



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground Works Engineering

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

**INFLUENCE DE LA BUTEE DE PIED SUR
LA STABILITE DE LA DIGUE A TALUS**

Proposé par : Mr RAHMANI.D

Présenté par : AMEUR Zeyneb

Promotion 2015

Ecole Nationale des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Remerciement

Je tiens à exprimer toute mes reconnaissances à mes parents « BELATI DAHBIE » et « AMEUR KADDA ». Je les remercie de m'avoir conseillée et aidée et pour tous son amour.

Aussi bien à mes sœurs « F.A.I.M »
Et particulièrement à « MEBIROUK.A »

J'adresse mes sincères remerciements à Mr « RAHMANI.D » de m'avoir encadrée et orientée et à tous les enseignants de l'ENSTP, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches.

Mon respect à tous les travailleurs du laboratoire des études maritimes LEM.

Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Merci à tous ceux qui je n'ai pas cité et qui nous ont aidés de proche ou de loin dans notre projet de fin d'études !

RESUME :

Notre étude a fait l'objet d'une série d'essais en canal à houle en vue de rechercher les meilleures configurations de la digue à talus pour qu'elle soit toujours stable.

L'analyse des résultats confirme l'effet de la butée de pied sur la stabilité de la digue. Il est conclu ainsi que dans de tels cas l'augmentation substantielle de la taille des blocs en butée n'est pas toujours la solution pour assurer la stabilité de cette dernière. L'érosion du pied est souvent due à la présence éventuelle de discontinuités verticales dans la pente du talus.

ABSTRACT:

The present study summarizes the results of a series of embankment 2D model tests in order to analyse the stability of the toe.

The study confirms the effect of the toe scouring on the embankment stability. It is concluded that the size of the blocks does not provide a guarantee of the stability because of the scouring due to the possible presence of vertical discontinuity on the structure slope.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة مجموعة من التجارب على قناة دراسة الأمواج بهدف البحث عن المعايير الجيدة للسور البحري حتى تكون أكثر استقراراً. دراسة نتائج التجارب تثبت تأثير قوة القدم الداعمة على ثبات السور البحري. باستطاعتنا استنتاج أنه في هذه الحالات زيادة مقاييس حجم القدم الداعمة، ليس دائماً الحل الأمثل لضمان ثبات السور البحري. تآكل القدم الداعمة ينتج غالباً من تواجد انقطاع عمودي في ميله السور البحري.

LISTE DES SYMBOLES

ρ_s : masse volumique du matériau

ρ_w : masse volumique de l'eau de mer

α : Angle du talus,

K_D : coefficient de stabilité,

H_s : houle de projet,

d : profondeur au pied de l'ouvrage.

μ coefficient de frottement

N : nombre de vagues incidentes.

S_d : niveau de dommage.

H_s : hauteur de la houle significative.

Δ : Densité relative déjaugée.

α : angle du talus.

P : paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage

ξ_m : Paramètre de déferlement calculé par la formule

T_m : Période moyenne de la houle

C_{pl} : coefficient égale 6.2

C_s : coefficient égale à 1

$H_{2\%}$: hauteur dépassée par 2% des hauteurs des houles incidentes au pied de l'ouvrage

T_m : période moyenne de la houle

T : période de la houle

Λ : longueur d'onde

LISTE DES FIGURES :

Chapitre 01 : généralités sur les ouvrages portuaires.

Figure I.1 : image d'un port.....	1
Figure I.2 : plan masse du port le havre.....	3
Figure I.3 : plan de l'estuaire de Loire.....	4
Figure I.4 : type de bouée d'amarrage.....	4
Figure I.5 : schéma d'un duc-d'Albe.....	6
Figure I.6 : schéma d'un appontement.....	6
Figure I.7 : schéma d'un quai.....	7
Figure I.8 : forme de radoub.....	7
Figure I.9 : écluse maritime	7
Figure I.10 : digue vertical	8
Figure I.11 : digue mixte.....	8
Figure I.12 : digue à talus.....	9
Figure I.13 : configuration de pied de digue à talus en fonction de la profondeur.....	12
Figure I.14 : coupe d'une digue à talus avec butée de pied.....	13

Chapitre 02 : Notion de la houle.

Figure II.1 : impact de la houle au large.....	14
Figure II.2 : les caractéristiques de la houle régulière.....	15
Figure II.3 : les trois types de déferlement.....	16
Figure II.4 : la réfraction de la houle.....	17
Figure II.5 : la réflexion totale de la houle.....	18
Figure II.6 : une onde stationnaire.....	18
Figure II.7 : la réflexion partielle.....	19
Figure II.8 : la diffraction de la houle.....	19
Figure II.9 : le houlographe.....	20
Figure II.10 : image de satellite.....	21

Chapitre 03 : stabilité des digues à talus.

Figure III.1 : les dégâts causés par la houle.....	29
--	----

Chapitre 04 : similitude de Froude et modèles réduits.

Figure IV.1 : bassin à houle35

Figure IV.2 : canal à houle36

Chapitre 05 : analyse et interprétation des résultats sur modèles réduits.

Figure V.1 : Schéma du Canal à houle.....37

Figure V.2 : image du canal à houle.....38

Figure V.3 : schéma expliquant les paramètres H_t et H41

Figure V.4 : graphe représentant les poids des blocs en fonction de la hauteur de la butée.....43

Figure V.5 : graphe représentant les poids des blocs en fonction de la largeur de la butée44

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre 03 : stabilité des digues à talus.

Tableau III.1 : coefficient de stabilité K_D	25
Tableau III.2 : coefficient de stabilité K_Δ	26
Tableau III.3 : valeurs moyennes des coefficients des équations	28

Chapitre 05 : analyse et interprétation des résultats sur modèles réduits.

Tableau V.1 : tableau des résultats des essais sur canal à houle	25
Tableau V.2 : Tableau des résultats des essais sur canal à houle du port de Beni Houa....	40
Tableau V.3 : Tableau des résultats des essais sur canal à houle du port de Chetaibi.....	40

SOMMAIRE :

Remerciement	i
Résumé	ii
Liste des symboles	iii
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	vi
Introduction générale	vii
Chapitre01 : généralités sur les ouvrages portuaires.	
Introduction.....	1
Définition du port.....	1
Types de port.....	1
Description du port.....	5
Conclusion.....	13
Chapitre02 : notion de la houle.	
Introduction.....	14
Houle régulière.....	14
Houle irrégulière et aléatoire.....	15
Transformation de la houle.....	15
Observation et mesure de la houle régulière.....	20
Conclusion.....	22
Chapitre 03 : Stabilité de la digue à talus.	
Introduction.....	23
Différentes forces appliquées sur la digue à talus.....	23
Différentes formules de dimensionnement.....	23
Notion de dégâts.....	28
Conclusion.....	30
Chapitre04 : similitude de Froude et modèle réduits	
Introduction.....	31
Similitude.....	31

Lois de similitude.....	31
Analyse dimensionnelle.....	32
Modèles réduits.....	34
Conclusion.....	36

Chapitre05 : analyse et interprétation des résultats sur modèles réduits

Introduction.....	37
Cadre des essais.....	37
Moyens des essais.....	38
Résultats des essais sur canal à houle.....	38
Interprétation des résultats.....	40
Influence de la butée de pied sur la stabilité des digues à talus.....	41
Conclusion.....	42

Conclusion générale

INTRODUCTION GENERALE :

Afin de protéger les littoraux maritimes des effets dévastateurs, les digues à talus maritimes sont le plus souvent utilisées. Les dysfonctionnements possibles de ce type d'ouvrage à talus sont la rupture de la carapace conduisant ensuite à la rupture d'ensemble de la structure et les franchissements dépassant le critère de sécurité.

Plusieurs formules ont été développées pour décrire les conditions de stabilité des digues en enrochements sous l'action de la houle. Mais ces formules restent incapable pour décrire l'instabilité de la digue à talus, ce que nous a poussé à utiliser les essais sur modèles réduits pour optimiser ces ouvrages de protection.

La position de la butée, les discontinuités de la pente dues à la présence de cette dernière sont des paramètres importants pour la stabilité de tels ouvrages à faibles profondeurs soumis à des houles déferlantes.

L'objectif de notre étude est de contribuer à la compréhension de ces phénomènes d'érosion de pied de talus et l'impact sur la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage. Un soin particulier à la conception de la butée et la recherche d'une protection renforcée contre l'érosion en pied doivent à chaque fois être recherché.

1. INTRODUCTION :

Dans l'étude d'un ouvrage maritime, il ne saurait question de le traiter sans pour cela le définir ou exposer les caractéristiques générales de ces ouvrages ainsi que les environnants maritimes influant sur une structure quelconque.

2. DEFINITION D'UN PORT :

Un port est par définition un abri artificiel ou naturel aménagé pour recevoir les bateaux, en d'autres termes c'est l'ensemble des équipements nécessaires à faire l'ensemble des manœuvres concernant l'interface terre-mer, et cela afin de garantir le bon cheminement des marchandises pour ce qui concerne les ports de commerce, la mise sur le marché dès l'arrivée au port des poissons et les produits de la mer pour les ports de pêche, et l'accostage et l'amarrage de tous les types de bateaux.



Figure I.1 : image d'un port

3. TYPES DE PORT

Deux importants critères permettent de distinguer les différents types de port :

- ✓ Les types de port d'après leur mission.
- ✓ Les ports d'après leur implantation géographique.

3.1 Définition des types de port d'après leur mission :

Un port est destiné à abriter les navires de l'action de la houle pour leur permettre :

- ✓ D'accostage en attendant de partir pour un autre voyage.
- ✓ D'effectuer des opérations commerciales d'embarquement et de débarquement des passagers, des marchandises et d'avitaillement.
- ✓ Enfin d'être construits, entretenus et réparés.

Compte tenu de la mission des ports et de celles des navires qui les fréquentent, on peut distinguer :

- ✓ Les Ports Militaires.
- ✓ Les Ports de Commerce.
- ✓ Les Ports de Travaux.
- ✓ Les Ports de Pêche.
- ✓ Les Ports de Plaisance.

3.1.1 Les ports militaires :

Les ports militaires peuvent comporter :

- ✓ Soit une rade abritée dans laquelle les navires sont mouillés sur leur ancre ou sur des coffres d'amarrage ; les dimensions de la rade doivent être assez vastes pour permettre des manœuvres d'évitage aussi rapide que possible et pour disperser les bâtiments.
- ✓ Soit des installations ayant les mêmes dispositions que celles d'un port de commerce, comportant des quais et des installations pour la construction, la réparation, et l'armement des navires.

3.1.2 Les Ports de commerce :

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

Ils peuvent également comporter des installations :

- ✓ Pour la construction et réparation navales.
- ✓ Pour la pêche.
- ✓ Pour la navigation de plaisance.

3.1.3 Les Ports de travaux :

Certains ports doivent être créés pour l'exécution de grands travaux afin de servir à abriter les engins flottants.

3.1.4 Ports de pêche :

Certains ports de faible importance sont spécialisés pour la pêche et offrent des facilités particulières pour la commercialisation et conservation du poisson.

3.1.5 Ports de plaisance :

De même, le développement des loisirs maritimes a entraîné la création des ports spécialement aménagés pour la navigation de plaisance.

3.2 Définition des ports d'après leur implantation géographique

Les contraintes physiques des sites qui se présentent pour l'implantation d'un port et les nécessités économiques qui justifient sa création conduisent à des types d'implantations très variées. Il s'agit bien souvent de compromis technico-économiques entre les impératifs en présence.

Suivant le critère de l’implantation, on peut retenir la classification suivante :

3.2.1 Ports établis dans les rades abritées :

Ceux sont essentiellement :

- ✓ Des ports militaires.
- ✓ Des postes pour le trafic des hydrocarbures établis sur sea-line ⁽¹⁾, ou sur tourelle isolée.
- ✓ Des postes minéraliers en rade foraine ⁽²⁾.
- ✓ Des postes à passagers ou à marchandises diverses avec transbordement sur engins flottants.

3.2.2 Ports extérieurs :

Ils sont établis sur le littoral et sont gagnés sur les eaux, ou creusés dans les terres.

Les terre-pleins et plans d’eau portuaires peuvent être aménagés soit par remblaiement sur la mer, soit par creusement à l’intérieur des terres.

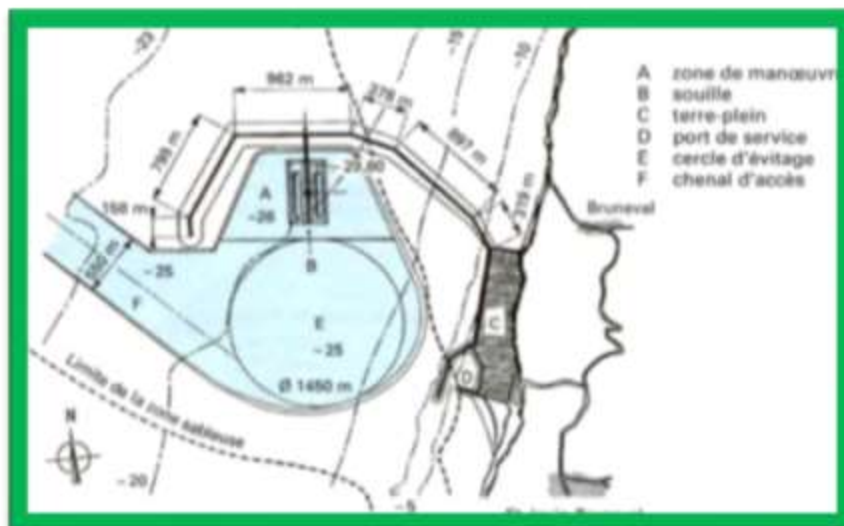


Figure I.2 : Plan masse du port du Havre-Antifer

⁽¹⁾ On rappelle qu’un sea-line est une canalisation sous-marine posée à demeure sur le fond de la mer. Cette canalisation est prolongée par une conduite flexible en caoutchouc armé, entre la canalisation fixe et un coffre flottant permettant de maintenir une extrémité de flexible hors d’eau. La jonction avec les prises d’aspiration ou de refoulement du navire s’effectue par une autre canalisation flexible.

⁽²⁾ On a construit des postes établis sur rades foraines sans protection par des ouvrages extérieurs : c’est le cas des postes pétroliers constitués par des plateformes fondus sur des pieux métalliques reliés aux tankers par des conduites flexibles, aboutissant à la poupe du navire, lui-même mouillé sur des encre et des coffres d’amarrage.

