

M0013/99A

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie Hydraulique

MEMOIRE DE MAGISTER

المركز الوطني للتوثيق
BIBLIOTHEQUE par المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

M^r BENGHERIFA Samir

Ingénieur d'état en Hydraulique de L' E.N.P.

pour l'obtention du grade de

MAGISTER EN HYDRAULIQUE

Option : Hydraulique

THÈME

**ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET
SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EQUILIBRE DU
LITTORAL SUR MODELE REDUIT PHYSIQUE**

Soutenue le 04.07.1999 devant la commission d'examen composée de:

- | | | |
|--------------------|---|--------------|
| A. KETTAB | Professeur à l'E.N.P | Président |
| M. BERKANI | Chargé de cours à l'E.N.P | Rapporteur |
| B. REMINI | Maître de conférences à l'Université de Blida | Examineur |
| S. BENMAMAR | Chargée de cours à l'E.N.P | Examinatrice |
| Z. BENZIADA | Chargé de cours à l'E.N.P | Examineur |

E.N.P 10. Avenue Hacén Badi El Harrach ALGER

RESUME

Ce travail a pour but d'étudier le comportement du fond marin sous l'action de la houle. Il s'intègre dans le cadre général de la modélisation physique des écoulements à fond mobile. Nos recherches expérimentales sur modèle réduit physique, nous ont permis de donner des conseils et recommandations pour l'exploitation des réserves sédimentaires marines, sans porter préjudices irréversibles à l'équilibre du littoral.

Mots clés: Transport solide, La houle, Modèle réduit physique, Equilibre du littoral

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة حالة قاع البحر تحت تأثير الأمواج. ينحصر في الأطار العام للتصميم الفيزيائي للبحر على سطح متحرك. الأبحاث التجريبية التي قمنا بها على النموذج المصغر سمحت لنا بإعطاء توصيات و إرشادات لاستغلال الموارد الرملية البحرية، بدون الأحلال بتوازن السواحل.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the behavior of sea-bed under the action of the swell. it is integrated within the general of physical modelling of flows with removable bottom. Our experimental research on reduces physical model, enable us to give councils and recommandations for the exploitation of the marine sedimentary reserves, without irreversible damage with littoral equilibrium .

DEDICACES



*Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance à
ma mère qui récolte ici le fruit de leur peine ; à :*

- *La mémoire de mon père ;*
- *Mes frères ;*
- *Mes sœurs ;*
- *Mes belles sœurs ;*
- *Mes neveux et mes nièces ;*
- *Mes proches amis.*

Samir

REMERCIEMENTS

- J'exprime mes remerciements et sincères reconnaissances à Mr. BERKANI M. chargé de cours à l'E.N.P, d'avoir accepté de m'encadrer durant l'élaboration de ce travail et pour son soutien moral et ses encouragements.
- Je tient à remercier vivement Mlle. BENMAMAR S. chargée de cours à l'E.N.P, pour ses aides précieuses dans des moments difficiles.
- Je remercie Mr. KETTAB A. professeur à l'E.N.P d'avoir accepté de présider le jury.
- Je remercie Mrs. REMINI B. maître de conférence à l'université de Blida, BENZIADA S. chargé de cours à l'E.N.P et Mlle BENMAMAR S. chargée de cours à l'E.N.P d'avoir accepté d'être membres de jury.
- Je remercie le personnel du L.E.M pour son encouragement et leurs disponibilités.

SOMMAIRE

Introduction	1
--------------------	---

CHAPITRE I : Généralités sur la houle et les sédiments marins

I- Terminologie marine	3
1- les mouvements de la mer	3
2- Etude théorique de la houle	4
3- Etude de la houle réelle	12
II- Les sédiments du fond marin	14
1- Diversités sédimentaires	14
2- La granulométrie et la représentation graphique des sédiments	15
3- Représentation hydrodynamique des dimensions des sédiments marins	16

CHAPITRE II : Dynamique côtière

I- Comportement des sédiments sous l'action de la houle	18
1- Mouvement orbital et courant d'entraînement dans la couche limite	18
2- Critères de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle	20
II- Profil d'équilibre de plage et leur modélisation	25
III- Système des rides	31
1- Critères d'apparition et de disparition des rides	32
2- Dimensions des rides	35

CHAPITRE III : Critères de similitude dans les modèles réduits physiques maritimes

I- Introduction	40
II- Principaux critères de similitudes	40
1- Similitude hydraulique	40
2- Similitude sédimentologique	43
3- Echelle des débits solides et des temps sédimentologiques	45

CHAPITRE IV : Modélisation physique de la dynamique côtière

I- Description du modèle physique et choix du matériau de simulation.....	46
1- Description du canal.....	46
2- Matériau choisi.....	46
II - Critère de début d'entraînement du matériau artificiel.....	46
1- Programme et résultats des essais.....	46
III- Profil d'équilibre de plage et leur classification.....	56
1-Critère de classification des profils de plage.....	58
2-Estimation du volume de la barre.....	68
IV- Système des rides.....	69
1-Processus de formation des rides sous l'action d'un mouvement oscillatoire.....	69
2-Critères d'apparition des rides.....	70
3-Dimension des rides à l'équilibre.....	74

CHAPITRE V : Recommandations pour l'exploitation des ressources sédimentaires marines

Introduction.....	88
I- Analyse des données de base.....	88
1- Cadre géographique.....	88
2- Données géotechniques.....	89
3- Données sédimentologiques.....	92
4- Données bathymétriques.....	92
5- Conditions océanographiques.....	93
II- Conception et réalisation du modèle.....	95
1- Echelle de similitude.....	95
2- Description du modèle.....	98
3- Réglage du modèle.....	98
4- Etude des souilles de dragage.....	102
Conclusion.....	108
Bibliographie.....	111
Annexe.....	114

INTRODUCTION

Introduction

Sollicitées par les multiples secteurs socio-professionnels (tourisme –Industrie), les zones côtières connaissent une pression de plus en plus forte. L'espace littoral est sureoccupé, notamment autour des grandes zones de concentration urbaine. Actuellement, les deux tiers de la population Algérienne, vie la frange littorale étroite qui ne représente que 4% de la superficie du pays [17].

Les actions que le développement, tel qu'il a été jusqu'au la opéré, ont transformé, parfois avec beaucoup de dommage (pollution, surexploitation des ressources marines, l'agression de paysage, l'érosion du milieu physique ...) le milieu naturel. Il est aujourd'hui urgent de préserver ces sites.

Comme toute forme côtière, du fait de leurs utilités socio-économiques, les côtes meubles sont de plus en plus occupées, et parfois anarchiquement exploitées. Les implantations ou autres formes d'occupation de ces milieux, à l'équilibre naturel fragile, ont parfois ignoré les contraintes d'évolutions des plages dont le sort est fatalement de reculer.

Deux principales séries de causes sont à l'origine de la fragilité des côtes de plages, celles qui relèvent de leurs évolutions naturelles, contre lesquels il est difficile de lutter et celles qui sont dues à l'impact négatif de l'occupation humaine, qu'il faut identifier pour mieux les maîtriser. D'une façon plus claire, cette dernière peut être expliquée par les interventions humaines sur le milieu naturel, au niveau de l'arrière pays littoral ou bien à proximité des zones côtières, qui ont influé sur l'évolution et l'alimentation en matériaux des zones de plages.

La politique et la gestion de l'eau sur le continent se sont traduite par la réalisation de grands ouvrages hydrauliques pour les besoins importants de l'irrigation, de l'industrie et des populations. Ces actions ont réduit remarquablement les quantités des apports solides, ces diminutions constituent donc un manque à gagner pour les zones de plages. De plus dans la période de pénurie sédimentaire que nous connaissons, l'extraction anarchique des granulats dans les zones côtières, ainsi sur le lit des cours d'eau, qui accentue le déficit des apports fluviaux, ne manque pas d'avoir des retombées sur l'évolution de ces formes côtières à

l'échelle locale et même régionale. Dans certains site on assiste à une avancée relativement rapide de la mer sur le continent. A titre d'exemple on citera le recul frappant d'une plage de la côte de Boumerdes qui a été évalué à 0.80 m/an pour la période de 1959 à 1973 et de 2m/an durant la période de 1973 à 1993.

Les principes de protection des plages, sont connus surtout pour les zones menacées de déséquilibre, où l'extraction de sable est strictement interdite. Face à cette situation et pour ces diverses raisons, il apparaît que les réserves sédimentaires marines en *Off-Shore* peuvent être exploitées afin de substituer leurs granulats aux matériaux d'origine continentale et côtière. Ainsi de répondre à la demande très importante en matériaux de constructions que l'époque moderne connaît actuellement. Il s'agit donc dévaluer les possibilités qui existent au large et surtout au voisinage des embouchures d'Oueds.

Ces extractions sous-marines demandent toute fois des études préalables sur la nature des sédiments (granulométrie, salinité et autres composants) et sur les conséquences que les dragages massifs peuvent avoir sur l'ensemble du milieu naturel (les fonds, la faune, la flore et la qualité des eaux). Actuellement, des projets d'exploitation de plusieurs gisement de sable en mer, ont été envisagés par les autorités publiques. Devant l'intérêt de ces projets des études d'impacts sur l'environnement côtier ont été entamées, ces études comporte essentiellement des études en modèles réduit physique *bidimensionnel à fond mobile*, et dans le but essentiel est de déterminer *la profondeur critique de la souille* à laquelle toute extraction de sable sera faite, sans aucune atteinte à *l'équilibre du littoral*, notamment les côtes meubles et la capacité de remplissages des souilles dans le temps.

L'étude proposée dans la présente thèse concerne la baie d'Alger où la demande des matériaux est accentuée pour la réalisation du terminal à conteneurs dans le port d'Alger. Cette étude comporte, cinq chapitres. Le premier chapitre comporte une recherche bibliographique sur la théorie de la houle et les sédiments marins, le deuxième chapitre traite la dynamique côtière en précisant la morphologie du fond marin. Le troisième chapitre relate les critères de similitude dans les modèles réduits physiques maritimes. Le quatrième chapitre traite la modélisation physique de la dynamique côtière, en précisant le choix de matériau artificiel substituant le sable naturel en modèle réduit physique, ainsi que son comportement sous l'action de la houle. Le cinquième chapitre donne *des recommandations pour l'exploitation des ressources sédimentaires marines dans la baie d'Alger, sans porter préjudices à l'équilibre du littoral*.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA HOULE ET LES SEDIMENTS MARINS

I-TERMINOLOGIE MARINE

1°/ Les mouvements de la mer

La mer est soumise à des mouvements *ondulatoires* et à des *courants généraux*. On distingue trois mouvements ondulatoires principaux, selon la périodicité et la force génératrice : *la houle*, les seiches et la marée. [23-27-33-43]

a- La houle

Les phénomènes météorologiques engendrent simultanément, sous l'effet des variations de la pression atmosphérique d'une part, et des vents d'autres part, des variations du niveau moyen de la mer et des courants. De plus, l'effet du frottement du vent sur la surface de la mer engendre des oscillations forcées par la présence permanente du vent provoquant un ébroulement de la surface de l'eau, produisant des ondes libres se propageant au delà du lieu de formation des tempêtes.

D'après J.LARRAS[27], ce sont *les ondulations les plus régulières* qui constituent ce que l'on appelle la houle, dont la période varie de 3 à 25 secondes et la hauteur peut atteindre une trentaine de mètres selon les références[23-27-33-43].

b- Les seiches

Les seiches se produisent dans certains ports avec une période variant de quelques dizaines de secondes à quelques minutes, et d'une amplitude de quelques décimètres [1]. Les seiches engendrent le phénomène de *raisonnance* à l'intérieur des bassins portuaires, la force génératrice des seiches en plus des phénomènes météorologiques (vent, variation de la pression atmosphérique), il y a le déferlement de la houle qui crée des ondes de longue durée et surélévation du niveau moyen de la mer.

c- La marée

Sous l'effet des phénomènes astronomiques (position de la terre et la lune par rapport au soleil), le niveau général des mers est affecté par un mouvement périodique avec une

amplitude qui variée entre 0.3m à 15m sur les côtes Françaises et de période de l'ordre de grandeur de la journée ou de la demi-journée. [8]

d- Les courants généraux marins

Sous l'effet des variations de température ou de densité à l'intérieur de la masse liquide, ainsi que la rotation de la terre, des courants marins sont générés, distincts des courants induits par la houle et la marée.

En terme d'énergie fournie ou dissipée par les courants marins, les seiches, la marée et la houle et en particulier en Méditerranée, cette dernière présente une énergie supérieure par rapport à celle donnée par les autres phénomènes, ce qui traduit l'importance de l'étude de la houle et son impact sur les ouvrages en mer, et malheureusement c'est la plus difficile à connaître par rapport aux autres phénomènes (les seiches, la marée et les courants).

