

13/91

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Hydraulique

lex

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

La contribution aux études hydrauliques
en modèle du Nouveau Port de
Dellys.

Proposé par :

Laboratoire des
études maritimes

Etudié par :

M^r FERROUKI
M^{ad} Riad

Dirigé par :

M^r BERKANI (E.N.P.)
M^r ABDELBAKI (L.E.M.)

PROMOTION

JUIN 1991.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Sujet :

LA CONTRIBUTION AUX ETUDES
HYDRAULIQUES EN MODELE REDUIT
DU NOUVEAU PORT DE DELLYS

Proposé par : Le L.E.M.

Etudié par : M^r ZERROUKI Mohamed Riad

Dirigé par : m^r A ABDELBAKI

Promotion : Juin 1991

أعوذ بالله من الشيطان الرجيم

بسم الله الرحمن الرحيم

((وما يستهوي البحران ، هذا عذب فرات سائغ
شرابه وهذا ملح أجاج ، ومن كل تأكلون لحما
طريما وتستخرجون حليمة تلبسونها وتـرى
الفلـك فيه مواخر لتبتغوا من فضله ولعلكم
تشكرون))

صدق الله العظيم

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE
PROJET DE FIN D'ETUDES

ملخص:

ان بناء الموانئ التجارية يلعب دورا هاما في تنمية الاقتصاد الجزائري . وبالتالي ، فإن دراستها صعبة وتأخذ وقتا طويلا . أن هدف هذا المشروع هو المساهمة في هذه الدراسة ، وقد استطعنا في آخره ايجاد المقطع الملائم لسد مناء دلس الجديد بعد دراسة على قناة الامواج .

Résumé :

Dans le but de développer l'économie de l'Algérie, la construction de ports joue l'un des plus importants rôles. Cependant leurs études sont longues et compliquées. Le présent projet a pour but de contribuer à ces études, il a permis de déterminer, après étude sur canal à houle, le profil optimal de la jetée principale du Nouveau Port de Dellys.

Abstract :

Port building is very important in the developpement of the economy of Algeria. However, theirs studies are difficult and long. The present project contibute for these studies. The experiments made on a swell chanal allowed the determination of the jetty optimal profile in the New Dellys Port (Nouveau Port).

A MES PARENTS

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier personnellement toutes les personnes qui m'ont aidé, de loin ou de près, à réaliser ce projet et en particulier :

- Monsieur H. TABET AOUEL, pour sa proposition du thème en Hydraulique maritime, ce qui m'a permis ainsi d'avoir une plus large connaissance dans le domaine de l'hydraulique,
- Monsieur A. ABDELBAKI, pour les précieux conseils qu'il m'a fournis tout le long du stage au Laboratoire d'Etudes Maritimes,
- Monsieur M. BERKANI, pour les fructueuses suggestions qu'il m'a fournis tout le long de ce dernier semestre à l'Ecole Nationale Polytechnique,
- Monsieur GUETTACHE, pour l'aide qu'il m'a fournis lors du déroulement des essais au laboratoire.
- Monsieur D. RAHMANI, pour les documents et les explications qu'il m'a fournis,

J'espère que toute personne trouvera ici l'expression de ma profonde gratitude.

PLAN DU PROJET

Notations.....	1
Introduction générale.....	2
<u>CHAPITRE 1</u> : La similitude en tant que moyen d'étude.....	6
<u>CHAPITRE 2</u> : La houle : étude théorique.....	14
<u>CHAPITRE 3</u> : Données réelles du phénomènes de la houle...	32
<u>CHAPITRE 4</u> : Phase de l'étude.....	47
Conclusion générale.....	99
Bibilographie.....	102

NOTATIONS

D	: [m]	profondeur du fond,
d_m	: [N/m ³]	poids volumique des blocs,
d_w	: [N/m ³]	poids volumique de l'eau de mer,
E	: [J]	énergie,
f	: [hz]	fréquence,
f_P	: [hz]	fréquence de pointe,
g	: [m/s ²]	accélération de la pesanteur,
H	: [m]	hauteur de la houle,
H_m	: [m]	hauteur significative de la houle,
K_a et K	:	coefficients adimensionnels
L	: [m]	longueur d'onde,
n	:	nombre de couche,
p	: [Pas]	pression,
t	: [s]	temps,
T	: [s]	période,
T_P	: [s]	période de pointe,
V	: [m/s]	vitesse,
W	: [N]	poids unitaire des blocs de la carapace,
Z	:	nombre d'éléments par unité de surface,
α	: [rd]	angle du talus
λ	:	échelle géométrique,

Pour les dessins des profils :

B.C.R.	:	blocs cubiques rainurés
E	:	enrochements
ZH	:	zero hydrographique,

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est un pays ayant une côte sur la méditerranée d'une longueur de 1200 km. Notre pays assiste aujourd'hui à une évolution du trafic maritime induisant un développement des infrastructures portuaires.

La construction de nouveaux ports importants dont celui de JENJEN (willaya de JIJEL) est un exemple.

Le présent travail a pour objet la présentation et l'analyse des résultats obtenus à l'issue des essais hydrauliques en canal à houle et concernant l'étude de la stabilité d'une portion de la partie courante de la jetée principale du Nouveau Port de Dellys.

Il a été réalisé avec le soutien du Laboratoire des Etudes Maritimes (LEM).

Il comporte quatre parties essentielles, la première porte sur la similitude hydraulique et son application dans le domaine maritime, elle est la base de l'étude des projets de grandes importances, car elle permet de visualiser en modèle tous les phénomènes susceptibles de se produire en nature.

Pour notre cas une échelle géométrique égale à $1/49.10$ a été prise pour l'étude de la stabilité en modèle bidimensionnel, elle vérifie largement le critère de similitude de REECH-FROULE, à savoir $R_{\omega} > 3 \cdot 10^4$.

La seconde partie est une étude théorique sur la houle, nécessaire pour l'acquisition de quelques notions fondamentales de l'hydraulique maritime, deux points sont donc importants à mentionner :

- quelques approches théoriques sur la déformation du plan d'eau formant ainsi les vagues,
- les déformations de la houle, à savoir la réflexion, la réfraction, la diffraction et le déferlement.

Toute fois la houle est un phénomène purement aléatoire, ce qui nécessite une étude plus approfondie basée sur des enregistrements effectués au site,

ceci a fait l'objet de la troisième partie, de même cette dernière comporte deux points essentiels :

- les méthodes de dépouillement des données enregistrées : statistique et spectrale. La seconde méthode a un rôle primordiale dans la réalisation des essais au laboratoire, car la houle est générée suivant un spectre d'énergie bien défini.
- la détermination des houles extrêmes à partir des données enregistrées sur le site de Dellys : elle permet de déterminer la houle de projet, c'est la houle cinquantennale ($H_m = 8.3 \text{ m}$) qui est prise dans ce cas.

La quatrième et dernière partie est la partie pratique du projet. Elle utilise les données citées dans les chapitres précédents; tels que l'échelle du modèle, la houle de projet, le spectre d'énergie ainsi que d'autres données supplémentaires, pour l'étude en modèle réduit physique d'une portion de la partie courante dont le profil est du type digue à talus de la jetée principale du Nouveau Port de Dellys.

Au début de ce dernier chapitre, une partie théorique brève est citée sur les essais d'agitation effectués en modèles, nécessaire pour l'étude d'un port en modèle réduit, cette partie ne fait pas l'objet de notre étude au laboratoire, une seconde partie plus détaillée est citée, concernant les essais de stabilité des digues à talus. Des résultats mentionnés sur des tableaux pour le cas du Nouveau Port de Dellys.

Des graphes et des photos sont ajoutés pour illustrer les résultats obtenus.

Le profil optimal, de la digue, qu'on obtient sera utilisé comme profil de la partie courante de la jetée principale du Nouveau Port de Dellys.

L'étude complète de ce port ne sera terminée qu'après avoir opéré à :

- des campagnes géotechniques et topographiques (déjà effectuées),
- des calculs des quais,

- l'étude de la stabilité de la digue (thème du sujet),
- l'étude de l'agitation du plan d'eau dans la rade,
- l'étude de stabilité des points singuliers.

l'avant dernière étude est en cours, et la dernière aura lieu prochainement, pour, enfin, présenter ces études à une entreprise de réalisation des travaux maritimes, qui permettra au Nouveau Port de Dellys de voir le jour, chose que nous souhaitons vivement pour permettre à l'économie algérienne de se développer.

CHAPITRE : 1

LA SIMILITUDE EN TANT
QUE MOYEN D'ETUDE

Introduction sur la similitude

I- Rappels sur la similitude physique

II- Application de la similitude physique à

l'hydraulique maritime

1- Modèles à fonds fixes

a- Essais d'agitation

b- Essais de stabilité

2- Modèles à fonds mobiles

III- Effets d'échelle

Conclusion sur la similitude

INTRODUCTION SUR LA SIMILITUDE :

Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques peut se faire de deux manières :

- a- En utilisant un modèle mathématique : constitué d'un ensemble d'équations régissant le phénomène.
- b- En utilisant un modèle physique : un modèle dimensionné est nécessaire pour l'étude des phénomènes.

Le plus souvent, les formules théoriques ne donnent pas une approche précise de la nature. Pour cela il est nécessaire d'élaborer un modèle représentatif montrant la complexité du phénomène.

Un modèle est la représentation d'un objet, d'un état de fait ou d'un événement dans sa large définition. Il devra y avoir une similitude entre les paramètres du modèles et ceux de la nature.

En hydraulique maritime, on dit que la simulation en modèle réduit physique consiste à avoir l'idée de "voir petit" ce qui peut se passer en "grand". Elle permet de faire l'étude, en un temps très court, avec des dépenses minimales devant le coût de l'ouvrage, et permettant ainsi d'éviter des catastrophes menaçant l'économie d'un pays, comme la fermeture d'un port par exemple.

Dans les modèles réduits, en hydraulique maritime, deux (2) études importantes peuvent avoir lieu :

- a- Etude des phénomènes hydromécaniques : étudie le transport des sédiments et l'érosion des fonds (cette partie n'a pas été détaillée car elle ne fait pas l'objet de notre étude).
- b- Etude des phénomènes hydrodynamiques : c'est l'étude de l'action de la houle sur les obstacles, comme les digues par exemple.

Quelques rappels physiques sur la similitude en modèle réduit, son

application en hydraulique maritime ainsi que les conditions d'application seront mentionnés dans le présent chapitre.

I- RAPPELS SUR LA SIMILITUDE PHYSIQUE :

La similitude physique nécessite la connaissance de quelques paramètres, permettant l'étude d'un phénomène quelconque, à savoir :

- La similitude géométrique : Elle montre le domaine d'écoulement. Soient (L_1) et (L_2) les longueurs de référence, en nature et en modèle respectivement, l'échelle géométrique est :

$$\lambda = L_2 / L_1 \quad [1]$$

- La similitude cinématique : Elle montre le rapport des vitesses, ainsi que le rapport des temps, ces échelles sont :

$$\lambda_v = V_2 / V_1 \quad [2]$$

$$\lambda_t = t_2 / t_1 \quad [3]$$

Des trois (3) formules [1], [2] et [3] on détermine la relation fondamentale [4], elle montre la dépendance des trois (3) rapports d'échelle :

$$\lambda = \lambda_v \cdot \lambda_t \quad [4]$$

- La similitude dynamique : Elle montre le rapport des forces, dont les principales sont les suivantes :

- forces d'inertie,
- forces de gravité,
- forces de turbulence,
- forces de viscosité,
- forces de capillarité (négligeables).

Une similitude complète ne peut être réalisée, c'est pour cela qu'on doit négliger certaines forces devant d'autres prépondérantes.

De ce fait deux conditions apparaissent :

a- Condition de REYNOLDS : Elle caractérise les fluides visqueux incompressibles et non pesants, les plus importantes forces sont alors celles de viscosité et d'inertie, soient :

$$R_{e1} = R_{e2} \quad [5]$$

ou bien : $V_1 d_1 / \nu_1 = V_2 d_2 / \nu_2 \quad [6]$

Avec :

V [m/s] : vitesse d'écoulement,

d [m] : diamètre équivalent,

ν [m²/s] : viscosité cinématique.

Cette condition est généralement utilisée pour les gaz et les écoulements en charge des liquides, (cette partie ne sera pas détaillée dans la présente étude).

b- Condition de REECH-FROUDE : Elle caractérise les fluides non visqueux, incompressibles et pesants, les principales forces sont alors celles de gravité et d'inertie. soient :

$$F_1 = F_2 \quad [7]$$

$$\frac{V_1^2}{g_1 L_1} = \frac{V_2^2}{g_2 L_2} \quad [8]$$

ou bien : $\frac{V_1^2}{L_1} = \frac{V_2^2}{L_2} \quad [9]$

Cette condition est utilisée essentiellement en hydraulique maritime, car les forces d'inertie et de gravité sont dominantes, les échelles sont alors :

1- Echelle des longueurs :

elle est la base des échelles : $\lambda = L_2 / L_1 \quad [10]$

2- Echelle des surfaces :

$$\lambda_s = \frac{S_2}{S_1} = \frac{L_2 l_2}{L_1 l_1} = \lambda \lambda \quad \text{soit : } \lambda_s = \lambda^2 \quad [11]$$

3- Echelle des volumes :

$$\lambda_{vol} = \frac{Vol_2}{Vol_1} = \frac{L_2 l_2 h_2}{L_1 l_1 h_1} = \lambda \lambda \lambda \quad \text{soit : } \lambda_{vol} = \lambda^3 \quad [12]$$

4- Echelle des vitesses :

D'après la formule [9], on aura :

$$\lambda_v = \frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2^{0.5}}{L_1^{0.5}} \quad \text{soit : } \lambda_v = \lambda^{0.5} \quad [13]$$

5- Echelle des temps :

D'après les formules [4] et [13], on détermine λ_t :

$$\lambda_t = \lambda \lambda_v^{-1} = \lambda \lambda^{-1/2} \quad \text{soit : } \lambda_t = \lambda^{1/2} \quad [14]$$

6- Echelle des forces :

Comme : $F = m.a = (\rho.Vol).a$

$$\text{Alors : } \lambda_f = \frac{\rho_2 Vol_2 a_2}{\rho_1 Vol_1 a_1} = \frac{Vol_2}{Vol_1} \quad \text{soit : } \lambda_f = \lambda^3 \quad [15]$$

7- Echelle des débits :

$$\lambda_q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{(Vol_2/t_2)}{(Vol_1/t_1)} = \frac{Vol_2}{Vol_1} \cdot \frac{t_1}{t_2} = \lambda^3 \cdot \lambda^{-1/2}$$

$$\text{Soit : } \lambda_q = \lambda^{-5/2} \quad [16]$$

8- Echelle des pressions :

$$\lambda_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(\rho_2 g_2 h_2)}{(\rho_1 g_1 h_1)} = \frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{Vol_2}{Vol_1} \cdot \frac{h_2}{h_1} = \lambda^{-3} \lambda^3 \lambda$$

$$\text{Soit : } \lambda_p = \lambda \quad [17]$$

9- Echelle des énergies :

Considérons l'expression de l'énergie potentielle, et déterminons l'échelle des énergies, on obtiendra les mêmes résultats en considérant l'expression de l'énergie cinétique :

$$\lambda_{en} = \frac{M_2 g_2 h_2}{M_1 g_1 h_1} = \lambda^3 \lambda$$

Soit : $\lambda_{en} = \lambda^4$ [18]

II- APPLICATION DE LA SIMILITUDE PHYSIQUE A L'HYDRAULIQUE MARITIME :

La similitude physique intervient, en hydraulique maritime, dans l'étude de l'implantation et le dimensionnement des ouvrages de protection ainsi que les ouvrages intérieurs des ports contre les actions néfastes de la houle. Pour cela deux modèles apparaissent :

1- Modèles à fonds fixes :

Ce sont des modèles construits sur des fonds fixes et durs, suivant la bathymétrie et la topographie du site, montrant ainsi les phénomènes hydrodynamiques.

Deux essais sont généralement nécessaires pour l'étude de l'ouvrage :

a- Essais d'agitation : Ces essais sont réalisés dans un bassin à houle, ils permettent de déterminer :

- une implantation optimale de l'ouvrage,
- une géométrie définitive des bassins portuaires,
- une étude des mouvements de navires en fonction de l'exploitation portuaire (chargement - déchargement)

b- Essais de stabilité : Ces essais sont réalisés sur :

- modèle bidimensionnel, ou canal à houle, nécessaire pour l'étude d'une portion de la partie courante de la digue, cette partie est soumise à une houle incidente normale à son axe.
- modèle tridimensionnel, ou bassin à houle, ce modèle très important pour l'étude des points singuliers, comme le musoir et les coudes. Dans ces derniers plusieurs directions de houles incidentes sont nécessaires à générer.

2- Modèles à fonds mobiles :

Contrairement aux précédents, ces modèles se déplacent par l'action de la houle, provoquant ainsi le transport des sédiments. Ces modèles étudient, en profondeur, les phénomènes hydromécaniques, rappelons cependant, que cette étude est très importante, mais elle ne fait pas l'objet de notre étude.

III- EFFET D'ECHELLE :

Les effets d'échelle sont les conséquences négatives d'une similitude mal choisie, c'est à dire : avoir des échelles géométriques trop petites, cela entraînerait l'apparition de forces supposées négligeables auparavant, comme celles de viscosité et de capillarité, ce qui fausserait l'étude. Pour éviter ces effets lors de l'étude de la modélisation de la houle, il est nécessaire de prendre :

- des hauteurs supérieures à 2.0 centimètres,
- des périodes supérieures à 0.5 secondes.

Pour la modélisation des blocs de la carapace, de la digue, un facteur important apparaît : le nombre de REYNOLDS, caractérisant ainsi le rapport des forces d'inertie sur les forces de gravité :

$$R_{\bullet} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de viscosité}} = \frac{(W/d_{\bullet})^{1/3} \cdot (g.H)^{1/2}}{\gamma} \quad [19]$$

Avec :

W : poids des blocs de la carapace,

d_• : densité spécifique du bloc,

H : hauteur de la houle,

γ : coefficient de viscosité cinématique.

$$\text{avec } \gamma = \mu / d_{\bullet} \quad [20]$$

où μ : coefficient de viscosité dynamique

On dit que la condition de REYNOLDS est vérifiée si $R_{\bullet} > 3 \cdot 10^4$.

Pour le cas du NOUVEAU PORT DE DELLYS, l'échelle choisie est largement satisfaite (on remarque que pour des valeurs minimales choisies :

$$R_{\bullet} \approx 10^{+5}).$$

CONCLUSION SUR LA SIMILITUDE :

Toutes les études de grands ouvrages maritimes doivent essentiellement passer par l'étude sur modèles réduits physiques car on a remarqué que les modèles mathématiques n'offraient souvent pas la précision désirée.

Pour le cas du NOUVEAU PORT DE DELLYS, la similitude est cependant nécessaire pour la modélisation des hauteurs de la houle.

Elle est aussi importante pour la détermination des dimensions des ouvrages intérieurs et extérieurs du port.

Bref, elle joue un rôle primordial pour le dimensionnement de l'ouvrage au laboratoire.

CHAPITRE : 2

LA HOULE : ETUDE THEORIQUE

Introduction sur la houle théorique

I- Phénomène physique de la houle

II- Etude théorique de la houle

1- Types de houles

2- Hypothèses

III- La déformation de la houle

1- La réflexion de la houle

2- La réfraction des lames

3- La diffraction des lames

4- Le déferlement des lames

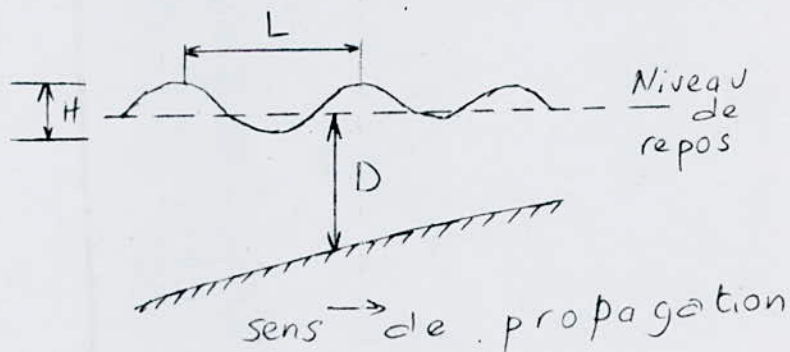
Conclusion

INTRODUCTION SUR LA HOULE THEORIQUE:

La surface libre de la mer présente tout le temps des ondulations, ou vagues, parrallèles et très ressemblantes, et qui avancent vers le rivage. L'ensemble de ces ondulations est appelé "HOULE".

Cette houle a les propriétés suivantes :

- * Une hauteur "H": c'est la dénivellation maximale entre un creux et une crête successifs.
- * Une longueur d'onde "L": c'est la distance qui sépare deux crêtes successives.
- * Une période "T": c'est le temps de passage en un point fixe de deux crêtes successives.
- * Une profondeur "D": c'est la distance du niveau de repos au fond.
- * Une célérité moyenne: $C = L/T$, ou vitesse moyenne.
- * Une combrure: $\gamma = H/L$: rapport de la hauteur et de la longueur d'onde.



I- PHENOMENE PHYSIQUE DE LA HOULE :

• La houle est produite par l'action du vent sur la surface libre de l'eau , formant ainsi des ondulations qui s'accroissent en fonction de la vitesse du vent, elle est aussi fonction de la surface de l'eau exposée au vent.

La propagation de ces ondulations donne naissance à la houle.

- La houle a toujours tendance à avancer perpendiculairement aux courbes de niveau du fond; appelées lignes bathymétriques.
- Il a été constaté que l'axe de symétrie des ondulations se trouve au dessus du niveau de la mer calme (niveau de repos).
- La particule liquide décrit un mouvement de trajectoire fermée :
 - En profondeur infinie : la houle est un phénomène ondulatoire sans transport de masse (selon la théorie du premier ordre).
 - Théoriquement les courbes sont des cercles dont le rayon décroît exponentiellement à partir de la surface de l'eau et ceux-ci pour les mers de très grandes profondeurs , par contre pour les cas des profondeurs finies, les trajectoires sont des ellipses, dont le grand axe décroît exponentiellement.
 - En réalité les trajectoires ne sont pas fermées, le mouvement de la particule liquide est la superposition de deux mouvements l'un orbital et l'autre de translation dû au courant d'entraînement , influant ainsi sur le transport des sédiments.
- Des enregistrements de la houle ont montré que la houle est un phénomène tout à fait irrégulier, ne montrant ainsi pas de grandeurs significatives , d'où l'importance de l'introduction d'études statistiques, en se servant des lois de probabilité pour l'étude de la houle réelle.
- Les phénomènes de : réflexion, réfraction, diffraction, et déferlement seront détaillés ultérieurement.