3.2.3 Ports intérieurs :

Ils sont établis sur des fleuves ou rivières, reliés au littoral par un canal maritime, ou établis sur des lagunes et étangs en communication avec la mer.

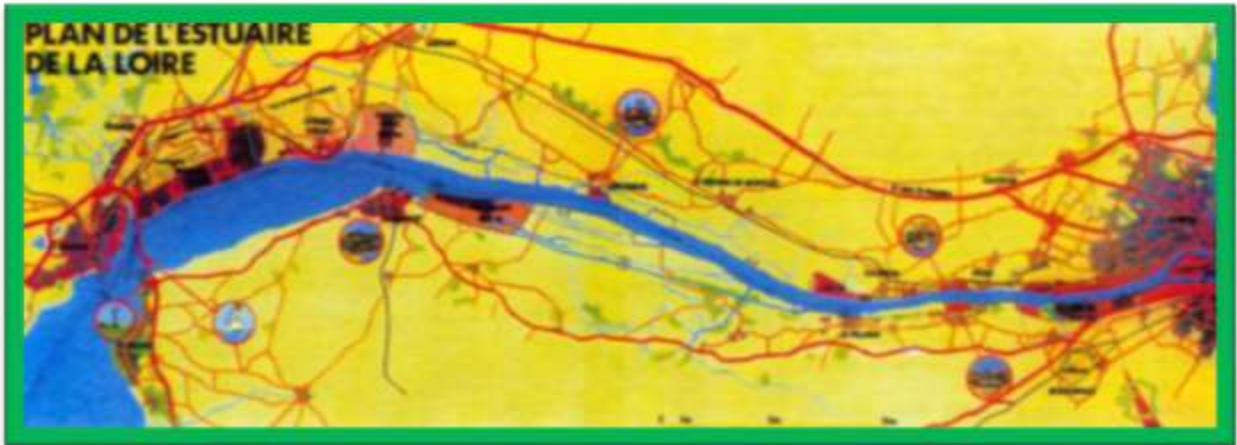


Figure I.3 : Plan de l'estuaire de la Loire.

Leurs débouchés à la mer peuvent être soit naturels, soit aménagés. Le débouché à la mer peut être équipé par des écluses.

3.2.4 Ports au large :

En dehors des installations spécialisées pour l'exploitation, le chargement ou le déchargement des hydrocarbures, on peut créer de véritables ports << îlots >> détachés du rivage, comportent des postes protégés.

Il peut s'agir d'îles artificielles ou simplement de bouées d'amarrage (figure ci-dessous).

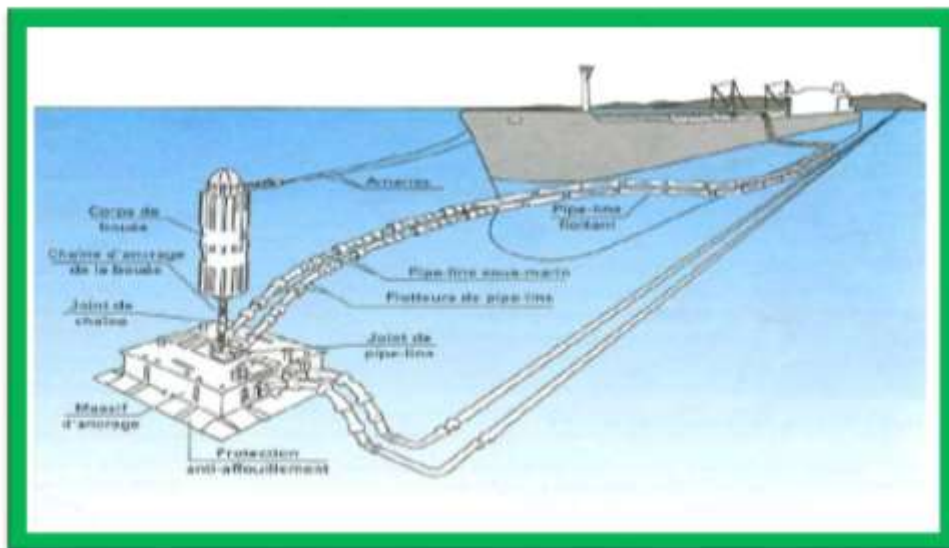


Figure I.4 : Type de bouée d'amarrage au large

Ces installations peuvent servir à des transferts de navire à navire ou être reliées à la terre par des oléoducs sous-marins (trafic d'hydrocarbures) ou des bandes transporteuses.

4. DESCRIPTION D'UN PORT

La description d'un port comporte les types d'ouvrages qui le constituent. Les ouvrages d'un port sont constitués de deux grands types :

- ✓ Les ouvrages intérieurs.
- ✓ Les ouvrages extérieurs.

4.1 Les ouvrages intérieurs du port :

Ils représentent l'ensemble des ouvrages se trouvant à l'intérieur des jetées. On distingue :

- ✓ Les ouvrages de protection et d'accès.
- ✓ Les plans d'eau.
- ✓ Les ouvrages d'accostage.
- ✓ Les ouvrages de réparation.

4.1.1 Les ouvrages de protection et d'accès :

Ces ouvrages ont pour rôle de défendre le port contre la houle et les apports solides du transport littoral, ils assurent aussi le calibrage du chenal d'accès pour les ports intérieurs.

4.1.2 Les plans d'eaux :

Servant à l'évolution et au stationnement des navires, ils constituent :

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

4.1.3 Les ouvrages d'accostage et d'amarrage :

Les ouvrages d'accostage désignent l'ensemble des équipements d'un port qui permettent de :

- ✓ Fournir aux navires un dispositif assurant son immobilisation, en permettant son accostage et son amarrage.
- ✓ Réaliser la liaison entre le navire et la terre.
- ✓ Soutenir les terres à la limite du plan d'eau en excluant des installations très particulières.

On distingue parmi les ouvrages d'accostage :

- ✓ Les ducs d'albe.
- ✓ Les appontements.
- ✓ Les quais.

4.1.3.1 Les ducs d'albe :

Ce sont des ouvrages en pilotis ancrés dans le fond du bassin, ils jouent le rôle d'appui pour les navires, et permettent seulement leurs amarrages.

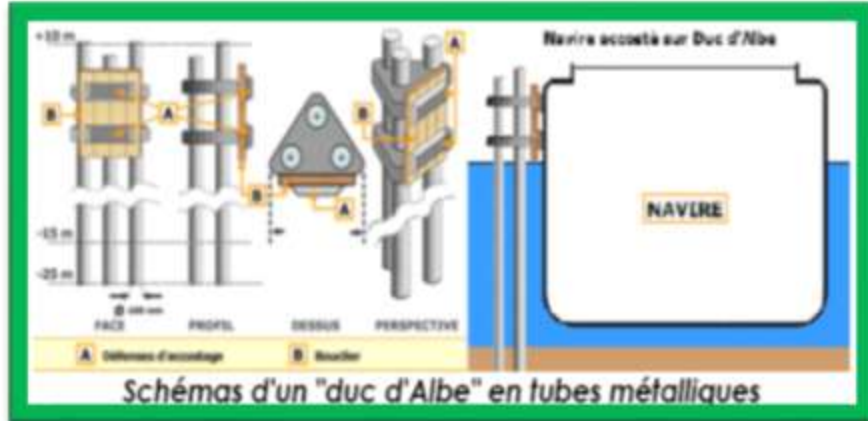


Figure I.5 : Schéma d'un duc d'Albe

4.1.3.2 Les appontements :

Ce sont des plates-formes fixes supportées par des pilotis, ils servent à l'amarrage et à l'accostage des bateaux et navires.

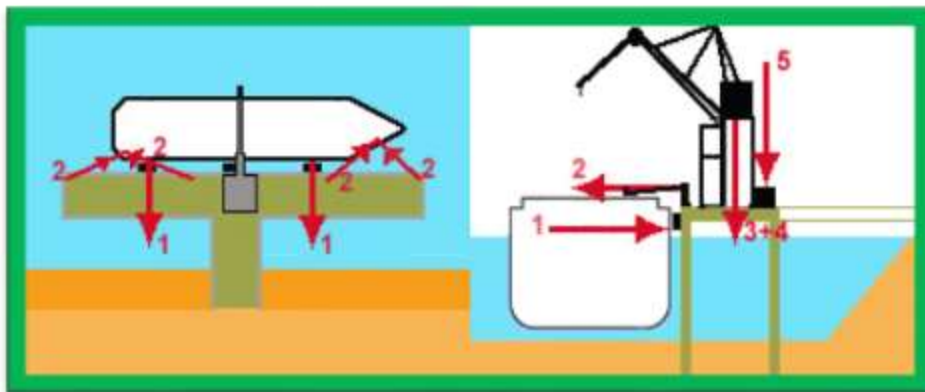


Figure I.6 : Schéma D'un Appontement

4.1.3.3 Les quais :

Ce sont les ouvrages en maçonnerie sur le rivage d'un port qui ont comme rôle :

- ✓ L'accostage et l'amarrage des navires et bateaux.
- ✓ Retenir les terres en contact des plans d'eau.
- ✓ Assurer la liaison entre le navire et la terre.
- ✓ Ils jouent aussi le rôle du mur de soutènement pour les remblais

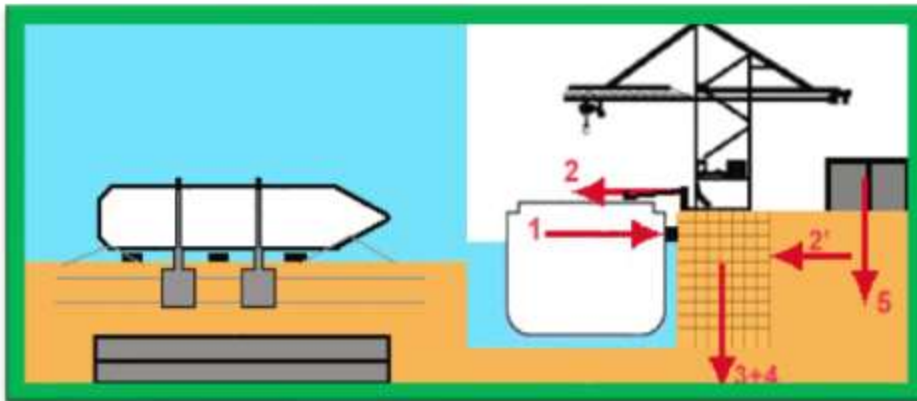


Figure I.7 : Schéma d'un Quai

On retrouve trois grands types de quai :

4.1.4 Les ouvrage de réparation :

Ce sont les ouvrages dont le rôle est la réparation et l'entretien des navires et bateaux. Ils se répartissent en :

Figure I.8 : Forme de radoub



Les formes de radoub (ou cales sèches) sont des bassins étanches, qui peuvent être mis à sec par vidange pour réparer et entretenir les navires. Les formes sont fermées par une ou parfois

Figure I.9 : Ecluse maritime



Les écluses sont des pertuis munis de portes constituant un barrage mobile étanche entre des bassins dont les niveaux peuvent être différents ; ces ouvrages donnent accès aux

4.2 Les ouvrages extérieurs :

Ce sont les ouvrages qui ont pour rôle la protection des zones de manœuvre et des postes d'opérations contre l'agitation causée par la houle. Les ouvrages extérieurs sont généralement les digues

4.2.2 Les digues :

Une digue est un remblai longitudinal, naturel ou artificiel, sa fonction est d'empêcher la submersion des basses-terres se trouvant le long de la digue par des eaux de la mer, lac, ou fleuve, et aussi de protéger le bassin contre les houles.

On distingue plusieurs types de digues :

- ✓ Les digues verticales.
- ✓ Les digues à talus.
- ✓ Les digues mixtes.

a- Les digues verticales :

La muraille est constituée par les blocs ou des caissons en béton armé qui résistent, par leur poids propre, aux efforts imposés par la houle : ils doivent donc être de grandes dimensions pour être suffisamment lourds. Lorsque la muraille est constituée par des blocs empilés les uns sur les autres, ces derniers ont un poids pouvant atteindre la centaine de tonnes, cette limite étant imposée par les performances des engins de manutention utilisés pour les mettre en place.

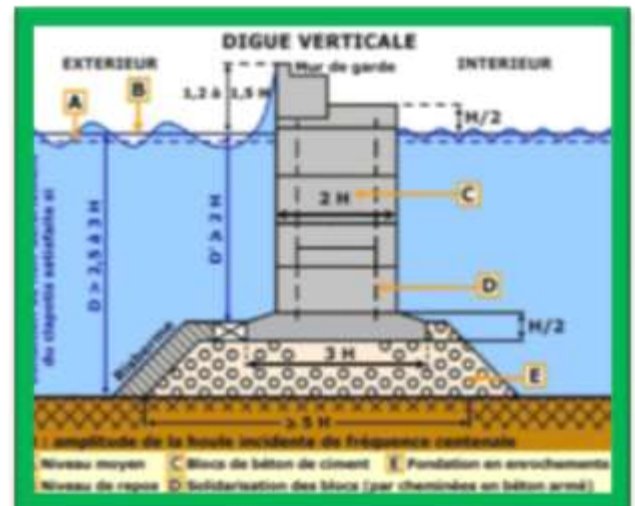


Figure I.10 : Digue Verticale

b- Les digues mixtes :

Lorsque les profondeurs sont importantes, la digue est souvent de type mixte. Une digue mixte, comme son nom l'indique reprenne certains principes des digues à talus et des digues verticales, elle comporte une muraille reposant sur un massif de fondation en enrochement ou sur un fond dur. Les dimensions et la structure de l'ouvrage vertical doivent être suffisantes pour résister aux efforts des vagues déferlantes.