2°/ Etude théorique de la houle

L'étude théorique de la houle consiste à rechercher une solution des équations générales de l'hydrodynamique, satisfaisant à certaines conditions sous certaines hypothèses.

La houle est considérée comme un écoulement à surface libre, dont les paramètres et les notations sont les suivants :

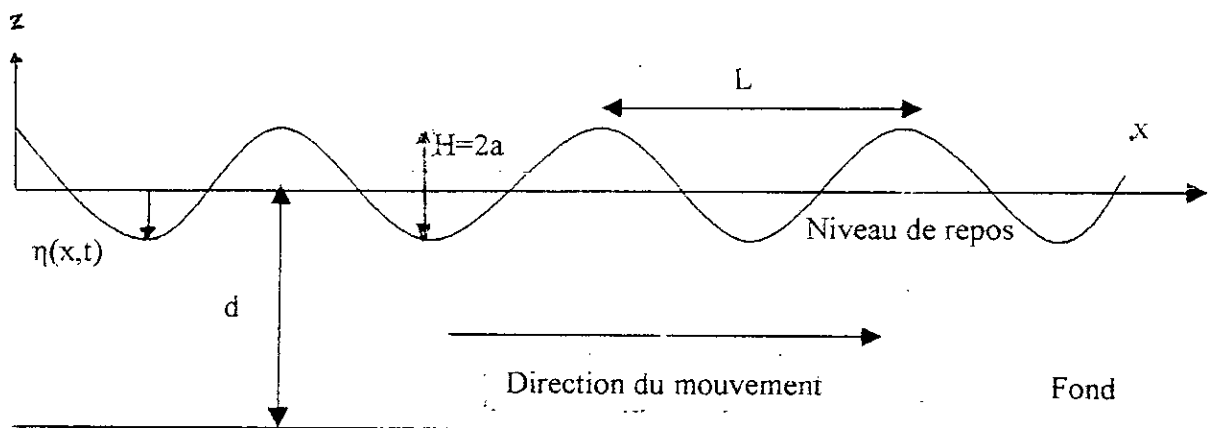


Figure II. – Paramètres et notations définissant la houle

- $H=2a$: dénivellation verticale entre la crête et le creux en m
- a : l'amplitude en m
- $C = \frac{L}{T}$: la célérité en m/s ; on a aussi $C = \frac{\sigma}{K}$ avec : $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ et $K = \frac{2\pi}{L}$

- $\gamma = \frac{H}{L}$: cambrure de la houle
- T : période de la houle en s, c'est l'intervalle de temps séparant le passage de deux crêtes successives en un point
- L : longueur d'onde en m, c'est la distance horizontale entre deux creux ou crêtes successifs
- Niveau de repos : c'est le niveau de la surface libre au repos
- Niveau moyen : c'est équidistant des crêtes et des creux
- $\eta(x, t)$: la côte de la surface libre par rapport au niveau de repos
- Vitesse des particules au point (x, z) à l'instant t :

$$\begin{cases} U(x, z, t) \text{ sur } ox \\ V(x, z, t) \text{ sur } oz \end{cases}$$

Les hypothèses simplificatrices sont :

- Le fluide est homogène et incompressible
- La seule force qui intervient est celle de la pesanteur, c'est à dire :
 - La tension superficielle est négligée (ce n'est pas le cas pour les ondes capillaires)
 - Le fluide est supposé parfait (pas de viscosité)
 - Les forces de Coriolis sont négligées (ce n'est pas le cas pour la marée)
- Le mouvement est supposé cylindrique, de génératrices perpendiculaires à la direction de propagation : on se ramène à un problème plan.
- Sur la surface libre du liquide, se propage une onde progressive périodique, où la côte de la surface libre est donnée par : $\eta = f(x - ct)$
avec : η = la côte de la surface libre
 c = célérité de l'onde

Les conditions aux limites sont :

- La pression sur la surface libre est uniforme et constante (pression atmosphérique).
- Le fond est horizontal et imperméable

Ces conditions sont insuffisantes pour déterminer le mouvement, on introduit donc des hypothèses supplémentaires qui peut être :

- Le rotationnel du mouvement est nul (houle irrotationnelle)
- Le déplacement horizontal moyen des particules liquides est nul : elles décrivent des courbes fermées ;
- La valeur du rotationnel varie avec la profondeur : c'est à dire que les orbites de particules ne sont plus des courbes fermées, par conséquent un *transport de masse* du

liquide, dans la direction de propagation de la houle, cette hypothèse est plus proche la réalité, ce sont les forces de la viscosité qui font que le mouvement a un rotationnel non nul [8,11,15,23,27,28,30,43,45].

a) Equations à résoudre

Les équations à résoudre sont :

- L'équation dynamique (Navier Stokes) :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p + \nu \Delta \vec{V}$$

- L'équation de continuité (conservation de la masse) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

- Le rotationnel :

$$\overline{\text{Rot}(\vec{V})} = \vec{0}$$

ceci implique l'existence d'un potentiel des vitesses, c'est à dire une fonction $\phi(x,z,t)$ telle

$$\text{que : } U = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad V = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

b) Différentes théories de la houle

Il existe peu de théorie donnant les expressions des grandeurs cherchées (p, u, v ou p, x, z) sous forme exacte, sans approximation. La plupart du temps, les chercheurs se limitent aux petits mouvements. Pour ce faire, ils développent les expressions donnant les caractéristiques du phénomène en fonction d'un paramètre h infiniment petit proportionnel à la hauteur des ondulations (l'amplitude $a = \frac{H}{2}$ par exemple).

Par conséquent, toute grandeur recherchée f est alors écrite sous la forme :

$$f = f_0 + f_1 h + \dots + h^n f_n + \dots$$

où f_i $i=0, n$ sont indépendante de h (en général $h=a$ ou $h = \frac{H}{L}$)

L'hypothèse des solutions dites approximatives consiste à supposer que les puissances de h supérieures à n sont négligeables. On dit qu'on a alors une solution du $n^{\text{ème}}$ ordre, les théories du premier ordre ($n=1$) sont aussi appelées théorie de «la houle linéaire» ou «infiniment petite». Toutes les théories du premier ordre sont irrotationnels. Les théories d'ordre supérieur sont appelées «les théories d'amplitude finie» [27,28,45].

Les théories les plus connues sont les suivantes :



- La théorie de GERSTNER : il s'agit d'une solution exacte en coordonnées de LAGRANGE et en profondeur infinie. Elle rend compte des phénomènes, mais admet un rotationnel de sens opposé au rotationnel réel.
- La houle d'Airy (1^{er} ordre) : en coordonnées d'EULER, elle est irrotationnelle comme toutes les houles du 1^{er} ordre.
- Les théories de STOKES : STOKES a étudié les houles irrotationnelles en coordonnées d'EULER d'ordre 1 à 5 en profondeur finie. Ces théories sont très utilisées.
- Les théories de MICHE : MICHE a développé une théorie générale de premier et deuxième approximation en coordonnées de LAGRANGE. Au premier ordre sa solution est très proche de celle de STOKES [27,33,43].
- Théorie de la houle cnoidale : proposée par KORTEW et DEVRIES (1960) [43], elle est en coordonnées d'EULER. Ce modèle est valable pour les faibles profondeurs $\frac{d}{L} < 0.1$, les solutions sont d'ordre 1 ou 2.
- Théorie d'onde solitaire : Il s'agit d'un cas extrême avec des périodes et des longueurs d'onde infinies, solution proposée par RUSSEL-SCOTT(1944), BOUSSINESQ(1871) et WEINSTEIN(1926). [43]

La houle du premier ordre (c'est à dire pour des faibles valeurs d'amplitude, H/L est petit) est valable pour toutes les profondeurs. En profondeur faible, c'est la théorie de la houle cnoidale qu'il faut utiliser. Lorsque H/L augmente, les théories de STOKES sont applicables pour des valeurs de $\frac{L^2 H}{d^3} \leq 26$.

Dans le tableau II ci dessous, nous présentons une comparaison des résultats obtenus par la théorie du premier ordre (théorie d'Airy), avec la théorie de seconde ordre donné par MICHE(1944) qui recouvrent les résultats de STOKES.

Paramètre	Théorie du 1 ^{er} ordre (AIRY) –EULER-	Théorie du 2 ^{ème} ordre (MICHE) –LAGRANGE-
1-surface libre	$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta^*$	$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{kH^2}{16} \cdot \frac{ch(Kd)}{sh(Kd)^3} (2 + ch(Kd)) \cdot \cos(2\theta)$
2-Célérité	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \cdot th\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \cdot th\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$
3-Déplacement des particules - Horizontale	$\xi = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$\xi = \frac{H}{2} \frac{chk(d+z_0)}{sh(Kd)} \cdot \sin(\sigma t - kx_0) - \frac{H^2}{4} k \cdot \frac{\sin 2k(\sigma t - kx_0)}{4sh^2kd}$ $\left(1 - \frac{3ch2k(d+z_0)}{2sh^2kd}\right) + \frac{H^2}{4} \cdot v(z_0)$
- Verticale	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{shk(d+z_0)}{shkd} \cos(\sigma t - kx_0) + \frac{H^2}{4} k \frac{sh 2k(d+y_0)}{4sh^2kd}$ $\left(1 + \frac{3 \cos(2(\sigma t - kx_0))}{sh^2kd}\right)$
4- la pression	$\frac{p}{\rho g} = \frac{H}{2} \frac{ch2\pi\left(\frac{z+d}{L}\right) \cdot \sin \theta}{ch\left(2\pi\frac{d}{L}\right)} - z$	$\frac{p}{\rho g} = \frac{H}{2} \frac{sh\left(2\pi\frac{z_0}{L}\right)}{sh\left(2\pi\frac{d}{L}\right) ch\left(2\pi\frac{d}{L}\right)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi x_0}{L}\right) + \frac{3\pi}{L} \frac{H^2}{2} \frac{shkz_0}{sh^2kd}$ $\left(\frac{shkz_0}{sh^2kd} - \frac{2chk(d+z_0)}{ch^2kd}\right) \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{T}t - \frac{4\pi x_0}{L}\right) - z_0$
5-l'énergie contenu dans la longueur d'onde et par unité de largeur en crête	$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$	$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L (1 + \alpha)$ $\alpha = f\left(\frac{H^2}{4}\right)$

Tableau I1 : Comparaison entre la théorie linéaire et la théorie non linéaire.

* : $\theta = \frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{L}$

D'après le tableau précédent on remarque bien que :

- les crêtes données par la théorie du 2nd ordre, sont plus élevées et les creux sont moins profonde par rapport à ceux données par la théorie du 1^{er} ordre, et cela est justifié par des mesures faites en nature qui montrent qu'il y a une surélévation du niveau moyen de la mer par rapport au niveau de repos, la figure I2 ci dessous montre la forme de la surface libre donnée par les deux théories :



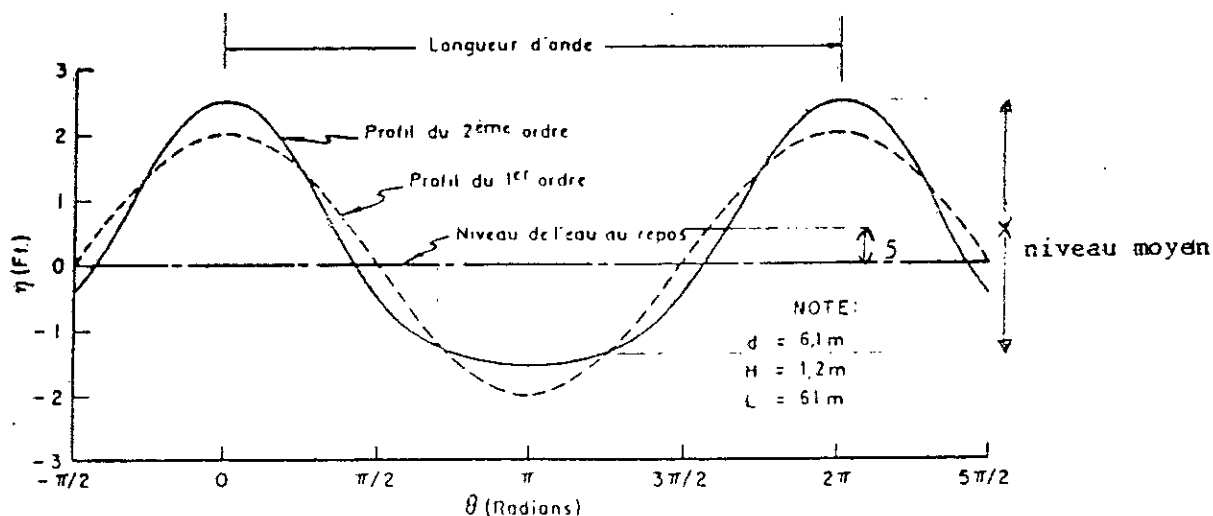


Figure 12.- Comparaison d'un profil de houle d'après la théorie de Stokes au 2^{ème} ordre avec un profil de la houle linéaire

- La célérité est indépendante de l'amplitude de la houle pour les deux théories.
- Le mouvement des particules donné par la théorie du 1^{er} ordre, est purement oscillatoire, par contre pour la houle du 2nd ordre on voit qu'aux mouvements oscillatoires des particules vient de s'ajouter un mouvement de translation horizontale, s'effectuant avec la vitesse $\frac{H^2}{4}v(z_0)$ et les trajectoires des particules ne sont plus fermées, et cela explique le phénomène de *transport de masse* qui n'est pas pris en compte dans le cas de la théorie linéaire.
- La pression donnée par les deux théories varie autour de la pression hydrostatique.
- L'énergie donnée par les deux théories est peu différente.

