

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département hydraulique

Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau

Laboratoire d'Etudes Maritimes

Mémoires de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'Etat en Hydraulique

Etude en modèle réduit physique en bassin à houle de l'agitation
et la stabilité du port de Cap Falcon d'Oran

Chahinez BEN NACER

Soltana BOUCHALMA

Sous la direction de Mme Saadia BENMAMAR Professeur

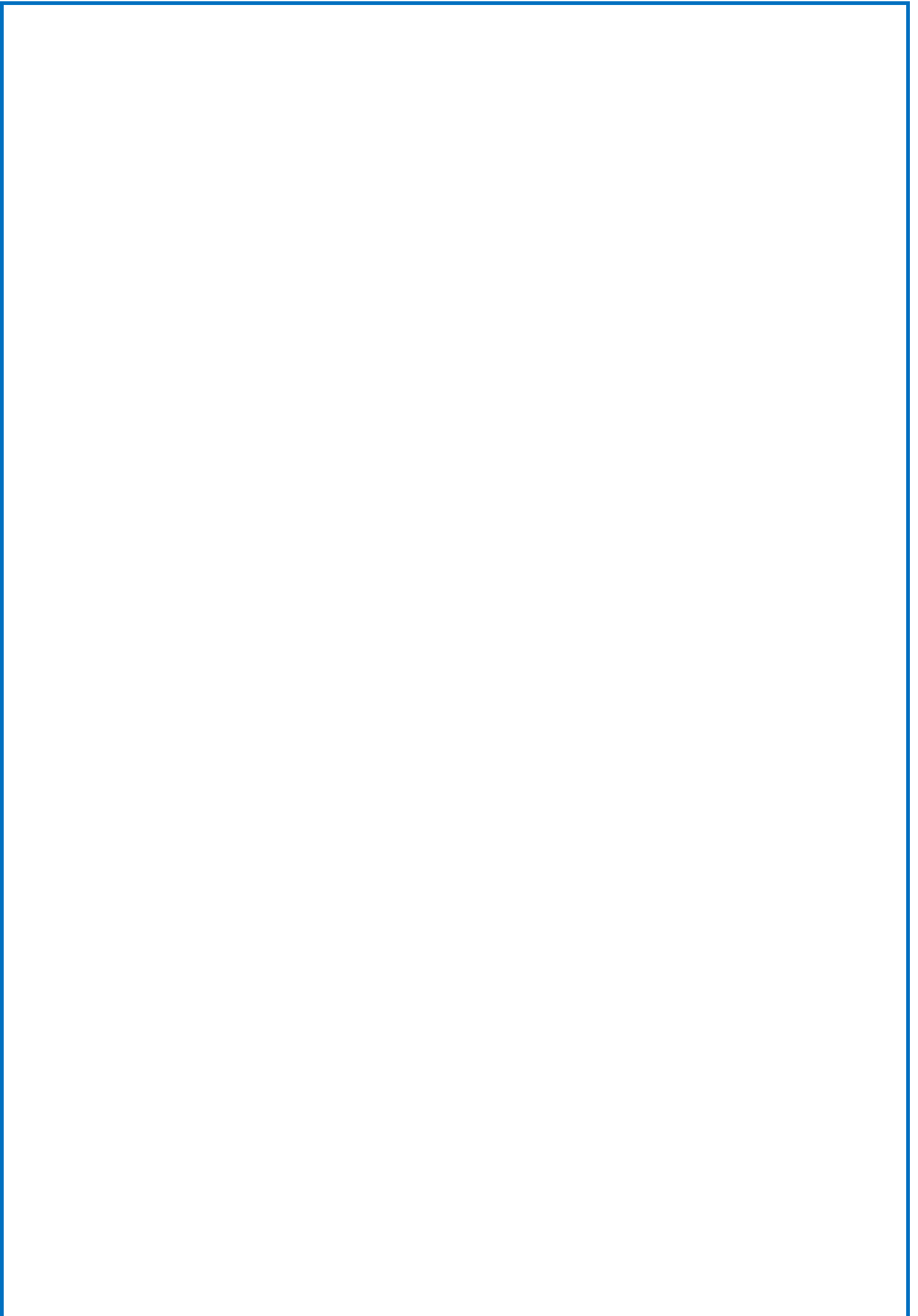
et M. Karim Belaid Ingénieur

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2020)

Composition du Jury :

Président :	M. Salim BENZIADA	MAA	ENP
Rapporteur :	Mme Saâdia BENMAMAR	Prof	ENP
	M. Karim BELAID	Ingénieur	LEM
Examineurs :	M. Rabie MESSAHLI	MAA	ENP
	Mme Meriem CHETIBI	Docteur	ENP

ENP 2020



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département hydraulique

Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau

Laboratoire d'Etudes Maritimes

Mémoires de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en Hydraulique

Etude en modèle réduit physique en bassin à houle de l'agitation
et la stabilité du port de Cap Falcon d'Oran

Chahinez BEN NACER

Soltana BOUCHALMA

Sous la direction de Mme Saadia BENMAMAR Professeur

et M. Karim Belaid Ingénieur

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2020)

Composition du Jury :

Président :	M. Salim B ENZIADA	MAA	ENP
Rapporteur :	Mme Saâdia BENMAMAR	Prof	ENP
	M. Karim BELAID	Ingénieur	LEM
Examineurs :	M. Rabie MESSAHLI	MAA	ENP
	Mme Meriem CHETIBI	Docteur	ENP

ENP 2020

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à mes parents Mouloud Ben nacer et Khalida ELhaddad , sans eux, je n'aurais pas abouti à ce stade d'étude, que Dieu puisse m'aider à les honorer, les servir et les combler.

A ma grand mère que dieu la protège : Zahia Rezig

A ma sœur Wissam et mes frères Fouad et Akram

A ma tante Nabila et mon oncle Hakim , sans oublier mes cousins et cousines.

A toute ma famille

A mes très chères amies Manel Bentouti , Kenza Bibeiche, Manel Elhaddad . et mon ami Islam Bennaceur.

A ma meilleure amie et mon binôme au même temps Bouchalma soltana .

Et à tous mes amis et amies que j'aime

BEN NACER CHAHINEZ

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui sont toujours là pour moi tout au long de mes études et qui m'ont aidé et soutenu

A mes frères OUSSAMA, ISLEM ET AYMEN

A ma petite sœur WIWI

A ma grand-mère MANI FATIMA que dieu la protège

A mon fiancé MOULOUD par son encouragement

A mes tantes FATI, NAJOU, SOUSOU et MIMI pour leur soutien moral

A mon très chère amie DJAZOULI FATIMA ZOUHRA

A mes cousines IMENE, SALIMA et SOUHILA

A toute ma famille, à tous ceux que j'aime et à toutes les personnes qui se sont données la peine de me soutenir durant ce projet

Et enfin à ma meilleur amie CHAHINEZ

BOUCHALMA SOLTANA

REMERCIEMENTS

Louange à Allah tout puissant qui nous a donné la force nécessaire et la sagesse d'accomplir notre travail en tout sérénité.

Nous exprimons nos remerciements et sincères reconnaissances à :

A notre promotrice de mémoire, Professeure S. BENMAMAR, d'avoir accepté de nous prendre en charge durant l'élaboration de notre projet et qui nous a prodigué conseil et assistance .

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

M^r Belaid Karim , Ingénieur chef du projet, de nous avoir encadré et pour son aimable aide et compréhension dans des moments difficiles .

Toutes l'équipe du LEM d'avoir mis à notre disposition tous les équipements du laboratoire et pour leurs encouragements ainsi que pour leur disponibilité.

Nos enseignants du département hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Merci .

ملخص

سيساهم بناء ميناء سياحي في كاب فالكون في تطوير قطاع السياحة الذي لا ينبغي أن يركز فقط على السياحة ، بل سيشترك أيضًا في التنمية الاقتصادية لولاية وهران.

كجزء من هذه الدراسة ، تم عمل أبعاد مسبقة للهياكل الواقية التي تشكل ميناء كاب فالكون المستقبلي. تم إجراء الاختبارات في نموذج الحجم المادي في حوض تضخم ثابت القاع في مختبر الدراسة البحرية. تم إجراء نوعين من الاختبارات: اختبارات التحريض داخل حوض الميناء واختبارات ثبات الهياكل الوقائية وقياس المعابر.

الكلمات الدالة مرسى- النموذج المصغر- البحرية-حوض الموجة .

ABSTRACT

The construction of a port of tourism in Cap Falcon will contribute to the development of the tourism sector which should not only focus on tourism, but also participate in the economic development of the wilaya of Oran.

As part of this study, a pre-dimensioning of the protective structures constituting the future port of Cap Falcon was made. Physical scale model tests in a fixed bottom swell basin were carried out at the maritime study laboratory. Two types of tests were carried out: Agitation tests inside the port basin and stability tests of protective structures and measurement of crossing.

Key Words A port - Physical model – Maritime - wave basin.

Résumé

La réalisation d'un port de plaisance à Cap Falcon contribuera au développement du secteur du tourisme qui ne doit pas se tourner uniquement vers la plaisance, mais il participe aussi au développement économique de la wilaya d'Oran.

Dans le cadre de cette étude, un pré dimensionnement des ouvrages de protection constituant le futur port de Cap Falcon a été fait. Des essais en modèle réduit physique en bassin à houle à fond fixe ont été réalisés au laboratoire d'étude maritime. Deux types essais ont été effectués : Essais d'agitation à l'intérieur du bassin portuaire et des essais de stabilité des ouvrages de protection et mesure des franchissement.

Mots clés Un port - Modèle physique- Maritime- bassin à houle.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux

Listes des figures

Liste des abreviations

Liste des symboles

Introduction générale14

Chapitre 1 : Notion sur les ports et Hydraulique maritime

1.1.	Introduction	17
1.2.	Définition d'un port	17
1.3.	Classification des ports.....	17
	1.3.1 Ports militaires.....	18
	1.3.2 Ports de commerce	18
	1.3.3 Ports des travaux	18
	1.3.4 Ports de pêche	18
	1.3.5 Ports de plaisance.....	18
1.4.	Rôle des ports.....	19
1.5.	Les principales composantes d'un port.....	19
	1.5.1 Les ouvrages extérieurs (de protection)	19
	1.5.2 Les ouvrages intérieurs	21
	1.5.3 Les ouvrages d'accostages	21
1.6.	Notion de la houle	21
	1.6.1 Formation de la houle	21
	1.6.2 Paramètres caractéristiques de la houle	22
1.7.	Déformation de la houle	23
	1.7.1 Le déferlement de la houle	23
	1.7.2 La réfraction de la houle	24
	1.7.3 Réflexion de la houle	25
	1.7.4 Diffraction de la houle	27
1.8.	Conclusion	27

Chapitre 2 : Collecte et analyse des données de base

2.1.	Introduction	29
2.2.	Situation du site	29
2.3.	Données de base	30
2.3.1	Données physiques	30
2.3.1.1	La topographie.....	30
2.3.1.2	La bathymétrie	31
2.3.2	Données météorologiques.....	31
2.3.2.1	Le climat	31
2.3.2.2	Les températures	32
2.3.2.3	La Marée et variation du niveau marin	32
2.3.2.4	Les Vents	32
2.3.3	Données océanographiques	34
2.3.3.1	La houle au large	35
2.3.3.2	Choix du secteur angulaire.....	36
2.3.3.3	Résultats de réfraction de la houle par SWAN	37
2.3.3.4	Les courants.....	40
2.4.	Conclusion	41

Chapitre 3 : Pré dimensionnement des ouvrages

3.1.	Introduction	43
3.2.	Etude des variantes.....	43
3.3.	Pré dimensionnement des ouvrages de protection	48
3.3.1	Choix de la structure	49
3.3.2	Pré dimensionnement de la jetée principale	50
3.3.3	Pré dimensionnement de la jetée secondaire	55
3.4.	Conclusion	56

Chapitre 4 : Modélisation physique

4.1.	Introduction	59
4.2.	Définition d'un modèle réduit physique	59
4.3.	Objectifs de l'étude	59
4.4.	Les modèles à fond fixe	60
4.4.1	Modèles d'agitation	60
4.4.2	Modèle de stabilité	60

4.4.2.1 Etude à deux dimension ou en canal à houle ...	60
4.4.2.2 Etude à trois dimensions ou à bassin à houle	66
4.5. Avantages des modèles réduits physiques.....	61
4.6. Règles de similitude	61
4.6.1 Similitude géométrique	61
4.6.2 Similitude cinématique	62
4.6.3 Similitude dynamique	63
4.7. Conception du modèle réduit physique	67
4.7.1 Choix de l'échelle	67
4.7.2 Construction des fonds	68
4.7.3 Matériaux de construction	70
4.7.4 Calibrage (réglage hydraulique du modèle)	71
4.8. Conclusion	71

Chapitre 5 : Etude de stabilité et d'agitation sur modèle réduit physique

5.1. Introduction	73
5.2. Critère d'agitation.....	73
5.3. Critère de stabilité	73
5.4. Critère d'exploitation des terres pleins et quai en fonction du débit de franchissement (Eurotop 2016)	74
5.5. Implantation et positionnement des sondes	74
5.6. Génération de la houle	75
5.7. Mesure de la houle	75
5.8. Conditions des houles	77
5.9. Conditions hydrographiques	78
5.10. Description du modèle de stabilité	78
5.10.1 Essais progressifs	78
5.10.2 Essais d'endurance	78
5.11. Mesure des franchissements	78
5.12. Etude des variantes et résultats des essais de stabilité et d'agitation en bassin à houle	79
5.13. Conclusion.....	90
Conclusion générale	91
Bibliographie	92

Annexe

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Répartition annuelle des vents par direction.....	33
Tableau 2-2 : Répartition des vents d'intensité supérieure à 10 m/s.....	33
Tableau 2-3 : Amplitude de la houle annuelle au large par direction et par période	35
Tableau 2-4 : Hauteurs significatives de houles en mètres et périodes en secondes associées aux Périodes de retour et par directions.....	36
Tableau 2-5 : Moyennes des résultats obtenus par direction et par période de la houle annuelle à 10m.....	38
Tableau 2-6 : Moyenne des résultats obtenus pour les houles de différentes périodes de retour à différentes profondeurs.....	39
Tableau 3-1 : Comparaison des variantes	48
Tableau 3-2 : Poids et épaisseurs de la carapace	53
Tableau 3-3 : Les poids et les épaisseurs des couches filtre.....	54
Tableau 3-4 : Les poids et les épaisseurs de butée du pied	55
Tableau 3-5 : Dimensionnement de protection de la jetée secondaire.....	56
Tableau 4- 1 : Caractéristiques des matériaux.....	71
Tableau 5-1 : Caractéristiques de la houle à -20,0m.....	78
Tableau 5-2 : Observations des essais progressives sur la variante n°1.....	81
Tableau 5-3 : Observations des essais d'endurance sur la variante n°1.....	82
Tableau 5-4 : Observations des essais progressifs sur la variante 2 pour la direction N°323.....	84
Tableau 5-5 : Observations des essais progressifs sur la variante 2 pour la direction N°353.....	85
Tableau 5-6 : Observations des essais d'endurance sur la variante N°2.....	86
Tableau 5-7 : Observations des essais progressifs sur la variante n°3 pour la direction N°353.....	87
Tableau 5-8 : Observations des essais d'endurance sur la variante 3.....	87
Tableau 5-9 : Les résultats des essais d'agitation sur la variante 3.....	89

Listes des figures

Figure 1.1 : Principales composantes d'une digue verticale (Scherrer, 2010).....	20
Figure 1.2 : Courbe représentative des caractéristiques de la houle. (Bonnefille,1980).....	22
Figure 1.3 : Le déferlement glissant (Bonnefille,2010)	23
Figure 1.4 : Le déferlement glissant plongeant par pente forte (Bonnefille,2010)	24
Figure 1.5 : Le déferlement frontal (Bonnefille,2010)	24
Figure 1.6 : Réfraction de la houle(Bonnefille,2010)	25
Figure 1.7 : La réflexion sur un mur vertical (clapotis du 1 ^{er} ordre) (Bonnefille, 2010).....	26
Figure 1.8 : La réflexion sur un mur vertical (clapotis du 2 ^{eme} ordre) (Bonnefille, 2010).....	26
Figure 1.9 : La réflexion sur une paroi inclinée (Réflexion partielle) (Bonnefille, 2010).....	27
Figure 1.10 : La diffraction de la houle (Bonnefille, 2010).....	27
Figure 2.1 : la zone d'étude (Google Earth pro).	30
Figure 2.2 : Carte Bathymétrie à Cap Falcon.	31
Figure 2.3 : Rose trimestrielle et annuelle des houles de la région Ouest d'Algérie.....	34
Figure 2.4 : Les houles qui peuvent atteindre le site de cap Falcon.....	37
Figure 3.1 : Plan de masse de la variante 01	45
Figure 3. 2 : Plan de masse de la variante 02.....	47
Figure 3.3 : Coupe type d'une digue à talus	50
Figure 5.1 : Implantation des sondes	78
Figure 5.2 : Schéma montrant les différents modifications.....	86
Figure 5.3 : Comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne pour la direction N° 21	90
Figure 5.4 : Comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne pour la direction N°323.....	91
Figure 5.5 : Comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne pour la direction N° 353	92

Listes des photos

Photo 4.1 : Photo montrant la représentation des courbes bathymétriques.....	70
Photo 4.2 : Photo montrant les ouvrages de protection.....	71
Photo 5.1 : Etat initiale du bassin à houle.....	78
Photo 5.2 : La variante 1 en bassin à houle.....	80
Photo 5.3 : Déferlement important devant le musoir à H50ans	81
Photo 5.4 : Franchissement important à H100ans à l'essai d'endurance +0,90m qui retombent directement sur la berme du talus intérieur.....	82
Photo 5.5 : État des ouvrages après essai +0,90m. ci érosion assez importante du talus intérieur en enrochement 1-3t	83
Photo 5.6 : Élargissement de la dalle de roulement de la jetée principale pour atteindre 12,10m.....	83
Photo 5.7 : Déferlement très important au niveau du massif rocheux à H20ans	84
Photo 5.8 : Franchissement assez important à H10ans	85
Photo 5.9 : Quelque franchissement faible qui atteint légèrement le terre-plein	88

Liste des abreviations

APS : Avant-projet sommaire.

BCR : Béton Compacté Rouleau (**blocs cubiques rainurés**)

CERC: Costal Engineering Research Center

ENR : Enrochements naturels anguleux .

E : Est .

Hs : Hauteur significative.

L.E.M : Laboratoire d'Etude Maritime .

N : Nord.

NE : Nord-Est .

N.G.A : niveau générale d'Algérie.

N.O : Nord –Ouest .

O :ouest

S : Sud.

S.E : Sud –Ouest .

SSMO : Summury of Synoptic Meteorological Observations.

SWAN : Simulating Waves at Nearshore

SO : Sud –Ouest

TVC :Tout venent de carrière .

Liste des symboles

c : Coefficient butée

d : Profondeur maximale dans le prototype (m)

d' : Profondeur maximale en modèle (m)

e : Epaisseur de la carapace (m)

Fr : nombre de Froude (-)

g : Accélération (m/s^2)=

H_slocale : Hauteur significative à la cote

H_s : Hauteur significative de la houle de projet (m).

H : Cote d'utilisation de l'enrochement (m)

h : Cote de la butée par rapport au niveau de repos (m)

K_d : Coefficient de stabilité des blocs (-)

K_r : Coefficient de réfraction (-)

k_Δ : Coefficient de couche (-)

l : Longueur du bassin (m)

S : Surface à travers laquelle se produit l'échange latéral de quantités de mouvement résultant de l'échange des particules liquides (m^2)

n : Nombre de lits de blocs (-)

$\overline{u'v'}$: Moyenne du produit des fluctuations de la vitesse instantanée (m^2/s^2)

W : Poids des blocs de la carapace (t)

W_{moy} : Poids unitaire du bloc ou poids moyen d'engrènement (t)

w : Poids de BCR (t)

α : Angle formant le parement de la digue avec l'horizontale (degré)

γ_s : Poids spécifique des blocs ou engrènements (t/m^3)

γ_w : Poids spécifique de l'eau de mer (t/m^3)

λ : Echelle géométrique (-)

λ_v : Echelle de volume (-)

λ_s : Echelle de surface (-)

λ_θ : Échelle de l'angle (-)

ρ : Masse volumique du liquide (t/m^3)

Introduction générale

L'homme a toujours utilisé la mer comme voie de communication et a été obligé en même temps d'établir des abris pour assurer le contact entre la terre et la mer, il s'est donc retrouvé dans l'obligation de construire des ouvrages portuaires (port) pour protéger les navires et bateaux pendant les opérations de chargement et de déchargement des marchandises et d'aménager l'espace littoral.

La conception d'un port maritime est une tâche difficile, car elle nécessite un travail d'équipe multidisciplinaire. Plusieurs aspects doivent être abordés, y compris ceux liés à la connaissance de l'environnement naturel des sites potentiels d'implantation (houle, courant, etc.), les trafics prévus en termes de tonnage et taille des navires et les données techniques liées aux travaux internes et externes du futur port qui doivent être parfaitement maîtrisées.

Au final, l'emplacement du port est choisi en fonction de différents critères (bathymétrie, risque d'ensablement, exposition aux houles, exposition au vent, installations existantes, etc.). Le projet de la réalisation d'un port devrait également intégrer l'élaboration d'un premier plan de masse initial, comprenant les aménagements environnementaux nécessaires au bon fonctionnement du port.

Les ouvrages et aménagement maritimes sont très coûteux, donc avant de les réaliser il faut s'assurer que le bassin portuaire est bien abrité et s'assurer aussi que les ouvrages vont permettre de résister à la dynamique de la houle.

Pour mieux répondre aux objectives, le laboratoire d'étude maritime a conçu un modèle réduit physique pour le futur port de Cap Falcon.

L'étude sur ce modèle réduit physique sera le sujet de notre mémoire qui comporte (05) chapitres, décrits comme suit :

Dans **le chapitre 1** sont données des notions sur les ports et hydraulique maritime. Le **chapitre 2** concerne la collecte et l'analyse de données pour la conception du futur port de Cap Falcon. Le **chapitre 3** est consacré au pré-dimensionnement des ouvrages de protection maritimes. Dans le **chapitre 4** est présentée l'approche théorique du projet. Cette approche permettra le dimensionnement des ouvrages envisagés. **Le chapitre 5** a pour objectif de présenter l'étude expérimentale en modèle réduit du futur port de Cap Falcon.

A la fin de ce projet, une conclusion générale est donnée .

Partie 1

**1. Notions sur les ports et Hydraulique
maritime**

1. Notion sur les ports et Hydraulique maritime

1.1. Introduction

Depuis que l'homme utilise des navires et autres embarcations à des fins militaires ou commerciales pour transporter des personnes et des marchandises, pour pêcher, pour exercer des activités de sports ou de loisirs, il a dû rechercher ou aménager des sites où les navires puissent stationner de façon sûre.

La construction d'un port maritime, son équipement, l'aménagement de ses accès, la protection du rivage contre l'action de la mer constituent un ensemble d'opérations complexes, habituellement englobés sous la désignation de « travaux maritimes ». En fait, les travaux maritimes n'ont que très rarement une technique exclusive d'autres applications, leur caractère maritime provient essentiellement du site dans lequel ils sont réalisés ou du fait qu'ils sont destinés à la réception du navire dont la taille est devenue très importante.

1.2. Définition d'un port

Un port est une infrastructure construite par l'homme, située sur le littoral maritime, il est destiné à accueillir tous les types d'embarcations. Il est destiné à protéger les navires contre l'action de la houle et le vent. Le terme « port » désigne le plan d'eau, mais dans son utilisation courante, il comprend les ouvrages de protection (digues, jetées) et d'accostage (quais, appontements), qui bordent le plan d'eau proprement dit. (*Bos, 1984*).

Le port peut également être défini comme un bassin formant un abri naturel ou artificiel sur les rives d'un océan, d'un lac ou d'une rivière et permettant l'ancrage, le mouillage ou le stationnement à quai des bateaux à couvert de la houle et des vents violents.

1.3. Classification des ports

On distingue plusieurs types de ports :

- Des ports maritimes ;
- Ports de commerce ;
- Ports des travaux ;
- Ports de pêche ;
- Ports de plaisance.

1.3.1. Ports militaires

L'équipement portuaire militaire ne peut contenir qu'une rade de dimensions suffisamment grande pour permettre le développement rapide des navires de guerre et pour assurer une dispersion adéquate des bâtiments.

Généralement, le port militaire contient des installations complémentaires (postes à quai, installations de construction et réparation) qui sont protégées de l'action de la houle par des digues.

1.3.2. Ports de commerce

Ces ports peuvent fournir un trafic de voyageurs et de marchandises diverses ou spéciales.

Les ports peuvent également inclure des installations suivantes :

- Pour la construction et la réparation des navires ;
- Pour la pêche ;
- Pour la navigation de la plaisance.

1.3.3. Ports des travaux

Ces ports ont été créés pour l'exécution de grands travaux afin de servir à abriter les engins flottants (*Benidjer, 2013*).

1.3.4. Ports de pêche

Ils sont les plus nombreux dans le monde. Leurs dimensions sont les plus réduites par rapport aux autres ports. Leurs dimensions varient selon les bateaux accueillis : les chalutiers de haute mer partant pour plusieurs semaines auront besoin de plus d'espace de quai en revenant décharger leur cargaison, tandis que les petits bateaux partant à la journée auront besoin de moins d'espace pour pouvoir décharger rapidement. L'infrastructure de ces ports est plus simple que celle d'un port de commerce : quelques quais ou pontons, une station de ravitaillement et éventuellement une zone de traitement avant la vente (*Dahmen, 2011*).

1.3.5. Ports de plaisance

Suite au développement des loisirs maritimes, des ports de plaisance sont spécialement créés. Des caractéristiques sont exigées dans la plaisance tels que la taille et le type des navires et des conceptions variables pour l'aménagement des ports.

Notions sur les ports et Hydraulique maritime

Ils accueillent les bateaux de plaisance, de loisir et de compétition. La plupart des bateaux sont de petite taille (inférieur à 20 m) et les places de port sont standardisées. Différentes techniques d'amarrage sont utilisées selon les endroits. Ce type de ports est souvent situé près du centre des villes pour des raisons touristiques et pratiques (*Toudji, et al., 2010*)

1.4. Rôle des ports

Les ports sont destinés à protéger les navires de l'action de la houle pour leurs permettre :

- De stationner en attendant de partir pour un autre voyage ;
- D'effectuer les opérations commerciales d'embarquement et de débarquement des passagers et de marchandises et d'avitaillement ;
- D'être construits, entretenus et réparés (*Chapon, 1971*).

1.5. Les principales composantes d'un port

On peut classer les ouvrages constituant le port en trois grandes classes qui sont :

- Les ouvrages extérieurs (de protection) ;
- Les ouvrages intérieurs ;
- Les ouvrages d'accostages.

1.5.1. Les ouvrages extérieurs (de protection)

Les ouvrages de protections contre la houle sont les ouvrages qui permettent la protection d'un port ou une partie d'un port contre les actions de la houle.

On peut classer les ouvrages en :

1. Digue ou jetées : on distingue deux types :
 - ❖ Digue à talus.
 - ❖ Digue verticale : peut-être ou non perméable.
2. Ouvrages spéciaux qui sont employés dans les conditions spécifiques :
 - ❖ Le mur d'eau fixe ;
 - ❖ Les brises lames flottants ;
 - ❖ Les ouvrages de pré déferlement ;
 - ❖ Mur d'eau oscillant.