II- ETUDE THEORIQUE DE LA HOULE :

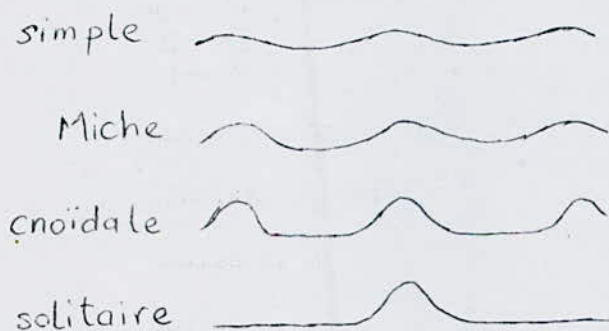
1- Types de houles :

Pour analyser les houles, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques faisant ainsi une représentation du phénomène ondulatoire.

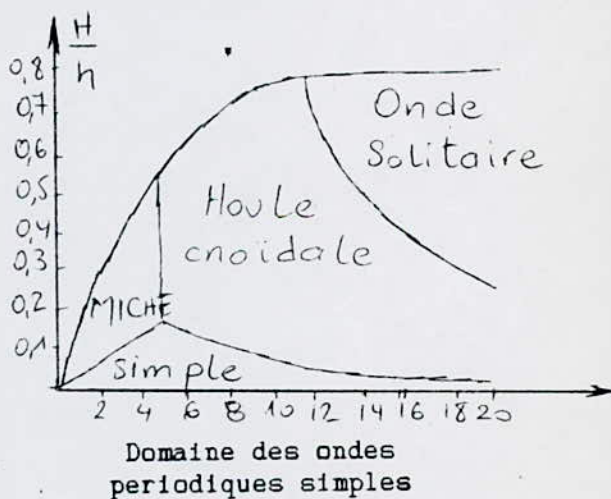
Plusieurs théories peuvent être classées suivant les types d'ondes périodiques simples suivants :

- Houles simples , monochromatiques ou sinusoïdales : proposées par GERSTNER et STOKES.
- Houles de MICHE : proposées par MICHE.
- Houles cnoïdales : proposées par DEVRIES et WIEGEL.
- Ondes solitaires : c'est le cas limite des houles cnoïdales avec des périodes et des longueurs d'onde infinies, elle sont proposées par RUSSEL et BOUSSINESQ.

En nature, la houle peut passer de la houle simple, au large, à l'onde solitaire, avant de déferler sur la côte, et ce, en passant respectivement par la houle cnoïdale avant la houle de MICHE.



Forme de la surface libre de l'eau pour les différents types de houles



Il existe un cas particulier des houles simples, appelé "seiche" ou encore "ressac".

Ce sont des faibles oscillations du plan d'eau dont la période varie d'une minute à une dizaine de minutes, leurs longueurs d'onde sont de plusieurs centaines de mètres, avec de très faibles amplitudes (quelque centimètres).

Ces ondes ne sont pas diffractées et pénètrent profondément dans les

bassins, provoquant ainsi des mouvements de navires qui donnent naissance à de fortes tractions dans les amarres.

La synchronisation des ondes réfléchies avec celles de la houle incidente crée le phénomène de résonance, il peut faire augmenter sérieusement l'amplitude des ondes stationnaires dans le bassin. Pour cela les ports doivent être dimensionnés de façon à éviter ce problème.

2- Hypothèses :

Tout phénomène naturel peut être traduit en équations mathématiques, par introduction de quelques approches simplificatrices. On peut citer comme exemple l'équation de NAVIERS et STOKES qui traduit le phénomène d'écoulement.

Pour notre cas, on aura à faire quelques approches mathématiques, simplifiant ainsi l'étude de la houle théorique vis à vis de la houle réelle .

Pour l'étude de la houle théorique, on a recours aux hypothèses suivantes :

- Assimilation des houles réelles à des houles cylindriques smples, c'est à dire, la propagation à vitesse constante et sans altération de forme de l'onde.
- Fluide parfait , homogène et pesant.
- Le mouvement des particules est circulaire.
- Le problème est plan : * axe des abscisses $\langle X \rangle$ horizontal qui est
l'axe de repos.
* axe des hauteurs $\langle Z \rangle$ vertical ascendant.
- L'écoulement est irrotationnel , d'où l'existence d'un potentiel de vitesse.

- La pression à la surface de l'eau est atmosphérique, et la pression dans l'eau est hydrostatique .
- Il n'existe pas de contraintes agissant sur l'eau (pas de vent).
- Le mouvement des particules liquides est nul en profondeur infinie et en profondeur finie, il est considéré comme parallèle au fond.
- Le fond est imperméable et horizontal ou varie lentement.
- D'après la périodicité des ondulations, on supposera que la côte de l'eau est fonction du terme $[2.\pi. (x/L - t/T)]$

3- Approches mathématiques:

Pour avoir leurs solutions, des auteurs ont supposé que les particules liquides tournaient autour d'un point de coordonnées (x_0, z_0) en décrivant un cercle de rayon R décroissant exponentiellement en profondeur supposée infinie.

D'après les équations de l'hydrodynamique, à savoir

* Equation de la dynamique :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \text{grad } p^* = 0 \quad [A]$$

avec p^* : pression dynamique $p^* = p + \rho.g.h$

* Equation de continuité :

$$\text{div } V = \frac{\delta V_x}{\delta x} + \frac{\delta V_y}{\delta y} + \frac{\delta V_z}{\delta z} = 0 \quad [B]$$

Ainsi que des conditions aux limites :

* Conditions aux limites :

$V = 0$ pour $Z = -d$: profondeur du fond,

$P = 0$ pour $Z = Z_{\text{eau}}$: côte de la surface libre de l'eau.

Quelques auteurs ont proposé des solutions dont voici quelques unes :

a- Solution de GERSTNER : - en profondeur infinie -

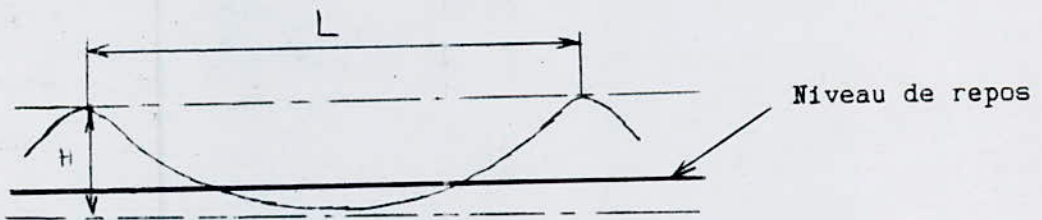
GERSTNER a proposé une solution pour une houle rotationnelle (contrairement aux hypothèses prescrites) et se propageant en profondeur infinie :

$$[1] \quad \begin{cases} x = a - (L/(2\pi)) \exp(-2\pi b/L) \cos 2\pi(t/T - a/L) \\ z = b - (L/(2\pi)) \exp(-2\pi b/L) \sin 2\pi(t/T - a/L) \end{cases}$$

avec : x, z : coordonnées de la particule à l'instant (t)
 a, b : coordonnées des centres des cercles de rotation des particules.

La surface de l'eau à un instant donné est une trochoïde, (dessin explicatif)

Surface libre de l'eau



$$R = (L/2\pi) \exp(-2\pi b/L)$$

Les résultats donnés par GERSTNER sont les suivants:

- La longueur d'onde est : $L = T^2 g / 2\pi$ [2]
- La célérité est $C = L/T = g T / 2\pi = (g L / 2\pi)^{1/2}$ [3]
- La vitesse angulaire de la particule liquide est : $\omega = 2\pi / T$ [4]
- L'énergie totale (cinétique et potentielle) contenue dans une période est : $E = (1/8) \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \cdot (1 - (\pi^2 \cdot H^2 / 2 \cdot L^2))$ [5]

b- Solution de STOCKES ou solution irrotationnelle de première approximation

De plus des deux équations [A] et [B] de base utilisées par GERSTNER , ainsi que les conditions aux limites, STOCKES a supposé que la houle est irrotationnelle, c'est à dire :

$$\text{rot } \vec{V} = \vec{0}$$

Selon la profondeur, deux études ont été faites :

* Profondeur infinie :

Cette solution est moins exacte que celle de GESTNER car elle ne considère pas la surelévation (Δ), entre le niveau moyen et le niveau de repos, soient donc :

$$[6] \quad \begin{cases} x = x_0 - \frac{H}{2} \exp(-2\pi z_0/L) \cos 2\pi(t/T - x_0/L) \\ z = z_0 - \frac{H}{2} \exp(-2\pi z_0/L) \sin 2\pi(t/T - x_0/L) \end{cases}$$

* Profondeur finie :

On suppose que la profondeur D est constante ,

$$[7] \quad \begin{cases} x = x_0 - \frac{H}{2} \frac{\text{Ch}(2\pi(D-z_0)/L)}{\text{Sh}(2\pi(D/L))} \cos 2\pi(t/T - x_0/L) \\ z = z_0 - \frac{H}{2} \frac{\text{Sh}(2\pi(D-z_0)/L)}{\text{Sh}(2\pi(D/L))} \sin 2\pi(t/T - x_0/L) \end{cases}$$

La courbe de la surface libre de l'eau est une trochoïde elliptique, c'est la trajectoire d'un point sur le contour d'une ellipse (ou d'un cercle pour le cas d'une trochoïde circulaire) qui tourne sur une droite horizontale sans glisser.

STOKES a trouvé comme résultats :

- La vitesse orbitale est : $\omega = 2\pi/T$

- Comme la pression à la surface libre de l'eau est considérée comme constante, alors :

$$T^2 = (2\pi L/g) \coth(2\pi D/L) \quad [8]$$

- La célérité moyenne est :

$$C = (gT/2\pi) \th(2\pi D/L) \quad [10]$$

- l'énergie totale contenue dans une période est :

$$E = (1/8) \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \left[1 + \frac{4\pi D/L}{\operatorname{Sh}(4\pi D/L)} \right] \quad [11]$$

On obtient la valeur de la longueur d'onde à partir de la mesure de la période T , qui est facile à déterminer.

La vitesse maximale parallèle au fond et en profondeur elle est :

$$U_m = (\pi/T) \cdot H/\operatorname{Sh}(2\pi D/L) \quad [12]$$

La surelévation sera donc :

$$\Delta = (\pi H^2/4L) \cdot \operatorname{Coth}(2\pi D/L) \quad (\text{en profondeur finie}) \quad [13]$$

Il existe encore d'autres approches mathématiques comme :

- la houle au second ordre d'approximation.
- la houle elliptique etc ...

Ces approches ressemblent beaucoup aux cas cités précédemment (leurs études détaillées ne font pas l'objet de notre étude).

II- LA DEFORMATION DE LA HOULE :

1 - La réflexion de la houle :

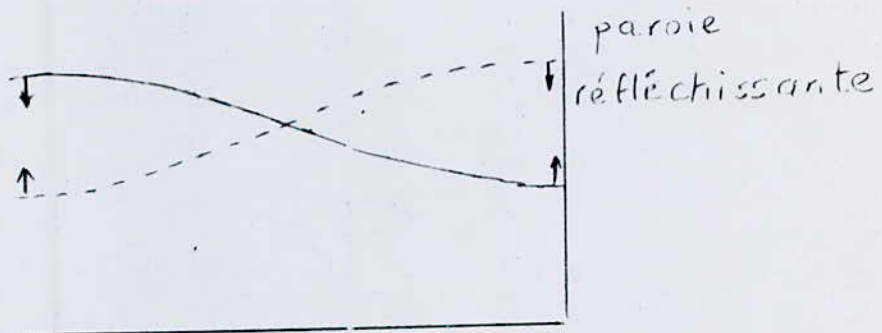
La houle est une onde qui est réfléchiée sur une muraille, sur un talus ou sur une plage, perdant ainsi de son amplitude et de son énergie.

On appelle le coefficient de réflexion ou le pouvoir réfléchissant le rapport suivant :

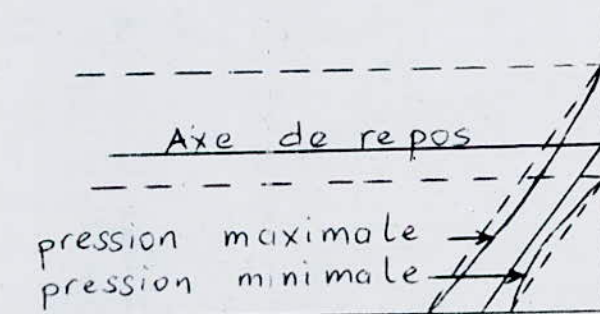
$$\rho = \frac{\text{amplitude de la houle réfléchiée}}{\text{amplitude de la houle incidente}}$$

a- Réflexion totale sur une paroi ou clapotis total :

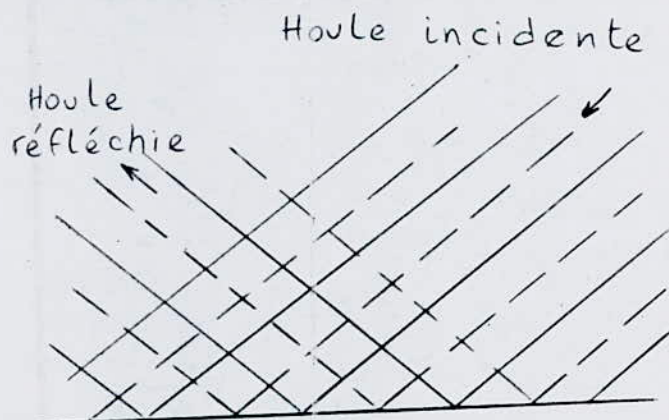
En général , une réflexion est dite totale lorsque $\rho = 0.8$ à 0.9 . Le clapotis total est la superposition de deux houles de mêmes amplitudes, énergies, périodes, longueurs d'onde et vitesses, mais de sens opposés.



Surface libre du clapotis



Pression d'un clapotis sur une muraille verticale



Clapotis gaufré

ou réflexion oblique de la houle sur une paroi verticale

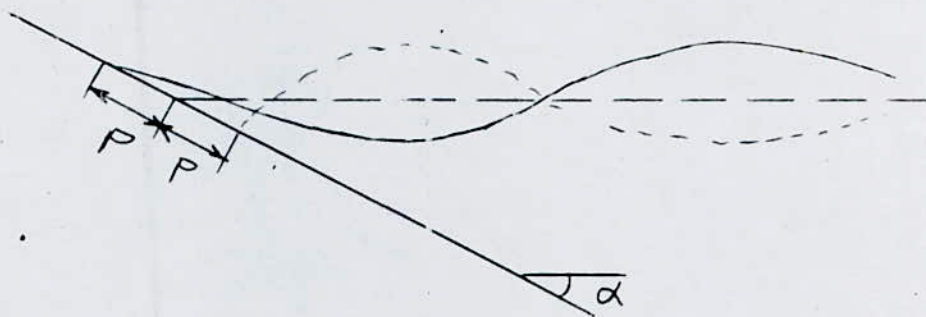
La vitesse maximale sera :

$$V_m = (\pi H / \sin \alpha) \cdot (g / \alpha L)^{1/2} \text{ pour le niveau moyen}$$

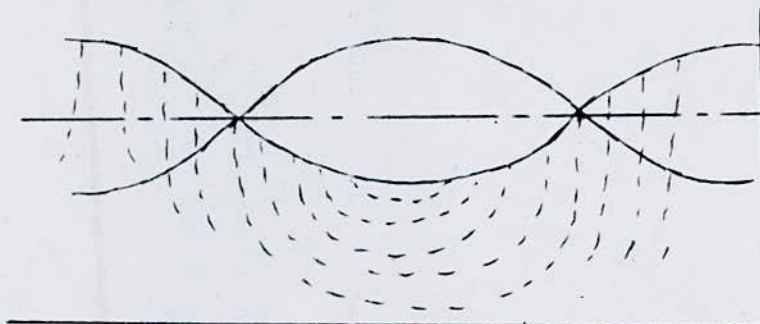
avec $\alpha < 20^\circ$

et la profondeur :

$$d = (H / \sin \alpha) \cdot (\pi / 2 \alpha)^{1/2}$$



Surface libre du clapotis sur fond incliné



Trajectoire d'une particule liquide

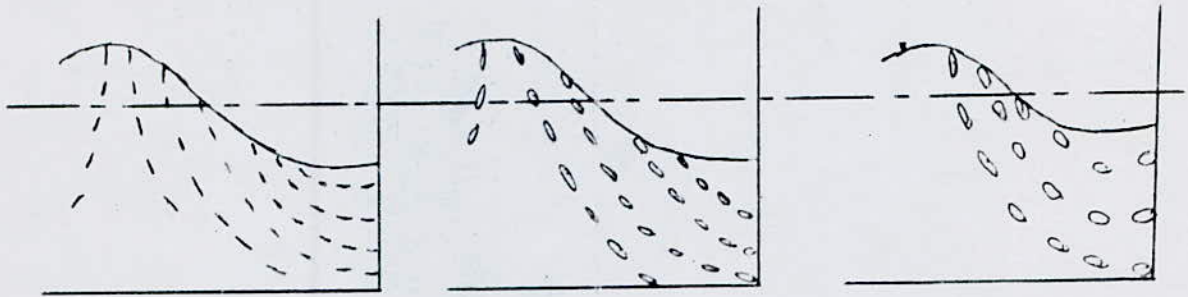
(pour $\rho = 1$)

b- Reflexion partielle sur une paroi ou clapotis partiel :

Le clapotis partiel est la superposition de deux houles de même période, longueur d'onde, et même vitesse se propageant en sens inverse, mais d'amplitude et d'énergie différentes, cette différence d'énergies est dissipée par l'obstacle .

Exemple : paroi verticale :

Les trajectoires des particules sont représentées pour les trois cas suivants :



$\rho = 0.7$

$\rho = 0.5$

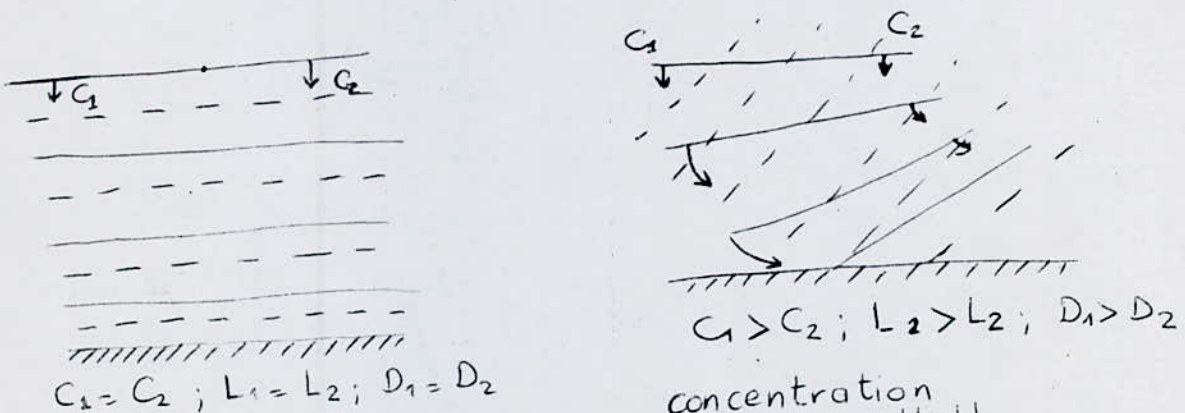
$\rho = 0.4$

Remarque : Pour les talus en sable lisse en pente douce (exemple des plages), la réflexion constatée est presque négligeable.

2 - La réfraction des lames :

On dit qu'il y a réfraction de la houle lorsque les crêtes de cette dernière se déforment progressivement en fonction des fonds.

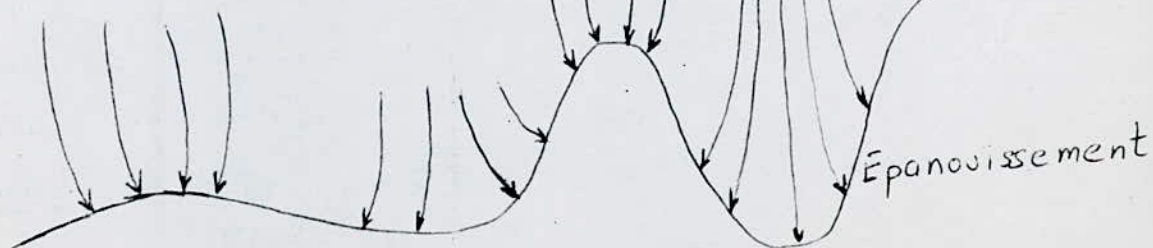
Le plan de vagues est la figure que l'on obtient, à un instant fixe, en reportant la position des crêtes de la houle sur une carte de fond.



$C_1 = C_2 ; L_1 = L_2 ; D_1 = D_2$

$C_1 > C_2 ; L_2 > L_1 ; D_1 > D_2$

concentration



Épanouissement

Conséquences de la réfraction des lames :

concentration ou renforcement	épanouissement ou atténuation
• près des caps	• dans les baies
• sur les crêtes sous-marines	• sur les fosses
• aux débouchés des vallées maritimes	• de chaque côte des débouchés

Elle peut causer l'apparition de houles croisées , lors d'un pivotement autour d'une île, ou d'un haut fond .

Il existe deux méthodes pour déterminer un plan de vagues d'une réfraction, la première est celle de HUYGHENS ou "méthode des cercles de HUYGHENS" la seconde est plus utilisée, elle est appelée "méthode des orthogonales

3 - La diffraction des lames :

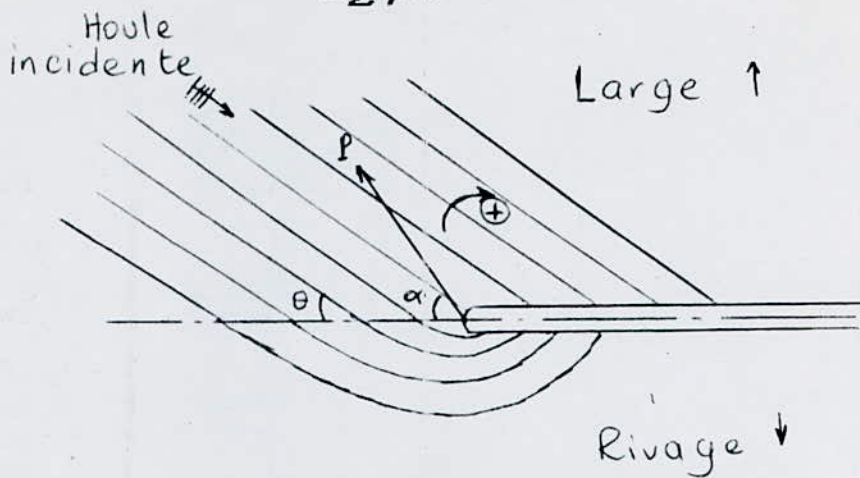
Il y a diffraction de la houle lorsque plusieurs orthogonales aux crêtes passent par un même point (exemple d'une extrémité d'un cap d'une jetée), car la houle tend toujours à contourner l'obstacle trouvé sur sa trajectoire.