En conclusion, la houle de première approximation en profondeur finie est longuement utilisée. L'imprécision des mesures sur les caractéristiques de la houle fait que les approximations sont suffisantes en général. Mais cette théorie ne rend pas compte de deux phénomènes importants :

- le déferlement (forme critique de la surface libre) ;
- le transport de masse (trajectoire des particules non fermées).

Par contre la théorie d'ordre supérieur à un, tient compte de ces deux phénomènes.

c) Transformation de la houle

Lorsque la houle se propage du large vers la côte, les ondes sont influencées par le fond. Et au moment où la profondeur devient inférieure à la moitié de la longueur d'onde, ce dernier lui fait subir deux sortes de déformations à savoir[43] :

- Des déformations indépendantes des modifications de direction de propagation, c'est le cas du déferlement et autres similaires tel que le mascaret SWACH.

- Des déformations qui constituent en une altération de direction ce qui traduit les phénomènes de réflexion, diffraction et réfraction.

- **Le déferlement :**

Le déferlement est un phénomène au cours duquel l'onde est partiellement ou totalement détruite. Il est caractérisé par un haut degré de turbulence et une grande dissipation d'énergie. Selon les auteurs des références [8,15,23,27,43], ce phénomène se produit lors des éventualités suivantes :

- La vitesse des particules sur la crête de l'onde dépasse la célérité,
- La condition de pression nulle ne peut pas être satisfaite,
- L'accélération des particules sur la crête est plus grande que l'accélération de la pesanteur,
- La surface libre devient verticale.

Les auteurs n'ont pas manqué de donner des critères ou des conditions de déferlement, et la plupart d'entre eux ont lié le déferlement à une valeur maximale de la cambrure. Pour les houles progressives irrotationnelles les critères proposés sont d'après R.BONNEFILLE [8] :

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{\max} = 0.142 \quad \text{en eau profonde (MICHELL 1893)}$$

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{\max} = 0.41 \operatorname{th}\left(2\pi \frac{d}{L}\right) \quad \text{(MICHE 1944)}$$

$$\left(\frac{H}{d}\right)_{\max} = 0.78 \quad \text{eau peu profonde (MUNK 1949)}$$

Les différents types de déferlement sont récapitulés dans la figure I3 ci après :

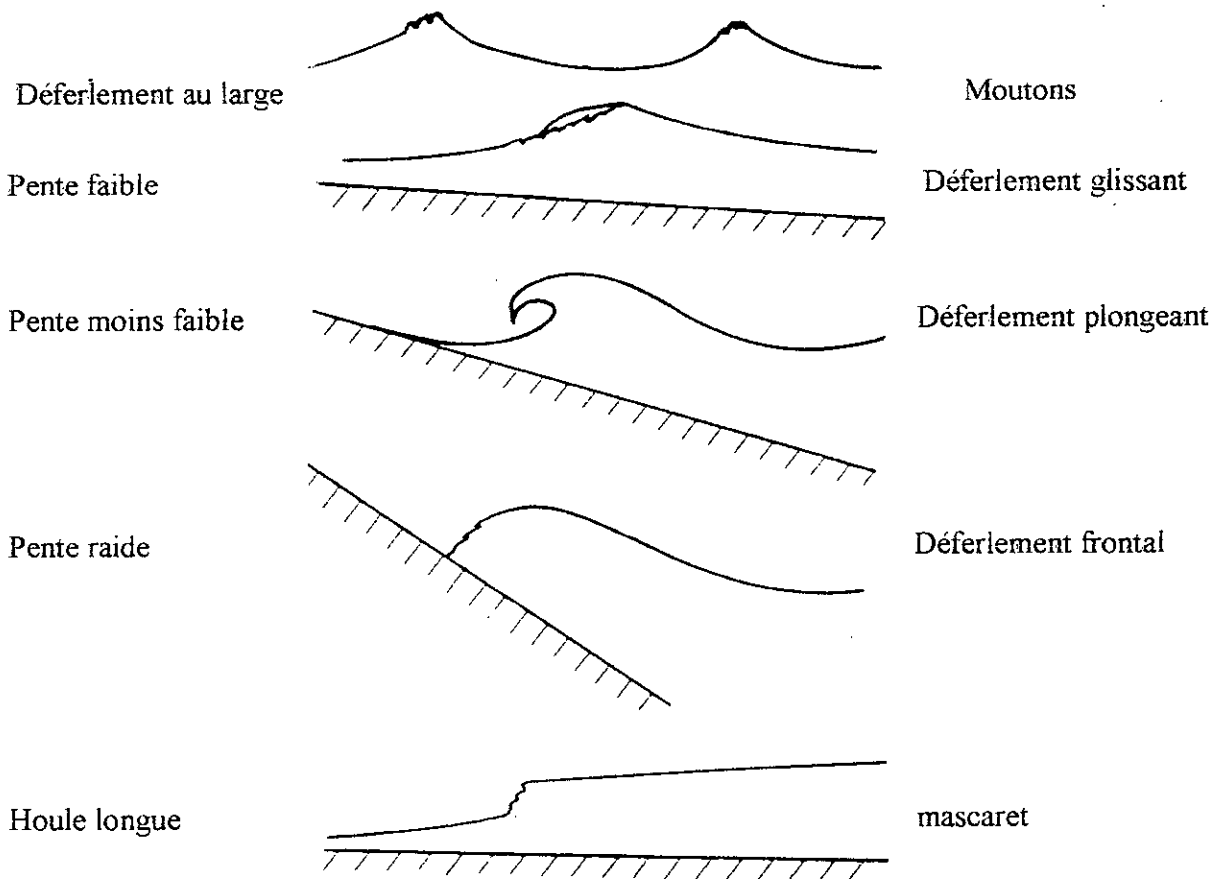


Figure I3- Différents types de déferlement

- Réfraction :

Lorsque la houle se propage du large vers la côte, les crêtes sont affectées par les faibles profondeurs, elles avancent moins vite et ne deviennent plus parallèles aux isobathes. Cette modification constitue en elle même la réfraction. Les changements de direction sont matérialisés par le tracé des cartes, qui représentent les trajectoires normales aux lignes de crêtes, et la valeur de l'amplitude est donnée par le coefficient de réfraction pour chaque profondeur et pour chaque période de la houle. Le changement de direction peut être déterminé par la relation donnée par SENNELA-HYGNES [8, 43] :

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0} = \frac{C}{C_0}$$

C, φ : indique la célérité et l'angle entre les lignes de crêtes à une profondeur donnée,

C_0, φ_0 : indique la célérité et l'angle entre les crêtes au large (eau profonde).

Le calcul du coefficient de réfraction est établi, en utilisant le principe de la conservation d'énergie entre deux lignes de niveau successive [11].

- **Réflexion :**

Lorsque la houle atteint une paroi verticale, elle se réfléchit en formant un système d'onde stationnaire, appelé «CLAPOTIT ». L'amplitude de ces ondes est sensiblement le double de celle de la houle incidente. Le calcul de la houle réfléchie rentre dans les études d'agitation à l'intérieur des bassins portuaires.

- **Diffraction :**

Le passage de la houle à travers une passe ou à proximité d'une digue unique entraîne la rotation des crêtes et une réduction de l'amplitude par diffraction. Les longueurs d'ondes et la période ne sont pas modifiées par la diffraction.

3°/ Etude de la houle réelle

En réalité la houle naturelle ou réelle n'est pas un phénomène ondulatoire simple, contrairement à la houle théorique (régulière), tous les paramètres caractéristiques tels que la période, la longueur d'onde et la célérité varient le long de la propagation de la houle qui forment en fin de compte des trains de vagues, dont l'étude fait intervenir la statistique.

D'après R.BONNEFILLE [8] et J.LARRAS [27], des spécialistes ont essayé d'interpréter et analyser la houle réelle par deux aspects statistiques différents :

- Aspect statistique descriptif,
- Aspect statistique énergétique (spectre d'énergie).

Les deux aspects permettent de décrire la houle, en précisant les caractéristiques de la houle (la houle significative, maximale, la période moyenne et la période de pointe etc...) d'un train de N vagues.

a) Aspect statistique descriptif

L'hypothèse de base de la théorie de la houle réelle est que la côte $\eta(x,t)$ de la surface libre peut être considérée comme la somme d'une infinité de grandeurs aléatoires indépendantes :

$$\eta(x,t) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} H_n \cdot \cos(f_n t + \phi_n)$$

Où les phases ϕ_n sont des variables aléatoires indépendantes supposées uniformément réparties sur l'intervalle $[0,2\pi]$ avec : $\overline{\eta(t)} = 0$ et $\overline{\eta^2(t)} = \frac{1}{8} \sum H^2 = m_0$.

D'après la référence [8], et par l'application du théorème central limite, la côte de la surface libre $\eta(x,t)$ est normalement distribuée, et les maxima de la surface libre suit :

- La loi normale pour un spectre étroit ($\varepsilon \rightarrow 1$, avec $\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$ = largeur du spectre)

et la densité de probabilité est donnée par :

$$P(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0}} e^{-\frac{\eta^2}{2m_0}}$$

avec m_n représente le moment d'ordre n.

- La distribution de Rayleigh pour un spectre large ($\varepsilon \rightarrow 0$) et la densité de probabilité des maxima est donnée par :

$$P(\eta) = \frac{\eta}{m_0} e^{-\frac{\eta^2}{2m_0}}$$

et à partir de là on peut déduire les caractéristiques d'un enregistrement de houle, en fonction du moment d'ordre zéros m_0 :

- la houle moyenne : $H_m = 2.51\sqrt{m_0}$
- la houle significative : $H_{1/3} = 4.03\sqrt{m_0}$
- la houle correspondant 1/10 supérieure des vagues : $H_{1/10} = 5.09\sqrt{m_0}$
- la valeur maximale des maxima de la surface libre d'un enregistrement de N

$$\text{vagues : } \bar{H}_{\max} = 2 \left(\sqrt{2 \log N} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \log N}} \right) \sqrt{m_0}$$

Donc en connaissant, le moment d'ordre zéros m_0 d'un enregistrement de N vagues, on peut déduire les grandeurs caractéristiques de la houle. Même chose pour le carré de la période qui suit la loi de Rayleigh, par conséquent toutes les caractéristiques de la période dans un enregistrement peuvent être déterminer.

b) Aspect statistique énergétique

Cette méthode consiste à caractériser la houle par son énergie qui doit nécessairement égale à la somme des énergies de toutes ces composantes[8]. On définit la densité spectrale $W(\omega)$ dans un intervalle de fréquence angulaire $\delta\omega$ par :

$$W(\omega) \cdot \delta\omega = \sum_{\delta\omega} H_i^2$$

Le calcul du spectre consiste à calculer la fonction d'autocorrélation $R(\tau)$, dont on prend le transformé de Fourier .

$$\text{Le moment d'ordre } n \text{ est donné par : } m_n = \int_0^{\infty} W^n \cdot W(\omega) \cdot d\omega$$

Et à partir delà, on peut déduire les caractéristiques de la houle en fonction du moment d'ordre zéro.

II- LES SEDIMENTS DU FOND MARIN

Les sédiments marins qui constituent les fonds sous les eaux de mer sont toujours dynamiques sous l'effet des mouvements de la mer, dus à l'action des courants, des vents ou des houles qui remuent et qui classent sans cesse les matériaux de fond. Les particules solides peuvent donc être arrachées du fond, entraînées en charriage ou en suspension et déposées dans les zones d'eau calme. Avant d'aborder la réalisation d'un ouvrage maritime, il est nécessaire de tenir compte des interactions possibles entre les fluides en mouvement et les matériaux solides et de prévoir les conséquences sur le littoral et les ouvrages artificiels.