Les types les plus utilisés sont :

1.5.1.1 Dignes à talus

Les digues à talus sont réalisées au moyen de matériaux rocheux et blocs plus ou moins grossiers, arrangés globalement sous la forme d'un trapèze qui va opposer à la progression de la houle une résistance d'autant plus efficace que le massif sera élevé et peu poreux. (*Ghomri, et al., 2006*)

Leur réalisation est devenue facile grâce aux techniques récentes de mise en place de grands volumes de matériaux naturels et aux possibilités de réaliser des blocs artificiels. Les digues à talus offrent une grande sécurité car leur ruine est rarement immédiate et complète, et leur endommagement par la houle est progressif et des réparations limitées peuvent être effectuées facilement et dans des délais courts, sans oublier qu'elles jouent un rôle favorable dans la protection du plan d'eau.

1.5.1.2 Digue verticale

Une digue verticale est essentiellement composée d'un mur vertical monolithique ou constituée d'éléments assemblés entre eux destinés à renvoyer l'énergie de la houle par réflexion totale.

Elle est assise sur un massif de fondation généralement constitué d'enrochements de petite taille protégé contre l'action de la houle par des éléments de taille beaucoup plus importante.

La figure 2.1 indique les principales dimensions à donner à l'ouvrage en fonction de la hauteur de la houle de projet H dans le cas où la digue n'est soumise qu'à l'action d'une houle non déferlante. (*Scherrer, 2010*).

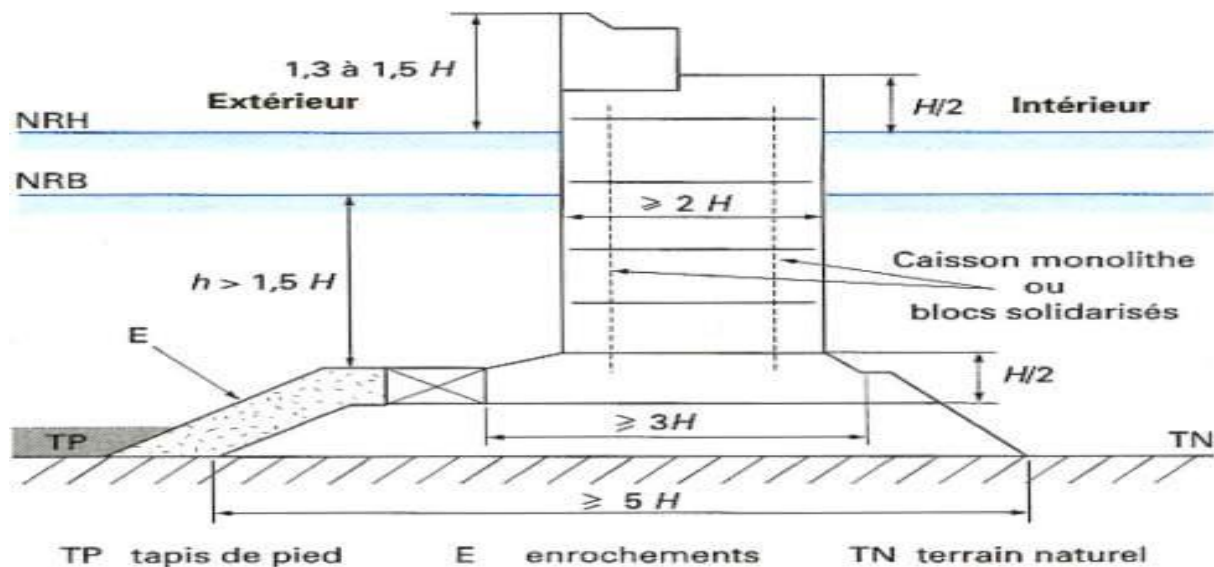


Figure 1.1 : Principales dimensions d'une digue verticale (*Scherrer, 2010*)

1.5.2. Les ouvrages intérieurs

Les plans d'eau servent à l'élaboration et au stationnement des navires, ils sont constitués de : (*Benidjer, 2013*).

- Bassins de marée dont le niveau suit celui de la marée ;
- Bassins à flot, dont le niveau suit celui de la mer qui est maintenu à un niveau constant.

Dans ce cas, la communication entre bassins se fait par des écluses.

i. Les aires de stockages des marchandises

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

ii. Zones industrielles portuaires

Les ouvrages pour la construction, la réparation et l'entretien des navires sont les cales de lancement, cale de halage.

1.5.3 Les ouvrages d'accostages

Les ouvrages d'accostages sont les quais qui ont les rôles suivants :

- Permettre l'accostage et l'amarrage des navires ;
- Soutenir les terres au contact avec les plans d'eau ;
- Assurer la liaison entre la terre et le navire. (*Ghomri Et Al., 2006*)

1.5. Notion de la houle

L'étude expérimentale en modèle réduit physique de l'aménagement du port de plaisance de Cap Falcon Ain-El-TURK nécessite la connaissance théorique des phénomènes du milieu marin (houle, courant...).

1.6.1. Formation de la houle

La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage.

On appelle houle cet ensemble d'ondulations ou de vagues. (La houle est donc un mouvement qui se traduit par une oscillation périodique).

1.6.2. Paramètres caractéristiques de la houle

La houle est caractérisée par (figure 1.2) :

- Sa hauteur H ou creux : c'est la dénivellation maximale entre une crête et un creux successif ;
- Sa longueur d'onde L : c'est la distance horizontale qui sépare deux crêtes ou creux successives ;
- Son amplitude A : c'est la distance entre la crête et le niveau de l'eau au repos ;
- Sa cambrure ou rapport d'aspect : $C = H / L$;
- Sa période T : c'est le temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe ;
- Sa vitesse moyenne de la propagation des crêtes (célérité) : $C = \frac{L}{T}$;
- Sa profondeur D : c'est une hauteur d'eau moyenne au repos ;
- Son Fetch qui correspond à la distance sur laquelle le vent souffle pour engendrer des vagues ;
- $\eta(x, t)$: c'est une surface libre par rapport au niveau de repos.

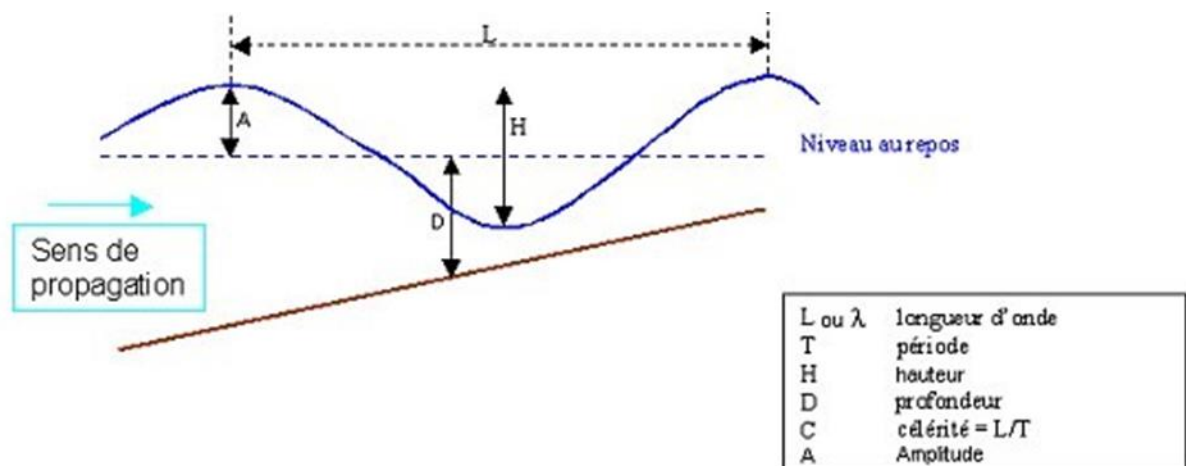


Figure 1.2 : Courbe représentative des caractéristiques de la houle (*Bonnefille, 1980*)

Le creux de la houle en période de tempête est de l'ordre de quelques mètres ; il ne dépasse pas une vingtaine de mètres sur le globe terrestre. La longueur d'onde de la houle varie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. La période varie entre 3 s à 20 s selon les dimensions de la mer. La cambrure de la houle est toujours de l'ordre de quelques %, elle ne peut

théoriquement pas dépasser 14 %, mais elle est toujours plus faible, car la houle déferle avant qu'elle atteigne cette valeur (*Bonnefille, 1992*).

1.7. Déformation 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.

1.7.1. Le déferlement de la houle

Le déferlement se produit quand les lames d'eau atteignent une certaine cambrure limite, au-delà de laquelle le profil devient instable. Il se produit alors une brisure de la partie haute de la houle (*Ameur, et al., 2009*).

Différents types de déferlement sont observés. D'une part, le déferlement au large causé soit par une barre au niveau de laquelle le fond remonte brusquement, soit en haut-fond avec deux vagues se superposant, soit par le vent. D'autre part, le déferlement se produit lorsque la houle arrive sur la côte. Ce dernier peut être décomposé en trois types :

- Le déferlement glissant ou déversant par pente faible (figure 1.3) ;
- Le déferlement plongeant par pente plus forte (figure 1.4) ;
- Le déferlement gonflant ou frontal par pente forte (figure 1.5). (*Bonnefille, 2010*).

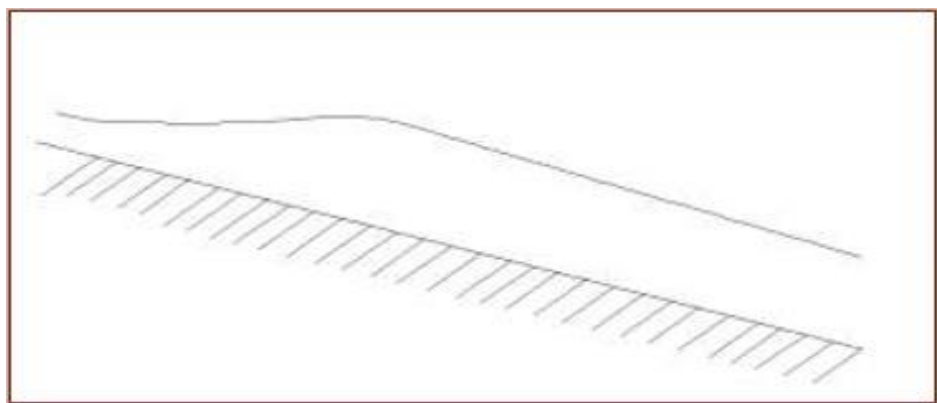


Figure 1.3 : Le déferlement glissant (*Bonnefille, 2010*)

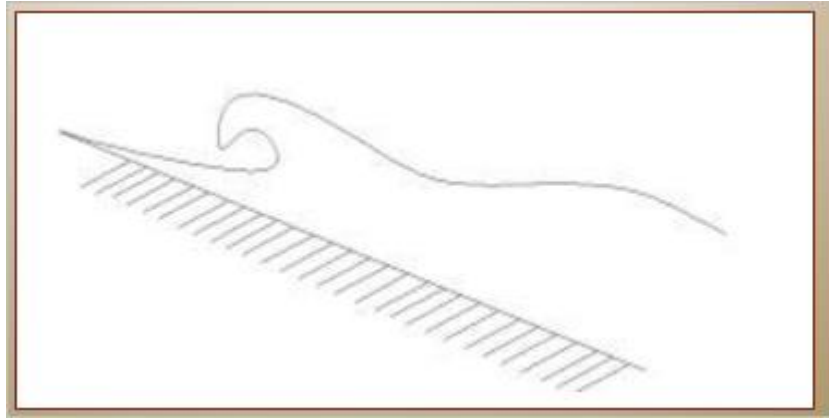


Figure 1.4 : Le déferlement glissant plongeant par pente forte (*Bonnefille, 2010*)

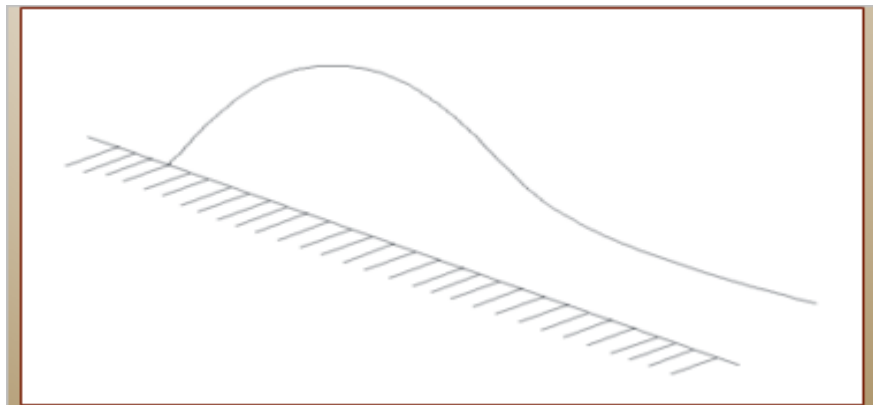


Figure 1.5 : Le déferlement frontal (*Bonnefille, 2010*)

1.7.2. La réfraction de la houle

Lorsque la houle se propage dans un milieu à profondeur variable, sa célérité n'est plus la même tout le long du front d'onde. Les crêtes se déforment en plan : la houle réfracte. Dans les zones de faibles profondeurs, inférieures à 4 % de la longueur d'onde. La célérité est alors :

$$V = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$$

Dans ce cas, les vagues se propagent à la même vitesse quelles que soient leurs périodes.

La diminution de la célérité avec la profondeur a les conséquences suivantes :

- Lorsque la houle se propage normalement aux lignes bathymétriques, sa longueur d'onde diminue au fur et à mesure de l'approche du rivage, car sa période reste constante. Les lignes de crêtes sont plus serrées au voisinage du rivage ;
- Lorsque la direction de la houle est quelconque par rapport aux lignes d'égalles profondeurs, les célérités sont différentes en deux points voisins d'une même crête de houle ; par exemple la longueur d'onde AA' est inférieure à BB' (figure 1.6). Les lignes

Notions sur les ports et Hydraulique maritime

de crêtes ne restent donc pas parallèles ; elles sont plus serrées du côté des petites profondeurs. Le résultat est que les lignes de crêtes de la houle sont incurvées ; la houle tourne de façon à ce que ses lignes de crêtes deviennent parallèles aux lignes bathymétriques. Cet état d'équilibre est parfois atteint avant le déferlement si la pente du fond est très faible ; c'est le cas des plages au fond des baies ; il n'est pas atteint si la houle est très oblique, ou si le fond varie rapidement au voisinage de la côte. (*Bonnefille, 2010*)

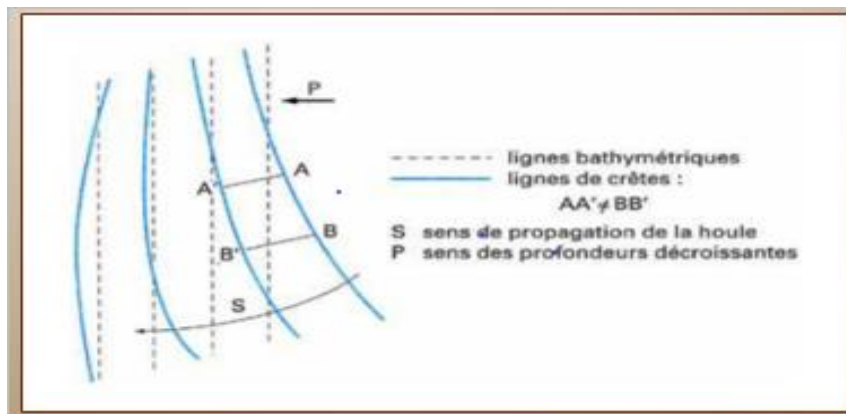


Figure 1.6 : Réfraction de la houle (*Bonnefille, 2010*)

1.7.3. Réflexion de la houle

1.7.3.1. Réflexion sur paroi verticale (Réflexion totale)

Lorsque la houle aborde sans déferler un mur vertical normal à sa direction de propagation, la vitesse de chaque particule d'eau se réfléchit sur la paroi imperméable. Une onde réfléchie identique à l'onde incidente, mais de direction opposée, cette onde est appelée clapotis, et on distingue deux sortes de clapotis.

a) Clapotis au premier ordre d'approximation

Les deux ondes peuvent se superposer et les trajectoires des particules sont des droites horizontales aux nœuds d'oscillation N, verticales aux ventres V, l'amplitude au ventre étant $2H$ (*Bonnefille, 2010*) (Figure 1.7).

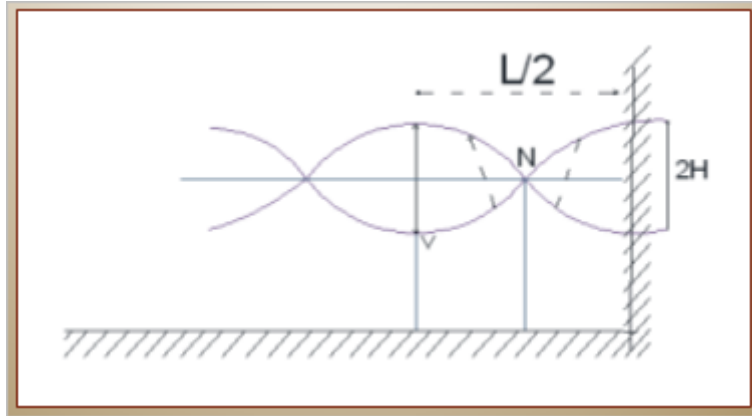


Figure 1.7 : La réflexion sur un mur vertical (clapotis du 1^{er} ordre) (*Bonnefille, 2010*).

b) Clapotis au deuxième ordre d'approximation

Les trajectoires des particules sont paraboliques, à axe vertical aux nœuds et à axe oblique pour les autres positions (*Bonnefille, 2010*).

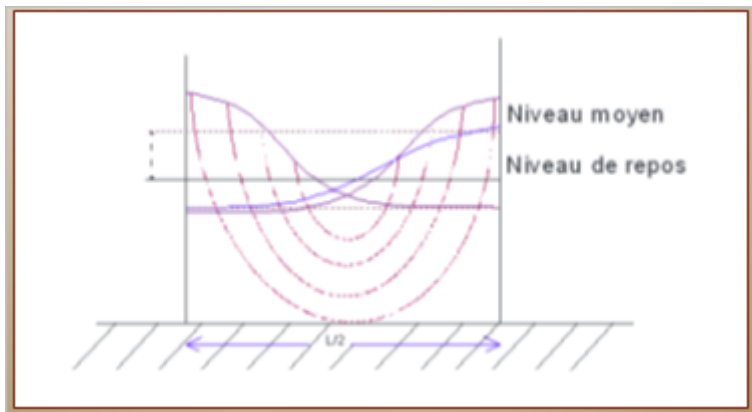


Figure 1.8 : La réflexion sur un mur vertical (clapotis du 2^{ème} ordre) (*Bonnefille, 2010*).

1.7.3.2. Réflexion sur paroi inclinée (Réflexion partielle)

Lorsque la paroi réfléchissante est un plan faisant l'angle α avec l'horizontale, la réflexion n'est que partielle. Lorsque la cambrure est forte, une partie de l'énergie est détruite par déferlement. (*Bonnefille, 2010*).

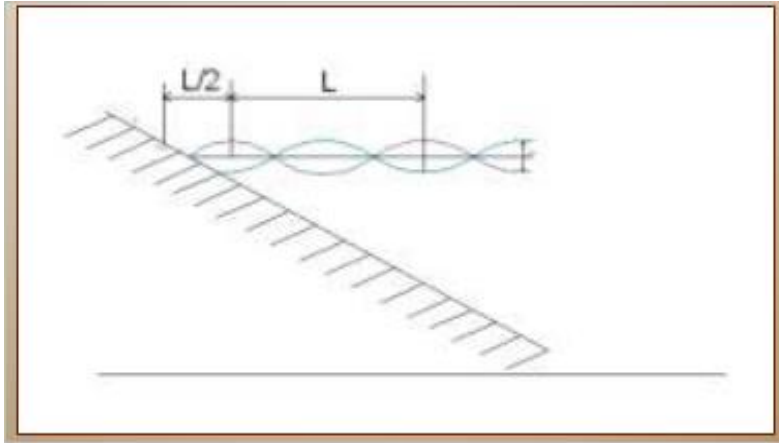


Figure 1.9 : La réflexion sur une paroi inclinée (Réflexion partielle) (Bonnefille, 2010).

1.7.4. Diffraction de la houle

Lorsqu'une houle ne se propage plus en ligne droite ou régulière, comme c'est le cas par exemple au contact d'un ouvrage à l'approche duquel une partie du front d'onde seulement est arrêtée, des oscillations se manifestent derrière l'extrémité de cet ouvrage en le contournant : On dit que la houle diffracte. (Ameur et al., 2009).

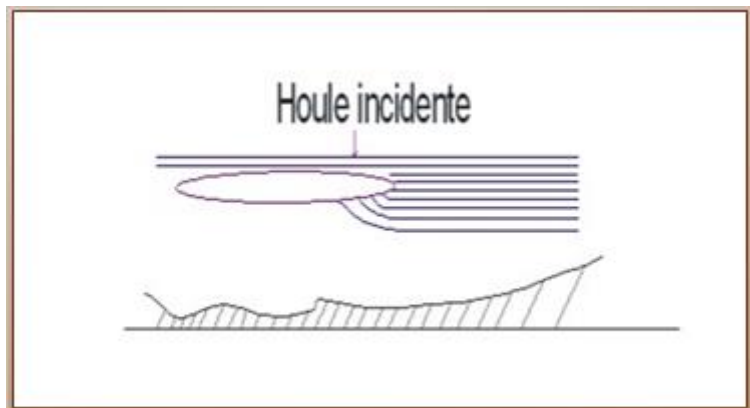


Figure 1.10 : La diffraction de la houle (Bonnefille, 2010).

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu identifier les différentes déformations de la houle et les ouvrages portuaires nécessaires qui constituent le futur port de Cap Falcon.

2. Collecte et analyse des données

2. Collecte et analyse des données de base

2.1 Introduction

L'étude expérimentale en modèle réduit physique de l'aménagement du port de plaisance de Cap Falcon Ain-El-TURK nécessite la connaissance des caractéristiques du site ainsi que l'analyse de toutes données disponibles concernant le site du port et ses alentours (données physiques ; données météorologiques ; données océanographiques ...etc.).

2.2 Situation du site

Le nouveau port est prévu dans le cap Falcon sur la commune d'Ain El Türk, dans la wilaya d'Oran.

La wilaya se situe sur le littoral Nord-Ouest du pays et dispose d'une façade maritime de 120 km. Elle est limitée :

- Au Nord par la mer méditerranée ;
- Au sud par les wilayas de Sidi bel Abbes et Mascara ;
- A Sud-Ouest par la wilaya d'Ain T'émouchent ;
- A l'Est par la wilaya de Mostaganem.

La zone d'étude couvre les sites de la Madrague et Cap Falcon et est comprise entre les extrémités Est de la baie des andalouses et l'Ouest de la baie des aiguades.

Cette zone s'inscrit entre les coordonnées Lambert suivantes :

$$\begin{cases} X = 179,800 - 185,000 \text{ m} \\ Y = 279,500 - 281,300 \text{ m} \end{cases}$$

La situation géographique de ce port de plaisance est la suivante :

Longitude Ouest : $0^{\circ}45'30''$ - Latitude Nord : $35^{\circ} 46'$



Figure 2.1 : La zone d'étude (Google Earth)

2.3 Données de base

La conception et la réalisation d'un port maritime nécessite une connaissance approfondie des facteurs naturels et notamment des divers mouvements de la mer.

2.3.1. Données physiques

Les conditions physiques qui caractérisent le littoral sont importantes pour les opérations d'aménagement.

Dans le cadre de la construction d'un port, le tracé, le type et le dimensionnement des ouvrages de protection dépendent des données physiques de site à aménager ; elle se traduit par la bathymétrie et la topographie.

2.3.1.1. La topographie

Un levé topographique a été effectué par le LEM en juin 1985 à l'échelle 1/1000 dans le cadre de l'étude d'aménagement du port de plaisance à Cap Falcon. La topographie du site de Cap Falcon est très accidentée, présentant des escarpements rocheux de pente très accentuées (de l'ordre de 60% à 50 m environ du rivage).

2.3.1.2. La bathymétrie

Dans le cadre de l'étude de l'aménagement du port de plaisance à Cap Falcon une campagne de bathymétrie a été effectuée par le L.E.M sur la zone d'étude.

La zone de Cap Falcon comprise entre la cote et l'isobathe -13 m, s'inscrit entre 700 m de cote et 600 m vers le large, il ressort de ce levé que la pente des fonds est de l'ordre de 2%.

D'après la carte marine « Mer Méditerranée – Cote d'Algérie, de Bordj Bouabed à Arzew, Bathymétrie d'après les levés de 1926-1930 et 1931-1933 » : l'isobathe de -20 m se trouve à environ 880 m de la cote et une pente prononcée de 2.27% environ.

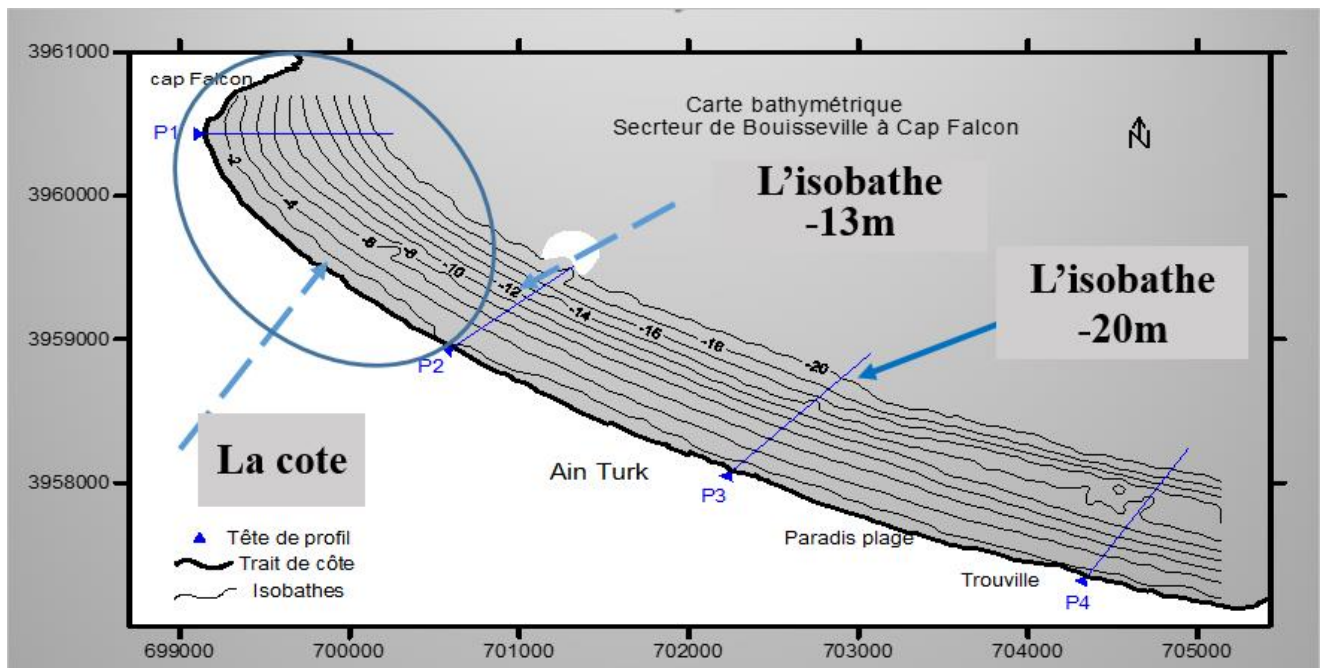


Figure 2.2 : Carte Bathymétrie à Cap Falcon.