La diffraction ne déforme la houle qu'en plan , la vitesse orbitale des particules ne change pas.

Elle a une grande influence sur l'agitation des plans d'eau.

-1- Cas de la jetée semi-infinie :

On considère pour ce cas que la profondeur est constante , la houle est diffractée par une jetée rectiligne non réfléchissante de longueur infinie à partir d'un point, appelé musoir, la jetée est considérée comme semi-infinie :



Diffraction d'une houle par une jetée semi-infinie

La houle diffractée aura pour hauteur :

$$H = H_0 [(F(v) - F(-\infty))^2 + (G(v) - G(-\infty))^2]^{1/2}$$

avec : $v = 2 (2\pi R/L)^{1/2} \sin((\alpha + \theta)/2 + \pi/4)$

où L : longueur d'onde,

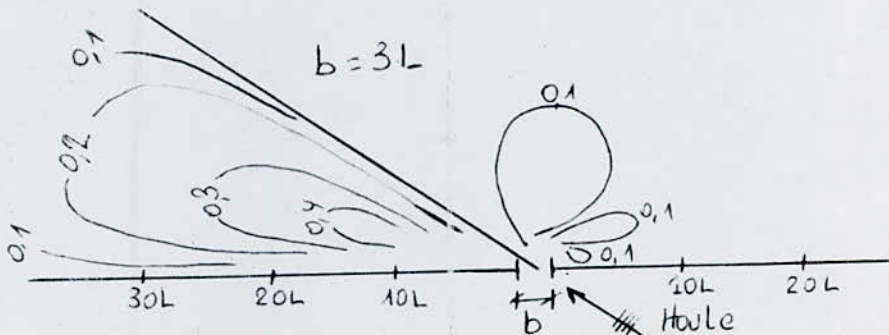
H_0 : Hauteur de la houle incidente,

F et G : Fonctions appelées intégrales de FRESNEL.

En profondeur variable, il n'y a pas eu d'expériences jusqu'à présent.

-2- Cas d'une passe à travers une jetée rectiligne :

Une passe est considérée comme deux jetées semi-infinies, espacées d'une largeur b .



Diffraction de la houle par une passe

Des expériences ont été réalisées, pour une passe de largeur $b = 3.L$, et ont donné les valeurs suivantes de (H/H_0) : rapport de la hauteur de la houle diffractée sur la hauteur de la houle incidente.

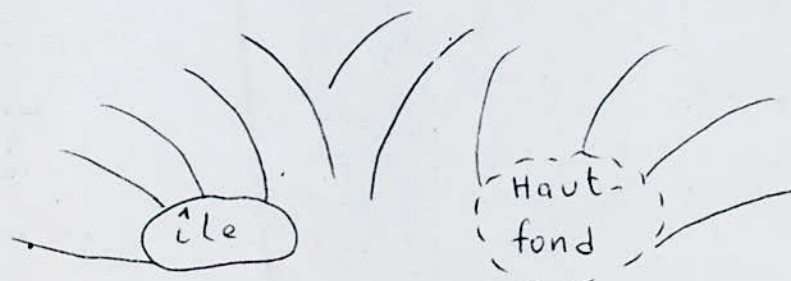
R/L	$\theta = -50^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = +50^\circ$
0.0	0.50	0.50	0.50
0.2	1.07	1.16	0.84
0.4	0.98	1.02	0.99
0.6	0.99	0.90	1.09
0.8	1.03	1.07	1.15
1.0	0.96	1.07	1.165

Remarques :

- * La houle conserve sa hauteur, en grande partie, lorsqu'elle passe par un écran très mince percé d'une série d'ouvertures de petites dimensions par rapport à la longueur d'onde "L" .
- * De même lorsqu'elle passe par un ensemble d'obstacles cylindriques de très faibles équidistances, toujours par rapport à la longueur d'onde "L" .

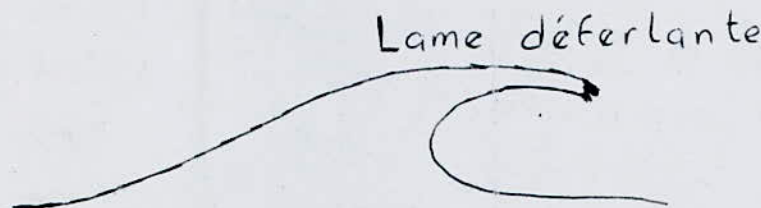
La diffraction peut causer l'apparition de houles croisées, lors d'un pivotement autour d'une île, ou d'un haut-fond .

La concentration de la houle cause des augmentations, d'énergies, donc des majorations locales, (important pour le dimensionnement).



4- Le déferlement des lames :

On appelle déferlement des lames leurs dislocations, et l'apparition de bouillonnements sur la surface antérieure de la lame.



(plunking breaking)

Déferlement:

- en volute,
- caracté
- basculant
- plongeon



(surging breaking)

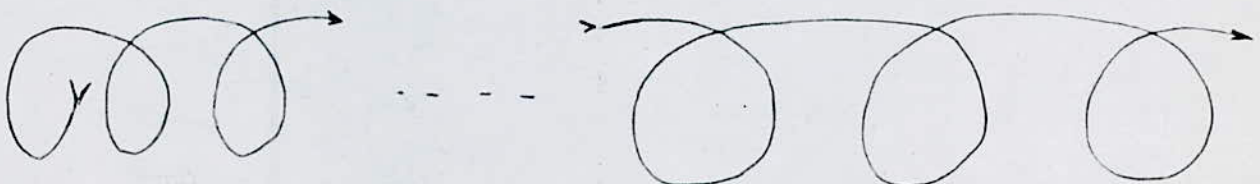
Déferlement:

- à gonflement
- frontal



(spilling breaking)

- à glissement
- à déversement



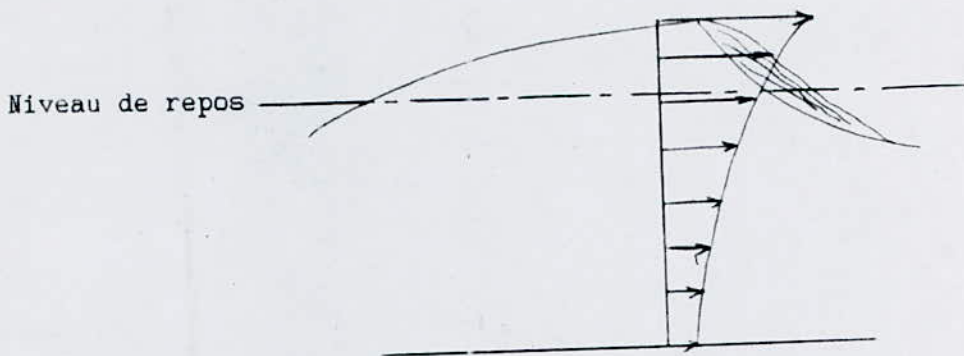
Déformation progressive des trajectoires
des particules sur la surface libre de l'eau

On appelle lignes de rouleau, les parallèles sur lesquelles les lames de la houle se brisent successivement.

La profondeur de déferlement est la profondeur où déferle la houle .

Lors d'un déferlement, la houle libère une bonne partie de son énergie.

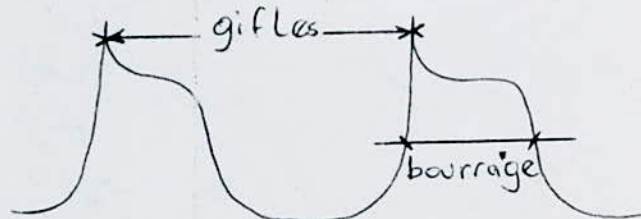
Il y aura déferlement lorsque la vitesse réelle des particules liquides de la partie supérieures de la lame est plus importante que la vitesse apparente de la propagation de l'onde .



Répartition des vitesses dans la lame déferlante

Le déferlement peut provoquer sur une paroi verticale :

- une pointe de pression extrême appelée "gifle",
- une variation de pression moins brutale et plus longue appelée "bourrage":



Variation de pression sur une paroi verticale lors des déferlements

CONCLUSION :

En réalité , la houle théorique ne se produit pas souvent en nature.

Cependant, elle est nécessaire pour l'étude de la houle réelle trouvée naturellement dans les mers et les océans.

Tout le long de sa propagation la houle se déforme et la déformation qui peut arriver à l'intérieur des ports peut être simulé à l'aide modèles mathématiques.

Toute fois, la houle théorique n'offre pas une grande précision, c'est pour cette raison qu'une étude approfondie, d'un enregistrement de houles réelles mesurées du site où l'on projette de réaliser l'ouvrage, est nécessaire.

D'après les mesures effectuées au site de DELLYS, on a remarqué que l'enregistrement obtenu avait une forme très irrégulière, et donc elle n'avait pas beaucoup de ressemblance avec les formes de la houle théorique vue dans ce chapitre.

CHAPITRE : 3

DONNEES REELLES DU PHENOMENE DE LA HOULE

Introduction

I- Mesure de la houle réelle

II- Etude sur un enregistrement

1- Methodes d'analyse statistique des

• enregistrements de houles réelles

a- Methode directe

b- Methode de TUCKEY-DRAPER

c- Methode des deux plus grandes vagues

2- Methodes d'analyse statistique de la houle réelle

a- Definition d'un spectre d'énergie

b- Spectres théoriques

c- Remarques

d- Application au projet du NOUVEAU PORT DE DELLYS

III- Houles de projet

IV- Relation hauteurs significatives et périodes de pointe

Conclusion

INTRODUCTION SUR LA HOULE REELLE :

La houle réelle n'est pas un phénomène ondulatoire simple, car ni les périodes, ni les hauteurs ni les directions ne restent constantes, tout le long de la propagation de l'onde.

Dans la nature, on rencontre un ensemble de houles complexes, appelées "train de vagues", dont l'étude se fait par des lois mathématiques (statistiques).

I- MESURE DE LA HOULE :

La mesure de la houle consiste essentiellement à mesurer les périodes et les hauteurs. Les appareils permettant de mesurer les directions sont encore rares.

En général, on effectue, toutes les trois (3) heures en moyenne, un enregistrement continu de l'ordre de vingt minutes (20 min), car c'est un intervalle de temps où l'on estime que l'état de la mer ne varie pas trop.

Deux principes de mesure de la houle sont distingués :

1- Par déplacement de la surface libre de l'eau :

deux structures existent :

- a- Structure fixe : - en implantant une perche à houle graduée, les graduations sont lues par un observateur.
- à l'aide d'un echo-sondeur : appareil posé sur le fond envoyant des ondes réfléchies sur la surface de l'eau.
- b- Structure mobile : une bouée houlographe (type DATAWELL) flotte sur la surface de l'eau, et munie d'un émetteur radio envoyant à un

récepteur situé au sol. Ce procédé est utilisé par le Laboratoire des Etudes Maritimes, pour la mesure in-situ.

2- Par fluctuation de pression :

Ces fluctuations sont mesurées à l'aide de capteurs de pression qui offrent certains avantages en raison de leurs coûts réduits, pour des profondeurs inférieures à vingt mètres (20 m).

Il sont surtout utilisés pour la mesure des seiches.

II- ETUDE SUR UN ENREGISTREMENT :

Les enregistrements, effectués par la bouée houlographe (type : DATAWELL), peuvent être obtenus suivant deux procédés à l'aide :

- d'un rouleau enregistreur, où est représentée la surface libre de l'eau en fonction du temps, utilisé surtout pour l'analyse statistique de la houle.
- d'un support informatique (bandes, cassettes magnétiques...), où des signaux sont enregistrés, ce procédé est utilisé généralement pour l'analyse spectrale de la houle.

D'après des enregistrements, on a constaté que les hauteurs des vagues se distribuent très sensiblement suivant la loi de RAYLEIGH, ce qui signifie que la probabilité d'occurrence de la hauteur H, dans l'intervalle [H, H+dH] est :

$$f(H) = \frac{H}{4 m_0} \exp \left\{ - \frac{H^2}{8 m_0} \right\} \quad [1]$$

f(H) : est la fonction densité de probabilité de la loi de RAYLEIGH,

H : hauteur de la lame,

m₀ : moment d'ordre 0, représenté par la surface du spectre.

Par conséquent, la probabilité qu'une hauteur d'une vague H, dépasse une

hauteur H_0 est :

$$P(H > H_0) = \int_{H_0}^{\infty} f(H) dH = \exp \left[- \frac{H^2}{8 m_0} \right] \quad [2]$$

$P(H > H_0)$: est la fonction de répartition de la loi de RAYLEIGH, c'est aussi la fonction densité de probabilité de la loi de GAUSS à un coefficient près.

On peut déterminer les hauteurs particulières, à savoir :

• Hauteur significative :

$$H_{1/3} = \int_{H_0}^{\infty} 3 H \cdot P(H) \cdot dH = 4 (m_0)^{1/2} \quad [3]$$

H_0 est obtenue moyennant l'intégrale suivante :

$$\int_{H_0}^{\infty} P(H) dH = 1/3 \quad [4]$$

• Hauteur moyenne :

$$H_{moy} = \int_{H_0}^{\infty} H \cdot P(H) \cdot dH = (2 \cdot \pi \cdot m_0)^{1/2} \quad [5]$$

• Hauteur de probabilité : $P(H > H_0) = 1/n$

$$H_{1/n} = \frac{\int_{H_0}^{\infty} H \cdot P(H) \cdot dH}{P(H > H_0)} \quad [6]$$

Le traitement des enregistrements peut se faire de deux manières :

méthode d'analyse statistique

méthode d'analyse spectrale

1- Méthodes d'analyse statistique des enregistrements de houles réelles:

La houle est un phénomène naturel aléatoire, pour faire son étude il est nécessaire de recueillir des données statistiques sur place par des enregistrements à l'aide des houlographes. Plusieurs méthodes de traitement de ces données existent :

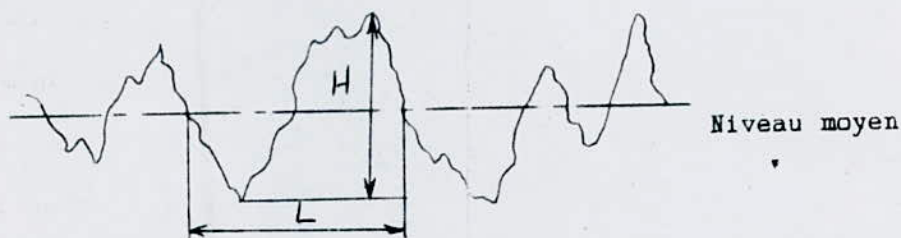
méthode directe : utilisée pour les estimations précises,

méthode de TUCKEY-DRAPER : utilisée pour une estimation
préliminaire,

méthode des deux plus grandes vagues : idem.

a) Méthode directe ou méthode d'analyse vague par vague :

La hauteur d'une lame est la distance verticale entre une crête et un creux qui la précède immédiatement. Une lame sera définie par la méthode du passage par le zéro par valeurs supérieures (zero crossing method ou Z.C.M.) qui est le double passage successif par le zéro (niveau moyen de l'enregistrement) en valeurs croissantes.



Après l'obtention d'un enregistrement composé de hauteurs des lames ainsi que de leurs périodes correspondantes, on classe ces données de deux manières :

1^{er} classement : après avoir classé les hauteurs par valeurs décroissantes on détermine :

H_{max} , T_{Hmax} : la hauteur maximale des vagues et sa période correspondante,

$H_{\text{moy}}, T_{\text{Hmoy}}$: la hauteur moyenne des vagues et sa période correspondante,

$H_{1/3}, T_{H1/3}$: la hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues et sa période correspondante, la hauteur $H_{1/3}$ est appelée hauteur significative,

$H_{1/10}, T_{H1/10}$: la hauteur moyenne du dixième supérieur des vagues et sa période correspondante.

2^{ème} classement : de même que pour le premier classement, on

détermine les périodes et les hauteurs correspondantes :

$T_{\text{max}}, H_{T_{\text{max}}}$: la période maximale des vagues et sa hauteur correspondante,

$T_{\text{moy}}, H_{T_{\text{moy}}}$: la période moyenne des vagues et sa hauteur correspondante,

$T_{1/3}, H_{T1/3}$: la période moyenne du tiers supérieur et sa hauteur correspondante,

$T_{1/10}, H_{T1/10}$: la période moyenne du dixième supérieur et sa hauteur correspondante.

b) Méthode de TUCKEY-DRAPER :

La hauteur significative ($H_{1/3}$) d'une houle est déterminée par un calcul simple à l'aide de la formule suivante :

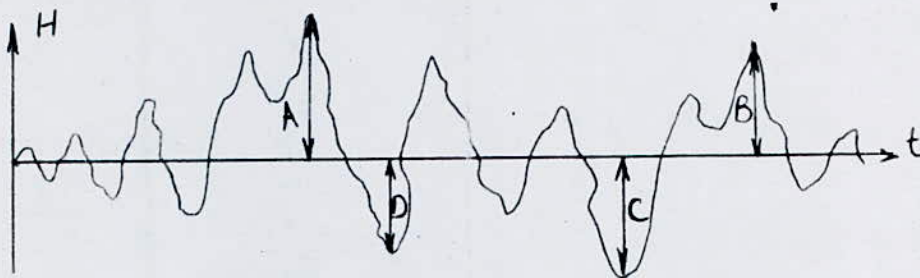
$$H_{1/3} = 2 (\alpha^{0.5} + \beta^{0.5}) \quad [7]$$

en considérant un enregistrement d'un nombre (N_z) vagues, dont (A) et (B) sont les deux plus grandes amplitudes positives, (C) et (D) sont les deux plus grandes amplitudes négatives des vagues.

Soit $\gamma = \ln(N_z)$, les valeurs de (α) et (β) sont obtenues directement des expressions suivantes :

$$\alpha = \frac{(A + C)^2}{8 \gamma (1 + (0.289/\gamma) - (0.241/\gamma^2))^2} \quad [8]$$

$$\beta = \frac{(B + D)^2}{8 \gamma (1 - (0.021/\gamma) - (0.103/\gamma^2))^2} \quad [9]$$



c) Méthode des deux plus grandes vagues :

Soit un enregistrement d'un nombre (N) vagues, dont (H₁) et (H₂) sont les deux plus grandes hauteurs positives des vagues.

La détermination de la hauteur significative est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$H_m = 4.0039 ((m_{01} + m_{02})/2)^{0.5} \quad [10]$$

Avec (m₀₁) et (m₀₂) sont des valeurs obtenues, en supposant l'hypothèse mentionnée au début, à savoir : les échantillons se distribuent suivant la loi de probabilité de RAYLEIGH.

$$P(H_1) = 1/N = \exp(-H_1^2 / (8m_{01})) \quad [11]$$

$$P(H_2) = 2/N = \exp(-H_2^2 / (8m_{02})) \quad [12]$$

On aura donc :

$$m_{01} = H_1^2 / (8 \ln(N)) \quad [13]$$

$$m_{02} = H_2^2 / (8 \ln(N/2)) \quad [14]$$

2- Méthodes d'analyse spectrale de la houle réelle :

a) Définition d'un spectre d'énergie :

Un spectre d'énergie est la courbe de la répartition de l'énergie de la houle en fonction des fréquences. [15]

(la fréquence est l'inverse de la période).

La génération de la houle à l'aide d'un spectre d'énergie nécessite une bonne connaissance du climat de la houle, cependant les avantages de cette génération sont nombreux, on cite :

- prise en compte des fréquences avec leurs niveaux d'énergie correspondants,
- positions relatives des fréquences de résonance,
- calcul des fréquences moyennes :

$$T_1 = 2\pi (m_0/m_2)^{1/2} \quad \text{et} \quad T_2 = 2\pi (m_2/m_4)^{1/2}$$

- connaissance de la loi de distribution.

b) Spectres théoriques :

Les formes des spectres $S(f)$, obtenues lors des analyses, sont peu nombreuses, les plus importants spectres sont :

• Spectre de PIERSON - MOSKOWITZ (1964) :

Ce spectre a été proposé par PIERSON et MOSKOWITZ, en 1964, et obtenu pour un enregistrement d'une houle en Atlantique du Nord, soit :

$$S(f) = A f^{-5} \exp(-1.25 (f/f_p)^{-4}) \quad [16]$$

$$\text{avec} \quad A = 0.315 H_m^2 f_p^{-4} \quad [17]$$

où H_m : hauteur significative, en (m)

f : fréquence, en (Hz)

f_p : fréquence de pointe, en (Hz)

En intégrant, on peut obtenir les moments d'ordres (0) et (2) :

$$m_0 = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) df = (A/5) f_p^{-4} \quad [17]$$

$$m_2 = \int_{-\infty}^{\infty} f^2 S(f) df = (A/2) (\pi/5)^{1/2} f_p^{-2} \quad [18]$$

• Spectre de J.O.N.S.W.A.P. (1969) :

J.O.N.S.W.A.P. : Joint North Sea Ways Project.

Ce spectre a été proposé dans le cadre du projet "J.O.N.S.W.A.P." en 1969, en Mer du Nord.