L'érosion des matériaux, leur transport et leur dépôt dépendent de multiples paramètres : gradient des vitesses dans le fluide, tourbillons, géométrie des fonds, traces des rives, nature des matériaux, épaisseur sur substratum, parasite et cohésion des dépôts, caractéristiques des fluides. Ces paramètres subissent des fluctuations dans le temps et l'équilibre du littoral précaire entre les forces hydrauliques très mouvantes et des matériaux solides très mobiles.

1°/ Diversités sédimentaires

La diversité morphologique et géologique du littoral conduit à une grande variété dans les sédiments, qui seront soumis aux actions océanographiques. Le littoral pourra, suivant les secteurs étudiés, être constitués de fond rocheux sur lesquels l'action des houles et des courants sera faible et très lente, de blocs de grosses tailles tels que ceux et certains éboulis de falaises, de galets et graviers qui seront surtout remaniés et déplacés au voisinage de l'éstran, de sable plus ou moins grossier, de vases enfin dans lesquelles on fera inclure tous les éléments inférieurs à 40 μm englobant les limons, les débris végétaux provenant de la destruction herbiers ou des champs d'algues qui pourront contribuer à colmater des zones portuaires ou à des accumulations appréciables et passagères sur les plages [25].

D'une façon générale, la granulométrie des sables rencontrés sur une plage et dans la zone des petits fonds dépendra des actions de triage par les houles et les courants, le diamètre des matériaux s'affinant entre le rivage et le large avec des répartitions moyennes données ci dessous [43] (Tab. I2).

Triage granulométrique dans le profil					
Profondeur (m)	0	-5	-10	-15	-20
Diamètre D (mm)	0,25 à 0,40	0,15 À 0,25	0,10 à 0,15	0,05 à 0,12	< 0,05

Tableau I2 : Répartition des sédiments le long du profil

Les particules solides constituant les sédiments diversifiés dont la morphologie reflète un état ou un stade de l'histoire du grain, les sédiments rencontrés en nature sur les fonds marins se trouvent regroupés sous forme de mélange ayant des répartitions minéralogiques, chimiques et granulométriques caractéristiques de leur origine, de leurs conditions d'érosion et de dépôts. Ce qui permet de représenter et quantifier le taux de ces particules par plusieurs courbes et calculs des indices, fournissant ainsi des indications sur leur classement et leurs conditions de transport.

2°/ La granulométrie et la représentation graphique des dimensions des sédiments

On appelle granulométrie d'un sédiment, la distribution de la taille des grains, elle est déterminée par suite d'une analyse d'un échantillon après l'avoir pesé qui est soumis à un tamisage à sec sur une colonne de tamis de norme AFNOR. Chaque refus de tamis est pesé et reporté sur une fiche granulométrie.

Il est pratiquement impossible de trouver des granulats d'un diamètre rigoureusement uniforme dans la nature, ni même d'en obtenir par tamisage. Les courbes granulométriques permettent de déterminer la distribution de la taille des grains et d'en déduire les teneurs en différentes classes granulométriques. On adapte aussi d'autres formes de représentations graphiques telle que :

- La représentation *pondérale* : C'est une représentation des diamètres en fonction des pourcentages en poids des grains plus petit que chaque diamètre.
- La représentation *fréquentielle* (courbes de fréquence granulométrique) : Cette représentation n'est que la dérivée de la courbe précédente par rapport au diamètre.

Le diagramme correspondant peut être cartésien, logarithmique, semi-logarithmique. Les courbes permettent de distinguer :

- Sables Fin : $40\mu\text{m} < D < 200\mu\text{m}$
- Sables moyens : $200\mu\text{m} < D < 600\mu\text{m}$
- Sables grossiers : $600\mu\text{m} < D < 2000\mu\text{m}$
- Gravier : $D > 2000\mu\text{m}$

Ces courbes permettent aussi de caractériser les sédiments par :

- Les déciles : $D_{10}\%$, $D_{90}\%$.
- Les quantités : $D_{25}\%$, $D_{75}\%$.
- Le diamètre médian : $D_{50}\%$.

Qui servent au calcul des différents indices. L'étude des courbes granulométriques conduit à distinguer :

1 – Les diamètres représentatifs :

- a) le diamètre moyen du mélange, qui représente la moyenne pondérée des diamètres individuels des granulats d'après leur proportions respectives dans le mélange.
- b) le diamètre médian du mélange, qui est le diamètre égale ou supérieur à celui de la moitié des granulats du mélange.
- c) le diamètre nominal est le diamètre de la sphère ayant le même poids que la moyenne pondérée des poids individuels des granulats d'après leurs proportions respectives dans le mélange .

2 – Les indices :

a) Indice de dispersion (indice de Tarsk)

$$S_0 = \frac{D_{75\%}}{D_{25\%}}$$

Il donne l'évasement de la courbe granulométrique, il varie entre 1,5 à 3,0. Les sables normalement classés se localisent autour de $S_0 = 3$.

b) Indice d'asymétrie de SKEWNESS : Il indique le degré de classement de la courbe granulométrique de part et d'autre de son diamètre médian .

$$S_K = \frac{D_{25\%} D_{75\%}}{D_{50\%}}$$

SK > 1 : Prédominance des grains de diamètre supérieur à la médiane.

SK < 1 : Prédominance des grains de diamètre inférieur à la médiane.

SK = 1 : Symétrie par rapport à la médiane, la fonction fine est aussi représentée que la fonction grossière.

3°/ Représentation hydrodynamiques des dimensions des sédiments marins

Une particule élémentaire est caractérisée par son diamètre, sa densité, sa forme et son état de surface, on peut également définir son volume et son maître couple, c'est à dire sa surface portante lorsqu'elle tombe dans un fluide. Ces caractéristiques se trouveront réunies dans la vitesse de chute des particules, éléments fondamental pour bien représenter leurs comportements sous une action hydrodynamique.

En eau calme, une particule élémentaire tombe sous l'effet de la force de gravité en étant retenue par la traînée hydrodynamique [8-26-43]. Le poids apparent de la particule dans l'eau est :

$$P = \pi / 6 (\rho_s - \rho) g D^3$$

La traînée hydrodynamique est :

$$F = 1/2 \rho C_x (\pi D^2/4) W^2$$

à l'équilibre , on aura la vitesse limite de chute :

$$F = P \Rightarrow \pi / 6 (\rho_s - \rho) g D^3 = 1/2 \rho C_x (\pi D^2/4) W^2$$

$$D'où \quad W^2 = \frac{4}{3} \frac{gD}{C_x} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) = \frac{4}{3} \frac{gD}{C_x} \rho'$$

Le coefficient de traînée est fonction du nombre de Reynolds R_w , qui est le rapport des forces d'inerties aux forces de frottements de viscosité. La nature de régime d'écoulement est établie en fonction du mouvement relatif du fluide par rapport à la particule [8-23-43], ces différents régimes correspondent à des nombres de Reynolds bien déterminés, R. Bonnefille représente la vitesse de chute en fonction de deux paramètres adimensionnels : $R_w = \frac{WD}{\nu}$ et

$$D_* = \left(\frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot D$$

$$\text{- en écoulement laminaire : } R_w < 1 \quad C_x = \frac{24}{R_w}$$

$$W = \frac{1}{18\nu} \rho' g D^2$$

$$\text{ou} \quad R_w = \frac{\rho' g D^3}{18\nu^2} = \frac{1}{18} D_*^3$$

$$\text{- en écoulement semi-turbulent : } 1 < R_w < 1000 \quad C_x \text{ varie comme } R_w^{-1/2}$$

$$W = kD$$

$$\text{ou} \quad R_w = \frac{1}{6.25} D_*^2$$

$$\text{- en écoulement turbulent : } C_x = 0.5$$

$$W = \left(\frac{8}{3} \rho' g \right)^{1/2} \cdot D^{1/2}$$

$$R_w^2 = \frac{8}{3} D_*^3$$

CHAPITRE II

DYNAMIQUE COTIERE**I- COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DE LA HOULE**

L'action de la houle sur les sédiments du fond marin, se caractérise d'une part par l'action des mouvements orbitaires des particules liquides sur le fond, d'autre part par l'action des courants induits par la houle (courants de translation ou courant d'entraînement, courant de compensation, courant littoral et le courant d'expansion latérale).

Le processus de transport sédimentaire marin, est caractérisé en premier lieu par le début d'entraînement des grains, les éléments fins sont transportés par suspension, les éléments moyen et grossiers sont transportés par charriage.

Dans ce paragraphe, nous présentons les mouvements orbitaires du liquide près du fond, ainsi que les courants engendrés par la houle dans la couche limite, qui agissent sur les sédiments du fond. En suite nous traitons les différents critères de début d'entraînement donnés par les différents auteurs.

1°/ Mouvement orbital et courant d'entraînement dans la couche limite

Le mouvement orbital de la houle est caractérisé par la formation d'une couche limite près du fond d'épaisseur δ , cette épaisseur a fait l'objet de plusieurs recherches théoriques et expérimentales.

D'après H.Lamb 1932 [26], l'épaisseur de la couche limite laminaire est donnée en fonction de la période de la houle et le coefficient de viscosité cinématique par : $\delta = 1.3\sqrt{\nu T}$, pour un fond horizontal.

Pour P.S.Eagleson 1959 [26], l'épaisseur de la couche limite est donnée par : $\delta = 3.35\sqrt{\nu T}$; il y a aussi la formule donnée par J.Ramos Salinas en 1963 [26] qui s'écrit : $\delta = 0.56\sqrt{\nu T}$.

Ces formules, part de même principe, la seule différence est le coefficient multiplicateur qui tient en compte de la définition de la couche limite, mais les auteurs sont tous d'accord que l'épaisseur de la couche limite dépend de la période de la houle, et du coefficient de la viscosité cinématique.

Mais juste après, P.S Eagleson [26] précise que l'épaisseur de la couche limite n'est pas constante le long d'une longueur d'onde, il propose la formule suivante voir la figure II.1 :

$$\delta = 1.03\sqrt{\nu T} \left(\frac{3\pi}{4} - 2\pi \frac{x}{L} \right)^{1/2} \quad \text{pour } \frac{L}{8} \leq x \leq 3\frac{L}{8}$$

$$\delta = 1.03\sqrt{\nu T} \left(\frac{7\pi}{4} - 2\pi \frac{x}{L} \right)^{1/2} \quad \text{pour } 3\frac{L}{8} \leq x \leq 7\frac{L}{8}$$

La formulation de l'épaisseur de la couche limite donnée par P.S Eagleson, tient en compte réellement de la périodicité dans le temps et dans l'espace, ce qui présente réellement le phénomène, ce résultat a été vérifié indirectement au laboratoire, par l'obtention des valeurs de la tension tangentielle de frottement sur le fond, qu'elles conduisent à les prévoir [26].

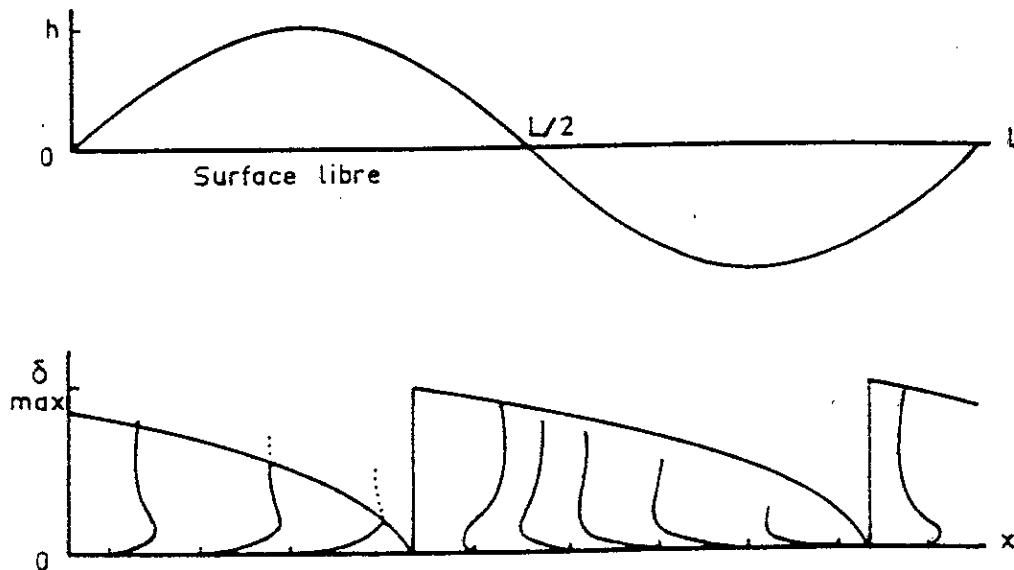


Figure II.1.- Couche limite de la houle d'après Eagleson[26]

La couche limite par sa nature, influe sur la capacité d'arrachement des particules solides sur le fond, par conséquent sur le début d'entraînement des sédiments.