2.3.2. Données météorologiques

Elles se résument à la température de la surface de la mer, le climat, les précipitations ainsi les données de la marée et les données de vent au niveau du site.

2.3.2.1. Le climat

Le climat de la région d'Oran est de type méditerranéen caractérisé par un été chaud et sec et un hiver frais et humide.

2.3.2.2. Les températures

Les températures sont modérées par la proximité de la mer avec des moyennes annuelles de 17,4° C à cap Falcon. Cette modération se traduit par une faible amplitude moyenne annuelle (12,65° C à cap Falcon).

2.3.2.3. La Marée et variation du niveau marin

Les phénomènes astronomiques engendrent des oscillations à très longue période qu'on appelle les marées.

La variation du niveau marin se produit essentiellement sous trois facteurs, nous pouvons citer :

- La marée ;
- La surélévation dynamique de la houle provoquée par le déferlement sur la frange du littoral ;
- Le vent.

La marée est réduite en Méditerranée, on a enregistré sur les côtes en Algérie, des variations inférieures à 10 cm. Elle peut néanmoins présenter quelques écarts selon l'époque lunaire, de pleine lune la marée est évaluée entre 25 et 30 cm, et après de 5 à 15 cm lors de la nouvelle lune. Ces variations peuvent s'accumuler à d'autres phénomènes tels que la pression atmosphérique, seiches, etc.

Les vents marins forts localement, peuvent également entraîner au rivage un gonflement du plan d'eau par action sur la surface de la mer.

En l'absence d'enregistrements de marée sur le site, le LEM s'est référé aux données d'Annaba; la différence entre les plus basses eaux et les plus hautes eaux connue est de 0,9 m.

2.3.2.4. Les Vents

Les données de vents utilisées sont ceux du Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO).

Les données de l'U.S. Naval Weather Service Command (S.S.M.O) sont basées sur les observations visuelles à partir des bateaux pour la période allant de 1914 à 1970.

Ces renseignements montrent que les vents dominants sont ceux provenant des secteurs Ouest et Sud-Ouest, Est et Nord-Est. (tableaux 2-1 et 2-2).

Tableau 2-1 : Répartition annuelle des vents par direction.

Direction	S.O	O	N.O	N	N.E	E	S.E	S
%	22,50	17,00	5,00	6,00	24,00	13,00	2,00	4,00*

Tableau 2-2 : Répartition des vents d'intensité supérieure à 10 m/s

	DIRECTIONS								
Vitesse m/s	S.O	O	N.O	N	N.E	E	S.E	S	TOTAL
10 à 15	14,40 %	35,45%	03,94%	23,85%	05,63%	01,58%	00,56%	02,25%	87,66%
> 15	01,01%	08,33%	01,46%	01,12%	00,23%	00,00%	00,00%	00,23%	12,34%

En se basant sur les données du SSMO, on détermine les fréquences d'apparition du vent sous forme de roses de vents pour chaque trimestre et pour toute l'année (figure 2.3).

Il ressort de cette analyse deux périodes distinctes où les vents dominant :

- En hiver, le secteur Ouest à Sud-Ouest est caractérisé par des vents fréquents et quelques fois forts et qui sont régulièrement répartis entre le 1er et le 4ème trimestre de l'année ;
- En été, secteur Est à Nord-Est est caractérisé par des vents très fréquents et forts pendant le 2ème et 3ème trimestre de l'année avec des périodes de pointes pendant le 3ème trimestre.

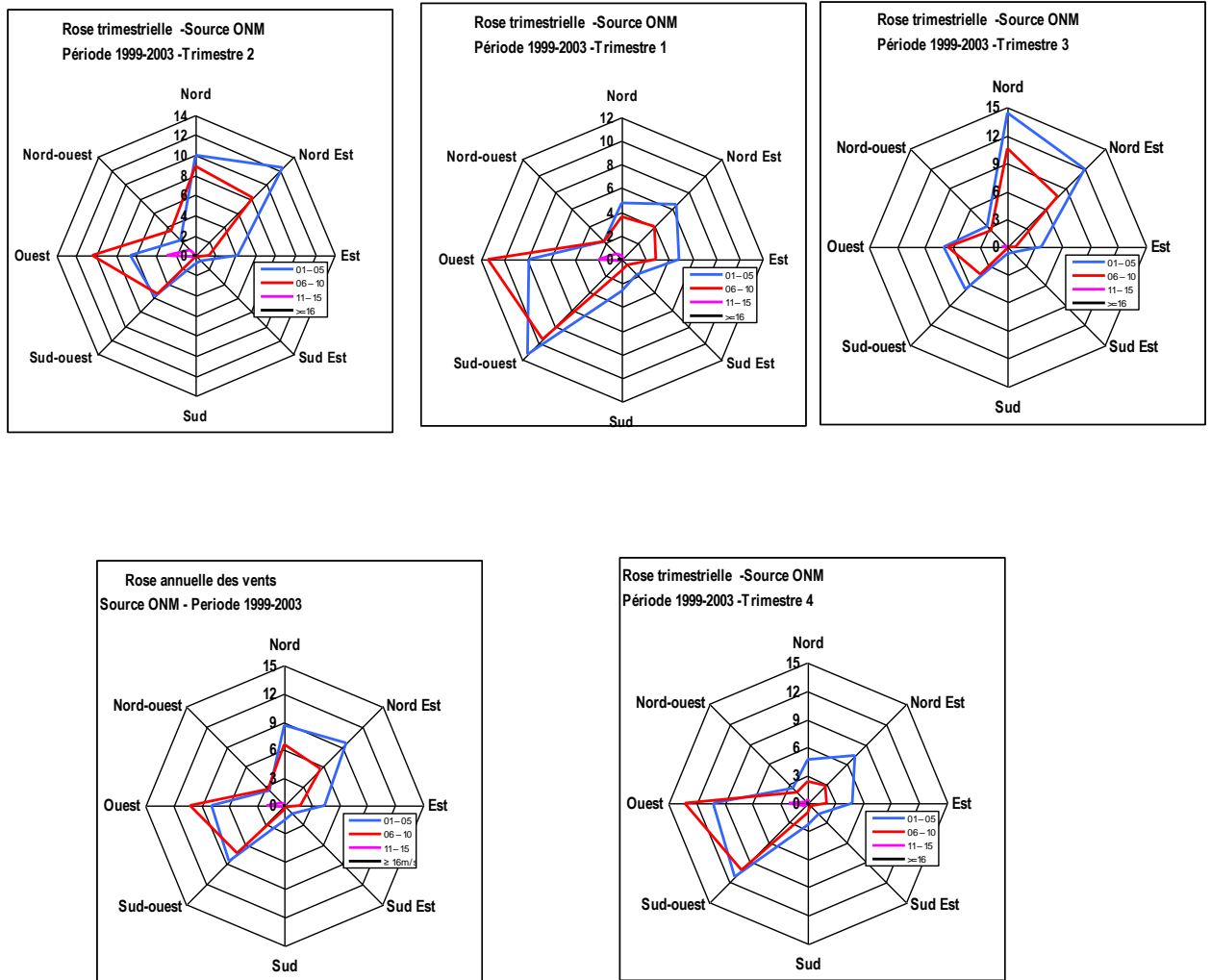


Figure 2.3 : Les rose trimestrielle et annuelle des vents de la région Ouest de l'Algérie

✚ Conclusion

Les vents d'Ouest et Sud-Ouest sont les plus fréquents et les vents du secteur Nord-Est bien que moins fréquents, sont les plus dangereux.

L'analyse de ces données montre que les vents défavorables pour le port de plaisance de Cap Falcon sont ceux provenant des secteurs Ouest, Sud-Ouest et Nord-Est.

2.3.3. Données océanographiques

Ce sont toutes les données ayant rapport avec la réfraction de la houle et sa propagation du large vers la cote.

2.3.3.1. La houle au large

Les données de houle au large utilisées pour le calcul de réfraction de la houle au LEM sont celles du Summary of Synoptic Meteorological observations (SSMO) sur la période de 1963 à 1970.

- Une analyse statistique de ces données de base par la rose annuelle des houles permet de définir les secteurs des houles dominants.

La rose annuelle des houles met en évidence la prédominance des houles du secteur NE (25,20 %), SO (19,40 %) et Ouest (12,40 %). La fréquence d'apparition des houles d'amplitude supérieure à 4 m est de l'ordre de 0,1 %. Les houles calmes sur l'année représentent 14.5 % des observations.

- Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle annuelle par direction et par période, ainsi que la détermination de la probabilité de retour des houles biannuelle, quinquennale, décennale, Vingtennale, Cinquantennale et centennale.

Les périodes de houle considérées dans le cadre de l'étude de réfraction 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 2-3 : Amplitude de la houle annuelle au large par direction et par période

Période de la houle (s)	Direction de la houle au large			
	N 360°(Nord)	N 45°(Nord-Est)	N315°(Nord-Ouest)	N 270°(Ouest)
6	$H_s = 1,07\text{m}$	$H_s = 1,15\text{m}$	$H_s = 1,11\text{m}$	$H_s = 1,16\text{m}$
8	$H_s = 2,68\text{m}$	$H_s = 2,56\text{m}$	$H_s = 2,49\text{m}$	$H_s = 2,67\text{m}$
10	$H_s = 7,12\text{m}$	$H_s = 5,84\text{m}$	$H_s = 4,53\text{m}$	$H_s = 4,83\text{m}$

Les caractéristiques des houles extrêmes retenues pour la détermination des conditions de houles au pied des ouvrages de protection à projeter (dimensionnement des ouvrages) sont présentées dans tableau ci-dessous.

Tableau 2-4 : Hauteurs significatives de houles en mètres et périodes en secondes associées aux Périodes de retour et par directions.

Période de retour (ans)		Nord (N 360°)	Nord-Ouest (N 315°)	Ouest (N 270°)	Nord Est (N 45°)
Biennale	H _s (m)	4,20	4,70	6,70	5,40
	T _p (s)	10,00	10,65	12,64	11,42
Quinquennale	H _s (m)	5,30	6,10	8,00	6,30
	T _p (s)	11,30	12,10	13,67	12,29
Décennale	H _s (m)	5,90	7,10	8,80	7,00
	T _p (s)	11,92	12,98	14,22	12,90
Vingtennale	H _s (m)	6,70	8,10	9,70	7,60
	T _p (s)	12,64	13,74	14,78	13,36
Cinquantennale	H _s (m)	7,70	9,50	9,80	8,50
	T _p (s)	13,45	14,66	14,84	14,02
Centennale	H _s (m)	8,40	10,40	11,70	9,20
	T _p (s)	14,00	15,18	15,94	14,48

2.3.3.2. Choix du secteur angulaire

Le secteur angulaire étudié correspond aux limites naturelles imposées d'une part, par la composition géographique du site d'étude, et d'autre part, selon la zone d'intérêt pour les houles du large.

Quatre directions ont été choisies, en tenant compte des tableaux de fréquence selon la direction des houles au large et de l'occurrence de ces houles par rapport à la zone d'étude (figure 2.4):

- Une (01) direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (N360°) ;
- Trois (03) directions de houle à incidence approximativement oblique (N45°, N 315°,N270°).



Figure 2.4 : Les houles qui peuvent atteindre le site de cap Falcon.

2.3.3.3. Résultats de réfraction de la houle par SWAN

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

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

Le coefficient de réfraction est calculé par SWAN. Ce coefficient est défini comme suit:

$$K_r = \frac{H_{s\text{ locale}}}{H_{s\text{ large}}}$$

Avec, H_s locale c'est la hauteur significative à la cote et H_s large c'est la hauteur de la houle au large.

Les résultats de l'étude de la propagation de la houle sont illustrés par les épures réfractives qui expliquent qualitativement comment la hauteur et la direction de l'onde changent pendant la propagation de la houle.

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 : 3, 5, 10, 15 et 20 m pour les houles Cinquantennale et centennale.

Les résultats obtenus pour le calcul de la houle pour différentes périodes de retour sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 2-5 : Moyennes des résultats obtenus par direction et par période de la houle annuelle à 10m.

Direction N degré	Période(s)	Amplitude de la houle au large H_s (m)	Amplitude de la houle A 10m	Angle d'arrivée Degré	Coefficient de réfraction K_r A 10m
N360°	6	1,07	1,00	358,00	0,93
	8	2,68	2,48	355,00	0,92
	10	7,12	5,54	354,00	0,77
N315°	6	1,11	1,02	318,00	0,92
	8	2,49	2,30	321,00	0,92
	10	4,53	4,20	324,00	0,93
N45°	6	1,15	0,90	33,00	0,78
	8	2,56	1,90	24,00	0,74
	10	5,84	4,14	17,00	0,71
N270°	6	1,16	0,81	285,00	0,70
	8	2,67	1,69	294,00	0,63
	10	4,83	3,02	303,00	0,62

D'après les résultats de la réfraction de la houle annuelle, on remarque que :

- Pour la houle de direction N360° de période (6s et de 8s) : elle conserve son énergie et son coefficient de réfraction est de 0,9, celle de période 10 s perd 30 % de son

énergie. L'angle de déviation maximum de cette direction est de 6° , elle attaque la côte de manière presque frontale.

- Pour la houle de direction $N315^\circ$: elle conserve son énergie pour les trois périodes. Son angle de déviation maximum est de 9° , elle aborde le rivage de manière presque frontale.
- Pour les houles de direction $N270^\circ$ et $N45^\circ$: elles perdent presque la moitié de leur énergie. Leur angle de déviation maximale est : 33° et 28° respectivement.

On constate donc que les houles les moins réfractées et qui gardent la totalité de leur énergie sont les houles de direction $N360^\circ$ et $N315^\circ$.

Tableau 2-6 : Moyenne des résultats obtenus pour les houles de différentes périodes de retour à différentes profondeurs

Période de retour (ans)	Direction (degré)	Profondeur (m)	-20		-15		-10		-5		-3	
			H_s (m)	K_r	H_s (m)	K_r	H_s (m)	K_r	H_s (m)	K_r	H_s (m)	K_r
50ans	$N360^\circ$	7,70	7,18	0,93	7,17	0,92	5,91	0,76	3,92	0,50	2,75	0,35
	$N315^\circ$	9,50	8,74	0,92	8,43	0,88	6,29	0,66	4,04	0,42	2,80	0,29
	$N45^\circ$	8,50	6,01	0,70	5,89	0,69	5,31	0,62	3,81	0,44	2,79	0,32
	$N270^\circ$	9,50	6,51	0,66	6,81	0,69	5,83	0,59	3,94	0,40	2,75	0,28
100ans	$N360^\circ$	8,40	7,86	0,93	7,72	0,92	6,18	0,73	4,05	0,48	2,83	0,33
	$N315^\circ$	10,40	9,52	0,91	8,97	0,86	6,52	0,62	4,17	0,40	2,89	0,27
	$N45^\circ$	9,20	6,44	0,70	6,29	0,68	5,50	0,59	3,88	0,42	2,82	0,30
	$N270^\circ$	11,70	7,71	0,65	7,86	0,67	6,22	0,53	4,07	0,34	2,85	0,24

Cette analyse montre que pour les périodes de retour Cinquantennale et centennale, les houles de direction $N270^\circ$ et $N45^\circ$ se réfractent le plus à la profondeur de 10 m par rapport aux autres directions où le coefficient de réfraction K_r atteint 0,6 ; c'est-à-dire que les houles perdent 40% de leur énergie durant leurs propagations du large vers la côte -10m. Par contre, les deux autres directions ($N360^\circ$, $N315^\circ$) à 10m de profondeur perdent (20 à 30%), de leur énergie (K_r compris entre 0,76 et 0,62).

A - 5 m et - 3 m, les quatre directions présentent les mêmes coefficients de réfraction et amplitudes. En terme d'énergie et amplitudes ce sont les houles de direction N360° N315° qui prédominent.

Conclusion

Les houles défavorables pour le futur port de cap Falcon sont les houles de directions N 360° et N 315°. Elles atteignent le site de manière frontale. La houle de projet est la houle centennale de direction N 360° ou N 315°. Ces dernières vont être prises dans le dimensionnement des ouvrages de protection.

2.3.3.4. Les courants

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

2.3.3.4.1. Les courants de marée

Sur les côtes algériennes les courants de marée, du fait du faible marnage des marées, sont négligeables voire même inexistantes.

2.3.3.4.2. Les courants de houle

Quand la houle déferle avec une certaine obliquité par rapport au rivage, elle donne naissance à un courant parallèle au rivage dont le sens est celui de la composante suivant le rivage de la célérité des vagues. Ce courant est localisé dans la zone comprise entre le déferlement et la côte.

Des échanges importants peuvent se faire entre la côte et le large par des courants orientés vers les larges appelés courants de retour ou « rip currents » ; ces courants traversent la zone de déferlement. Les écoulements sont concentrés dans des zones étroites, sensiblement perpendiculaires à la côte et séparés de façon régulière.

2.3.3.4.3. Les courants côtiers

Les courants agissent pendant l'hiver et ont une direction Ouest - Est par houle NO, le reste de l'année les courants ont une direction Est - Ouest. Ces courants locaux peuvent favoriser le transport près de la côte, induit par le déferlement des houles et des courants de houles le long de la côte (transport littoral et transport perpendiculairement au rivage).

Les instructions nautiques signalent l'existence d'un courant général au large portant vers l'Est et pouvant atteindre 2,5 nœuds.

Au voisinage de la côte, il y aurait un courant allant du cap de Garde vers l'Oued Mafragh avec une vitesse maximale de 1,5 nœuds.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les données topographiques, bathymétriques et les vents défavorables pour le site de Cap Falcon ainsi que les fréquences selon la direction des houles au large et l'occurrence de ces houles par rapport à la zone d'étude. Nous avons aussi étudié la réfraction de la houle entre le large et la côte. Ces données seront nécessaires dans les chapitres suivants pour élaborer la variante d'aménagement, le pré dimensionnement des ouvrages et l'étude sur modèle réduit.

3.Pré dimensionnement des ouvrages

3. Pré dimensionnement des ouvrages

3.1 Introduction

Dans le cadre d'une étude, le dimensionnement des différents éléments de l'ouvrage hydraulique est d'abord fait en se basant soit sur des formules théoriques ou empiriques, soit sur l'expérience d'ouvrages analogues existants.

3.2 Etude des variantes

Sur la base des résultats des reconnaissances générales topographiques, bathymétriques 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 deux (02) scénarios d'aménagement pour la réalisation d'un port de plaisance.

La détermination des besoins nécessaire pour le futur port de plaisance nous a permis d'étudier deux variantes d'aménagement afin de retenir la variante la plus favorable sur le plan technico-économique.

3.2.1 Variante d'aménagements 01

Les principales composantes de cette variante sont :

Ouvrages de protection

Les ouvrages de protection qui constituent cette variante sont :

- Une jetée principale de longueur de 1400ml, fondée à des profondeurs variant entre 0,0m et -11,0m ;
- Une jetée secondaire de longueur de 500ml, fondée à des profondeurs variant entre 0,0m et -9,0m ;
- Une passe d'entrée de 85 ml orientée vers le Nord-Est.

Ouvrages d'accostage

Les ouvrages d'accostage qui constituent cette variante sont :

- Un quai d'avitaillement de 80 ml fondé à -4,50 m, situé au niveau des terre-pleins adossés au musoir de la jetée principale ;

- Un quai de 60 ml pour les gardes côtes fondés à -4,50 m, situé au niveau des terre-pleins adossés le quai d'avitaillement ;
- Un môle de 200 ml de long et 110 m de largeur divisant le plan d'eau en deux sous bassins ;
- Un quai de 165ml dédié aux grands voiliers.

Pour les bateaux de (6,0 * 2,5 * 1,5) il a été prévu comme suit :

- 8 appontements flottants de 100ml + deux quais d'une longueur totale de 220ml fondés à -4,50m.

Pour les bateaux de (9,0 * 3,0 * 1,5) et de (12,0 * 3,5 * 2,5), il a été prévu comme suit :

- 04 appontements flottants de 100ml + un quai d'une longueur 110ml fondés à -4,50m.

Pour les bateaux de (15,0 * 4,0 * 2,5), il a été prévu comme suit :

- Quai d'une longueur de 707ml fondés à -4,50m.

✚ Ouvrages de réparation

- Estacade de 09 x 25 m avec un tirant d'eau de 4,5 m ;
- Cale de halage de 10 x 40 m avec une pente de 10%.

✚ Terre-pleins

- Un terre-plein ayant une superficie totale 19,70Ha ;
- La surface totale du plan d'eau est d'environ 26Ha ;
- Mur de soutènement de 1 334 m de longueur réalisé en béton armé.

✚ Route d'accès par voie terrestre : Linéaire de la route est de 330 ml.

✚ Capacité du port

La capacité totale du port est de : 873 unités.

- Pour les bateaux de (15,0 * 4,0 * 2,5) : 140 unités ;
- Pour les bateaux de (9,0 * 3,0 * 1,5) et de (12,0 * 3,5 * 2,5) : 220 unités ;
- Pour les bateaux de (6,0 * 2,5 * 1,5) : 510 unités ;
- Pour les grande unités (70,0 * 15,0 * 3,5) et (60,0 * 14,0 * 3,0) : 03 unités.

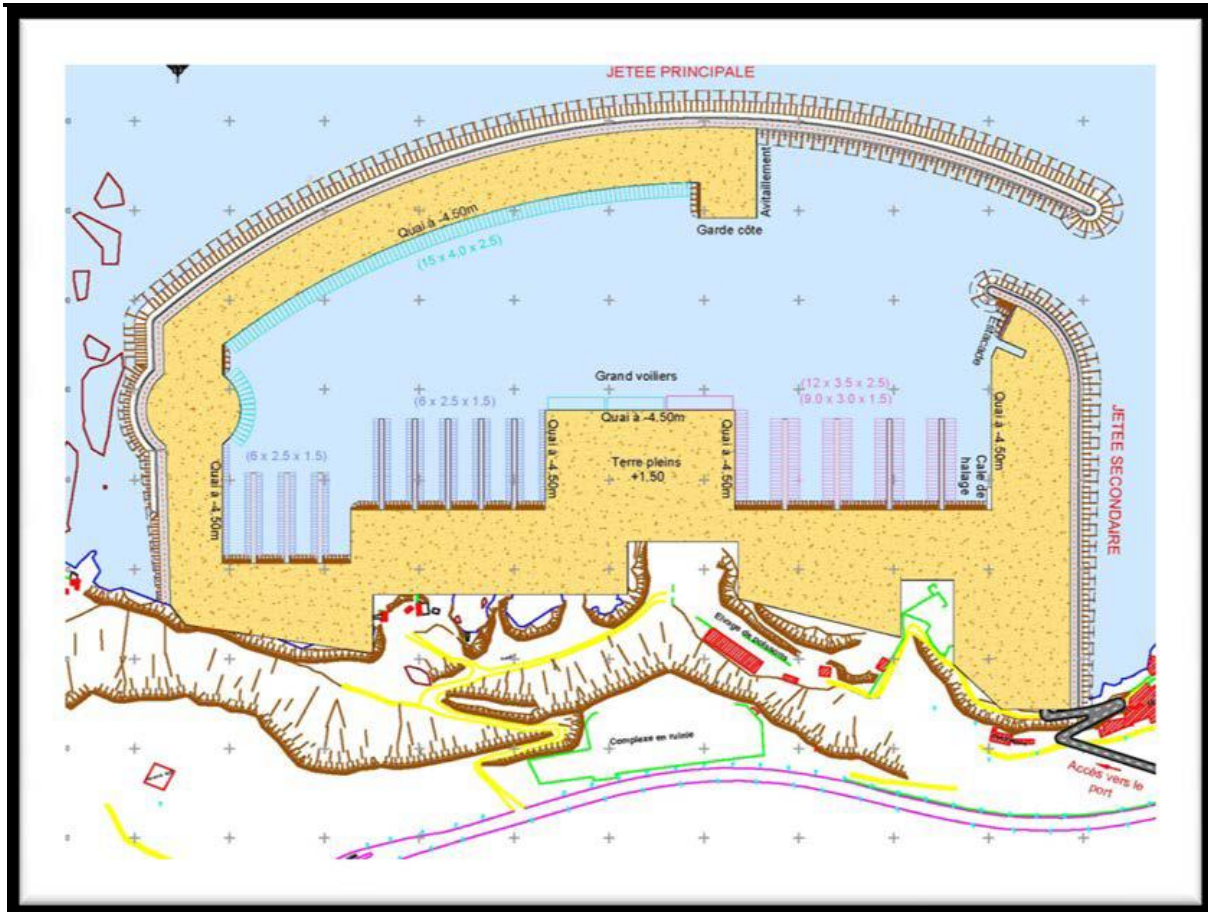


Figure 3.1 : Plan de masse de la variante 01 (LEM)

3.2.2 Variantes d'aménagement 02

Les principales composantes de cette variante sont données ci-dessous.

✚ Ouvrages de protection

Les ouvrages de protection qui constituent cette variante sont :

- Une jetée principale de longueur de 1400ml, fondée à des profondeurs variant entre 0,0m et -11,0m ;
- Une jetée secondaire de longueur de 575ml, fondée à des profondeurs variant entre 0,0m et -9,0m ;
- Une passe d'entrée de 80 ml orientée vers le Nord-est.

✚ Ouvrages d'accostage

Les ouvrages d'accostage qui constituent cette variante sont :

- Un quai d'avitaillement de 80 ml fondé à -4,50 m, situé au niveau des terre-pleins adossés au musoir de la jetée principale ;

- Un linéaire de 60 ml accostable pour les gardes côtes composé de deux quais adjacents fondés à -4,50 m, situé au niveau des terre-pleins adossés le quai d'avitaillement ;
- Un môle de 310 ml de long et 100 m de largeur divisant le plan d'eau en deux sous bassins, doté d'un quai de 310ml dédié aux grands voilier.

Pour les bateaux de (6,0 * 2,5 * 1,5) il a été prévu comme suit :

- (10) appontements flottants soit : (07) de 80ml et (01) de 100ml sont attachés à un môle de 310m et (02) appontement de 100ml sont situés dans le premier bassin à l'est près de la cale de halage.

Pour les bateaux de (9,0 * 3,0 * 1,5) et de (12,0 * 3,5 * 2,5) il a été prévu comme suit :

- (03) appontements flottants de 100ml+ deux (02) quais d'une longueur total de 400ml fondés à -4,50m situés dans le deuxième bassin à l'ouest du môle.

Pour les bateaux de (15,0 * 4,0 * 2,5) il a été prévu comme suit :

- (03) appontements flottants de 100ml.

✚ Ouvrages de réparation

- Estacade de 09 x 25 m avec un tirant d'eau de 4,5 m ;
- Cale de halage de 10 x 40 m avec une pente de 10%.

✚ Terre-pleins

- Un terre-plein ayant une superficie totale 19,0Ha ;
- La surface totale du plan d'eau est d'environ 23Ha ;
- Mur de soutènement de 1 170 m de longueur réalisé en béton armé.