Soient trois (3) constantes dont dépend ce spectre : τ , σ_a et σ_b , le spectre sera :

$$S(f) = A f^{-5} \exp(-1.25 (f/f_p)^{-4}) \tau \exp(-(f-f_p)^2 / (2\sigma^2 f_p^2)) \quad [19]$$

où $\sigma = \sigma_a$ pour $f < f_p$

et $\sigma = \sigma_b$ pour $f > f_p$

K.HASSELMAN a proposé en première approximation, en 1973 :

$$\tau = 3.3$$

$$\sigma_a = 0.07$$

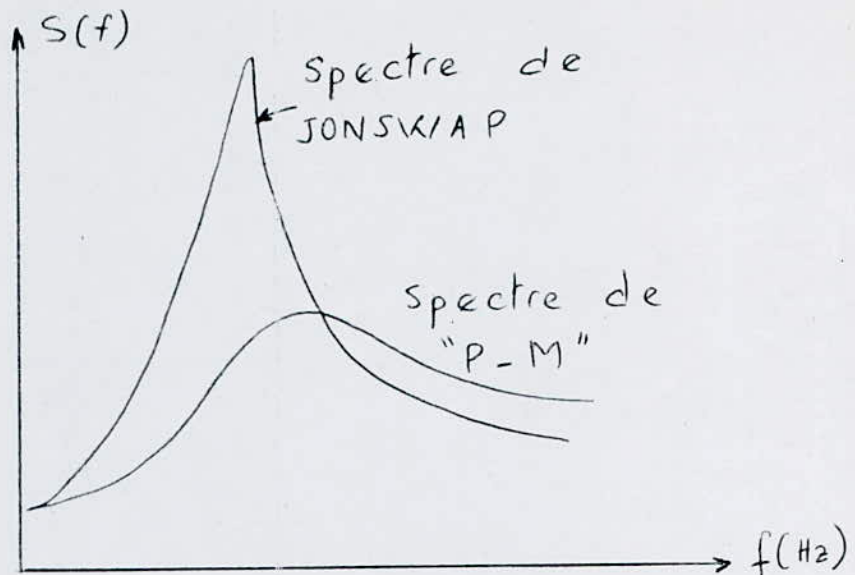
$$\sigma_b = 0.09$$

c) Remarques :

On remarque que le spectre de PIERSON - MOSKOWITZ est un cas particulier du spectre de J.O.N.S.W.A.P.

Pour $\tau = 1$, ils s'égalisent .

(voir graphe montrant la comparaison)



Comparaison entre les spectres de
J.O.N.S.W.A.P. et PIERSON-MOSKOWITZ

Le degré d'aplatissement du spectre de J.O.N.S.W.A.P. dépend de la constante (γ).

On remarque également, d'après un spectre quelconque, que la densité spectrale augmente rapidement, pour les basses fréquences, et diminue lentement pour les hautes fréquences.

Ce phénomène est tout à fait logique, car il a une grande relation avec la formation des vagues; au début de la tempête, le vent agit sur la surface de l'eau en formant des petites vagues, de faibles hauteurs et périodes, donc les vagues jeunes se trouvent dans la bande des hautes fréquences.

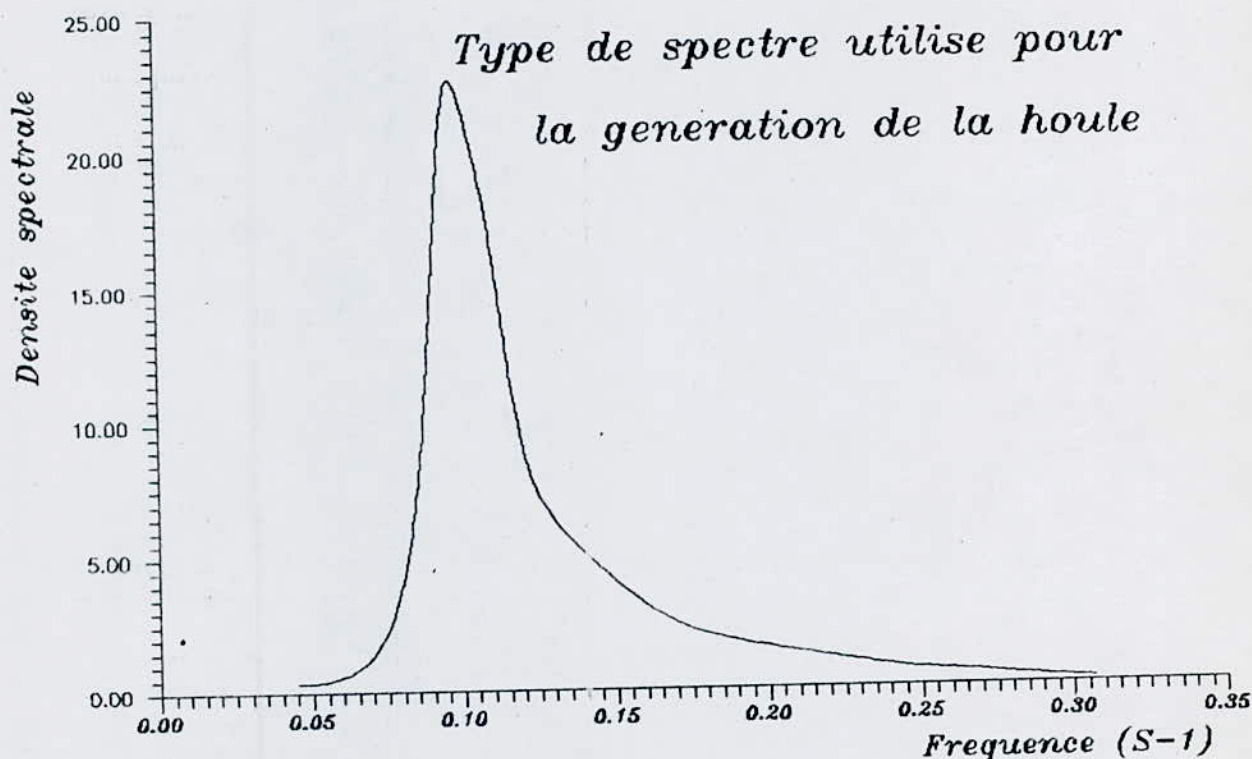
Contrairement au cas des basses fréquences, les vagues augmentent de hauteurs et de périodes. Les pics dans les spectres signifient un groupement d'énergie.

d) Application au projet du NOUVEAU PORT DE DELLYS :

Dans le cadre de l'étude du NOUVEAU PORT DE DELLYS, la distribution spectrale utilisée est celle enregistrée au large DES ISSERS (Wilaya de BOUMERDES à l'est d'ALGER).

on a constaté que le spectre obtenu avait une grande ressemblance avec le spectre de J.O.N.S.W.A.P.

(voir figure) :



III- HOULES DE PROJET :

Lors du dimensionnement d'un port, il est nécessaire de connaître les houles de projet. Le principe de la détermination de ces dernières consiste à donner des périodes de retour assez importantes, de l'ordre de quelques années, avec des temps cumulés de la durée de la tempête, de l'ordre de quelques heures, ou bien des probabilités d'occurrence assez faibles.

Soit, par exemple, une période de retour de (R) années pour une houle de hauteur $H(R)$, cette hauteur est dépassée pendant (r) heures cumulées.

Prenons : $P = 3 \text{ h} / 10 \text{ ans}$ c'est équivalent à $P = 3.4 \cdot 10^{-3} \%$

$$\text{car : } P = 3 \text{ h} / (10.24.365 \text{ h}) = 3.4 \cdot 10^{-5}$$

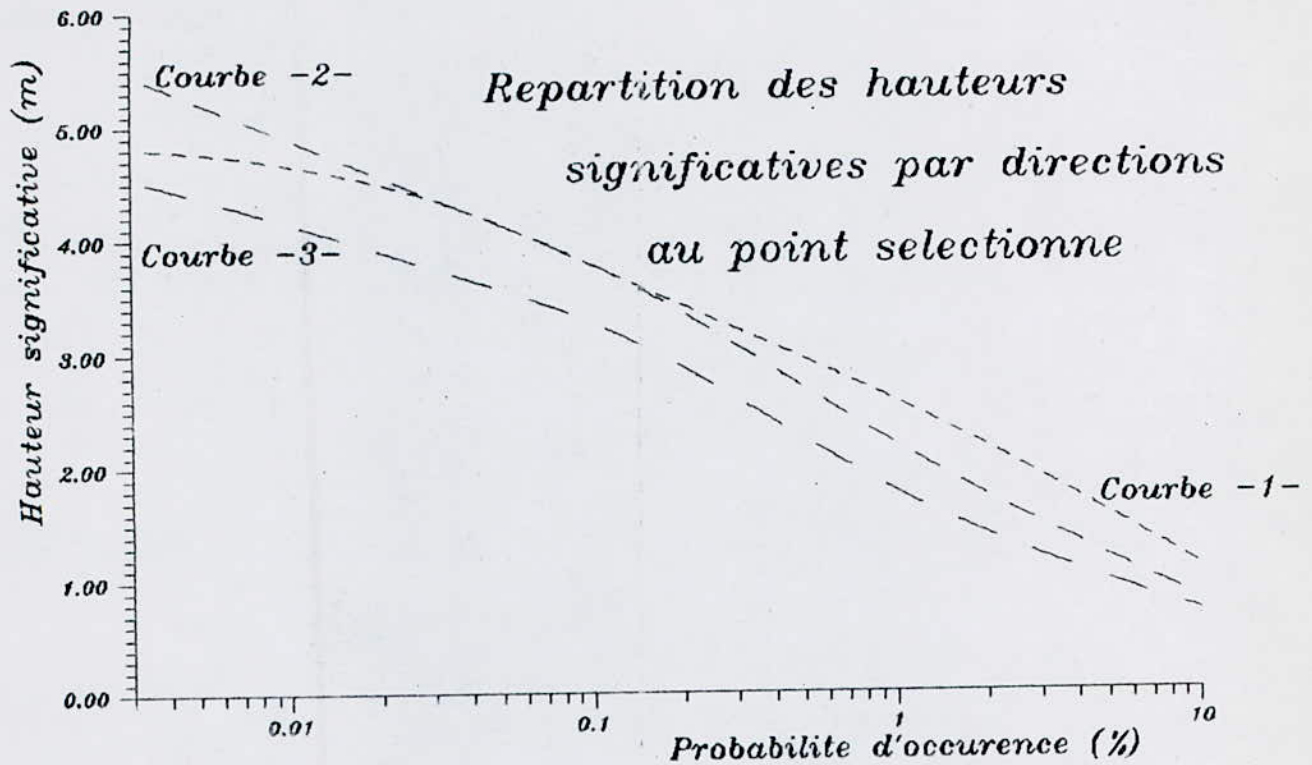
Une fois la période ainsi que la durée cumulée de la tempête choisies, la hauteur de projet cherchée est obtenue par la lecture de la courbe d'interpolation sur le graphe : $H = f(T)$.

L'équation de ce graphe est supposée : $H = H_0 \cdot \text{Log}(P)$ (Loi de LARRAS)

La distribution des hauteurs significatives H_s de la houle par direction en un point sélectionné à l'isobathe (- 23 m) près du port est donné dans le tableau suivant :

Direction	Probabilité d'occurrence (P)				
moyenne	$3.4 \cdot 10^{-3} \%$	$3.4 \cdot 10^{-2} \%$	$1.14 \cdot 10^{-1} \%$	1.14 %	10 %
au large	(3h/10ans)	(3h/an)	(10h/an)	(3h/10ans)	/
270°	0.8	0.7	0.5	0.3	/
300°	2.2	1.9	1.6	1.3	0.4
330°	4.5	3.7	3.2	1.7	0.7
0°	4.8	4.3	3.7	2.5	1.1
30°	5.4	4.3	3.7	2.1	0.8
55°	2.5	2.2	2.0	1.4	/

Les résultats sont représentés dans la figure suivante : $H_s = f(P)$, où l'on peut conclure que la direction (Nord-Nord-Est, N-N-E), soit (30°) est la direction la plus dangereuse.



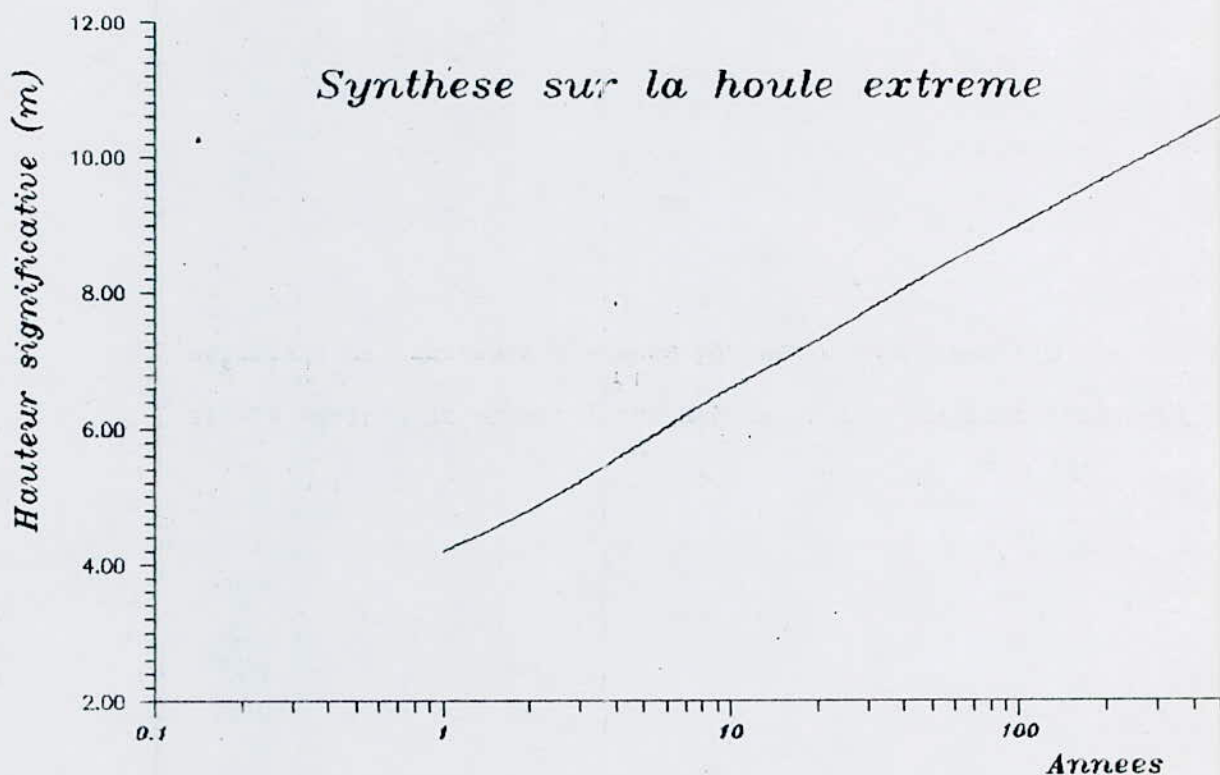
Courbe -1- : direction 0 deg.

Courbe -2- : direction 30 deg.

Courbe -3- : direction 330 deg.

Pour le cas du projet du Nouveau Port de DELLYS, des houles extremes au point considere(à -23 m), sont mentionnés dans le tableau ci-apres :

Houles	Hauteurs significatives H_n (m)
annuelle : H_1	4.2
bienale : H_2	4.8
décennale : H_{10}	6.6
vingtennale : H_{20}	7.3
cinquantennale : H_{50}	8.3
centennale : H_{100}	9.0
bientennale : H_{200}	9.7
cincentennale : H_{500}	10.6



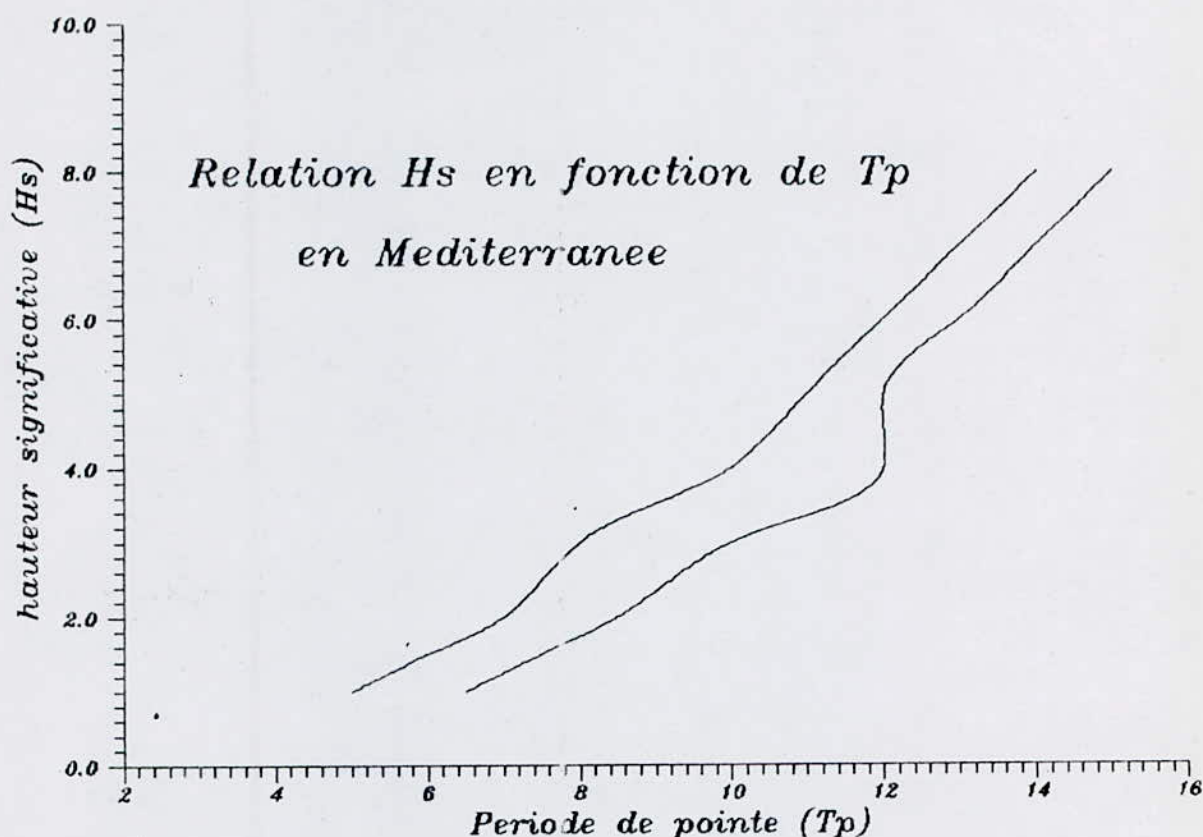
**V- RELATION HAUTEURS SIGNIFICATIVES
ET PERIODES DE POINTE :**

Il existe une grande relation entre la hauteur de lame (H_s) et la période de pointe (T_p), sachant que :

H_s : est la hauteur significative de la houle (moyenne du tiers supérieur des hauteurs classées par ordre décroissant),

T_p : est la période de pointe (correspondante à un maximum d'énergie de la houle).

Le graphe suivant, montre la relation entre ces deux (2) paramètres principaux, pour le cas de la méditerranée :



CONCLUSION SUR LA HOULE REELLE :

Malgré la complexité du phénomène de la houle, on a pu l'étudier et par conséquent modéliser des tempêtes réelles au laboratoire.

Pour cela, la houle a été mesurée à l'aide d'appareils simples, comme la bouée (du type DATAWELL), et traitée, par une méthode statistique ou spectrale.

La méthode spectrale permet la modélisation du phénomène de la houle, par contre la méthode statistique est très importante pour déterminer les houles extrêmes.

Cependant, lors des essais, on pourra générer, en modèle, des houles de différentes hauteurs significatives, pouvant correspondre à des hauteurs de projet, en nature, suivant un spectre d'énergie propre au site.

CHAPITRE 4

PHASE DE L'ETUDE

- I- Introduction sur le Nouveau Port de Dellys
 - II- Données nécessaires pour les essais au laboratoire
 - III- Echelles utilisées
 - IV- Types de houles générées et technique de mesure
 - V- Essais effectués sur modèles
 - A- Essai d'agitation (étude théorique)
 - B- Essai de stabilité
 - 1- Introduction
 - 2- Types de brise-lames
 - 3- Predimensionnement de la carapace
 - 4- Predimensionnement de la butée
 - 5- Predimensionnement des sous-couches et du noyau
 - 6- Construction du modèle de stabilité en bidimensionnel
 - 7- Types d'observations effectuées pour les essais de stabilité
 - 8- Déroulement des essais au laboratoire
- Profil I
- Profil II
- Profil IIA, IIB et IIC
- Profil III

I- INTRODUCTION SUR LE NOUVEAU PORT :

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

- De stationner en attendant de partir pour un autre voyage,
- D'effectuer des opérations commerciales d'embarquement et de Débarquement des passagers et marchandises, de soutage et d'avitaillement,
- Enfin d'être construits, entretenus, et réparés." (voir Travaux maritimes de Chapon t:1)

D'après les missions des ports, on peut distinguer éventuellement :

- les ports militaires : dont la dimension de la rade est importante,
- les ports commerciaux : qui peuvent comporter des installations pour la construction et la réparation navale,
- ports de travaux : nécessaires pour la protection des engins flottants utilisés pour les grands travaux,
- ports de pêche et de plaisance : ces derniers sont de faible importance

En général, un même port peut remplir la plupart de ces fonctions sinon la totalité.

Le Nouveau Port de Dellys est du type commercial, il est situé à environ 2.50 km à l'Est du port de Dellys actuel.

Une étude a été menée sur la base d'un trafic de 1.500.000 tonnes/an pour les types de marchandises suivantes :

- Céréale - Produits agricoles - Bois - Matériaux de construction et produits métallurgiques - Produits chimiques - Marchandises diverses...

Et pour les types de navires suivants :

- Navires pour les conteneurs et les céréales - RO RO - Cargo Général.

La figure ci-après représente la solution d'une seule variante.

II- DONNEES NECESSAIRES POUR LES ESSAIS AU LABORATOIRE :

Quelques paramètres sont importants à connaître pour l'étude du projet en modèle réduit physique.

Certains sont directement obtenus des lectures faites sur le site comme :

- Une topographie exacte des côtes,
- Une bathymétrie précise des fonds marins,
- Les profondeurs du bassin et du chenal d'accès,
- Les structures et les plans des terre-pleins ainsi que les ouvrages de protection,
- Un climat de la houle.

D'autres paramètres sont obtenus à partir d'une étude préliminaire, qui a été faite par l'Institut Danois d'Hydraulique (I.D.H.). Elle a permis d'obtenir des données supplémentaires, en plus des estimations des houles extrêmes mentionnées au chapitre précédent, ces données sont :

- Niveaux d'eau : Les niveaux d'eau sont compris entre -0.30 et +0.70 m ZH, pour l'étude on prendra (± 0.00 et + 1.00 m) ZH pour les essais.
- Réfraction de la houle : Un calcul par modèle mathématique a montré que la direction (Nord-Nord-Est) est celle où la houle n'est presque pas réfractée, le coefficient de réfraction est de 0.92 à 0.96.
- Analyse des seiches : L'étude a montré que les seiches doivent être prises en considération pour les essais d'agitation (rappelons que l'agitation ne fait pas l'objet de notre étude).

