à l'état actuel est constitué de :

- une jetée principale de longueur 143.0 ml, est fondée à des profondeurs variant entre 0.0m et -5.0 m. Elle est constituée extérieurement d'enrochement à partir de l'enracinement jusqu'au coude et de bloc cubique rainuré (B.C.R) de 12T du coude vers le musoir.
- une jetée secondaire de 120 ml environ est constituée d'une dalle avec un mur de garde en béton, arasé à +2.10m. Extérieurement, le corps de la jetée est protégé par des enrochements à partir de l'enracinement jusqu'au coude avec une longueur de 60ml, de blocs artificiels du coude au musoir avec une longueur de 60ml.
- la passe d'entrée est orientée vers le Nord-Ouest.

b) Variante d'aménagement N°01

La variante d'aménagement N° 01 consiste en l'extension de l'abri de pêche en port de pêche, les ouvrages de protection qui constituent cette variante sont :

- une jetée principale d'environ 690.0ml de longueur, est fondée à des profondeurs variant entre 0.0m et -10.0m. Elle est composée de trois tronçons. Le premiers tronçon débute de l'enracinement jusqu'au commencement de la carapace en BCR de 12T est orienté du Sud-Est vers le Nord-Ouest de 175ml de longueur. Le deuxième tronçon débute du commencement des BCR de 12T jusqu'au début des BCR de 20T de 214 ml. Le troisième tronçon de 301ml de long orienté vers l'Est et débute de la fin des BCR de 12T jusqu'au musoir.
- une jetée secondaire d'environ 275.0ml de longueur, qui consiste en le prolongement de l'ancienne jetée principale de l'abri de pêche d'environ 132ml. Elle est fondée à des profondeurs variant entre -1.0m et -7.0 m.
- la passe d'entrée est orientée vers le Nord-Est.

Le plan de masse de la variante d'aménagement N°1 est donné en annexe B.

c) La variante d'aménagement N°02

La variante d'aménagement N°02 consiste à faire un redressement sur la première partie courante de la jetée principale de la 1^{ère} variante d'aménagement, un rétrécissement de la deuxième partie courante et un prolongement au niveau de la 3^{ème} partie courante de cette jetée ainsi qu'un rétrécissement de 51.0ml de la jetée secondaire de la 1^{ère} variante d'aménagement.

Le plan de masse de la variante d'aménagement N°2 est donné en annexe C.

Les ouvrages de protection qui constituent cette variante sont les suivants :

- une jetée principale de longueur de 774ml, fondée à des profondeurs variant entre 0.0m et -10.0m, composée de trois tronçons. Le premiers tronçon débute de l'enracinement jusqu'au commencement de la carapace en BCR de 12T est orienté du Sud-Est vers le Nord-Ouest de 174ml de longueur, le deuxième tronçon débute du commencement des BCR de 12T jusqu'au début des BCR de 20T de 160ml, le troisième tronçon de 440ml de long orienté vers l'Est et débute de la fin des BCR de 12T jusqu'au musoir.
- une jetée secondaire d'environ 224ml de longueur, qui consiste en le prolongement de l'ancienne jetée principale de l'abri de pêche d'environ (81ml), fondée à des profondeurs variant entre -1.0m et -7.0 m.
- la passe d'entrée est orientée vers le Nord-Est.

d) La variante d'aménagement N°03

La variante d'aménagement N° 03 consiste en l'extension de l'abri de pêche en port de pêche, les ouvrages de protection de cette variante sont comme suit :

- Une jetée principale d'environ 690.0ml de longueur, qui consiste en le prolongement de l'ancienne jetée principale de l'abri de pêche d'environ 476.6ml, fondée à des profondeurs variant entre -1.0m et -10.0m, composée de trois tronçons. Le premiers

tronçon débute de l'enracinement orientait du Sud-est vers le Nord-ouest de 200.0ml de longueur, le deuxième tronçon est de longueur de 225.0ml, le troisième tronçon de 265.0ml de long orienté vers l'Ouest.

- Une jetée secondaire d'environ 255.0ml de longueur, est fondée à des profondeurs variant entre 0.0m et -7.0 m.
- La passe d'entrée est orientée vers le Nord-est.

Le plan de masse de la variante d'aménagement N°3 est donné en annexe D.

Une étude technico-économique réalisée par le LEM a montré que les deux premières variantes (01 et 02) sont les cas les plus défavorables économiquement (cout de revient de la construction). Et l'étude d'agitation a montré qu'au niveau de la passe d'entrée de ces deux variantes les houles de directions N30° et N360° arrive avec une hauteur de 2.0m : l'agitation est importante.

Mais pour la variante N°03, les études ont montré qu'elle est la plus favorable économiquement et aussi la plus favorable par rapport à l'agitation ; les houles, qui arrivent sur la passe d'entrée, ont une hauteur qui varie entre 0.43m et 1.20m.

Par contre, l'étude sédimentologique a montré que les deux premières variantes sont les plus favorables car y a pas un transit sédimentologique par rapport à la 3^{ème} variante où il y a un risque d'ensablement.

Conclusion

Le « LEM » a décidé de retenir la 3^{ème} variante qui a 2 point positifs alors que les deux autres avaient un seul point positif, et la solution proposée contre l'ensablement est de prolonger la jetée principale de 70m (voir le plan de masse de la variante N°03 avec extension dans l'annexe E).

3) Digue à talus

La variante d'aménagement retenue est la variante N°3 avec extension et un prolongement de 70m de la jetée principale.

L'extension de la jetée principale est constituée de digue à talus.

a) Définition d'une digue à talus

Les talus en enrochements prennent une place plus importante dans la construction des ouvrages maritimes défensifs, car ils sont plus facile à mettre en place et à les maintenir par la suite, ainsi que leur bonne tenue en mer, et leur coût de revient qui est plus faible que celui des autres types de constructions.

Les digues à talus sont des ouvrages constitués de matériaux rocheux, habituellement protégés par une carapace de blocs d'enrochement naturel ou de blocs artificiels de plus grandes dimensions. Les digues servent généralement à mettre à la disposition des navires des eaux calmes pour l'amarrage ou le mouillage, à l'abri de la houle ou des courants.

Ya plusieurs types de digue à talus, dans le cas de notre projet, l'extension est une digue à talus conventionnelle avec mur de couronnement. (*Rock Manuel*)

b) Les composantes de la digue en talus

On donne sur la figure ci-dessous un schéma montrant les composants d'une digue à talus conventionnelle avec mur de couronnement :

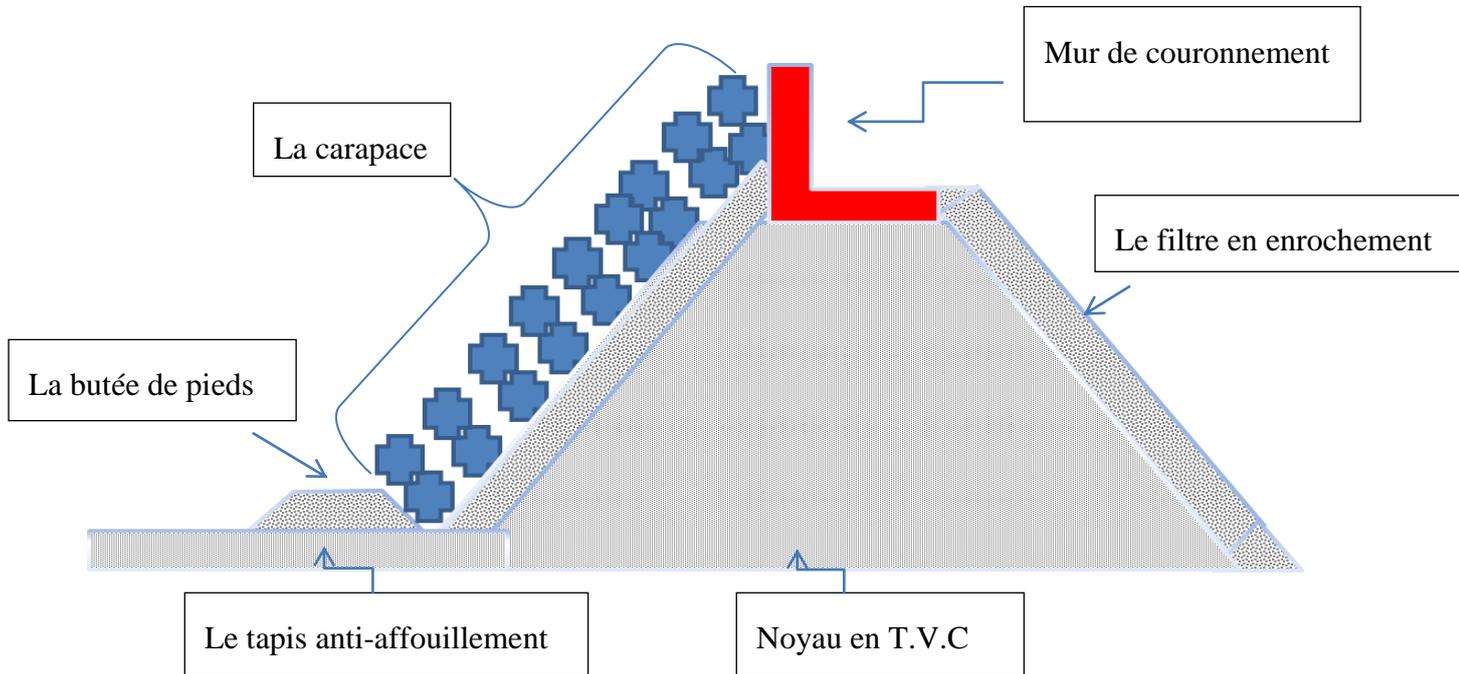


Figure IV.2 : schéma d'une digue à talus conventionnelle avec mur de couronnement.

La digue à talus conventionnelle avec mur de couronnement est constituée de :

- noyau en T.V.C (tout-venant carrière) : c'est un noyau constitué de résidus de matériaux venant de carrière.
- filtre en enrochement : c'est une couche en enrochement d'une granulométrie plus grande que celle du noyau. Elle a pour but de protéger ce dernier contre l'action de la mer et éviter que les fines matériaux du noyau passent à travers la carapace et ainsi éviter toutes cavités qui pouvant conduire la digue à un tassement.
- la butée : c'est une couche en enrochement qui est mise au pied de l'ouvrage afin de maintenir la carapace.
- le tapis anti-affouillement : il est fait en T.V.C et a pour but d'éviter que l'ouvrage s'enfonce dans le sable.
- mur de couronnement: c'est la crête de l'ouvrage, intègre souvent une voie de circulation et il permet l'accès le long de la digue.
- la carapace : représente un élément clé de la stabilité de la structure. Elle se compose soit d'enrochements naturels soit de blocs artificiels en béton lorsque l'intensité de la houle requiert des poids d'éléments naturels que les carrières disponibles ne sont pas en mesure de fournir. Les blocs artificiels, de par leur forme plus ou moins complexe, sont caractérisés par un coefficient de stabilité élevé.

Les photos ci-dessous montrent plusieurs types de blocs artificiels :

Tableau IV-1 : différents blocs artificiels existants au LEM.

Les différents blocs artificiels	Photos des blocs
Blocs d'ancien port	 <p>(1)</p>
Blocs tétrapodes	 <p>(2)</p>
Blocs acropodes	 <p>(3)</p>
Blocs cubique	 <p>(4)</p>



c) Mode de fonctionnement d'une digue à talus

La houle qui vient frapper une digue à talus a une action complexe et diversifié.

Lorsque l'on observe en modèle réduit l'action de la houle, on constate que (*Technique de l'ingénieur*) :

- A vague montante, la houle exerce sur la carapace une action de bas en haut qui tend à soulever les blocs situés à l'extérieur ;
- A vague descendante, les blocs sont aspirés vers le bas et reprennent dans la plupart des cas la place qu'ils occupaient auparavant.

L'analyse plus fine du phénomène montre que:

- A lame montante, la houle à l'extérieur de la digue agit bien, pendant qu'une partie de l'eau et de l'énergie va s'infiltrer à l'intérieur de la carapace et des sous-couches.
- Au début du mouvement de reflux de la vague à l'extérieur, le mouvement de l'eau à l'intérieur est toujours ascendant, puis le mouvement intérieur va s'inverser.

On constate alors un déphasage du niveau de l'eau entre l'intérieur de la digue (carapace et sous-couches) et l'extérieur, qui va produire deux effets que l'on nomme run up et run down :

- En partie haute de la digue : arrachement des blocs les moins stables qui peuvent être complètement éliminés de la digue soit parce qu'ils retombent au pied de celle-ci, soit parce qu'ils sont emportés du côté intérieur par les franchissements ;
- En partie basse de la digue : expulsion horizontale des blocs soumis à la différence de pression maximale lorsque la lame est au niveau le plus bas à l'extérieur et au niveau le plus haut dans la digue.

Du point de vue de l'efficacité en matière de réflexion de la houle, l'optimum est atteint lorsque le déphasage est égal à la demi-période de la houle : l'onde réfléchie est en opposition de phase avec l'onde incidente. Par contre, l'action sur les éléments de carapace est la plus importante dans ce cas.

Le déphasage dépend de très nombreux paramètres parmi lesquels on peut citer (*Technique de l'ingénieur*) :

- Les caractéristiques de la houle : creux, période, longueur d'onde, cambrure ;
- Les caractéristiques du fond : profondeur d'eau, pente des fonds ;

- Les caractéristiques de la digue : pente du talus, porosité et rugosité de la carapace et des sous-couches (à l'échelle de la houle), perméabilité du noyau.

Chaque cas est un cas particulier qui devra être étudié.

Par ailleurs, une partie de la houle peut passer par-dessus l'ouvrage c'est le phénomène de franchissements et déversement ou même se propager à l'intérieur de celle-ci si la porosité du noyau le permet.

II. Évaluation de la houle de projet

La stabilité des ouvrages de protection contre la houle dépend essentiellement des caractéristiques de la houle susceptible de venir attaquer l'ouvrage pendant sa vie.

La détermination de la houle de projet est basée sur la bonne connaissance des houles du site, mais aussi sur d'autres critères parmi lesquels figurent en bonne place la durée de vie de l'ouvrage et le risque admissible.

1) Durée de vie de l'ouvrage

Plus la durée de vie de l'ouvrage est importante, plus la probabilité d'avoir affaire à des tempêtes importantes est grande.

Les formules suivantes, traduisent cette quasi-évidence par :

$$P_E = 1 - \exp\left(-\frac{N}{T}\right)$$

$$T = \frac{-N}{\ln(1 - P_E)}$$

Avec, T : durées de retour ; N : durées de vie de l'ouvrage et P_E : probabilité du risque de dommage tel que E correspondant à un creux H de la houle d'une durée de retour T.

D'un point de vue pratique, pour un ouvrage donné dont la durée de vie est de l'ordre de 50 ans, on a (*Technique de l'ingénieur*) :

- Une quasi-certitude d'être confronté au moins une fois à la houle décennale ($P_E = 99,5$ %).
- Pratiquement une chance sur deux d'être confronté à la houle centennale ($P_E = 39$ %).
- Une chance non négligeable (5 %) d'être confronté à la houle millénaire.

Si l'on désire se prémunir contre les risques à 99 %, il faudra adopter une houle de calcul dont la période de retour sera 100 fois la durée de vie de l'ouvrage, ce qui entraînera vraisemblablement un coût d'investissement prohibitif. Il est alors nécessaire d'accepter un risque plus important, mais raisonnable. (*Technique de l'ingénieur*)

2) Risque admissible

Il s'agit ici de déterminer aussi précisément et aussi objectivement que possible la notion de risque admissible. En effet, celui-ci n'est pas le même si l'on veut protéger des effets de la mer une centrale nucléaire ou un simple remblai non exploité.

On peut utiliser alors deux critères qui permettent de mieux quantifier le risque encouru :

- Le critère de non-dommage pour lequel la structure doit rester intacte et ne pas subir de mouvement important (non remaniement de la carapace pour une digue à talus, ou du talus de soubassement pour une digue verticale).
- Le critère de dommage réparable pour lequel on admet que la structure puisse être endommagée mais effectivement réparable.

Le concepteur doit s'assurer que l'ouvrage pourra objectivement être réparé du point de vue :

- Administratif : les autorisations doivent être facilement obtenues.
- Financier : il ne peut être question d'attendre plusieurs années les crédits pour réparer une digue car la mer se chargera d'augmenter les dégâts, sinon de la détruire complètement.
- Technique : il faut s'assurer que l'on dispose dans un délai raisonnable et à courte distance des compétences nécessaires, de la technologie, des matériels et des matériaux nécessaires à la réparation.

En général, on associe le critère de non-dommage aux conditions naturelles normales (houle, vent, niveau de référence) et le critère de dommage effectivement réparable aux conditions naturelles exceptionnelles.

3) Critères à retenir pour l'évaluation de la houle de projet

La bonne connaissance des houles régnant sur le site, l'évaluation du risque admissible en fonction de la durée de vie et de la nature de l'ouvrage sont les critères les plus importants.

Mais il ne faut pas négliger les phénomènes de fatigue des ouvrages, car la houle va imposer de l'ordre de 10 000 sollicitations alternées par jour (pour une période de 8,6 s) et c'est sur une structure éprouvée qu'arriver groupées les vagues les plus fortes. (*Technique de l'ingénieur*)

La durée de la tempête intervient comme facteur important sur les problèmes des dégradations des fondations ou des érosions de pied dues au transport des sédiments généré par la houle.

On peut essayer de tenter une approche économique pour choisir la houle de projet.

Pour une houle de projet donnée, deux séquences de cout peuvent être calculées en tenant compte des probabilités d'apparition des dommages comme suit :

$$C = \sum_{a=0}^{a=N} \frac{(Ia + Ea + Ra)}{(1+J)^a}$$

Avec, C : le coût total actualisé sur la durée de vie de l'ouvrage ; I : les coûts d'investissement ; E : les coûts d'entretien ; R : les coûts des réparations ; J : le taux d'actualisation ; N : la durée de vie de l'ouvrage et a : l'indice de l'année.

En fait, l'expérience montre que l'obtention des crédits d'entretien ou de réparation est en général plus difficile que celle des crédits de premier investissement. (*Technique de l'ingénieur*).

On peut alors faire appel à la notion de taux de rareté des crédits et la formule ci-dessus s'écrit alors :

$$C = \sum_{a=0}^{a=N} \frac{(\zeta_I I_a + \zeta_E E_a + \zeta_R R_a)}{(1+J)^a}$$

En général :

- ζ_I taux de rareté des crédits d'investissement, est connu car il résulte de choix et de priorité de la politique d'investissement ;
- ζ_E et ζ_R taux de rareté des crédits d'entretien et de réparations, sont mal connus, dépendent des ressources disponibles à un moment donné (généralement faibles pour les pays en voie de développement), mais sont en général très grands.

Donc, pour un coût total actualisé, il vaudra souvent mieux augmenter les investissements en accroissant la sécurité de l'ouvrage et en diminuant l'entretien et les réparations. Un surdimensionnement de l'ouvrage ne coûte pas forcément plus cher. (*Technique de l'ingénieur*)

Au total, on pourra, pour un ouvrage standard d'une durée de vie de 50 ans, retenir comme conditions normales la tempête décennale et comme conditions exceptionnelles la tempête centennale associées aux niveaux d'eau correspondants.

4) Choix de la houle de projet

Lors d'une tempête, les vagues successives vont éprouver et fatiguer la digue, notamment en transmettant au massif de fondation des efforts alternés au rythme d'environ 10 000 par jour.

Lorsque survient le paroxysme de la tempête, la vague la plus forte, généralement accompagnée par un train de vagues fortes, va appliquer à la structure les efforts les plus grands qui risquent de la mettre en péril.

On retiendra donc, pour le creux de la houle de projet, le creux maximal de la tempête (H_{\max}) pour une durée de retour habituellement prise égale à 10 ans pour les conditions normales et à 100 ans pour les conditions exceptionnelles.

Dans le cas de notre projet, on fait un dimensionnement avec la houle centennale ($H_{100\text{ans}} = 8.08\text{m}$).

III. Le pré-dimensionnement de la variante d'aménagement N°03

De très nombreuses études expérimentales ont permis d'observer les processus d'action de la houle sur différents types d'ouvrages maritimes et de dégager des formules utilisables pour pré-dimensionner un ouvrage au stade d'avant-projet. Ces formules empiriques utilisées en général pour le pré-dimensionnement des digues sont tirées à partir d'essais effectués en canal à houle par différents chercheurs. (*Ismal, 1993*)

Et l'objectif du pré-dimensionnement est de déterminer le poids unitaire des blocs de la carapace ainsi que le poids moyen des enrochements des filtres, de la butée de pied et du talus intérieur.

La formule la plus connue est celle de Hudson qui permet de déterminer les poids des blocs de carapace du profil étudié en fonction de la houle incidente qui s'écrit comme suit (*Ismal, 1993*) :

$$W = \frac{1}{K_d} * \left(\frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3} * \frac{H_b^3}{\cot\alpha} \right)$$

Avec, W: poids unitaire des blocs en tonne (T) ; γ_s : densité du matériau constitutif du bloc en T/m^3 ; γ_0 : densité de l'eau de mer, elle est égale à $1.026 T/m^3$; H_b : hauteur de la houle de projet en m ; K_d : coefficient adimensionnel dépendant notamment de la nature du bloc et de la pente du talus et α : angle du talus d'enrochement par rapport à l'horizontal.

Cette formule a été établie à partir d'essais réalisés sur des digues en enrochements naturels en houle régulière non déferlante, c.à.d. dans les conditions pouvant être relativement éloignées de celles auxquelles est soumis l'ouvrage.

1) Calcul de poids des différents matériaux formant les jetées principale et secondaire de l'extension de l'abri de pêche Khemisti

La jetée principale et secondaire sont des digues à talus formé d'un noyau en T.VC, d'une carapace, de filtres, d'une butée, ainsi de talus intérieur.

a) Jetée principale

La jetée principale se constitue d'un profil A-A, un profil B-B, un profil C-C et d'un profil D-D (figure IV.3).

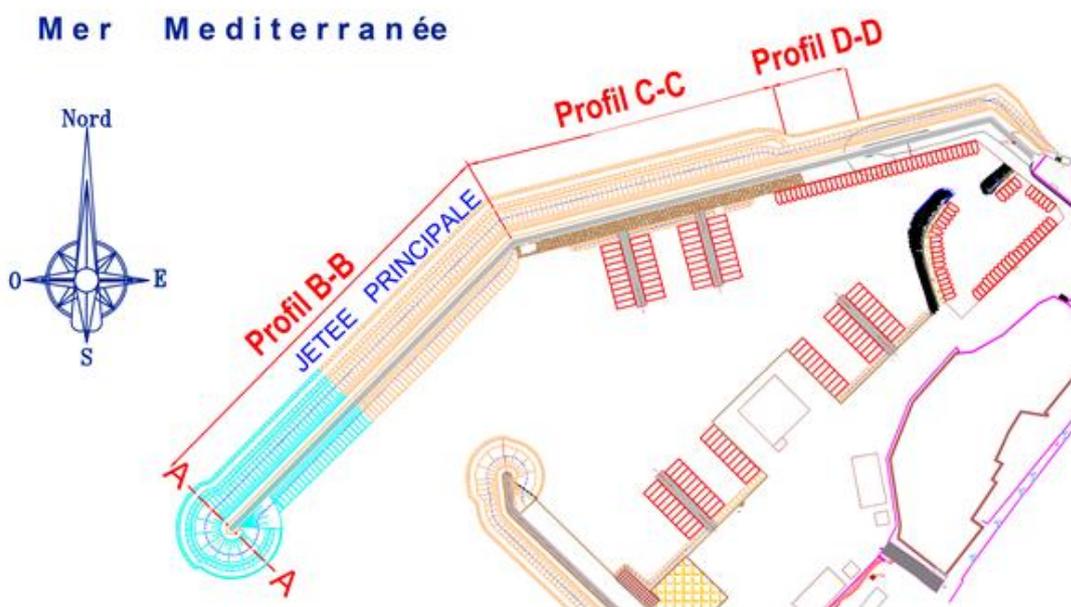


Figure IV.3 : la jetée principale de l'extension de l'abri de pêche Khemisti.

i. Profil B-B

Le profil B-B se situe entre le coude et le musoir à la cote -10m, comme le montre (la figure VI.3), où la houle de projet est égale à $H_b = 5.7\text{m}$.

- Calcul de poids unitaire de la carapace

Le poids unitaire des blocs de la carapace est donné par la formule de Hudson vu précédemment :

$$W = \frac{1}{K_d} * \left(\frac{\gamma_s}{(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1)^3} * \frac{H_b^3}{\cot\alpha} \right)$$

Où :

$\gamma_0 = 1.026 \text{ T/m}^3$; $\cot\alpha = 3/2$: la pente du talus d'enrochement ; K_d : le coefficient de stabilité est admis à 7.5 et γ_s : la densité des blocs artificiels (blocs en B.C.R) est égale à 2.4 T/m^3 .