✚ Route d'accès par voie maritime : Le linéaire de la route est de 425ml.

✚ Capacité du port

La capacité totale du port est de : 862 unités.

- Pour les bateaux de (15,0 * 4,0 * 2,5) : 116 unités ;
- Pour les bateaux de (9,0 * 3,0 * 1,5) et de (12,0 * 3,5 * 2,5) : 242 unités ;
- Pour les bateaux de (6,0 * 2,5 * 1,5) : 502 unités ;
- Pour les grande unités (70,0 * 15,0 * 3,5) et (60,0 * 14,0 * 3,0) : 02 unités.

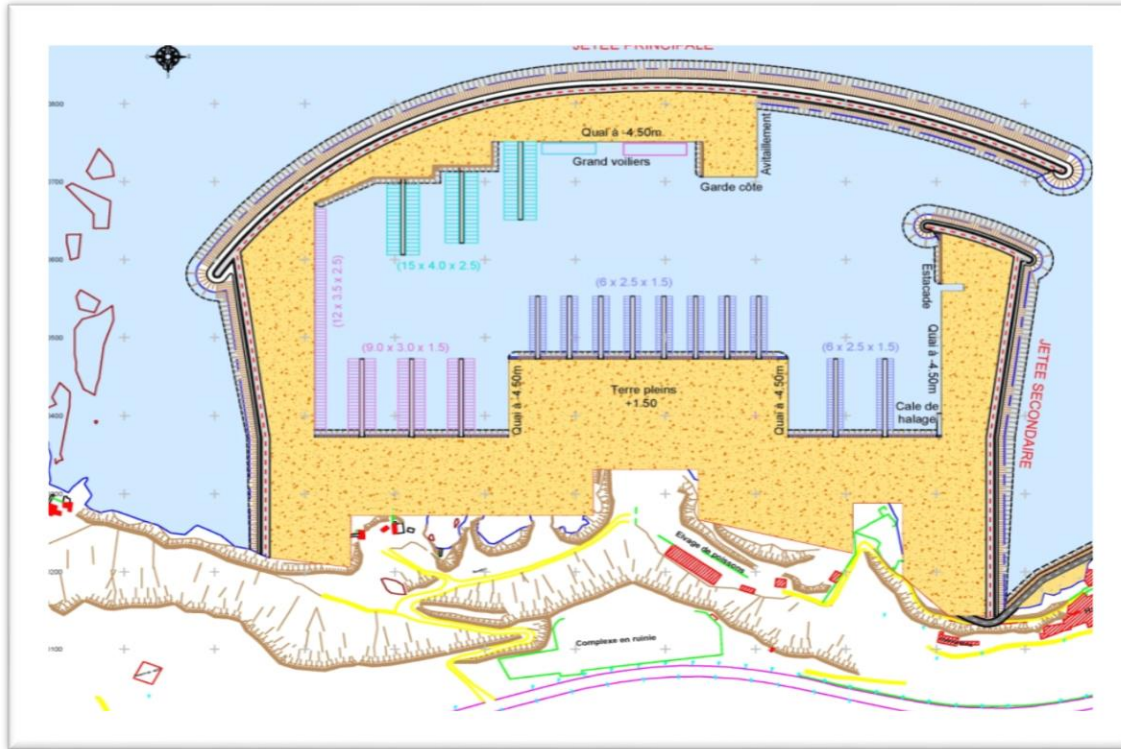


Figure 3. 2 : Plan de masse de la variante 02 (LEM)

3.2.3 Comparaison des variantes

Une analyse multicritère a été établie afin de déterminer les avantages et les inconvénients de chacune des variantes étudiées selon les critères considérés suivants :

- Niveau d'agitation résiduelle ;
- Flexibilité en termes d'accueil d'embarcations de différentes tailles ;
- Impact sédimentologie ;
- Conditions d'accès au port ;
- Surface des terre-pleins ;
- Superficie du plan d'eau (bassin) ;
- Dragage et déroctage (volume) ;
- Délai de réalisation ;
- Coûts de construction.

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

A : cas favorable (10 points) ;

B : cas peu favorable (7 points) ;

C : cas défavorable (2 points) ;

La notation totale est sur 90 points.

Tableau 3-1 : Comparaison des résultats

Critères	Variantes	Variante 01	Variante 02
Niveau d'agitation résiduelle		B	A
Flexibilité en termes d'accueil d'embarcations de différentes taille		A	B
Impact sédimentologie		B	A
Conditions d'accès au port		A	A
Surface des Terre-pleins		A	A
Superficie du Plan d'eau (bassin)		A	B
Dragage et déroctage (volume)		A	A
Délai de réalisation		B	A
Coûts de construction		B	A
Notation globale reçue		5A + 4B	7A + 2B
		78/90	84/90

3.2.4 Conclusion

Sur la base des critères suscités il ressort que la variante N° 02 se distingue favorablement par rapport à la variante N°01.

Le Laboratoire d'Etudes Maritimes recommande la variante n°2 et met ainsi à la disposition de l'Administration les éléments lui permettant de fixer son choix sur la variante à retenir et à étudier en phase de détail.

3.3 Pré dimensionnement des ouvrages de protection

Les ouvrages de protection envisagés pour le port de Cap Falcon doivent satisfaire plusieurs critères qui sont :

- La durabilité ;
- L'efficacité de la protection contre la houle ;
- Le cout de la construction ;
- Le cout d'entretien.

3.3.1 Choix de la structure

Les ouvrages de protection de ce port ont la structure d'une digue à talus, vu qu'on est dans une zone de faible profondeur, sa réparation est possible et facile, ses fondations sont économiques.

Les digues à talus sont réalisées avec matériaux plus au moins grossiers, arrangés globalement sous la forme d'un trapèze qui va opposer à la progression de la houle une résistance d'autant plus efficace que le massif sera élevé et peux poreux, Une digue à talus est composée :

Carapace

C'est la partie de l'ouvrage qui reçoit directement la houle, sa stabilité est assuré par le poids unitaire W_i , des blocs naturels, ou artificiels à forte indice de vide (de 37% à 63 %).

Filtre

Il est disposé entre le noyau et la carapace car il assure la transition entre ces deux couches, il empêche aussi l'entraînement par l'eau des matériaux fins du noyau vers l'extérieur. Le poids de ces éléments ne doit pas être inférieur au un dixième (1/10) de ceux constituant la carapace. Si l'ouvrage est en eau profonde, ou moyennement profonde il n'est pas justifié de poursuivre les enrochements au de la d'une certaine profondeur et l'on dispose alors de ce que l'on appelle une butée de pied qui doit être malgré tout correctement réalisé, car elle a une double fonction :

- Assure la butée de la base de la carapace ;
- Résister aux affouillements.

Et si la profondeur le justifie, on dispose sous l'ensemble du corps de la digue de front de mer un matelas de matériaux appelé soubassement, justifié par la faible portance de sol de fondation diminuant ainsi les risques de tassement.

Butée de pied

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

Le noyau

Il constitue le cœur de la digue, en général on utilise le tout-venant, mais qui doit assurer une transition satisfaisante entre le soubassement aux matériaux fins ou le terrain naturel et les matériaux les plus grossiers du filtre.

✚ Couronnement

Le couronnement sert essentiellement à fermer l'ouvrage en partie haute et souvent à circuler sur la digue, il représente la superstructure il a une grande importance sur la stabilité de la digue. Il assure les rôles suivants :

- Protège la partie supérieure de l'ouvrage ;
- Assure la butée supérieure des blocs de la carapace ;
- Limite les franchissements.

✚ Soubassement

Le soubassement est destiné à asseoir le corps de la digue en la surélevant de façon à économiser les matériaux nobles. Il est généralement réalisé avec des matériaux provenant de site.

✚ Tapis de pied

Il est utilisé pour rattraper les irrégularités du terrain naturel afin de faciliter la mise en place des couches extérieures d'une part et à obtenir une protection anti-affouillement d'autre part, il est constitué de matériaux graveleux ou enrochements.

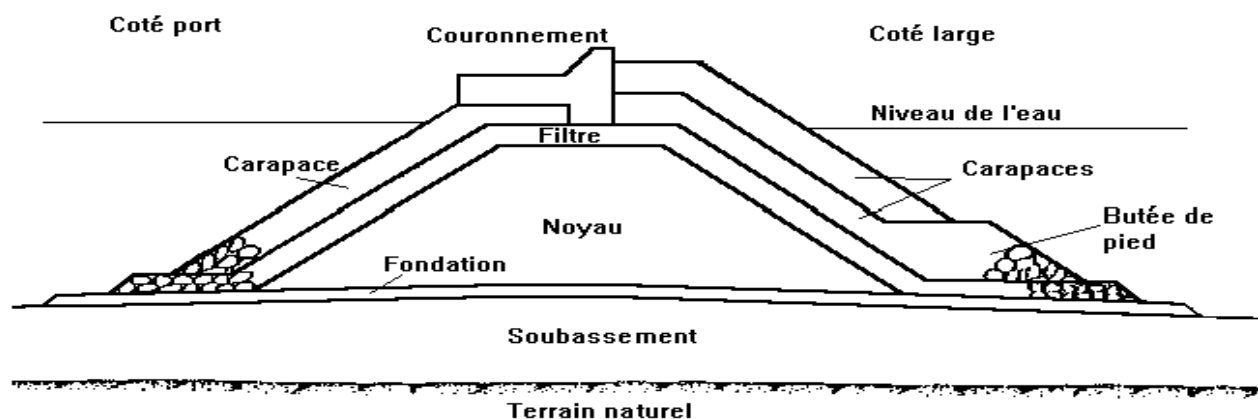


Figure 3.3 : Coupe type d'une digue à talus

3.3.2 Pré dimensionnement de la jetée principale

La jetée principale est une digue à talus formée d'un noyau en TVC, d'une carapace en BCR, de filtres et d'une butée en ENR ainsi de talus intérieur.

La jetée principale se constitue de trois profils : profil enracinement, profil courant et profil musoir.

✚ Profil enracinement

Le profil enracinement se situe entre 0 m et -5 m et où la houle de projet est égale à $H_s = 5,5\text{m}$.

1. Le poids des blocs de carapace « W »

Les formules permettant de calculer le poids théorique des blocs artificiels ou enrochements naturels constituant la carapace des jetées sont nombreuses et conduisent à des valeurs très diversifiées (**Hudson, Van Der Meer, Etc.**).

De nos jours, la formule d'Hudson est considérée comme étant la plus satisfaisante. D'après cette formule l'amplitude H_s ne crée pas de dommages à un talus constitué aux voisinages de la zone de déferlement par des blocs de poids « W » :

$$W = \frac{1}{K_d} \frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3} \frac{H_s^3}{\cot \alpha} \quad (3.1)$$

W : Poids des blocs de la carapace ; γ_s : Poids spécifique des blocs ou enrochements (t/m^3) ; γ_w : Poids spécifique de l'eau de mer (t/m^3) ; α : L'angle formant le parement de la digue avec l'horizontale (degré) ; K_d : Coefficient de stabilité des blocs et H_s : Hauteur significative de la houle de projet (m).

Dans notre cas, la houle est calculée au déferlement vu qu'on est dans les petites profondeurs, On a : $\gamma_s = 2,4 \text{ t}/\text{m}^3$; $K_d = 7,8$; $\gamma_w = 11,026 \text{ t}/\text{m}^3$ et $\cot \alpha = 3/2$.

D'après la formule d'Hudson (équation 3.1), nous obtenons un poids égale à 14,210 t.

D'où le poids de la carapace est pris égal à **15 t**.

2. Epaisseur de la carapace « e »

L'épaisseur d'une couche (carapace) dépend de la forme et de la nature des blocs qui la composent du nombre de lits, on utilise la formule extraite du manuel du CERC :

$$e = k_{\Delta} n \left(\frac{w}{\gamma_s}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

e : Epaisseur de la carapace (m) ; n : Nombre de lits de blocs ; k_{Δ} : Coefficient de couche ; w : Poids de BCR et γ_s : Poids volumique des éléments (t/m^3).

En Considérant que $n = 2$; $k_{\Delta} = 1,02$ et $\gamma_s = 2,4 \text{ t}/\text{m}^3$, l'épaisseur de la carapace après calcul est de 5,031m.

D'où on prend des couches d'épaisseur de **5,00 m**.

✚ Profil courant

Le profil courant se situe à -5 m et -9m, où la houle de projet est égale à $H_s = 6,7$ m.

1. Le poids des blocs de carapace « W »

Le poids unitaire des blocs de la carapace est donné par la formule d'Hudson vu précédemment (équation 3.1).

En considérant que K_d : coefficient de stabilité est admis à 7,8 ; γ_s : la densité des blocs artificiels (blocs en BCR) égale à $2,4 \text{ t/m}^3$; $\gamma_w = 1,026 \text{ t/m}^3$; $\cot\alpha = 3/2$: la pente du talus d'enrochement, on obtient après calcul le poids unitaire des blocs de la carapace $w = 25,688\text{t}$.

D'où le poids de la carapace est pris égal à **26 t**.

2. Epaisseur de la carapace « e »

L'épaisseur est donnée par la formule extraite du manuel du CERC vu précédemment (équation 3.2).

En considérant que n : nombre de couches égal à 2 ; $k_\Delta = 1,02$: coefficient de couche et $\gamma_s = 2,4 \text{ t/m}^3$, on obtient après calcul une épaisseur égale à : $e = 4,495\text{m}$.

D'où on prend des couches d'épaisseur de **4,5m**.

✚ Profil musoir

Le profil musoir se situe à -11 m, où la houle de projet est égale à $H_s = 6,7$ m.

1. Le poids des blocs de carapace « W »

Le poids unitaire des blocs de la carapace est donné par la formule d'Hudson vu précédemment (équation 3.1).

En considérant que K_d : le coefficient de stabilité est admis à 5,6 ; γ_s : la densité des blocs artificiels (blocs en BCR) égale à $2,4 \text{ t/m}^3$; $\gamma_w = 1,026 \text{ t/m}^3$ et $\cot\alpha = 3/2$: la pente du talus d'enrochement, on obtient après calcul un poids unitaire des blocs de la carapace égal à : $w = 35,779\text{t}$.

D'où le poids de la carapace est pris égal à **36 t**.

2. Epaisseur de la carapace « e »

L'épaisseur est donnée par la formule extraite du manuel du CERC vu précédemment (équation 3.1.)

En considérant que n : nombre de couches est égal à 2; $k_\Delta = 1,02$: coefficient de couche et $\gamma_s = 2,4 \text{ t/m}^3$, on obtient après calcul une épaisseur égale à : $e = 5,031\text{m}$.

On prend des couches d'épaisseur égale à **e = 5,00 m**.

Les poids et les épaisseurs de la carapace formant la jetée principale sont données dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Poids et épaisseurs de la carapace.

	Poids	Epaisseurs
Profil enracinement	15 t	5,00 m
Profil courant	26 t	4,50 m
Profil musoir	36 t	5,00m

✚ Dimensionnement des filtres

Entre les blocs de la carapace et le noyau sont interposées une ou plusieurs couches intermédiaires d'encrochement qui devront répondre aux conditions de filtre qui s'expriment par des règles empiriques ayant trait à la granulométrie du filtre et à celle du noyau à protéger.

Les conditions préconisées par CERC (Costal Engineering Research Center) ; recommandant d'avoir des poids unitaires au moins égaux à W/100 pour la première sous couche, W/200 pour la deuxième sous couche et W/4000 pour le noyau.

Deux catégories de filtre seront mises en place, dans le cas du profil enracinement $W = 15t$.

- **Poids du filtre de transition** : le poids du filtre de transition est généralement compris entre W/200 à W/100.
- **L'épaisseur du filtre de transition** : l'épaisseur du filtre de transition en encrochements naturels est déterminée par la formule :

$$e_1 = n * K_{\Delta} \left(\frac{W_{moy}}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (3.3)$$

Avec, W_{moy} : poids unitaire du bloc ou poids moyen d'encrochement égal à $W_{moy} = 0,35t$; n : nombre de couches égal à 2 ; γ_s : la densité du bloc ou de l'encrochement est égal à $\gamma_s = 2,6 t/m^3$ et k_{Δ} : coefficient de couche égal à $K_{\Delta} = 1,10$.

- **Poids du filtre support** : le poids du filtre support est compris entre W/15 à W/10.
- **Epaisseur du filtre support** : pour l'encrochement naturel anguleux, l'épaisseur est donnée par la formule vu précédemment (équation 3.3).

Avec $n = 2$; $K_{\Delta} = 1,10$; $\gamma_s = 2,6 t/m^3$; $W_{moy} = 1,25 t$.

Les poids et les épaisseurs des couches filtre sont données dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Les poids et les épaisseurs des couches

Profil		Poids	Epaisseur
Profil enracinement	Filtre de transition	0,20-0,50 t	1,15m
	Filtre support	0,50-2,00 t	1,75m
Profil courant	Filtre de transition	0,20-0,50 t	1,15m
	Filtre support	1,00-3,00t	2,20m
Profil musoir	Filtre de transition	0,20-0,50 t	1,15m
	Filtre support	1,00-3,00t	2,20m

Butée du pied

La butée assure un blocage vertical de la carapace évitant sa ruine par glissement vers le bas.

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

Lorsque la profondeur d'eau est suffisante pour que la butée de pied soit naturellement protégée, on pourra diminuer notablement la granulométrie et l'on pourra utiliser la formule de Hudson aménagé :

$$W = \frac{1}{K_d} \frac{\gamma_s}{(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1)} \frac{H_s^3 H}{\cot \alpha h} \quad (3.4)$$

avec, w : la limite inférieure de la catégorie d'enrochement ; H : la cote d'utilisation de l'enrochement ; h : désigne la cote de la butée par rapport au niveau de repos ; γ_s : poids spécifique des blocs ou enrochements (t/m^3) ; γ_w : poids spécifique de l'eau de mer (t/m^3) ; α : l'angle formant le parement de la digue avec l'horizontale (degré) ; K_d : coefficient de stabilité des blocs et H_s : hauteur significative de la houle de projet (m).

L'épaisseur de la butée est donnée par la formule extraite du manuel du CERC :

$$e = c \left(\frac{w}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

Où, c : coefficient butée et $\gamma_s = 2,4 t/m^3$.

Les poids et les épaisseurs des butées formant la jetée principale sont donnés dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Les poids et les épaisseurs de butée du pied

Profil	Poids (m)	Epaisseurs (m)
Enracinement	1-3 t	2,2 m
Courant	3-6 t	2,2 m
Musoir	3-6 t	2,2 m

✚ Dimensionnement du noyau

Le poids du noyau est généralement compris entre $W/6000$ et $W/4000$.

Le noyau est composé de tout-venant de 0-0,2 t, arasée à +1,00 m, sa largeur doit permettre la circulation de deux camions ou d'un camion et d'une grue, soit de 15 m.

3.3.3. Prédimensionnement de la jetée secondaire

La jetée secondaire se constitue de trois profils : profil enracinement (1-1) ; profil courant (2-2, 2'-2') et profil musoir (3-3) ; comme la montre la figure suivante.

✚ Profil enracinement

Le profil enracinement se situe entre 0m et -5m. Les enrochements de la carapace sont d'une catégorie de (1- 3) t.

✚ Profil courant

Le profil courant se situe entre -5m et -9m, où la houle de projet est égale à $H_s = 5,5$ m ; le poids unitaire des blocs de carapace retenu est de 15t. On prend donc une couche d'épaisseur de 3,75m.

✚ Profil musoir

Le profil courant se situe à -9m, où la houle de projet est égale à $H_s = 5,5$ m. Nous retenons un poids unitaire de blocs en BCR de 15t.

✚ Tableau résumant le dimensionnement de protection de la jetée secondaire

Les ouvrages de protection de la jetée secondaire sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-5 : Dimensionnement de protection de la jetée secondaire

Profil	Désignation	Jetée secondaire		
		Poids (t)	Epaisseur (m)	Catégorie
Profil enracinement	Carapace	1,00-3,00	2,12	ENR
	Filtre de transition	0,20-0,50	1,15	ENR
	Noyau	0,00-0,20	/	TVC
	Butée	/	/	/
Profil courant	Carapace	15,00	3,75	BCR
	Filtre de support	0,50-2,00	1,75	ENR
	Filtre de transition	0,20-0,50	1,15	ENR
	Noyau	0,00-0,20	/	TVC
	Butée	1,00-3,00	2,20	ENR
Profil musoir	Carapace	15,00	3,75	BCR
	Filtre de support	0,50-2,00	1,75	ENR
	Filtre de transition	0,20-0,50	1,15	ENR
	Noyau	0,00-0,20	/	TVC
	Butée	1,00-3,00	2,20	ENR

3.4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons réalisé un pré dimensionnement des ouvrages de protection constituant le futur port de Cap Falcon.

Ce pré dimensionnement des ouvrages a été fait à partir de formules théorique et empiriques. Ces formules restent insuffisantes en raison des hypothèses approximatives sur lesquelles elles reposent et les simplifications préalables à leur établissement, pour optimiser ce dimensionnement. Pour cette raison que la modélisation physique qui sera abordée dans le chapitre suivant, est une étape nécessaire pour avoir un bon dimensionnement.

Partie 2

4.Modélisation physique

4. Modélisation physique

4.1 Introduction

Les phénomènes étudiés dans le domaine maritime sont tellement complexes qu'il est difficile, voire impossible de les mettre en équation et les résoudre d'une manière mathématique ce qui a incité les spécialistes à chercher des méthodes plus perfectionnées et plus fiables.

C'est pour cette raison que le modélisation physique a été reconnu comme le meilleur outil et parfois le seul pour étudier ces phénomènes.

4.2 Définition d'un modèle réduit physique

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

Le modèle réduit physique exprime l'idée toute simple d'essayer de voir en « petit » comment cela va se passer en « grand », c'est-à-dire que c'est la reproduction à petit échelle d'un phénomène en général.

Ce sont de véritables modèles réduits hydrauliques du port à construire sur lesquels on simule divers phénomènes physiques. (*Chapon, 1971*)

En théorie (en milieu marin), un modèle réduit 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.

4.3 Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude en bassin à houle est de vérifier ce qui suit :

- L'agitation du plan d'eau du bassin du port ;
- La stabilité des deux jetées, principale et secondaire, et éventuellement l'optimisation des blocs de la carapace ;
- Les franchissements derrière le mur de garde.

4.4 Les modèles à fond fixe

Ces modèles servent à étudier des phénomènes hydrauliques relatifs aux écoulements des liquides à l'exclusion de tout transport solide.

Leur but est de répondre à des questions d'hydraulique pure qui peuvent être subdivisées comme suit.

4.4.1 Modèles d'agitation

Dans le cadre de l'établissement d'un projet portuaire, de telles études ont pour but de s'assurer que le tracé en plan des digues portuaires et de l'aménagement intérieur fera que les critères d'agitation résiduelle admissible dans les différentes zones du port seront satisfaits. Ces critères sont généralement le non dépassement, pendant des tempêtes, de certaines hauteurs d'agitation pour assurer la sécurité des bateaux (cas des ports de plaisance) ou permettre les opérations de chargement et de déchargement.

Ces modèles hydrauliques sont construits dans des cuves à houle équipées d'un générateur de houle en trains d'ondes ou aléatoire dont l'orientation peut être modifiée. La mesure de l'agitation résiduelle s'effectue à l'aide d'un réseau de sondes fixes ou mobiles.

Sur ces modèles, on cherche à déterminer l'agitation résiduelle en fonction de la houle et des dispositions de l'ouvrage (*Chapon, 1971*).

4.4.2 Modèle de stabilité

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

Lorsqu'une vague atteint un obstacle, une partie de son énergie se réfléchit et se superpose à l'énergie incidente pour donner naissance au clapotis, une autre est transmise derrière l'ouvrage, par exemple en franchissement de crête, ou encore en se propageant dans le massif en enrochements constituant le corps de la digue.

Il existe deux types de modèles : modèles 2D (canal à houles) et 3D (bassin à houles) :

4.4.2.1 Etude à deux dimension ou en canal à houle

Habituellement la mise au point du profil s'effectue d'abord à deux dimensions dans un canal ayant le plus souvent 1 à 2 m de largeur et 50 m au moins de longueur. Ce canal est équipé d'un générateur de houle aléatoire. Le modèle est construit à une échelle suffisamment grande,

habituellement comprise entre le $1/30^e$ 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 s'en nature (à une petite correction près du fait que l'eau du modèle est douce).

Le profil est soumis à des houles qui ont généralement des périodes de retour allant de 20 à 100 ans suivant le type d'ouvrage concerné.

4.4.2.2 Etude à trois dimensions ou à bassin à houle

Les études à deux dimensions destinées à mettre au point le profil courant d'un ouvrage sont souvent complétées par des études à trois dimensions dans un bassin à houle de grande superficie, 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).

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.

4.5 Avantages des modèles réduits physiques

Les formules 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, (Hudson par exemple ne tient pas compte de la direction ni de la période de la houle) :

- Economie du temps et d'argent (optimisations) ;
- Réalisation de plusieurs essais en faisant varier plusieurs paramètres (ce qui est irréalisable sur le prototype) ;
- Eviter des erreurs catastrophiques menaçantes :
- L'environnement, à travers le modèle sédiment (pollution, érosion des côtes...etc.) ;
- La sécurité des personnes et des biens, par exemple par la détermination d'un degré de franchissement ;
- L'économie d'un pays (fermeture d'un port : par exemple agitation et taux d'indisposition.

4.6 Règles 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 étudiée 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.

4.6.1 Similitude géométrique

La première condition à satisfaire sera de présenter les longueurs, largeurs, hauteurs, suivant les échelles linéaires afin que toutes les dimensions du modèle et leurs homologues en nature (prototype) soit dans un rapport constant, si toutes les dimensions ont le même rapport, le modèle sera dit « non distordu » au contraire si les dimensions en plan et en hauteur présentent des rapports différents, le modèle sera « distordu ».

Dans certains cas les échelles des longueurs et des largeurs ne seront pas les mêmes et le modèle sera dit « à double distorsion ».

L_1 : prototype

L_2 : modèle

- Echelle géométrique : $\lambda = \frac{L_2}{L_1}$
- Echelle de surface : $\lambda_s = \lambda^2$
- Echelle de volume : $\lambda_v = \lambda^3$
- Échelle de l'angle : $\lambda_\theta = 1$

4.6.2 Similitude cinématique

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

Soit :

t_1 : le temps mis pour parcourir une distance L_1 dans le prototype et t_2 : le temps mis pour parcourir une distance L_2 dans le modèle.

- λ Echelle du modèle : $\lambda = \frac{L_2}{L_1}$
- λ_t Echelle de 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 : $\lambda_\gamma = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$

Alors, on peut écrire les équations suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = \frac{L_1}{t_1} \\ V_2 = \frac{L_2}{t_2} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2}{L_1} * \frac{t_1}{t_2} = \frac{\lambda}{\lambda_t} = \lambda_v \rightarrow \lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_t}$$

Pour l'accélération, on a :

$$\left. \begin{array}{l} \gamma_1 = \frac{L_1}{t_1^2} \\ \gamma_2 = \frac{L_2}{t_2^2} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{L_2}{L_1} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 = \frac{\lambda}{\lambda_t^2} \rightarrow \lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

On voit donc que le choix de l'échelle des temps λ_t impose celle des vitesses $\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_t}$ et des accélérations $\lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$.