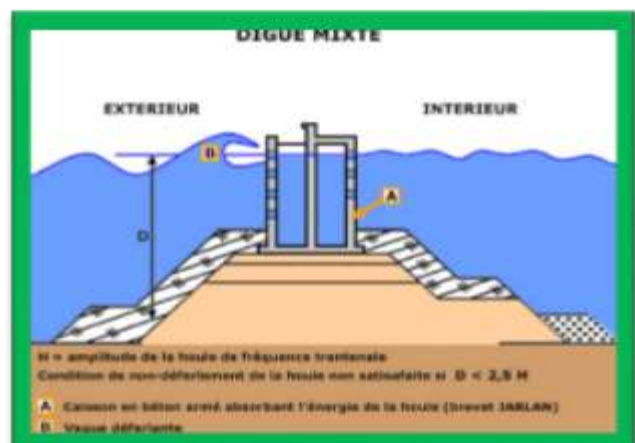


Figure I.11 : Digue Mixte

c- Les digues à talus :

Une digue à talus est une digue de forme trapézoïdale constituée par :

- ✓ Une infrastructure en enrochements et matériaux tous venant.
- ✓ Une carapace en blocs de poids élevé naturels ou artificiels.
- ✓ Une superstructure constituée par un couronnement en béton de ciment coulé sur place ou formé de blocs préfabriqués ; cette superstructure peut dans certains cas remplacée par un recouvrement de la carapace.

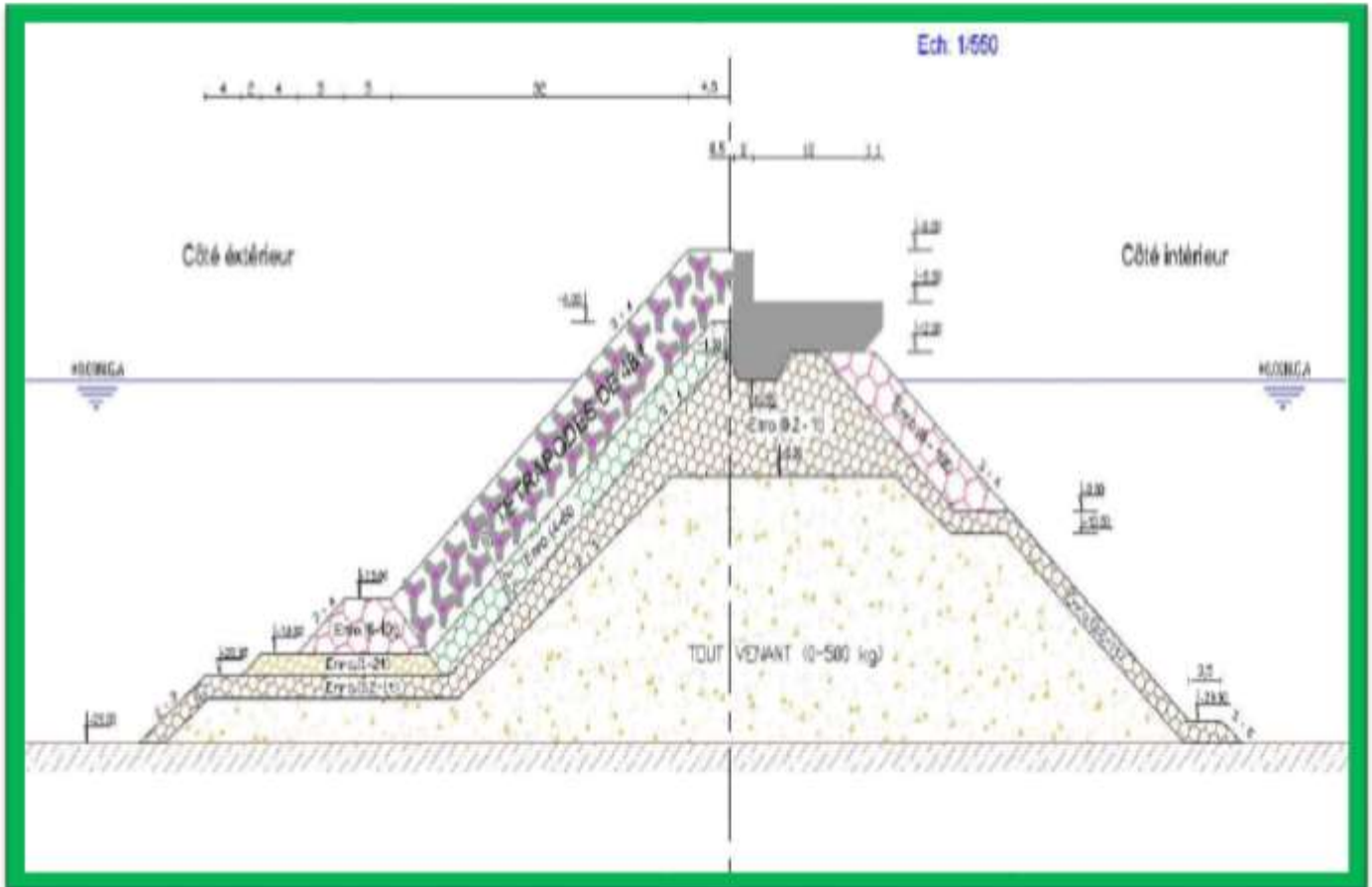


Figure I.12 : Digue à talus

Une description de chaque constituant ainsi que sa fonction est développée ci-dessous :

✓ **SOUBASSEMENT :**

Réaliser une digue à talus par grande profondeur requiert des volumes importants de matériaux de carrière. Il peut alors s’avérer intéressant d’exhausser le niveau d’assise de la digue à talus, pourvu de disposer sur le site de grandes quantités de matériaux à faible coût.

Les matériaux du soubassement non recouverts par la structure doivent présenter une certaine stabilité vis-à-vis des éventuels courants et surtout des houles et ce, durant toute la vie de l'ouvrage. Un soubassement trop haut risquerait de favoriser les érosions en pied des couches inférieures et de déstabiliser progressivement la structure elle-même.

Il faut également souligner que les matériaux de soubassement étant généralement de faible granulométrie présentent des pentes d'équilibre relativement faibles. Les gains en hauteur se traduisent donc rapidement en des augmentations substantielles de volumes de soubassement.

D'autre part, la stabilité des matériaux du soubassement devant à terme recevoir ceux de la digue doit faire l'objet de vérifications vis-à-vis des événements normalement prévisibles durant la période transitoire qu'ils ne sont pas encore recouverts.

✓ **FONDATION :**

La fondation, dont la mise en œuvre n'est pas systématique, remplit plusieurs fonctions.

D'abord, dans l'hypothèse où un soubassement a été prévu, ce dernier aura été le plus souvent mis en place par clavage ou par déversement. C'est-à-dire que la mise en œuvre n'aura pas été opérée avec précision et que l'enveloppe extérieure du matériau souffrira d'irrégularités marquées. La fondation, bénéficiant d'une pose plus soignée, vient déjà égaliser, homogénéiser cette surface.

La fondation fait principalement office de filtre entre les petits matériaux composant le soubassement ou le terrain naturel et ceux d'un calibre beaucoup plus gros de la digue. La fondation contribue, d'autre part à répartir les efforts et à homogénéiser les tassements. Suivant le ou les rôles assignés à la fondation, diverses dispositions constructives sont envisageables.

Dans cette disposition, ces fondations peuvent alors prendre la forme de cavaliers dont la présence est mise à profit pour édifier en partie inférieure de l'ouvrage un volume supplémentaire à l'aide des matériaux du soubassement plus économique que ceux constitutifs du noyau.

✓ **NOYAU :**

Le noyau est le remblai intérieur du massif que constitue l'ouvrage. Il s'agit généralement d'un matériau tout venant de carrière. Il bénéficie d'un coût inférieur à celui des autres matériaux constitutifs de la structure proprement dite.

✓ **CARAPACE :**

La carapace constitue l'élément clé d'une digue à talus. C'est surtout à l'intérieur de cette couche que s'opère la dissipation de l'énergie de la houle.

La carapace protège l'ensemble de l'ouvrage de l'action des houles. Il est essentiel que les blocs qui la composent aient un poids suffisant leur permettant de résister aux efforts engendrés par les vagues susceptibles de frapper la structure.

Ces blocs peuvent être des enrochements naturels ou des blocs artificiels de béton le plus souvent non-armé, posés suivant les pentes variant de 3/1 à 4/3 en fonction de la nature du bloc retenu et placés généralement en deux couches (sauf en particulier les acropodes), parfois davantage dans le cas d'enrochements naturels présentant une stabilité un peu juste.

Pendant longtemps on s'est évertué à développer de nouveaux blocs artificiels toujours plus performants d'un point de vue hydraulique, c'est-à-dire présentant une stabilité maximale vis-à-vis des houles pour un poids de référence donné.

Les outils classiques, en particulier les modèles réduits physiques sont capables de simuler les efforts hydrauliques sur les contours du bloc et donc la stabilité externe.

✓ **FILTRE :**

Il convient de distinguer deux types différents de filtres :

Le premier se place directement sous les blocs de carapace c'est LE FILTRE SUPPORT. Le poids moyen des blocs le composant représente généralement une fraction de celui du bloc de carapace, le fuseau granulométrique étant le plus souvent assez resserré autour de cette valeur.

Le rôle de cette couche est d'offrir une assise permettant d'obtenir un bon accrochage de la carapace en présentant une taille et une distribution des cavités adaptées au type de bloc utilisé. Il importe d'autre part que le filtre support bénéficie d'une bonne perméabilité, car cette dernière influence directement les circulations hydrauliques de la couche supérieure et conditionne par la stabilité même des blocs de carapace.

Le FILTRE DE TRANSITION constitue le second type. Son rôle ne souffre d'aucune ambiguïté. Il s'agit principalement de retenir le départ des matériaux fins du noyau au travers des couches supérieures. La composition de cette couche lui permet d'être drainée par le filtre support et de drainer le noyau. Cette disposition permet donc d'amortir progressivement les vitesses d'écoulement de l'eau à l'intérieur de l'ouvrage.

Lorsqu'un filtre de transition n'a pas été prévu, c'est alors le filtre support qui doit assurer le rôle de l'élément manquant.

L'ensemble des auteurs mentionne les règles de TERZAGHI pour le dimensionnement des filtres.

✓ **COURRONNEMENT :**

Une structure en béton posée en partie supérieure de l'ouvrage. Elle comporte en général une dalle horizontale et un mur vertical appelé aussi mur de garde ou encore mur chasse-mer.

Sa présence permet de limiter les franchissements dus aux houles et d'offrir une voie de roulement en arrière de l'écran. Le couronnement protège également le talus arrière de l'impact des franchissements.

Le couronnement se compose généralement de plots de l'ordre d'une dizaine de mètres de longueur. Il peut être muni de joints interdisant la pénétration de l'eau issue des franchissements suivant la nature de la couche le supportant.

Afin de limiter des risques de fissuration, il est recommandé d'attendre qu'une bonne partie des tassements du corps de l'ouvrage se soit produit avant d'édifier cette structure rigide, lorsque ce report ne met pas en danger la stabilité de la digue, ce qui limite la portée de cette recommandation.

✓ BUTEE DE PIED :

Les rôles exercés par ces structures sont multiples. Elles opèrent un calage inférieur de la carapace limitant par-là les risques de glissement de cette dernière. Elles permettent d'offrir une sécurité supplémentaire vis-à-vis des affouillements en pied d'ouvrage. Elles peuvent jouer aussi le rôle de filtre entre les blocs inférieurs de la carapace et la couche sous-jacente.

Une disposition fréquente consiste à bâtir la butée de pied à l'aide d'enrochements de même calibre que ceux du filtre support, lorsqu'un tel arrangement est possible, les dispositions sont en fait très variables en fonction de la profondeur d'eau.

A noter que la butée de pied peut prendre la forme d'une simple assise horizontale des blocs de carapace. Il conviendrait d'employer plutôt dans ce cas le terme de risberme de pied mais cette distinction n'est généralement pas spécifiée.

La stabilité de la butée de pied dépend d'un certain nombre de paramètres tels que la hauteur significative de la houle H_s , la hauteur d'eau au-dessus de la butée de pied, la largeur de la butée de pied.

Pour des eaux profondes, la butée de pied peut être construite à une certaine hauteur au-dessus du fond marin. Dans les eaux peu profondes où la houle peut déferler sur l'ouvrage, la butée de pied est souvent construite comme une extension de la carapace principale.

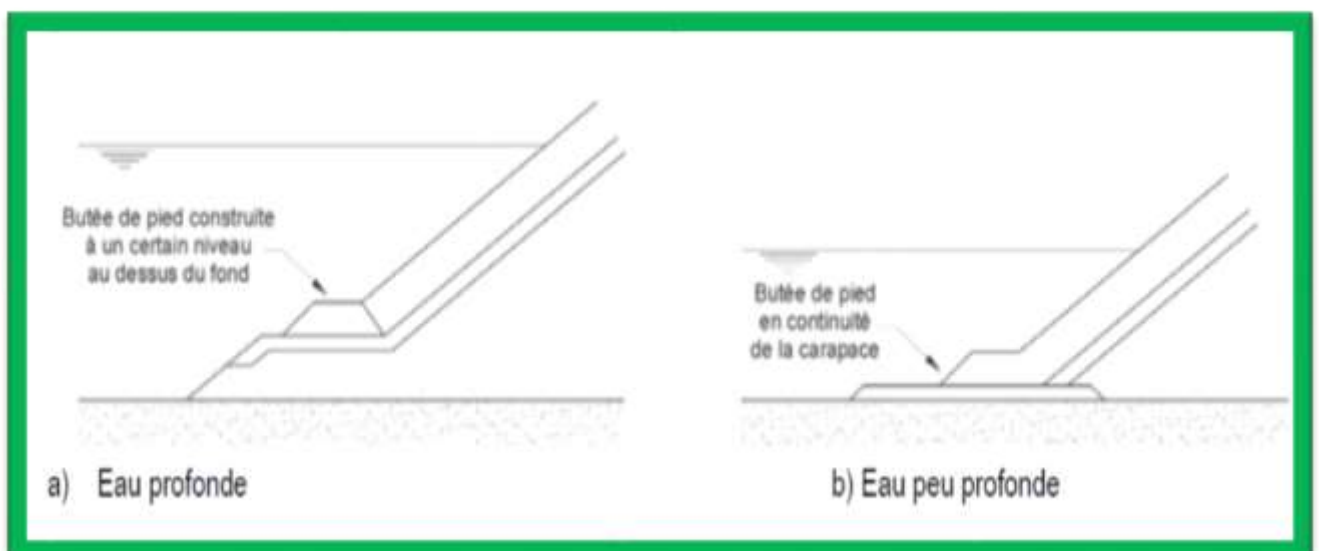


Figure I.13 : Configuration de pied de digue à talus en fonction de la profondeur