Le poids unitaire des blocs de la carapace est :

$$W_{\text{carapace}} = \frac{1}{7.5} * \left(\frac{2.4}{\left(\frac{2.4}{1.026} - 1\right)^3} * \frac{5.7^3}{1.5} \right)$$

$$\Rightarrow W_{\text{carapace}} = 23.10\text{T.}$$

$$\Rightarrow \text{Le poids de la carapace est pris égal à } 20 \text{ T.}$$

Les blocs de la carapace sont disposés sur deux couches.

- Calcul du poids des filtres d'enrochement et de la butée de pieds et du talus intérieur

Le poids moyen des enrochements du filtre et de la butée de pieds sont calculés comme suit :

$$W = W_{\text{carapace}}/10.$$

$$\Rightarrow W = 20/10$$

$$\Rightarrow W = 2.0 \text{ T.}$$

Les enrochements sont disposés en deux couches, et leur gamme est calculée comme suit :

$$W = \begin{cases} 2.0 * 1.30 = 2.60 \text{ T.} \\ 2.0 * 0.70 = 1.40 \text{ T.} \end{cases}$$

Les enrochements sont d'une catégorie de (1- 3) T.

ii. Profil A-A

Le profil A-A se situe au musoir à la cote -12m, comme le montre la figure VI.3, où la houle de projet est égale à $H_b = 7\text{m}$.

- Calcul du poids de la carapace

Le poids unitaire des blocs de la carapace est donné par la formule de Hudson : (Ismal, 1993)

$$W = \frac{1}{K_d} * \left(\frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3} * \frac{H_b^3}{\cotg\alpha} \right)$$

Où :

$\gamma_0 = 1.026 \text{ T/m}^3$; $\cotg \alpha = 3/2$: la pente du talus d'encrochement ; K_d : le coefficient de stabilité est admis à 7.5 ; γ_s : la densité des blocs artificiels (blocs en B.C.R) est égale à 2.4 T/m^3 .

Le poids unitaire des blocs de la carapace est :

$$W_{\text{carapace}} = \frac{1}{7.5} * \left(\frac{2.4}{\left(\frac{2.4}{1.026} - 1\right)^3} * \frac{7^3}{1.5} \right)$$

$$\Rightarrow W_{\text{carapace}} = 29.70\text{T}.$$

\Rightarrow Laboratoire d'études maritimes prend le poids de la carapace au musoir égale à 25 T par expérience vu que le poids unitaire de la carapace de la partie courante de la jetée principale est de 20T, et cette diminution de poids a aussi un but économique.

Les blocs de la carapace sont disposés sur deux couches.

- Calcul du poids de filtre d'encrochement et du talus intérieur

Le poids moyen des encrochements du filtre est calculé comme suit :

$$W = W_{\text{carapace}}/10.$$

$$\Rightarrow W = 25/10$$

$$\Rightarrow W = 2.5\text{T}.$$

Les encrochements sont disposés en deux couches, et leur gamme est calculée comme suit :

$$W = \begin{cases} 2.5 * 1.30 = 3.25 \text{ T.} \\ 2.5 * 0.70 = 1.75 \text{ T.} \end{cases}$$

Les encrochements sont d'une catégorie de (1- 3) T.

- La butée de pieds

Le poids unitaire des encrochements de la butée de pieds est établi par la formule d'Hudson.

On utilise dans les calculs la hauteur de la houle de projet à la cote -10.00m et qui est égale à 5.7m, car la butée de pieds du musoir est une continuité de la butée de pieds du profil B-B (le tronçon qui se trouve entre le coude et le musoir). (APS, 2009)

$$D'où : W_{\text{butée}} = \frac{0.1}{3.5} * \left(\frac{2.65}{\left(\frac{2.65}{1.026} - 1\right)^3} * \frac{5.7^3}{1.5} \right)$$

$$\Rightarrow W_{\text{butée}} = 2.31 \text{ T.}$$

Les enrochements de la butée de pieds sont disposés en deux couches et leur catégorie est définie comme suit :

$$W = \begin{cases} 2.31 * 1.30 = 3.00 \text{ T.} \\ 2.31 * 0.70 = 1.61 \text{ T.} \end{cases}$$

D'où : on utilise une catégorie d'enrochement de (1-3) T au niveau de la butée de pieds.

iii. Profil C-C

Le profil C-C se situe entre l'enracinement et le coude à la cote -8m, comme le montre la (figure VI.3), où La houle de projet est égale à $H_b = 4.9\text{m}$.

- Calcul de poids de la carapace

Le poids unitaire des blocs de la carapace est donné par la formule de Hudson : (Ismael, 1993)

$$W = \frac{1}{K_d} * \left(\frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3} * \frac{H_b^3}{\cot\alpha} \right)$$

Où :

$\gamma_0 = 1.026 \text{ T/m}^3$; $\cot\alpha = 3/2$: la pente du talus d'enrochement ; K_d : le coefficient de stabilité est admis à 7.5 ; γ_s : la densité des blocs artificiels (blocs en B.C.R) est égale à 2.4 T/m^3 .

Le poids unitaire des blocs de la carapace est :

$$W_{\text{carapace}} = \frac{1}{7.5} * \left(\frac{2.4}{\left(\frac{2.4}{1.026} - 1\right)^3} * \frac{4.9^3}{1.5} \right)$$

$$\Rightarrow W_{\text{carapace}} = 10.45 \text{ T}$$

\Rightarrow Le poids de la carapace, on le prend égale à 12 T car

Les blocs de la carapace sont disposés sur deux couches.

- Calcul de poids des filtres d'enrochement et de la butée de pieds

Le poids moyen des enrochements du filtre est calculé comme suit :

$$W = W_{\text{carapace}}/10.$$

$$\Rightarrow W = 12/10$$

$$\Rightarrow W = 1.2 \text{ T.}$$

Les enrochements sont disposés en deux couches, et leur gamme est calculée comme suit :

$$W = \begin{cases} 1.2 * 1.30 = 1.56 \text{ T.} \\ 1.2 * 0.70 = 0.84 \text{ T.} \end{cases} \quad \text{Les enrochements sont d'une catégorie de (0.5-1) T.}$$

Mais cette gamme est trop petite par rapport à la carapace donc on fait, une 2^{ème} couche entre le filtre et la carapace d'un poids de : $W = W_{\text{carapace}}/5$.

$$\Rightarrow W = 12/5$$

$$\Rightarrow W = 2.4 \text{ T.}$$

$$W = \begin{cases} 2.4 * 1.30 = 3.12 \text{ T.} \\ 2.4 * 0.70 = 1.68 \text{ T.} \end{cases}$$

Les enrochements du filtre et de la butée de pieds sont d'une catégorie de (1- 3) T.

Et on garde la 1^{ère} gamme (0.5-1) T pour le talus intérieur.

- Les noyaux du profil A-A, du profil B-B et du profil C-C

Le noyau de la jetée est du tout venant de carrière (T.V.C) d'une gamme (1-500 Kg).

b) Jetée secondaire

La jetée secondaire se constitue d'un profil A'-A', et d'une partie courante comme la montre la figure IV.4.

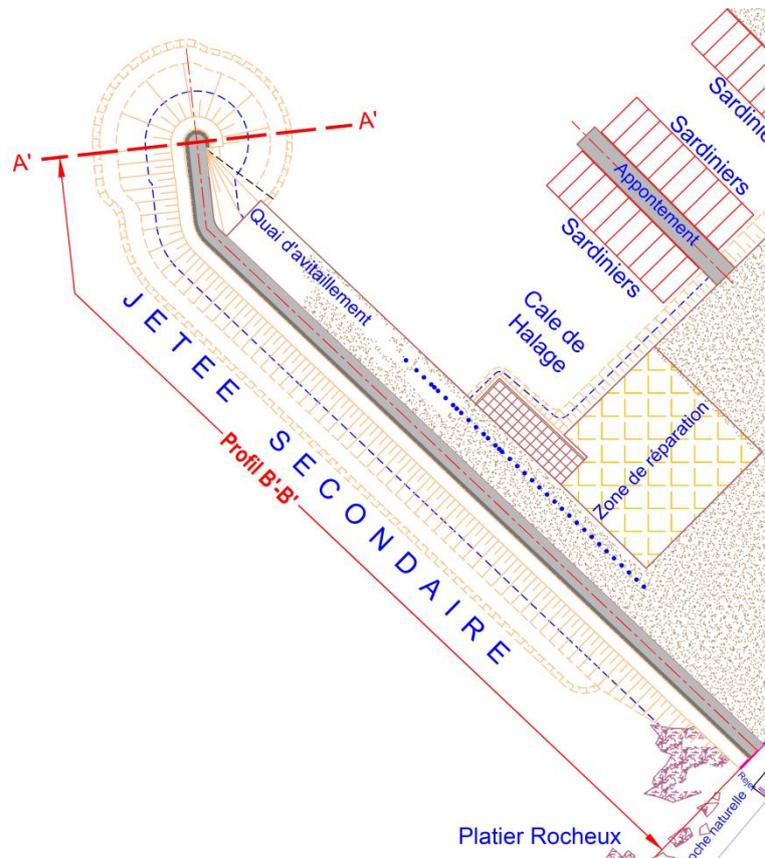


Figure IV.4 : la jetée secondaire de l'extension de l'abri de pêche Khemisti.

i. Profil A'-A'

Pour le profil A'-A' coté musoir, nous retenons un poids unitaire de blocs en B.C.R de 7T.

ii. Partie courante de la jetée secondaire

Ce qui concerne la partie courante de la jetée secondaire, nous prenons une gamme d'enrochement de (2-5) T.

2) Calcul des épaisseurs des différentes couches formant les jetées principale et secondaire de l'extension de l'abri de pêche Khemisti

L'épaisseur d'une couche formant les jetées est déterminée par la formule suivante (*Technique de l'ingénieur*) :

$$e = n * k_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{1/3}$$

Avec, W : poids unitaire du bloc ou poids moyen d'enrochement en Tonne ; n: nombre de couches égale à 2 ; γ_r : la densité du bloc ou de l'enrochement en T/m³ ; et k_{Δ} : coefficient de couche.

Les épaisseurs des couches formant les jetées principale et secondaire de l'extension de l'abri de pêche Khemisti sont données par le tableau IV-2.

Tableau IV-2 : différents blocs artificiels existants au LEM.

Les matériaux	Jetée	Profil	Poids unitaire de blocs ou poids moyen d'enrochement (T)	La densité du bloc (T/m ³)	Coefficient de couche	Epaisseur (m)
Carapace	Principale	A-A	25.0	2.40	1.02	4.45
		B-B	20.0	2.40	1.02	4.14
		C-C	12.0	2.40	1.02	3.50
	secondaire	A'-A'	07.0	2.40	1.02	2.91
Filtres	Principale	A-A	02.5	2.65	1.15	2.26
		B-B	02.0	2.65	1.15	2.09
		C-C (enrochement et butée)	02.4	2.65	1.15	2.22
		C-C (talus intérieur)	01.2	2.65	1.15	1.80

Conclusion

Ces formules empiriques sont insuffisantes pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Pour cela, on passe à la modélisation physique et à la simulation des interactions houle-ouvrage afin d'avoir un bon dimensionnement et assurer une bonne stabilité de ce dernier.

Chapitre V

Essais de stabilité en
canal à houle

Chapitre V

Essais de stabilité en canal à houle

Habituellement, la mise au point du profil s'effectue d'abord à deux dimensions (direction de la houle perpendiculaire à l'ouvrage) dans un canal à houle. Ce canal est équipé d'un générateur de houle aléatoire. Le modèle est construit à une échelle suffisamment grande, généralement comprise entre le 1/30^e et le 1/60^e, pour permettre la construction en similitude de Froude non distordue de tous les éléments constitutifs de l'ouvrage.

La masse volumique de ces derniers sera la même qu'en nature (à une petite correction près du fait que l'eau du modèle est douce).

Le profil est soumis à des houles qui ont généralement des périodes de retour allant de 1 à 100 ans suivant le type d'ouvrage concerné (port de plaisance, grande digue d'un port de pêche ou de commerce).

Les comparaisons qui ont pu être effectuées sur le comportement d'ouvrages dans la nature et sur le modèle sont satisfaisantes, pour autant que ces études soient réalisées par des laboratoires possédant une grande expérience de ce type d'essai.

L'objet de la présente étude est l'optimisation des ouvrages de protection de l'extension de la jetée principale de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche du point de vue stabilité en modèle réduit physique en canal à houle.

I. Cadre des essais

Dans le cadre des essais, l'installation utilisée pour la modélisation et les hypothèses sont comme suit :

1) Description de l'installation

Les essais en canal permettent de modéliser une plage soumise uniquement aux houles frontales, ils ne tiennent pas compte du transit littoral. Seuls les processus sédimentaires d'échanges transversaux sont représentés. Les mouvements dans le profil sont particulièrement importants entre la côte et la zone de déferlement. Dans cette zone, les fonds s'érodent et se sédimentent alternativement suivant les caractéristiques des houles, mais le profil moyen peut rester stable au cours des années successives en l'absence d'ouvrage le long de la côte.

Ces essais permettent de vérifier la stabilité d'une ou plusieurs sections (2D) de ces ouvrages dans un environnement marin donné, et d'en évaluer les performances en termes de franchissement, de réflexion ou encore de transmission en vue d'une éventuelle optimisation du projet.

Les essais se sont déroulés dans le canal à houle du centre d'essais sur modèle du Laboratoire d'Etudes Maritimes. Ce canal a les dimensions suivantes:

- Largeur : 0.6 m.

- Profondeur : 01 m.
- Longueur : 40 m.

On donne ci-dessous une figure montrant le canal à houle :



Figure V.1: le canal à houle du laboratoire d'études maritimes (LEM).

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

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

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

2) Hypothèses d'essais

Il y a lieu tout d'abord de rappeler que les modèles réduits physiques hydrauliques doivent satisfaire à une similitude géométrique et à une similitude cinématique et dynamique. En effet, le but de tels modèles est de reproduire des mouvements de l'eau et son action sur des obstacles (ouvrages, ...).

a) **Loi de similitude**

En hydraulique maritime, les deux phénomènes à représenter sont la marée et la houle. Dans notre cas (Méditerranée) seule la dernière est prise en considération. Les problèmes liés à la

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

L'échelle de réduction géométrique λ étant choisie pour satisfaire du mieux possible les différentes contraintes de réalisation du modèle tout en garantissant une représentativité des phénomènes et une précision de leur mesure suffisante, le choix de la similitude consiste à convenir d'une ou de plusieurs relations entre l'échelle de réduction géométrique et les échelles de représentation des autres grandeurs.

Pour ce type d'essai, la nature des principaux phénomènes mis en jeu (propagation d'une onde de gravité, équilibre de corps solides, etc.) suggère de privilégier la représentation des forces déterminantes que sont les forces liées aux accélérations (gravité et inertie). Pour cela, il est nécessaire que la similitude adoptée laisse invariant le nombre de Froude :

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Avec, v : Vitesse caractéristique (vitesse orbitale, célérité, etc.) ; g : Accélération de la pesanteur ; et D : Dimension caractéristique (dimension d'un bloc, hauteur d'eau, etc...).

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

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

Volumes, masses, poids : λ^3

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

b) Distorsions

Il y a deux (02) types de distorsion, l'une due à la viscosité et l'autre due à la densité de l'eau :

i. Distorsion due à la viscosité

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

$$R_e = \frac{v^* D}{\nu}$$

Avec, v^* : Vitesse caractéristique (vitesse orbitale, célérité, ...) ; ν : Viscosité cinématique du fluide et D : Dimension caractéristique (dimension d'un bloc, hauteur d'eau,...).

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

Pour satisfaire à la fois aux critères de similitude de Froude et de Reynolds, il serait donc théoriquement nécessaire d'utiliser pour le modèle, un fluide de très faible viscosité, 1/189,57 fois celle de l'eau dans ce cas. Cette impossibilité pratique conduit très généralement à préférer le simple choix de l'eau pour le modèle et donc à accepter une distorsion sur la représentation du nombre de Reynolds, distorsion d'autant plus importante que l'échelle de réduction des longueurs est plus grande.

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

ii. Distorsion due à la densité de l'eau

L'eau utilisée dans le modèle est douce ($\gamma_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$) alors qu'elle est salée en nature, donc plus dense, dans la réalité ($\gamma_s = 1025 \text{ kg/m}^3$). La masse spécifique de l'eau intervient directement dans les forces de nature inertielle, proportionnelles aux volumes et aux accélérations, ainsi que dans les poussées d'Archimède. En fait, cette caractéristique intervient globalement sur la stabilité suivant une relation empirique (formule de stabilité d'Hudson) qui traduit les conditions d'apparition d'un certain degré de dommage.

$$W = \frac{1}{K_d} * \left(\frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3} * \frac{H_b^3}{\cot\alpha} \right)$$

Avec, W : Masse unitaire des blocs de carapace ; H_b : Hauteur des vagues incidentes ; γ_s : Masse spécifique du matériau constituant les blocs ; γ_0 : Masse spécifique de l'eau ; K_d : Coefficient empirique caractérisant la stabilité propre du bloc ; et α : Angle de pente du talus par rapport à l'horizontale.

Cette équation peut s'écrire aussi :

$$V = \frac{1}{K_D} * \left(\frac{H_b^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3 * \cot\alpha} \right)$$

Avec, V : Volume du bloc.

Pour compenser de manière simple la distorsion qu'entraîne l'emploi de l'eau douce, il suffit donc d'adopter pour les modèles de blocs (réduits à l'échelle) un matériau de densité inférieure à celle des blocs du prototype de manière à ce que le groupement : $\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3$ ait la même valeur dans les deux systèmes.

Avec, $\gamma_s = 1025 \text{ kg/m}^3$ pour le prototype et $\gamma_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ pour le modèle.

La valeur de la masse spécifique des matériaux à utiliser pour représenter les blocs artificiels de béton est : 2341 Kg/m^3 au lieu de 2400 Kg/m^3 , pour les enrochements naturels, un facteur de correction égal à 0,87 intervient directement sur leur poids.

II. Conditions des essais

Pour mettre en œuvre les essais, on doit prendre en considération les conditions suivantes :

1) Niveaux d'eau en modèle

Afin d'étudier les conditions de houles les plus défavorables, le L.E.M a jugé nécessaire de prendre en considération, dans cette étude en modèle, deux niveaux d'eau :

- **Niveau $\pm 0,00$ NGA** : pour les essais de la série progressive.
- **Niveau $+ 1.00$ NGA** : pour les essais de la série d'endurance.

2) Conduite des essais

Chaque essai est exécuté avec une série de plusieurs tests successifs avec des conditions de houle (H_s , T_p , etc.) augmentés par paliers discontinus jusqu'à ce que la houle soit limitée par le déferlement.

Pour les essais d'agitation et de stabilité, la durée d'un test est de l'ordre de 19 minutes soit 2 heures en nature.

3) Période de pointe

Pour les besoins de l'étude en modèle, il est demandé de faire correspondre à chaque hauteur de houle une période de pointe.

Le modèle est équipé d'un logiciel acquit récemment par le LEM du laboratoire Anglais Wallingford. Celui-ci impose le choix du spectre pour la génération en modèle.

Dans le cadre de cette étude, le spectre choisi est celui de Jonswap.

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

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

La durée de chaque test en modèle est fixé par le logiciel, ce qu'on appelle le "cycle time" elle varie entre 10mins à 15mins ce qui correspond à une tempête de 1h40min en nature, la durée de la série d'endurance est d'environ 3 Heures en modèle correspondant à une tempête de 20 Heures environ en nature.

4) Les houles

Les résultats de la réfraction de la houle du large du site d'étude à -10m de profondeur sont prises du rapport d'étude de réfraction du port de Khemisti et sont données sur le tableau V-1 avec leur périodes de pointes calculé selon la formule de Jonswap.

Tableau V-1 : caractéristiques de la houle à la profondeur -10m.

	Hs (m)	Période de pointe (s)
H_{1ans}	2.56	7.66
H_{2ans}	4.93	10.91
H_{5ans}	5.67	11.69
H_{10ans}	6.23	12.23
H_{20ans}	6.79	12.72
H_{50ans}	7.53	13.32
H_{100ans}	8.08	13.73
10 % H_{100ans}	8.08 ~ 9	14.36

5) Génération de la houle

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

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

6) Techniques de mesure et définitions

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

Les signaux des capteurs de houles sont enregistrés en continu et analysés par une chaîne de mesure informatisée

A la fin de chaque essai, la chaîne de mesure transmet à l'imprimante les répartitions statistiques de tous les signaux enregistrés.

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

a) **Hauteur significative (Hs)**

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

b) **Hauteur moyenne (Hmoy)**

Elle est définie comme la moyenne des vagues enregistrées dans un train de houle.

c) Période de pointe (Tp)

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

7) Calibration (réglage hydraulique du modèle)

Après la construction des fonds et avant chaque essai, on procède à la calibration hydraulique.

Ce réglage a pour but d'une part de procéder au réglage de l'appareillage, et d'autre part d'ajuster les conditions expérimentales de manière à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques soient reproduits conformément à la nature. (voir annexe I)

III. Observations effectuées et moyens mis en œuvre

Les observations effectuées pendant chaque essai sont données ci-dessous :

1) Observations hydrauliques

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

Les franchissements: on note leur nature, localisation, ainsi que leur mesure.

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

2) Observation des dégâts

L'observation des dégâts est principalement faite dans les zones sensibles de l'ouvrage, notamment la carapace, la butée, le talus intérieur (stabilité des enrochements ou des blocs et estimation des dégâts).

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

a) Moyens mis en œuvre pour les observations

Pour conserver les résultats de ces observations, trois supports ont été retenus :

i. Support écrit

Les observations sont inscrites au fur et à mesure des essais sur un cahier permettant de plus d'y ajouter quelques commentaires.

ii. Support photographique

Tout au long des essais, de nombreux photos sont réalisés permettant en outre de comparer les dégâts propres à chaque essai.

iii. Support vidéo

Pour visualiser de manière plus concrète le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage, un enregistrement vidéo est effectué.

La confrontation de ces modes d'observations permet une analyse objective de l'essai.

IV. Critères de stabilité

Il est nécessaire, pour tout ouvrage maritime, de s'assurer qu'il résiste à l'action dynamique de la houle pour les tempêtes les plus fortes qui est le cas le plus défavorable pour sa stabilité.

En général les dégâts admissibles vont jusqu'à 5% de dommages pour la houle cinquantennale ($H_{50\text{ans}}$) et jusqu'à 8% de dommages pour la houle centennale ($H_{100\text{ans}}$).

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

V. Critères de franchissements

Le critère ou les normes de franchissement adopté par cette étude concerne la circulation des personnes derrière le mur de garde, qui est le plus sévère.

On donne ci-dessous un tableau montrant les critères de franchissements :

Tableau V-2 : critères de franchissement pour la circulation des piétons. (*Rock Manuel*)

	q Débit Franchissant Moyen ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	V_{max} Volume Franchissant maximum (m^3/m)
Piéton		
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	$q > 3.10^{-5}$	$V_{\text{max}} > 2.10^{-3} - 5.10^{-3}$
Dangereux pour des piétons conscients des risques, pas facilement contrariés ou effrayés, capable de tolérer d'être mouillés ; bonne visibilité sur la mer, passage plus large	$q > 1.10^{-4}$	$V_{\text{max}} > 0.02 - 0.05$
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	$q > 1.10^{-3} - 0.01$	$V_{\text{max}} > 0.5$

VI. Construction du modèle

Pour faire la construction du modèle physique en canal, on procède comme suit.

1) Choix de l'échelle

Dans un projet de modèle réduit physique, on doit mesurer toutes les conditions de la mer ayant un impact sur l'aménagement qui est en cours d'étude afin de réaliser tous les phénomènes capables d'influencer la stabilité de cet ouvrage en choisissant une échelle qui permet d'approcher ou de passer de l'état naturel (état réel) vers l'état réduit (modèle réduit physique) réaliser au laboratoire.

Et cette échelle est aussi choisie selon et en fonction des matériaux disponible au laboratoire, c'est-à-dire selon les dimensions du canal, du bassin et des blocs et enrochements.

Le canal à houle est un canal où on fait des études à deux dimensions (2D), sa longueur fait 40m mais on la prendra 39m car son extrémité se termine par un batteur qui fait osciller l'eau afin de générer des houles frontales à l'ouvrage, et il fait 1m de hauteur et 0.6m de largeur.