4.6.3 Similitude dynamique

Les mouvements du liquide dans le prototype et dans le modèle sont provoqués par des forces que les deux systèmes (modèle et prototype) soient dynamiquement semblables, il est donc nécessaire que toutes les forces agissant en des points homologues du modèle et du prototype soient dans le même rapport.

Il est noté que la similitude cinématique entraîne la similitude dynamique en vertu de la relation : $F = m * \gamma$

$$\text{Echelle des forces : } \lambda_f = \frac{f_2}{f_1}$$

Analyse des forces

Les principales forces agissant sur les ouvrages maritimes sont :

- Force d'inertie ;
- Force de turbulence ;
- Force de pesanteur ;
- Force de viscosité ;
- Force de capillarité (négligeable en hydraulique maritime).

Force 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 aura donc :

$$F_1 = m_1 \frac{v_1^2}{r_1}$$

Au point homologue du modèle :

$$F_2 = m_2 \frac{v_2^2}{r_2}$$

Où
$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \frac{r_1}{r_2}$$

Posant : $\frac{F_2}{F_1} = \lambda_{fi}$: rapport des forces d'inertie.

$$\frac{m_2}{m_1} = \lambda_m : \text{rapport des masses.}$$

Il vient :
$$\lambda_{fi} = \frac{\lambda_m \lambda_v^2}{\lambda} = \lambda_m \lambda \lambda_t^{-2} .$$

Mais le rapport masses est égal au rapport des masses volumiques (λ_ρ) multiplié par rapport des volumes (λ^3) ; on a donc , en définitive ::

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

Force de pesanteur

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

Le rapport des forces de pesanteur sera donc

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

✚ Force de turbulence

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

$$F_t = \rho S \overline{u'v'}$$

ρ : la masse volumique du liquide (t/m^3) ; S : représente la surface à travers laquelle se produit l'échange latéral de quantités de mouvement résultant de l'échange des particules liquides (m^2) ; $\overline{u'v'}$: c'est la moyenne du produit des fluctuations de la vitesse instantanée dans le sens longitudinale (u') et dans le sens transversale (v').

Le rapport des forces de turbulence sera donc :

$$\lambda_{ft} = \frac{\rho_2 S_2 \overline{u'_2 v'_2}}{\rho_1 S_1 \overline{u'_1 v'_1}}$$

$$\lambda_{ft} = \lambda_\rho \lambda^2 \lambda_V^2$$

$$\lambda_{ft} = \lambda_\rho \lambda^2 \lambda_V^2 = \lambda_{fi}$$

Le rapport de similitude des forces de turbulence et les forces d'inertie est le même, ce qui traduit le fait que ces deux catégories de forces sont de même nature.

✚ 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 : coefficient de viscosité ($kg.m^{-1}.s^{-1}$) et dv/dn : gradient de vitesse dans la direction normale à ds .

Le rapport des forces de viscosité sera donc :

$$\lambda_{fV} = \lambda_\mu \lambda^2 \lambda_V \lambda^{-1}$$

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

✚ **Similitude de Reech-Froude** : (les forces de viscosité sont négligeables par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur) .

Les forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur sont donc pratiquement seules à intervenir et la condition de similitude des forces impose que les trois rapports λ_{fi} , λ_{ft} , λ_{fp} soient les mêmes.

Compte tenu déjà que $\lambda_{fi} = \lambda_{ft}$; il reste que : $\lambda_{fi} = \lambda_{fp}$

Comme il est impossible de faire varier la pesanteur g entre le prototype et le modèle, on prend $\lambda_g = 1$

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

Autre expressions de la loi de Froude : $\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$ D'où $\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{g L_2}{g L_1}} = \frac{\sqrt{g L_2}}{\sqrt{g L_1}}$

$$\frac{V_2}{g L_2} = \frac{V_1}{g L_1} = Fr$$

avec, Fr : nombre de Froude

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

- Echelle des vitesses : $\lambda_V = \sqrt{\lambda}$
- Echelle des temps : $\lambda_V = \frac{\lambda}{\lambda_t} \rightarrow \lambda_t = \frac{\lambda}{\lambda_V} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} \rightarrow \lambda_t = \sqrt{\lambda}$
- Echelle des débits : $\lambda_q = \lambda_V \lambda^2 = \lambda^{1/2} \lambda^2 \rightarrow \lambda_q = \lambda^{5/2}$
- Echelles des accélérations : $\lambda_a = \frac{\lambda}{\lambda_t^2} = 1$

Pour un même liquide dans le modèle et dans le prototype, on a : $\lambda_\rho = 1$

- Echelle des forces : $\lambda_f = \lambda_V \lambda_m = \lambda_\rho \lambda^3 = \lambda^3$
- Echelle des pressions : $\lambda_p = \frac{\lambda_f}{\lambda^2} = \lambda_\rho \lambda = \lambda$
- Echelle des puissances : $\lambda_p = \frac{\lambda \lambda_f}{\lambda_t} = \lambda_\rho \lambda^{7/2} = \lambda^{7/2}$
- Echelle des pentes : $\lambda_i = \frac{\lambda}{\lambda} = 1$

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 jouent 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.

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_l
- L'autre pour les dimensions verticales (hauteurs) : λ_h

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

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

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

4.7 Conception du modèle réduit physique

La conception du modèle de la variante choisie du futur port de plaisance de cap Falcon a été élaboré dans le but de réaliser des essais d'agitation et de stabilité.

Le modèle est construit dans le laboratoire du LEM à Hydra, dans un bassin ayant pour dimensions (26x19x1m) (longueur, largeur, profondeur) ; c'est un modèle sans distorsion et à fond fixe c'est-à-dire qu'on ne cherche pas à reproduire le phénomène de transport des sédiments.

4.7.1 Choix de l'échelle

L'échelle doit le plus possible nous rapprocher de la réalité, elle est déterminée de telle façon que toutes les conditions importantes des états de la mer ayant un impact sur l'aménagement soient respectées et mesurées d'une manière acceptable.

Pour les bassins à houle les échelles sont en générale comprise entre 1/60 à 1/150, on devra éviter en particulier les problèmes parasites de réflexion ou de résonance des bassins liés à la construction du modèle et qui n'existent pas en nature.

On détermine l'échelle par des méthodes expérimentales qui prennent comme condition :

Condition 01

L'échelle géométrique doit satisfaire la relation suivante :

$$\lambda < 3 * l$$

l : la longueur du bassin (l = 26m)

Condition 02

La profondeur d'eau maximale « d' » dans le modèle doit être inférieure à 50 cm pour des bassins de 1m de profondeur, pour cela il faut que la relation suivante soit vérifiée :

$$d' = d * \frac{1}{\lambda} < 50 \text{ cm}$$

d : la profondeur maximale dans le prototype. ; et d' : la profondeur maximale en modèle.

Dans le cas de notre étude on a :

- Longueur du prototype : l' = 1924m.
- La longueur du bassin : l = 26m
- Profondeur maximale dans le prototype : d = 19 m

L'échelle géométrique choisie est :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\text{longueur du bassin}}{\text{longueur du prototype}} = \frac{26}{1924} = \frac{1}{74}$$

Pour une échelle de $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{74}$ on vérifie si les conditions sont satisfaites :

- $\lambda = 74 < 3 * 26 \rightarrow$ 1ère condition est vérifiée.
- $19 * 1/74 = 0,25 \text{ m}$ elle est inférieure à 0,50m \rightarrow La 2ème condition est vérifiée.

L'échelle géométrique $\lambda = 74$ vérifie les deux conditions principales du choix de l'échelle en bassin à houle.

Donc, on prend l'échelle du bassin à houle égale à $\frac{1}{74}$.

4.7.2 Construction des fonds

Les fonds du modèle ont été reconstruits en sable recouvert d'une couche de mortier de ciment tout en respectant la bathymétrie naturelle grâce à l'implantation des isobathes dessinées préalablement sur le plancher du bassin et mises à niveau à l'aide d'un appareil topographique.

La construction des fonds s'est faite sur la base de levé bathymétrique et l'échelle choisie comme suit :

- Création d'un carroyage sur le plan de masse à l'aide d'AUTOCAD ;
- Représentation des nœuds de ce carroyage sur le bassin tous les 1 mètres à l'aide de peinture ;
- La mise en place des courbes bathymétriques du levé à l'aide de barre de fer plat qui sont posées selon leur disposition par rapport au carroyage. (Sur le plan de masse, 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 passage de 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) ;
- Remplissage du fond avec du sable entre chaque courbe sur modèle ;
- Lissage et finition avec une chape en mortier de ciment de 5 cm d'épaisseur arasée au niveau des fers plats représentant les isobathes (*LEM*).

Après avoir construit les fonds en bassin, on commence la construction des ouvrages selon le plan de masse et selon les variantes retenues ainsi que les résultats du pré-dimensionnement et l'échelle du modèle.



Photo 4.1 : La représentation des lignes bathymétriques.

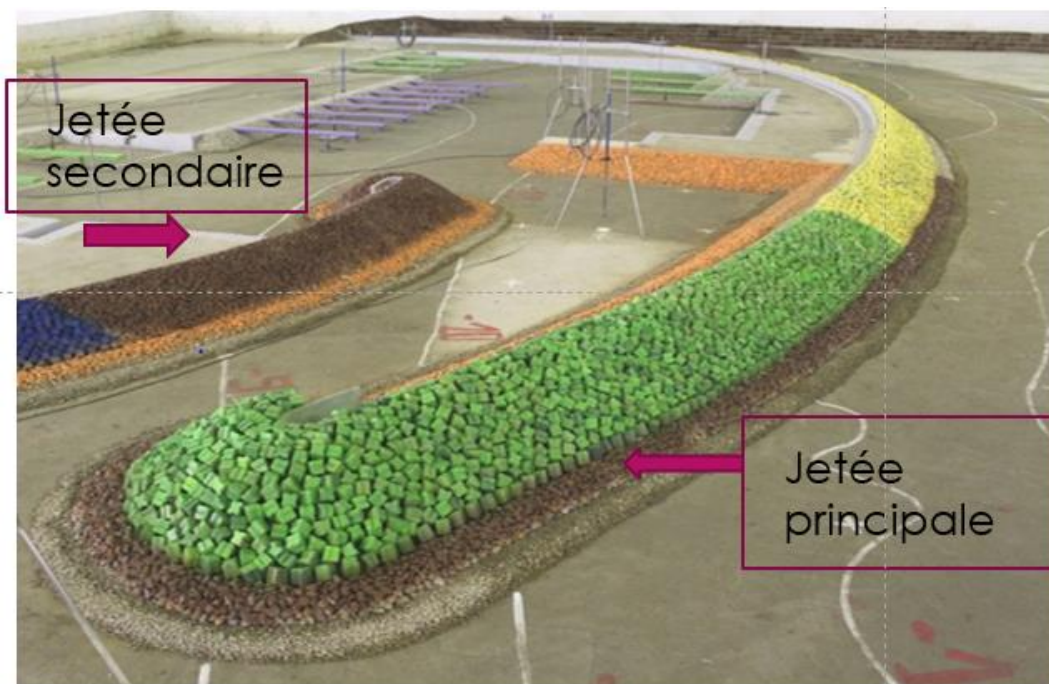


Photo 4.2 : Les ouvrages de protection.

4.7.3 Matériaux de construction

Les matériaux constituant les profils sont sélectionnés en fonction de leurs poids et de leurs tailles.

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

Les matériaux de construction utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau 4- 1 : Caractéristiques des matériaux.

Désignation	Caractéristiques en nature		Caractéristiques en modèle	
	Poids (t)	Densité (t/m ³)	Poids (g)	Densité (g/cm ³)
Enrochements	0,50- 2,00	2,65	1,09 - 4.40	2,65
	1,00 – 3,00	2,65	2,20 - 6,60	2,65
	2,00 – 5,00	2,65	4,40 - 11.00	2,65
	3,00 – 6,00	2,65	6,60 - 13,20	2,65
BCR	15,00	2,40	37,00	2,40
	26,00	2,40	64,00	2,40
	35,00	2,40	86,00	2,40

4.7.4 Calibrage (réglage hydraulique du modèle)

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

4.8 Conclusion

La connaissance de la théorie de modélisation ainsi que l'utilisation des lois de similitudes sont fondamentales dans l'étude du projet en modèle réduit physique. Cela permet d'entreprendre cette étude sur de bonnes bases.

5. Etude de stabilité et d'agitation sur modèle réduit du port de Cap Falcon

5. Etude de stabilité et d'agitation sur modèle réduit physique

5.1 Introduction

L'étude en modèle réduit physique en bassin à houle porte sur deux types d'essais :

- Des essais d'agitation à l'intérieur du bassin portuaire ;
- Des essais de stabilité des ouvrages de protection et mesure des franchissements.

L'étude d'agitation est fondamentale pour le développement des installations portuaires puisqu'elle permet de tester la protection offerte par le port projeté.

Il convient aussi pour tout ouvrage maritime d'en assurer sa stabilité. L'ouvrage doit résister à l'action dynamique de la houle ainsi qu'aux tempêtes les plus fortes atteignant le site considéré.

5.2 Critère d'agitation

Dans le cadre de l'établissement d'un projet portuaire (port de plaisance), l'étude d'agitation a pour but de s'assurer que le tracé en plan des ouvrages de protection et de l'aménagement intérieur fait que l'agitation résiduelle admissible dans les différentes zones ports est satisfaisante.

Le critère d'agitation admissible est le non dépassement, pendant des tempêtes, de certaines hauteurs significatives d'agitation pour assurer la sécurité des embarcations à l'intérieur du port.

Les valeurs peuvent se résumer ainsi :

- Agitation admissible pour une houle annuelle : 30 cm ;
- Agitation pour une houle décennale : 60 cm.

5.3 Critère de stabilité

L'objet principal des essais de stabilité en modèle réduit physique est de vérifier la résistance de l'ouvrage vis-à-vis l'action dynamique de la houle et d'apprécier la stabilité des points singuliers tels que les musoirs, les coudes et les enracinements afin d'optimiser les ouvrages de protections du point de vue technico-économique.

La stabilité est déterminée sur la base d'un ensemble de critères de dommage acceptable.

Le dommage est défini comme étant un dommage relatif (P) ; exprimé en pourcentage par le rapport entre le nombre de blocs déplacés et le nombre de blocs posés, les dommages admissibles sont fixés comme suit :

- Partie courante : 0 à 5% pour la houle décennale H_{10} ; 5 à 8% pour la houle Cinquantennale H_{50} .

- Partie musoir : 0 à 2% pour la houle Cinquantennale H_{50} ; 2 à 5% pour la houle centennale H_{100} .

5.4 Critère d'exploitation des terres pleins et quai en fonction du débit de franchissement

Pour mieux répondre aux besoins d'une meilleure appréciation des vagues franchissant les jetées, on doit tenir compte des hypothèses suivantes :

- La mesure des franchissements se fait par comptage du nombre de vagues passant au-dessus de l'ouvrage ;
- Le comptage se fait par observation du phénomène ;
- On considère comme franchissement, toute vague d'un front minimal de 3 mètres (en nature) franchissant la jetée.

Les franchissements tout au long de la jetée principale en utilisant le débit de franchissement Q pour quantifié les franchissements derrière le mur de garde avec les critères de sécurité qui sont définies d'après le manuel Eurotop 2016 comme suit :

- $Q = 0,3$ l/m/s : préservation de la sécurité des piétons avertis ;
- $Q = 5$ à 10 l/m/s : pas de dégâts structurels ;
- $Q < 5$ l/m/s : Embarcation en sécurité pour exploitation (dans notre cas elles sont assez loin du mur de garde du fait des terres plein large). (*Eurotop 2016*)

5.5 Implantation et positionnement des sondes

Après avoir fait la construction du modèle en bassin à houle (voir chapitre 4), on met en place les sondes pour déterminer les houles en des points bien précis.

Les sondes de mesures de houles sont placées d'une façon judicieuse pour donner une meilleure description de l'agitation dans l'aménagement intérieur du port, et suivant la direction de la propagation de la houle.

Pour cela on dispose de douze (12) sondes qu'on place comme suit : (Figure 5.1)

- La sonde N°1 est placée au niveau de la passe d'entrée du port (entre le musoir de la jetée principale et le musoir de la jetée secondaire) ;
- La sonde N°2 et N°9 sont placées au niveau du quai de débarquement ;
- Les sondes N°3, 4, 5, 6, 7, 8 et 10 sont placées au niveau des appontements flottants ;
- La sonde N°11 est placée au niveau des quai voiliers ;
- La sonde N°12 est placée à coté de garde côte.

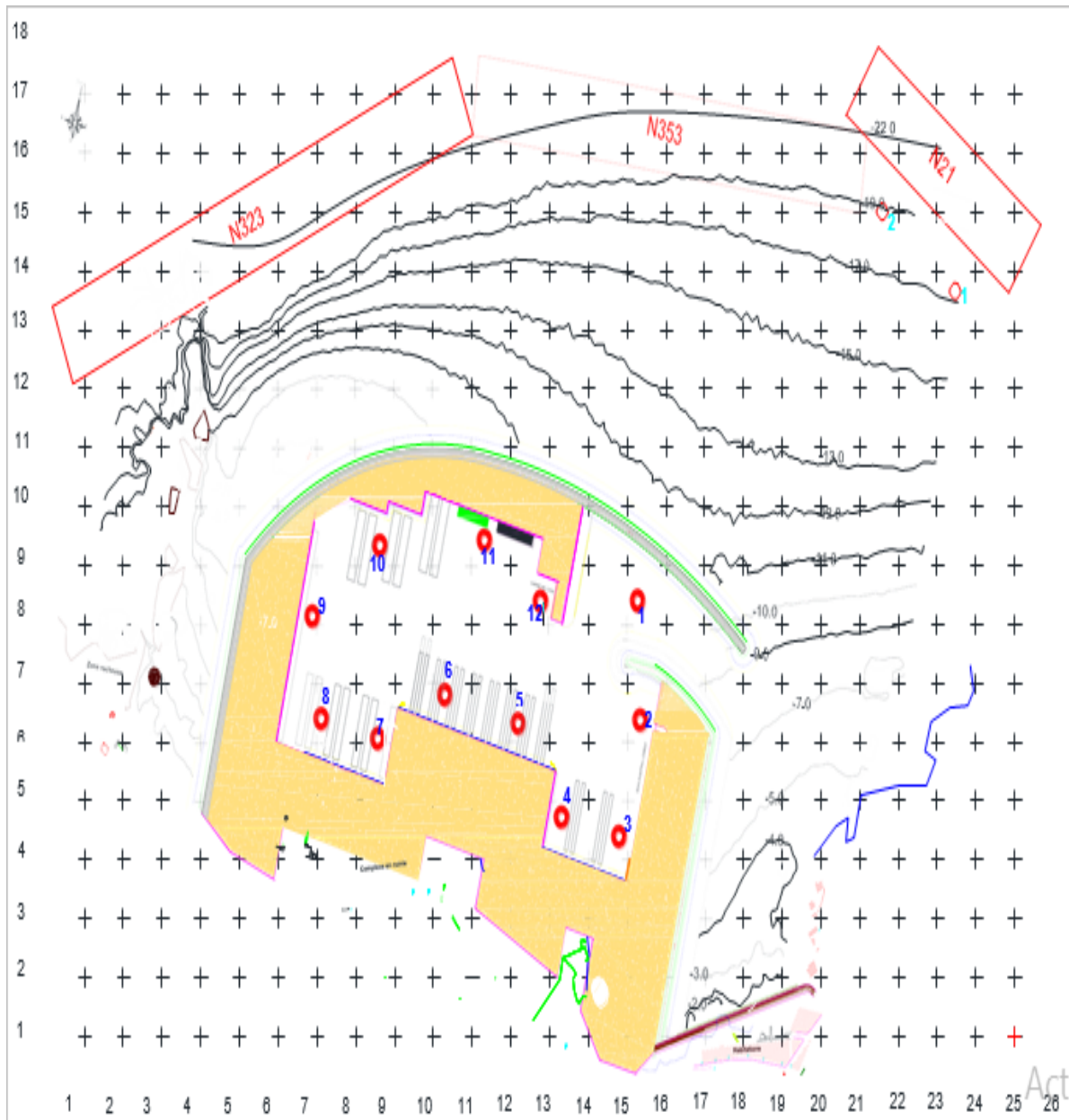


Figure 5.1 : Implantation des sondes.

5.6 Génération de la houle

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

Largeur :	19 m
Profondeur :	1 m
Longueur :	26m

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 élabore le signal

de commande lié à un logiciel informatique dénommé WAVEGEN représentant un train de houle théorique en nature et converti en train de houle en modèle.

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

5.7 Mesure de la houle

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.

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

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

Hauteur moyenne (H) : Elle est définie comme la moyenne des vagues enregistrées dans un train de houle ;

Période de pointe (T_p) : C'est la période qui correspond à la plus grande densité d'énergie spectrale.



Photo 5.1 : Etat initiale du bassin à houle.

5.8 Conditions des houles

Les conditions de houles retenues pour les essais en bassin à houle résultant de l'étude de réfraction faite au stade de l'avant-projet sommaire (voir chapitre 2). Les points d'extraction de la houle après réfraction sont situés à -20,0m pour les trois directions de houles à savoir N21°, N353° et N323°, elles sont résumées comme suit :

Tableau 5-1 : Caractéristiques de la houle à -20,0m.

Occurrences (année)	Hs (m)		
	N21°	N353°	N323°
H _{1an}	2,09	2,51	2,34
H _{2ans}	3,96	3,87	4,30
H _{5ans}	4,55	4,90	5,60
H _{10ans}	5,01	5,45	6,55
H _{20ans}	5,40	6,24	7,50
H _{50ans}	6,01	7,18	8,74
H _{100ans}	6,44	7,86	9,52

5.9 Conditions hydrographiques

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

- Niveau 0,00 m NGA : pour les essais de la série progressive ;
- Niveau + 0,90 m NGA : pour les essais de la série d'endurance.

5.10 Description du modèle de stabilité

Les essais de stabilité ont été effectués en même temps que les essais d'agitation et sur le même modèle tridimensionnel utilisé pour l'étude d'agitation, Et ils se déroulent en deux phases.

5.10.1 Essais progressifs

L'ouvrage est d'abord soumis à une petite houle appelée « houle de tassement » pour réaliser l'imbrication naturelle des blocs de la carapace, puis on applique des houles exceptionnelles augmentées par paliers progressifs d'une durée de 17 minutes en modèle qui correspond à 2

heures en nature jusqu'à la houle extrême, généralement la houle de période de retour de cent ans, des observations seront notées pendant le déroulement de chaque test.

5.10.2 Essais d'endurance

Pour tester la stabilité extrême des ouvrages de protection on procède à des essais d'endurance d'une durée de 2 heures en modèle qui correspond à une tempête de 15 heures en nature, l'essai est effectué avec la houle extrême à savoir la houle cinquantennale ou centennale pour se situer dans le cas le plus défavorable et optimiser au maximum les ouvrages.

A la fin des essais, le bassin sera vidé pour permettre une meilleure constatation des dégâts, Ainsi l'étude de stabilité permet de modifier la variante initiale au fur et à mesure de l'analyse des résultats afin d'optimiser une structure de digue qui devrait être stable et économique.

Il est rappelé que l'essai d'endurance est réalisé après les essais progressifs en ne portant aucune modification ou changement dans la constitution des ouvrages.

5.11 Mesure des franchissements

Pour la mesure des franchissements, il a été mis en place deux bacs derrière le mur de garde.

A la fin de chaque essais le volume d'eau ainsi récoltée dans le bac est mesuré rapportée à la durée du test.

5.12 Etude des variantes et résultats des essais de stabilité et d'agitation en bassin à houle

Les essais d'optimisation des ouvrages de protection menés en modèle réduit ont été effectués selon les trois directions N353°, N323°et N21°.

Des houles, allant de celle ayant une période de retour d'une année jusqu'à celle de 100ans, ont été générées selon les trois directions citées ci-dessus sur les ouvrages. Celles-ci ont constitué les caractéristiques des essais progressifs. Les essais d'optimisation extrême, à savoir l'endurance, ont été menés avec une houle de période de retour de 100ans respectivement pour les trois directions de propagation de la houle.

5.12.1. La variante 1

La 1 ère variante est montrée dans la photos ci-dessous.

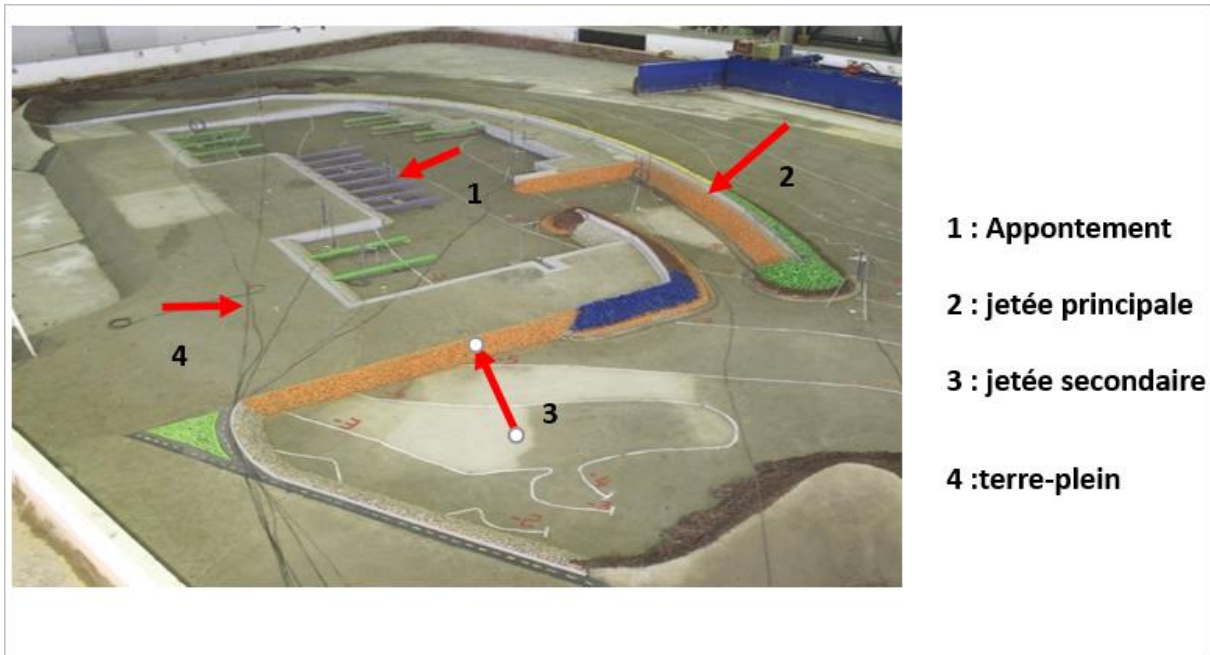


Photo 5.2 : La variante n°1 en bassin à houle.

✚ Essais progressifs

Les observations faites pendant la série progressive ont été effectuées que pour la direction N°21 de la variante n°1 sont données dans le tableau 5-2.

Tableau 5-2: Observations des essais progressifs sur la variante 1.