Une autre étude a permis, à l'aide de sondages, de déterminer la structure du sol, elle a montré en première couche, du sable ayant une épaisseur croissante, en seconde le grès sous forme de blocs et en dernier les schistes altérés et compacts.

III- ECHELLES DES MODELES D'AGITATION ET DE STABILITE :

En général, une échelle est déterminée de façon que toutes les conditions se trouvant en nature soient réalisées en modèle.

Une échelle trop grande est difficile à réaliser et coûte chère, cependant une autre très petite cause des problèmes comme les effets d'échelle, c'est à dire que les forces de viscosité ne sont plus négligeables, et la similitude de base en hydraulique maritime, celle de REECH-FROUDE, ne peut plus être appliquée.

On utilisera des valeurs minimales comprises entre :

- 2 et 5 cm pour les hauteurs des vagues,
- 0.5 et 0.7 sec pour leurs périodes.

En général, les échelles des modèles tridimensionnels sont comprises entre $(1/60^{ème})$ et $(1/150^{ème})$, pour les modèles bidimensionnels les échelles sont souvent plus grandes pour permettre une meilleure étude de la stabilité. Elles dépendent toutes des conditions aux limites fixées par les calculs (de réfraction par exemple).

Il faut toujours éviter les phénomènes parasites comme la réflexion de la houle incidente sur les parois limitant le modèle.

Pour l'étude du Nouveau Port de Dellys deux (2) échelles ont été prises :

- 1:49.10 : pour les essais de stabilité en modèle bidimensionnel,
- 1:100 : pour les essais de stabilité en modèle tridimensionnel
- (cette partie ne fait pas l'objet de notre étude).

Ces deux échelles correspondent aux conditions de similitude :

- géométrique (dimensions des modèles),
- cinématique (vitesses et périodes),
- dynamique (effets de viscosité négligeables).

Les principales forces prises en considération sont celles de pesanteur et d'inertie, celles de viscosité et de capillarité sont alors négligeables.

A partir de l'échelle géométrique (λ) on détermine les autres échelles :

Echelles	Essais de stabilité
des longueurs : λ	49.10
des surfaces : λ^2	2410.81
des volumes : λ^3	118 370.77
des vitesses : $\lambda^{1/2}$	7.01
des temps : $\lambda^{1/2}$	7.01
des forces : λ^3	118 370.77
des débits : $\lambda^{5/2}$	16 892.88
des pressions : λ	49.10
des énergies : λ^4	5 812 004.86

IV- TYPES DE HOULES GENEREES ET TECHNIQUE DE MESURE :

Deux types de houles peuvent être générées dans les modèles réduits :

- houles régulières : ce type de houle est généré dans les bassins à houle pour la détermination des périodes de résonance ainsi que l'excitation des bassins. Ces houles sont, en général, générées en modèle tridimensionnel pour les essais d'agitation.
- houles irrégulières : elles sont générées avec un train d'ondes ou un spectre d'énergie bien spécifié.

Pour l'étude du Nouveau Port de Dellys, le spectre a été obtenu à partir d'enregistrements effectués au large des ISSERS, dans la Willaya de BOUMERDES.

Elles sont donc générées dans les deux modèles.

La houle, en arrivant du large, vers les ouvrages estuaires se déforme par réflexion, réfraction, diffraction ou déferlement. Cette déformation cause des variations des hauteurs des vagues, dont la mesure est faite par des sondes placées dans le modèle, à l'intérieur et à l'extérieur du port. Chaque sonde, dont le principe est basé sur la mesure de la conductivité entre deux électrodes, permet de définir les paramètres principaux de la houle (hauteurs et périodes) en utilisant d'autres appareils.

V- ESSAIS EFFECTUES SUR MODELES :

A- Essai d'agitation : (étude théorique)

Le but des essais d'agitation consiste à déterminer les conditions d'exploitation des ports. Cette dernière peut être obtenue par étude des fluctuations de la surface libre de l'eau, à l'intérieur du port, en fonction des houles extrêmes.

L'agitation vise donc à étudier :

- L'optimisation du plan masse du port :
 - une implantation des brise-lames,
 - une détermination de la largeur de la passe d'entrée,
 - une définition exacte du chenal d'accès.
- La meilleure définition de la géométrie des quais et des appontements :
 - une bonne orientation des quais et des appontements,
 - une définition du type de structure des quais (réfléchissante ou absorbante).
- L'amélioration du système d'amarrage :
 - une meilleure position des bollards et des défenses,
 - une évaluation du système d'amarrage suivant la position et le nombre d'amarres le composant.

Toute fois il existe plusieurs types de ports de différentes importances, et où il est nécessaire de faire des mesures d'agitation sur des bassins à houles. Ces mesures sont :

- des mesures d'agitation au niveau de la passe d'entrée et au niveau des quais, ainsi que les mesures des périodes de résonance pour les ports de moindre importance comme ceux de la pêche.
- en plus des mesures citées précédemment, une étude détaillée des navires amarrés aux quais est imposée pour les ports plus importants, exemple les ports commerciaux.

Ces conditions d'exploitation peuvent être obtenues en faisant la corrélation entre deux (2) graphes décrivant :

- Le climat de la houle, c'est à dire :

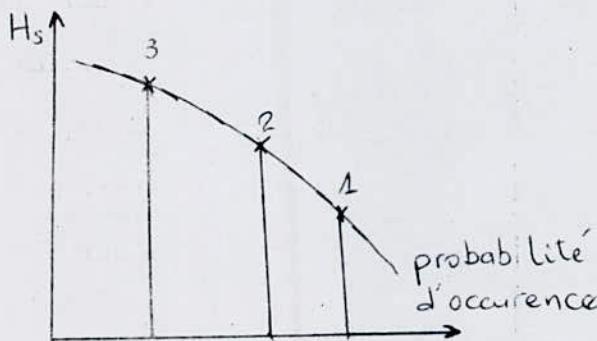
$$H_s = Fct \text{ (probabilité d'occurrence)}$$

- Les conditions de dimensionnement de l'ouvrage, soit :

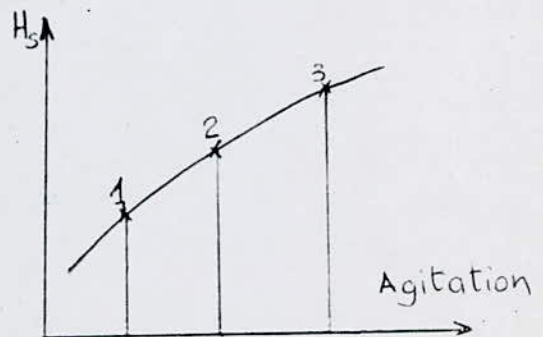
$$H_s = Fct \text{ (agitation)}$$

De ces deux (2) graphes, on trace un troisième donnant ainsi la description statistique de l'agitation, à savoir :

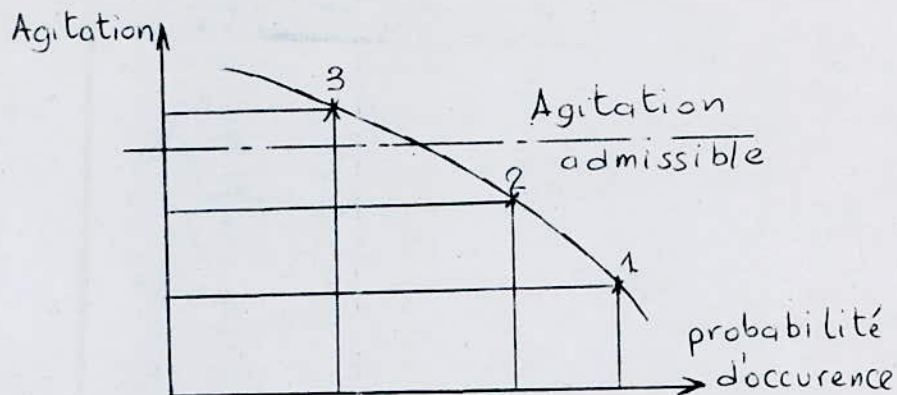
$$\text{Agitation} = Fct \text{ (probabilité d'occurrence)}$$



"Statistique de la houle"



"Résultats des essais"



"Description statistique de la houle"

Ce dernier graphe montre le seuil critique appelé agitation admissible, préalablement imposé.

Après avoir obtenu les résultats des essais d'agitation, on doit vérifier que le seuil critique (ou l'agitation admissible) n'est pas dépassé.

Dans le cas d'un dépassement de ce seuil, des améliorations devront être faites en respectant le critère économique.

B- Essai de stabilité :

1- Introduction :

Le but de ces essais est d'obtenir la stabilité optimale de la digue principale du Nouveau Port de Dellys.

Cette étude a nécessité un modèle réduit physique bidimensionnel, sur canal à houle, à l'échelle géométrique (1:49.10).

Les premiers essais consistent en l'augmentation des hauteurs de la houle par paliers pour des raisons de simulation, car le tassement de la digue doit être progressif, en commençant par une houle ajustée à 50 % de la houle critique, appelée houle de projet, jusqu'à cette dernière pour l'étude de la stabilité.

Un autre palier est ajouté, pour permettre la visualisation des dégâts occasionnées, éventuellement, par une houle qui dépasserait la houle de projet, comme la houle centennale par exemple.

La durée des essais est de 17 min au laboratoire, correspondante à une durée de 2 h en nature, pour les essais préliminaires. D'autres essais de durée 1 h 25 min à l'échelle du laboratoire, soit l'équivalent de 10 h en nature, sont nécessaires pour l'étude du phénomène d'endurance, c'est à dire l'influence de la durée de la tempête sur la stabilité de l'ouvrage. Des mesures de franchissements sont importantes pour la détermination de la quantité d'eau passée au-dessus du couronnement du brise-lames.

Un débit linéaire (par unité de longueur) (Q_{ad}) est admissible pour une houle annuelle, ce dernier est :

$$Q_{ad} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec/ml}$$

Remarques : Il existe d'autres essais importants, surtout pour les entreprises de réalisation des ports, comme :

a- Essais de phasage des travaux des brise-lames :

Ils permettent la limitation des risques de dommage des brise-lames lors de la construction.

L'entreprise est obligée de réaliser respectivement :

- * Le noyau : composé d'enrochements de très faible stabilité,
- * Les filtres et la butée : construits en enrochements moyens, ils sont stables pour les houles de faible importance,
- * La carapace : construite en gros blocs, elle est très stable si les autres éléments ne sont pas détériorés.

Ceci montre que ces trois (3) degrés de construction sont soumis à même climat de houle.

b- Essais de visualisation du processus de destruction d'un brise-lames :

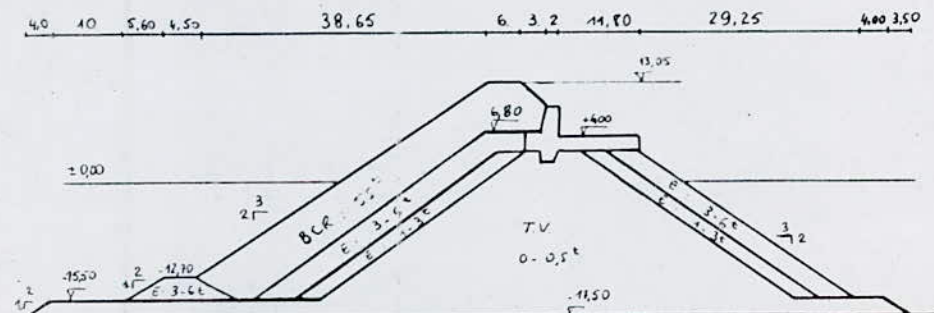
Ces essais permettent de montrer le mod de destruction d'un brise-lame.

Le principe est de réaliser en modèle plusieurs tempêtes ayant frappé ce brise-lames.

2- Types de brise-lames :

Rappelons qu'un brise-lames est un ouvrage de protection d'infrastructures portuaires contre l'action néfaste de la houle.

Un seul type de digue est utilisé en Algérie, c'est la digue à talus, elle est représentée dans les figures suivantes :

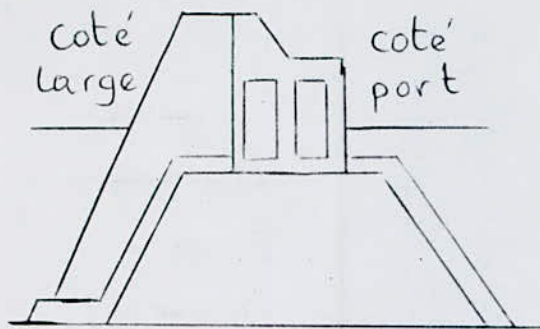


Profil du type digue à talus

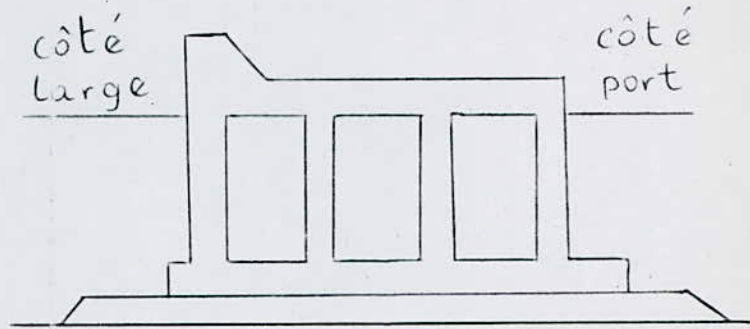
La digue est composée des éléments suivants :

- la carapace : elle joue le plus important rôle, car elle permet la protection de la digue, en dissipant, en grande partie, l'énergie de la houle. Elle est formée de gros blocs en enrochements ou en béton.
- la butée : son rôle est aussi important car elle supporte le poids de la carapace. Une butée mal construite entraînerait l'instabilité de la carapace. En général, elle est composée d'enrochements naturels.
- le couronnement : il est aussi appelé superstructure. Il joue deux rôles importants : évite, par sa largeur, les oscillations du plan d'eau, et permet l'accostage et la circulation. L'utilisation, d'armatures dans la superstructure, dépendra des études de sur-pression.
- le noyau : il est composé du tout-venant (enrochements de poids < 0.5 t) dont la granulométrie est continue. Il constitue un écran évitant la transmission de pressions qui s'exercent sur la face exposée.
- le talus intérieur : c'est une petite carapace, elle joue le rôle des filtres; en protégeant le noyau de l'entraînement des enrochements. Le talus intérieur est composé d'enrochements, il est possible d'ajouter quelques blocs pour augmenter la stabilité.
- les sous-couches : elles sont aussi appelées filtres. Elles sont composées d'enrochements de granulométrie différentes. Leur rôle est d'éviter l'entraînement des enrochements du noyau par le courant.

Néanmoins, plusieurs profils existent dans le monde, dont voici les plus importants :



Digue mixte



Digue verticale

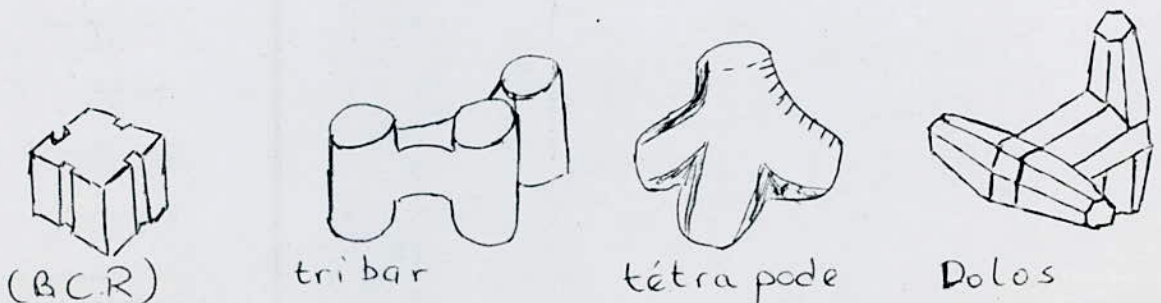
Pour le cas de l'Algérie, on opte, pour le profil de type digue à talus pour des raisons économiques. Ce dernier présente une très bonne stabilité. Dans le cas d'une houle non attendue, le cas d'une houle centennale ou millénaire, la digue subit des dégâts qui sont réparables, contrairement aux autres profils, lors d'une houle de très faible probabilité, les murs constituant les brise-lames sont détruits conduisant à une détérioration du port.

3- Prédimensionnement de la carapace :

a- Blocs constituant la carapace :

La construction de brise-lames dans les eaux profondes a nécessité un besoin en blocs naturel très lourds, permettant la protection de la digue, ces derniers sont devenus introuvables en nature, ce qui a orienté vers l'utilisation des blocs en béton.

Plusieurs blocs ont été inventés, comme ceux de la figure suivante :



D'après des expériences vécues dans le monde, il semble que l'on est revenu à l'utilisation de blocs massifs, où les blocs cubiques rainurés (B.C.R.) présentent une très bonne stabilité. (voir "Séminaire National sur les Sciences et techniques de la mer" auteur : A.ABDELBAKI)

b- Etude de la stabilité hydraulique des digues à talus :

α- Forces exercées par la houle : La protection des ports est assurée par les brise-lames, en dissipant une bonne partie de l'énergie de la houle sur la carapace.

Une carapace est le revêtement de la digue par des blocs. Son dimensionnement est fonction de la hauteur de la houle agissant sur l'ouvrage. Plusieurs formules ont été trouvées par des expériences. La houle exerce sur le bloc des forces d'ascension et de descente, essayant de le faire déplacer de sa position initiale, on cite :

- * une force importante provoquée par la trainée due à l'ascension de la houle,
- * une force orientée vers le bas de la pente provoquée par des sous-pressions dues à la descente de la vague.
- * le déferlement d'une lame sur la digue provoque une force brutale et irrégulière donc très dangereuse, et dont la rencontre de cette lame déferlante avec la descente d'une autre lame sur la pente de la digue provoque un remous, qui tend à surélever le bloc.

D'autres forces apparaissent comme :

- * forces statiques : le poids propre du bloc et les forces de tassement.
- * forces dynamiques : forces dues à la mise en place et au séisme,
- * forces dues aux réactions chimiques et aux différences de température.

β- Formules de stabilité : Plusieurs auteurs ont proposé des formules basées sur l'expérience qui donnent les poids unitaires des blocs de la carapace dont voici quelques formules importantes :

i- Formule d'HUDSON : (U.S.A. 1958-1959)

C'est la formule la plus utilisée pour le prédimensionnement des blocs en Algérie, elle a été par conséquent nécessaire pour le Nouveau Port de Dellys, la formule est la suivante :

$$W = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{K_d} \frac{H^3 d_s}{(\delta - 1)^3} \quad [1]$$

Avec :

W : poids unitaire des blocs,

H : hauteur significative de la houle de projet,

α : angle que fait le talus avec l'horizontale,

d_s : poids volumique des blocs,

δ : densité des blocs par rapport à l'eau de mer,

K_d : coefficient de stabilité dépendant de :

- la forme des blocs,
- la rugosité de la carapace,
- le degré d'accrochage lors de la pose.

Le tableau suivant donne quelques valeurs de K_d.

Blocs	K _d pour des pentes		
	1:1.5	et	1:2.0
enrochements	1.0	-	4.0
cubes	2.0	-	7.0
tetrapodes	3.0	-	8.0
Dolos	6.0	-	15.0

Le predimensionnement des blocs de la carapace du Nouveau Port de Dellys a donnée comme résultats, tout en prenant comme paramètres :

- $d_m = 2.4 \text{ t/m}^3$
- $d_w = 1.0.25 \text{ } 2.4 \text{ t/m}^3$
- $\text{tg } \alpha = 2/3$
- $H_m = 8.3$ (houle de projet)

On trouve après une application numérique :

$$W = 55 \text{ t}$$

ii- Formule d'IRRIBARREN : (Espagne 1938), (voir thèse magister de M^r RAHMANI)

C'est la formule la plus ancienne, elle a pour expression :

$$W = \frac{K}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^3} \frac{H_m \cdot d_m}{(\delta - 1)} \quad [2]$$

Avec :

- W : poids unitaire des blocs,
- H_m : hauteur de la vague déferlente,
- α : angle que fait le talus avec l'horizontale,
- δ : densité des blocs par rapport à l'eau de mer,
- K : coefficient qui est fonction de la forme des blocs.

iii- Formule de LARRAS :

Cette formule est appliquée pour des profondeurs supérieures ou égales aux profondeurs de déferlement, soit son expression :

$$W = \frac{\left| \frac{2 \pi (H/L)}{\sin \alpha} \right|^2}{(\cos \alpha - \sin \alpha)} \frac{H^3 d_m}{(\delta - 1)^3} \quad [3]$$

Avec :

W : poids unitaire des blocs,

H : hauteur significative de la houle de projet,

α : angle que fait le talus avec l'horizontale,

d_m : poids volumique des blocs,

δ : densité des blocs par rapport à l'eau de mer,

L : longueur d'onde de la houle

iv- Formules de VANDER-MEER : (voir mémoire de fin d'études ZANE)

Les formules de VANDER-MEER sont les plus récentes et les plus exactes. Cependant elles sont légèrement différentes des autres formules citées auparavant, car elles sont basées sur un critère économique spécial, c'est le "niveau de dommage (S)".

Les formules de VANDER-MEER sont citées en fonction de la vague qui déferle sur la carapace de la digue, les formules sont alors :

- Déferlement plongeant :

$$\frac{H_m}{\Delta D_{N50}} (\epsilon_x)^{1/2} = 6.2 P^{0.13} (S/(N)^{1/2})^{0.20} \quad [4]$$

- Déferlement gonflant :

$$\frac{H_m}{\Delta D_{N50}} = 1.0 P^{-0.13} (S/(N)^{1/2})^{0.20} (\cotg \alpha)^{1/2} \epsilon_x^P \quad [5]$$

Avec :

H_m : hauteur significative au pied de la carapace (ou de projet),

ϵ_x : paramètre du déferlement :

$$\epsilon_x = \frac{\tg \alpha}{(H_m/L)^{1/2}} = \frac{\tg \alpha}{((2\pi H_m)/(T_x^2 g))^{1/2}} \quad [6]$$

où :

T_x : période de pointe, et α : angle du talus.

Δ : densité relative du bloc :

$$\Delta = ((d_m/d_w) - 1)$$

où :

d_m : densité du bloc,

d_w : densité de l'eau de mer.

D_{NSO} : diamètre nominal du bloc,

P : coefficient de la perméabilité de la structure,

S : niveau de dommage

$$S = \frac{A}{(D_{NSO})^2} \quad [7] \quad \text{où } (A) \text{ est la section érodée.}$$

Toutes ces formules de prédimensionnement des blocs ne donnent que des valeurs approchées, il est nécessaire pour cela de faire des essais hydrauliques en modèle :

- tridimensionnel, c'est à dire en bassin à houle,
- bidimensionnel, à savoir le canal à houle,

pour l'obtention définitives des dimensions des blocs de la carapace.