On prendra :

Un tronçon du profil B-B de la jetée principale qui fait 30m de longueur comme est indiqué sur le plan ci-dessous :

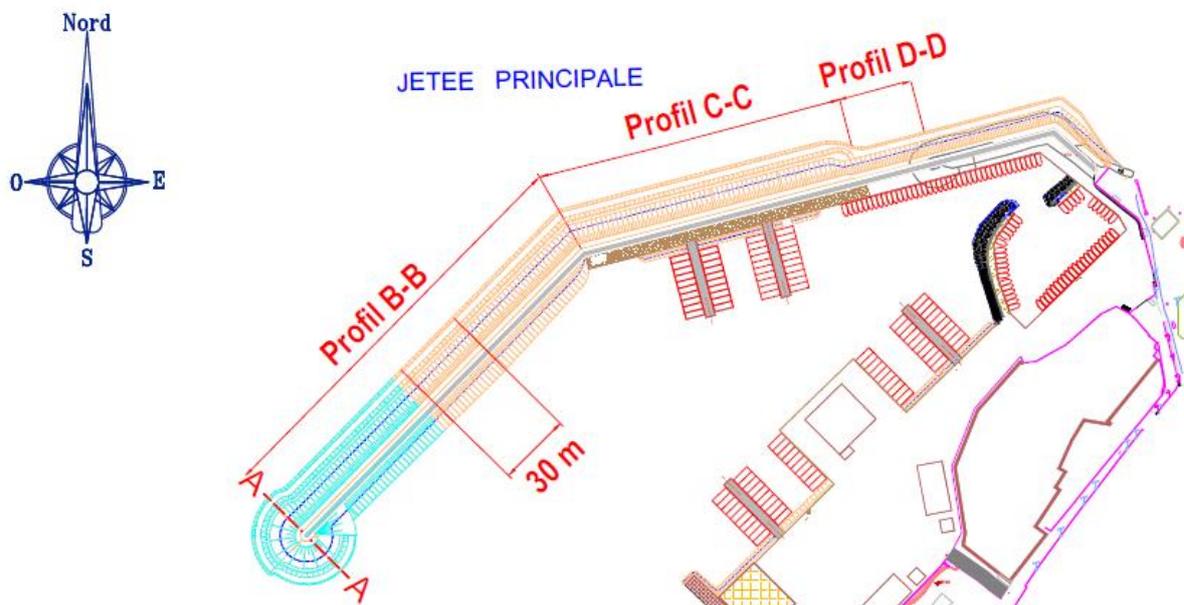


Figure V.2 : le tronçon du profil B-B de la jetée principale pris en étude sur le canal à houle

Pour que le tronçon de 30m du profil B-B soit modélisée et réduit en canal, on doit choisir une échelle afin d'occuper toute la largeur du canal qui est de 0.6m.

Alors, on prend une échelle géométrique qui est de l'ordre de :

$$\lambda = \frac{\text{largeur du canal}}{\text{longueur du tronçon}} = \frac{0.6}{30} = \frac{1}{50}$$

L'échelle géométrique obtenue par les calculs est de **1/50^{ème}**.

Compte tenu des dimensions du canal, ceux de l'ouvrage et son implantation ainsi qu'aux matériaux disponibles au laboratoire, l'échelle du modèle retenue par le LEM (laboratoire d'études maritimes) est de **1/44^{ème}**.

2) Représentation des fonds

On a des levés bathymétriques faits par une compagnie de reconnaissances des fonds marins réalisés par l'équipe du LEM (laboratoire des études maritimes) en avril 2013.

A partir de ces levés bathymétriques, on fait construire les fonds du canal, et cela en calculant la pente entre chaque isobathe à partir de ce levé.

Pour avoir cette pente, on fait une perpendiculaire au profil B-B ainsi qu'au profil C-C sur AutoCad et à partir de là on mesure la distance entre l'ouvrage et chaque isobathe et on calcule la pente α le plus normalement du monde.

Tel que : $\alpha = \frac{\text{la profondeur}}{\text{la distance}}$

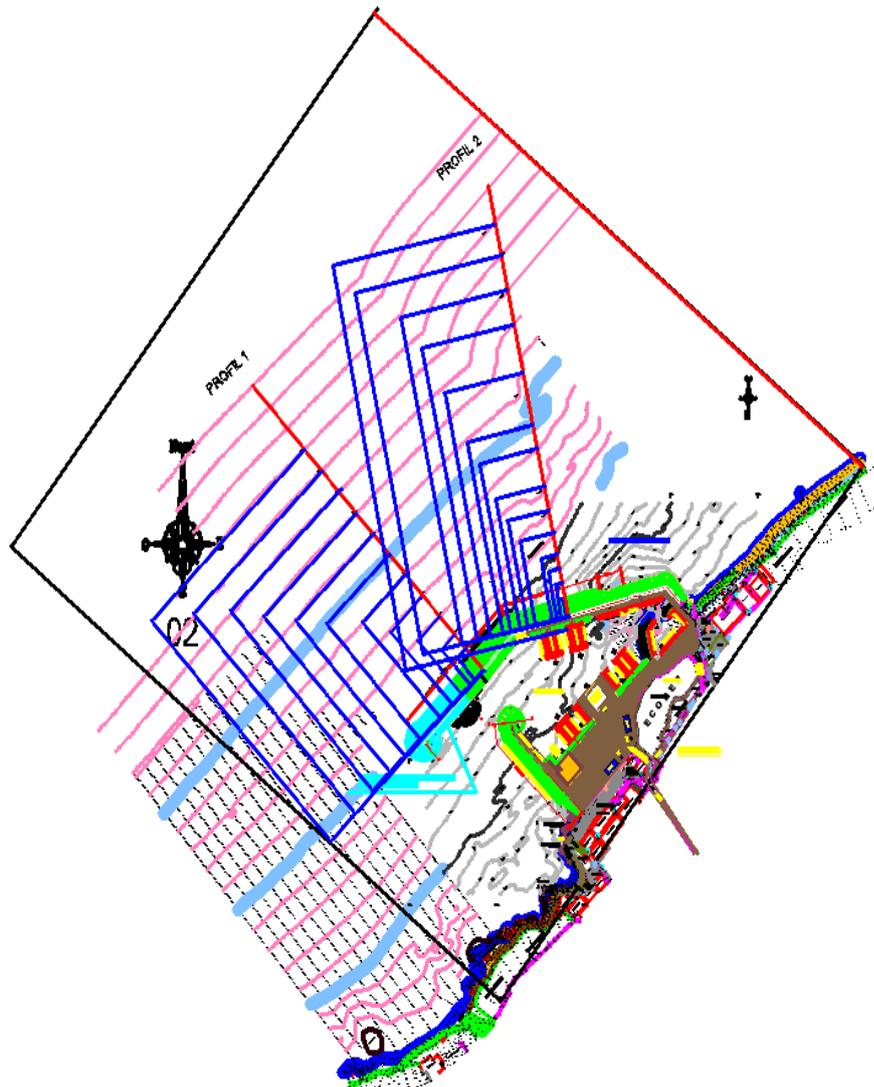


Figure V.3 : méthode de traçage des pentes sur AutoCad.

a) L'étude du profil B-B

Les profondeurs du modèle en canal ont été établies à partir de l'isobathe -10.00 m c'est-à-dire à partir de la profondeur au pied de l'ouvrage jusqu'à la profondeur -20.00 m au large. Elles ont été construites avec du sable qui est couvert d'une chape de ciment (modèle à fond fixe).

Les fonds relatifs à ce profil sont donnés par le graphe en figure V.4, où la pente moyenne est de 6%.

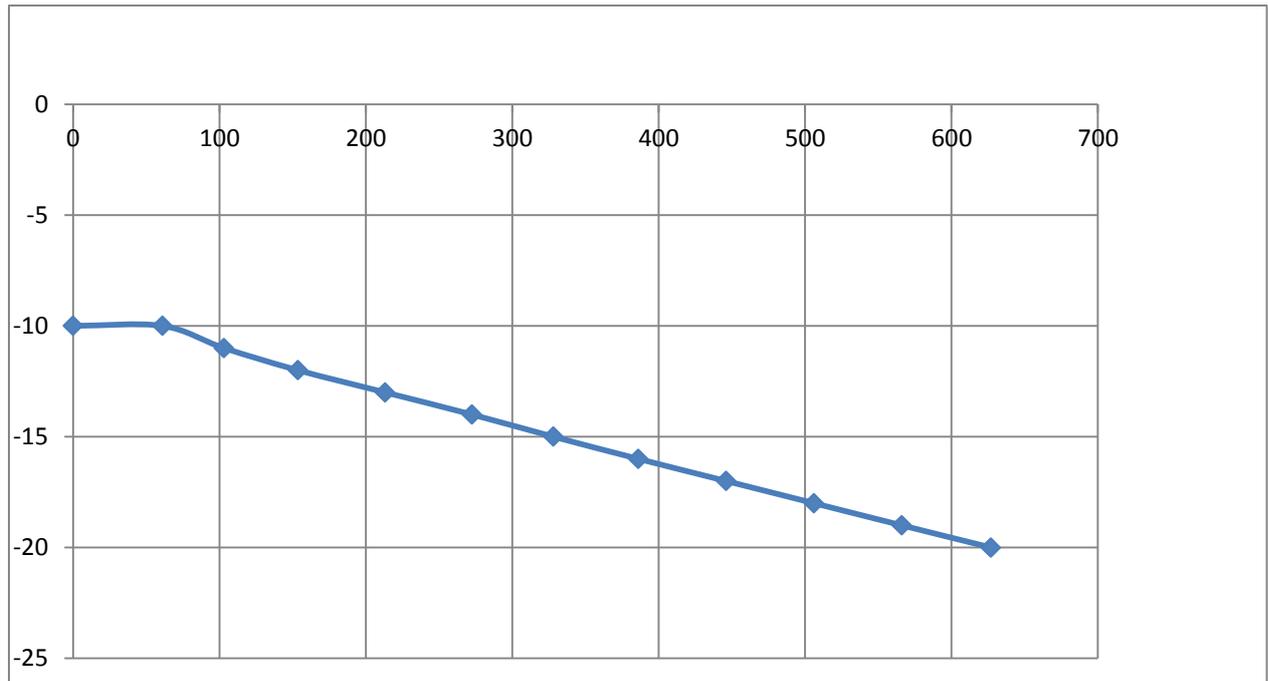


Figure V.4 : la pente des fonds relatifs au profil B-B.

b) L'étude du profil C-C

Dans ce cas les profondeurs du modèle en canal ont été établies à partir de l'isobathe -08.00 m c'est-à-dire à partir de la profondeur au pied de l'ouvrage jusqu'à la profondeur -20.00 m au large. Elles ont été construites avec du sable qui est couvert d'une chape de ciment (modèle à fond fixe).

Les fonds relatifs au profil C-C sont donnés par le graphe suivant, où la pente moyenne est de 5%.

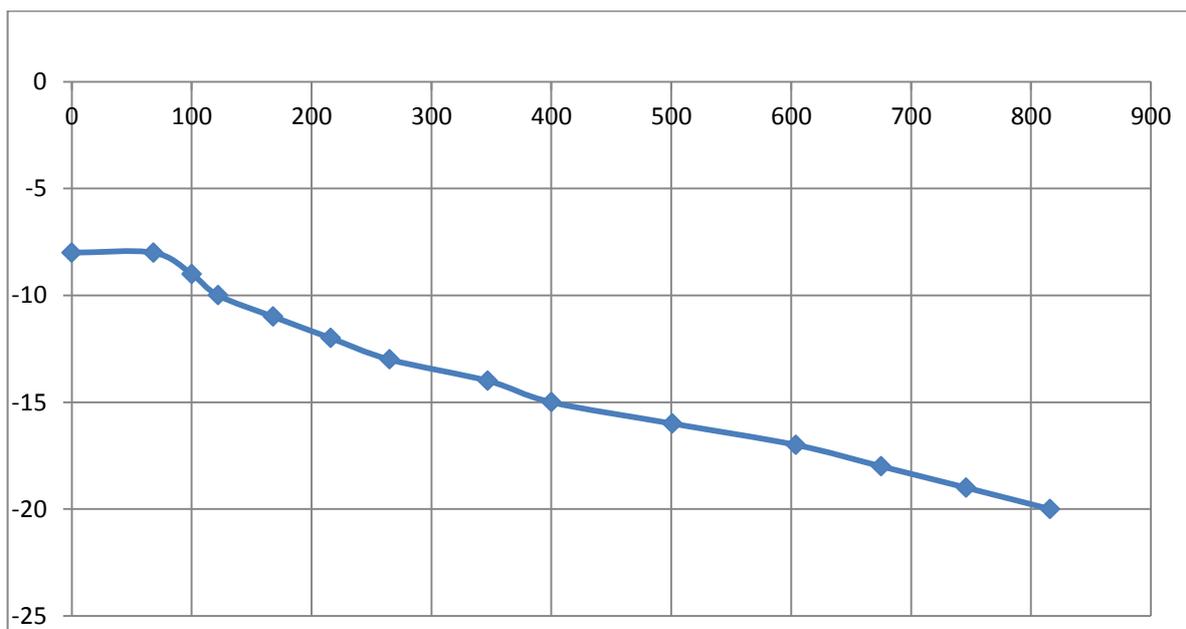


Figure V.5 : la pente des fonds relatifs au profil C-C.

3) Choix des matériaux

L'ouvrage en modèle est constitué de différents matériaux, des matériaux naturels ou bien artificiel, tel que leurs poids et leurs tailles sont caractérisés par l'ouvrage en question et l'échelle utilisée.

Dans le cas de notre étude (profil B-B et profil C-C), les matériaux utilisés sont des enrochements, des blocs en BCR ainsi qu'un tout-venant carrière, et chaque catégorie est trié soigneusement.

En ce qui concerne le tout-venant carrière, il est soumis à un lavage préliminaire pour éliminer les éléments fins capable de déformer la représentation de la perméabilité de l'ouvrage.

VII. Description des variantes et résultats des essais de stabilité en canal à houle

Six (06) variantes ont été optimisées au fur et à mesure des essais de stabilité effectués en modèle réduit physique.

Selon les observations relevées sur chaque variante après essai en canal, on choisira la variante la plus favorable du point de vue technico-économique.

1) Profil B-B

Le profil B-B se trouve entre le coude et le musoir, et pour l'étude de sa stabilité on a fait trois (3) variantes.

a) Variante n°1

La 1^{ère} variante du profil B-B en modèle réduit en canal à fond fixe est constitué de :

- blocs en B.C.R de 20 T.
- butée de catégorie d'enrochement (1-3) T.
- un noyau en T.V.C (1-500 Kg).
- un talus intérieur fait d'enrochement de catégorie (1-3) T.
- un filtre d'enrochement de catégorie (1-3) T qui est placé entre la couche des blocs en BCR et le noyau en T.V.C.

On donne une photo montrant la 1^{ère} variante du profil B-B (figure V-6), et le profil de cette variante fait en Autocad est donné en annexe J.

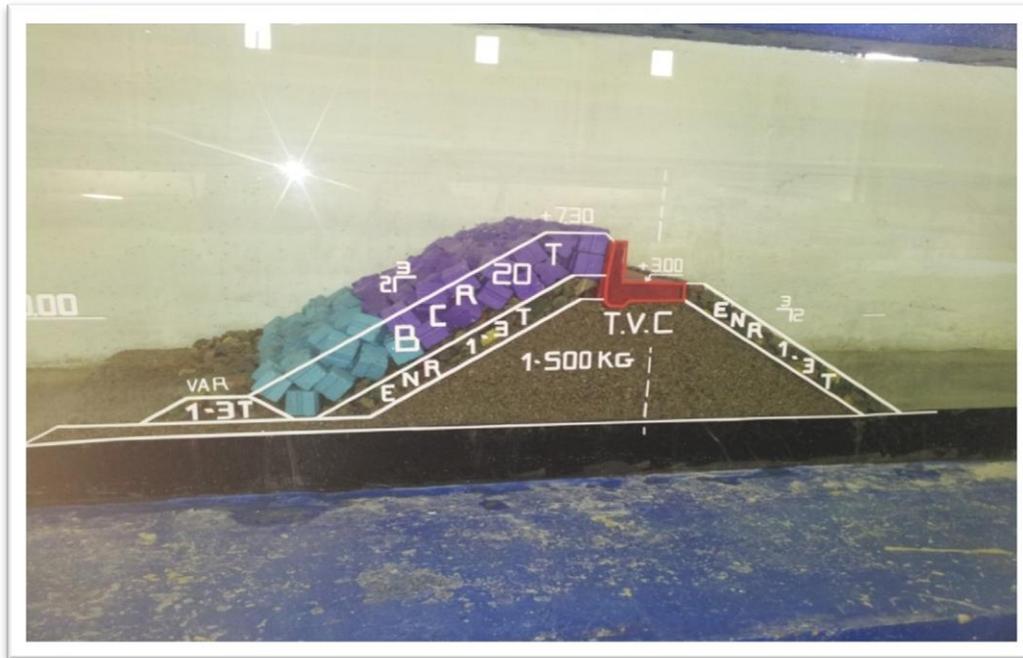


Figure V.6 : la 1^{ère} variante du profil B-B en canal à houle

i. Caractéristiques des matériaux

En utilisera l'échelle utilisée par le laboratoire d'études maritimes qui est de 1/44^{ème}.

Les caractéristiques des matériaux de la 1^{ère} variante du profil B-B sont données dans le tableau suivant :

Tableau V-3 caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante n°1 du profil B-B.

Matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Enrochement	1- 3	2.65	10 - 31	2.65
B.C.R	20	2.40	235	2.34

ii. L'épaisseur des matériaux formant l'ouvrage

L'épaisseur de la carapace et des sous-couches a été calculée dans le chapitre précédent (chapitre IV) et résumée dans le tableau V-4.

Tableau V-4 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante.

Matériaux	Epaisseur (m)
B.C.R	4.14
Enrochement (1-3) T	2.09

iii. Résultat des essais sur la variante n°1

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°1 du profil B-B sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-5 : observations des essais sur la variante n°1 du profil B-B

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	2.0	6.67	2.06	<ul style="list-style-type: none"> - Légers embruns ; - Déferlement de la houle à l'ouvrage ; - Aucun dégât à signaler pour Hs = 2.00m.
Houle annuelle	2.56	7.56	2.60	<ul style="list-style-type: none"> - Légers embruns ; - Glissement de quelques enrochements de (1-3) T au niveau de la butée.
Houle biannuelle	4.93	10.93	4.84	<ul style="list-style-type: none"> - Légers franchissements sur l'ouvrage ; - Début d'érosion du tapis en TVC; - Glissement d'un enrochement de (1-3) T au niveau du talus intérieur suite aux franchissements importants; - La houle déferle à l'ouvrage.
Houle quinquennale	5.67	11.70	4.60	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur l'ouvrage ; - Glissement de quelques enrochements de (1-3) T au niveau de la butée; - Remontée du TVC sur la butée; - Des enrochements de (1-3) T dégringolent au niveau du talus intérieur; - Glissement de quelques enrochements de (1-3) T au niveau du talus intérieur; - Dégradation du talus intérieur

				suite aux franchissements importants; - Erosion du tapis en TVC.
Houle décennale	6.23	12.23	6.23	- Franchissements très importants dégradent le talus intérieur ; - Erosion du tapis en TVC ; - Glissement massif des enrochements de (1 - 3) T au niveau du talus intérieur.
➤ Les essais ont été arrêtés suite aux importants dégâts sur l'ouvrage				
Conclusion : cette variante n'a pas été retenue suite aux importants dégâts sur l'ouvrage				

Les figures V.7 et V.8 montrent les dégâts observés sur l'ouvrage :



Figure V.7 : vue de dessus de la variante n°1 du profil B-B (les dégâts)

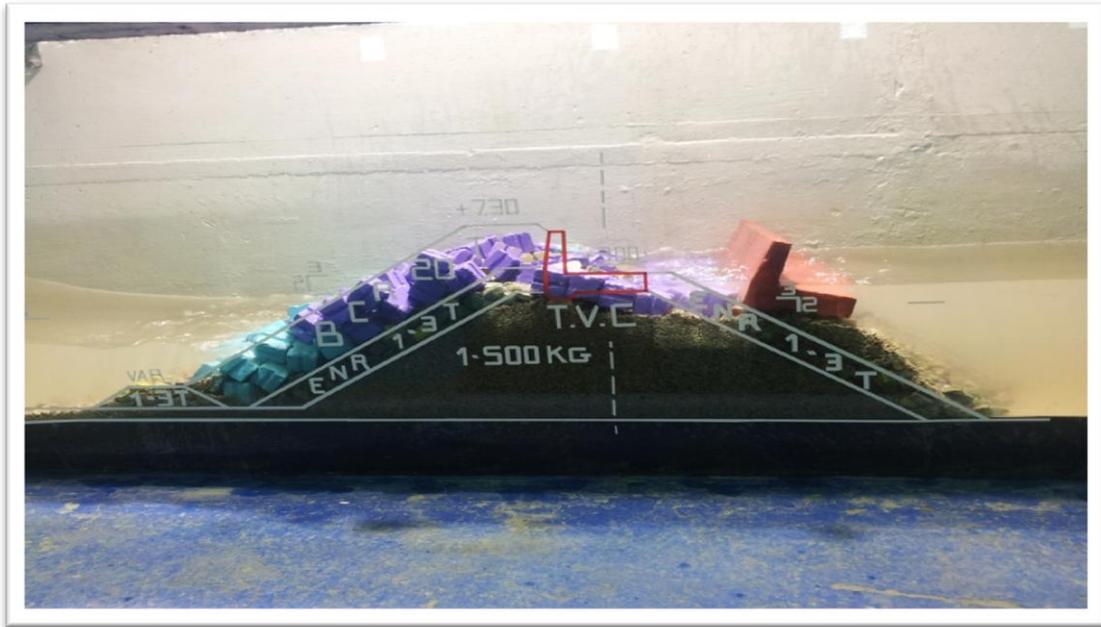


Figure V.8 : vue de face de la variante n°1 du profil B-B. (les dégâts)

b) Variante n°2

On a fait des modifications sur la variante n°1 après essai pour obtenir la 2^{ème} variante du profil B-B en modèle réduit en canal qui est constitué de :

- blocs en B.C.R de 20 T.
- une butée de catégorie d'engrochement (1-3) T.
- un noyau en T.V.C (1-500 Kg).
- un talus intérieur d'engrochement de catégorie (1-3) T.
- un 1^{er} filtre d'engrochement de catégorie (1-3) T.
- on a mis un 2^{ème} filtre d'engrochement de catégorie (0.5-1) T entre le 1^{er} filtre d'engrochement de (1-3) T et le T.V.C (1-500Kg).

On donne dans la figure V.9 une photo montrant la 2^{ème} variante du profil B-B, et le profil de cette variante fait en Autocad est donné en annexe K:

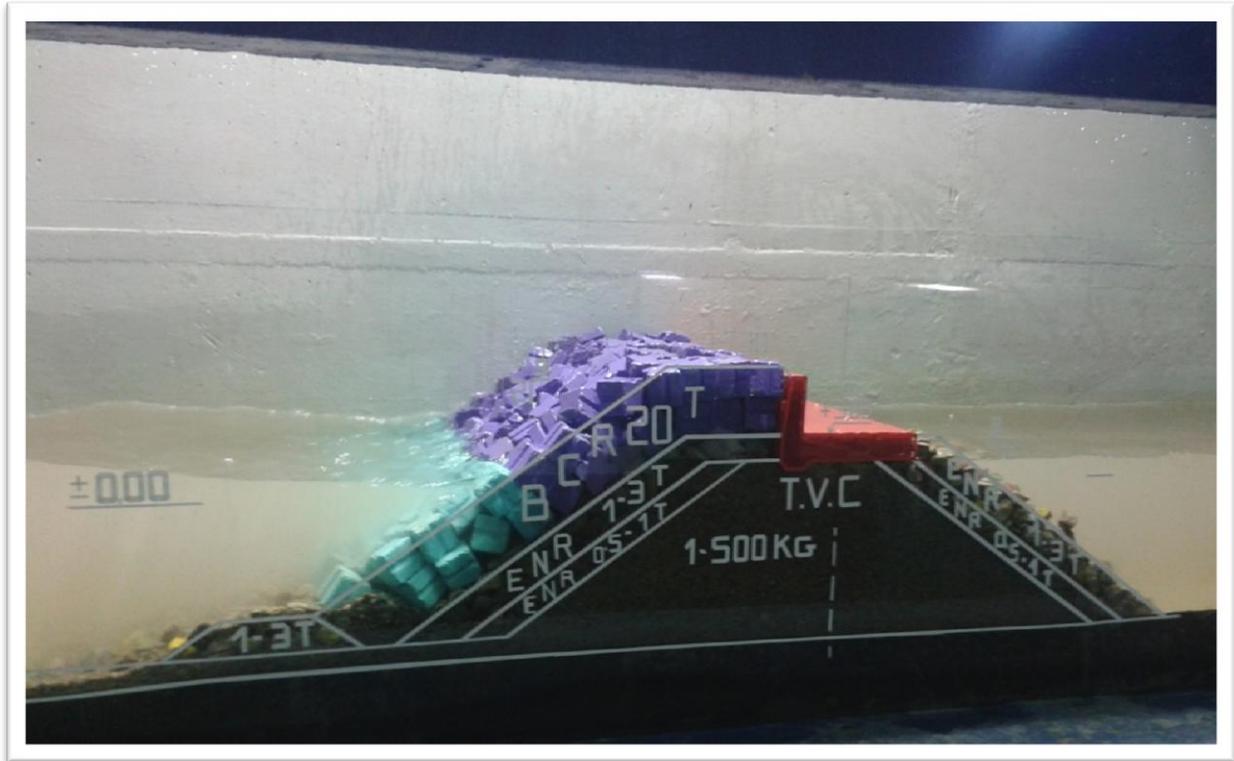


Figure V.9 : la 2^{ème} variante du profil B-B en canal à houle.

i. Caractéristiques des matériaux

On utilisera l'échelle utilisée par laboratoire d'études maritimes qui est de 1/44^{ème}.