Occurrences	Tp (s)	Hs obtenue à -20 m	Hs obtenue devant l'ouvrage à -11,0m	Observations
H 1an	6,84	2,09	1,54	Rien à signaler.
H2ans	9,75	3,97	3,47	Rien à signaler.
H5ans	10,48	4,31	3,75	Léger embruns au niveau de la coupe musoir.
H10ans	11,01	5,07	4,52	Léger franchissements.
H20ans	11,42	5,31	4,74	Franchissement moins important.
H50ans	12,03	6,23	5,14	Franchissement assez important toujours dans le même endroit.
H100ans	12,43	7,03	5,24	Franchissement très important.



Photo 5. 3 : Déferlement important devant le musoir à H50ans.

✚ Essais d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2 h en modèle qui correspond à une tempête de 15 h en nature.

Les observations des essais d'endurance sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5-3 : Observations des essais d'endurance sur la variante 1.

Occurrences	Tp (s)	Hs obtenu en -20 m	Hs obtenue devant l'ouvrage à -11,0m	Observations
H100ans	12,43	6,50	5,45	<ul style="list-style-type: none"> - Franchissement très important au point où la stabilité du talus intérieur est affecté avec l'apparition d'une zone d'érosion au niveau de la berme. - Dégradation du talus intérieur. - Glissement de 03 BCR 35t au niveau du musoir (axe).



Figure 5.4 : Franchissement important à H100ans à l'essai d'endurance +0,90m qui retombent directement sur la berme du talus intérieur.

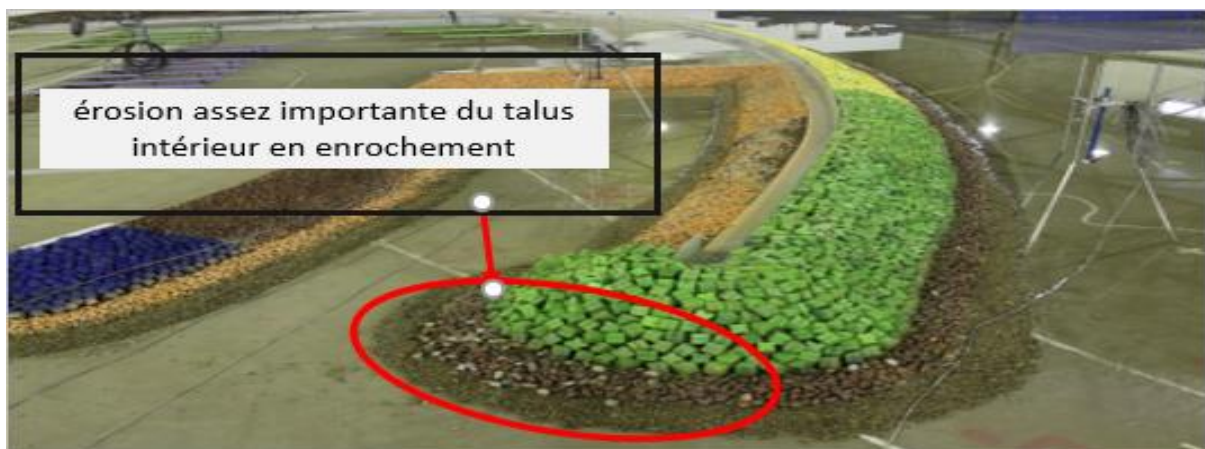


Photo 5.5 : État des ouvrages après essai +0,90m. ici érosion assez importante du talus intérieur en enrochement 1-3t.

✚ Conclusion

Les essais sur le profil de la variante 1 n'ont pas été concluants par rapport à la direction N21°, le franchissement important a été obtenu et qui a causé des dégâts au niveau du talus intérieur.

5.12.2 Variante 2

Cette variante est conçue tout en améliorant la variante précédente. Elle est composée des mêmes profils des jetées que la variante précédente avec élargissement de la dalle de roulement

de 4,10m pour atteindre 12,10m afin de protéger la berme du talus intérieur des grands paquets de franchissements.

La photo 5.6 montre l'élargissement de la dalle de roulement de la jetée principale:

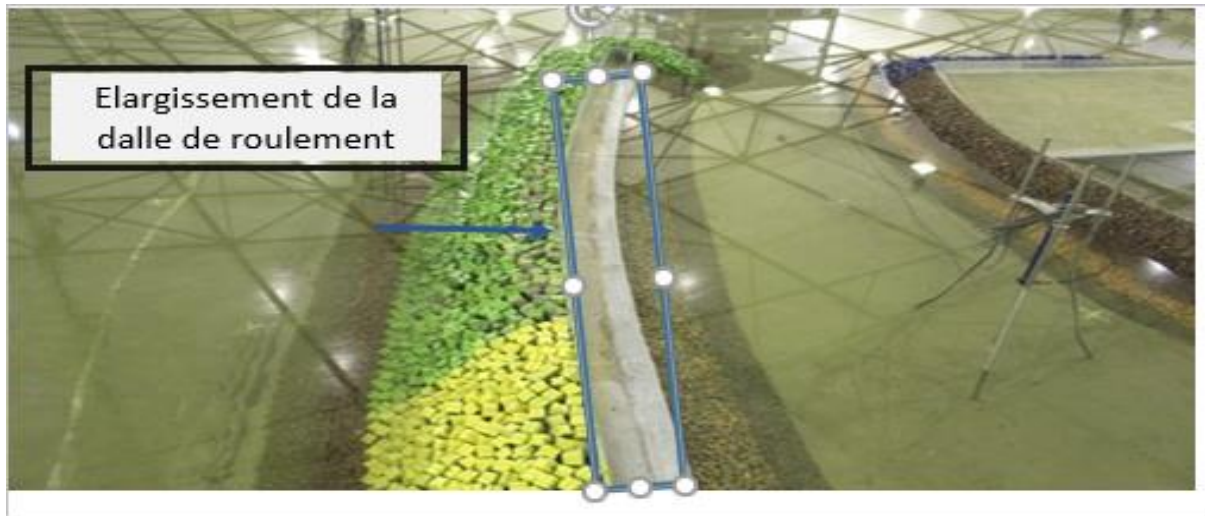


Photo 5.6 : Élargissement de la dalle de roulement de la jetée principale pour atteindre 12,10m.

✚ Essais progressifs

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante n°2 pour la direction 323° et 353 ° sont données dans le tableau 5-4.

Pour la direction 21°, les dégâts sur le talus intérieur sont observés à partir de l'essai d'endurance donc il a été jugé de refaire pour cette variante que cet essai.

Tableau 5-4: Observations des essais progressifs sur la variante 2 pour la direction N°323

Occurrences	Tp (s)	Hs obtenue à -20 m	Hs obtenue Devant l'ouvrage à environ -9,50m	Observations
H 1an	7,29	2,83	1,96	- Rien à signaler.
H2an	10,18	4,65	3,38	- Quelques embruns.
H5a	11,63	5,51	3,88	- Quelques embruns.
H10ans	12,52	6,36	4,37	- Franchissements faibles au niveau du coude. $Q_{\text{moy_H10ans}} = 0,63$
H20ans	13,31	7,69	5,07	- Franchissement assez important. $Q_{\text{moy_H20ans}} = 3,15 \text{ l/s/ml}$;

H50ans	14,19	9,00	5,53	- Franchissement très important toujours dans le même endroit. Q_moy_H50ans = 5,20 l/s/ml
H100ans	14,68	9,56		- Franchissement très important.



Photo 5.7 : Déferlement très important au niveau du massif rocheux à H20ans.

Tableau 5-5 : Observations des essais progressifs sur la variante 2 pour la direction N°353.

Occurrences	Tp (s)	Hs obtenue à -20 m	Hs obtenue devant l'ouvrage à -11,0m	Observations
H 1an	7,58	2,67	2,16	- Rien à signaler.
H2an	9,63	3,65	3,74	- Quelques embruns au niveau de terre-plein du quai d'avitaillement "ancien emplacement".
H10ans	11,48	5,38	4,64	- Franchissements ± important sur le même endroit. Q_moy_H10ans = 1,68 l/s/ml
H20ans	12,24	6,34	4,87	- Franchissement assez important. Q_moy_H20ans = 8,70 l/s/ml
H50ans	13,05	7,41	5,22	- Franchissement important toujours dans le même endroit.
H100ans	13,58	7,97	5,26	- Franchissement très important.



Photo 5.8 : Franchissement assez important à H10ans.

➤ **Essai d'endurance**

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2 h en modèle qui correspond à une tempête de 15 h en nature.

Les observations des essais d'endurance sont présentées dans le tableau 5-6.

Tableau 5-6 : Observations des essais d'endurance sur la variante 2.

Occurrences	Directions	Tp (s)	Hs obtenue à -20 m	Hs obtenue devant l'ouvrage à -11,0m	Observations
H100ans	N21°	12,43	6,40	5,25	- Franchissement très important. - Les BCR de la carapace et les enrochements de la butée sont stables.
	N323°	14,68	9,63	5,77	- Franchissement très important.
	N353°	13,58	7,84	5,78	- Franchissement très important avec légère érosion du talus intérieur a l'extrémité de la coupe B-B.

✚ **Conclusion**

Après l'analyse des résultats de la variante 2 pour les trois directions, il a été conclu que le franchissement est jugé assez important pour l'exploitation des terrepleins à partir de H_{10ans} pour N353° et à partir de H_{20ans} pour N323° pour les essais progressifs.

5.12.3 Variante 3

Le profil de la variante 3 diffère de celui de la Variante 2 par :

- Élargissement du noyau de 10,0m;
- Ajout d'une couche en enrochement 1-3t au niveau de la berme arasée à +5,50m;
- Mis en place d'une couche en enrochement 2-3t arasée à +6,60m ;
- Abaissement de la cote d'arase de la carapace BCR26t à +7,80m.

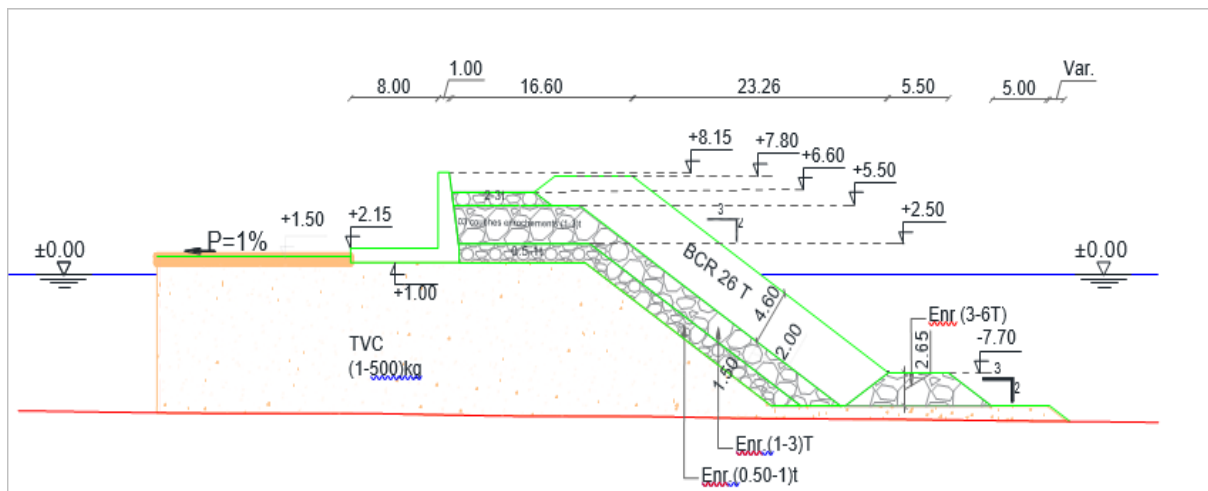


Figure 5.2: Schéma montrant les différentes modifications .

Le profil de la variante 3 a été soumis à une seule direction (la direction N323°) afin de vérifier la stabilité des ouvrages.

✚ Essais progressifs

Les observations faites pendant la série progressive sur la variante 3 sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-7 : Observations des essais progressifs sur la variante 3 pour la direction N°353.

Occurrences	Tp (s)	Hs obtenue à -20 m	Hs obtenue Devant l'ouvrage à environ -9,50m	Observations
H	7,29	2,96	2,22	RAS
H10ans	12,52	6,53	4,57	- Franchissements considérablement atténués au niveau du coude. Q_moy_H10ans = 0,027 l/s/ml
H20ans	13,31	7,46	5,23	- Même constat avec Q_moy_H20ans = 0,193 l/s/ml.

H50ans	14,19	8,55	5,60	- Même constat avec $Q_{\text{moy_H50ans}} = 0,335 \text{ l/s/ml}$.
H100ans	14,68	9,60	5,62	- Franchissement \pm important mais qui sont considérablement atténués.

✚ Essai d'endurance

Dans notre cas, la durée de l'essai est de 2 h en modèle qui correspond à une tempête de 15 h en nature.

Les observations des essais d'endurance sont présentées dans le tableau 5-8 ci-dessous.

Tableau 5-8 : Observations des essais d'endurance sur la variante n°3.

Occurrences	Tp (s)	Hs obtenue à - 20 m	Hs obtenue devant l'ouvrage	Observations
H100ans	14,68	9,63	5,77	Quelques franchissements faibles qui atteignaient légèrement le terre-plein.

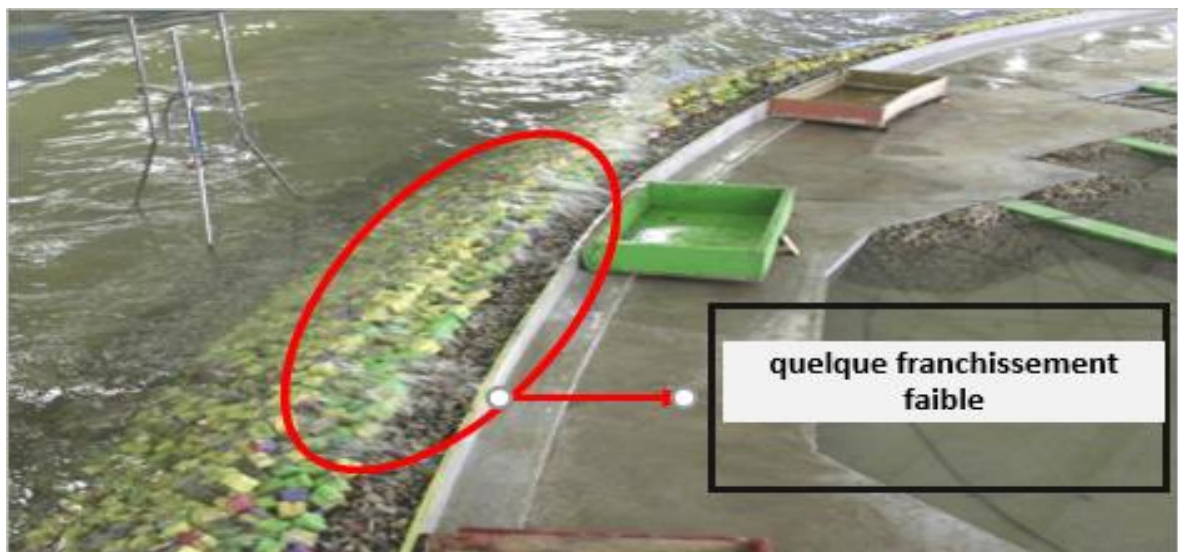


Photo 5.9 : Quelques franchissements faibles qui atteignent légèrement le terre-plein.

Conclusion

Après l'analyse des résultats de variante 3, il a été conclu ce qui suit :

- Malgré quelques glissements de BCR 26t, le profil courant est jugé stable ;

- Les franchissements ont considérablement atténué pour la variante 03 de la direction N323° suite à l'élargissement de la berme du profil ainsi que la création d'un bassin d'amortissement pour recueillir les grands paquets, pour la direction N353° les essais n'ont pas été exécutés mais on peut conclure que la tendance des résultats obtenue pour N323° synchronisera certainement avec la direction N353°.

✚ Essais d'agitation

Les résultats des essais d'agitations sur la variante 3 sont illustrés dans le tableaux ci-dessous.

Tableau 5-9 : Les résultats des essais d'agitation sur la variante 3.

		Sondes												
Direction	Occurrence	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	
Variante 02 (APS-modifié)	N21°	H1an	0,17	0,12	0,08	0,14	0,04	0,08	0,11	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
		H2an	0,28	0,30	0,14	0,40	0,21	0,09	0,10	0,16	0,08	0,09	0,16	0,15
		H5ans	0,29	0,30	0,15	0,46	0,19	0,10	0,11	0,16	0,09	0,09	0,17	0,16
		H10ans	0,45	0,53	0,27	0,65	0,35	0,13	0,16	0,36	0,17	0,16	0,30	0,31
		H20ans	0,45	0,48	0,32	0,68	0,34	0,11	0,15	0,29	0,18	0,15	0,25	0,24
		H50ans	0,49	0,51	0,31	0,71	0,35	0,12	0,16	0,29	0,20	0,16	0,29	0,26
		H100ans	0,53	0,56	0,47	0,80	0,45	0,15	0,18	0,34	0,22	0,24	0,31	0,27
	N353°	H1an	0,17	0,08	0,07	0,09	0,07	0,08	0,06	0,10	0,05	0,07	0,05	0,05
		H2an	0,28	0,21	0,12	0,26	0,20	0,10	0,11	0,34	0,14	0,14	0,15	0,14
		H10ans	0,52	0,51	0,35	0,66	0,38	0,13	0,22	0,60	0,30	0,22	0,30	0,26
		H20ans	0,62	0,59	0,38	0,76	0,41	0,16	0,23	0,66	0,33	0,25	0,36	0,32
		H50ans	0,75	0,84	0,59	1,04	0,51	0,22	0,35	0,82	0,46	0,31	0,45	0,40
		H100ans	0,78	0,80	0,66	0,97	0,52	0,24	0,39	0,81	0,47	0,32	0,44	0,41
	N323°	H1an	0,06	0,00	0,06	0,03	0,00	0,07	0,05	0,03	0,03	0,06	0,00	0,00
		H2an	0,14	0,04	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,04	0,04	0,07	0,04	0,03
		H5ans	0,15	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05	0,04
		H10ans	0,21	0,10	0,07	0,14	0,10	0,08	0,07	0,11	0,08	0,10	0,10	0,09
		H20ans	0,37	0,16	0,09	0,22	0,14	0,09	0,09	0,20	0,14	0,13	0,14	0,13
		H50ans	0,50	0,21	0,12	0,30	0,19	0,09	0,11	0,27	0,17	0,17	0,21	0,16
		H100ans	0,48	0,26	0,14	0,37	0,23	0,11	0,15	0,37	0,27	0,19	0,31	0,26

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 qui sont :

- Agitation admissible pour une houle annuelle : 30 cm ;
- Agitation pour une houle décennale : 60 cm.

Les graphes présentés dans les figures suivantes montrent les comparaisons :

- Entre la hauteur moyenne annuelle et l'agitation admissible annuelle ;
- Entre la hauteur moyenne décennale et l'agitation admissible décennale.

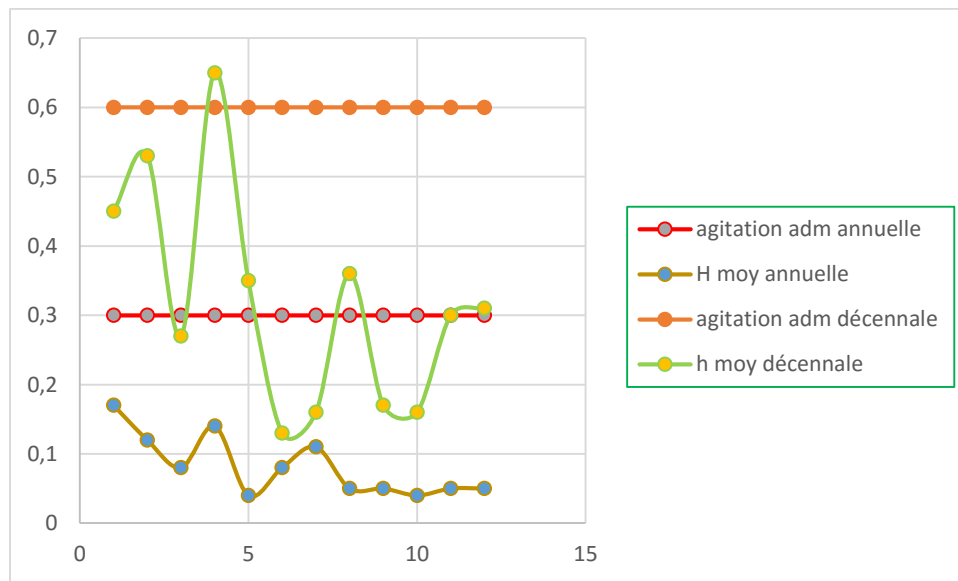


Figure 5.3 : Comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne pour la direction N° 21.

Sur la figure 5.3, il est observé :

- Une agitation moyenne enregistrée à l'intérieur du port par les sondes est inférieure à l'agitation résiduelle admissible « 0,3 » pour une houle annuelle ;
- Une agitation moyenne enregistrée à l'intérieur du port par les sondes est inférieure à l'agitation résiduelle admissible de « 0,6 » pour une houle décennale mis à part la sonde 4 qui est légèrement supérieure à la norme mais reste acceptable.

Ce qui nous ramène à dire que notre variante répond aux critères d'agitation retenue

→ Les résultats sont concluants.

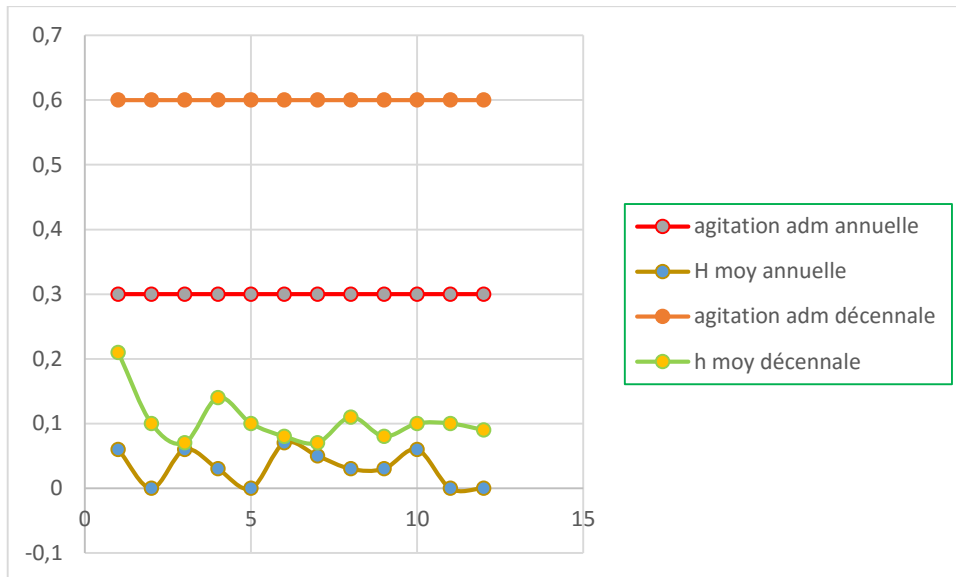


Figure 5.4 : Comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne pour la direction N° 353.

De la figure 5.4, il en ressort que :

- Une agitation moyenne enregistrée à l'intérieur du port par les sondes est inférieure à l'agitation résiduelle admissible « 0,3 » pour une houle annuelle ;
- L'agitation moyenne enregistrée à l'intérieur du port par les sondes est inférieure à l'agitation résiduelle admissible de « 0,6 » pour une houle décennale mis à part la sonde 4 qui est légèrement supérieur à la norme mais reste acceptable.

Ce qui nous ramène à dire que notre variante répond aux critères d'agitation retenue.

→ Les résultats sont concluants.

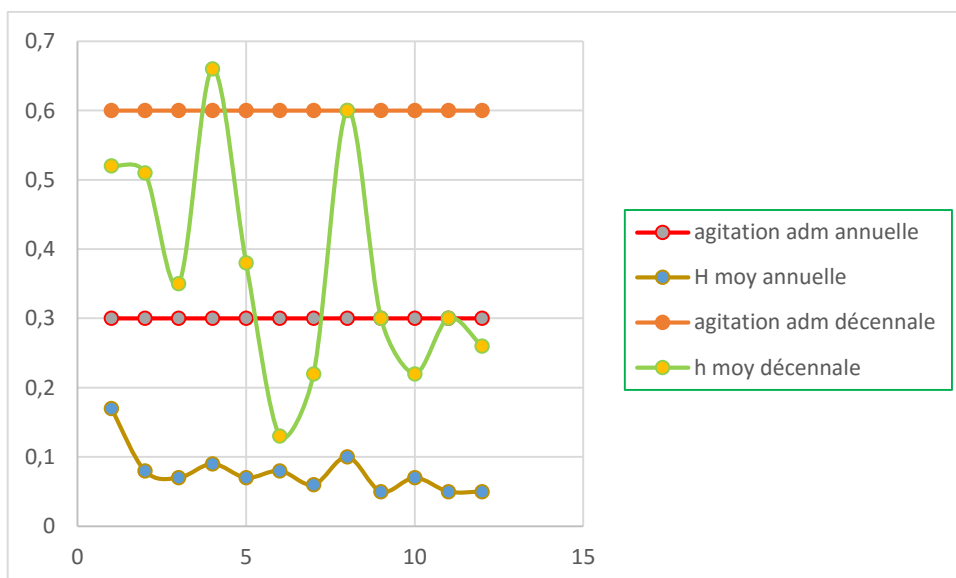


Figure 5.5: Comparaison entre l'agitation admissible et la hauteur moyenne pour la direction N° 323.

L'analyse des résultats permet de constater que l'agitation moyenne enregistrée à l'intérieur du port par les sondes (S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13, S14, S15) est inférieure à l'agitation résiduelle admissible "0,3 m" pour une houle annuelle et de "0,6 m" pour une houle décennale.

Ce qui nous ramène à dire que notre variante répond aux critères d'agitation retenue.

→ les résultats sont concluants.

➤ **Conclusion**

Les résultats des essais de la variante 3 testée répondent totalement aux critères d'agitation admissible et offrent des conditions hydrauliques satisfaisantes.

5.12. 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.

L'étude sur modèle réduit physique permet donc, la vérification du pré-dimensionnement des ouvrages de protection, de les optimiser, et enfin de les dimensionner définitivement pour être réaliser conformément ceux en nature.

Conclusion Générale

Notre contribution au projet d'étude de réalisation d'un port de plaisance à Cap Falcon – commune d'Ain El Turck-wilaya d'Oran nous a permis de prendre connaissances des différents étapes de réalisation de ce projet.

La première étape englobe la collecte et l'analyse de toutes les données disponibles concernant le site du port et ses alentours.

L'étape suivante avait pour but de déterminer les différentes échelles du modèle sur la base des données du prototype. La dernière étape a consisté à la construction du modèle en bassin à houle à fond fixe. Des essais se sont avérés nécessaires pour vérifier les critères d'agitation et tester la stabilité de chaque profil afin de retenir une variante finale.

La variante choisie pour l'implantation du port de Cap Falcon assure bien la stabilité et l'agitation suite à l'étude réalisée sur le modèle réduit physique.

BIBLIOGRAPHIE

BONNEFILLE, René. Cours d'hydraulique maritime. Masson :1980, 180 p.

BOS, Nicol. Voies de communication, routes travaux maritimes. s.l. : office des publications universitaires, 1984.

GHOMARI, Samira et TAIBI, Leila. Contribution à l'étude d'un port de pêche et de plaisance à EL –Aouana Wilaya de Jijel. Alger :2006, 110 p.