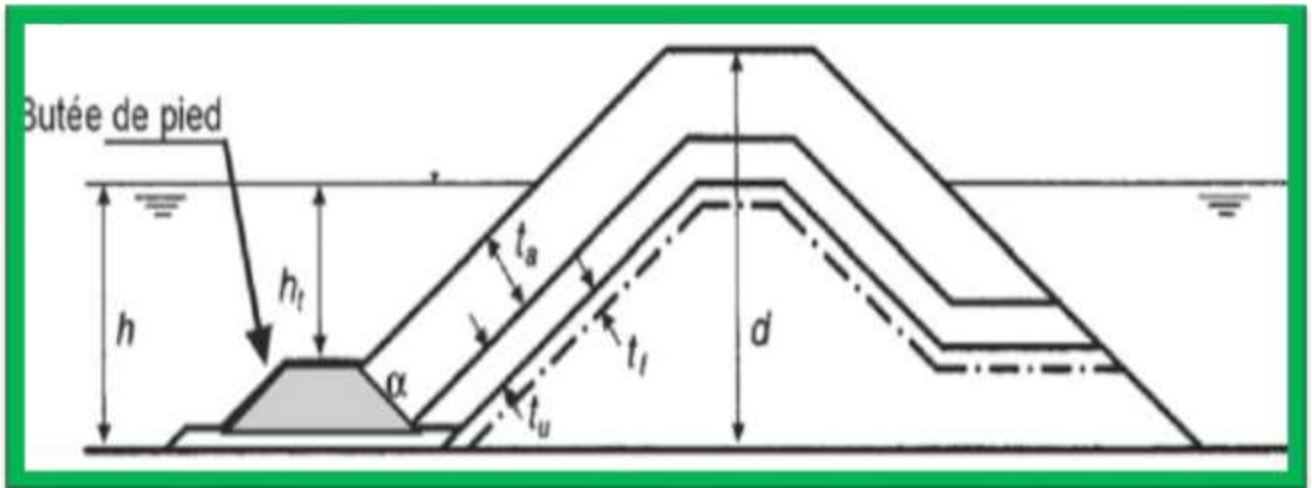


Figure I.14 : Coupe d'une digue à talus avec une butée de pied

5. CONCLUSION :

Les ports maritimes ont constamment dû adapter leurs aménagements et leurs équipements aux caractéristiques des navires, des trafics et aussi aux efforts naturels agissants sur ses infrastructures particulièrement la houle qu'on va développer sa notion dans le 2^{ème} chapitre. Ceci s'est traduit par une très grande augmentation de leurs dimensions ainsi que par une très haute spécialisation de leurs équipements.

1. INTRODUCTION :

Il est très important d'expliquer la signification et l'origine des vagues. Ce sont à l'origine des ondes se produisant à la surface d'un plan d'eau. Ils peuvent être classés selon plusieurs critères partant de leur origine :

- ✓ Des vagues causées par le vent, résultant d'un forçage météorologique sont appelées houle.
- ✓ Des vagues causées par les mouvements de la lune, résultant d'un forçage astronomique sont appelées marées.
- ✓ Des vagues causées des tremblements de terre sont appelées tsunamis.

Intérêt de la connaissance de la houle :

Les houles conditionnent les ouvrages portuaires de plusieurs manières :

- ✓ Elle influe sur l'implantation des ouvrages portuaire pour protéger le port.
- ✓ Elle agit sur l'évolution du trait de côte, comme dans le cas de l'impact sédimentologique des ouvrages projetés doit être étudié.
- ✓ Elle est le paramètre essentiel de dimensionnement structurel des ouvrages.



Figure II.1 : impact de la houle au large

2. LA HOULE REGULIERE :

On peut définir la houle régulière comme étant le résultat d'un ensemble d'ondulations ou de vagues parallèle identiques, qui s'accroissent avec l'augmentation de l'intensité du phénomène causant ces ondulations et qui se traduit par un transport d'énergie.

Une houle régulière est caractérisée par une amplitude, une période et une longueur d'onde.

La figure suivante montre bien ces caractéristiques :

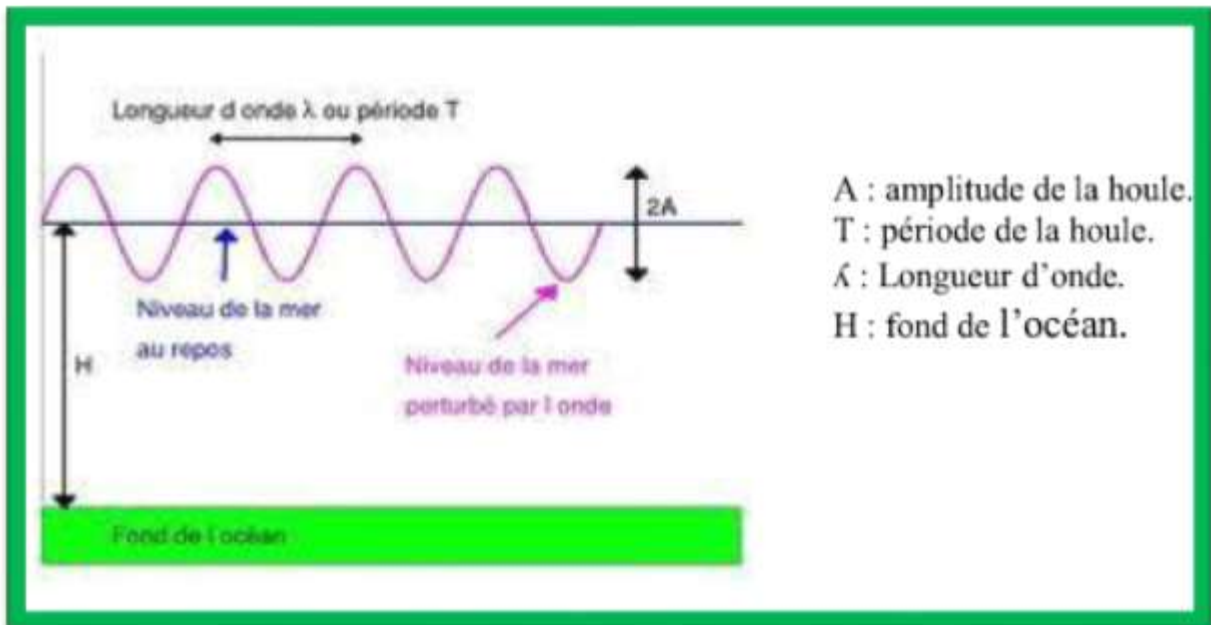


Figure II.2 : les caractéristiques de la houle régulière

L'amplitude A : dénivellation maximale entre la crête et le creux

La longueur d'onde λ : distance qui sépare deux creux ou deux crêtes successives.

La période T : intervalle de temps qui sépare les passages de deux crêtes consécutives au même point.

La profondeur H : paramètre de contrôle des processus physiques affectant les vagues.

3. LA HOULE IRREGULIERE ET ALEATOIRE :

Dans le cas d'un état de mer composé de vagues ayant des caractéristiques différentes mais appartenant au même processus aléatoire (conditions physiques constantes). On utilise deux approches pour décrire le champ de la houle :

3.1 Houle aléatoire à longue crête :

Est encore unidirectionnelle mais elle inclut une vaste gamme de hauteur et de périodes de vagues. Le train de vagues irrégulières ou aléatoires est composé de vagues successives avec différentes hauteurs et périodes.

3.2 Houle aléatoire à courte crête :

Est composée de vagues se propageant quant à elles dans des directions différentes, définies sous la forme de l'écart-type de la direction de propagation de l'énergie de la houle ou d'une autre fonction de dispersion standard. Le spectre directionnel de la houle qui donne la distribution de l'énergie de la houle en fonction de la fréquence et de la direction, permet d'obtenir une description plus complète de l'état de mer. La houle à courte crête est la meilleure représentation de la houle réelle.

3.3 La houle significative :

Elle est souvent abrégée en H_s ou $H_{1/3}$ (ou SWH : Significant Wave Height en anglais). Elle correspond à la hauteur atteinte par le tiers des vagues les plus fortes observées lors de la tempête). Pour la calculer à partir d'un enregistrement d'élévation de la surface, on classe les vagues par ordre de hauteur, et la moyenne des hauteurs du tiers supérieur donne la H_s .

4. TRANSFORMATION DE LA HOULE :

4.1 Déferlement :

Lorsque la houle atteint une côte inclinée, la cambrure des lames augmente jusqu'au déferlement qui se traduit par un effondrement de la vague avec formation d'un bouillonnement (écume) sur la surface antérieure ; sur un fond à faible pente, les lames déferlantes progressent sans perdre beaucoup de leur symétrie.

Dans ce cas la seule caractéristique de la houle qui reste constante est la période.

On constate trois types de déferlement :

- ✓ Un déferlement gonflant (dans le cas de faibles pentes).
- ✓ Un déferlement plongeant.
- ✓ Un déferlement glissant (dans le cas de pentes fortes)

La figure ci dessus présente ces trois types de déferlement :

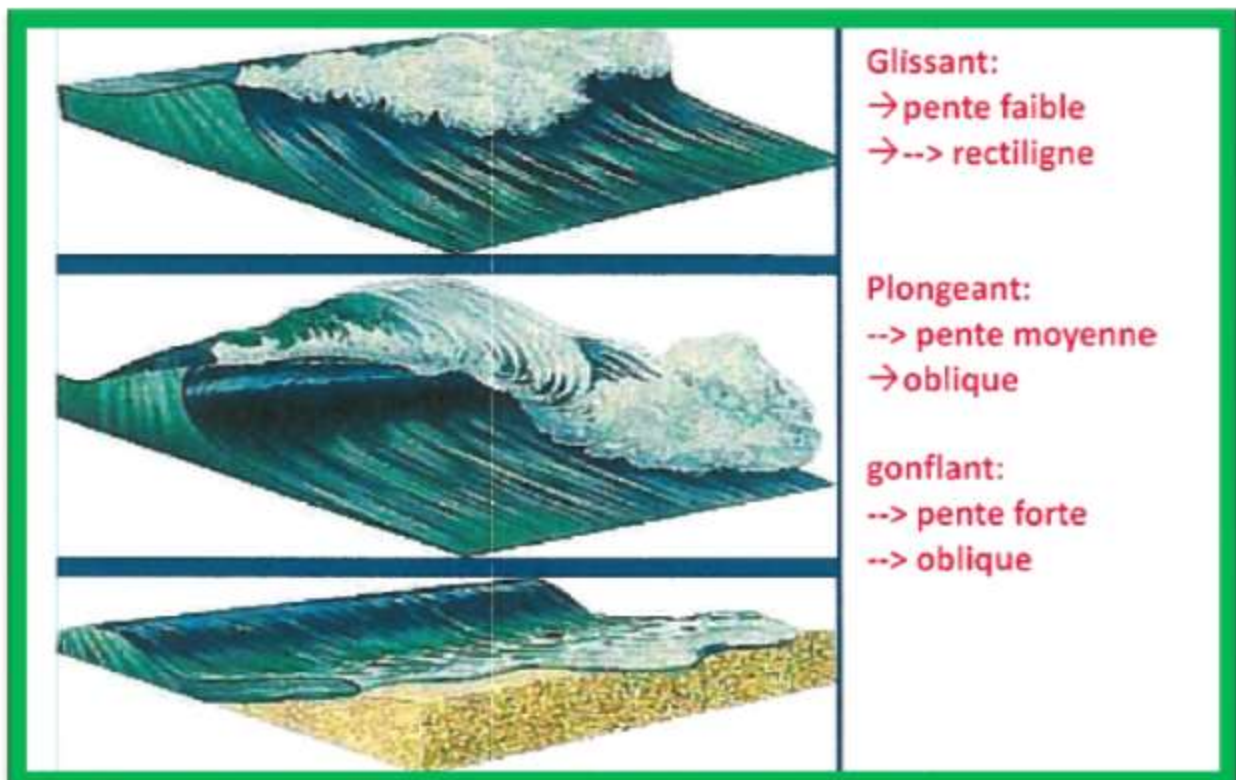


Figure II.3 : les trois types de déferlement

Les effets du déferlement :

- ✓ Dissiper l'énergie de la houle.
- ✓ Mettre en suspension les sédiments.
- ✓ Provoquer un courant vers les rivages.

4.2 La réfraction :

Correspond à la modification des caractéristiques de longueur d'onde, amplitude et direction de propagation de la houle due à une variation de la bathymétrie.

Lorsque la houle cylindrique se propage par des profondeurs variables, sa longueur d'onde, son amplitude et sa direction subissent des modifications, alors que sa période reste constante ; c'est le phénomène de réfraction.

Si la propagation s'effectue vers une côte faiblement inclinée, dont les lignes de niveau sont sensiblement parallèles aux crêtes de la houle, on constate une diminution de la longueur d'onde, et en général de l'amplitude ; les vagues se déforment avec augmentation de la cambrure au fur et à mesure que la profondeur diminue. Si les lignes de niveau du fond ne sont pas parallèles aux crêtes, les vagues subissent une rotation qui tend à les rendre parallèles aux lignes de fond. C'est ainsi que la houle subit des concentrations au voisinage d'une pointe ou d'une île, pouvant augmenter considérablement son amplitude ; au contraire la propagation dans une baie provoque un épanouissement des crêtes avec diminution de l'amplitude.