4- Prédimensionnement de la butée :

Pour le prédimensionnement de la butée trois (3) points doivent être pris en considération, à savoir :

- La hauteur à la rase de la butée (h) doit être :

$$h > 1.2 H \quad \text{avec } H : \text{ hauteur de projet}$$

- Le poids initiale des enrochements doit être en moyenne :

$$W_b = \frac{0.1}{K} \frac{H^3 d_m}{((d_m/d_w) - 1)^3 \cot \alpha} \frac{H}{h} \quad [8]$$

Avec : - K : coefficient qui dépend de l'enrochement,

- La pente de la butée peut être plus douce que celle de la carapace pour limiter les risques d'érosion.

Le prédimensionnement de la butée a donné comme résultat :

$$W_L = 3.5 \text{ t}$$

En prenant comme valeurs :

$$h = 12,70 \text{ m } (> 1.2 \text{ H})$$

$$H = 8,30 \text{ m}$$

$$d_m = 2.4 \text{ t/m}^3$$

$$d_w = 1.025 \text{ t/m}^3$$

$$\cotg \alpha = 3/2$$

5- Prédimensionnement des sous-couches et du noyau :

Les poids moyens des enrochements constituant les sous-couches sont prédimensionnés en fonction du poids des blocs de la carapace (W) :

- Poids de la première sous-couche : $W_{\text{couche } 1} = W / 10$
- Poids de la seconde sous-couche : $W_{\text{couche } 2} = W / 200$

Le poids minimal des enrochements du tout-venant constituant le noyau est aussi fonction du poids des blocs de la carapace (W), soit :

$$W_{\text{noyau}} = W / 4000$$

Cependant, la condition de TERZAGHI est vivement conseillée d'être utilisée. Après un classement massique des enrochements de la carrière en plusieurs catégories, comme :

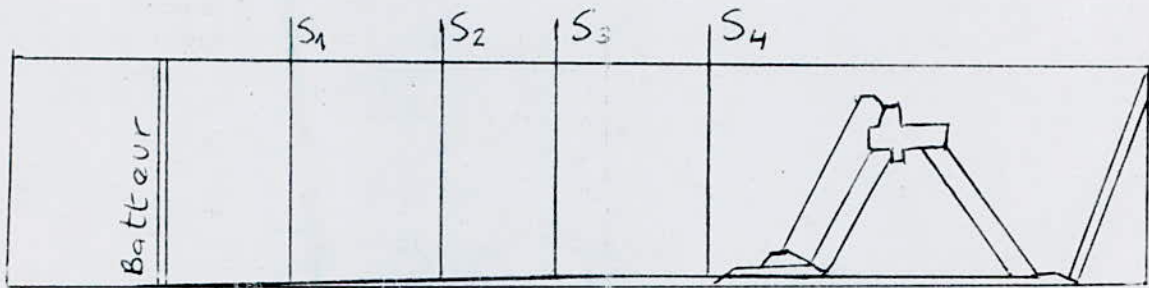
- tout-venant : < 500 kg,
- blocs de la première catégorie : 0.5 à 1 t,
- blocs de la seconde catégorie : 1 à 3 t,
- blocs de la troisième catégorie : 3 à 6 t,

on dresse la courbe granulométrique de chaque catégorie.

La règle de TERZAGHI consiste à prendre le diamètre $D_1(15\%)$, de la catégorie ayant de gros matériaux, compris entre $4.D_2(85\%)$ et $4.D_2(15\%)$, de la catégorie ayant les matériaux les plus fins.

6- Construction du modèle de stabilité en bidimensionnel :

La construction de la maquette a été faite dans le modèle suivant :



a- Les fonds marins :

Ces fonds sont construits à partir des lignes bathymétriques levées sur le site, et dont l'exécution a été effectuée par le Laboratoire des Etudes Maritimes, les pentes de ces fonds sont les suivantes :

- de 1.0 % entre les isobathes (- 17.5 m) à (- 20.0 m),
- de 1.8 % entre les isobathes (- 20.0 m) à (- 25.0 m).

b- La digue et ses éléments :

Etant donnée l'eau douce, utilisée au laboratoire, des corrections seront faites pour les poids des blocs de la carapace ainsi que les poids des enrochements.

Une portion de la partie courante du brise-lames a été modélisée dans un canal à houle, vidé en premier, ensuite construite par simple mise en place manuelle des différents éléments.

Les matériaux utilisés sont les suivants :

Eléments	Nature		Modèle	
	poids (t)	densité (t/m ³)	poids (g)	densité (g/cm ³)
Carapace	55,40,30	2.4	508,369,277	2.28
	26,20,33		240,185,305	
Butée	3 - 6	2.65	27 - 55	2.65
Filtre ou sous-couches	3 - 6	2.65	27 - 55	2.65
	1 - 3		9 - 27	
Talus interieur	3 - 6	2.65	27 - 55	2.65
	1 - 3		9 - 27	
Noyau (TV)	0 - 0.5	2.65	0 - 4	2.65
Couronnement (béton)	/	2.40	/	2.28

Remarque : Du sable fin (d = 0.21 mm) sera ajouté pour la constatation de l'érosion du fond.

La partie difficile à modéliser est la carapace, car elle a nécessité plusieurs paramètres de modélisation, à savoir :

- le poids, la forme et la densité des blocs,
- le nombre de couches de blocs,
- la pente des talus,
- le plan de pose des blocs.

Soit la formule suivante obtenue à partir de celle d'HUDSON :

$$N = \frac{H_s^3 d_m}{W_m ((d_m/d_w) - 1)^3} \quad [9]$$

Avec :

- N : grandeur constante,
- H_m : hauteur significative de la houle (houle de projet),

- d_m, d_w : densités du matériau et de l'eau respectivement,
- W_m : poids des blocs et des matériaux pierreux.

La formule [9] est valable en modèle ainsi qu'en nature, cependant une rectification, de la densité du béton, s'impose. Cette variation de densité du béton est due à la légère différence de densité entre l'eau douce du laboratoire (1 g/cm^3) et l'eau salée de la mer (1.025 g/cm^3), les densités du béton pour le modèle et le prototype sont alors :

- $d_m = 2.28 \text{ t/m}^3$: densité du béton en modèle,
- $d_m = 2.40 \text{ t/m}^3$: densité du béton en nature.

La similitude physique en modèle réduit permet d'écrire l'égalité suivante:

$$N_1 = N_2 \quad [10]$$

Les indices (1) et (2) désignent le prototype et le modèle respectivement, l'expression [2] est équivalente à :

$$\frac{H_{m,1}^3 d_{m,1}}{W_{m,1} ((d_{m,1}/d_w) - 1)^3} = \frac{H_{m,2}^3 d_{m,2}}{W_{m,2} ((d_{m,2}/d_w) - 1)^3} \quad [11]$$

cette formule [3] permet la détermination des poids des blocs modélisés utilisés en laboratoire.

La détermination de l'épaisseur de la carapace est obtenue grâce à la formule suivante :

$$e = n c V^{1/3} \quad [12]$$

Avec :

e : épaisseur de la carapace en (m),

n : nombre de couches,

c : coefficient de forme des blocs, pour le cas de notre étude :

$$c = 1.1,$$

V : volume d'un élément en (m^3).

Une autre formule simple permet de donner le nombre de blocs par unité de surface, son expression est :

$$Z = n c V^{-2/3} (1 - (p/100)) \quad [13]$$

$$\text{ou bien } Z = (e/V) (1 - (p/100)) \quad [14]$$

Avec :

Z : nombre d'éléments par unité de surface,

p : porosité de la carapace, pour le cas du Nouveau Port de Dellys,
une porosité de 47 % doit être respectée.

Le couronnement est préfabriqué en modèle avec une densité $d_m = 2.28 \text{ g/cm}^3$, en nature, il est obtenu par coulée de béton dans du coffrage, et dont la densité est $d_m = 2.4 \text{ (g/cm}^3\text{) ou (t/m}^3\text{)}$.

Reamarques : Pour le cas du Nouveau port de Dellys, déterminons le nombre d'éléments par unité de surface :

$$Z = n.c. (m/d_m)^{-2/3} . (1 - (p/100))$$

Application numérique : $d_m = 2.4 \text{ t/m}^3$

$$p = 47 \%$$

$$n = 2$$

$$c = 1.1$$

$$\text{et } m = 55 \text{ t}$$

On trouve : $Z = 0.144 \text{ unités/m}^2$

Et en considérant à l'échelle réelle, la surface de la carapace $S = 1355 \text{ m}^2$ on détermine le nombre de blocs à mettre dans la carapace pour le premier profil, soit : 195 B.C.R.

Or le pourcentage de dégâts admissible est de : 3% , c'est l'équivalent à six (6) blocs.

De même pour le talus intérieur, le nombre d'enrochements à mettre est :

$$Z = 820 \text{ unités}$$

Les nombres admissibles pour le talus interieur et la butée sont :

- talus interieur : 25 (E),
- butée : 38 (E).

c- Les profils de l'étude :

Pour l'étude sur canal à houle, la partie étudiée est une portion de la partie courante de la digue, dont la profondeur est maximale.

Pour l'étude, en canal à houle, du modèle du Nouveau port de Dellys, il a fallu six profils, dont le premier est obtenu par prédimensionnement.

Les autres profils sont réalisés d'après les résultats et les remarques obtenus des précédents.

Dans le cas d'une très bonne résistance de la digue contre l'action de la houle, le projet est surdimensionné. Dans le cas contraire, le modèle présente une instabilité de la digue et des dégâts occasionnés par les vagues. Donc ce profil est sous-dimensionné, le dernier profil devra être le modèle optimal.

7- Types d'observation effectuées pour les essais de stabilité :

Avant tout essai, un réglage hydraulique est important, il a pour but de recalibrer les sondes de mesures.

Cependant, lors des manipulations des observations sont faites pour permettre l'étude, on cite :

a- Observations hydrauliques :

Pour cela, sont notés :

- les franchissements,
- les déferlements.

Pour notre étude il sera utilisé pour les franchissements ainsi que les déferlements les lettres suivantes :

(A) , (a) , (B) , (b) , (C) , (c) , (D) , (d) , (E) et (e)

Franchissements	(A) = aucun	(B) = peu important	(C) = important
Déferlements	(a) = aucun	(b) = au large	(c) = important
Franchissements	(D) = augmentant importance	(E) = tres important	
Déferlements	(d) = au pied de la carapace	(e) = tres important	

b- Observation des dégats occasionnés par la houle sur la digue :

Au fur et à mesure du déroulement des essais, on doit noter pour :

i- la carapace : les déplacements ainsi que les rockings,

* Un déplacement: c'est le mouvement d'un bloc de plus de sa dimension

$$D, \text{ où } D = (W/d_m)^{1/3}$$

Avec : W : poids du bloc,

d_m : densité spécifique du bloc.

* Un rocking: est la rotation d'un bloc sur lui-même sans déplacement.

On peut éventuellement tracer un graphe montrant le pourcentage de dégats de la carapace en fonction des hauteurs de la houle.

Pour le cas du Nouveau Port de Dellys, la chute de blocs n'a pas été tellement remarquée, sauf pour l'avant dernier cas (20 tonnes) et pour le dernier essai, donc pour une houle dépassant la houle de projet.

Ceci ne permet pas de tracer un graphe illustrant les dégats obtenus.

ii- la butée et les sous-couches : les changements de pente ainsi que les chutes d'enrochements.

iii- le couronnement: les déplacements relatifs aux poussées de la carapace dues à l'action de la houle.

Des mesures de la pression sur le couronnement sont nécessaires pour le dimensionnement de ce dernier, malheureusement, elles n'ont pas été faites, pour le cas du Nouveau Port de Dellys, à cause de la non disponibilité des cellules permettant ces mesures.

8- Déroulement des essais au laboratoire :

Notre étude consiste à vérifier la stabilité des différents éléments de la partie courante de la digue, à savoir :

- la carapace,
- la butée,
- le couronnement,
- le noyau,
- le talus intérieur ainsi que les sous-couches.

Pour l'étude du projet du Nouveau Port de Dellys, il a fallu six (6) profils, dont le premier est obtenu par prédimensionnement théorique, les autres sont corrigés à partir des remarques et des observations, mentionnées sur des tableaux faites pour les profils précédents.

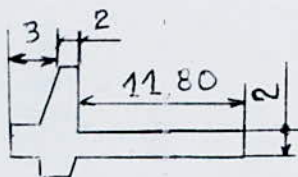
Une seconde étude est d'une importance primordiale, c'est celle du franchissement, dont les résultats sont représentés dans des tableaux, des graphes sont nécessaires pour la détermination du débits critique obtenu pour une houle anuelle.

Des photos ont été ajoutées pour illustrer les différents profils à la fin des essais.

PROFIL N° : I

Le premier profil a les caractéristiques suivantes, ces dernières sont données à l'échelle du prototype :

- Carapace : deux (2) couches de B.C.R. (bloc cubique rainuré) de 55 tonnes, sont posés avec une pente ($i = 3/2$) de la côte d'arase (+ 13.00 m Z.H.) à la côte (- 15.50 m Z.H.).
- Butée : elle est composée de trois (3) rangées d'enrochements de 3 à 6 tonnes posés suivant une pente ($i = 2/1$), entre les côtes (- 15.50 m Z.H.) et (- 12.70 m Z.H.).
- Couronnement : il est préfabriqué suivant le modèle suivant :



- Noyau : il a la forme trapézoïdale, et il est composé du tout-venant c'est dire d'enrochements dont la masse ne dépasse pas les 500 kg.
- Talus intérieur : il est composé de deux (2) couches d'enrochement et suivant deux rangées chacune, de (1 à 3 t) et de (3 à 6 t) et allant de la côte (- 15.50 m Z.H.) jusqu'à la côte (+ 4.00 m Z.H.), ces rangées sont placées de façon que la granulométrie varie en croissant du noyau jusqu'à la dernière couche.
- Sous-couches : ces dernières sont identiques au talus intérieur, elles sont placées entre la carapace et le noyau.

Profil: I

Echelle : 1/500^{eme}

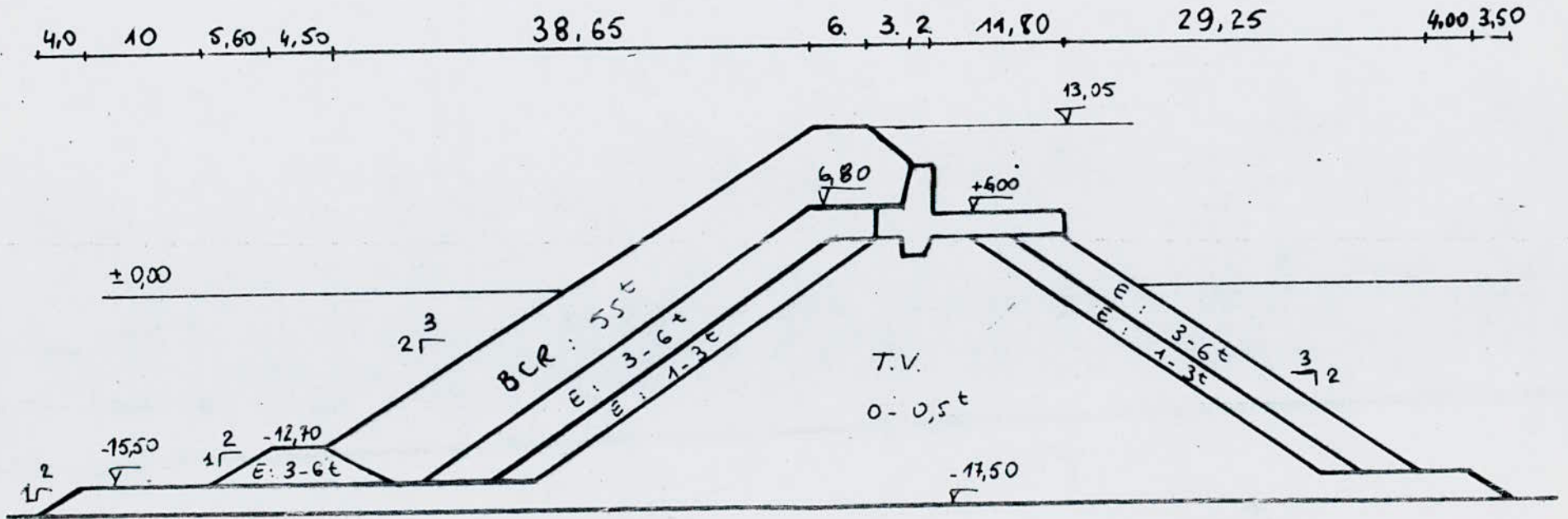


Tableau I-1 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 2 heures (nature).

N° du test	H. (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	1.50	7.0	Houle de tassement	franchissement (A) déferlement (a)
2	2.00	8.0		
3	3.00	9.0		
4	3.50	10.0		
5	4.50	11.0	•début de formation d'une pente (3/1) de la butée, •quelques rockings.	idem
6	5.50	12.0	•continuation de la formation de la pente (3/1) de la butée, •montée de quelques enroche- ments au pied de la carapace.	franchissement (A) déferlement (b)
7	6.50	12.0	idem	franchissement (B) déferlement (b)
8	7.00	13.0		
9	7.50	14.0		
10	8.50	15.0		
11	9.50	15.0	•érosion du fond, •formation d'une pente de (3/1) de la butée.	franchissement (C) déferlement (c)

Tableau I-2 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 12 heures (essai d'endurance).

N° du test	H. (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement
				Déferlement
1	7.50	12.0	•pas de dégats sur la carapace,	
			•chute de 1 ou 2 enrochements du talus intérieur,	franchissement (B)
			•chute de 2 ou 3 enrochements de la butée.	déferlement (b)
2	10.20	15.0	•même état de la carapace,	
			•chute de quelques enrochements du talus intérieur,	franchissement (D)
			•formation d'une pente finale de (3/1) de la butée.	déferlement (d)

Tableau I-3 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : + 1.00 m Z.H.

Durée : 2 heures (nature).

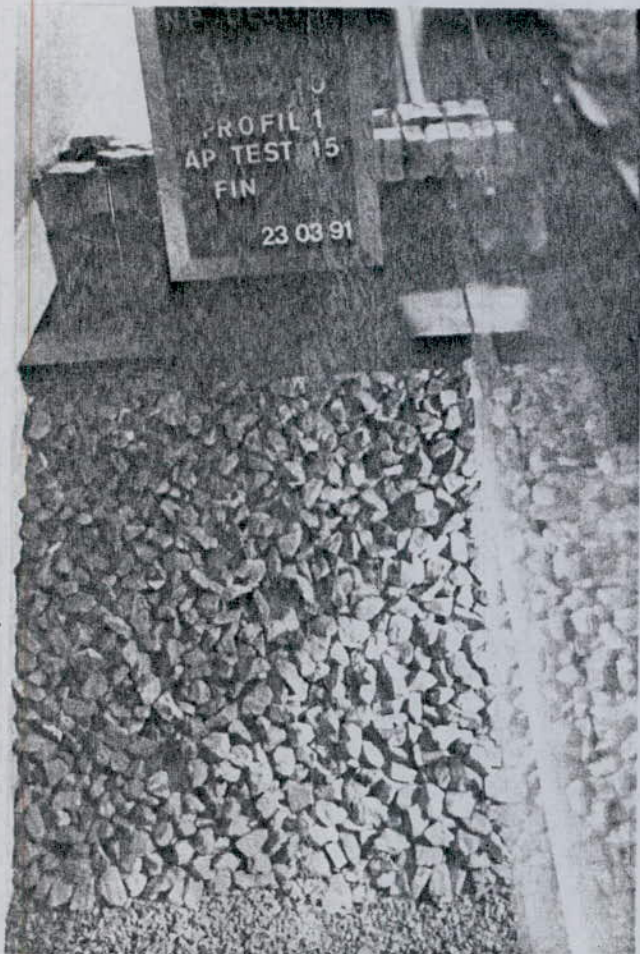
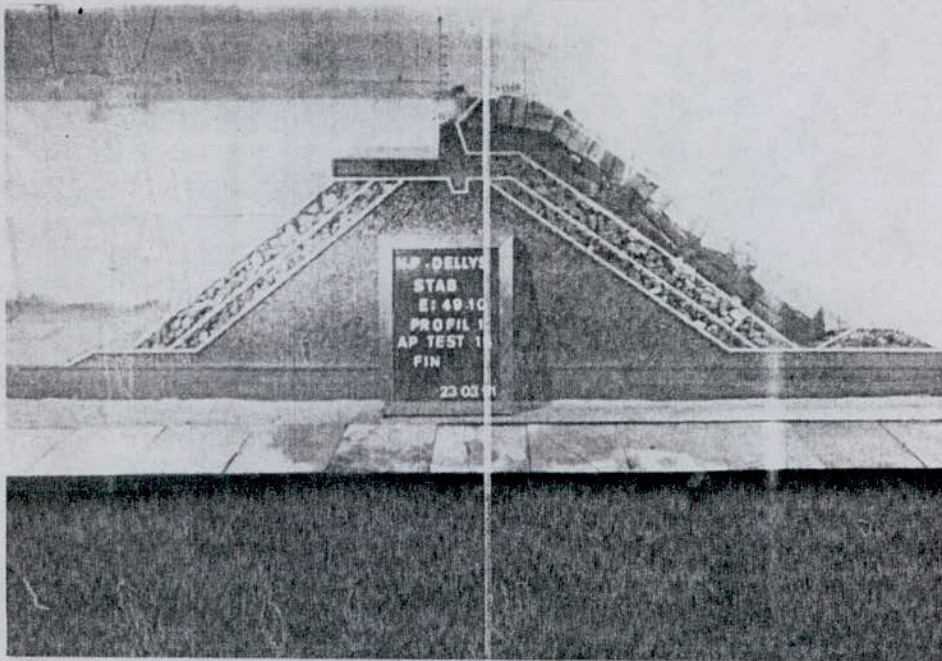
N° du test	H. (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	3.50	10.0	• même état que celui des essais	franchissement (A)
2	5.50	12.0	précédents.	déferlement (a)
3	7.50	14.0	• érosion du fond de la butée,	franchissement (C)
4	9.50	15.0	• quelques chutes d'enrochements du talus intérieur.	déferlement (c)

Tableau I-4 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 12 heures (essai d'endurance).