Les caractéristiques des matériaux de la 2^{ème} variante du profil B-B sont données par le tableau suivant :

Tableau V-6 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante n°2 du profil B-B.

Matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Enrochement	0.5-1	2.65	5.10 - 10.21	2.65
Enrochement	1-3	2.65	10-31	2.65
B.C.R	20	2.40	235	2.34

ii. L'épaisseur des matériaux formant l'ouvrage

L'épaisseur de la carapace et des sous-couches est calculée par la formule suivante :

$$e = n * k_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3}$$

Avec, W : poids unitaire du bloc ou poids moyen d'enrochement en Tonne ; n : nombre de couches égale à 2 ; γ_r : la densité du bloc ou de l'enrochement en T/m^3 et k_{Δ} : coefficient de couche.

Tel que le coefficient de couche change d'un matériau à un autre comme suit :

- Pour les enrochements le $k_{\Delta} = 1.15$.
- Pour les B.C.R le $k_{\Delta} = 1.02$.

Les épaisseurs des couches de matériaux formant la 2^{ème} variante du profil B-B sont données par le tableau ci-dessous :

Tableau V-7 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante.

Matériaux	Epaisseur (m)
B.C.R	4.14
Enrochement (0.5-1) T	1.51
Enrochement (1-3) T	2.09

iii. Résultat des essais sur la variante n°2

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°2 du profil B-B sont données dans le tableau V-8.

Tableau V-8 : observations des essais sur la variante 2 du profil B-B.

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	2.00	06.67	2.02	<ul style="list-style-type: none"> - Légers embruns - Déferlement de la houle à l'ouvrage - Aucun dégât à signaler pour Hs = 2.00m.
Houle annuelle	2.56	7.56	2.60	<ul style="list-style-type: none"> - Légers franchissements sur l'ouvrage ; - Rocking de quelques enrochements de (1-3) T au niveau de la butée.
Houle biannuelle	4.93	10.93	5.00	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur l'ouvrage - Erosion légère du tapis en T.V.C. - Rien à signaler au niveau du talus intérieur
Houle quinquennale	5.67	11.70	5.64	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur l'ouvrage - Remontée du T.V.C sur la butée - Glissement de quelques enrochements de (1-3) T au niveau de la butée.
Houle décennale	6.23	12.23	6.23	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur l'ouvrage - Glissement de quelques enrochements de (1-3) T au niveau de la butée - Remontée du T.V.C sur la butée - Des enrochements de (1-3) T dégringolent au niveau du talus intérieur - Glissement de quelques enrochements de (1-3) T au niveau du talus intérieur; - Dégradation du talus intérieur suite aux franchissements importants
Houle ventennale	6.79	12.73	5.54	
Houle cinquantennale	7.53	13.33	5.85	
Houle centennale	8.08	13.74	6.60	
10% de la houle centennale	9.00	14.36	7.25	<ul style="list-style-type: none"> - Arrêt des essais suite aux dégâts importants survenus au niveau du talus intérieur à cause des franchissements très important.
Conclusion : cette variante n'a pas été retenue suite aux dégâts sur l'ouvrage au niveau du talus intérieur				

c) Variante n°3

Après essai sur la variante n°2, on a agrandi l'épaisseur du talus intérieur afin d'avoir une bonne résistance au franchissement de la houle, d'où la 3^{ème} variante du profil B-B en modèle réduit en canal. Cette variante est constitué de :

- blocs en B.C.R de 20 T.
- une nouvelle butée de catégorie d'embrochement (2-5) T.
- un noyau en T.V.C (1-500 Kg).
- un nouveau talus intérieur d'embrochement de catégorie (2-5) T d'épaisseur plus grande de 2.50 m.
- un 1^{er} filtre d'embrochement de catégorie (1-3) T.
- un 2^{ème} filtre d'embrochement de catégorie (0.5-1) T entre le 1^{er} filtre d'embrochement de (1-3) T et le T.V.C (1-500Kg).

On donne une photo montrant la 3^{ème} variante du profil B-B dans (la figure V.10), et le profil de cette variante fait en Autocad est donné en annexe L.

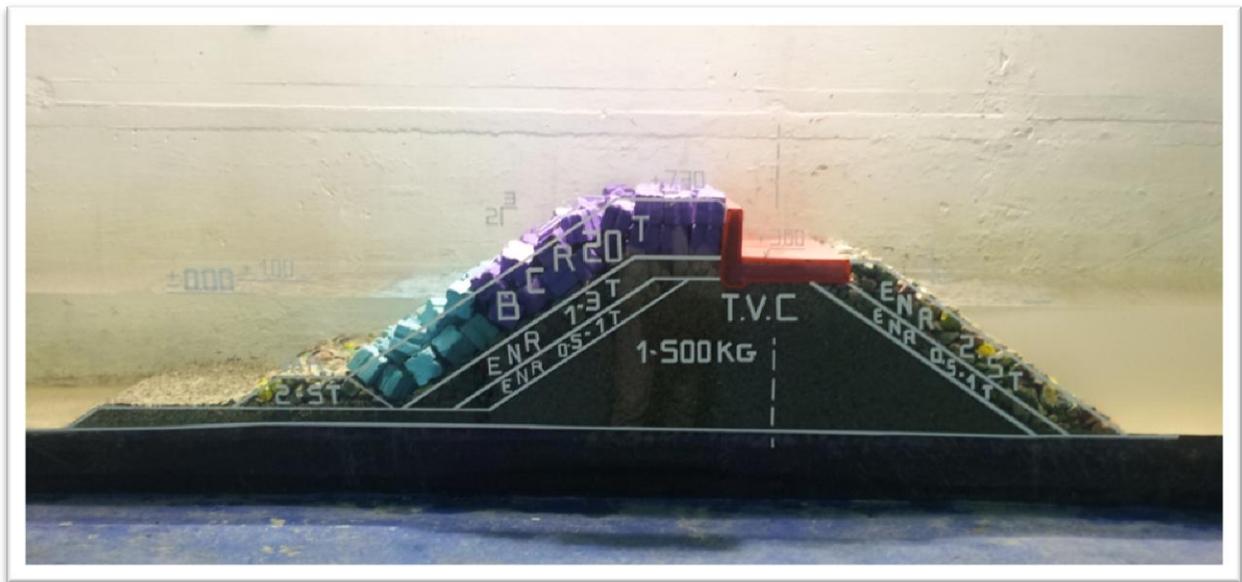


Figure V.10 : la 3^{ème} variante du profil B-B en canal à houle.

i. Caractéristiques des matériaux

On utilisera l'échelle utilisée par laboratoire d'études maritimes qui est de 1/44^{ème}.

Les caractéristiques des matériaux de la 3^{ème} variante du profil B-B sont données dans le tableau V-9.

Tableau V-9 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante 3 du profil B-B.

Matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Enrochement	0.5-1	2.65	5.10 - 10.21	2.65
Enrochement	2-5	2.65	20.42-51.06	2.65
Enrochement	1-3	2.65	10-31	2.65
B.C.R	20	2.40	235	2.34

ii. L'épaisseur des matériaux formant l'ouvrage

L'épaisseur de la carapace et des sous-couches est calculée par la formule suivante :

$$e = n * k_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3}$$

Avec, W : poids unitaire du bloc ou poids moyen d'enrochement en Tonne ; n: nombre de couches égale à 2 ; γ_r : la densité du bloc ou de l'enrochement en T/m³ et k_{Δ} : coefficient de couche.

Tel que le coefficient de couche change d'un matériau à un autre comme suit :

- Pour les enrochements le k_{Δ} = 1.15.
- Pour les B.C.R le k_{Δ} = 1.02.

Les épaisseurs des couches de matériaux formant la 2^{ème} variante du profil B-B sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-10 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante.

Matériaux	Epaisseur (m)
B.C.R	4.14
Enrochement (0.5-1) T	1.51
Enrochement (2-5) T	2.52
Enrochement (1-3) T	2.09

iii. Résultat des essais sur la variante n°3

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°3 du profil B-B sont données dans le tableau V-11.

Tableau V-11 : Observations des essais sur la variante 3 du profil B-B

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	2.0	6.67	2.22	<ul style="list-style-type: none"> - Légers embruns ; - Déferlement de la houle à l'ouvrage ; - Aucun dégât à signaler pour Hs = 2.00m.
Houle annuelle	2.56	7.56	2.61	<ul style="list-style-type: none"> - Légers franchissements sur l'ouvrage ; - Rocking de quelques enrochements de (1-3)T au niveau de la butée.
Houle biannuelle	4.93	10.93	5.00	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur l'ouvrage; - Erosion légère du tapis en TVC. - Rien à signaler au niveau du talus intérieur
Houle quinquennale	5.67	11.70	5.87	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur l'ouvrage ; - Remontée du TVC sur la butée; - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la butée sur le TVC.
Houle décennale	6.23	12.23	6.90	<ul style="list-style-type: none"> - Remontée du TVC sur les enrochements de la butée provoque une érosion; - Franchissements très importants sur la digue; - Un enrochement de (2-5)T a dégringolé suite aux franchissements intenses; - Rocking des enrochements de (2-5) T au niveau de la butée. - Franchissements très importants sur la digue; - Erosion du tapis en TVC; - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la butée sur le TVC. - Remontée du TVC sur les enrochements de la butée provoque une érosion mais renforce la butée; - Franchissements très
Houle ventennale	6.79	12.73	6.89	
Houle cinquantenale	7.53	13.33	7.85	
Houle centennale	8.08	13.74	8.00	

				importants sur la digue; - Rien à signaler au niveau de la carapace; - Aucun dégât apparent au niveau du talus intérieur; - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau du talus intérieur suite aux franchissements importants pour Hs100.
10% de la houle centennale	9.00	14.36	8.25	- Franchissements très importants sur l'ouvrage; - Franchissements très importants provoquent glissement des enrochements de (2-5)T au niveau du talus intérieur.
Conclusion : cette variante est retenue				

iv. Essai d'endurance

Pour dire que l'ouvrage est vraiment stable, on lui fait subir une série d'endurance qui est une série où on génère des houles avec les paramètres de la houle centennale :

$H_s = 8.08$ m et $T_p = 13.74$ s et on fait monter le niveau d'eau +1.00m pour simuler le cas de la marée (cas défavorable).

La durée du test en modèle correspond à la durée d'une tempête en nature.

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2h30min en modèle c'est-à-dire tempête de 17h en nature (la durée est trouvée à l'aide des lois de similitude).

Les tests effectués dans l'essai d'endurance et leurs observations sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V-12: observations des essais d'endurance.

N° d'essai	H_s (m) obtenue en modèle	Durée de l'essai (min)	Observations
Essai 1	9.02	30	- érosion de quelques enrochements du talus intérieur (0.5-1) T ; - franchissements très importants ; - érosion de quelques enrochements de la butée (2-5) T.
Essai 2	9.14	30	
Essai 3	8.99	30	
Essai 4	8.59	30	
Essai 5	8.59	30	

Conclusion

Les essais effectués sur la variante 3 du profil B-B sont concluants malgré les franchissements très importants pendant les houles exceptionnelles cette variante reste stable.

2) Profil C-C

Le profil C-C se trouve entre l'enracinement et le coude, pour l'étude de sa stabilité on a fait trois (3) variantes et on a fait une quantification des franchissements. Sur cette partie de l'ouvrage on ne permet pas les franchissements à cause de l'accostage.

a) Variante n°1

La 1^{ère} variante du profil C-C est constitué de :

- blocs en B.C.R de 20 T.
- butée de catégorie d'enrochement (2-5) T.
- un noyau en T.V.C (1-500 Kg).
- un talus intérieur fait d'enrochement de catégorie (50-300) Kg.
- un filtre d'enrochement de catégorie (1-3) T qui est placé entre la couche des blocs en BCR et le noyau en T.V.C (1-500Kg).
- un revêtement de pente 1%.

Le profil montrant la 1^{ère} variante du profil C-C et donné en annexe M.

Cette variante n'a pas été testée car laboratoire d'études maritimes a jugé qu'elle n'était pas stable.

i. Caractéristiques des matériaux

On utilisera l'échelle utilisée par le laboratoire d'études maritimes (LEM) qui est de 1/44^{ème}.

Les caractéristiques des matériaux de la 1^{ère} variante du profil C-C sont données dans le tableau suivant :

Tableau V-13: caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante 1 du profil C-C.

Matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Enrochement	0.5-1	2.65	5.10 - 10.21	2.65
Enrochement	2-5	2.65	20.42-51.06	2.65
Enrochement	1-3	2.65	10-31	2.65
Enrochement	0.05-0.30	2.65	0.51-3.06	2.65
B.C.R	20	2.40	235	2.34

ii. L'épaisseur des matériaux formant l'ouvrage

L'épaisseur de la carapace et des sous-couches est calculée par la formule suivante :

$$e = n * k_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3}$$

Avec, W : poids unitaire du bloc ou poids moyen d'enrochement en Tonne ; n : nombre de couches égale à 2 ; γ_r : la densité du bloc ou de l'enrochement en T/m^3 ; et k_{Δ} : coefficient de couche.

Tel que le coefficient de couche change d'un matériau à un autre comme suit :

- pour les enrochements le $k_{\Delta} = 1.15$.
- pour les B.C.R le $k_{\Delta} = 1.02$.

Les épaisseurs des couches de matériaux formant la 1^{ère} variante du profil C-C sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-14 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante

Matériaux	Epaisseur (m)
B.C.R	4.14
Enrochement (1-3) T	2.09

b) Variante n°2

On a fait des modifications sur la variante n°1 pour obtenir la 2^{ème} variante du profil C-C en modèle réduit en canal qui est constitué de :

- blocs en B.C.R de 20 T.
- une nouvelle butée de catégorie d'enrochement (2-5) T.
- un noyau en T.V.C (1-500 Kg).
- un nouveau talus intérieur d'enrochement de catégorie (0.5-1) T.
- un 1^{er} filtre d'enrochement de catégorie (1-3) T.
- on a mis un 2^{ème} filtre d'enrochement de catégorie (0.5-1) T entre le 1^{er} filtre d'enrochement de (1-3) T et le T.V.C (1-500Kg).
- Un revêtement de pente égale à 1%.

On donne dans la figure V.11 une photo montrant la 2^{ème} variante du profil C-C, et le profil de cette variante fait en Autocad est donné en annexe N.

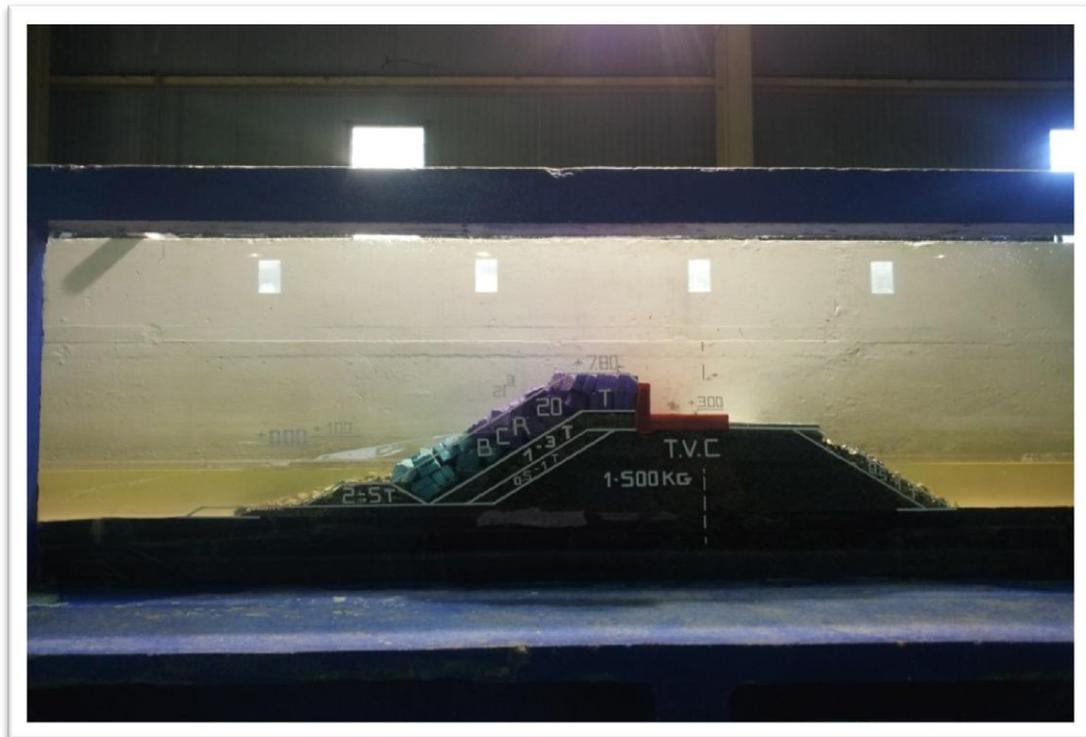


Figure V.11 : la 2^{ème} variante du profil C-C en canal à houle

i. Caractéristiques des matériaux

On utilisera l'échelle utilisée par laboratoire d'études maritimes qui est de 1/44^{ème}.

Les caractéristiques des matériaux de la 2^{ème} variante du profil C-C sont données par le tableau suivant :

Tableau V-15 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle de la variante 2 du profil C-C

Matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Enrochement	0.5-1	2.65	5.10 - 10.21	2.65
Enrochement	2-5	2.65	20.42-51.06	2.65
Enrochement	1-3	2.65	10-31	2.65
B.C.R	20	2.40	235	2.34

ii. L'épaisseur des matériaux formant l'ouvrage

L'épaisseur de la carapace et des sous-couches est calculée par la formule suivante :

$$e = n * k_{\Delta} * \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{1/3}$$

Avec,

W : poids unitaire du bloc ou poids moyen d'encrochement en Tonne ; n: nombre de couches égale à 2 ; γ_r : la densité du bloc ou de l'encrochement en T/m³ et k_{Δ} : coefficient de couche.

L'épaisseur de chaque couche est donnée dans le tableau suivant :

Tableau V-16 : épaisseur de chaque couche de matériaux utilisés dans la construction de la variante.

Matériaux	Epaisseur (m)
B.C.R	4.14
Enrochement (0.5-1) T	1.51
Enrochement (2-5) T	2.52
Enrochement (1-3) T	2.09

iii. Résultat des essais sur la variante n°2

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°2 du profil C-C sont données dans le tableau V-7.

Tableau V-17 : observations des essais sur la variante 2 du profil C-C.

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	2.0	6.67	2.83	- Rien à signaler
Houle annuelle	2.56	7.56	2.69	- Rien à signaler
Houle biannuelle	4.93	10.93	4.74	- Rien à signaler à part quelques embruns insignifiants
Houle quinquennale	5.67	11.70	5.23	- Légers franchissements - Remontée du tapis anti affouillement en T.V.C vers la butée de (2-5) T
Houle décennale	6.23	12.23	6.05	- Un faible franchissement sur le tapis de roulement - Glissement de quelques enrochements de catégorie (2-5)T de la butée vers le fond
Houle vengtennale	6.79	12.73	6.80	- Apparition de franchissements assez importants sur l'ouvrage dans cet essai
Houle cinquantenale	7.53	13.33	7.49	- Franchissements importants au niveau de l'ouvrage - Glissement de quelques enrochements de catégorie (2-5)T de la butée vers le fond
Houle centennale	8.08	13.74	8.32	- Franchissement très importants - n'y a pas de dégâts au niveau du talus intérieur - Erosion du tapis anti affouillement
10% de la houle centennale	9.00	14.36	8.08	- Franchissements trop importants - Erosion de quelques enrochements de la butée (2-5) T
Conclusion On ne va pas retenir cette variante car les franchissements sont très importants, ils sont défavorables pour la stabilité du talus intérieur ainsi que pour l'accostage				

iv. Essai d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2h40min en modèle qui correspond à une tempête de 18h en nature (la durée est trouvée à l'aide des lois de similitude).

Les tests effectués dans l'essai d'endurance et leurs observations sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V-18: observations des essais d'endurance.

N° d'essai	H _s (m) obtenue en modèle	Durée de l'essai (min)	Observations
Essai 1	9.02	30	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion de quelques enrochements du talus intérieur (0.5-1) T - Franchissements trop importants - Erosion de quelques enrochements de la butée (2-5) T - Rocking d'un bloc en B.C.R au pied de la carapace
Essai 2	9.14	30	
Essai 3	8.99	40	
Essai 4	8.59	30	
Essai 5	8.56	30	

Conclusion

Les essais effectués sur la variante 2 du profil C-C sont pas concluant car il y a érosion du talus intérieur due aux franchissements très importants.

v. Quantification des franchissements

Dans cette partie de la jetée principale (profil C-C), il y a l'accostage, du coup on ne peut pas tolérer des franchissements très importants et cela pour éviter une perturbation au niveau du bassin d'accostage afin d'éviter les dégâts au niveau de la flottille ainsi que les dégâts humain, sur le terre-plein y aura une circulation de piéton (les pêcheurs ...), pour cette raison qu'on a fait la quantification des franchissements dans l'étude du profil C-C en modèle réduit physique en canal.

Cette quantification se fait à l'aide d'un bac de 6l qu'on pose au niveau du terre-plein durant chaque essai. (Figure V.12) et (figure V.13)

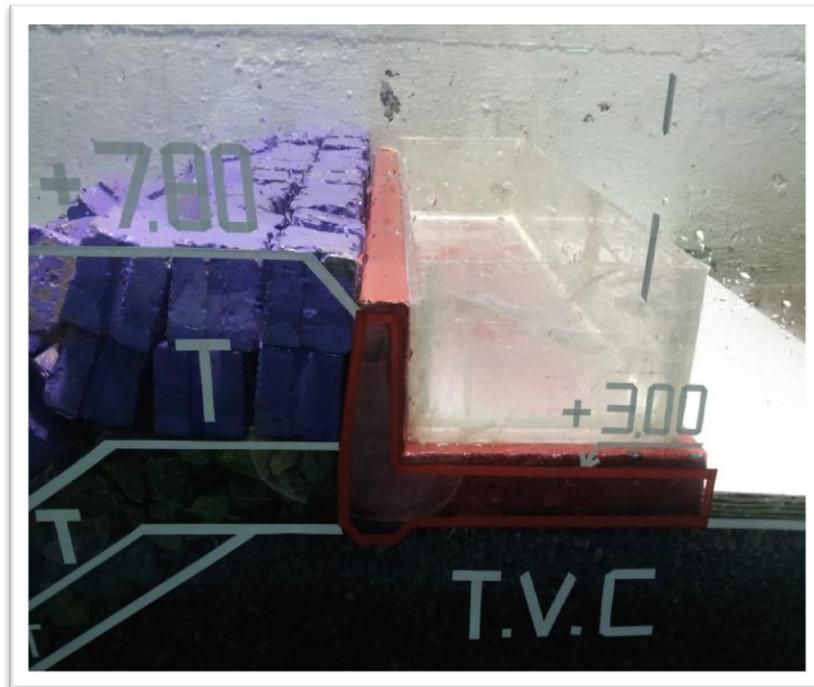


Figure V.12 : photo montrant la pose du bac

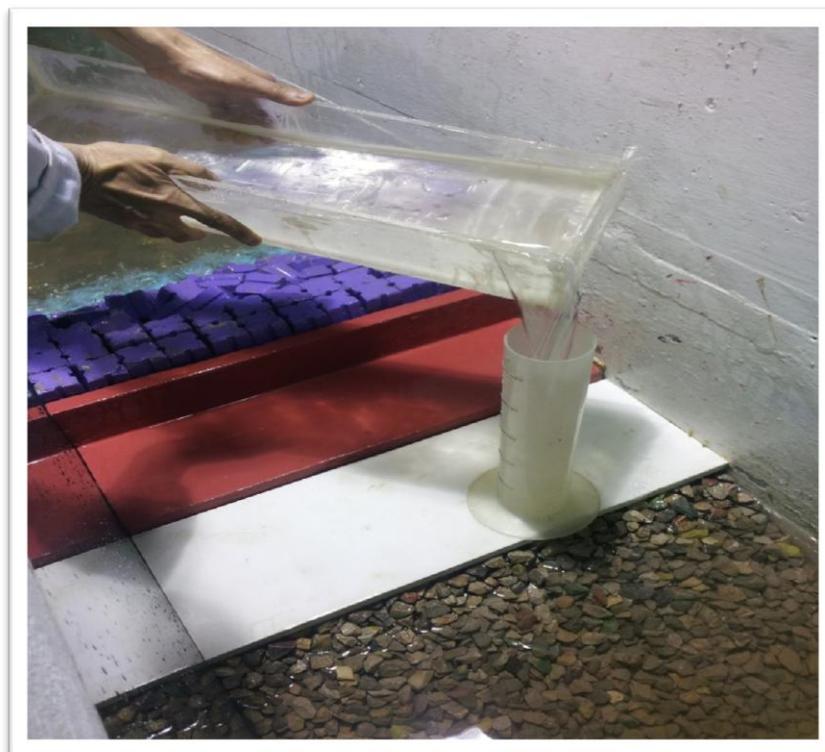


Figure V. 13 : photo montrant la méthode de quantification des franchissements

- Franchissements quantifiés dans l'étude de la variante 2 du profil C-C

On calcule le débit moyen par les lois de la similitude comme suit :

$$Q = \frac{V}{T}$$

Avec, Q : débit de franchissement moyen (m³/s) ; V : le volume de franchissement moyen quantifié durant l'essai à l'aide du bac (m³) et T : la durée de l'essai (s).