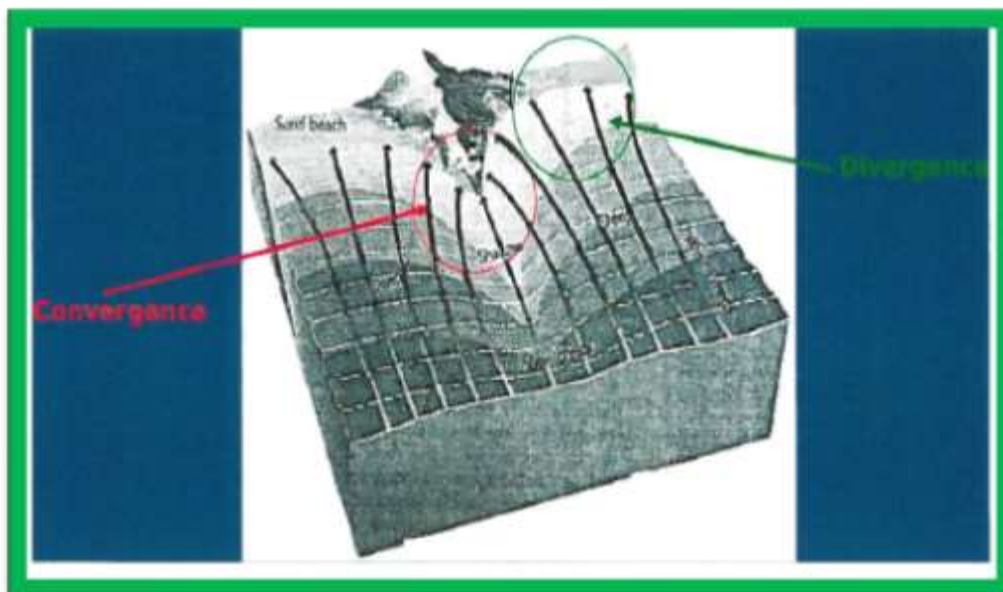


Figure II.4 : la réfraction de la houle

4.3 La réflexion :

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

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

4.3.1 La réflexion totale frontale (clapotis total) :

Supposons un ouvrage (une digue imperméable) réfléchissant totalement la houle incidente dont la direction de propagation est orthogonale à l'ouvrage.

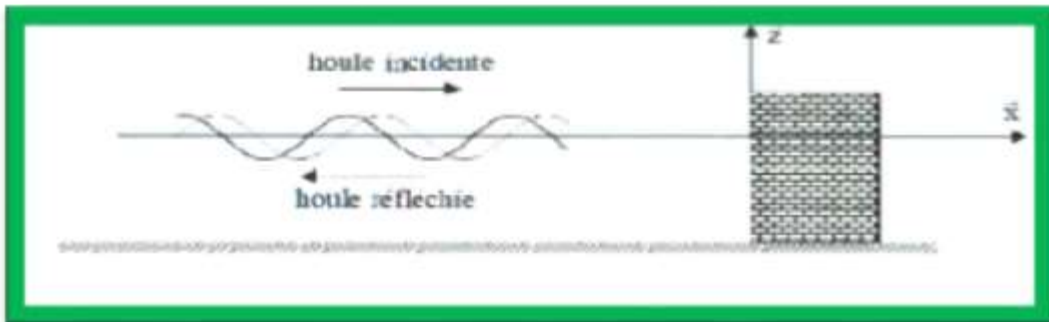


Figure II.5: la réflexion totale de la houle

Globalement le système d'ondes est équivalent à une onde stationnaire (c'est-à-dire sans propagation).

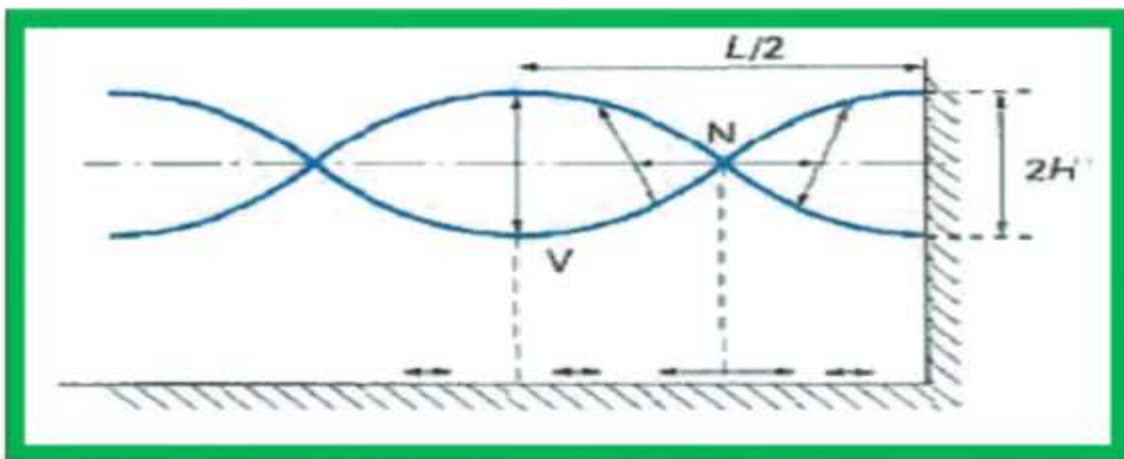


Figure II.6: Une onde stationnaire

4.3.2 La réflexion partielle :

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

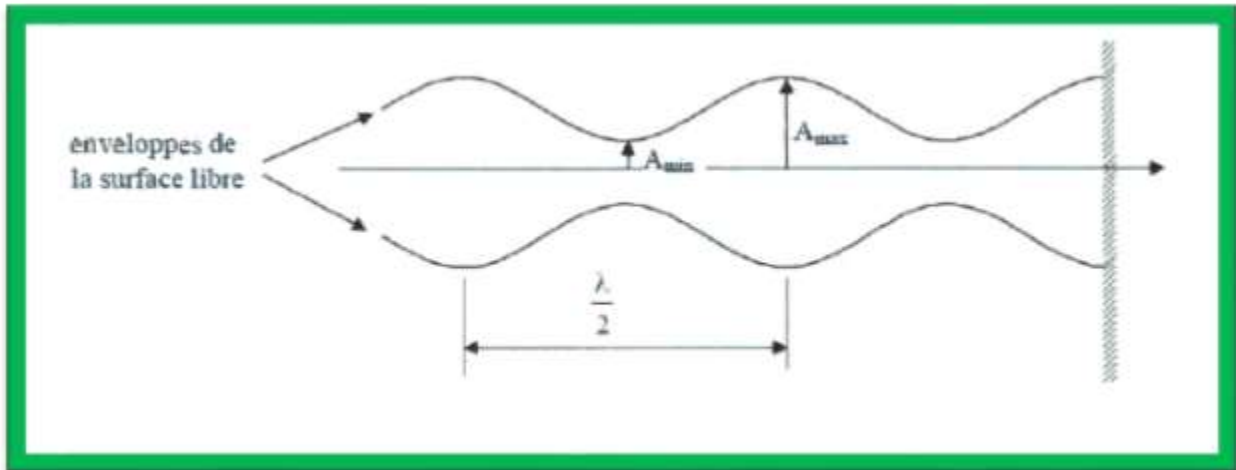


Figure II.7 : La réflexion partielle

4.4 La diffraction :

Correspond à la modification des caractéristiques de direction de propagation et amplitude de la houle due à la présence d'un obstacle.

Si la profondeur est constante la longueur d'onde est la même partout, l'obstacle a pour effet de modifier la direction de propagation et l'amplitude.

Dans le cas général où la bathymétrie n'est pas constante le phénomène de réfraction se superpose.

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

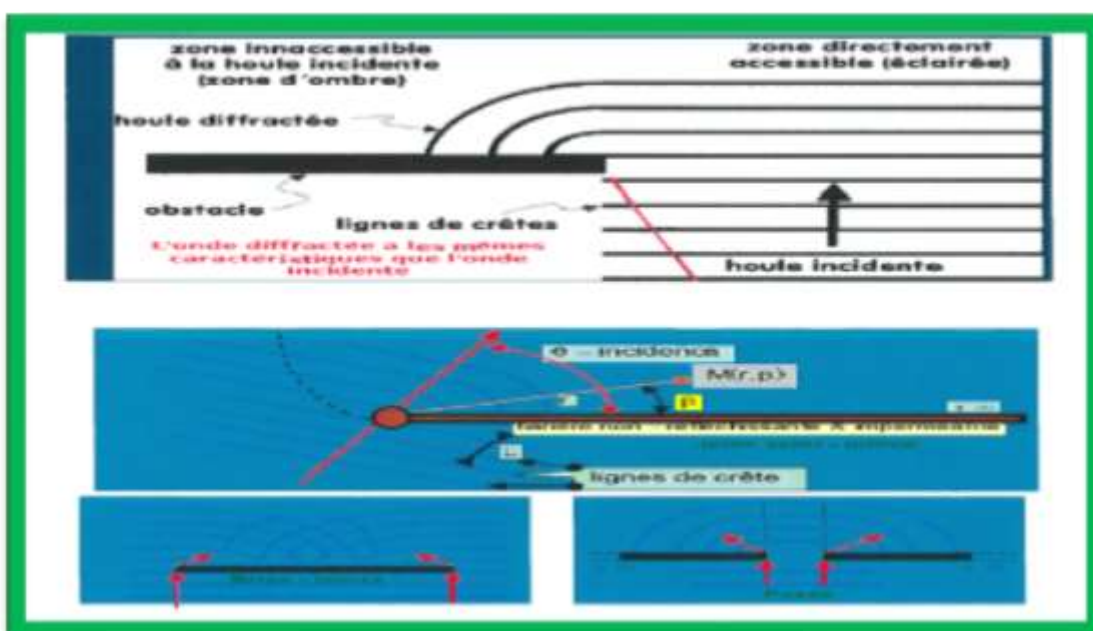


Figure II.8: la diffraction de la houle

5. OBSERVATION ET MESURE DE LA HOULE REELLE :

Les méthodes de mesure des vagues sont étroitement liées à la description mathématique utilisée pour analyser ces mesures et aux paramètres que l'on cherche à décrire. En effet, si on conçoit les vagues comme un mouvement de la surface, ce mouvement est aussi associé à des déplacements horizontaux, un champ de vitesse, un champ de pression, une rugosité de la surface ...etc. Chacun de ces paramètres peut être utilisé pour mesurer les vagues.

On peut mesurer la houle réelle par :

- ✓ La mesure ponctuelle par un appareillage :

Le houlographe :

L'instrument le plus utilisé car très robuste est la bouée houlographe. Développées dans les années 1960 les premières bouées mesuraient l'accélération verticale et le tangage et roulis (pitch and roll en anglais).

Aujourd'hui ce type de mesure reste adapté à des bouées météorologiques de quelques mètres de diamètre, tandis que les bouées qui ne font que la mesure des vagues utilisent plutôt l'accélération dans les trois directions (x, y, z). A partir de ces accélérations on peut remonter aux déplacements x, y et z par les différentes méthodes d'analyse.

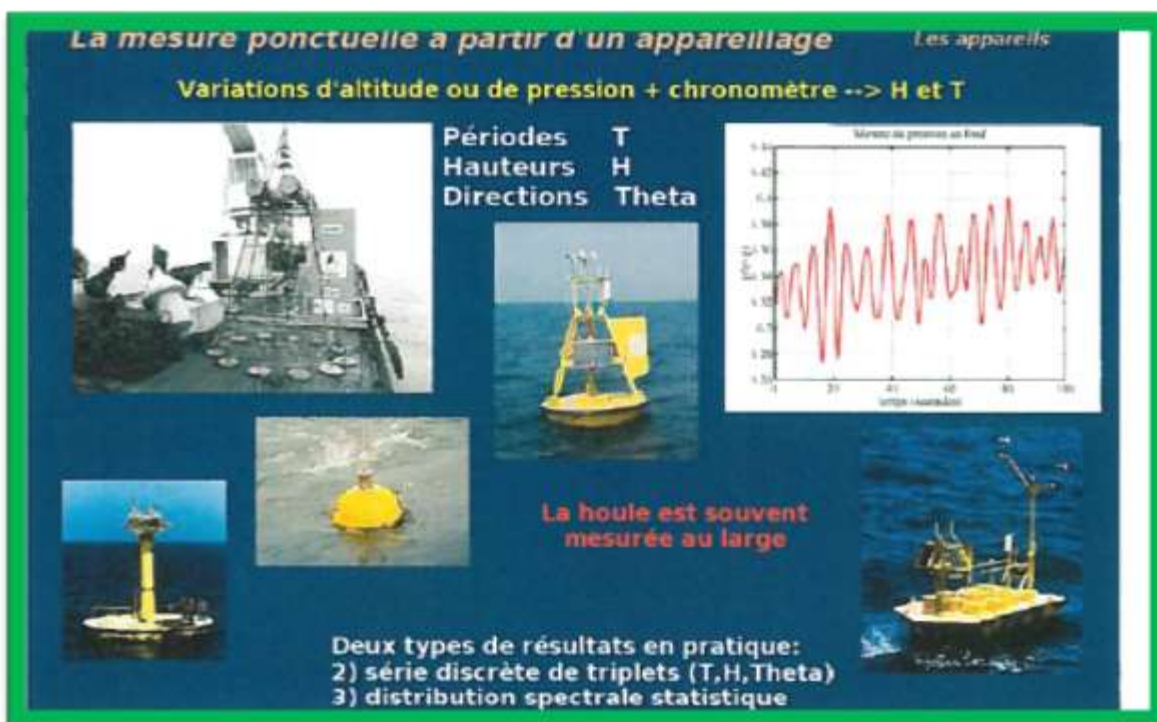


Figure II.9 Le houlographe

- ✓ La mesure à partir de l'imagerie :

Depuis la mission SEASAT (satellite de télédétection océanographique de la NASA), plusieurs satellites ont été utilisés pour mesurer la hauteur des houles. Ces satellites

mesurent le temps d'aller et retour d'une onde radar envoyé par le satellite. Cette mesure donne le niveau moyen de l'océan... qui n'est pas plat car il est couvert de houles.

La précision sur la mesure du temps correspond à environ 40 cm en distance. Ainsi le satellite découpe en tranches de 40 cm d'épaisseur de la géométrie de la surface. Ce retour progressif des échos correspondant d'abord aux crêtes des grandes vagues, pour recevoir enfin les échos réfléchis par les creux des grandes vagues. Cet étalement dans le temps des échos peut être relié à la hauteur significative H_s .

Ces signaux sont analysés par le Laboratoire d'Océanographie Spatiale de l'Ifremer, ainsi que le CLS (Collecte Localisation Satellites).

Plusieurs études montrent que les échos radars de ces satellites peuvent aussi servir à donner une information sur la période des houles. Il est malheureusement impossible de déterminer la direction des vagues avec ce type de radar.