N° du test	H. (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	7.50	12.0	• pas de dégâts supplémentaires.	franchissement (B) déferlement (b)
2	10.20	15.0	• stabilité de la butée à une pente (3/1), • quelques chutes d'enrochements du talus intérieur, • aucun dégât n'apparaît sur la carapace.	franchissement (D) déferlement (d)



Conclusion :

D'après les essais de stabilité effectués sur le profil I, on peut conclure sur les différents éléments de la carapace :

- Carapace : elle est très stable, n'a subi aucun dégât, donc il y a possibilité de surdimensionnement. Il est nécessaire de diminuer le poids des B.C.R., soit 40 tonnes par exemple.
- Butée : il y a eu formation d'une pente de (3/1) qui paraît stable, d'où la nécessité de tenir compte dans le prochain profil
- Couronnement : il y a eu un très léger déplacement, considéré comme négligeable car il n'est pas visible à l'oeil, il est dû aux forces de tassement provoquées par l'eau sur la carapce et donc sur le couronnement.
- Noyau : il n'a subi aucun dégât, il est donc stable.
- Talus intérieur : il y a eu quelques chutes d'enrochements de la partie supérieure pour des houles de faibles probabilités d'occurrence. Cependant la partie inférieure du talus n'a subi aucun dégât et semble être inutile.
- Sous-couche : aucun dégât n'apparaît, donc stable.

Les nombres d'éléments chutés, de la digue, ne dépassent pas les nombres admisibles. La digue paraît très résistante, d'où la nécessité d'un second profil.

PROFIL N° : II

Ce second profil a les caractéristiques suivantes, ces dernières ont subi quelques modifications :

- Carapace : deux (2) couches de B.C.R. (blocs cubiques rainurés) réduits à 40 tonnes, sont posées avec une même pente ($i = 3/2$) de la côte d'arase (+ 12.40 m Z.H.) à la côte (- 15.50 m Z.H.).
- Butée : à la fin des essais précédents, une pente est apparue de ($i = 3/1$), qui a été gardée pour ce profil, la butée est composée de trois (3) rangées d'enrochements de 3 à 6 tonnes, entre les côtes (- 15.50 m Z.H.) et (- 11.40 m Z.H.).
- Couronnement : il est identique au précédent.
- Noyau : il est le même que le précédent, cependant on a ajouté un tapis filtrant pour éviter l'érosion du fond.
- Talus intérieur : il est composé des mêmes couches d'enrochements et posés suivant la même pente mais de côtes différentes, allant de la côte (- 10.10 m Z.H.) jusqu'à la côte (+ 4.00 m Z.H.) pour les couches (1 à 3) tonnes et de (- 8.00 m Z.H.) à (+ 4.00 m Z.H.) pour la seconde c'est à dire (3 à 6) tonnes.
- Sous-couches : ces dernières sont identiques à celles du profil N° : I

Profils: II, IIA, IIB et IC

Echelle : 1/500^{eme}

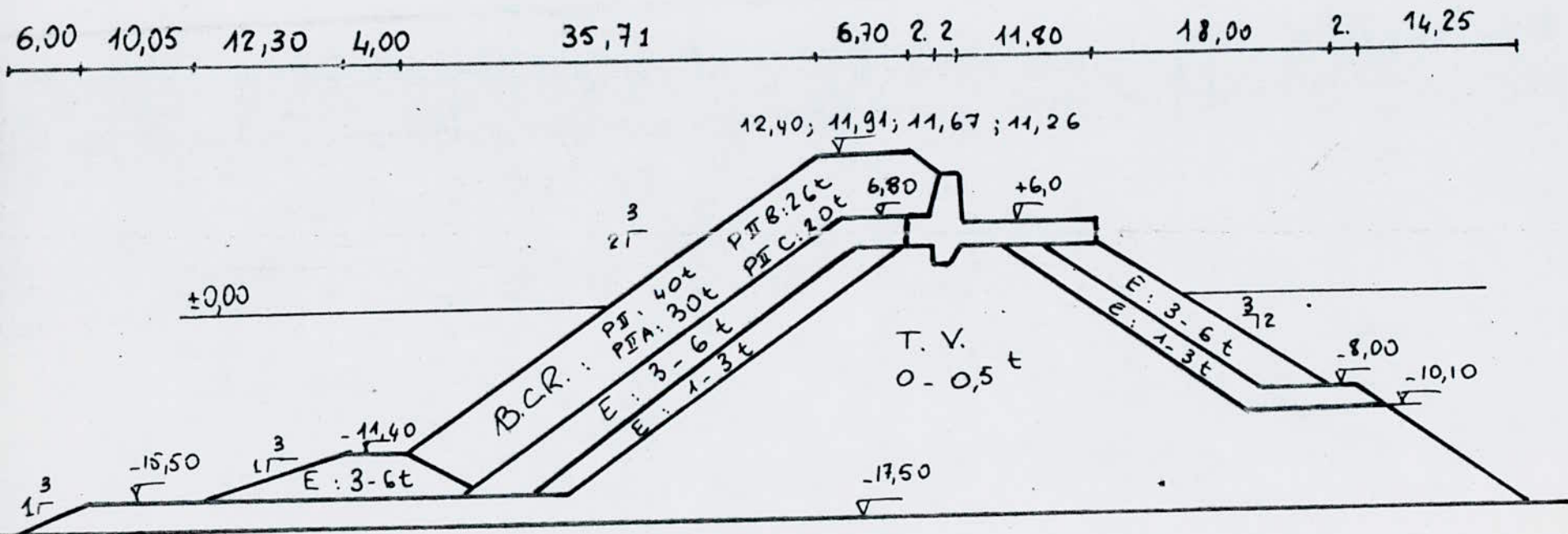


Tableau II-1 : Résultats des essais de stabilité du
profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 2 heures (nature).

N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	1.50	7.0		
2	2.00	8.0	Houle	franchissement (A)
3	3.00	9.0	de	
4	3.50	10.0	tassement	déferlement (a)
5	4.50	11.0	• un rocking apparaît,	franchissement (B)
			• apparition des premiers mouve- ments des enrochements de la butée et du tapis.	déferlement (a)
			• apparition de l'érosion du fond,	franchissement (A)
6	5.50	12.0	• quelques mouvements des enro- chements de la butée,	
			• montée de quelques enroche- ments au pied de la carapace.	déferlement (b)
7	6.50	12.0	• continuation de la déforma- tion du tapis sous la butée,	franchissement (C)
			• chute de quelques enrochements de la butée,	
8	7.00	13.0	• quelques rockings.	déferlement (c)
9	7.50	14.0	• formation d'une pente (3/1) : butée - tapis,	Franchissement (D)
			• montée du tout-venant au pied de la carapace,	
10	8.50	15.0	• chute de quelques enrochements de la butée et du talus intérieur	déferlement (d)
11	10.00	15.0	• érosion du fond.	

Tableau II-2 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 12 heures (essai d'endurance).

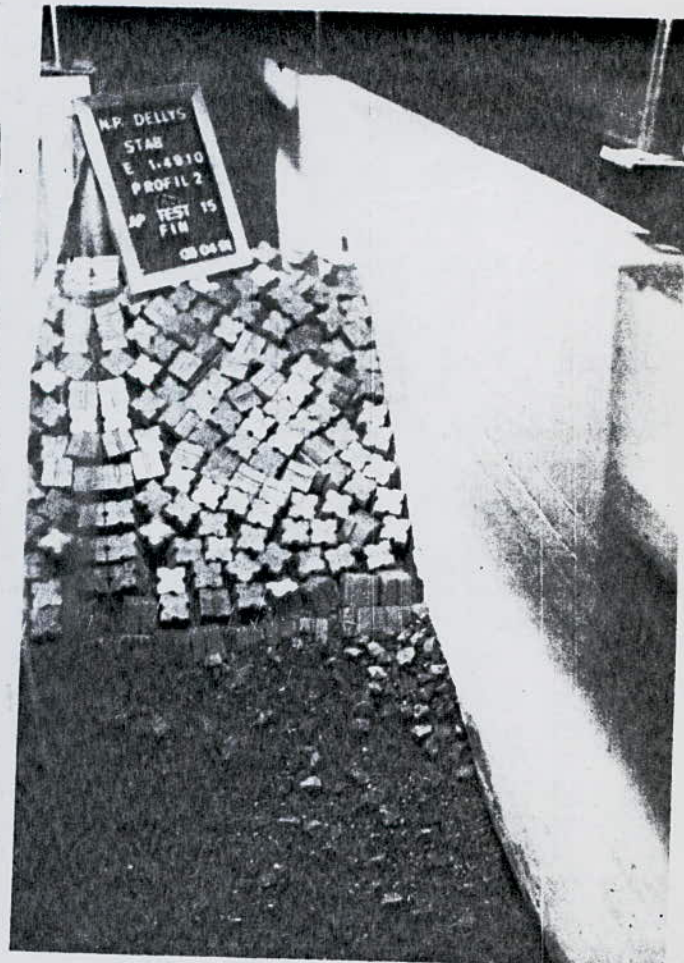
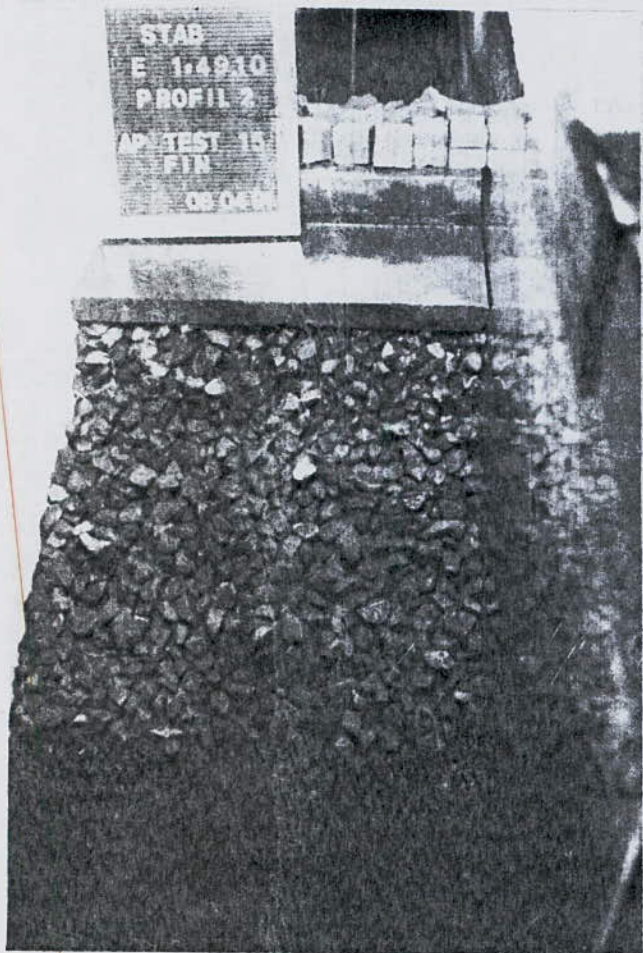
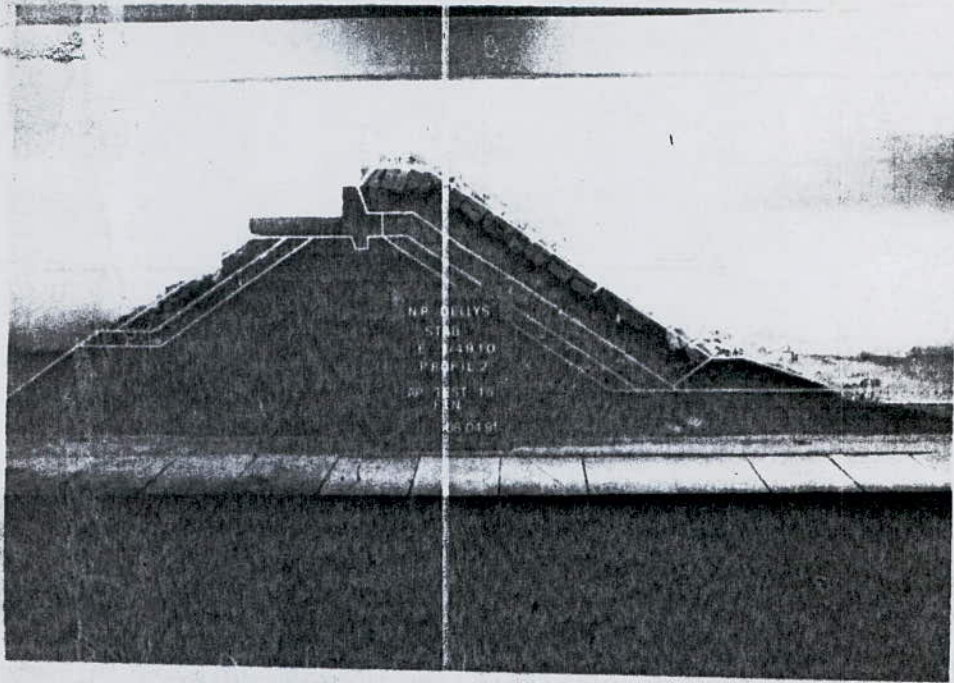
N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement
				Déferlement
1	7.50	12.0	• pas de dégâts sur la carapace,	
			• chute de quelques enrochements du talus intérieur,	franchissement (B)
			• chute de quelques enrochements de la butée.	déferlement (b)
2	10.20	15.0	• même état de la carapace,	
			• chute d'autres enrochements du talus intérieur et de la butée,	franchissement (D)
			• formation d'une pente finale de (3/1) de la butée avec le filtre.	déferlement (d)
			• érosion du fond	

Tableau II-3 : Résultats des essais de stabilité du
profil

Niveau : + 1.00 m Z.H.			Durée : 2 heures (nature).	
N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	3.50	10.0	• même état que celui des essais	franchissement (A)
2	5.50	12.0	précédents.	déferlement (b)
3	7.50	14.0	• érosion du fond de la butée,	franchissement (C)
4	9.50	15.0	• quelques chutes d'enrochements du talus intérieur.	déferlement (c)

Tableau II-4 : Résultats des essais de stabilité du
profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.			Durée : 12 heures (essai d'endurance).	
N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	7.50	12.0	• pas de dégâts supplémentaires.	franchissement (B) déferlement (b)
2	10.20	15.0	• stabilité de la butée à une pente (3/1) entre la butée et le tapis, • quelques chutes d'enrochement du talus intérieur, • aucun dégât n'apparaît sur la carapace.	franchissement (E) déferlement (d)



Conclusion :

D'après les essais de stabilité effectués sur le profil II, on constate pour les différents éléments de la digue :

- Carapace : elle montre une bonne stabilité, il y a eu une chute d'un B.C.R., mal positionné, sur le couronnement, on peut toujours croire que la carapace est surdimensionnée, cependant il est nécessaire de diminuer le poids des B.C.R., soit 30 tonnes par exemple.
- Butée : il y a eu quelques chutes d'enrochements pour des houles de faibles probabilité, ainsi qu'une formation d'une pente de (3/1) entre la butée et le tout-venant.
- Couronnement : mêmes remarques que celles faites pour le profil précédent.
- Noyau : il n'a subi aucun dégât, donc stable.
- Talus intérieur : il y a eu quelques chutes d'enrochement de la partie supérieure pour des houles de faible probabilité d'occurrence.
- Sous-couches : aucun dégât n'est apparu, elles sont donc stables.

La remarque finale pour ce profil est la même que pour le profil précédent, pour cela il faudra un troisième profil.

PROFIL N° II : A. B et C

Ces trois (3) derniers profils sont très ressemblants au profil N° II précédent, cependant il y a eu, pour chaque profil, une modification du poids des blocs cubiques rainurés (B.C.R.) de la carapace.

Les autres paramètres de la carapace (pente) ainsi que les autres éléments de la digue sont restés identiques à ceux du profil N° II.

Ces trois (3) profils ont les carapaces suivantes :

- Profil N° IIA : dont la carapace est formée de deux (2) couches de B.C.R. (blocs cubiques rainurés) réduits à 30 tonnes.
- Profil N° IIB : dont la carapace est formée de deux (2) couches de B.C.R. (blocs cubiques rainurés) réduits à 26 tonnes.
- Profil N° IIC : dont la carapace est formée de deux (2) couches de B.C.R. (blocs cubiques rainurés) réduits à 20 tonnes.

Le but de ces essais est l'étude de stabilité de la digue et l'optimisation du poids des blocs de la carapace.

Pour ces profils, il n'y a pas eu d'essais d'endurance, car le but est de déterminer le profil le plus stable avec le poids des B.C.R. optimisé.

Tableau II-A : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 2 heures (nature).

N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	1.50	8.0	Houle de tassement	franchissement (A)
2	3.00	9.0		déferlement (a)
3	4.00	10.0		
4	5.50	11.0	•apparition du premier rocking,	franchissement (A)
			•apparition des premiers mouvements des enrochements du tapis en tout-venant.	déferlement (a)
5	6.00	12.0	•quelques rockings apparaissent	franchissement (B)
			•apparition de l'érosion du fond avec formation d'une pente (3/1) entre la butée et le tapis en tout-venant,	
6	7.50	12.0	•quelques mouvements des enrochements de la butée et le talus intérieur,	déferlement (b)
			•montée de quelques enrochements au pied de la carapace.	
7	8.50	13.0	•aucun rocking d'où la stabilité des B.C.R. ,	franchissement (E)
8	9.50	14.0	•chute de quelques enrochements de la butée et talus intérieur,	
9	10.00	15.0	•formation d'une pente (3/1) : butée - tapis,	déferlement (d)
			•montée du tout-venant au pied de la carapce,	
			•érosion du fond.	

Tableau II-B : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 2 heures. (nature)

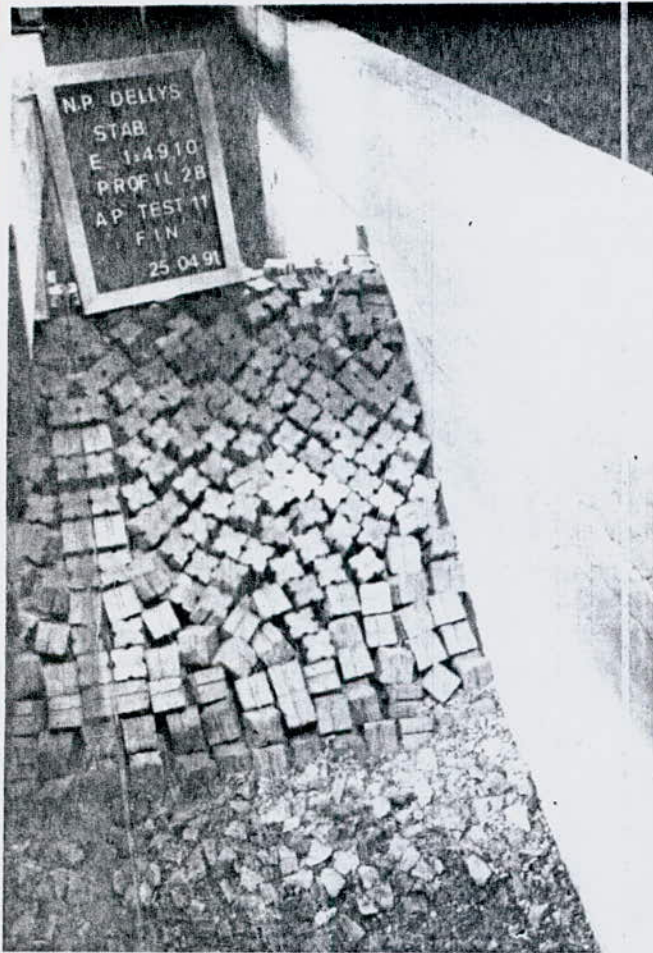
N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	1.50	8.0	Houle	franchissement (A)
2	3.00	9.0	de	
3	4.00	10.0	tassement	déferlement (a)
			•un rocking apparait,	franchissement (A)
4	5.50	11.0	•apparition des premiers mouve- ments des enrochements du tapis en tout-venant.	déferlement (a)
			•des rockings apparaissent,	
5	6.00	12.0	•apparition de l'érosion du fond avec formation d'une pente (3/1) entre la butée et le tapis en tout-venant,	franchissement (B)
6	7.50	12.0	•quelques mouvements des enro- chements de la butée et le talus intérieur,	déferlement (b)
			•montée de quelques enroche- ments au pied de la carapace.	
7	8.50	13.0	•aucun rocking d'où la stabi- lité des B.C.R. avec une légère concentration de B.C.R. au pied de la carapace,	
			•chute de quelques enrochements de la butée et talus intérieur,	franchissement (E)
8	9.50	14.0	•formation d'une pente (3/1) : butée - tapis,	déferlement (d)
9	10.00	15.0	•montée du tout-venant au pied de la carapace,	
			•érosion du fond.	

Tableau II-C : Résultats des essais de stabilité du
profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 2 heures (nature).

N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	1.50	8.0	Houle	franchissement (A)
2	3.00	9.0	de	
3	4.00	10.0	tassement	déferlement (a)
			•un rocking apparait,	franchissement (A)
4	5.50	11.0	•apparition des premiers mouve- ments des enrochements du tapis en tout-venant.	déferlement (a)
			•des rockings apparaissent,	
5	6.00	12.0	•apparition de l'érosion du fond avec formation d'une pente (3/1) entre la butée et le tapis en tout-venant,	franchissement (B)
6	7.50	12.0	•quelques mouvements des enro- chements de la butée et le talus intérieur,	déferlement (b)
			•montée de quelques enroche- ments au pied de la carapace.	
7	8.50	13.0	• <u>chute de trois B.C.R.</u>	
			•chute de quelques enrochements de la butée et talus intérieur,	franchissement (E)
8	9.50	14.0	•formation d'une pente (3/1) : butée - tapis,	déferlement (e)
9	10.00	15.0	•montée du tout-venant au pied de la carapace,	
			•érosion du fond.	



Conclusions :

D'après les trois (3) tableaux, on constate que les remarques faites pour les profils : (IIA), (IIB) et (IIC) sont pratiquement identiques à celles faites pour le profil (II), une exception est faite pour les carapaces des quatre (4) profils.

Les conclusions faites au sujet de la carapace, pour les trois profils (IIA), (IIB) et (IIC) sont les suivantes :

- Profil (IIA) : dont le poids des B.C.R. est de 30 tonnes, on a remarqué une très bonne stabilité, même pour des houles de faible probabilité d'occurrence. Il n'y a pas eu de chute de B.C.R.
- Profil (IIB) : dont le poids des B.C.R. est de 26 tonnes, on constate une légère concentration des blocs de la carapace dans la partie inférieure de celle-ci, ce qui fait prendre à la butée tout le poids de cette partie risquant le dommage de la digue, ce profil paraît stable mais dangereux malgré le non dépassement du critère.
- Profil (IIC) : dont le poids des B.C.R. est de 20 tonnes, au cours des essais, on a remarqué la formation d'un vide au niveau (± 0.00 m Z.H.) avec une grande concentration de B.C.R. sur la butée, à la fin quelques chutes de B.C.R. sont remarquées.
Ce profil n'est pas stable.