G.Vincent et F.Rulleau 1957 [26], ont montré par des essais au laboratoire dans un canal rectangulaire que la couche limite est le siège d'un courant d'entraînement du liquide, dans le même sens que la direction de la propagation de la houle, qui a une vitesse maximale :

$$V_{\max} = 1.376 \cdot U_0^2 \frac{T}{L}$$

avec :

V_{\max} : la vitesse maximale du courant d'entraînement dans la couche limite

U_0 : la vitesse maximale orbitale sur le fond

Quand cette vitesse est atteinte, la couche limite devient turbulente, et le courant devient de plus en plus moins rapide, et change de direction ; à cet effet la vitesse maximale du courant d'entraînement représente un critère de passage d'un écoulement laminaire à écoulement turbulent dans la couche limite près du fond.

Les mêmes constatations ont été données par P.Lhermitte, lorsqu'il a étudié les actions réciproques de la couche limite et la couche de granulats au cours des essais au laboratoire[26-48] ; il a remarqué avec la houle de laboratoire, en augmentant l'amplitude de la houle un(e) :

- 1- Mouvement alternatif des granulats, avec une résultante dans le sens de propagation de la houle ;
- 2- Décollement de la couche limite et formation des tourbillons, avec la formation du premier bourrelet ;

- 3- Apparition de nouveaux bourrelets suivant une répartition aléatoire, évoluant vers un système de rides régulières ;
- 4- Mise en saltation générale des granulats avec instabilités des rides, lorsque l'écoulement dans la couche limite passe du régime laminaire au régime turbulent.

Les essais de P.Lhermitte, ont montré clairement que le processus de début d'entraînement des sédiments, est lié d'une façon directe à la nature de la couche limite du liquide près du fond, sous l'influence du mouvement oscillatoire et le courant d'entraînement dans la couche limite. P.Lhermite [26], et sur le plan quantitatif présente la formule ci-après, pour préciser la vitesse moyenne du courant d'entraînement limite pour laquelle, on aura un écoulement turbulent :

$$\frac{\bar{V}}{U_0} = 0.003 \left(\frac{g}{\nu^2} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{2U_0}{H} \right)^{0.6}$$

avec :

\bar{V} : la vitesse moyenne du courant d'entraînement dans la couche limite laminaire ;

U_0 : la vitesse maximale d'oscillation de la houle au contact de la couche limite ;

H : la hauteur d'eau au dessus du fond.

Un autre critère qui précise la nature de la couche limite, est donné par Huon Li [26-48] en 1954, d'après ces résultats la couche limite d'un fond couvert de granulat, qu'on fait osciller sous un liquide immobile est :

- Laminaire pour : $\frac{\delta}{D} = 2.6 \frac{\sqrt{Tv}}{D} > 30$
- Turbulent pour : $\frac{\delta}{D} = 2.6 \frac{\sqrt{vT}}{D} < 18.5$

2°/ Critères de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle

Sous l'action des courants et le mouvement orbital du à la houle, le grain est soumis à un système de forces, si la résultante des forces motrices est supérieure à la résultante des forces passives, le grain sera mis en mouvement, et cela présente le début d'entraînement des grains ; plusieurs formulations des critères de début d'entraînement, ont été proposé par plusieurs expérimentateurs qui ont essayé de caractériser ou bien définir un critère de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle, d'après notre lecture on a constaté qu'il y a trois types de formulations différentes.

- La première formulation, caractérise le début d'entraînement par la vitesse instantanée critique sur le fond à partir de laquelle le grain sera mis en mouvement ;
- La deuxième formulation, exprime le début d'entraînement par la contrainte tangentielle sur le fond ;
- La troisième formulation, fait intervenir des nombres adimensionnels présentant l'ensemble des forces qui s'exercent sur le grain.

En réalité, les formulations précédentes consistent à représenter la force critique de début d'entraînement soit, par *la vitesse instantanée* de l'écoulement sur le fond, soit par la *contrainte tangentielle critique* sur le fond ou *la vitesse de frottement étoilé* sur le fond, et la troisième formulation regroupe les deux premières formulations sous forme de *nombre adimensionnel*, qui ne constitue pas dans le fond une représentation très différente.

a) Critère de la vitesse instantanée critique du liquide

- C'est J.Larras en 1956 [26], qui a proposé le premier critère de début d'entraînement des sédiments par la houle ou par le clapotis, sous forme de formule empirique, permettant de calculer la vitesse instantanée critique de l'eau V_m pour laquelle l'érosion est provoquée, la formule s'écrit :

$$V_m - W = 95v^{1/2}(d_s - 1)^{1/3} T^{1/2}$$

où :

W : la vitesse de chute libre des particules dans l'eau calme

d_s : densité des sédiments

On remarque bien que cette formule, ne tient pas en compte les dimensions des granulats, ce qui représente un inconvénient majeur de cette formule ; à noter que J.Larras a obtenu cette formule après des essais sur des matériaux de densité entre 1.05 à 4.70 avec des diamètres de 0.06 à 4 mm ; et le régime d'écoulement est laminaire.

- G.Vincet et F.Ruellan en 1957[26-43-48], ont proposé un autre critère basé sur la notion de superposition de la vitesse du courant d'entraînement dans la couche limite et la vitesse orbitale du liquide, près de la couche limite ; ce pendant on aura le début d'entraînement lorsque la vitesse sur le fond atteint la vitesse $V_{max} + U_0$, pour un type de granulat donné et quelque soit la longueur d'onde de la houle voir la figure II2, avec :

V_{max} : vitesse maximale du courant d'entraînement dans la couche limite

U_0 : vitesse orbitale maximale sur le fond.

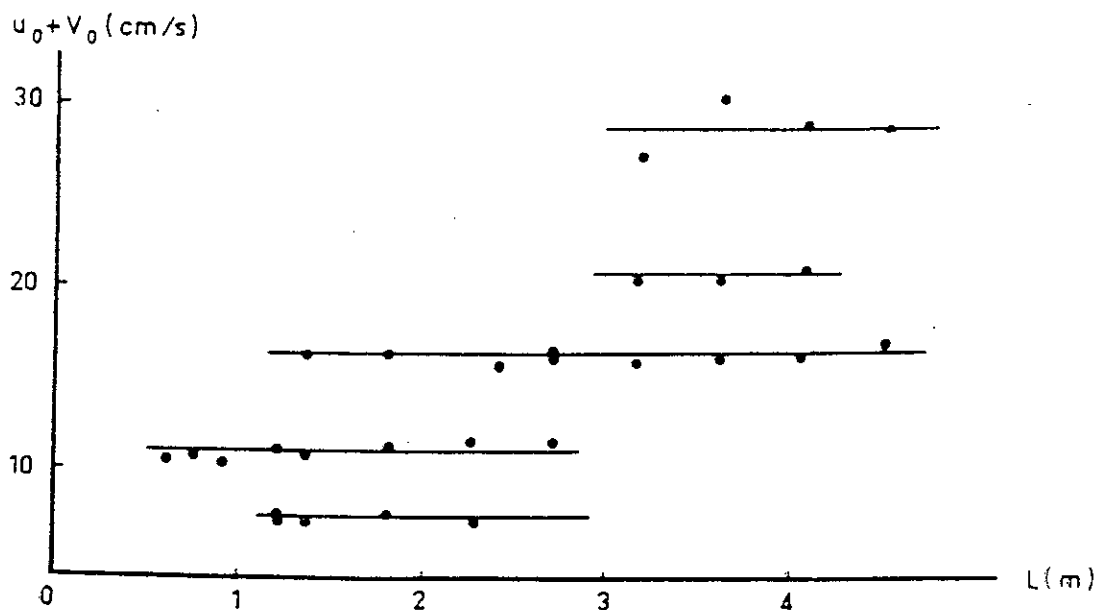


Figure II.2.- Critère de début d'entraînement proposé par G.Vincet et F.Ruellan [26]

- J.Goddet en 1960 [26], donne un autre critère, à la suite d'essais sur des houles de laboratoires sur des grains de 0.15 à 2.5mm de diamètre et 1.08 à 2.6 de densité ; le critère s'écrit :

$$V_m' = 27(\rho_s - \rho)^{2/3} D^{1/3} T^{3/8} \text{ en unité (CGS)}$$

V_m' : représente la vitesse minimale à partir de laquelle l'érosion alternative provoque un début de mouvement de grain.

J.Goddet a signalé que ce critère ne convient qu'aux houles dont la couche limite est en phase de transition(laminaire - turbulent) ; on remarque que ce critère fait apparaître à la fois le diamètre, la densité et la période.

- A partir des considérations théoriques, P.S.Eagleson, B.Glennie et J.A.Dracup en 1961 [26], ont établi le quatrième critère de début d'entraînement des sédiments, qui s'écrit :

$$D = 258.7 \frac{H_0 v^{1/3}}{g T^{3/2}} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{1 - R}{1.3 + \sin \alpha} \cdot F\left(\frac{h}{L_0}\right)$$

avec :

D : Diamètre médian des sédiments

H_0, L_0 : amplitude et longueur d'onde de la houle

α : angle du profil d'équilibre dans le point considéré

R, h : coefficient de réflexion de la houle sur le profil d'équilibre et la hauteur d'eau sur le point considéré.

$$F\left(\frac{h}{L_0}\right) = \left[\frac{2\pi h}{L_0} th^2 \frac{2\pi h}{L_0} + sh^2 \frac{2\pi h}{L_0} th \frac{2\pi h}{L_0} \right]^{-1/2}$$

J.Larras critique fortement cette formule, et même il réduit son domaine d'utilisation, seulement pour le calcul du profil d'équilibre.

b) Critère de la tension tangentielle critique sur le fond

Sous l'action des courants alternatifs développés par la houle sur le fond, les sédiments pourront subir un début d'entraînement lorsque la tension tangentielle τ_0 est suffisante pour vaincre les forces de frottements et de cohésion des matériaux sur le fond [1-4-8-20-23-27-43], la détermination de cette contrainte est basé sur l'équilibre statique limite de la particule sous l'action de son poids sous l'eau , la force de frottement exercée par le mouvement de la houle et la force de contact avec les particules voisines.

Plusieurs auteurs ont donné cette contrainte de frottement critique par[4-8-13-23-26-29-32-34-38] :

$$\tau_c = 50 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) gD$$

et la contrainte tangentielle exercée par le fluide sur la particule solide est donnée par :

$$\tau_0 = \rho U_*^2 = 1000 \left(\frac{8vU_0^2}{\pi T} \right)^{1/2}$$

avec : $U_0 = \frac{\pi H}{Tsh(2\pi d/L)}$, et la vitesse de frottement étoilé sur le fond est donnée

$$\text{par : } U_* = \left(\frac{H^2}{T^3 sh 2\pi d/L} \right)^{1/4}$$

Mais après une étude récente donnée, par L. Charrouf en 1989 à l'université de Paris II [34], le début des oscillations des sédiments sous l'action de la houle peut apparaître pour des valeurs plus faibles de la contrainte tangentielle de frottement τ_0 exercé par la houle sur les fonds que celle exercée par les courants par suite des légères sous-pressions dues aux mouvements orbitaux.

c) Critère des rapports adimensionnels

Ce critère est basé sur des rapports de forces qui s'exercent sur la particule solide, les principaux nombre adimensionnel sont :