Selon les lois de la similitude, on a :

$$\text{L'échelle du temps : } \lambda_t = \sqrt{\lambda}$$

$$\text{L'échelle géométrique : } \lambda = \frac{L_{\text{modèle}}}{L_{\text{prototype}}}$$

$$\text{D'où on aura : } Q = \frac{V * \lambda^{1.5}}{T * L_{\text{bac}}}$$

Les résultats de la quantification des franchissements de cette variante sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-19 : résultats de la quantification des franchissements

Les essais	Durée de l'essai en modèle (s)	Volume moyen des franchissements en modèle (m ³)	Débit moyen des franchissements en nature (m ³ /s)
Essai de tassement	---	Rien à signaler	---
Essai H _{1ans}	---	Rien à signaler	---
Essai H _{2ans}	843	0.0012	8.13*10 ⁻⁷
Essai H _{5ans}	903	0.0033	2.08*10 ⁻⁶
Essai H _{10ans}	944	0.0035	2.12*10 ⁻⁶
Essai H _{20ans}	983	0.0240	1.39*10 ⁻⁵

Les franchissements sont dans les normes pour la houle vingtennale le débit moyen des franchissements est inférieur à la norme c'est-à-dire $Q_{\text{moy}} < 3 * 10^{-5}$, mais n'empêche que la variante n'a pas été retenu vu les dégâts survenu au niveau du talus intérieur.

c) Variante n°3

Après les essais sur la variante n°2, on a fait un allongement sur la berme afin de diminuer l'effet de franchissement de la houle sur le tapis roulant et le revêtement, d'où la 3^{ème} variante du profil C-C en modèle réduit en canal. Cette variante est constituée de :

- blocs en B.C.R de 20 T.
- une butée de catégorie d'enrochement (2-5) T.
- un noyau en T.V.C (1-500 Kg).

- un nouveau talus intérieur d'encrochement de catégorie (2-5) T d'épaisseur plus grande de 2.50 m.
- un 1^{er} filtre d'encrochement de catégorie (1-3) T.
- un 2^{ème} filtre d'encrochement de catégorie (0.5-1) T entre le 1^{er} filtre d'encrochement de (1-3) T et le T.V.C (1-500Kg).

On donne ci-dessous une photo montrant la 3^{ème} variante du profil C-C, et le profil de cette variante fait en Autocad est donné en annexe O:

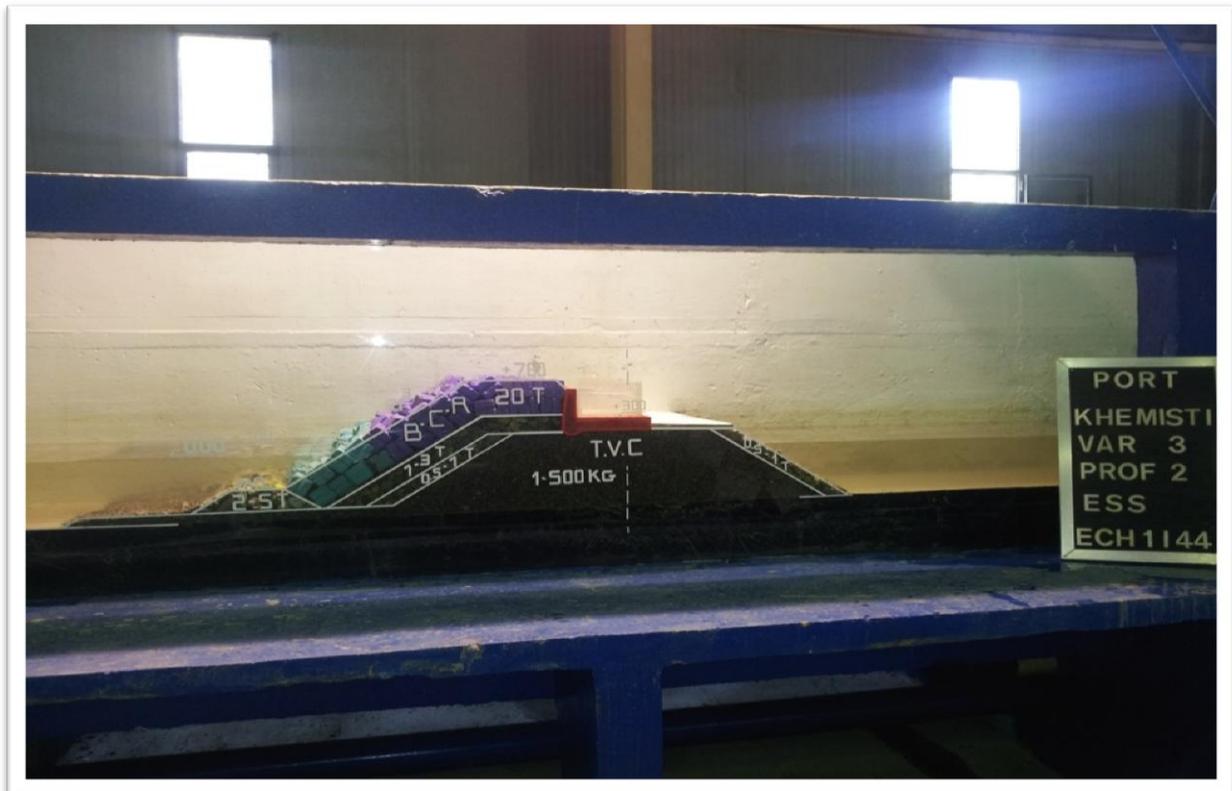


Figure V.14 : la 3^{ème} variante du profil C-C en canal à houle.

i. Résultat des essais sur la variante n°3

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°3 du profil C-C sont données dans le tableau V-20.

Tableau V-20 : observations des essais sur la variante 3 du profil C-C

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	2.0	6.67	2.82	- Rien à signaler
Houle annuelle	2.56	7.56	2.66	- Rien à signaler à part quelques embruns insignifiant
Houle biannuelle	4.93	10.93	4.69	- Rien à signaler à part quelques embruns insignifiant
Houle quinquennale	5.67	11.70	5.41	- Rien à signaler à part quelques embruns peu important
Houle décennale	6.23	12.23	6.07	- Des embruns important - Glissement de quelques roches (3 à 4) de la butée de catégorie (2-5) T ce n'est pas vraiment grave - Le début d'érosion du tapis anti affouillement en T.V.C qui est léger
Houle ventennale	6.79	12.73	6.67	- Des embruns très importants et quelques franchissements
Houle cinquantennale	7.53	13.33	7.54	- Quelques franchissements pas très importants - Glissement de quelques enrochement de la butée (2-5) T - Une légère érosion du tapis anti affouillement en T.V.C et puisque la houle augmente la pression augmente est du coup le T.V.C remonte vers la butée et renforce cette dernière
Houle centennale	8.08	13.74	8.58	- Franchissement très important - On aperçoit le phénomène de run-up et run-down
10% de la houle centennale	9.00	14.36	8.08	- - Franchissements très importants - Remonté du tapis anti affouillement en T.V.C vers la butée - Ya pas eu de dégâts au niveau du talus intérieur - Glissement de quelques enrochements de la butée de (2-5) T
Conclusion : on retient cette variante car y a pas trop de dégâts				

ii. Essai d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2h30min en modèle qui correspond à une tempête de 17h en nature (la durée est trouvée à l'aide des lois de similitude).

Les tests effectués dans l'essai d'endurance et leurs observations sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V-21: observations des essais d'endurance.

N° d'essai	H _s (m) obtenue en modèle	Durée de l'essai (min)	Observations
Essai 1	8.61	60	- Déplacement de quelques enrochements de la butée (2-5) T
Essai 2	8.90	60	- Franchissements très importants - Arrachement de quelques enrochements du talus intérieur mais ce n'est pas significatif
Essai 3	8.84	30	- Remonté du tapis de pied en T.V.C vers la butée de catégorie (2-5) T

Conclusion

Les essais effectués sur la variante 3 du profil C-C sont concluants malgré les franchissements très importants pendant l'essai d'endurance, cette variante reste stable.

iii. Franchissements quantifiés dans l'étude de la variante 3 du profil C-C

Comme on a vu précédemment, le débit de franchissement quantifié s'écrit sous la forme

$$\text{suivante : } Q = \frac{V * \lambda^{1.5}}{T * L_{bac}}$$

Les résultats de la quantification des franchissements de la variante n°3 sont dans le tableau V-22.

Tableau V-22 : résultats de la quantification des franchissements.

Les essais	Durée de l'essai en modèle (s)	Volume moyen des franchissements en modèle (m ³)	Débit moyen des franchissements en nature (m ³ /s)
Essai de tassement	---	Rien à signaler	---
Essai H_{1ans}	---	Rien à signaler	---
Essai H_{2ans}	---	Rien à signaler	---
Essai H_{5ans}	903	0.00095	$6.01 \cdot 10^{-7}$
Essai H_{10ans}	944	0.00110	$6.65 \cdot 10^{-7}$
Essai H_{20ans}	983	0.00300	$1.74 \cdot 10^{-6}$
Essai H_{50ans}	1029	0.00440	$2.44 \cdot 10^{-6}$
Essai H_{100ans}	1061	0.01000	$5.38 \cdot 10^{-6}$
Essai H_{10% de la 100ans}	1108.4	0.01100	$5.66 \cdot 10^{-6}$

Les franchissements sont dans les normes pour les houles exceptionnelles où le débit moyen des franchissements est inférieur à la norme c'est-à-dire $Q_{\text{moy}} < 3 \cdot 10^{-5}$, et de point de vue stabilité cette variante est stable d'où sa rétention.

Conclusion

Les résultats des différents essais ont montré que la variante 3 du profil B-B présente un profil stable par rapport aux autres variantes testées en modèle réduit physique en canal. La variante 3 du profil C-C est également stable et assure une stabilité au niveau du talus intérieur et un calme au niveau du plan d'eau derrière le mur de garde due à la diminution des franchissements.

Chapitre VI

Essais de stabilité et
d'agitation en bassin à
houle

Chapitre VI

Essais de stabilité et d'agitation en bassin à houle

Les études à deux dimensions (étude en canal à houle) destinées à mettre au point le profil courant d'un ouvrage sont souvent complétées par des études à trois dimensions dans un bassin à houle de grande superficie où l'échelle du modèle varie entre le 1/40^e et le 1/85^e, afin d'examiner certains problèmes particuliers tels que :

- L'influence des fonds et/ou de l'obliquité des vagues sur les conditions d'attaque de la houle ;
- La stabilité de points singuliers tels que les musoirs d'extrémité, les points anguleux (coudes) ;
- L'agitation au niveau du bassin de port.

De tels essais peuvent également être utiles pour apprécier les risques de dommages en cas de tempête survenant pendant les phases de travaux et pour rechercher les protections provisoires à prévoir en cas d'annonce de tempête et/ou d'arrêt du chantier.

I. Objectifs d'étude en bassin à houle

L'objet de cette étude en modèle réduit physique en bassin à houle est l'optimisation des ouvrages de protection de l'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche du point de vue stabilité et d'agitation au niveau du bassin de port.

- Ils permettent d'étudier la stabilité des digues en mer, les musoirs de jetées.
- Ils prennent notamment en compte les houles obliques qui engendrent des efforts tangentiels sur les blocs du musoir.
- Ils permettent également d'étudier l'effet de concentration des houles sur un endroit particulier de l'ouvrage tel que les coudes et les musoirs, du fait que les fonds marins sont reproduits fidèlement à l'échelle grâce à des courbes de niveau construites en modèle
- Ces modèles permettent d'avoir une bonne appréciation qualitative même quantitative des franchissements que peut subir un ouvrage en fonction de la direction de la houle et de son intensité (Hs, Tp).
- Eviter les inondations qui peuvent avoir lieu au niveau des quais, et vérifier une agitation admissible à l'intérieur du port pour le nouveau plan d'aménagement (*Ismail, 1993*).

Les objectifs à étudier permet à l'ingénieur de faire une analyse précise des coûts et des solutions proposées pour dégager une variante d'aménagement adéquate.

II. Données nécessaires à la conception du modèle en bassin à houle (en 3D)

Les données suivantes sont nécessaires pour la conception du modèle en bassin à houle :

- Le plan bathymétrique à (échelle 1/500, 1/1000, 1/2000).
- Le climat de houles (conditions de houles au large et après réfraction) et le secteur angulaire des houles dominantes ;

- L'avant-projet sommaire de l'aménagement (APS variante de base);
- Les plans des profils en travers des ouvrages de protection retenus d'après l'étude en modèle en canal à houle (*Ismail, 1993*).

III. Méthodologie à suivre dans l'exécution des essais en bassin à houle

Afin de faire une étude sur bassin à houle, on doit suivre la méthode suivante :

1) La construction des fonds en bassin à houle

La construction des fonds en bassin est faite on se basant sur le levé bathymétrique et l'échelle choisie comme suit :

- A l'aide d'Autocad, on fait un carroyage sur le plan de masse, ensuite on représente ce carroyage sur bassin à l'aide de peinture tout en respectant l'échelle ;
- On représente ensuite les courbes bathymétriques avec des fers plats selon leur disposition par rapport au carroyage ;
- On trace l'emplacement des batteurs à houle en fonction des directions de houles à étudier sur le plan de masse ;
- On pose du sable et on le recouvre de mortier en ciment entre chaque courbe bathymétrique où chaque courbe est peinte à la peinture.

2) Construction des ouvrages en modèle réduit en bassin à houle

La construction du modèle se fait manuellement à l'aide de gabarits et cela en respectant la similitude de Froude pour les différentes catégories de matériaux constituant les ouvrages (quais, jetées).

3) Calibration du modèle

On calibre le modèle à l'aide de sondes disposées tout le long du modèle et reliées à un logiciel de mesure qui traduit le voltage en hauteur de houle. Ce logiciel de mesure est détaillé en annexe P.

4) Essais de stabilité

Pour une direction de houle donnée, on fait subir à l'ouvrage une série progressive de houle où on augmente l'énergie de la houle à chaque essai et on observe la stabilité des différents éléments des ouvrages de protection.

5) Essais d'endurance

Pour dire que l'ouvrage est vraiment stable, on lui fait subir une série d'endurance qui est une série où on génère des houles avec les paramètres de la houle centennale et une durée d'essai simulant une tempête de 6h, 12h, ou bien 20h.

6) Etude des variantes du modèle

En fonction des résultats obtenus, on étudie d'autres variantes jusqu'à obtention de la stabilité souhaitée pour la houle de projet. L'objectif est d'obtenir un profil stable de l'ouvrage de protection étudié.

IV. Critères de stabilité

Il est nécessaire de s'assurer que tout ouvrage maritime résiste à l'action dynamique de la houle pour les tempêtes les plus fortes qui est le cas le plus défavorable pour sa stabilité.

En général les dégâts admissibles vont jusqu'à 5% de dommages pour la houle cinquantennale ($H_{50\text{ans}}$) et jusqu'à 8% de dommages pour la houle centennale ($H_{100\text{ans}}$), et les dégâts admissible relatif au musoir sont fixés comme suit :

De 0% à 2% pour la houle cinquantennale ($H_{50\text{ans}}$) et de 2% à 5% pour la houle centennale ($H_{100\text{ans}}$).

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

V. Critères d'agitation

Le critère d'agitation est l'un des points les plus importants à prendre en considération lors du choix de la variante d'aménagement d'un port.

L'agitation au niveau du bassin de port est dite admissible ou non selon la hauteur moyenne des vagues survenant sur le bassin, cette hauteur admissible est la hauteur maximale des vagues permettant des opérations à quais en toute sécurité.

L'agitation admissible en hauteur moyenne afin d'assurer la sécurité des embarcations est comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau VI-1 : critères admissibles d'agitation.

Houle incidente	Hauteur moyenne (cm)
Annuelle	≤ 35
Décennale	≤ 70

VI. Construction du modèle

Pour faire la construction du modèle physique en bassin à houle, on procède comme suit :

1) Choix de l'échelle

L'échelle doit le plus souvent nous rapprocher de la réalité, pour cela il faut que toutes les conditions importantes des états de la mer ayant un impact sur l'aménagement soient respectées et mesurées d'une manière respectable.

L'échelle dépend également des capacités et des installations du laboratoire.

Si l'échelle est trop petite les forces de viscosité ne seraient plus négligeables et la loi de Froude n'est plus applicable. Il est recommandé pour éviter ces effets d'avoir des profondeurs supérieures à 2cm et de conduire des essais avec des vagues dont le seuil minimal en hauteur varie entre 2 à 5cm et en période entre 0,5 et 0,75 s. (A. Hasnaoui, 2009)

Pour déterminer l'échelle qui doit être utilisé en bassin, il faut satisfaire les conditions suivantes :

- L'échelle géométrique λ doit être inférieur à $3 \cdot l$, tel que « l » est la longueur du bassin à houle ;
- La profondeur d'eau maximale dans le modèle doit être inférieure à 60cm pour des bassins de 1m de profondeur, pour cela il faut que la relation suivante soit vérifiée :

$$P' = P \cdot (1/\lambda) < 60\text{cm.}$$

Avec, P : la profondeur maximale du prototype ; et P' : la profondeur maximale en modèle.

Dans le cas de notre étude d'extension de l'abri de pêche Khemisti en port de pêche, on a :

- Longueur du prototype : $l' = 1560\text{m}$
- Profondeur maximale dans le prototype : $P = 20\text{ m}$

L'échelle géométrique choisie est :

$$\lambda = \frac{\text{longueur du bassin}}{\text{longueur du prototype}} = \frac{26}{1560} = \frac{1}{60}$$

Pour une échelle de $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{60}$, on vérifie si les conditions sont satisfaites :

- $\lambda = 60 < 3 \cdot 26 \rightarrow$ 1ère condition est vérifiée.
- $P' = 20 \cdot (1/60) = 0.33\text{m}$ elle est inférieure à 0.60m \rightarrow 2ème condition est vérifiée.

L'échelle géométrique $\lambda = 60$ vérifie toutes les conditions principales du choix de l'échelle en bassin à houle.

Donc : on prend l'échelle du bassin à houle égale à $\frac{1}{60}$.

Mais compte tenu de l'expérience du LEM, l'échelle du modèle retenue par le laboratoire est de $1/65^{\text{ème}}$.

2) Représentation des fonds

On a des levés bathymétriques faits lors d'une campagne de reconnaissances des fonds marins réalisés par l'équipe du LEM (laboratoire des études maritimes) en avril 2013.

A partir de ces levés bathymétriques on fait construire le fonds du bassin à houle, et cela à partir du carroyage fait par Autocad sur le plan de masse d'échelle 1/2000 comme suit :

On a le plan bathymétrique avec une échelle 1/2000 et l'échelle du modèle est de 1/65 d'où la relation de similitude entre les deux est :

$$x = \frac{\text{échelle du plan}}{\text{échelle du modèle}} = 0.0325 \text{ m}$$

Donc : 65m en nature → 1m en modèle → 0.0325m sur le plan bathymétrique.

En utilisant l'échelle 1/65, on fait le traçage du carroyage sur le plan de masse à l'aide d'Autocad comme le montre la figure VI-1.

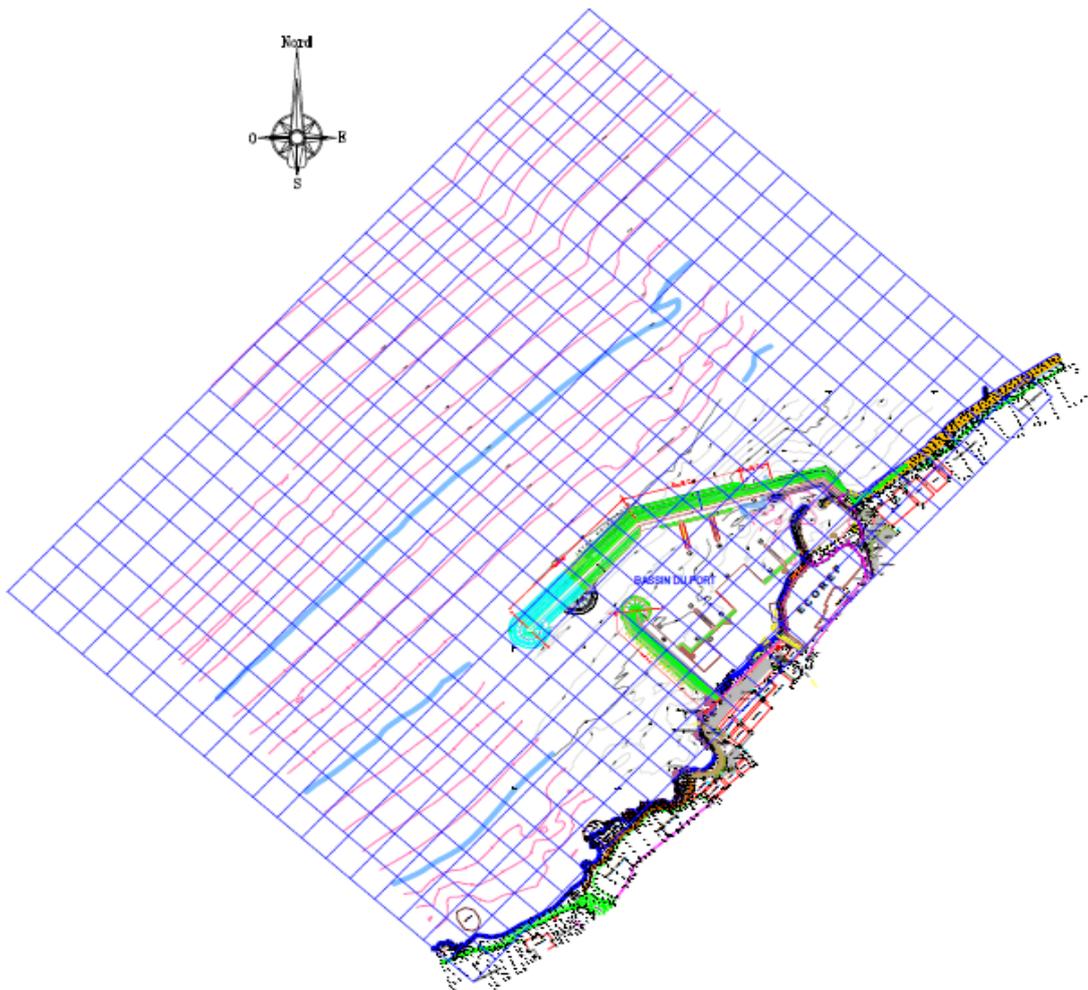


Figure VI.1 : traçage de carroyage sur Autocad.

Ensuite, on commence la mise en œuvre de la construction des fonds dans le bassin à houle :

On marque les nœuds du carroyage à la peinture tous les 1m en modèle comme le montre la photo (figure VI.2).

On met en place les courbes bathymétriques du levé à l'aide de barre de fer plat qui sont posées selon leur disposition par rapport au carroyage. Par exemple on prend un carreau où passe une courbe bathymétrique, on mesure la distance entre la courbe et le carreau puis on rapporte cette distance en modèle et on met un repère (le point bleu dans la figure VI-2). Ensuite, on fait passer le fer plat sur les points de repère pour avoir le tronçon de la courbe, on fait ça pour tous les carreaux du carroyage afin d'avoir toutes les courbes bathymétriques sous forme de barres de fer. Entre chaque courbe sur modèle on remplit le fond avec du sable qu'on couvrira avec du mortier de ciment de 5cm d'épaisseur (figure VI-3).