CHAPON, Jean. Travaux maritime Tome 1. Edition Eyrolles. Paris : 1971, 285 p.

BONNEFILLE, René. Cours d'hydraulique maritime. Edition Masson :1992, 180 p.

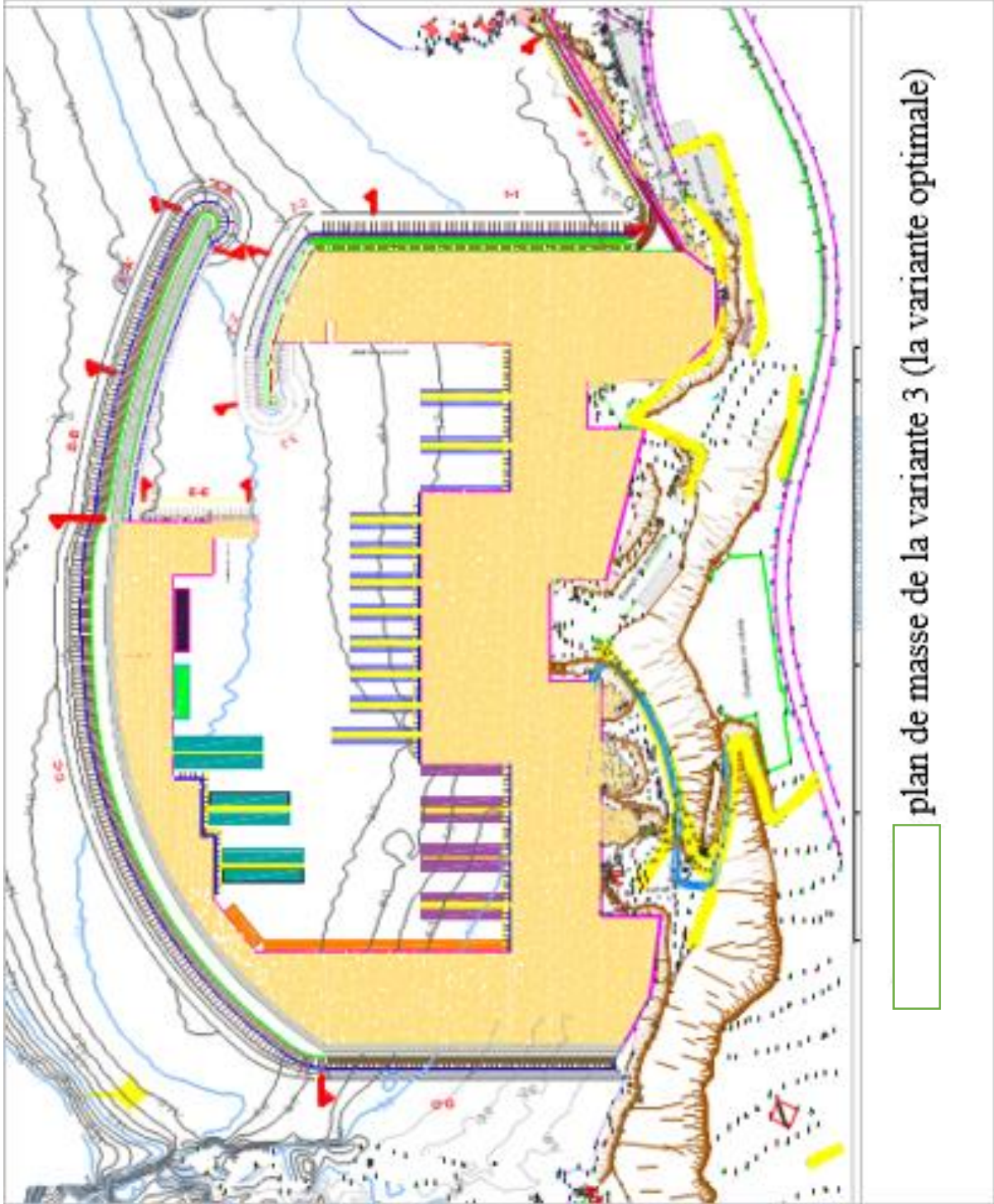
MOSTEFAOUI, Sofiane et BELAID, Bilel. Avant-projet sommaire de l'étude de réalisation d'un port de plaisance à Cap Falcon Wilaya d'Oran, Laboratoire d'études maritimes (LEM). Alger : décembre 2018.

BONNEFILLE, René (2010). Technique de l'ingénieur, Mouvements de la mer. Réf :C 4 610.

CARLIER, Michel. Hydraulique générale appliquée. Edition [Eyrolles](#). Paris :1972.

Annexes

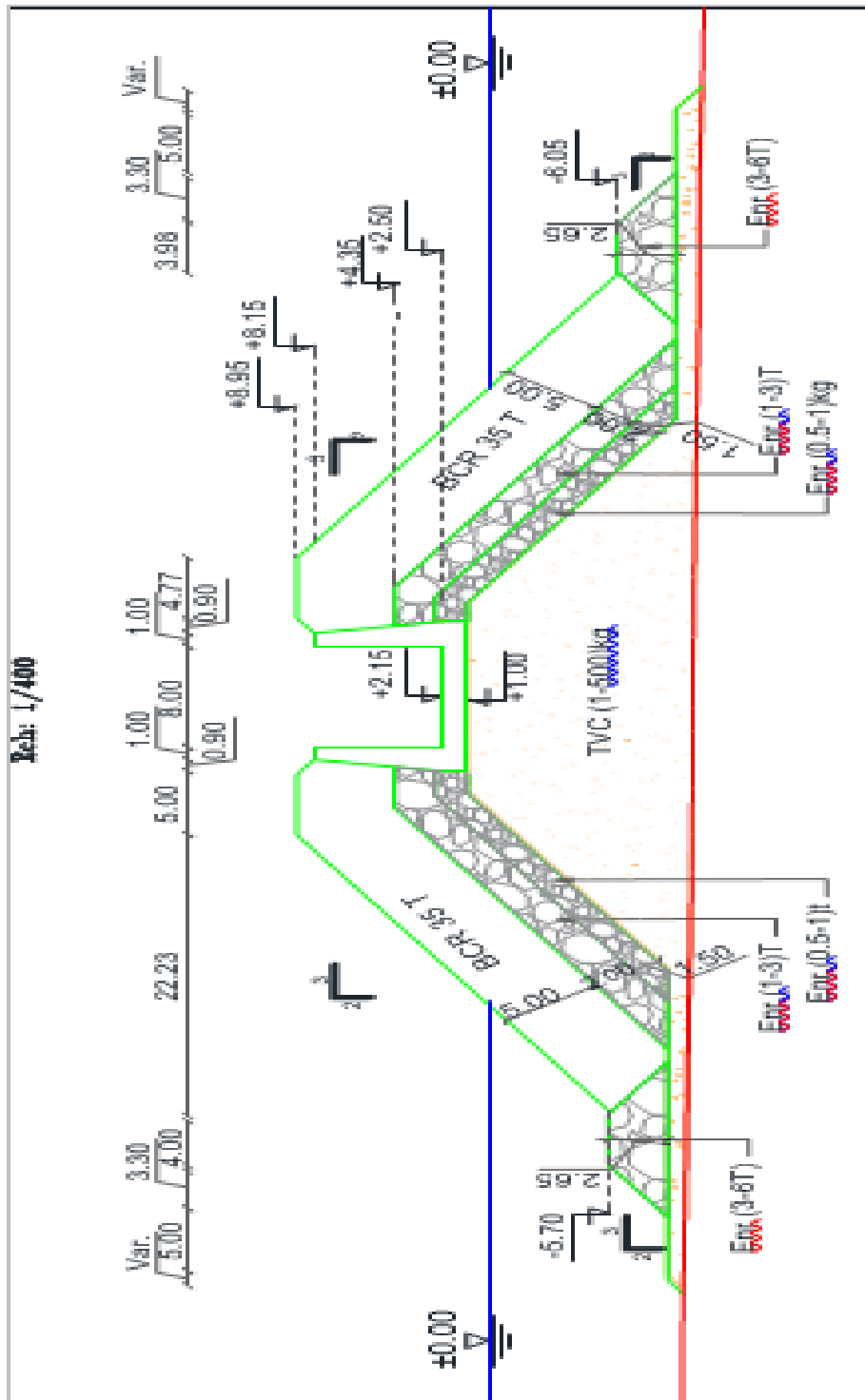
Annexe 1



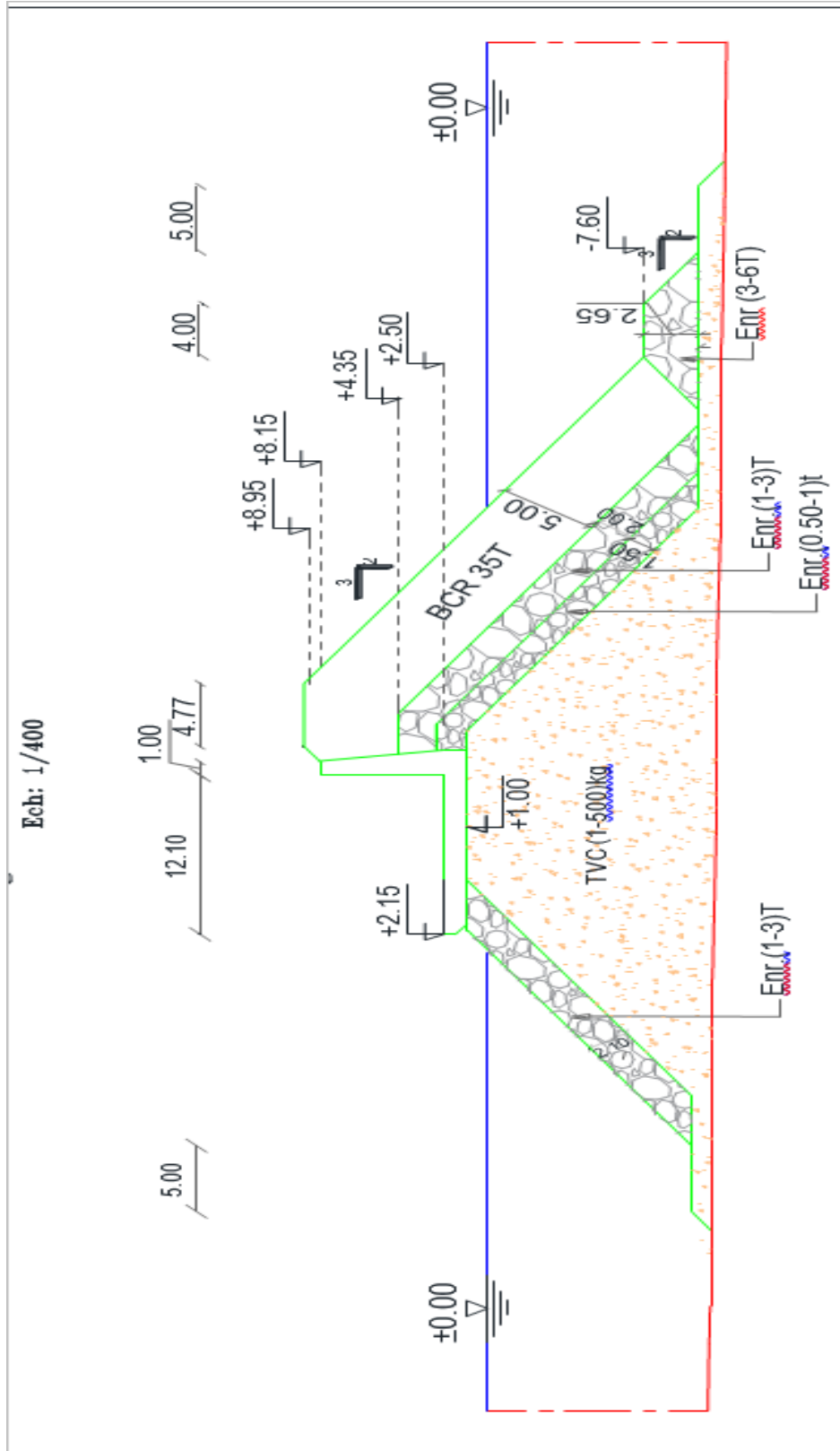
plan de masse de la variante 3 (la variante optimale)

Jetée principale

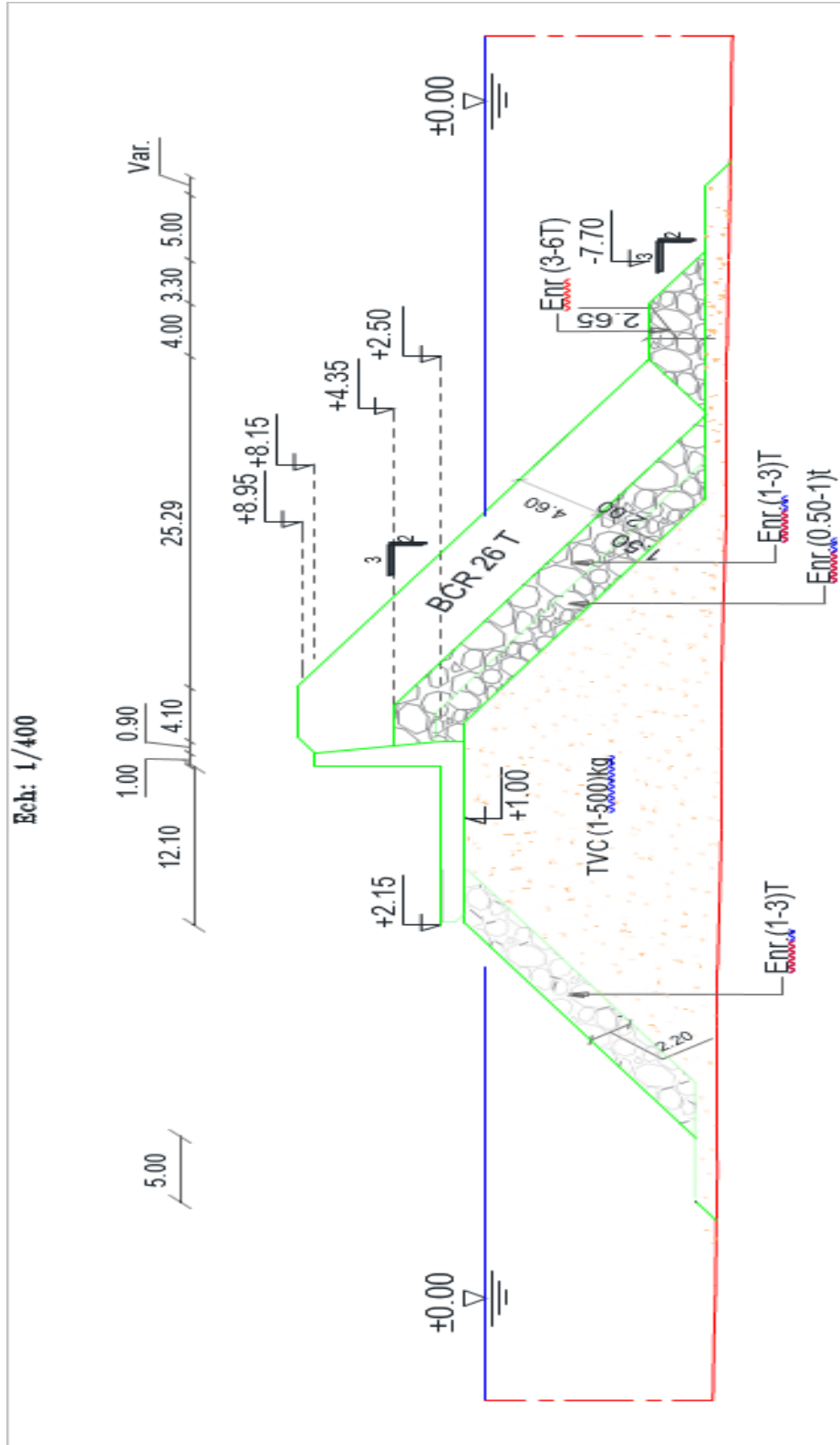
Annexe 2 : Coupe A-A



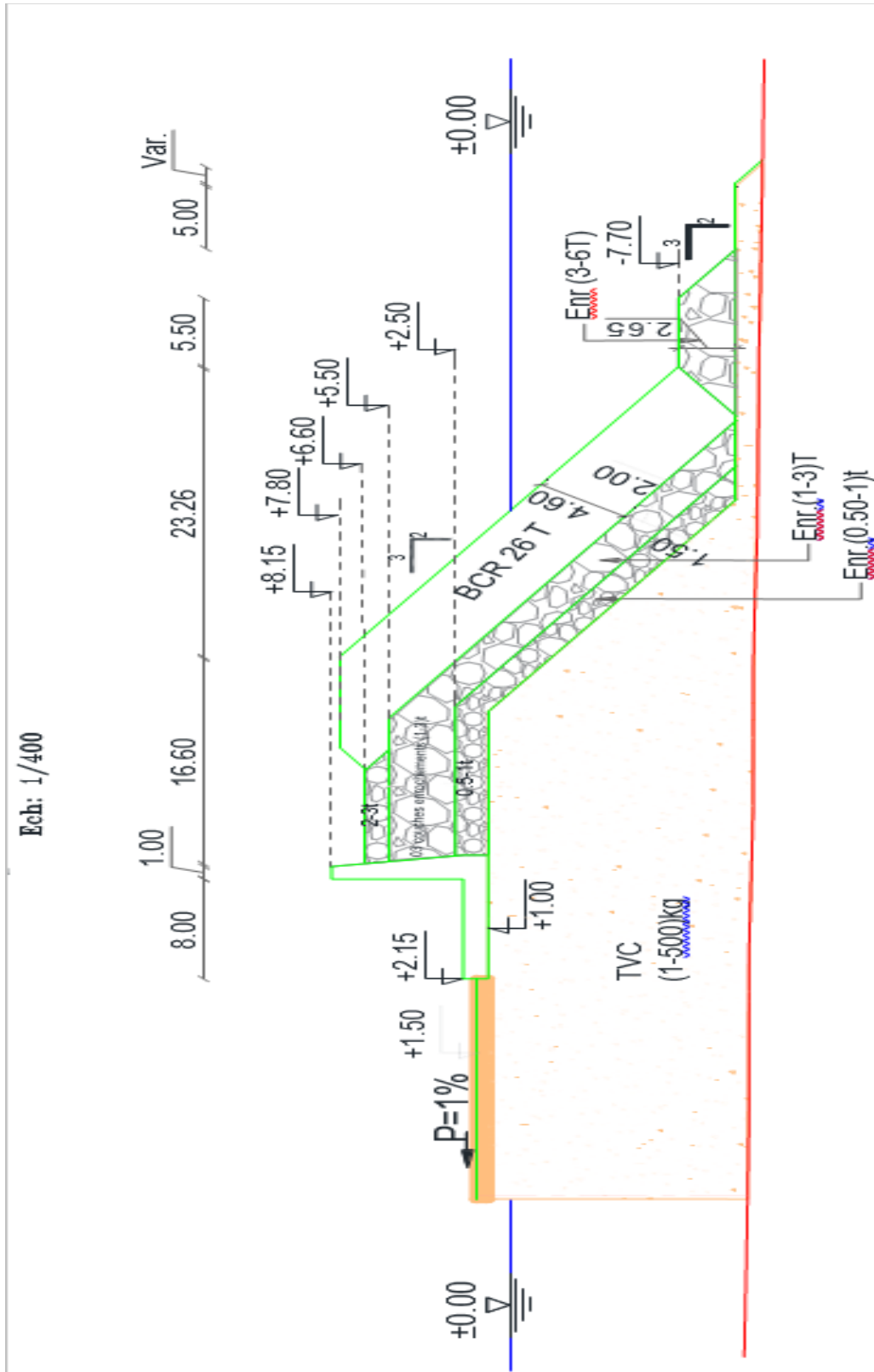
Annexe 3 : Coupe A'-A'