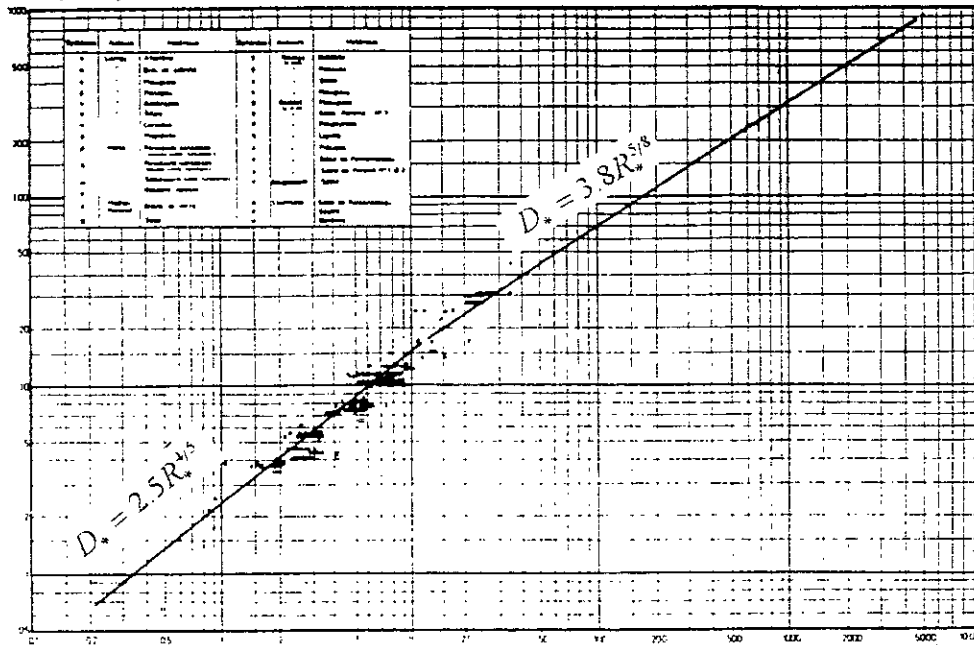
- nombre de Reynolds étoilé : $R_* = \frac{\text{forced' inertie}}{\text{forcedeviscosité}} = \frac{U_* D}{\nu}$
- Paramètre de mobilité : $M = \frac{\text{force defrottement}}{\text{force degravité}} = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gD} = \frac{\rho U_*^2}{(\rho_s - \rho)gD}$
- Diamètre sédimentologique : $D_* = \left(\frac{R_*^2}{M} \right)^{1/3} = \left(\frac{\rho g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot D$

R. Bonnefille et L. Pernecker [8-26-43], ont montré théoriquement et expérimentalement que le début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle est exprimé par la loi suivante voir la figure II.3 :

$$\begin{aligned} D_* &= 2.5 R_*^{4/5} && \text{pour } R_* < 12 \\ D_* &= 3.8 R_*^{5/8} && \text{pour } 12 < R_* < 1000 \\ D_* &= 2.7 R_*^{3/8} && \text{pour } R_* > 1000 \end{aligned}$$

Un autre critère est donné par A. Shields [12-13-14-19-26-29-43-48], utilisant le paramètre de mobilité M et le nombre de Reynolds ; ce critère est représenté dans la figure II.4. Les deux critères précédents, tiennent en compte l'ensemble des forces qui s'exercent sur la particule, et cela est confirmé par des essais aux laboratoires, sur plusieurs types de matériaux de densités différentes par plusieurs expérimentateurs ; et l'avantage d'utiliser les lois précédentes, est que les nombres R_* , M et D_* sont aussi utilisés dans la loi de début d'entraînement des sédiments sous l'action des courants.

$$D_* = \left(\frac{\rho g}{\nu^2} \right)^{1/3} D$$



$$R_* = \frac{U_* D}{\nu}$$

Figure II3.- Critère de début d'entraînement des sédiments donné par R.Bonnefille[8]

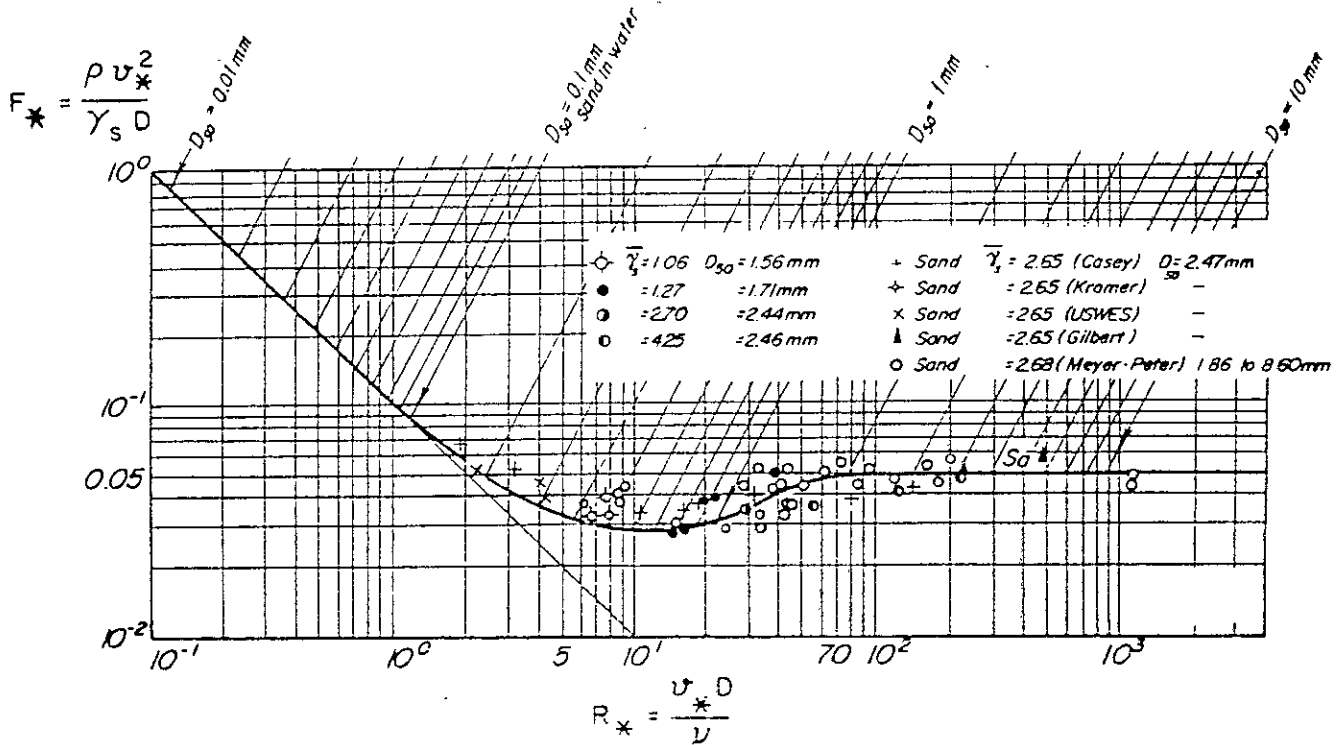


Figure II4. - Critère de début d'entraînement des sédiments donné par A.Shields[14]



II- PROFIL D'EQUILIBRE DE PLAGE ET LEUR MODELISATION

La mer passe son temps à remuer et reclasser les matériaux du fond sans arrêt. Mais on peut définir à tout instant un profil limite (dit *profil d'équilibre*) sur lequel la surface des matériaux tendrait à s'adapter si la houle conservait indéfiniment les mêmes caractéristiques et la même orientation.

Ce profil limite est caractérisé par :

- Une partie concave constamment immergée dont la pente diminue vers les grandes profondeurs et qui s'étend du plateau continental à la ligne des basses mers.
- Une partie rectiligne à faible pente, alternativement couverte et découverte qu'on appelle plage et qui s'étend à la ligne des basses mers à la limite extrême d'action des vagues à haute mer ; cette partie comporte parfois des barres de lévigation séparées par fosses de lévigation (Fig.II.5).
- Une partie abrupte constamment immergée qu'on appelle microfalaise et qui se tient à la limite extrême d'action des vagues à haute mer. La pente de chacune des parties du profil limite dépend :
 - Des caractéristiques et de l'orientation de la houle.
 - Des caractéristiques du sable.
 - Des courants (de marée ou d'autres).
 - Des points fixes (tels que le plateau continental, les massifs coralliens ou les bancs de terrain dur) auxquels le profil doit nécessairement se raccorder.

Les pentes des plages sont de l'ordre de 1 à 5 % ; elles sont d'autant plus douces que la houle est creuse et que le sable est fin et plus raide que la houle est moins creuse et que le sable est plus gros. Le sable grossier et les galets se déposent dans les parties les moins abritées à turbulence maximale, La houle d'été a tendance à regarnir la plage contrairement à la houle d'hiver.

Dans le temps, et après des mesures faites en nature, et des résultats obtenus sur modèles réduits physiques, la forme de profil de plage est connue avec une précision acceptable. D'après ces résultats, les chercheurs ont pu classer, les profils de plages en deux types bien distincts, le profil normal et le profil caractérisé par la formation de la barre [5-12-13-14-25-26-27-42-43].

JOHNSON en 1952 [14] a nommé le profil normal, profil de *beau temps* et le profil caractérisé par la barre par le profil de *mauvais temps*. Ce dernier est caractérisé par la formation de la barre et la fosse de lévigation dans la partie immergée, avec érosion de la plage (la partie émergée), par contre le profil de plage de beau temps est caractérisé par un dépôt des sédiments dans le haut plage, les deux types de profils sont représentés dans la figure II.6. Les recherches qui ont été élaboré, avaient comme but de donner des critères de classification des profils en fonction des conditions hydrosédimentaire (la houle et le sédiment), ces recherches ont montré que la forme de plage est en fonction de la cambrure de la houle, des caractéristiques des sédiments et la forme de la plage initiale. JOHNSON (1952) [14-48], exprime la forme de plage en fonction de la cambrure de la houle $C = H/L$, JOHNSON suggère une valeur critique minimale de la cambrure de la houle entre 0.025 et 0.030, pour laquelle l'apparition du profil de mauvais temps est constaté. SAVILLE (1957) [14] a noté à travers des tests sur des modèles réduits physiques à grandes échelles, que le profil des beaux temps est constaté pour des valeurs : $C = H/L < 0.025$. On remarque bien que ces deux critères ne tient pas en compte la granulométrie du fond, et grasse à RECTOR

(1954) [14], un autre critère a été proposé, $H/D50$ qui tient en compte à la fois de la granulométrie du fond (diamètre moyen $D50$) et la houle (amplitude H) pour la classification des profils de plage ; ce critère présente un intérêt très remarquable par rapport aux deux critères précédents proposés par JOHNSON et SAVILLE.

IWAGAKI & NODA (1962) [14-48], après des résultats obtenus au laboratoire, ont pu établir les critères précédents sous forme d'abaque en fonction de H/L et de $H/D50$, voir la figure II.7.

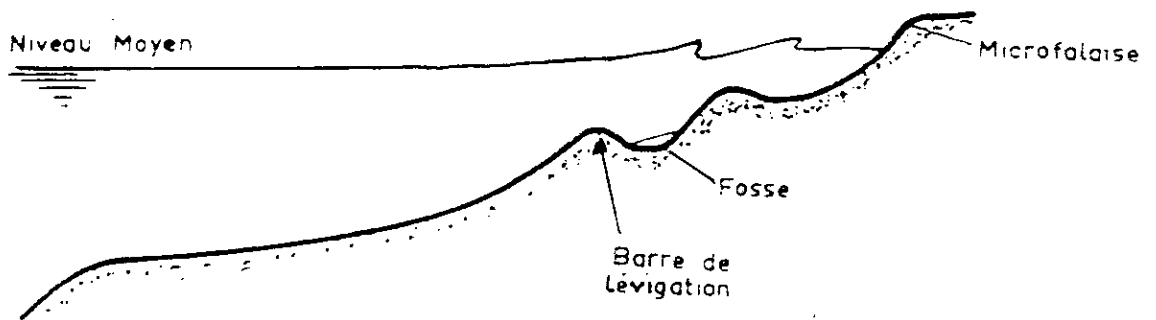


Figure II.5.- Forme générale de la plage [8]

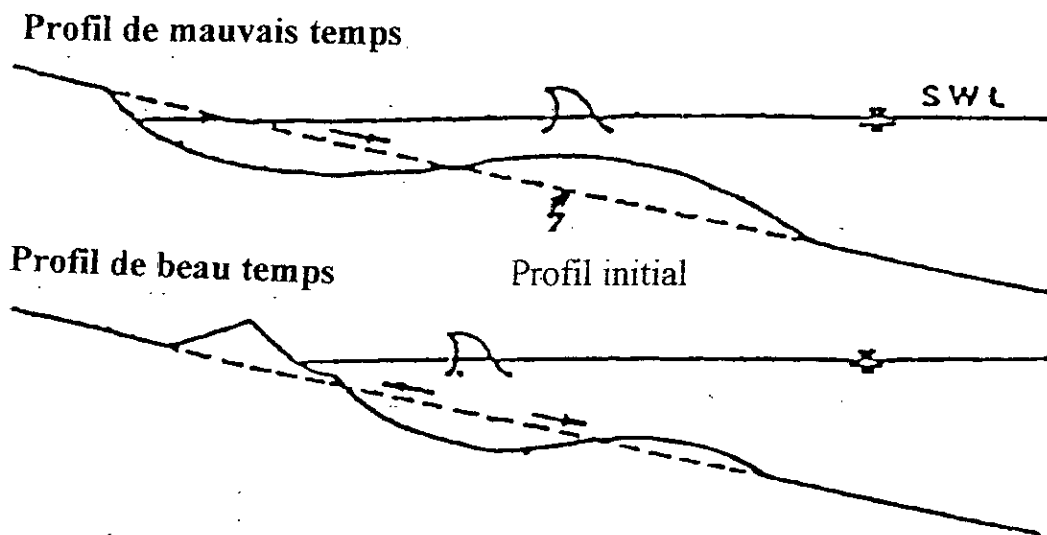


Figure II.6.- Forme des profils de plage de mauvais et beaux temps [14]