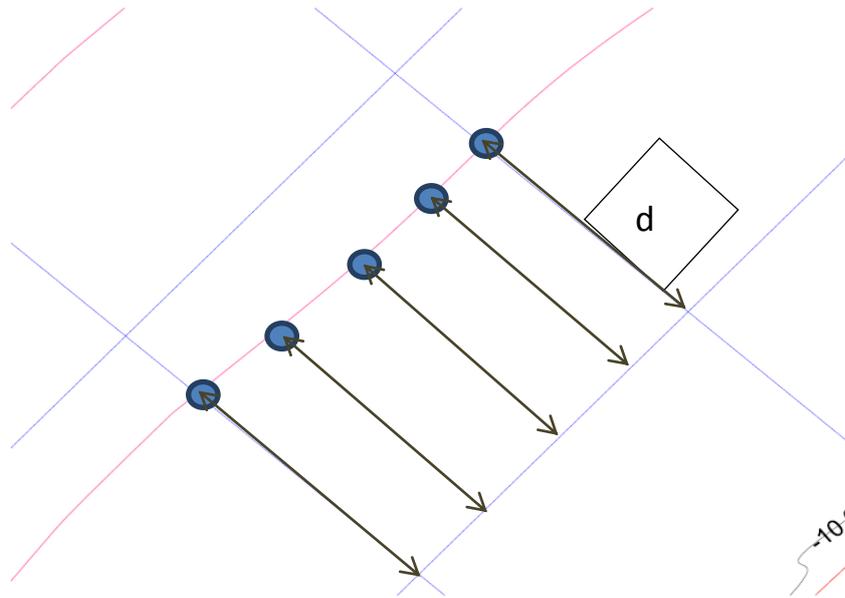


Figure VI.2 : technique de la mise des points de repère.

Après avoir construit les fonds en bassin, on commence la construction des ouvrages selon le plan de masse et selon les variantes retenues en canal pour le profil B-B et le profil C-C ainsi que les résultats du pré-dimensionnement et l'échelle du modèle (photos en figures VI.4 et VI.5).

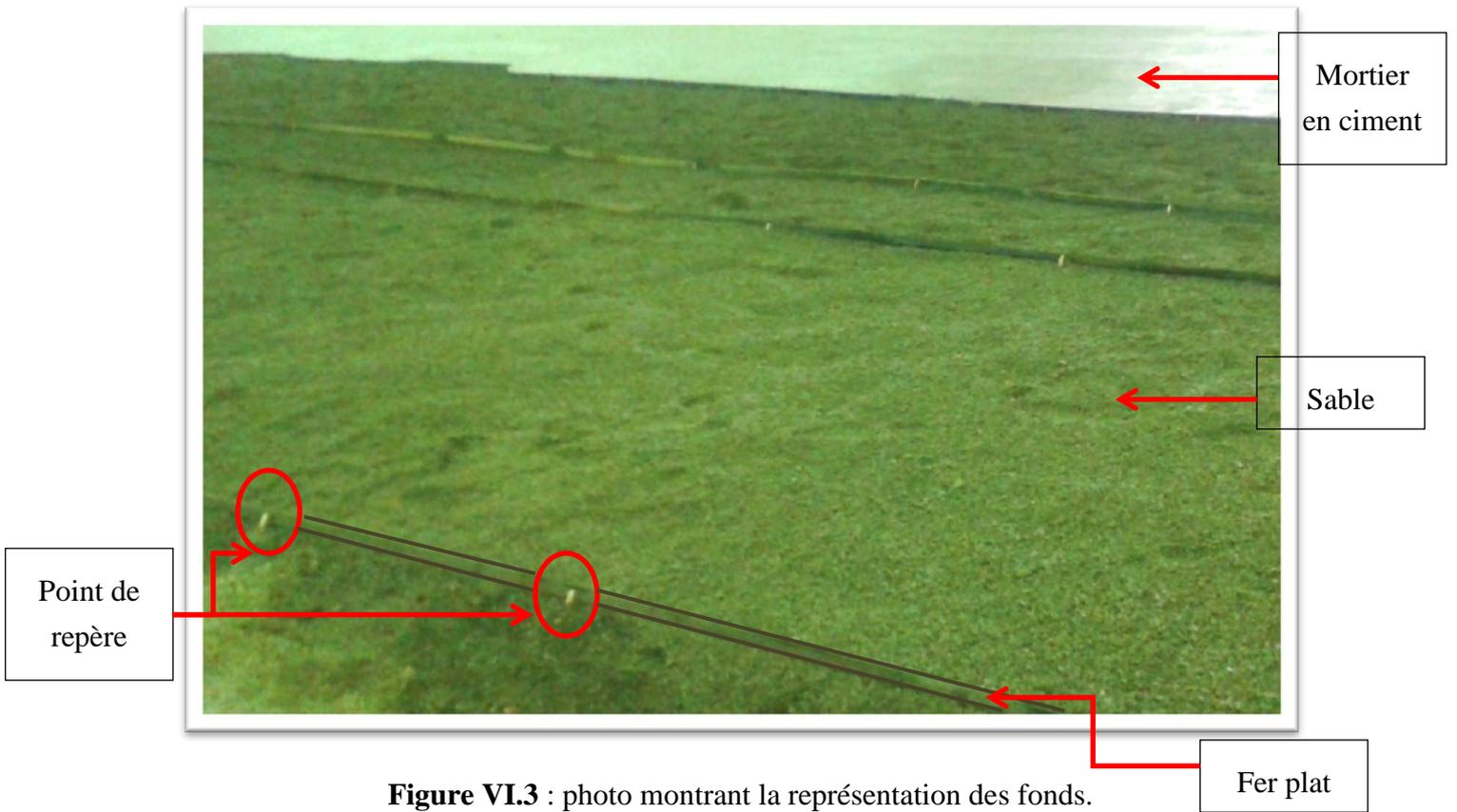


Figure VI.3 : photo montrant la représentation des fonds.



Figure VI.4 : photo montrant la construction des quais et du terre-plein.



Figure VI.5 : photo montrant la mise en œuvre des ouvrages de protection selon les variantes retenues en canal à houle.

3) Condition des houles

Les données de houles utilisées pour l'étude en modèle sont les résultats de la réfraction faites par le LEM à la profondeur -20m et à la direction N270°, N30° et N360°. Ces résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau VI-2 : résultat de la réfraction de la houle à la profondeur -20m.

Houle	Nord-Est	Angle d'arrivée	Nord	Angle d'arrivée	Ouest	Angle d'arrivée
Biannuelle	4.88	10	4.70	342	7.36	279
Quinquennale	5.65	7	5.58	340	8.40	280
Décennale	6.23	8	6.38	340	9.22	280
Vingtennale	6.79	8	7.00	340	9.92	280
Cinquantenale	7.53	8	7.80	340	10.75	281
Centennale	8.08	7	8.50	339	11.00	282

4) Description des variantes et résultats des essais de stabilité et d'agitation en bassin à houle

Après avoir fait la construction du modèle en bassin à houle, on met en place les sondes pour déterminer les houles en des points bien précis. (annexe Q)

a) **Caractéristiques des matériaux**

L'ouvrage en modèle est constitué de différents matériaux ; des matériaux naturels ou bien artificiel. Les poids et les tailles de ces dernières sont caractérisés par l'ouvrage en question et l'échelle utilisée.

Dans le cas de notre étude, les matériaux sont les mêmes que ceux utilisés dans la construction des variantes retenues en canal, sauf que la similitude du naturel vers le modèle se base sur l'échelle choisie du bassin : $1/65^e$. Pour les profils A-A, A'-A' et D-D, la partie courante de la jetée secondaire, et les jetées de l'ancien abri de pêche, les matériaux utilisés sont ceux déterminés par le pré-dimensionnement.

Les caractéristiques des matériaux sont résumées dans le tableau VI-3.

Tableau VI-3 : caractéristiques des matériaux en nature et en modèle.

Matériaux	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m^3)	Poids (g)	Densité (g/cm^3)
Enrochement	0.5-1	2.65	1.58-3.17	2.65
Enrochement	2-5	2.65	6.33-15.83	2.65
Enrochement	1-3	2.65	3.17-9.50	2.65
B.C.R	20	2.40	73.00	2.34
B.C.R	25	2.40	91.00	2.34
B.C.R	12	2.40	44.00	2.34
B.C.R	7	2.40	25.00	2.34

b) La variante n°1

La 1^{ère} variante est montrée dans la photo ci-dessous :



Figure VI.6 : schéma montrant la variante n°1 en bassin à houle.

La photo de la 1^{ère} variante est donné dans l'annexe R.

i. Résultat des essais sur la variante n°1

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°1 sont données dans le tableau VI-4.

Tableau VI-4 : observations des essais sur la variante n°1.

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	1.19	5	1.23	- Rien à signaler
Houle annuelle	6.00	12.48	6.23	- Rien à signaler - Agitation inadmissible au niveau des différents postes à quais. - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la jetée secondaire
Houle biannuelle	7.36	13.20	7.57	- Légers embruns. - Agitation admissible au niveau des différents postes à quais; - Légère érosion au niveau de la jetée principale (profil D-D).
Houle quinquennale	8.40	13.96	8.70	- La Diffraction de la houle au niveau du musoir de la jetée principale a provoqué le glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la butée; - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la jetée secondaire; - Le bassin est agité pour une houle Quinquennale
Houle décennale	9.22	14.5	9.75	- Rien à signaler au niveau du talus intérieur de la jetée principale; - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la butée des profils B-B, C-C, D-D; - Légère érosion du TVC; - Glissement de quelques enrochements de (2-5) Tau niveau de la jetée secondaire; - Légers franchissements sur le musoir de la jetée principale; - Aucune chute de BCR n'a été observé au niveau des jetées principale et secondaire; - Agitation inadmissible au niveau des différents postes à quais pour la houle décennale

Houle vingtennale	9.92	14.97	9.87	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissements assez importants sur le musoir et une section de la partie courante de la jetée principale; - Glissement de quelques enrochements de (2-5)T au niveau de la butée du profil B-B (jetée principale); - Rien à signaler au niveau du talus intérieur de la jetée principale; - Légère érosion du tapis en TVC; - Aucun dégât apparent au niveau de la jetée principale (profil B-B, profil C-C, profil D-D); - Réflexion importante provoquant une inondation au niveau de terres pleines ; - Agitation importante au niveau du bassin; - Etalement de la butée au niveau du musoir; - Franchissements sur la section courante de la jetée principale
Houle cinquantenale	10.75	15.38	10.52	
Houle centennale	11.00	15.50	11.16	

ii. Essai d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2h30min en modèle qui correspond à une tempête de 20h en nature (la durée est trouvée à l'aide des lois de similitude). Les paramètres simulés sont ceux de la houle centennale avec un niveau de marée correspondant à +1m.

Les observations des essais d'endurance sont les suivantes :

- Franchissements importants sur le musoir et la section courante de la jetée principale;
- Glissement de quelques enrochements de (2 – 5)T de la jetée secondaire ;
- Chute massive des B.C.R de 25T au niveau du musoir de la jetée principale;
- Rien à signaler au niveau du musoir de la jetée secondaire;
- Réflexion importante au niveau des quais provoquant une inondation au niveau des terres pleins;
- Rien à signaler au niveau des profils B-B, C-C et D-D de la jetée principale;
- Rien à signaler au niveau des enracinements des deux jetées;
- Agitation importante au niveau du bassin.

Conclusion

Le modèle réduit de la variante n°1 est stable au niveau de toutes ses composantes, mais l'agitation résiduelle à l'intérieur du port demeure inadmissible pour la houle annuelle.

c) La variante n°2

Les modifications sur la 1^{ère} variante ont été faites pour obtenir la 2^{ème} variante (voir annexe S). Ces modifications se résume à l'allongement de la jetée principale de 30m et au remplacement de la butée du musoir coté bassin par une contre butée (le schéma en figure VI.7).

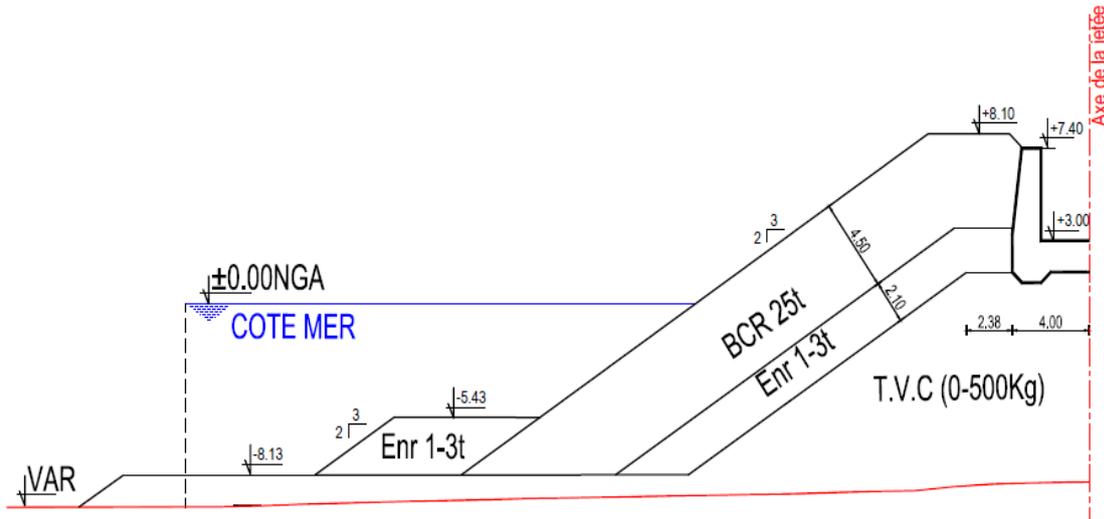


Figure VI.7 : schéma montrant la contre butée au niveau du musoir.

i. Résultat des essais sur la variante n°2

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°2 sont données dans le tableau VI-5.

Tableau VI-5 : Observations des essais sur la variante n°2.

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	1.19	5	1.06	- Rien à signaler
Houle annuelle	6.00	12.48	5.91	- Rien à signaler coté stabilité mais on remarque une agitation au niveau du bassin
Houle biannuelle	7.36	13.20	7.22	- Glissement de quelques enrochement de la jetée secondaire mais c'est insignifiant - Rocking de quelques enrochements de la contre butée de pieds au

				<p>niveau du musoir de la jetée principale</p> <ul style="list-style-type: none"> - Des embruns au niveau du musoir de la jetée principale.
Houle quinquennale	8.40	13.96	8.29	<ul style="list-style-type: none"> - Remontée du tapis anti affouillement en T.V.C vers la butée au niveau du musoir de la jetée principale - Rien à signaler au niveau du profil B-B, profil C-C et profil D-D sur le plan stabilité
Houle décennale	9.22	14.5	10.01	<ul style="list-style-type: none"> - Des embruns très importants au niveau du musoir de la jetée principale ainsi que quelques franchissements - Glissement de quelques enrochements de la jetée secondaire et de la contre butée de pieds au niveau du musoir de la jetée principale - Y a pas d'agitation, elle est admissible au niveau du bassin du port
Houle ventennale	9.92	14.97	10.42	<ul style="list-style-type: none"> - Légère érosion du T.V.C au niveau du musoir de la jetée principale
Houle cinquantennale	10.75	15.38	10.78	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques franchissements (c'est des embruns très importants) - Diffraction intense continue au niveau du musoir de la jetée principale
Houle centennale	11.00	15.50	11.79	<ul style="list-style-type: none"> - Chute d'un bloc en B.C.R au niveau du musoir de la jetée principale - Glissement de quelques enrochements de la butée de pieds au niveau du musoir de la jetée principale - Glissement de quelques enrochements du profil D-D - Remontée du tapis d'anti affouillement en T.V.C au niveau du musoir de la jetée principale vers la butée de pieds - Franchissement sur le musoir de la jetée principale - Inondation des quais pendant les houles exceptionnelles

ii. Résultat d'essai d'agitation

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

Tableau VI-6 : les résultats des essais d'agitation sur la variante n°2.

Sonde Houle	Direction N270°								
	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Annuelle (m)	0.33	0.23	0.29	0.25	0.30	0.36	0.26	0.25	0.31
Décennale (m)	0.53	0.35	0.52	0.37	0.47	0.52	0.44	0.54	0.55

Pour conclure, si on a une agitation admissible au niveau du bassin du port, on doit comparer les résultats d'essai avec les normes d'agitation figurant dans les paragraphes ci-dessus.

Le graphe présenté en figure VI.8 montre les comparaisons :

- entre la hauteur moyenne annuelle et l'agitation admissible annuelle.
- entre la hauteur moyenne décennale et l'agitation admissible décennale.

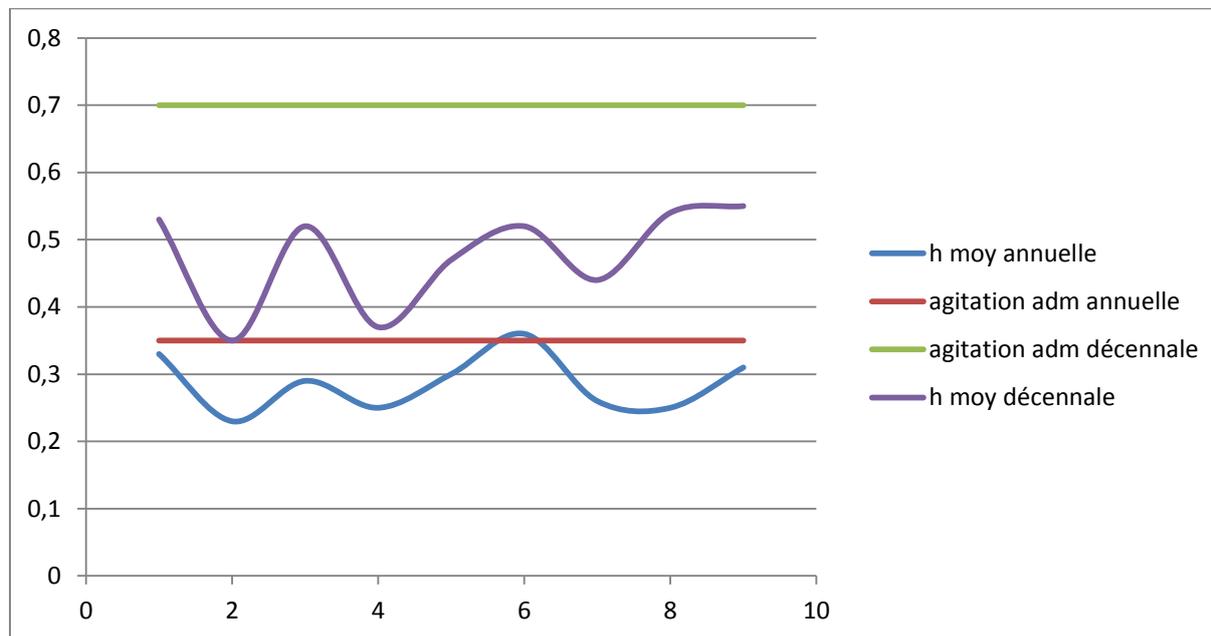


Figure VI.8 : comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne.

Sur la figure VI.8 il est observé :

- une agitation au niveau du bassin lors de l'essai progressif de la houle annuelle ;
- on ne constate aucune agitation lors de l'essai progressif de la houle décennale.

iii. Essai d'endurance

iii. Essai d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2h30min en modèle qui correspond à une tempête de 20h en nature (la durée est trouvée à l'aide des lois de similitude).

Les observations des essais d'endurance sont les suivantes :

- franchissement au niveau de la jetée secondaire et au niveau du musoir de la jetée principale et au niveau de la partie courante (profil B-B) ;
- projection de quelques enrochements de la jetée secondaire (2-5)T vers le quai de réparation suite aux franchissements très importants;
- glissement de quelques enrochements de la butée de la jetée secondaire ;
- glissement de plusieurs blocs en B.C.R de 12T de la jetée principale ;
- énorme agitation au niveau du bassin ;
- inondation des quais ;
- réflexion importante au niveau du profil D-D et E-E ce qui implique des inondations des quais.

Conclusion

Cette variante n'est pas retenue à cause de l'agitation inadmissible au niveau du bassin et ceci malgré qu'elle a montré une bonne stabilité niveau de toutes ses composantes.

d) Variante n°3

La 3^{ème} variante (voir annexe T) a été réalisée en procédant à des modifications de la 2^{ème} variante. Ces dernières se résument :

- au redressement de la jetée secondaire ;
- à l'élimination de la jetée secondaire du l'ancien abri de pêche, son emplacement est montré sur la figure VI.9 (fig a).
- à l'élimination d'une partie de la jetée secondaire de l'abri de pêche actuel, son emplacement est montré sur la figure VI.9 (fig b).

Les photos en figures VI.9 et VI.10 montrent les différentes modifications.



Figure VI.9 : photo montrant l'emplacement de la jetée secondaire et les tronçons de la jetée principale de l'abri de pêche actuel.



Figure VI.10 : photo montrant le redressement de la jetée secondaire du port de pêche étudié.

i. Résultat des essais sur la variante n°3

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°3 sont données dans le tableau ci-dessous :

NB : les dégâts de la variante n°2 n'ont pas été réparés.

Tableau VI-7 : observations des essais sur la variante n°3.

N° d'essai	Hs(m) en nature	Tp(s)	Hs(m) obtenue en modèle à -20m	Observations
Tassement	1.19	5	1.23	- Rien à signaler
Houle annuelle	6.00	12.48	6.23	- Rien à signaler coté stabilité. - une agitation admissible au niveau du bassin. - La houle se déferle à l'ouvrage. - Diffraction de la houle sur les deux musoirs. - Glissement de trois (03) enrochements de la jetée secondaire.
Houle biannuelle	7.36	13.20	7.57	- Embruns importants sur les deux jetées - Chute de quelques enrochements au niveau de la jetée secondaire - Déferlement de la houle à l'ouvrage
Houle quinquennale	8.40	13.96	8.70	- Léger franchissement sur la jetée principale - Glissement de quelques enrochements au niveau de la jetée secondaire - Des embruns sur la jetée secondaire - Rien à signaler sur la partie courante de la jetée principale - Remonté du T.V.C vers la butée du musoir de la jetée principale - Légère érosion du T.V.C au niveau du profil B-B
Houle décennale	9.22	14.5	9.75	- Des embruns très importants au niveau du musoir de la jetée principale ainsi que quelques franchissements - Glissement de quelques enrochements de la jetée

				secondaire et de la contre butée de pieds au niveau du musoir de la jetée principale - Rien à signaler au niveau du talus intérieur du profil B-B
Houle vingtennale	9.92	14.97	9.87	- Quelques embruns très importants au niveau du musoir de la jetée principale ainsi que sur la jetée secondaire
Houle cinquantenale	10.75	15.38	10.52	- Diffraction intense continue au niveau du musoir de la jetée principale
Houle centennale	11.00	15.50	11.16	- Glissement de quelques enrochements de la butée de pieds au niveau du musoir de la jetée principale ainsi qu'au profil B-B - Glissement de quelques enrochements du profil D-D - Remontée du tapis d'anti affouillement en T.V.C au niveau du musoir de la jetée principale vers la butée de pieds - Glissement de quelques enrochements de la jetée secondaire - Franchissement sur le musoir de la jetée principale et sur la jetée secondaire - Chute de trois (03) blocs en B.C.R de 25T au niveau du musoir de la jetée principale - Inondation des quais pendant les houles exceptionnelles

ii. Résultat d'essai d'agitation

Les résultats d'agitation sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau VI-8 : les résultats des essais d'agitation sur la variante n°3.

		Direction N270°								
Sonde		S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Houle	Annuelle (m)	0.21	0.37	0.24	0.23	0.25	0.29	0.25	0.15	0.25
Houle	Décennale (m)	0.44	0.58	0.46	0.37	0.41	0.49	0.40	0.46	0.50

Pour conclure, si on a une agitation admissible au niveau du bassin du port, on doit comparer les résultats d'essai avec les normes d'agitation figurant dans les paragraphes ci-dessus.

Le graphe présenté dans la figure VI.11 montre les comparaisons :

- entre la hauteur moyenne annuelle et l'agitation admissible annuelle.
- entre la hauteur moyenne décennale et l'agitation admissible décennale.