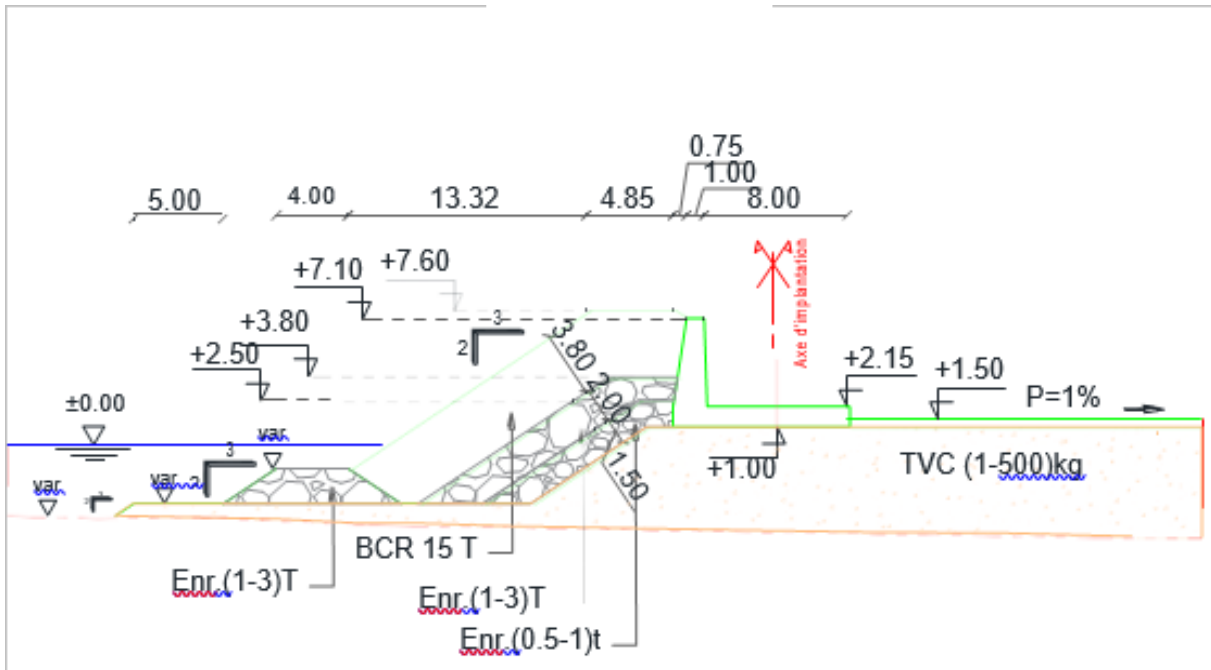
Annexe 4 : Coupe B-B



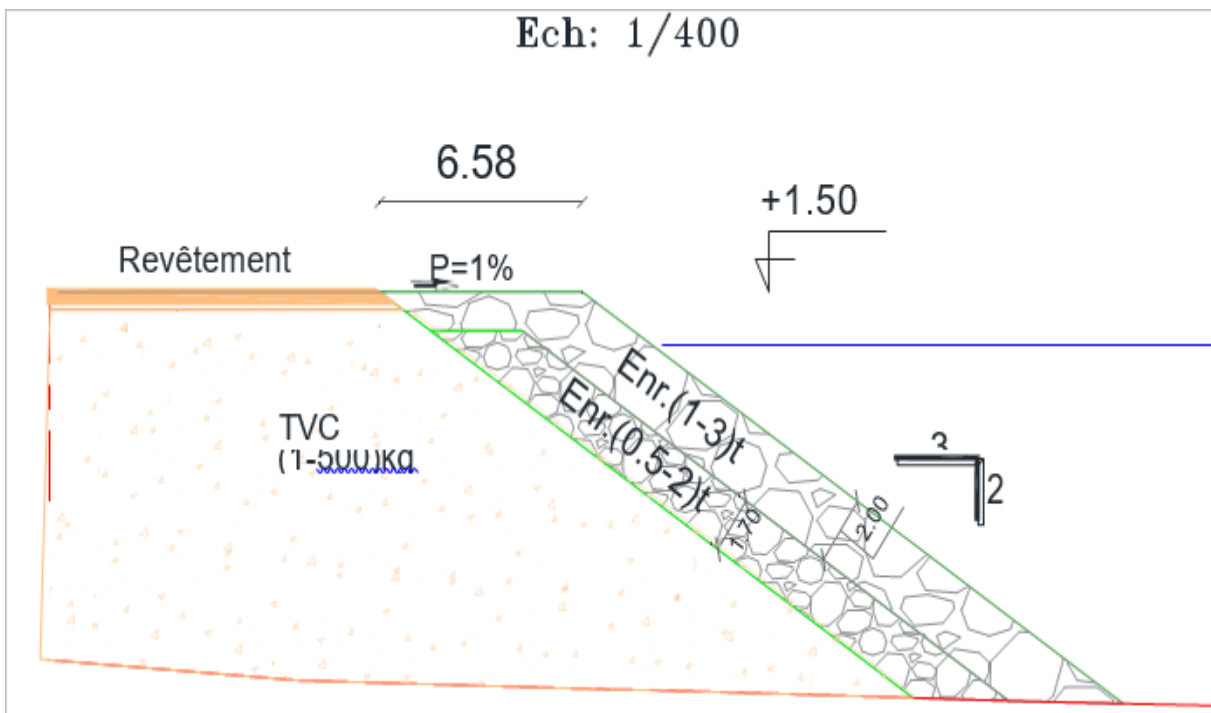
Annexe 5 : Coupe C-C



Annexe 6 : Coupe D-D

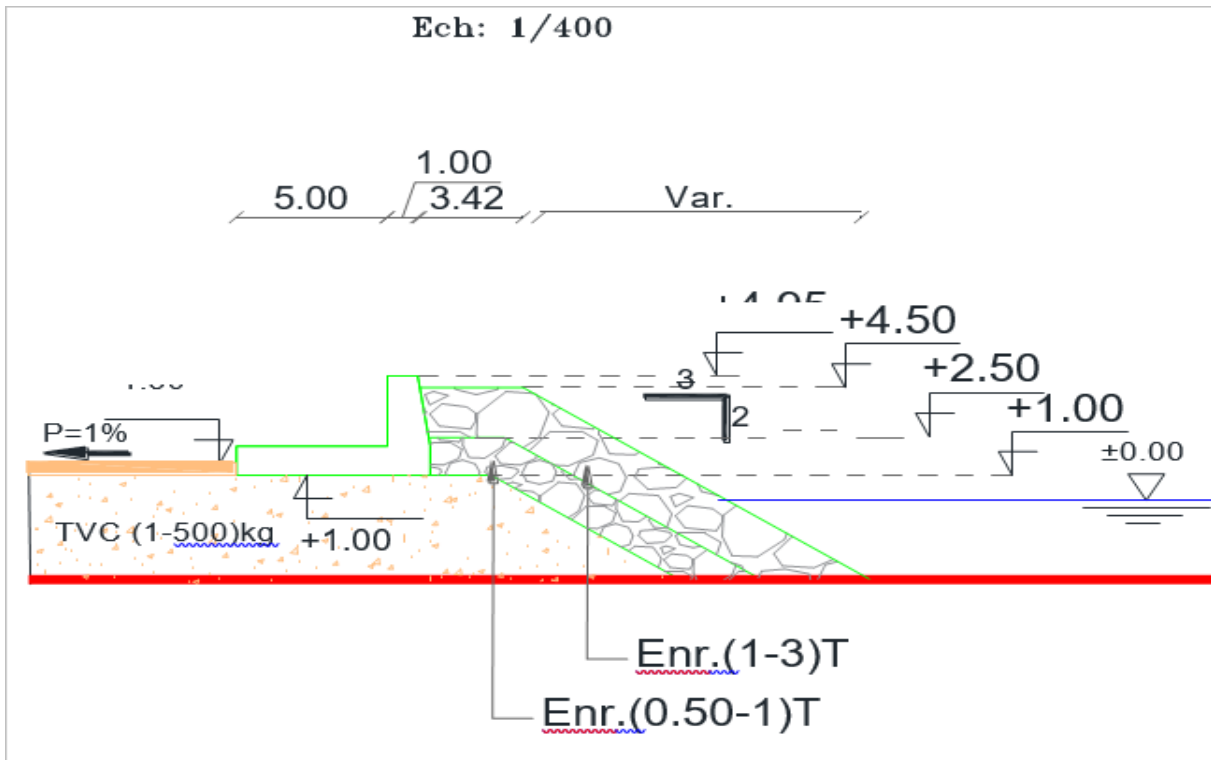


Annexe 7 : Coupe F-F

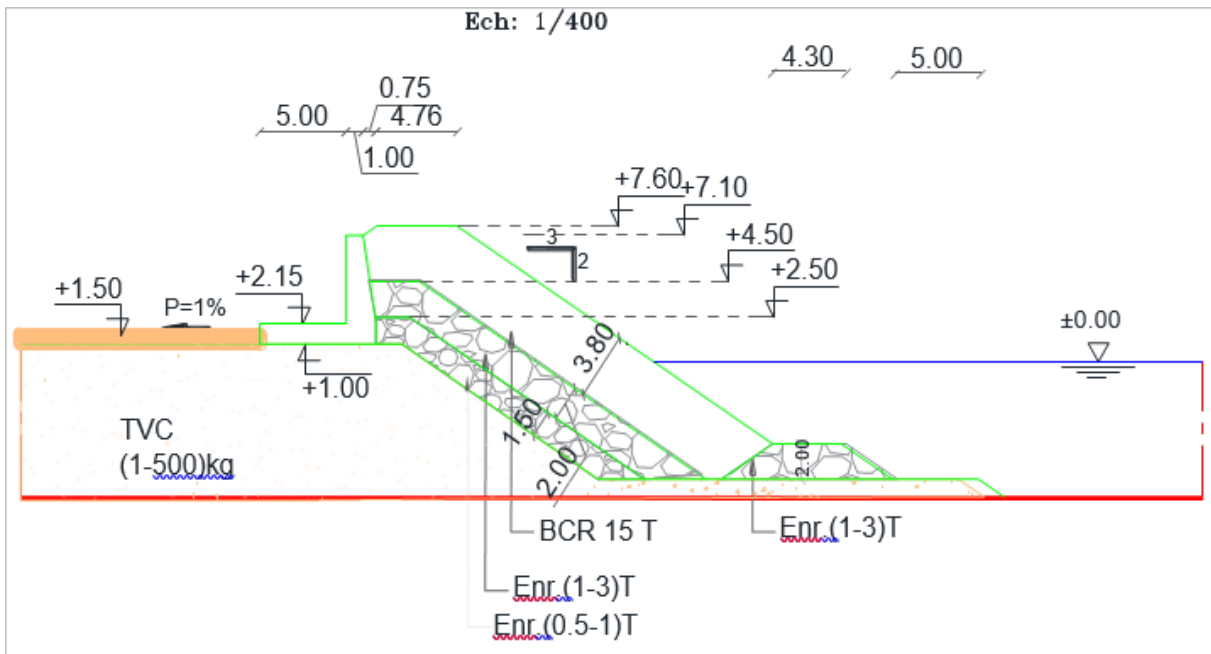


Jetée secondaire

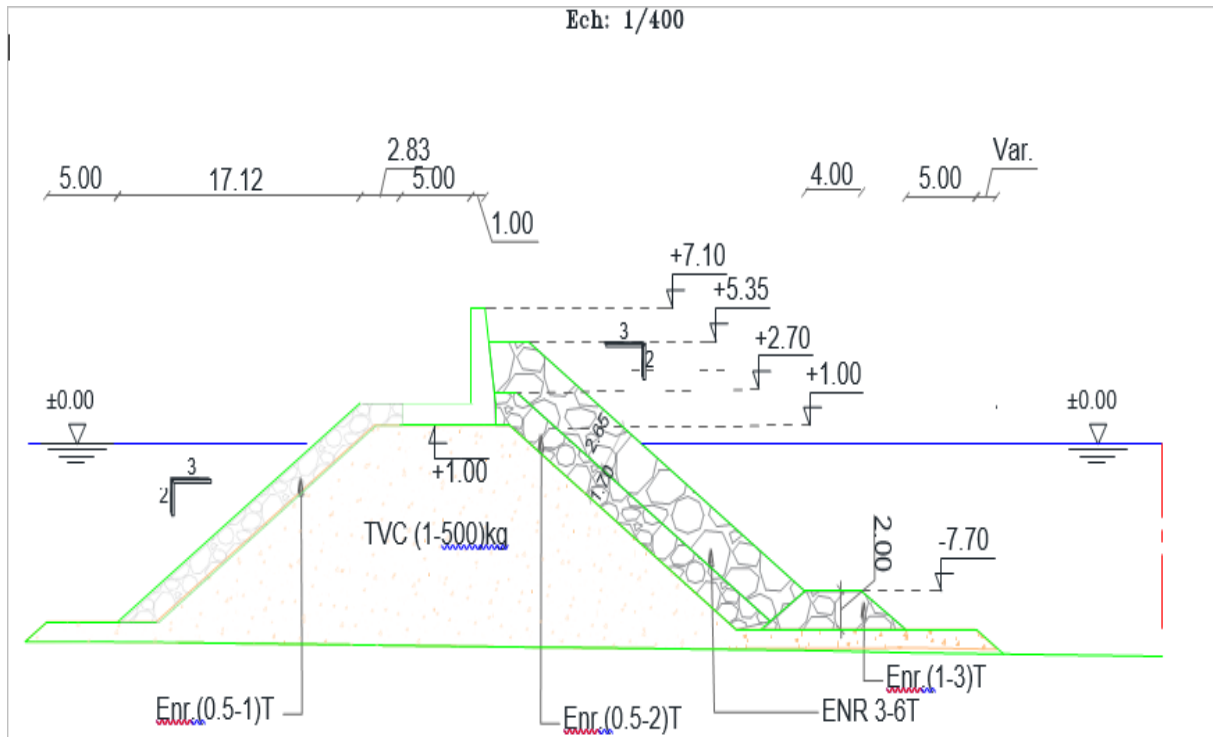
Annexe 8 : coupe 1-1



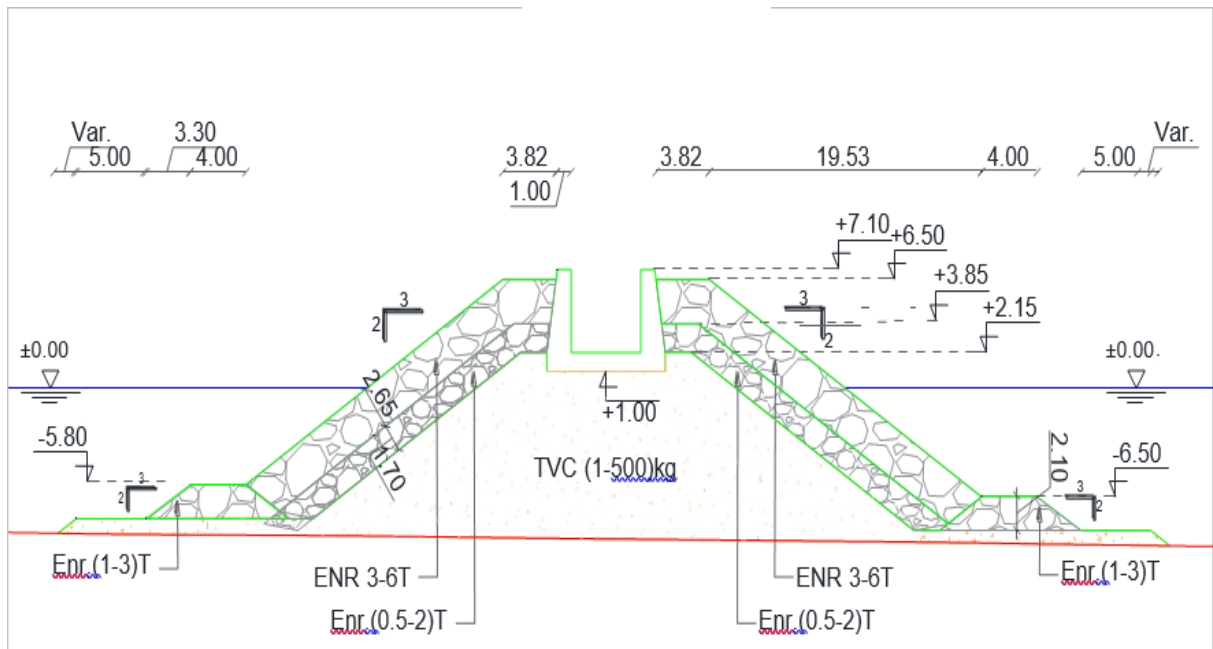
Annexe 9 : coupe 2-2



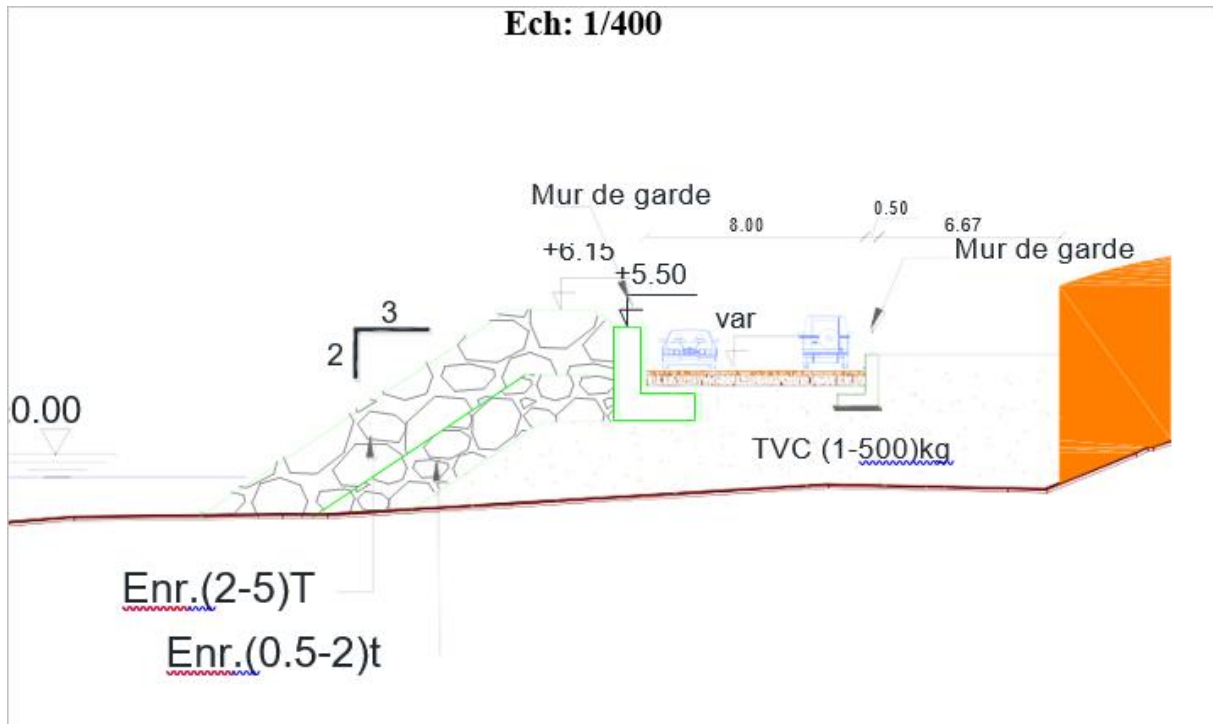
Annexe 10 : coupe 2'-2'



Annexe 11 : coupe 3-3



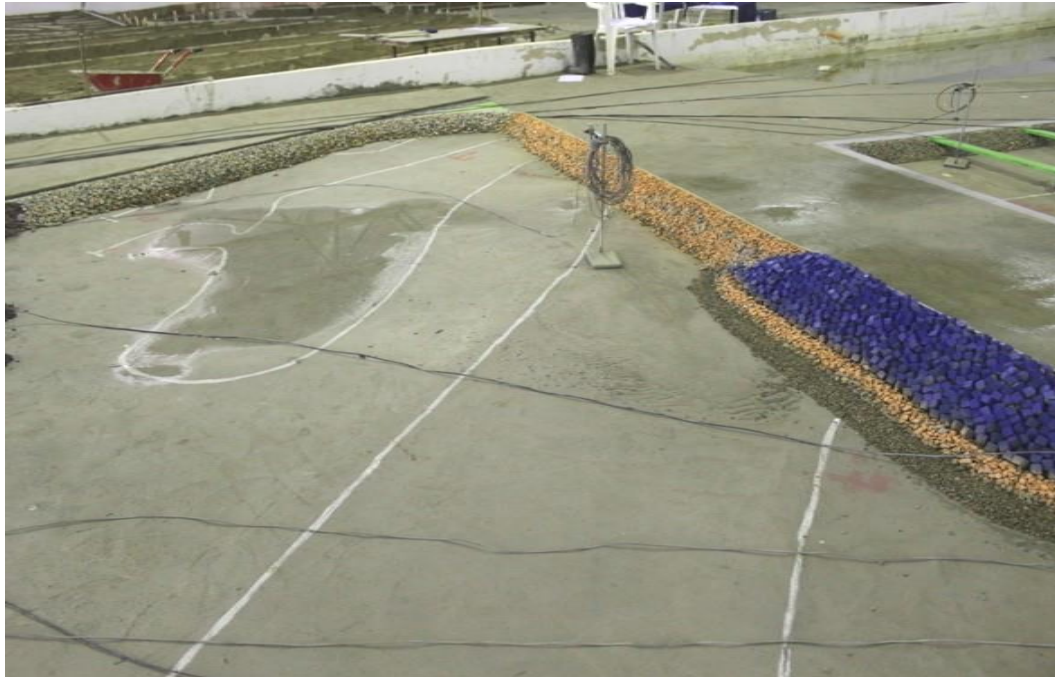
Annexe 12 : coupe E-E



Variante 1

Direction N°21

Annexe 13 : Stabilité parfaite des enrochements après essais de la jetée principale.



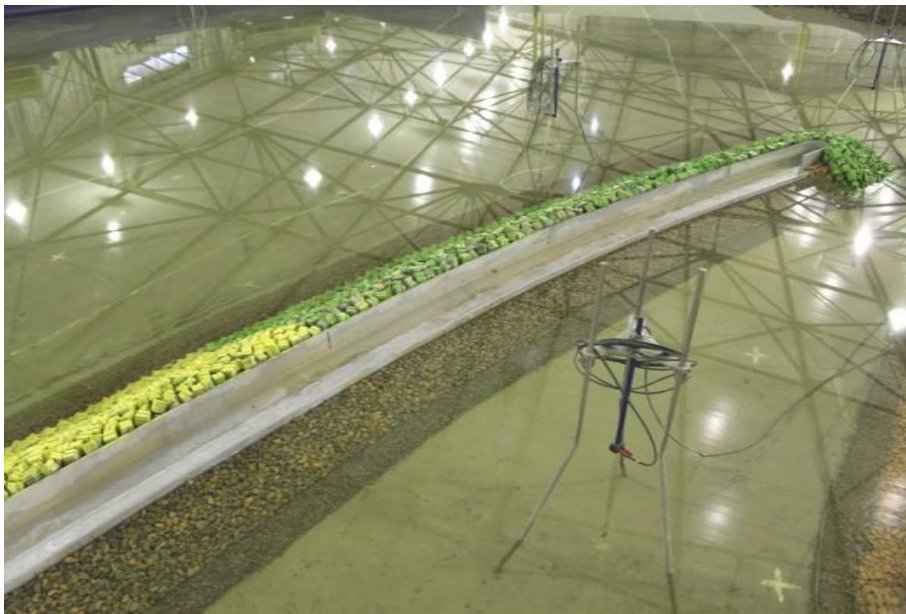
Variante 2

Direction N°21

Annexe 14 : Les franchissements n'atteignent plus le talus intérieur.



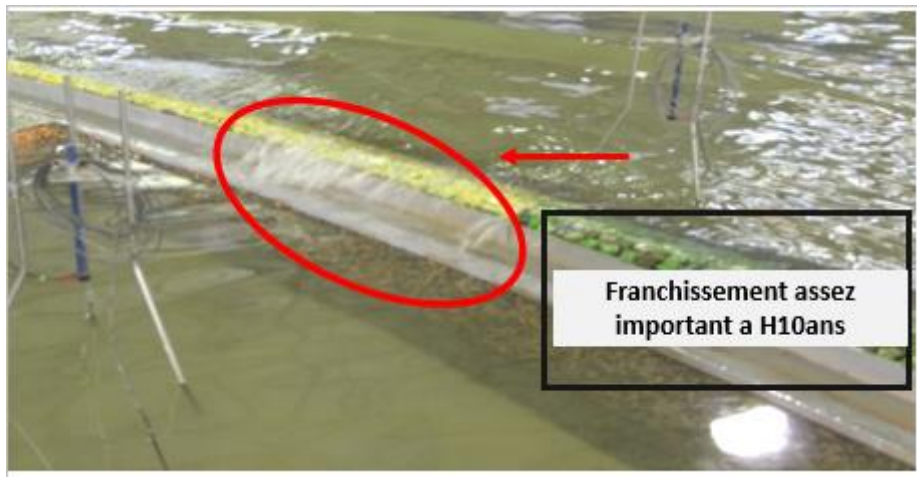
Annexe 15 : stabilité parfaite du talus intérieur



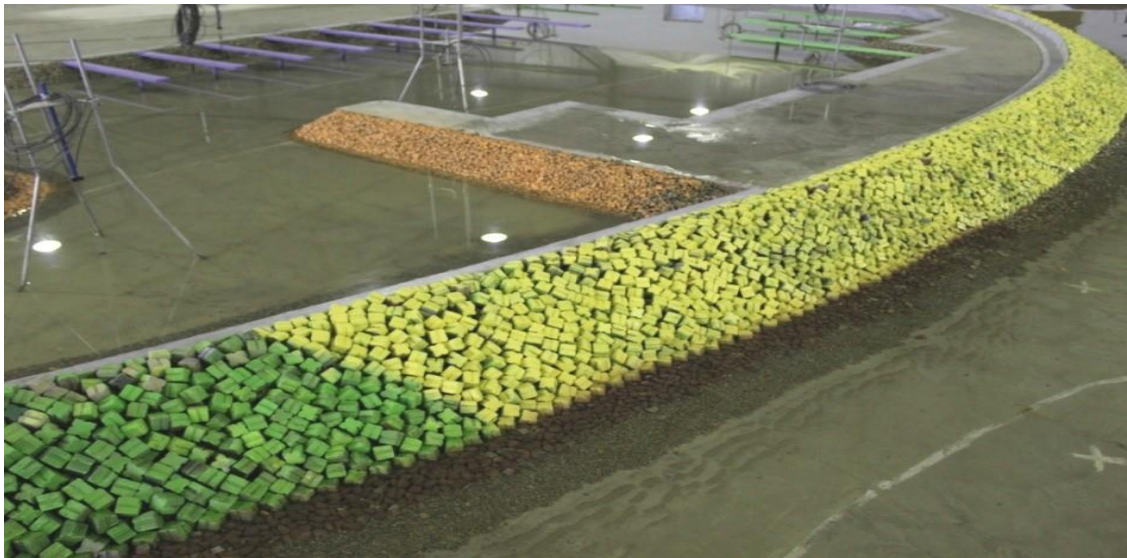
Variante 2

Direction N°353

Annexe 16 : Franchissement assez important à H10ans

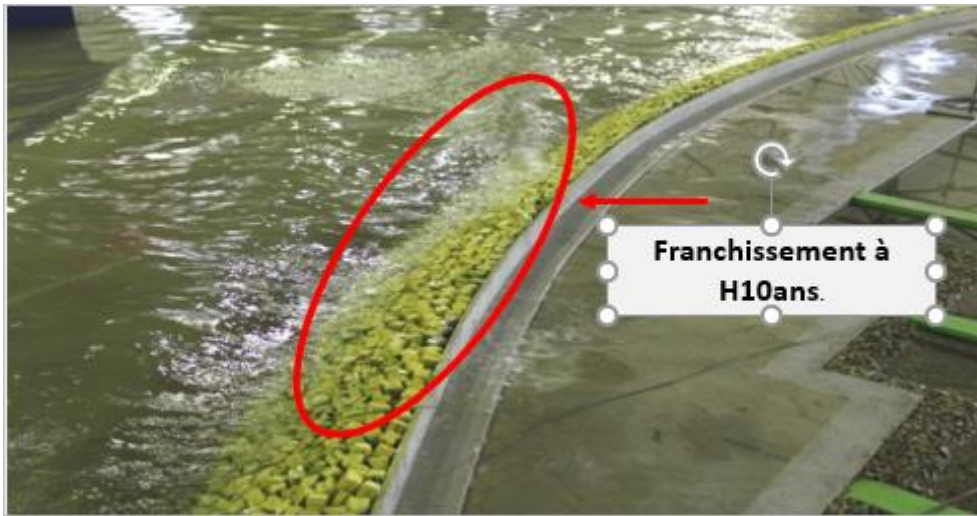


Annexe 17 : Carapace stable après la série d'essai.

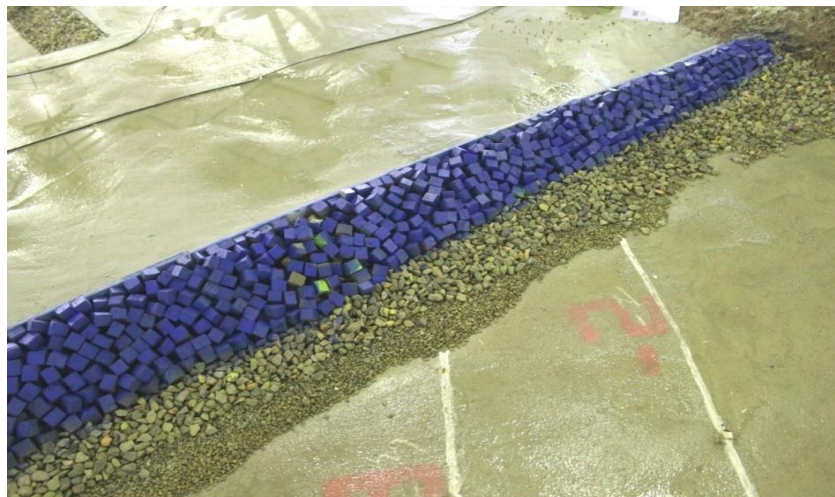


Variante 2
Direction N°323

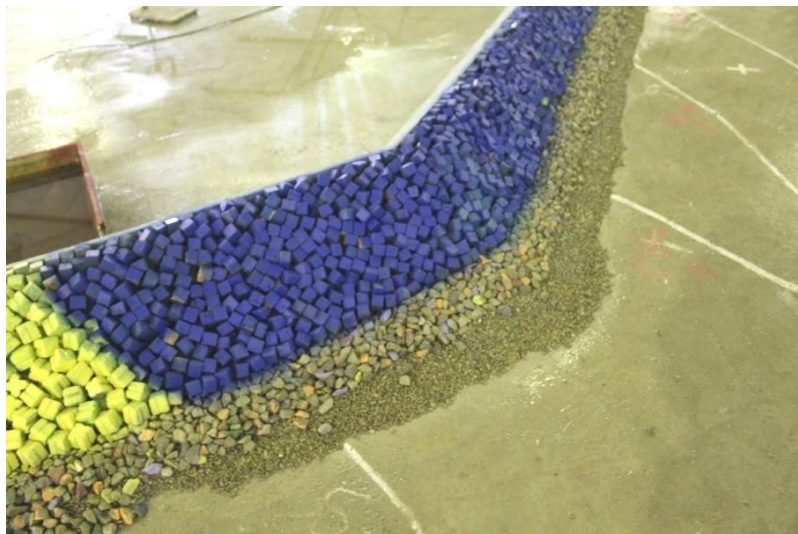
Annexe 18 : : Franchissement à H10ans.



Annexe 19 : État de l'enracinement de la jetée principale après la série d'essai.



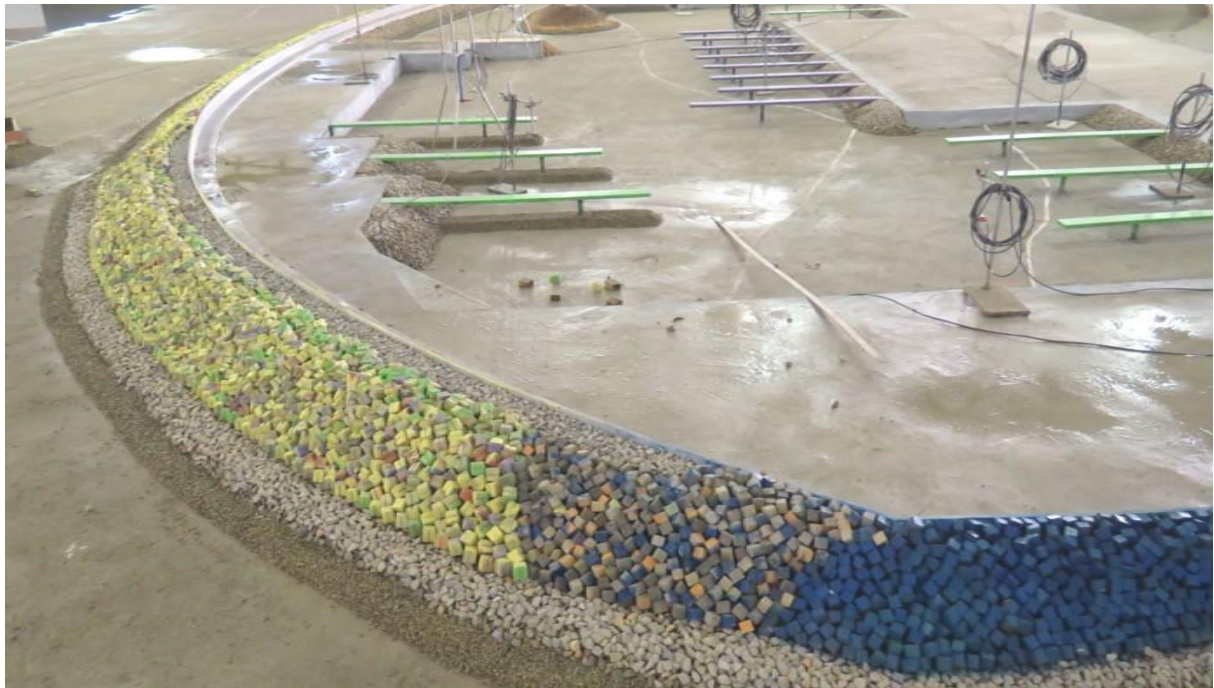
Annexe 20 : : État du coude avant l'enracinement après la série d'essai.



Variante 3

Direction N°323

Annexe 21 : État de la partie courante avec élargissement de la berme avant la série d'essai.



Annexe 22 : Glissement de 07 BCR26t et étalement de la butée en enrochement 3-6t après la série d'essai.