PROFIL N° : III

Ce dernier profil a les caractéristiques suivantes, ces dernières ont subi quelques modifications :

- Carapace : deux (2) couches de B.C.R. (blocs cubiques rainurés) dont le poids a augmenté à 33 tonnes, construites avec une même pente ($i = 3/2$) de la côte d'arase (+ 12.10 m Z.H.) à la côte (- 14.40 m Z.H.).
- Butée : une pente de ($i = 3/1$) a été gardée pour ce profil final, cependant elle est composée de trois (3) rangées d'enrochements de 3 à 6 tonnes, entre les côtes (- 10.30 m Z.H.) et (- 14.40 m Z.H.).
- Couronnement : il est identique au précédent.
- Noyau : il est le même que le précédent, cependant on a ajouté un tapis filtrant pour éviter l'érosion du fond, des côtes (- 16.50 m Z.H.) à la côte (- 17.50 m Z.H.).
- Talus intérieur : il est identique à celui du profil précédent.
- Sous-couches : ces dernières sont identiques à celles du profil N°: II avec un tapis filtrant d'une épaisseur d'un mètre.

Profil : III

Echelle : 1/500^{eme}

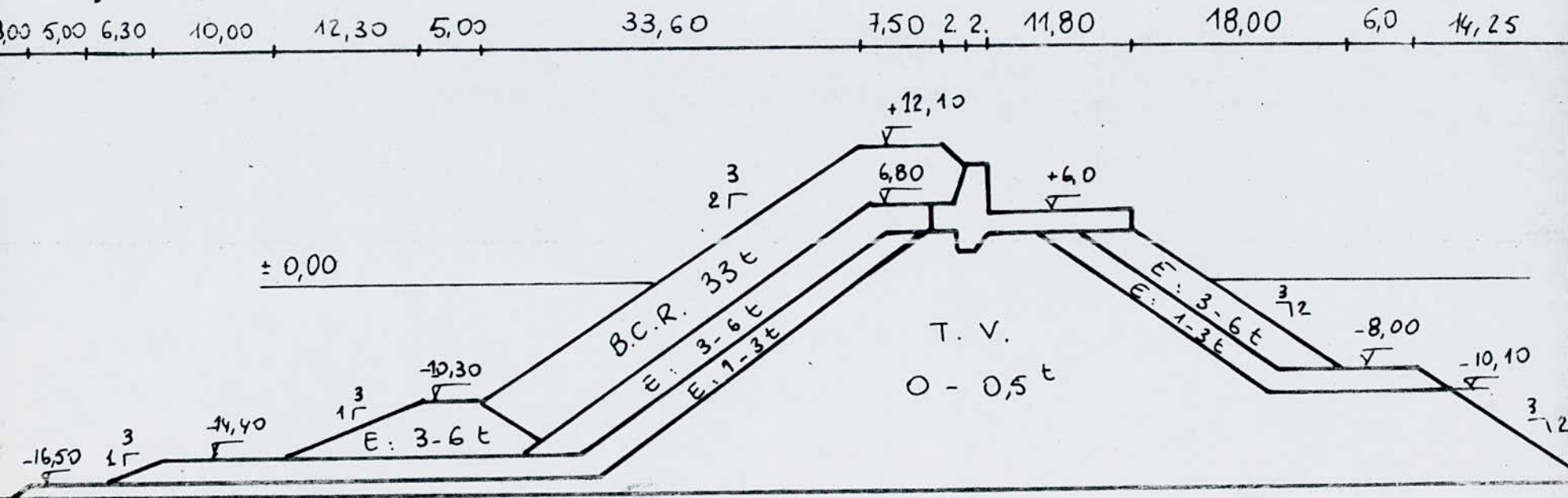


Tableau III-1 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 2 heures (nature).

N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	1.50	7.0		
2	2.00	8.0	Houle	franchissement (A)
3	3.00	9.0	de	
4	3.50	10.0	tassement	déferlement (a)
5	4.50	11.0	• un rocking apparaît, • quelques mouvements des enrochements de la butée et du tapis filtrant.	franchissement (B) déferlement (b)
6	5.50	12.0	• 2 à 3 rockings apparaissent, • commencement de l'érosion du fond, • continuation des mouvements des enrochements de la butée, • avancée de quelques enroche- ments au pied de la carapace.	franchissement (A) déferlement (b)
7	6.50	12.0	• continuation de la montée du T.V. du tapis sous la butée,	franchissement (C)
8	7.00	13.0	• chute de 1 ou 2 enrochements de la butée, • quelques rockings.	déferlement (c)
9	7.50	14.0	• formation d'une pente finale (3/1) : butée - tapis finale, • montée du tout-venant au pied de la carapace,	franchissement (D)
10	8.50	15.0	• chute de quelques enrochements de la butée et le talus intérieur,	déferlement (d)
11	10.00	15.0	• érosion du fond.	

Tableau III-2 : Résultats des essais de stabilité du profil

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 12 heures (essai d'ondurance).

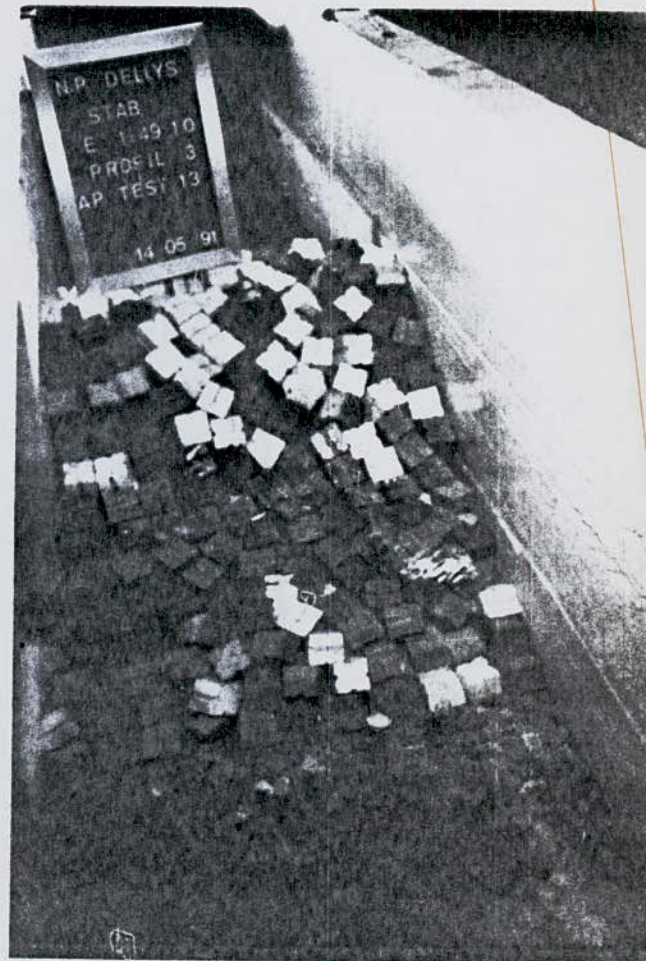
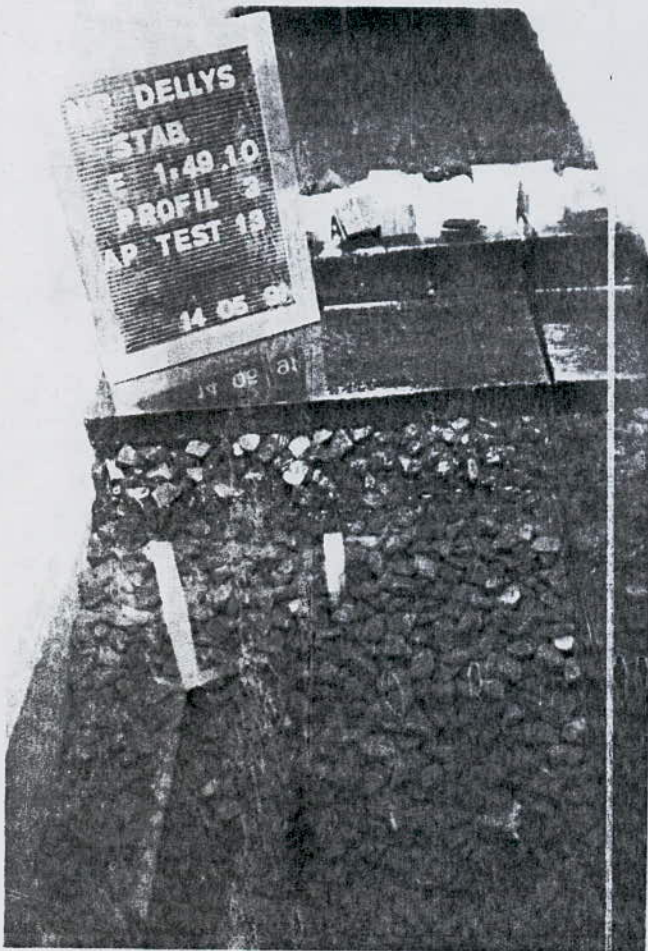
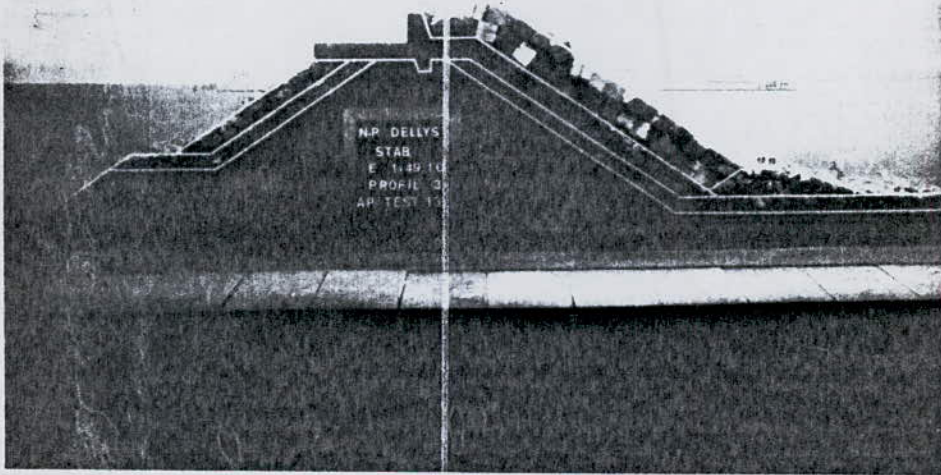
N° du test	H _m (m)	T _p (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	7.50	12.0	•pas de dégats sur la carapace,	
			•chute de 1 ou 2 enrochements du talus interieur,	franchissement (B)
			•chute de 1 ou 2 enrochements de la butée,	déferlement (b)
			•continuation de la montée du T.V. au pied de la carapace.	
2	10.20	15.0	•même état de la carapace,	
			•chute d'autres enrochements du talus interieur et de la butée,	franchissement (D)
			•formation d'une pente finale de (3/1) de la butée avec le tapis filtrant,	
			•érosion du fond avec montée du T.V. au pied de la carapace.	déferlement (d)

Tableau III-3 : Résultats des essais de stabilité du
profil

Niveau : + 1.00 m Z.H.			Durée : 2 heures (nature).	
N° du test	H. (m)	T. (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	3.50	10.0	• même état que celui des essais	franchissement (A)
2	5.50	12.0	précédents.	déferlement (b)
3	7.50	14.0	• érosion du fond avec montée du T.V. au pied de la carapace	franchissement (C)
4	9.50	15.0	• quelques chutes d'enrochements du talus intérieur.	déferlement (c)

Tableau III-4 : Résultats des essais de stabilité du
profil

Niveau : + 1.00 m Z.H.			Durée : 12 heures (essai d'endurance).	
N° du test	H. (m)	T. (s)	Observations	Franchissement Déferlement
1	7.50	12.0	• pas de dégats supplémentaires.	franchissement (B) déferlement (b)
2	10.20	15.0	• stabilité de la butée et du tapis à une pente (3/1), • quelques chutes d'enrochements du talus intérieur, • aucun dégat n'apparaît sur la carapace.	franchissement (E) déferlement (d)



Conclusion :

D'après les essais de stabilité effectués sur ce dernier profil (III), on a remarqué pour les différents éléments de la digue :

- Carapace : elle montre une très bonne stabilité avec un poids des blocs optimisé.
- Butée : il y a eu quelques chutes d'enrochements pour des houles de faibles probabilité, ainsi qu'une formation d'une pente de (3/1) entre la butée et le tout-venant, ce qui n'influe pas sur la stabilité de la digue.
- Couronnement : mêmes remarques que celles faites pour le profil précédent, il faudra cependant le dimensionner avec plus de précision.
- Noyau : il n'a subi aucun dégât, donc stable.
- Talus intérieur : il y a eu quelques chutes d'enrochements de la partie supérieure pour des houles de faibles probabilités d'occurrence, de même ceci n'influera pas sur la stabilité de l'ouvrage.
- Sous-couches : aucun dégât n'apparaît, elles sont donc stables.

Il y a eu quelques dégâts apparemment de faible importance, car ils se sont manifestés pour des houles de faibles probabilités d'occurrence, à savoir, pour des houles cinquantennale et centennale.

Ce dernier profil est optimal, cependant des conclusions sur les essais de franchissements sont nécessaires pour opter sur ce profil final de la partie courante du brise-lames.

Essai de franchissement

Tableau : A Résultats des essais de franchissement.

Niveau : ± 0.00 m Z.H.

Durée : 1 heure (échelle en nature)

Numero du test	H. (m)	Volumes déversés		Débits (m ³ /s/m.l).10 ⁻⁴
		(ml)	(m ³)	
1	4.0	pas de franchissement		0.0
2	5.0			0.0
3	6.0	50	5.9	0.6
4	7.0	1100	130.2	13.9
5	7.9	2900	343.3	36.6
6	8.5	6450	763.5	81.5

Tableau : B Résultats des essais de franchissement.

Niveau : + 1.00 m Z.H.

Durée : 1 heure (échelle en nature)

Numero du test	H. (m)	Volumes déversés		Débits (m ³ /s/m.l).10 ⁻⁴
		(ml)	(m ³)	
1	4.0	pas de franchissement		0.0
2	5.0			0.0
3	6.5	112	13.3	1.4
4	7.4	1100	130.2	13.9
5	8.5	3450	408.4	43.6

Conclusion sur les essais de franchissement :

Tout d'abord rappelons que la quantité d'eau franchie est mesurée dans un bac dont la longueur est égale à (53 cm), qui correspond, par des lois de similitude, à (26.02 m) à l'échelle nature.

Les essais sont effectués pendant une durée d'une heure, et dont le débit est obtenu par simples calculs.

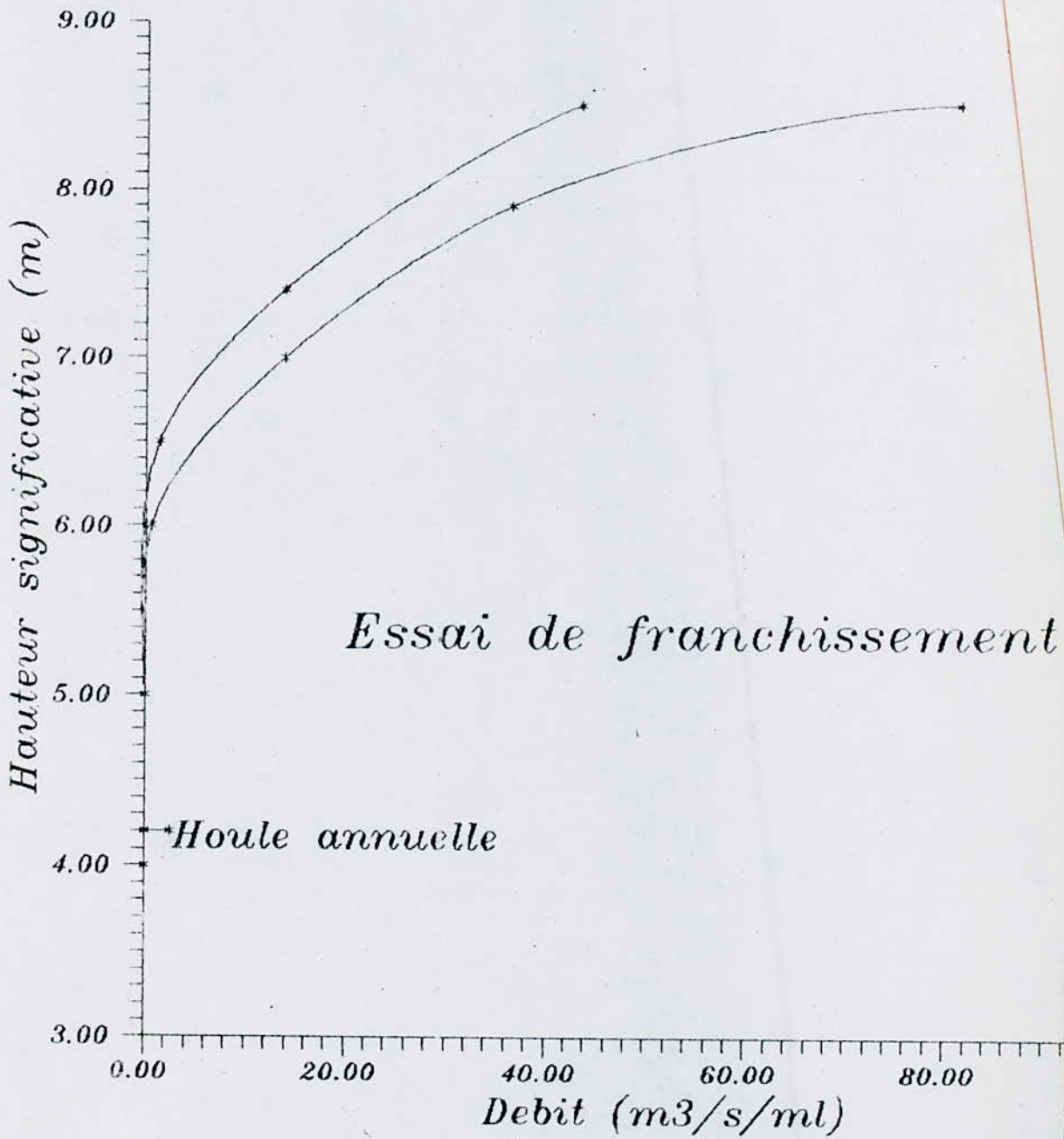
Rappelons aussi qu'un débit admissible est à respecter pour une houle annuelle, à savoir :

$$Q_{ad} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m.l}$$

Et rappelons, en fin, la houle annuelle, qui est égale à : 4.2 m.

On remarque que pour cette hauteur aucun franchissement n'est observé, donc les franchissements remarqués sont obtenus pour des houles de plus faibles probabilités d'occurrence devant la houle annuelle.

Ce qui permet de conclure : après avoir effectué les essais de stabilité ce dernier profil sera pris comme profil final de la partie courante du brise-lames de la jetée principale du Nouveau Port de Dellys.



CONCLUSION GENERALE

Jusqu'à l'heure actuelle, et dans le monde entier il est évident que les essais sur modèles réduits physiques jouent un rôle primordial dans le dimensionnement des brise-lames.

Des formules de predimensionnement des digues permettent d'avoir le premier modèle à partir duquel, seront faites des modifications jusqu'à obtention du profil optimal.

Le but de cette étude a été de déterminer le profil optimal de la jetée principale du Nouveau Port de Dellys, il a fallu pour cela les six profils suivants : (I) , (II) , (IIA) , (IIB) , (IIC) , et (III).

Le premier a été obtenu par simples formules de predimensionnement. Lors des essais il a été constaté un surdimensionnement des blocs de la carapace et une partie inférieure du talus intérieur sans intérêt pour la stabilité de la digue.

Compte tenu des remarques et des observations faites pour ce profil un second est réalisé en diminuant le poids des blocs de la carapace et en supprimant la partie inférieure du talus intérieur. Pour ce profil on a remarqué deux points importants, le premier est la stabilité de la digue entière, le second est un surdimensionnement des blocs de la carapace.

Pour les trois profils suivants, à savoir (IIA), (IIB), et (IIC), une étude de l'optimisation des poids des blocs est réalisée.

Lors de ces essais les mouvements des blocs sont suivis avec rigueur.

Il a été observé, pour ces profils, une stabilité de la carapace pour le premier, pour le second une concentration de B.C.R sur la butée avec une création d'un vide au niveau (± 0.00 m Z.H) et sans chutes de blocs, et pour le dernier des chutes de blocs montrant l'instabilité de cette carapace.

En fin un profil final deduit des profils etudies précédemment est réalisé. des essais montrent la stabilité de la digue modelisée avec quelques chutes d'enrochements du talus interieur pour des houles de faibles probabilités d'occurence (centenale).

De cette etude, une conclusion finale est obtenue, elle consiste au fait d'avoir opter pour un profil optimisé de la partie courante de la jetée principale du Nouveau port de Dellys.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- L. CHAPON "Travaux maritimes" Tomes 1 et 2
Eyrolles (1978)
- 2- R. BONNEFILLE "Cours d'hydraulique maritime" 2^{ème} édition
Masson (1980)
- 3- J. LARRAS "Physique de la houle et des lames"
Eyrolles
- 4- J. LARRAS "Cours d'hydraulique maritime et travaux maritimes"
EYROLLES
- 5- E. MARENDET "Cours de travaux maritimes" Tomes 1 et 2
E.N.T.P.
- 6- BELMERABET et ZANE "Mémoire de fin d'études de l'E.N.T.P. :
- Etude de la stabilité des blocs,
- Nouvelles formules de prédimensionnement".
- 7- RAPPORT "Etude de protection du port d'El-Kala :
Etudes hydrauliques sur modèle réduit physique"
L.E.M.
- 8- RAPPORT "Port d'El-Marsa Chlef :
Etude en canal à houle de la digue de fermeture"
L.E.M.
- 9- D. RAHMANI "Thèse de magister de l'E.N.P. :
Analyse du régime de houle sur le littoral Algérien.
Etude expérimentale des digues à talus."
- 10- A. ABDELEAKI "Séminaire national sur les sciences et technologie
de la mer :
La similitude en tant que moyen d'études"
L.E.M.