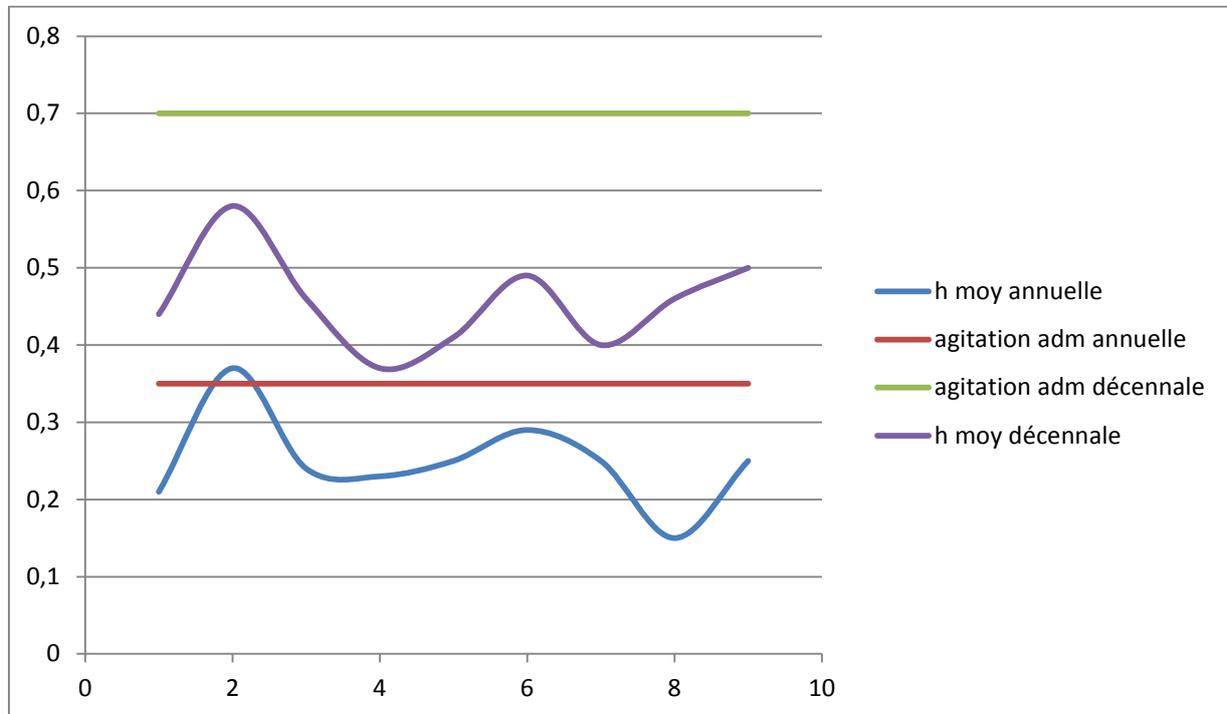


Figure VI.11 : comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne.

Sur la figure VI.11, il est observé :

- une agitation mesurée par la sonde 6 au niveau de la passe d'entrée du port lors de l'essai progressif de la houle annuelle et une diminution de l'agitation au niveau du bassin du port par rapport à celle observée dans les essais de la variante n°2 ;
- on ne constate aucune agitation lors de l'essai progressif de la houle décennale.

iii. Essais d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2h30min en modèle qui correspond à une tempête de 20h en nature (la durée est trouvée à l'aide des lois de similitude).

Les tests effectués dans l'essai d'endurance et leurs observations sont résumés dans le tableau VI-9.

Tableau VI-9: observations des essais d'endurance.

N° d'essai	H _s (m) obtenue en modèle	Durée de l'essai (min)	Observations
Essai 1	11.17	30	- Des franchissements importants au niveau du musoir de la jetée principale et la partie courante (profil B-B) - Glissement de quelques B.C.R de 25T du musoir de la jetée principale
Essai 2	11.11	30	- Erosion du talus intérieur de la partie courante de la jetée principale (profil B-B)
Essai 3	11.15	60	- Inondation des quais et le terre-plein - Projection d'un enrochement de (2-5)T de la jetée secondaire vers le quai

Conclusion

La 3^{ème} variante n'est pas retenue à cause des franchissements très importants au niveau du quai de la jetée secondaire.

Conclusion

Les résultats des différents essais en bassin à houle ont montré que la variante n°3 vérifie les critères de stabilités et d'agitation sauf qu'il y a un problème de franchissement au niveau des quais de la jetée secondaire.

Pour éviter ce problème, on fait un surélevé de 1m du mur de garde de la jetée secondaire et on fait élargir sa berme avec un enrochement de (2-5)T.

Cette dernière solution sera la variante n°4 qui est en cours de réalisation au LEM.

CONCLUSION GENERALE

L'étude expérimentale en modèles réduits physique a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres océanographiques sur le comportement hydrodynamique et sédimentologique du littoral.

Il existe différents critères qu'il faut respecter pour la simulation des phénomènes liés à la dynamique côtière, sur modèle réduit physique. Cette étape consiste en la recherche des échelles de similitude en utilisant la similitude de Reech-Froude, et reproduire le climat de houle sur modèle.

Notre projet de fin d'étude consiste à étudier l'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche sur modèle réduit physique en canal à houle et en bassin à houle.

La première étape de cette étude étant de tester la stabilité de chaque profil de la jetée principale en canal à houle à fond fixe par rapport à la direction frontale de la houle et ceci on les conforment à une série progressive de houles allant de la houle annuelle à la houle centennale et une série d'endurance qui représente le cas le plus défavorable de la houle ou le niveau d'eau de la mer est augmenté à +1m et la durée de tempête est élargie. A la fin des essais, nous avons retenu la variante qui assure la stabilité de l'ouvrage même sous les houles dites de tempêtes.

En second lieu, nous avons exécuté des essais en bassin à houle à fond fixe dans le but de tester la stabilité au niveau de toute la partie du nouveau port et de vérifier les critères d'agitation dans le bassin en passant par une série progressive de houles et une série d'endurance afin de clôturer et de retenir la variante finale.

En conclusion, la variante choisie pour l'extension de l'abri de pêche de Khemisti en port de pêche assure bien la stabilité et l'agitation d'après l'étude faite sur le modèle réduit physique.

BIBLIOGRAPHIE

- Benidjer, H (2013). mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER en ingénierie des eaux, thème : « étude de l'agitation du port BENI SAF « ain timouchent » en modèle numérique », à l'USTHB, 210 pages.
- Bonafous, P; Lebars, X; Legras, F (1994). « Technique de l'ingénieur, Ports de commerce et de pêche – Aménagement et équipement intérieur », Réf : C4640.
- Bonnefille, R (1980). « cours d'hydraulique maritime ». editeur Masson, 2^{ème} édition, 180 pages.
- Bonnefille, R (2010). « Technique de l'ingénieur, Mouvement de la mer et leurs risques », Réf : C4610.
- Caminade, D (1995). « Technique de l'ingénieur, Ouvrages de protection contre la houle », Réf : C4631.
- Carlier, M (1980). « hydraulique générale et appliquée ». eyrolles editeur / paris, 565pages.
- Chapon, J (1971). « travaux maritime Tome 1 ». Edition eyrolles, 2^{ème} Edition mise à jour / paris V^e, 285 pages.
- Chapon, J (1967). « travaux maritime Tome II ». editions eyrolles/ paris V^e, 280 pages.
- Equipe du département environnement et littoral, (janvier 2010). « avant-projet sommaire de l'étude en phase d'extension de l'abri de peche de khemisti en port de peche ». laboratoire d'études maritimes (LEM).
- Ismal, A (1993). « Cours de modélisation ».
- Larras, j (1961). « cours d'hydraulique maritime et de travaux maritimes »./ dunod editeur, 459 pages.
- Scherrer, P (2011). « Technique de l'ingénieur, Principes d'implantation et d'aménagement des ports maritimes », Réf : C4630.
- Schmied, L (1993). « Calcul des spectres de projet ». Communication du laboratoire d'optoélectronique de l'université de Toulon et du var.

Webographie

https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/644931/filename/These_JARRY.pdf

<http://www.paris-lavillette.archi.fr/s5a/supports-decours/s5amodelisationphysique.pdf>

http://www.memoireonline.com/01/12/5197/m_Contribution--l-etude-de-la-croissance-du-Pagellus-acarne-Risso-1826-dans-la-baie-de-Bou-Isma18.html

<http://www.memoireonline.com/03/08/998/amenagement-port-bouharoun-khemist.html>

<http://www.cnrtl.fr/lexicographie/port>

http://www.memoireonline.com/03/08/998/m_amenagement-port-bouharoun-khemist5.html

http://www.cfmr-roches.org/sites/default/files/manifestations/CETMEF_Trmal_enrochement.pdf

<http://www.cfms-sols.org/sites/default/files/manifestations/060202/02022006trmal.pdf>

<http://www.cfms-sols.org/sites/default/files/manifestations/110127/Demay.pdf>

http://www.paralia.fr/jngcgc/10_76_safari.pdf

http://www.memoireonline.com/03/12/5465/m_Amenagement-du-port-dEl-Djamila-avantages-et-inconvenients-et-comportements-des-structures25.html

<http://scs-ingenierie.pagesperso-orange.fr/cours/OuvragesGenieCotier/Ouvrages08.TalusEnrochements.pdf>

<http://www.oceanide.net/index.html>

<http://www.techniques-ingenieur.fr/>

www.infovisual.info/05/081_fr.html

<http://oatao.univ-toulouse.fr/7670/1/duval.pdf>

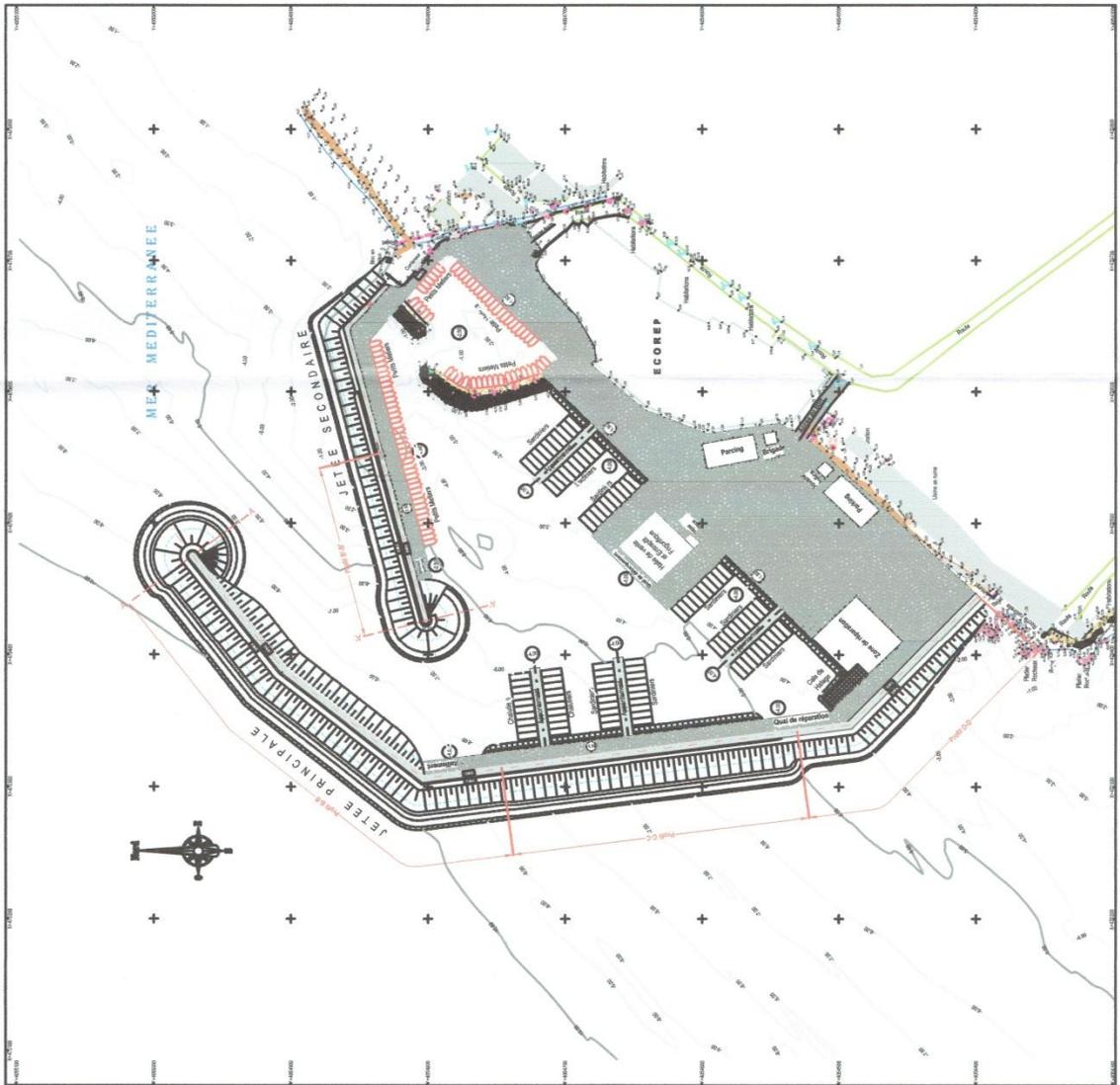
<http://modb.oce.ulg.ac.be/cours/OCEANO/oceano6b.pdf>

<http://www.oceanide.net/index.html>

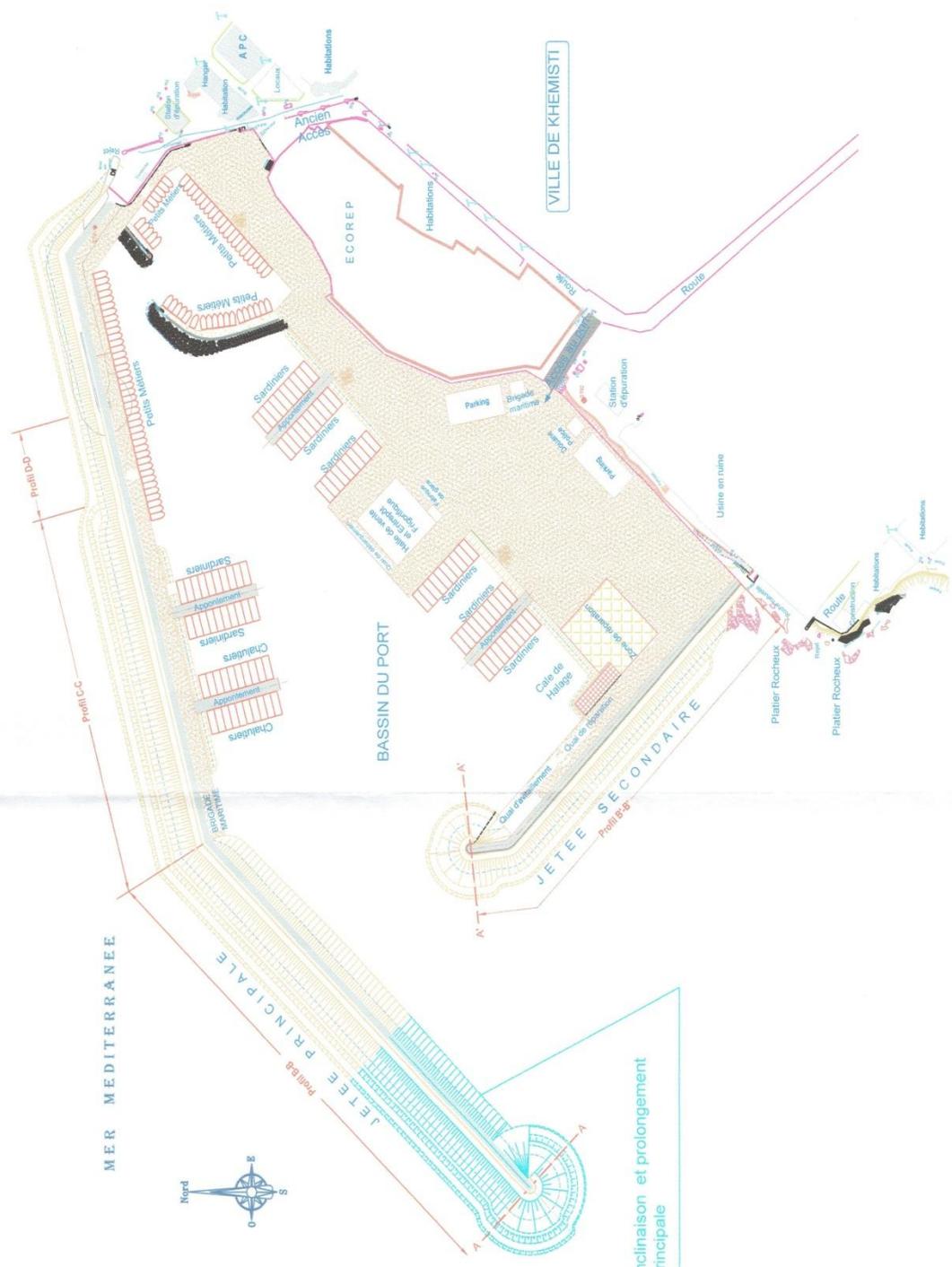
Annexes



Annexe B



Annexe E



Rétablissement de l'inclinaison et prolongement de 70 m de la jetée principale

Annexe F: photo donnant le volet plan.



Annexe G: photo représentant le vérin hydraulique.



Annexe H : photo montrant le générateur électrique.



Annexe I: logiciel de calibration en canal à houle.

A. Acquisition

Logiciel A1 : All Multch (mode opératoire)

- ✓ Lorsqu'on exécute le logiciel une boîte de dialogue apparaît sous le nom « **Waves Acquisition** », qui contient les quatre onglets suivants :
 - **Identification**
 - **Calibration**
 - **Statistique**
 - **Raw data**
- ✓ Dans l'onglet « **Identification** » introduire :
 - Le nom du projet,
 - Le numéro de la variante,
 - La direction de la houle,
 - Le numéro du test,
 - Le gain (paramètre ajusté au niveau de la génération).
- ✓ Dans l'onglet « **Calibration** » introduire :
 - L'échelle du modèle,
 - Sélection des sondes à utiliser,
 - La durée du test,
 - La déviation lors de la calibration de chaque sondes (0, -h et +h).
 - Lecture 1 :** Correspond au zéro de référence, vérifier le zéro au niveau du voltmètre et le valider,
 - Lecture 2 :** Faire monter la sonde d'une hauteur h avec $1\text{cm} < h < 5\text{cm}$, vérifier la lecture du voltage et la valider,
 - Lecture 3 :** Faire descendre la sonde d'une hauteur (h) avec $1\text{cm} < h < 5\text{cm}$, vérifier la lecture du voltage et la valider,

Validation de la calibration de la sonde :

- Remettre la sonde au niveau du zéro de référence, en vérifiant la valeur au niveau du voltmètre, si le zéro n'est obtenu on refait la calibration de la sonde.
- En cliquant sur « valider », la droite de calibration s'affiche et elle doit passer par les trois points de lecture, ainsi que le paramètre « GoodFeet » qui doit s'approcher de 0,999, si c'est conditions sont satisfaites, on valide et le facteur de calibration α de la sonde s'affiche ($\alpha = \text{Echelle} \times \text{hauteur} / \text{voltage}$).
- ✓ Dans l'onglet « **Statistique** », ou apparaît le listing des différents paramètres de H_s , lancer le test en cliquant sur **Acquit**.
- ✓ A la fin du test le message « Acquisition terminer » apparaît, et les résultats s'affichent et s'impriment en cliquant sur « Stat ».

Sur la base des résultats, le test peut être validé et le test suivant de la série progressive sera lancé. Sinon le test sera refait.

B. Génération

Logiciel B : HR WAVE MAKER (mode opératoire)

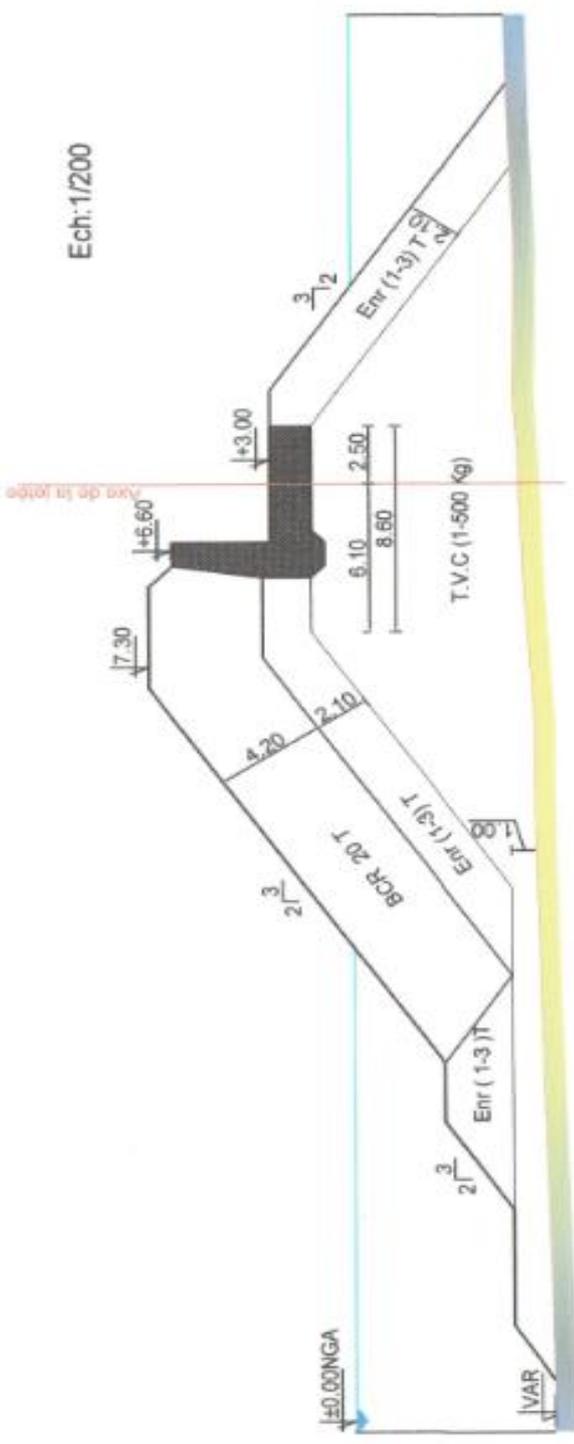
- ✓ A l'exécution le menu principal apparait comme suit :
 - **File** : pour introduire les données d'un nouveau projet.
 - **View**.
 - **Seastate** : pour choisir le type de houle.
 - **Setup** : pour introduire la profondeur d'eau et l'échelle du modèle.
 - **Help**.
- ✓ Une fois tous les paramètres nécessaires sont saisis, à partir du menu, on sélectionne le fichier test désiré.

Une boîte de dialogue apparait ou on trouve toutes les données du test saisies ainsi que celles calculés par le logiciel : H_s , la fréquence, Wind speed, le fetch, Max semi stroke, Cycle time et la période.
- ✓ Sélectionner le batteur en saisissant « **Paddle standart** ».
- ✓ Saisir le paramètre lié à la course du batteur dans la case « **gain** ».
- ✓ Lancer le test et à la fin de l'acquisition, arrêter la génération en cliquant sur « **Stop** ».