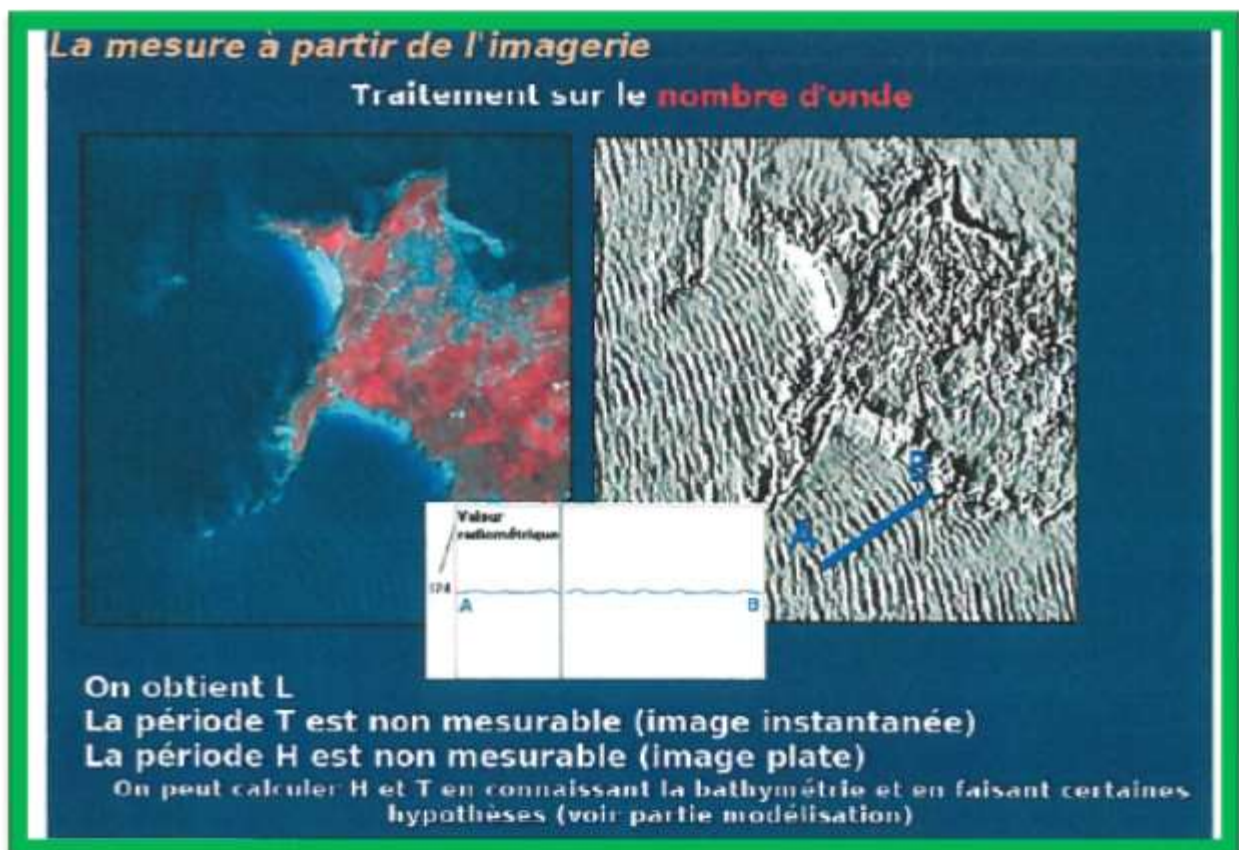


Figure II.10 : images de satellite

6. CONCLUSION :

Une fois connues les houles au large, il s'agit de les « ramener à la côte », c'est-à-dire de caractériser la houle qui viendra frapper l'ouvrage.

À partir des caractéristiques de la houle au large et en utilisant des logiciels et Modèles en hydraulique maritime, il est possible d'estimer avec une bonne approximation la houle à prendre en compte pour le calcul de l'ouvrage.

En plus des caractéristiques des houles extrêmes (période correspondant au pic d'énergie du spectre et creux significatif H_s), il est utile de connaître la durée de la tempête de référence et l'évolution de la période et du creux de la houle pendant celle-ci pour pouvoir en tenir compte pour le dimensionnement des ouvrages de protection.

1. INTRODUCTION :

Les digues protègent les ports contre les assauts des houles du large et permettent (par réfraction / diffraction de la houle incidente) de réduire l'agitation intérieure à moins d'un mètre d'amplitude. Elles doivent être construites par des profondeurs plus importantes qu'autrefois (jusqu'à une cinquantaine de mètres) et doivent résister à des vagues dont l'amplitude peut dépasser la dizaine de mètres - d'autant plus grande que la profondeur au pied de l'ouvrage est plus importante.

Les grandes digues modernes sont, en général, du type "à talus", constituées par des couches d'enrochements de poids croissant depuis l'intérieur vers les faces externes, elles comportent une carapace contre laquelle vient se briser la houle et sont surmontées par un couronnement massif en béton de ciment.

2. LES DIFFERENTES FORCES APPLIQUEES SUR LA DIGUE A TALUS :

2.1 Le poids propre : la digue est constituée de plusieurs couches en enrochements de différentes tailles dont l'ensemble donne un poids très important.

2.2 Les actions hydrauliques : le milieu marin est un milieu agressif plein d'actions aléatoires comme la houle (franchissement), les courants (érosion de la butée de pied), la marée...

2.3 Les actions sismiques : le séisme a une très importante influence sur le milieu marin et pose un grand problème pour les ouvrages de protection comme (la liquéfaction du fond marin sous l'ouvrage – les tsunamis...)

3. LES DIFFERENTES FORMULES DE DIMENSIONNEMENT :

3.1 LA FORMULE D'IRIBARREN :

Est la première formule de stabilité d'enrochement proposée. Son expression résulte d'une approche théorique qui a considéré qu'une houle de hauteur donnée génèrait une vitesse proportionnelle à la racine carrée de cette hauteur. Estimant que l'effort hydrodynamique est proportionnel au carré de cette vitesse, il conclut à une proportionnalité entre la hauteur de la houle et la force déstabilisatrice de l'enrochement.

Equilibrant cette force avec la projection sur le talus du poids déjaugé du bloc et le frottement de ce dernier sur son assise, il a proposé l'expression suivante :

$$W \geq \frac{K \rho_r g H^3}{\Delta^3 (\mu \cos \alpha \pm \sin \alpha)}$$

Où W est le poids du bloc, H est la hauteur de la houle incidente au pied de la digue, μ un coefficient de frottement, à l'angle du talus, K un coefficient sans dimension dépendant

de la forme du bloc, ρ_s la masse volumique du bloc, ρ_w la masse volumique de l'eau, Δ la densité déjaugée relative ($\Delta = \rho_s / \rho_w - 1$) et g l'accélération de la pesanteur.

Irribarren a réalisé le calcul statique traduisant la limite d'équilibre au glissement d'un bloc sous les efforts de la houle qui engendre des vitesses parallèles au talus de la digue. Bien qu'il s'agisse d'une formule théorique, les coefficients K et μ sont obtenus à partir de travaux expérimentaux.

3.2 La formule d'Hudson :

Elle repose sur des essais sur modèles dans des conditions de houle régulière sur des ouvrages en enrochements non-franchis et à noyau perméable.

Le poids unitaire W des enrochements se calcule suivant la formule suivante :

$$W = \left(\frac{0,1}{K_D} \right) \times \left(\frac{\rho_s \times H_s^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot g \alpha} \right) \times \left(\frac{H_s}{d} \right)$$

- ✓ ρ_s : masse volumique du matériau utilisé t/m^3 ,
- ✓ ρ_w : masse volumique de l'eau de mer = $1.026 t/m^3$,
- ✓ α : angle du talus,
- ✓ K_D : coefficient de stabilité,
- ✓ H_s : houle de projet,
- ✓ d : profondeur au pied de l'ouvrage.

Le principal avantage de la formule d'Hudson est bien sa simplicité, ainsi que la vaste gamme d'enrochement et de configuration pour lesquelles des valeurs de K_D ont été calculées. Mais cette formule a aussi des limites :

- ✓ Elle ne s'applique qu'à une houle régulière.
- ✓ Elle ne tient pas compte de la période de la houle ni la durée de la tempête.
- ✓ Elle n'intègre aucune description du niveau de dommage.
- ✓ Elle ne s'applique qu'à des ouvrages non-franchis et perméables.

Note : ces problèmes peuvent être résolus en utilisant diverses valeurs particulières du coefficient de stabilité K_D .

Les tableaux montre les données nécessaires pour le valeurs K_D , K_Δ , p et α :

Type de blocs	Nombres de couches	K_D tronçons courants		K_D Musoir		tg α
		Houle déferlante	Houle non déferlante	Houle déferlante	Houle non déferlante	
Enrochements lisses arrondis	2	2,1	2,4	1,7	1,9	1,5 à 3
Enrochements lisses arrondis	> 3	2,8	3,2	2,1	2,3	1,5 à 3
Enrochements rugueux anguleux	2	3,5	4	2,9	3,2	1,5
				2,5	2,8	2
				2	2,3	3
Enrochements rugueux	> 3	3,9	4,5	3,7	4,2	1,5 à 3
Tétrapodes et quadripodes	2	7,2	8,3	5,9	6,6	1,5
				5,5	6,1	2
				4	4,4	3
Dolos (dois)	2	22	25	15	16,5	2
				13,5	15	3
Hexapodes	2	8,2	9,5	5	7	-
Acropodes	1	10	12	7,6	9,2	
Tribars	2	9	10,4	8,3	9	1,5
				7,8	8,5	2
				7	7,7	3
Granulométrie étalée		2,2	2,5			
Cube modifié	2	6.8	7.5		5.8	

Tableau III.1 : Coefficient de stabilité K_D

Types de blocs	n = nombre de couches	K_{Δ} coefficient de couche	P = porosité en %
Enrochement arrondi	2	1,02	38
Enrochement anguleux	2	1,15	37
Enrochement anguleux	>3	1,1	40
Cube modifié	2	1,1	47
Tétrapode	2	1,04	50
Quadripode	2	0,95	49
Hexapode	2	1,15	47
Tribar	2	1,02	54
Tribar rangé	1	1,13	47
Dolos	1 ou 2	1	63
Cube rainuré	2	1,03	44
Accropode	1	1,51	60

Tableau III.2 : Coefficient de stabilité K_{Δ}

3.3 Formule de Van Der Meer : (eau profonde)

Il a élaboré des formules d'estimation de la stabilité des enrochements sur des talus uniforme en enrochement dont les crêtes dépassent le niveau maximal de run-up. Ces formules sont basées sur une grande quantité d'essais sur modèles dont la majorité avait été effectués en eau profonde. Elle est plus complexe que la formule d'Hudson car elle inclut les effets de la durée de la tempête, de la période de la houle ainsi qu'un niveau de dommage clairement défini. Les formules distinguent deux cas différents :

Déferlement plongeant ($\xi_m < \xi_{cr}$) :

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}$$

Déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cos\alpha} \xi_m^p$$

Avec :

- ✓ N : nombre de vagues incidentes.
- ✓ S_d : niveau de dommage.
- ✓ H_s : hauteur de la houle significative.

- ✓ $\Delta = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1$: densité relative déjaugée.
- ✓ α : angle du talus.
- ✓ P: paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage, sa valeur est comprise entre $0.1 \leq P \leq 0.6$
- ✓ ξ_m : paramètre de déferlement calculé par la formule suivante : $\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m^2}}}$ avec :

T_m est la période moyenne de la houle

- ✓ Cpl : 6.2 (voir tableau (III.3))
- ✓ Cs : 1 (voir tableau (III.3))
- ✓ La transition entre un déferlement plongeant et un déferlement gonflant est calculée en se basant sur la pente du talus de l'ouvrage par la formule suivante :

$$\xi_{cr} = \left[\frac{C_{pl}}{C_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right]^{\frac{1}{p+0.5}}$$

Pour ($\xi_m < \xi_{cr}$) le déferlement est plongeant.

Pour ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) le déferlement est gonflant.

Note : pour des pentes de talus $\cot \alpha \geq 4$, on n'utilise que la formule lié au déferlement plongeant peu importe les valeurs des paramètres de déferlement ξ_m et ξ_{cr}

3.4 Formule de Van Der Meer : (eau peu profonde)

Les formules de Van Der Meer ont été changées par Van Gent en (2004), car en eau profonde, l'effet de la houle change c'est pour ça qu'on utilise la hauteur à 2%, plutôt que la houle significative, et on augmente les valeurs des coefficients Cs et Cpl, on utilise aussi une période de houle spectrale $T_{m-1,0}$ au lieu d'utiliser la période moyenne T_m .

Déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) :

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \xi_{s-1,0}^{-0.5}$$

Déferlement gonflant ($\xi_{s-1,0} \geq \xi_{cr}$) :

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \sqrt{\cos \alpha} \xi_{s-1,0}^p$$

Avec :

- ✓ $\xi_{s-1,0}$: paramètre de déferlement calculé par la formule suivante : $\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m^2}}}$ avec :

T_m est la période moyenne de la houle

- ✓ $C_s=8.4$ (voir tableau (III.3))
- ✓ $C_{pl}=1,3$ (voir tableau (III.3))
- ✓ $H_{2\%}$: hauteur dépassée par 2% des hauteurs des houles incidentes au pied de l'ouvrage
- ✓ $\xi_{s-1,0}^{-0.5} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_{m-1,0}^2}}}$ paramètre de déferlement, calculée à partir de la période énergétique de la houle.
- ✓ $T_{m-1,0}$: période spectrale de la houle ou bien période énergétique de la houle.

	coefficient	Valeur moyenne	Ecart-type du coefficient
Eau profonde	C_{pl}	6.2	0.4
	C_s	1.0	0.08
Eau peu profonde	C_{pl}	8.4	0.7
	C_s	1.3	0.15

Tableau III.3 : Valeurs moyennes des coefficients des équations

3.5 LA FORMULE Van Gent et Al (très faible profondeur) :

La formule de stabilité simplifiée et calculée par Van Gent et Al prend en considération qu'en eau très peu profonde la période de la houle diminue notablement :

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.75 \sqrt{\cos\alpha} \left(1 + \frac{D_{n50noyau}}{D_{n50}} \right)^{2/3} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2}$$

L'influence de la perméabilité de l'ouvrage est intégrée à l'aide du ratio $\frac{D_{n50noyau}}{D_{n50}}$ qui est le ratio entre le diamètre nominal médian du matériau du noyau et celui de l'enrochement utilisé en carapace.

4. NOTION DE DEGATS :

Au cours de son existence, la digue va subir de nombreuses tempêtes qui la malmèneront, et il sera nécessaire de surveiller l'évolution de la digue et de procéder périodiquement à des opérations d'entretien et parfois de réparations.