Par la suite, NAYAK(1970) [14] propose le même critère, mais il fait inclure la densité spécifique du matériau dans la classification des profils voir la figure II.8. Par la suite DEAN (1973) [14], argumente dans son modèle heuristique de transport de sable sous l'action de la houle, que la durée de suspension des particules dans un cycle de houle, influe sur la classification des plages (*beau temps/mauvais temps*) ; en d'autre terme, si la durée de chute libre de la particule dans un cycle de houle est inférieure à la période de la houle, la particule a une tendance à remonter vers le haut de la plage, par conséquent la formation d'un profil de beau temps ; et si la durée de chute libre est supérieure à la période de la houle, la particule a une tendance à se déplacer vers le large, par conséquent la formation d'un profil de mauvais temps. Le critère proposé par DEAN regroupe les paramètres proposés par Johnson, Rector et Nayak, ce critère s'écrit en fonction de la cambrure de la houle H/L et le paramètre adimensionnel $\pi W/gT$:

$$(H/L)_c = 1.7 \cdot (\pi W/gT)$$

- avec :
- W : la vitesse de chute des particules
 - T : la période de la houle
 - $(H/L)_c$: la cambrure critique à partir de laquelle le profil de mauvais temps apparaît.

Le critère de DEAN est représenté dans la figure II.9.

SUNAMURA & HORIKAWA (1974) [14-23-43-48], ont montré que le profil final de plage est affecté par le profil initial $tg\beta$ ainsi que la cambrure de la houle et le diamètre moyen D_{50} , ils ont pu classer les profils de plage en trois types voir la figure II.10 :

Type I : $H/L > 8 \cdot (tg\beta)^{-0.27} (D_{50}/L)^{0.67}$ profil de mauvais temps

Type II : $4 \cdot (tg\beta)^{-0.27} (D_{50}/L)^{0.67} < H/L < 8 \cdot (tg\beta)^{-0.27} (D_{50}/L)^{0.67}$ profil intermédiaire

Type III : $H/L < 4 \cdot (tg\beta)^{-0.27} (D_{50}/L)^{0.67}$ profil de beau temps

Le paramètre dit de plage défini par $H/g^{1/2}T \cdot tg\beta$ est suggéré par HARTORI (1980) et YANG (1981) [14], les résultats sont montrés dans la figure II.11 et la figure II.12.

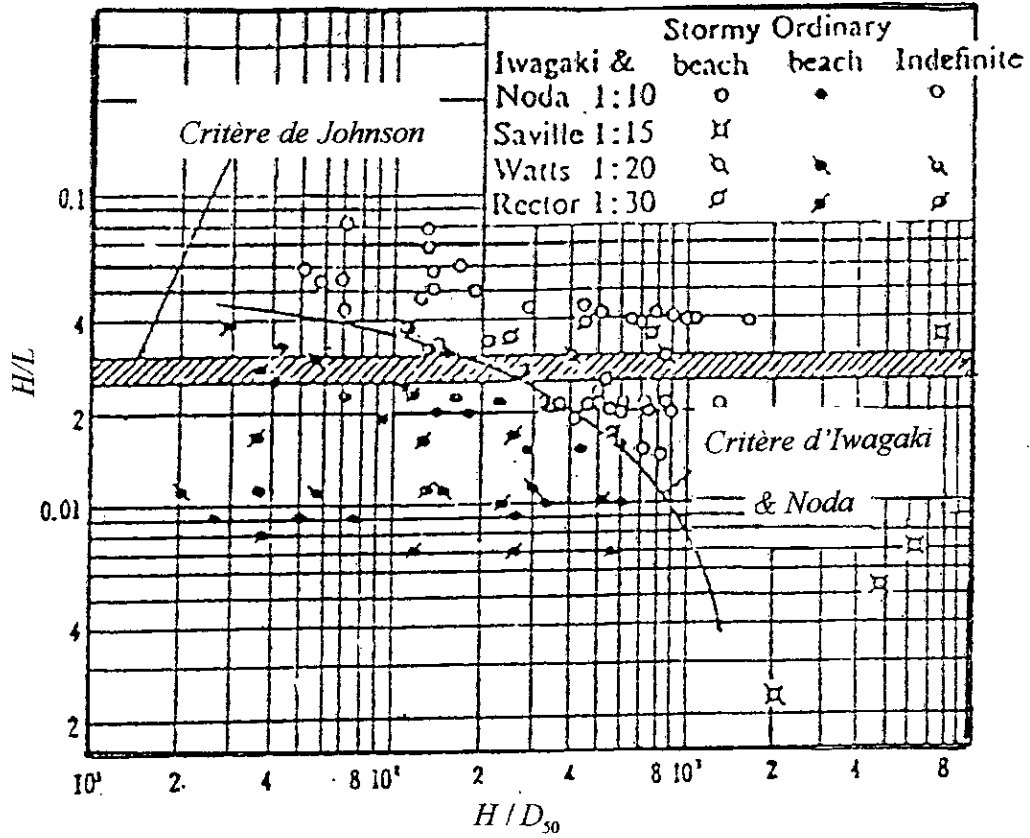


Figure II.7. - Classification des profils donnée par Iwagaki & Noda(1962)[14]

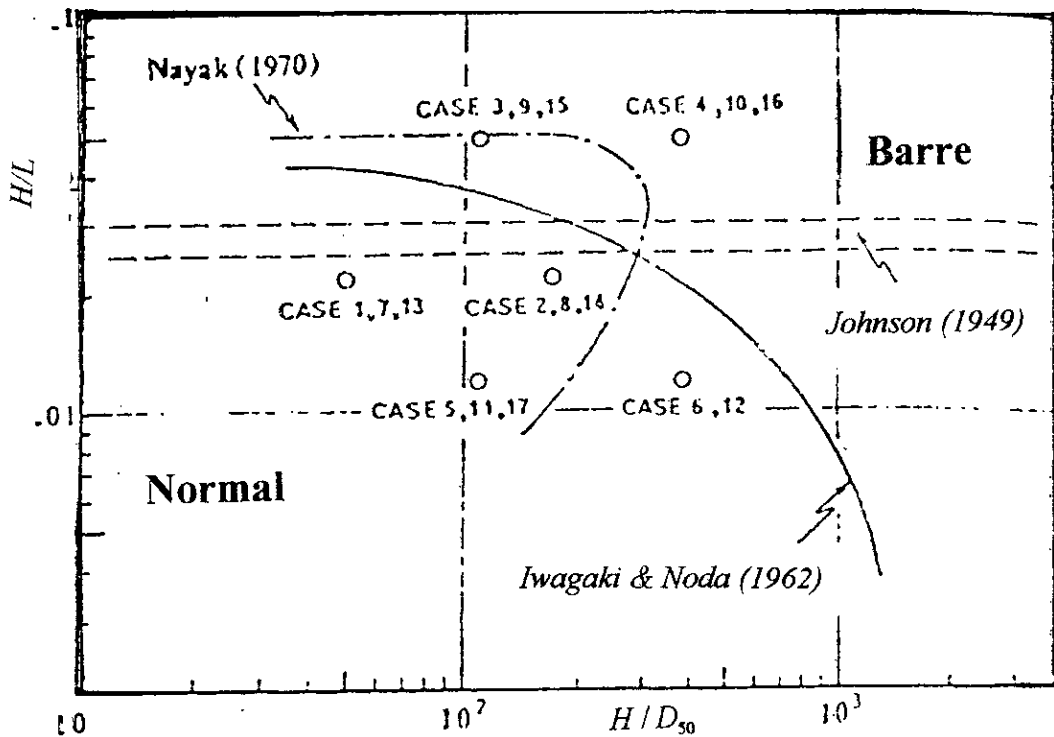


Figure II.8 - Classification des plages données par Nayak (1970)[14]

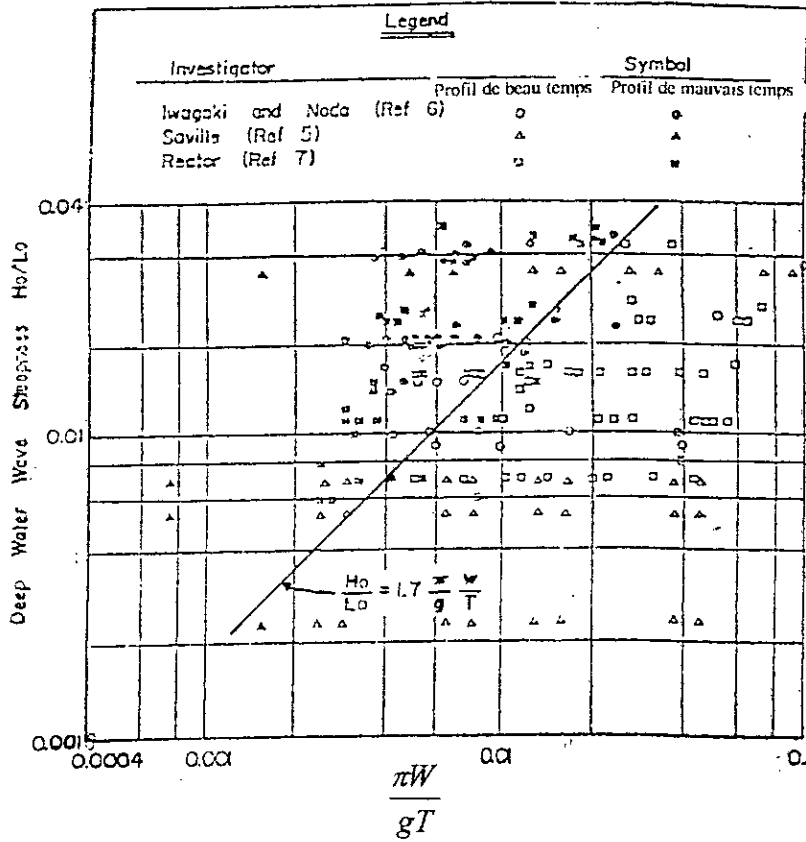


Figure II.9. - Classification de plage donnée par Dean (1973)[14]

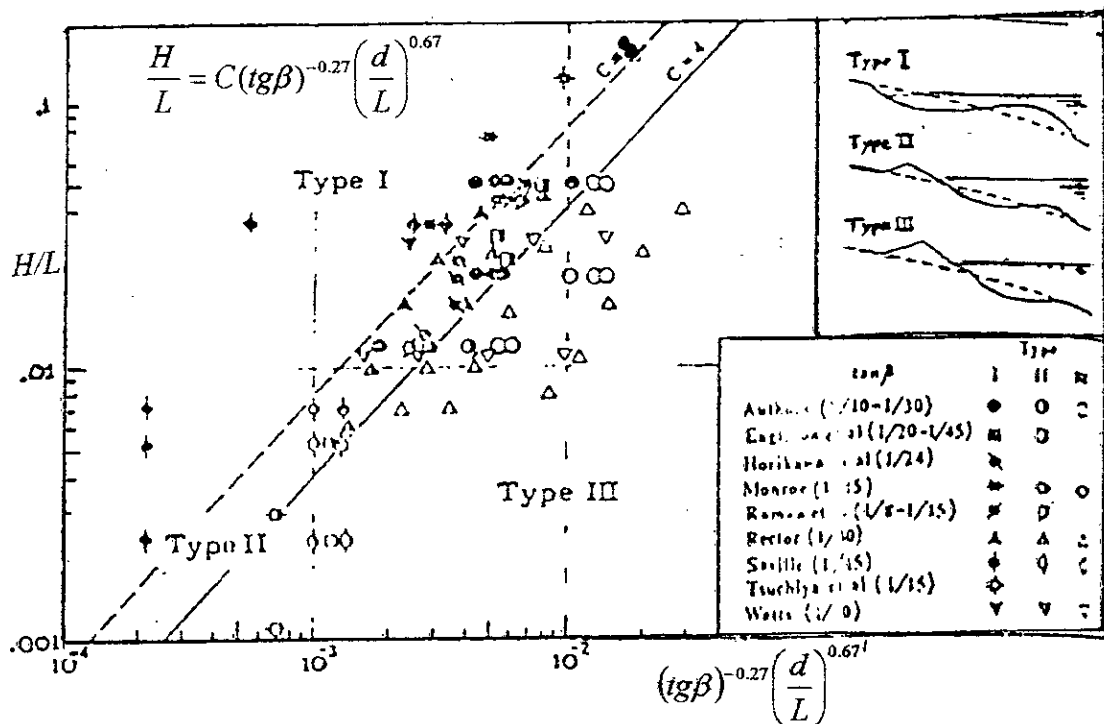


Figure II.10. - Classification de la forme de plage proposée par Sunamura & Horikawa (1974)[14]