Annexe J

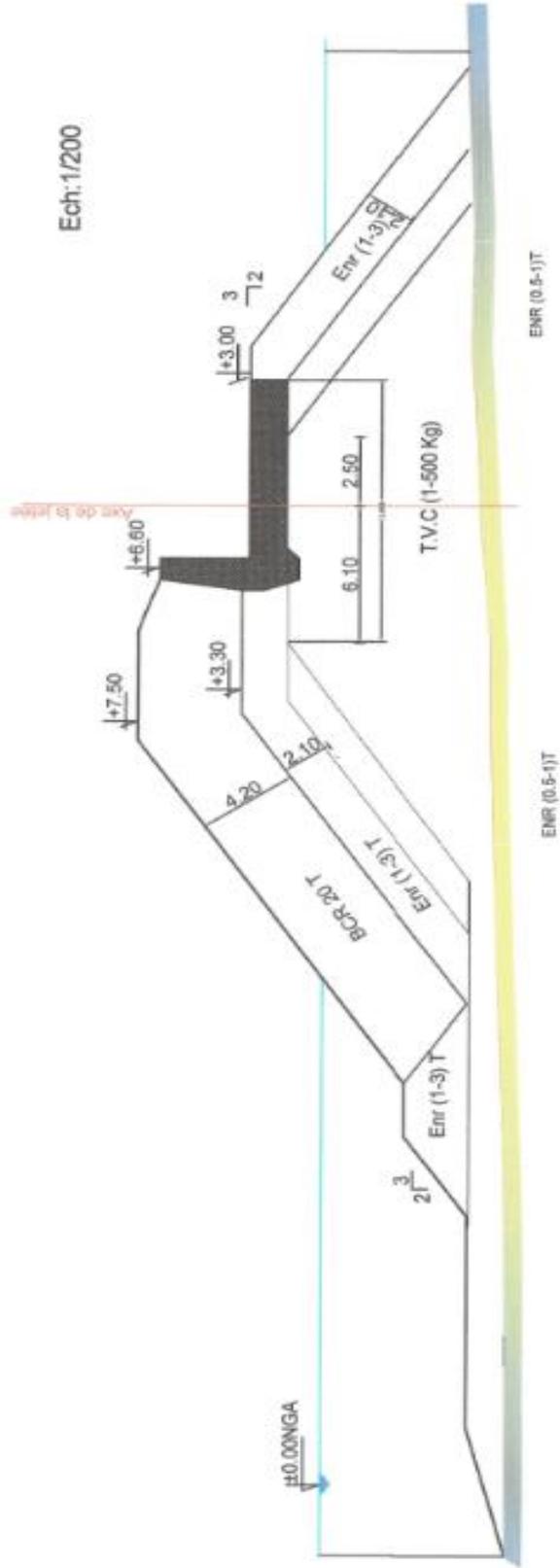
PROFIL - B - B - variante 1

Ech: 1/200



Annexe K

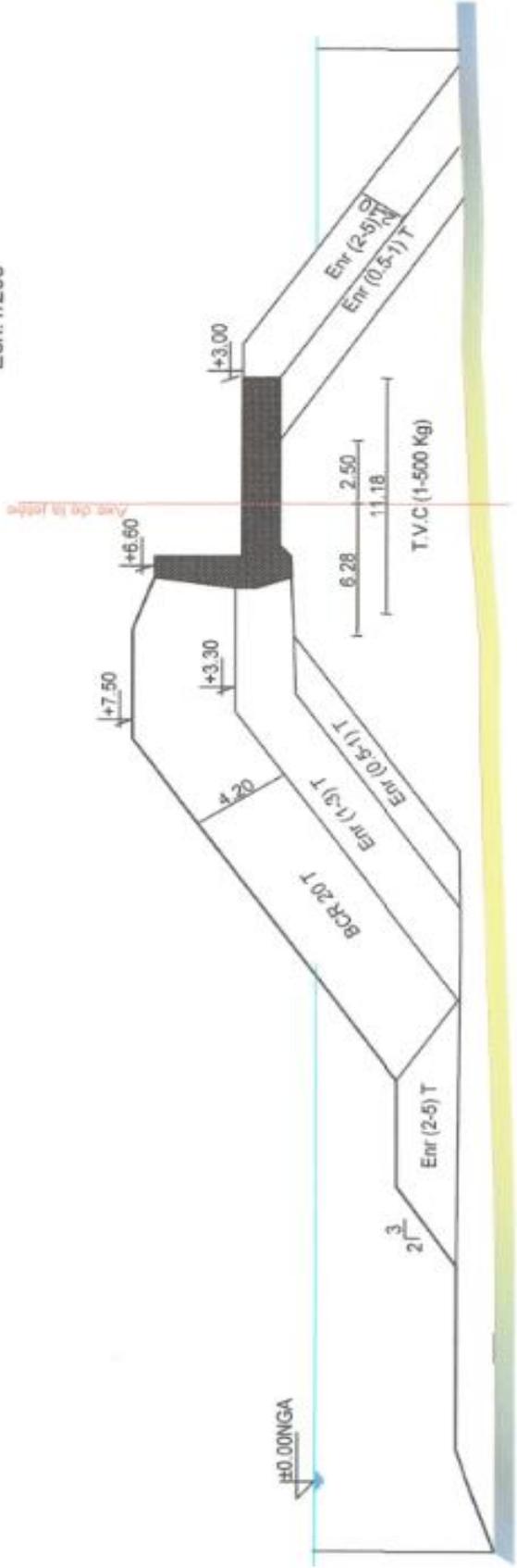
PROFIL - B - B - variante 2



Annexe L

PROFIL - B - B - variante 3

Ech: 1/200

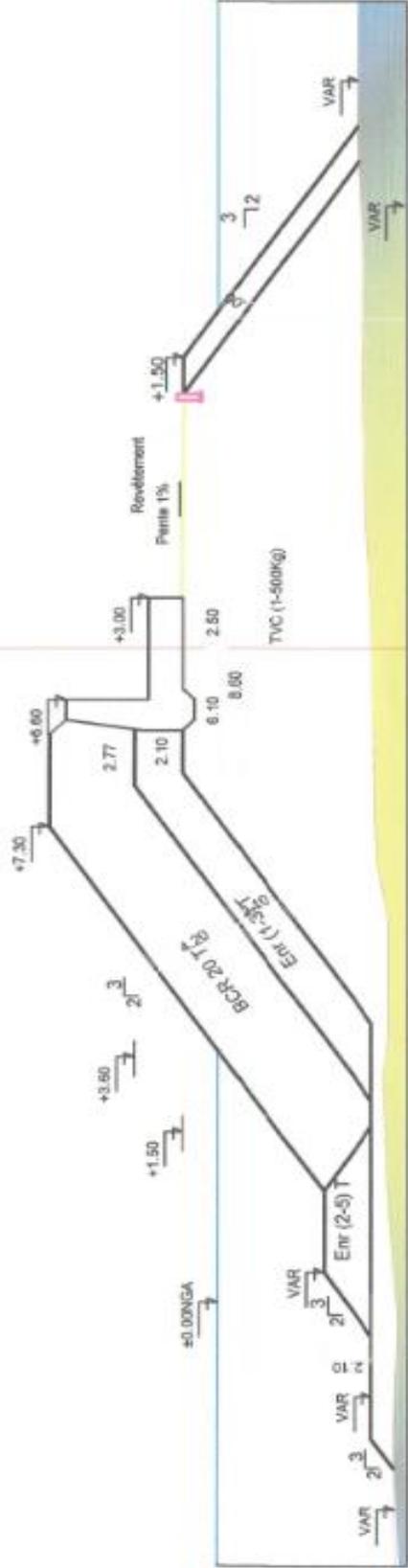


Annexe M

PROFIL - C.-C. - variante I

Ech: 1/200

Axe de la lettre

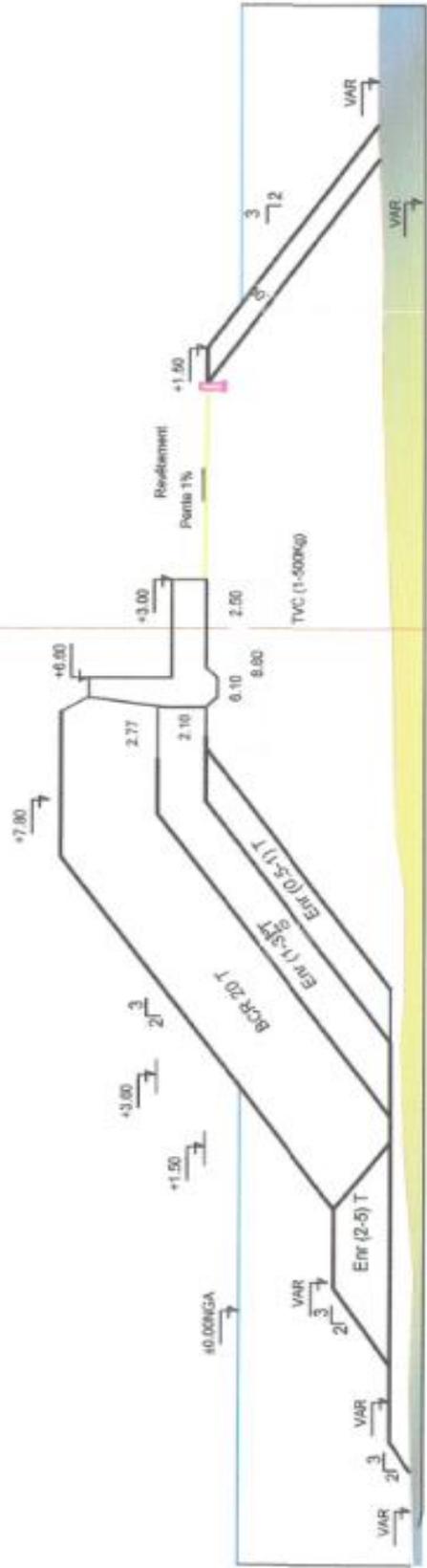


ENR(50-300)Kg

Annexe N

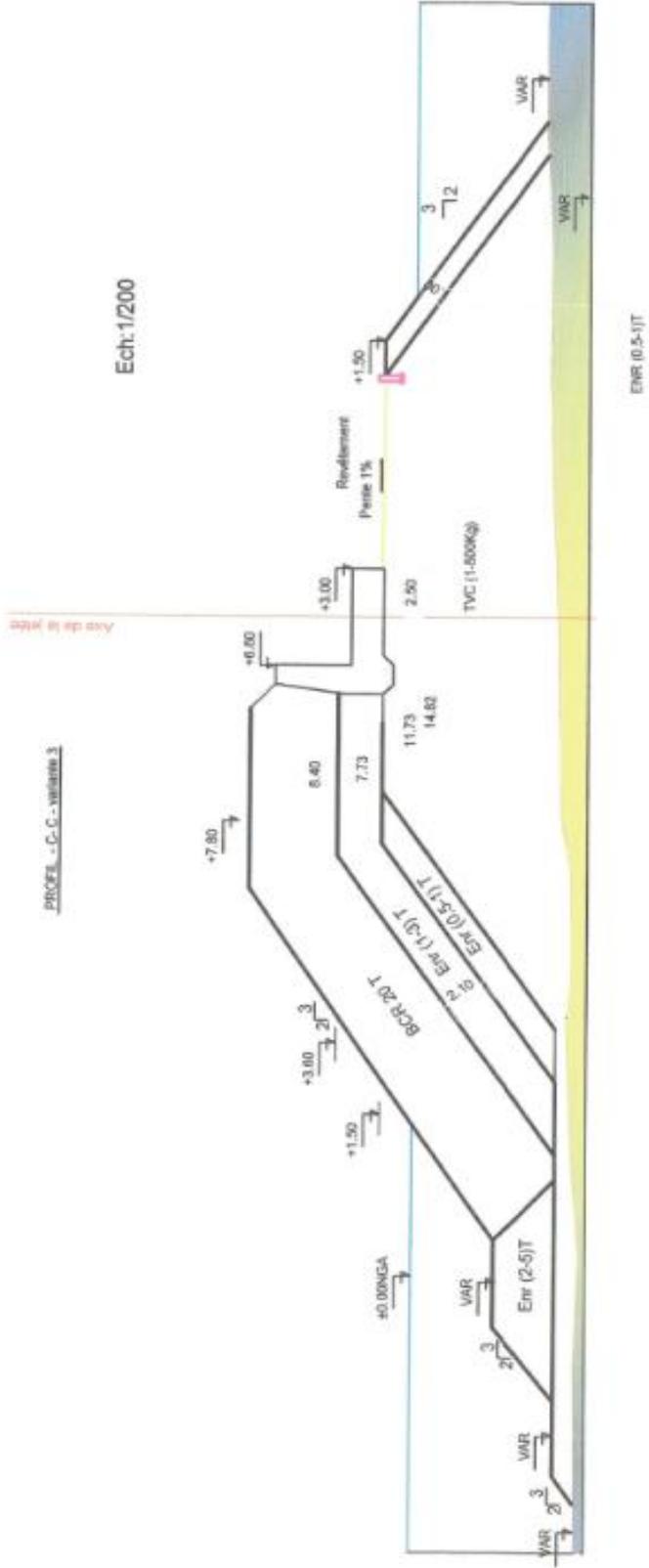
PROFIL - C. C. - variante 2

Ech: 1/200



ENR (0.5-1)T

Annexe O



Annexe P: logiciel de calibration en bassin à houle.

A. Acquisition

Logiciel A2 : HR WAVE DATA (mode opératoire)

- ✓ Allumer l'ordinateur de l'acquisition et installer les sondes au niveau de la carte d'acquisition du logiciel **16PCH230**.
- ✓ Entrer le nom du projet et exécuter le logiciel « **HR WAVE DATA** » et sélectionner la carte d'acquisition **16PCH230**.
- ✓ Le menu principal de logiciel apparait comme suit :
 - **Calibration instrument** : pour calibrer les sondes.
 - **Edit calibration and collecte data** : pour vérifier les paramètres de calibration.
 - **Perform data analysis** : pour introduire les paramètres du test (durée, fréquence).
 - **Utilities** : pour utiliser le module de séparation des ondes (incidentes et réfléchies) au niveau du canal à houle.
 - **Select new job** : permet de sélectionner le nom d'un autre projet.
 - **Stop** : pour sortir du logiciel et retourner au menu principal.

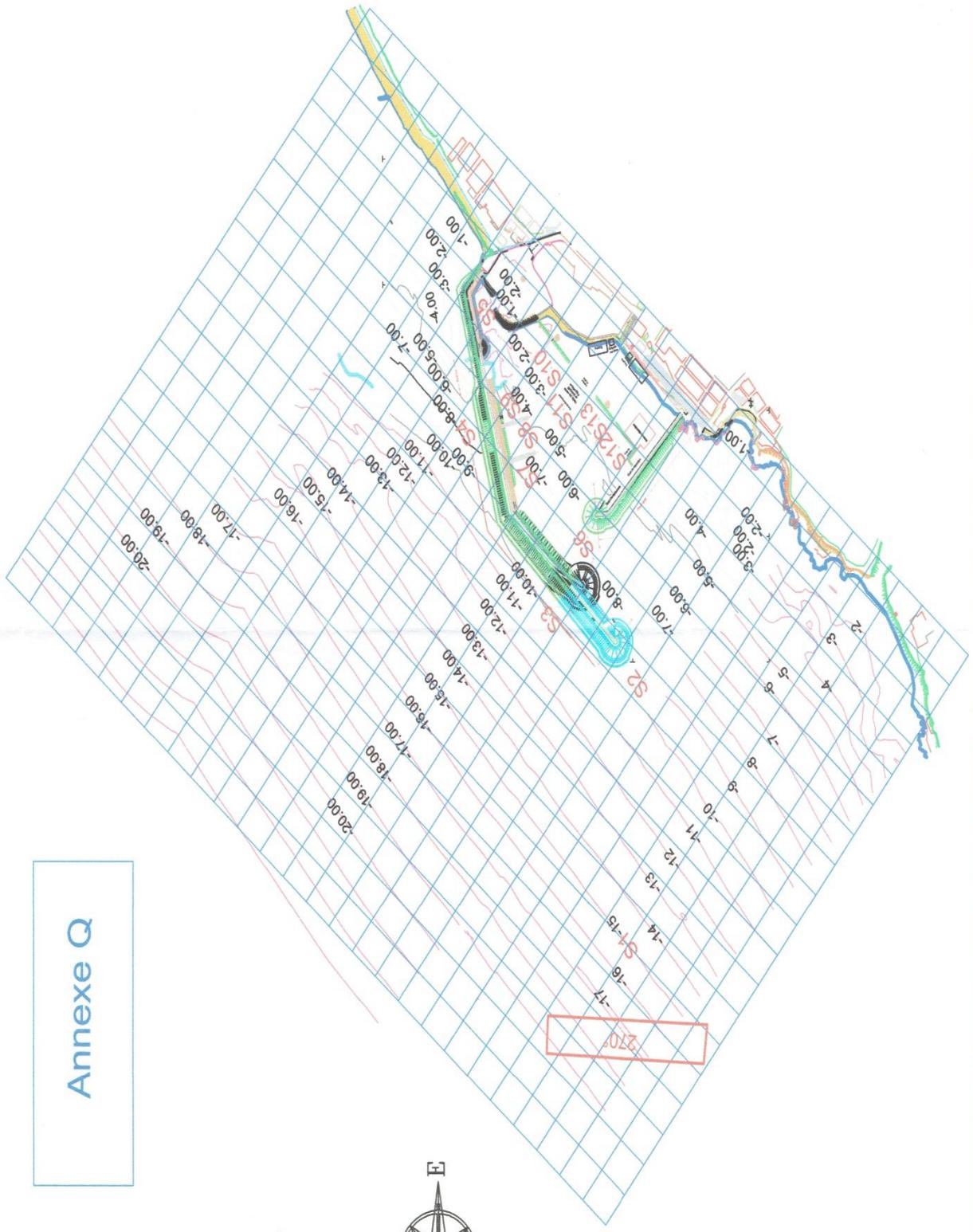
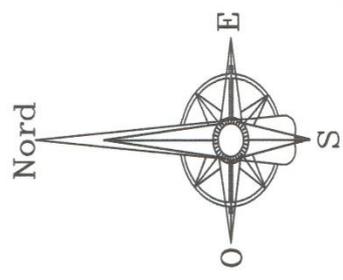
B. Génération

Logiciel B : HR WAVE MAKER (mode opératoire)

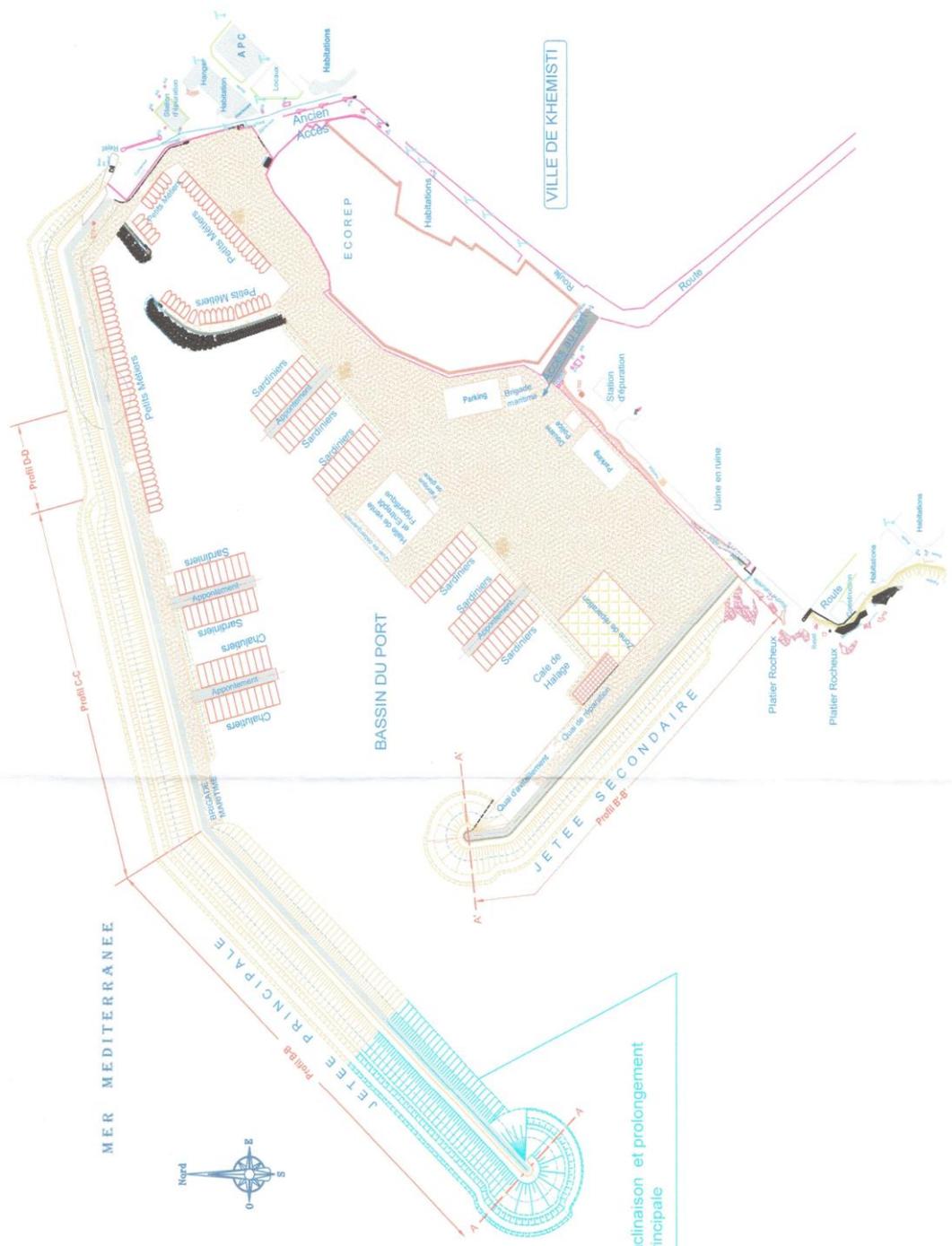
- ✓ A l'exécution le menu principal apparait comme suit :
 - **File** : pour introduire les données d'un nouveau projet.
 - **View**.
 - **Seastate** : pour choisir le type de houle.
 - **Setup** : pour introduire la profondeur d'eau et l'échelle du modèle.
 - **Help**.
- ✓ Une fois tous les paramètres nécessaires sont saisis, à partir du menu, on sélectionne le fichier test désiré.

Une boîte de dialogue apparait où on trouve toutes les données du test saisies ainsi que celles calculés par le logiciel : H_s , la fréquence, Wind speed, le fetch, Max semi stroke, Cycle time et la période.
- ✓ Sélectionner le batteur en saisissant « **Paddle standart** ».
- ✓ Saisir le paramètre lié à la course du batteur dans la case « **gain** ».
- ✓ Lancer le test et à la fin de l'acquisition, arrêter la génération en cliquant sur « **Stop** ».

Annexe Q

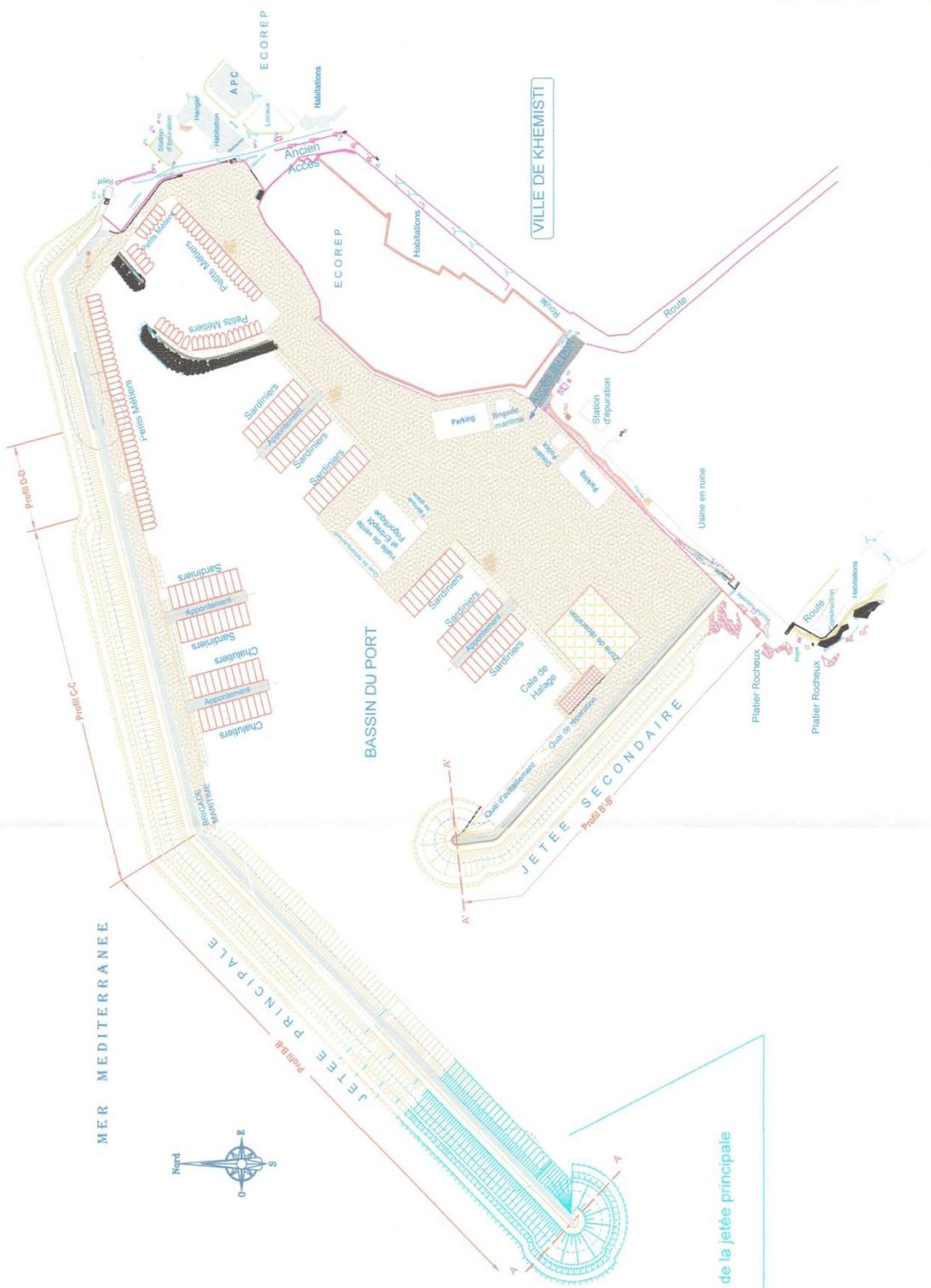


Annexe R



Rétablissement de l'inclinaison et prolongement de 70 m de la jetée principale

Annexe S



Prolongement de 30 m de la jetée principale