Les digues à talus sont des ouvrages très résistants qui présentent une certaine souplesse vis-à-vis de l'action des lames. Une digue bien conçue, bien réalisée et

correctement entretenue se comporte honorablement pendant plusieurs dizaines d'années, même lorsque surviennent des événements imprévisibles.

Les accidents graves répertoriés à ce jour ont essentiellement pour causes :

❖ **des erreurs de conception dont les principales sont :**

- ✓ la mauvaise évaluation de la houle de projet,
- ✓ la recherche trop poussée d'économies conduisant à minimiser les caractéristiques du projet (carapace, butées de pied),
- ✓ la non-prise en compte du facteur temps-fatigue dans la conception,
- ✓ la trop faible résistance du couronnement,
- ✓ la trop grande fragilité du talus arrière,
- ✓ le choix du type de bloc (trop grande fragilité) ;

❖ **des erreurs de réalisation dont les principales sont :**

- ✓ la réalisation d'un projet non conforme à celui étudié (allègement des caractéristiques),
- ✓ la mauvaise qualité des matériaux et notamment des bétons dont la tenue dans le temps peut parfois présenter des surprises,
- ✓ le non-respect des spécifications de base et principalement du plan de pose des blocs constituant la carapace.



Figure III.1 : les dégâts causés par la houle

5. CONCLUSION :

Les ruptures de la digue à talus sont généralement dues soit à l'action de la houle, soit à des facteurs géotechniques (comme un grand glissement, une rupture des fondations ou une érosion interne...), qui sont influencés par le poids propre, les actions hydrauliques et les actions sismiques. Les essais sur modèles réduits restent de plus haute importance pour évaluer le comportement de l'ouvrage face à l'action de la houle.

1. INTRODUCTION :

L'observation n'est pas toujours possible ni suffisante pour étudier un phénomène réel. Les causes principales en sont le manque de moyens techniques, financiers ou théoriques. La simulation est alors d'un grand secours pour approfondir l'étude. La simulation est l'expérimentation sur un modèle du phénomène que l'on veut étudier.

Le modèle sur lequel s'appuie une simulation est fondé sur une théorie, c'est-à-dire une description abstraite de la réalité. Dans le cas où le problème physique est basé sur une théorie reconnue et éprouvée, la simulation sert à évaluer ou à vérifier le comportement de l'objet d'étude. De tels modèles servent à dimensionner des ouvrages ou à établir des essais de laboratoire en génie civil par exemple. Quand la théorie n'est pas assurée, la simulation permet, par confrontation avec la réalité, de tester sa validité. Les modèles sont de deux types, numérique et analogique.

2. LA SIMILITUDE :

La similitude est l'étude des lois régissant le passage entre les grandeurs d'un modèle réduit et celles du prototype associé. L'analyse dimensionnelle est à la base de la détermination de ces lois.

3. LES LOIS DE SIMILITUDE :

Pour établir les lois de la similitude, on ne s'intéresse plus aux paramètres particuliers à un problème, mais aux grandeurs (comme les longueurs, les forces, les déformations etc.) et aux facteurs d'échelle associés. C'est-à-dire que l'on regroupe les paramètres par types. Par exemple tous les paramètres du type "longueur" seront affectés dans les lois de similitude d'un même facteur d'échelle. Pour connaître les relations liant les facteurs d'échelle, on se base sur les lois connues de la physique. Elles ont pour origine les équations d'équilibre et les lois de comportement des matériaux.

3.1 Similitude géométrique :

Deux systèmes sont géométriquement semblables si les longueurs des objets homologues restent au rapport constant.

L_p : Longueur du prototype L_m : longueur du modèle

- ✓ échelle géométrique : $\lambda = \frac{L_m}{L_p} = \text{Constante}$.
- ✓ échelle de surfaces : $\lambda_s = \lambda^2$
- ✓ échelle des volumes : $\lambda_v = \lambda^3$
- ✓ échelle des angles : $\lambda_\theta = 1$

3.2 Similitude cinématique

Deux systèmes sont cinématiquement semblables s'ils sont géométriquement semblables et si les vitesses et les accélérations en tous points homologues restent au rapport constant.

Soit λ_t l'échelle des temps : $\lambda_t = \frac{t_m}{t_p}$

✓ L'échelle des vitesses :

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p} \right) * \left(\frac{t_p}{t_m} \right) = \frac{\lambda}{\lambda_t} = \text{Constante.}$$

✓ L'échelle des accélérations :

$$\lambda_a = \frac{a_m}{a_p} = \left(\frac{L_m}{L_p} \right) * \left(\frac{t_p^2}{t_m^2} \right) = \frac{\lambda}{\lambda_t^2} = \text{Constante.}$$

3.3 Similitude dynamique

Deux systèmes sont dynamiquement semblables s'ils sont cinématiquement semblables et si les forces agissantes sur des objets homologues à des instants correspondants restent au n rapport constant.

✓ L'échelle des forces :

$$\lambda_F = \frac{F_m}{F_p} = \frac{\rho_m L_m^3 L_m t_p^2}{\rho_p L_p^3 L_p t_m^2} = \frac{\rho_m}{\rho_p} * \frac{\lambda^2}{\lambda_t^2}$$

4. ANALYSE DIMENSIONNELLE :

L'analyse dimensionnelle est l'étude de la forme générale des équations régissant un phénomène physique. Elle s'intéresse aux dimensions des variables intervenant dans les équations scientifiques. La propriété d'homogénéité des équations, c'est-à-dire leur indépendance par rapport au système d'unité, permet, à partir des relations entre les variables dimensionnelles de former un système équivalent de variables sans dimensions qui sont des produits des précédentes. Cette opération permet de réduire le nombre de variables décrivant le problème physique en ne considérant que des paramètres adimensionnels.

4.1 Unités de mesure :

Dans l'analyse dimensionnelle on utilise les unités du système international ou système métrique décimal. Ce système repose sur 7 unités fondamentales :

1. La longueur : le mètre [m] ;
2. La masse : le kilogramme [kg] ;
3. Le temps : la seconde [s] ;
4. L'intensité électrique : l'ampère [A] ;
5. La température : le kelvin [K] ;
6. L'intensité lumineuse : la candela [cd] ;
7. La quantité de matière : la mole [mol].

Chaque mesure est associée à un symbole, dont la typographie a été fixée. On se sert soit de noms propres (le symbole commence alors par une majuscule), soit des unités de base. Par exemple :

- force : le newton [N] ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$) ;
- pression : le pascal [Pa] ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$) ;
- vitesse : [m/s] ;
- masse volumique : [kg/m³] ;
- Accélération : [m/s²] ;
- Surface : [m²] ;
- Débit : [m³/s] ;
- énergie : le joule ($1 \text{ J} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$) ;
- puissance : le watt ($1 \text{ W} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$).

4.2 Théorème de Vaschy-Buckingham :

Énoncé en 1914, il prouve que si un problème peut s'écrire en fonction de relations entre n variables dimensionnelles fondamentales, alors il existe des relations équivalentes fonctions de m produits adimensionnels indépendants formés à partir de ces variables. De plus il indique précisément le nombre m de produits adimensionnels indépendants qu'on peut former à partir des n variables dimensionnelles fondamentales du problème. Pour un problème de dynamique sans considération thermodynamique, on a $m = n - 3$, pour un problème cinématique on a $m = n - 2$.

4.3 Détermination des paramètres adimensionnels :

Dans un problème de mécanique, la détermination des paramètres (ou produits) adimensionnels est possible en utilisant le fait que chaque grandeur G soit le produit de puissances de trois grandeurs fondamentales : la longueur, la masse et le temps.

On note $[G]$ la dimension de la grandeur G et L, M, T les dimensions respectives des longueurs, masse et temps. $[G]$ peut alors s'écrire sous la forme : $[G] = L^a M^b T^c$, par exemple : pour une vitesse V , on a $[V] = LT^{-2}$.

Les paramètres dimensionnels peuvent alors être combinés en produits de puissances formant des paramètres de dimension $L^0M^0T^0 = 1$, donc adimensionnels. Il existe des méthodes systématiques pour déterminer une série de paramètres adimensionnels indépendants, mais on peut aussi les déterminer par tâtonnement.

4.4 Nombres adimensionnels usuels :

Dans l'analyse dimensionnelle, on est souvent amené à manipuler des groupes de variables sans dimension, appelés « nombre adimensionnel » ou « rapport de similitude ». Ces groupes sont construits en faisant des rapports entre des termes apparaissant dans les équations du mouvement, ce qui permet de les interpréter physiquement.

Les nombres les plus utilisés sont ceux de Froude et de Reynolds.

➤ **Nombre de Reynolds : $Re = \frac{VD}{\nu}$**

Avec : V : la vitesse caractéristique du fluide (m/s).

D : dimension caractéristique (m).

ν : viscosité cinématique du fluide (m^2/s).

Le nombre de Reynolds est le plus souvent interprété comme le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité. Il sert notamment à classer le régime d'écoulement en distinguant les écoulements laminaires ($Re < 1$) et les écoulements turbulents ($Re > 1$).

➤ **Nombre de Froude : $Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$**

Avec : V : la vitesse du fluide (m/s)

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

D : longueur caractéristique (m).

Le nombre de Froude est le plus souvent interprété comme le rapport de l'énergie cinétique sur l'énergie potentielle. Il sert notamment en hydraulique à classer le régime d'écoulement en distinguant les écoulements supercritiques ($Fr > 1$) et les écoulements subcritiques ($Fr < 1$).

5. MODELES REDUITS :

Le modèle réduit physique est souvent le seul moyen de résoudre un problème d'écoulement impossible à étudier par le calcul. Il en est ainsi pour la mise au point d'ouvrages tels que les évacuateurs de crues, les dissipateurs d'énergie, les ports, les barrages et prises d'eau en rivière, etc.

Avantages des modèles réduits :

- ✓ Grandes précisions dues à l'appareillage de laboratoire
- ✓ Réalisation de plusieurs essais en faisant varier plusieurs paramètres
- ✓ Economie de temps et d'argent

Les modèles réduits doivent être construits à une échelle convenable de telle sorte à reproduire fidèlement ce qui se passe sur la nature en vraie grandeur « prototype ». Pour que le modèle et le prototype soient semblables il faut réaliser certaines conditions résultant des lois de similitudes.

Les forces agissant sur les fluides et le corps en contact avec eux sont principalement dues à l'inertie, à la pesanteur, à la viscosité et à la capillarité. On doit, dans un modèle, conserver les rapports entre les diverses catégories importantes de forces. En général, il est impossible de réaliser une similitude permettant la représentation simultanée de plus de deux types de forces.

En hydraulique à surface libre, les modèles réduits sont construits sur la base d'une similitude dynamique fondée sur le nombre de Froude. Pour que des écoulements à des échelles différentes soient dynamiquement similaires, il faut que les nombres de Froude soient égaux.

Dans la similitude de Froude, on conserve dans le même rapport les forces de pesanteur et d'inertie. On obtient ce résultat en réalisant un même nombre de Froude V/gD sur le modèle et dans la nature « prototype ». Ceci nécessite souvent d'introduire une distorsion dans le modèle (échelles horizontales et verticales différentes). Quand cela est possible, il est également souhaitable que les nombres de Reynolds soient également égaux.

Dans la similitude de Reynolds, on conserve dans le même rapport les forces d'inertie et les forces de viscosité. Les nombres de Reynolds homologues VD/ν doivent alors être les mêmes sur le modèle et dans la nature.



Figure IV.1 : bassin à houle



Figure IV.2 : Canal à houle

6. CONCLUSION :

Le coût des études sur modèles réduits est généralement élevé, mais ils représentent la réalité par la précision de leurs résultats. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire que les essais soient effectués par des personnes expérimentées, capables d'éviter les écueils courants, tant lors de la réalisation des essais que pendant l'analyse des mesures. Il ne faut pas omettre de tenir compte des limites éventuelles des modèles réduits et techniques de mesure.

1. INTRODUCTION :

Le Laboratoire d' Études Maritimes, est un bureau d'Études d'ingénierie maritime et portuaire constitué exclusivement par des apports de l'Etat, sous forme de titres participatifs détenus par la Société de Gestion des Participations des Travaux Publics SINTRA, elle et fondée en 1976. Ses activités consistent en :

- ✓ L'étude et l'établissement de tous projets de travaux publics ou privés.
- ✓ Les études d'aménagements d'ouvrages portuaires, maritimes et hydrauliques.
- ✓ Les études de gestion, d'organisation des ouvrages précités.
- ✓ L'expertise, le suivi, le contrôle des travaux des ouvrages maritimes et hydraulique.

2. CADRE DES ESSAIS :

Les essais se sont déroulés dans un canal à houle du centre d'essais sur modèles du laboratoire d'étude maritimes. Le canal est de dimensions suivantes :

- ✓ **Largeur : 0.6m**
- ✓ **Profondeur : 1.1m**
- ✓ **Longueur : 40m**



Figure V.1 : Schéma du Canal à houle



Figure V.2 : image du canal à houle

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

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

Dans le cas de la houle aléatoire, le signal est effectivement aléatoire suivant une durée de tempête préalablement fixée.

Deux grandes baies vitrées de 6m de longueur permettent l'observation directe des évolutions des maquettes de l'ouvrage.

Une conduite met en communication permanente la partie du canal située à l'arrière de la maquette de l'ouvrage et la partie profonde où se trouve le batteur. Ce dispositif évite une éventuelle surélévation du plan d'eau par suite de franchissement répétés.

L'échelle du modèle retenue dans les essais est de l'ordre de 1/50^{ème}.

Note : Le JONSWAP (Joint Project North Sea Wave) est une relation empirique qui définit la distribution de l'énergie avec la fréquence au sein de l'océan.

3. MOYENS DES ESSAIS :

3.1 Génération de la houle :

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

Le déplacement du volet est assuré par un vérin lui-même actionné par un groupe de puissance hydraulique de 110bars. Le tout est piloté par un générateur électronique qui est lié à un programme de génération à l'aide d'un ordinateur représentant un train de houle réel enregistré en nature et converti en train de houle sur modèle.

Cette fonction est introduite dans système appelé « SERVO » qui contrôle le mouvement du vérin. Les périodes et les amplitudes simulées en modèle sont obtenues respectivement par variation de la vitesse et par amplification du signal de puissance « Output » du générateur électronique.

3.2 Mesure de la houle :

La houle générée dans le modèle est enregistrée par des capteurs de houle (sondes) basés sur le principe de la conductance entre deux électrodes. Les signaux des capteurs de houle sont enregistrés en continu et analysés par un microprocesseur préprogrammé « MULTI CHANNEL WAVE ANALYSER » qui peut traiter jusqu'à 32 canaux.

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

4. LES RESULTATS DES ESSAIS SUR CANAL A HOULE :

Dans le but d'analyser l'effet de la butée de pied sur la stabilité de la digue à talus, on a essayé de traiter les résultats de 20 essais sur canal à houle de différents ports, dans plusieurs régions du littoral algérien.

Le tableau suivant résume bien ces résultats :

le port	Largeur de la butée (m)	Profondeur de la butée Ht(m)	Profondeur au pied de l'ouvrage H(m)	nature des blocs	houle de projet (m)	penne
Beni saf	4	5,25	7,5	enrochement 2 à 5 t	6	1,5
Arzew	6,3	16	18	BCR 50t	9	1,5
Bouzedjar P1	4	7,2	9	enrochement 1 à 2,5t	8,8	1,5
Bouzedjar P2	6	6,7	9	enrochement 3 à 6t	8,8	1,5
Madagh	3,3	7,35	9,45	enrochement 1,5 à 3t	5,8	1,5
Rais Hamidou P1	5,6	6,7	7,5	BCR 50t	8	1,5
Rais Hamidou P2	7,5	6,7	7,5	enrochement 2 à 5 t	8	1,5
Beni houa P1	5	2	2,5	enrochement 2 à 5 t	7	1,5
Beni houa P2	4	1,5	2,5	enrochement 0,5 à 2t	7	1,5
Beni houa P3	5	1,5	2,5	enrochement 0,5à2t	7	1,5
Beni houa P4	6	1,5	2,5	enrochement 0,5 à 2t	7	1,5
Zemouri P1	4	0,6	3,4	enrochement 3 à 5t	7	1,5
Zemouri P2	4	0,7	3,4	enrochement 3 à 5t	7	1,5
Tala Guilef	4	2,2	5,5	enrochement 1 à 3t	5	1,33
Beni ksila	4	4,5	7	enrochement 2 à 5 t	6,9	1,5
chetaibi P1	4	3,7	13	BCR20t	5	1,5
Chetaibi P2	4	3,7	13	BCR15t	5	1,5
Chetaibi P3	4	3,7	13	enrochement 3-6t	5	1,5
Elkala	4	3,36	9	BCR 18t	5	1,5

Tableau V.1 : Tableau des résultats des essais sur canal à houle.

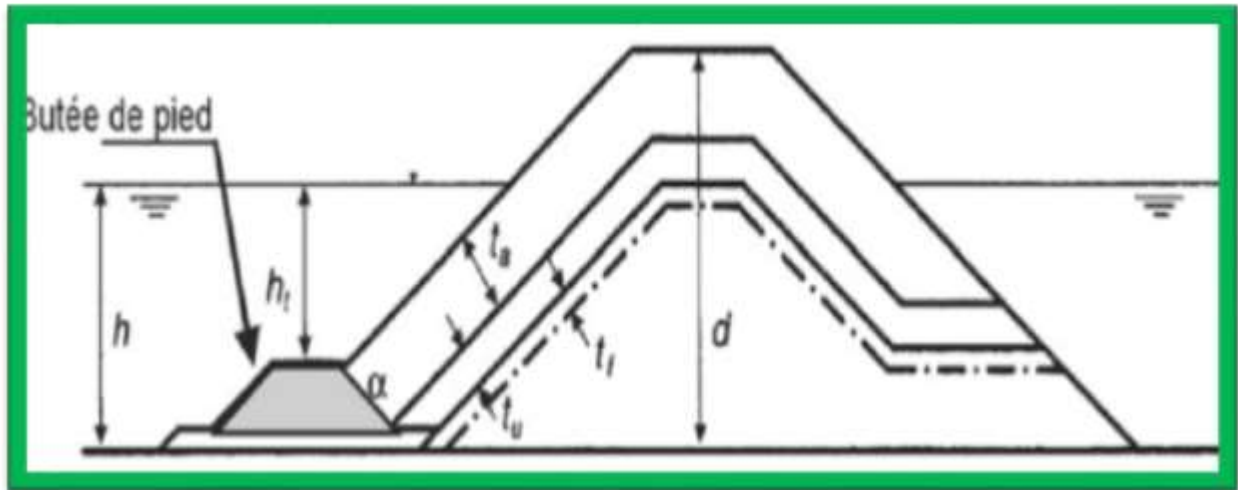


Figure V.3 : schéma expliquant les paramètres Ht et H

5. INTERPRETATION DES RESULTATS :

L'analyse du tableau N°1 fait apparaître les points suivants :

Lorsque la hauteur Ht de la butée est plus ou moins petite les enrochements de la butée sont de grandes dimensions (blocs de 18t et 20t pour respectivement Ht=3.36m et Ht=3.7m), la représentation graphique de ces catégories d'enrochement en fonction de la hauteur Ht donne le graphe suivant :

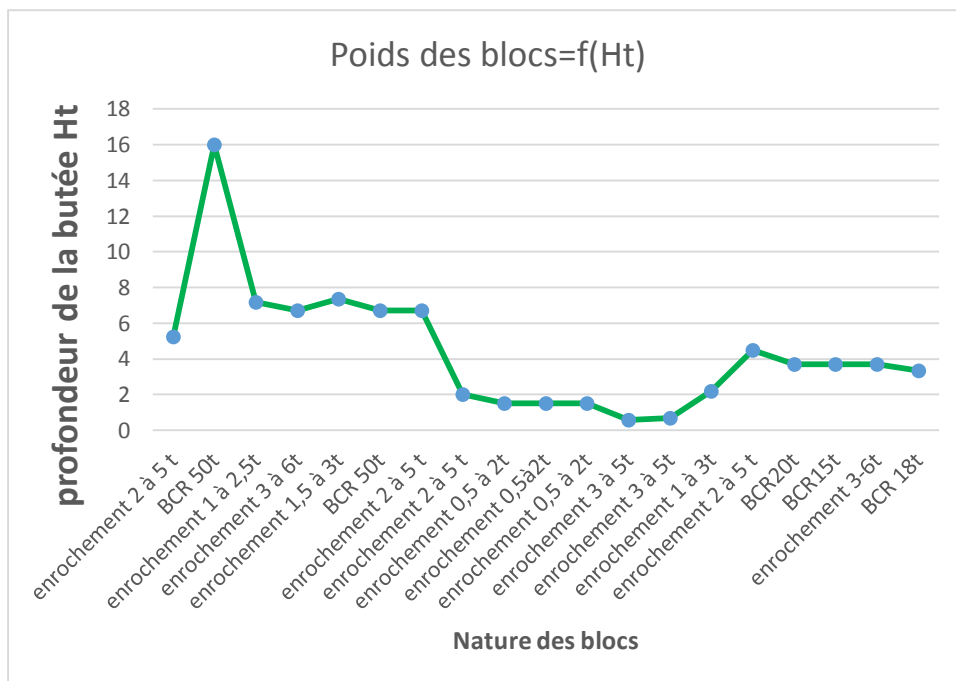


Figure V.4 : graphe représentant les poids des blocs en fonction de la profondeur de la butée de pied.

Le 2^{ème} graphe qui représente la variation de la nature des enrochements en fonction de la largeur de la butée, montre que plus la largeur est grande plus l’enrochement est de taille importante :

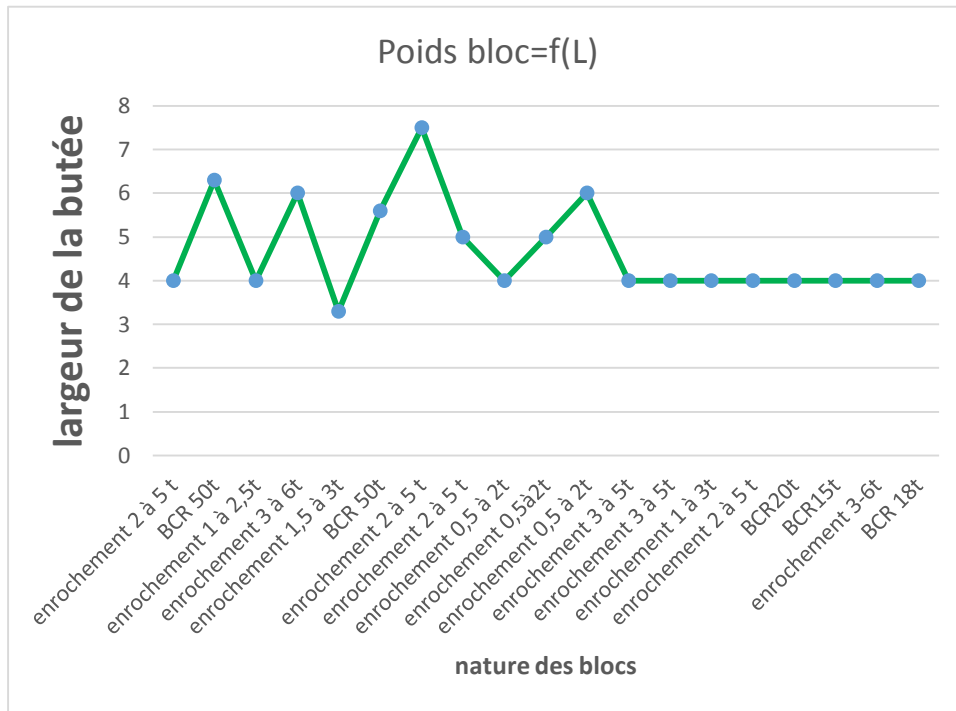


Figure V.5 : graphe représentant les poids des blocs en fonction de la largeur de la butée de pied.

L’effet de la houle sur le talus est confirmé. On note que plus la houle de projet est importante, les dimensions de la butée de pied sont importantes (Largeur L, et la profondeur de la butée de pied Ht).

On remarque aussi que la pente idéale presque pour tous les ouvrages est 3/2, elle montre une stabilité meilleure par rapport aux autres pentes.

L’analyse des essais du projet de port de Beni Houa, on a fait varier la largeur de la butée de 4 à 6m en fonction de la profondeur de la butée de pied de 2 à 1.5m jusqu’à atteindre la stabilité admissible sur les quatre profils analysés :

	Largeur de la butée	Profondeur de la butée de pied	La profondeur de l'ouvrage	Nature et tailles des blocs	Houle de projet
Beni houa P1	5	2	2,5	enrochement 2 à 5 t	7
Beni houa P2	4	1,5	2,5	enrochement 0,5 à 2t	7
Beni houa P3	5	1,5	2,5	enrochement 0,5à2t	7
Beni houa P4	6	1,5	2,5	enrochement 0,5 à 2t	7

Tableau V.2 : Tableau des résultats des essais sur canal à houle du port de Beni Houa

Le profil optimal correspond à une largeur de la butée de pied de 6m pour une profondeur de 1.5m.

Pour le projet du port de plaisance à Chetaibi, les différentes variantes ont été testées en faisant varier la taille et la nature des blocs selon le tableau suivant :

	Largeur de la butée	Profondeur de la butée de pied	La profondeur de l'ouvrage	Nature et tailles des blocs	Houle de projet
chetaibi P1	4	3,7	13	BCR20t	5
Chetaibi P2	4	3,7	13	BCR15t	5
Chetaibi P3	4	3,7	13	enrochement 3-6t	5

Tableau V.3 : Tableau des résultats des essais sur canal à houle du port de Chetaibi

Les blocs de 20t assurent une meilleure stabilité.

6. INFLUENCE DE LA BUTEE DE PIED SUR LA STABILITE DES DIGUES A TALUS :

L'interprétation des résultats sur modèles réduits nous a conduits à constater que la disposition constructive de la butée de pied doit garantir une protection contre l'érosion de l'ouvrage ainsi qu'un soutien contre le glissement de la carapace. La butée de pied doit donc être conçue pour empêcher l'apparition de ces deux modes de rupture potentiels.

La butée doit s'étendre jusqu'à un niveau assez bas pour ne subir aucun affouillement, ou doit contenir suffisamment de matériaux et être assez déformable pour s'abaisser à un autre niveau.

A des faibles profondeurs le poids des blocs de la butée augmente, pour assurer une stabilité contre l'érosion.

La butée de pied est généralement constituée du même matériau du filtre support en augmentant leurs tailles (enrochements), et dans certains cas elle est constituée des blocs artificiels de la carapace.

Pour des digues soumises à des forts affouillements, on applique des largeurs de butée plus grandes pour qu'il ait des enrochements suffisamment jouant le rôle d'un tapis de protection plongeant.

7. CONCLUSION :

Différentes variantes de digues à talus ont été testées : avec ou sans butée de pied, avec différentes largeurs de butée, avec plusieurs catégories d'enrochements...

Les résultats obtenus de chaque configuration ont fait apparaître une influence importante de la butée de pied sur la stabilité de la digue à talus.

CONCLUSION GENERALE :

Le travail réalisé durant cette thèse de Master m'a permis d'approfondir et de valoriser les connaissances acquises en travaux maritimes. Aussi il m'a été donné une occasion à travers mes études de savoir comment faire des recherches et comment analyser et interpréter des résultats et des observations. Ce travail m'a appris les initiations de la recherche et ouvre de larges perspectives pour des études futures dans le cadre du Doctorat.

BIBLIOGRAPHIE :

Documentation :

1. Pierre CORMAULT, « **HYDRAULIQUE** », *Encyclopédie Universelle* [en ligne],
URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/hydraulique>.
2. JM. Terriez - Cours de mécanique des fluides - Chap.2
3. Adil Ridha (Université de Caen) Analyse Dimensionnelle et Similitude.
4. Rahmani.d Cours hydraulique appliquée école national supérieur des travaux publics.
5. Dang-Trinh NGUYEN, Stabilité et franchissement des digues maritimes, thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université du Havre
6. Guide de l'enrochement, CIRA, CUR, CETMEF, 2009, CETMEF Compiègne.
7. François ROPERT, François BOUTTES, Conception et dimensionnement des digues à talus.
8. Hafid Tabet, Jérôme Brossard, Michel Colinet, Bruno Jacinthe, effet de la butée de pied posée à faible profondeur sur la stabilité des talus de protection.