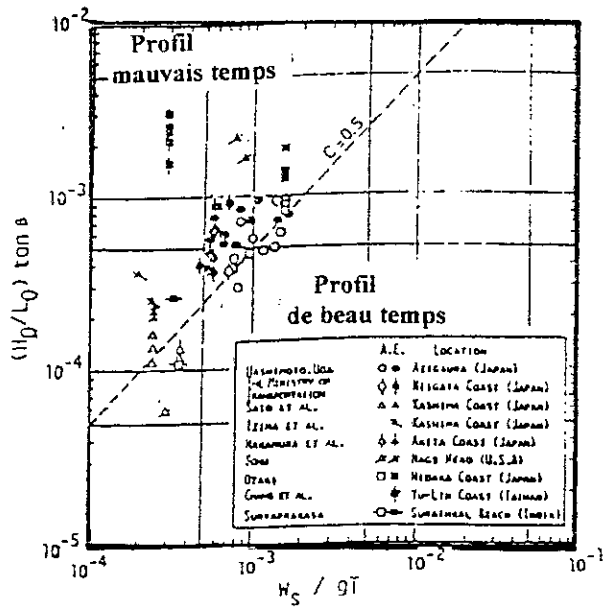


Figure II.11. - Classification de plage donnée par Harttrori [14]

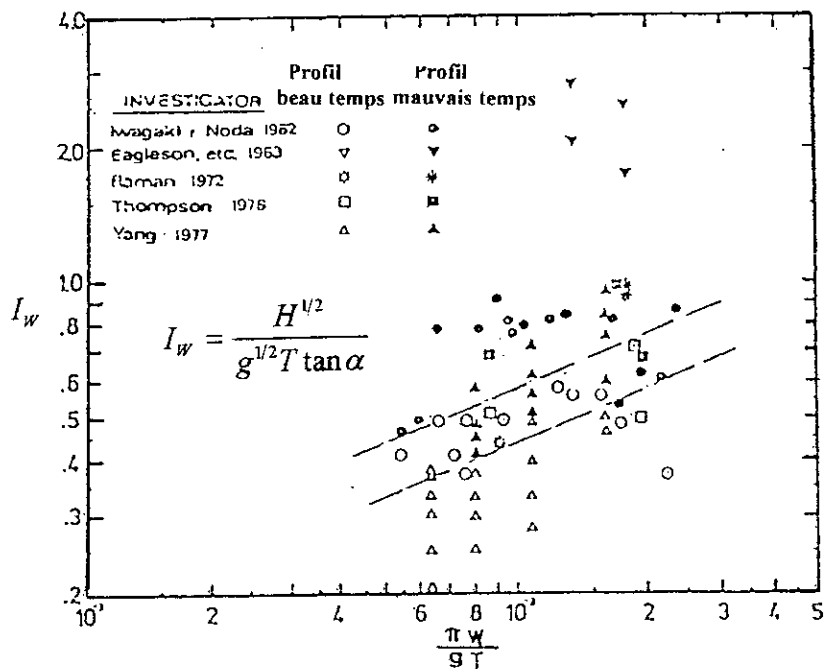


Figure II.12.- Classification de plage donnée par Yang (1981)[14]

AUTEURS	PARAMETRES	CRITERE D'APPARITION DE PROFIL DE MAUVAIS TEMPS
Johnson, 1952	H/L	$H/L > 0.025 - 0.030$
Saville, 1957	H/L	$H/L > 0.025$
Iwagaki & Noda, 1963	$H/L, H/D_{50}$	Graphe
Nayak, 1970	$H/L, H/D_{50}, \rho_s/\rho$	Graphe
Dean, 1973	$H/L, \pi W/gT$	$H/L > \pi W/gT$
Sunamura & Horikawa, 1974	$H/L, tg\beta, D_{50}/L$	$H/L = C \cdot (tg\beta)^{-0.27} \cdot (D_{50}/L)^{0.67}$, $C \sim 4 \text{ à } 8$
Wang & Yang, 1980	$H/g^{1/2} T \cdot tg\beta$	$H/g^{1/2} T \cdot tg\beta > 0.5 - 0.6$
Hartori, 1980	$H/L \cdot tg\beta, W/gT$	$H/L \cdot tg\beta > 0.5 W/gT$

Tableau II.1 : L'ensemble des critères de classification des profils de plage

III- SYSTEME DES RIDES

Lors de la propagation de la houle, les granulats sont soumis aux mouvements oscillatoires de cette dernière, des déformations régulières d'ondulations grossièrement équidistantes qui ne dépassent généralement pas quelques centimètres à quelques décimètres de longueur d'onde et quelques centimètres de creux d'après J.LARRAS[26], C.MIGNIOT [34], VAN RIJN L.C [48] et VILLARD.C [51], à noter que ces dimensions ne couvrent pas les ondulations naturelles dans les fleuves et le fond marin, car ces dernières présentent des dimensions plus grandes que ceux des laboratoires, données par les auteurs précités. Ces ondulations ont été appelées *rides d'oscillations* par opposition avec les rides d'écoulement souvent dissymétrique et du a un courant unidirectionnel. La présence des *rides d'oscillations* sur le fond, entraîne les mouvements suivants du liquide et des granulats voir la figure ci dessous :

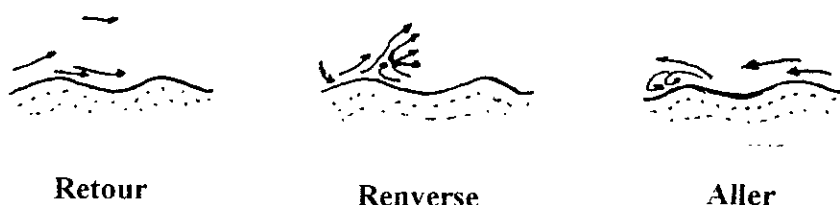


Figure II.13.- Processus de formation des rides[26]

- Le mouvement d'aller du liquide provoque la formation de *tourbillon* à l'aval de chacune des rides au cours de la première demi-période d'oscillation ;

- Les *tourbillons* par le mouvement ascensionnel, provoque une mise en suspension des particules sur la face aval de chacune des rides, et la vitesse du liquide finit par changer de sens ;
- Le mouvement de retour du liquide rabat les granulates en suspension sur les faces (devenues faces amont), qu'ils venaient de quitter, et le mouvement se poursuit par la formation de nouveaux tourbillons, dans la deuxième demi période d'oscillation [26].

L'existence d'un *transport de masse* du au mouvement oscillatoire du liquide, fait que le sens de cheminement des rides est dans le sens de propagation de la houle, ce qui rend les rides dissymétriques voir la figure II.14.

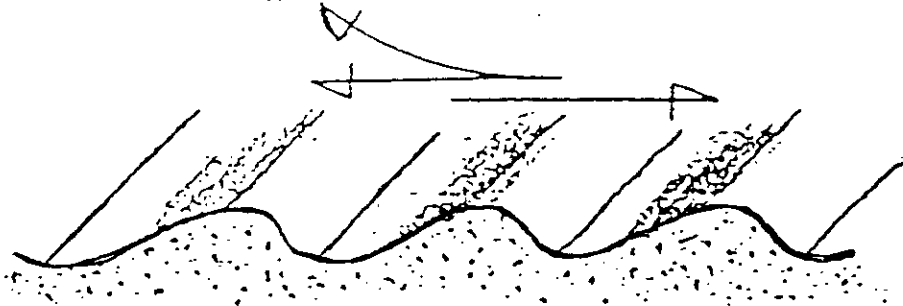


Figure II.14.- Effet du transport de masse sur la formation des rides[34]

1° Critères d'apparition et de disparition des rides

Le phénomène d'apparition des rides sous l'action de la houle a fait l'objet des recherches expérimentales par plusieurs auteurs, qui ont essayé de mettre en évidence les paramètres qui influent sur la formation des rides oscillatoires ; toutes ces recherches ont abouti à expliquer ce phénomène par l'instabilité de la couche limite, du à un passage d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent, et cela par des paramètres regroupant les caractéristiques physiques de la houle et des sédiments marins.

D'après J.LARRAS [26], l'existence d'un système de rides n'est pas compatible avec l'existence d'une couche limite laminaire, et les rides n'apparaissent que dans le cas d'une couche limite turbulente. Les granulates qui forment les rides se déplacent par roulement sur le fond pour les faibles vitesses d'oscillation du liquide, et par saltation d'une ride à l'autre pour les vitesses d'oscillation les plus élevées. Mais les rides finissent par la disparition lorsqu'on arrive à la mise en suspension générale des granulates.

Les principaux critères d'apparition des rides donnés par certains auteurs sont les suivants :

- 1- M.Manohar en 1955 [26] a proposé le critère suivant pour l'apparition des rides sur un fond animé d'un mouvement oscillatoire, sous un liquide au repos :

$$\frac{\pi A_0}{T} = 9.23(d_s - 1)^{0.4} g^{0.4} (vD_{50})^{0.2}$$

avec :

T : la période de la houle

A_0 : la longueur d'excursion du fond par rapport au liquide

d_s : la densité du sédiment

le critère de disparition des rides et le même, avec le coefficient 20.90 au lieu de 9.23.

- 2- P.Lhermitte en 1958 [26], a proposé un critère basé sur le principe de la mise en suspension des sédiments par les forces ascensionnelles d'aspiration, et les rides n'apparaissent que lorsque les forces d'aspirations sont supérieures au poids des grains immergés, le critère de P.Lhermitte ne s'applique que pour la houle progressive. Le critère s'écrit comme suit :

$$(\gamma_s - \gamma)D_{50} / \gamma = K(2\pi/\nu T)^{1/2} \cdot P^2 / \gamma_s^2$$

avec :

γ_s : poids volumique des grains

γ : poids volumique du liquide

P : la partie variable de la pression

$$K = \begin{cases} 0.0004 & \text{sur un fond horizontal} \\ 0.0001 & \text{sur un fond en pente de 1\%} \\ 0.0002 & \text{sur un fond en pente de 2 à 5\%} \end{cases}$$

Le critère manque de précision quand le fond est horizontal voir la figure II.15. La disparition des rides d'après P.Lhermitte est atteinte lorsque la mise en suspension des sédiments est générale.

- 3- J.Larras en 1963 [26-33] a proposé un troisième critère d'apparition des rides, en montrant que celle ci ne dépendait que d'une relation relativement indépendante de la période d'oscillation du liquide, entre les deux rapports sans dimension suivant :

- $\frac{U}{W}$: rapport entre la vitesse maximale U d'oscillation du liquide sur le fond et la vitesse W de chute libre des granulats dans le liquide.

- $\frac{WD_{50}}{\nu}$: nombre de Reynolds du mouvement de chute libre des granulats dans le liquide à l'échelle de leur diamètre médian D_{50} .

Ce critère présenter dans la figure II.16, présente un intérêt remarquable, car il tient compte de la nature de l'écoulement autour du grain d'une part, d'autre part, il tient en compte du rapport entre les forces d'inerties et les forces de gravités (U/W).

- 4- R.Bonnefille en 1979 [8], a proposé un quatrième critère d'apparition des rides, basé sur l'instabilité de la couche limite laminaire, cette instabilité est l'origine du changement de la configuration du fond, par la variation brusque et périodique de la vitesse orbitale sur le fond ; R.Bonnefille propose des nombres adimensionnels pour justifier l'apparition des rides, ce critère peut s'écrire comme suit :

$$D_* = 3,2R_*^{5/8} \quad \text{avec : } R_* = \frac{U_* D_{50}}{\nu} \quad \text{: nombre de Reynolds étoilé}$$

$$D_* = (\rho g / \nu^2)^{1/3} \cdot D_{50} \quad \text{: diamètre sédimentologique}$$

Ce critère tient en compte d'une manière directe, de la nature de la couche limite, en tenant compte du nombre de Reynolds étoilé R_* , qui représente le rapport entre l'épaisseur de la couche limite et les dimensions des grains.

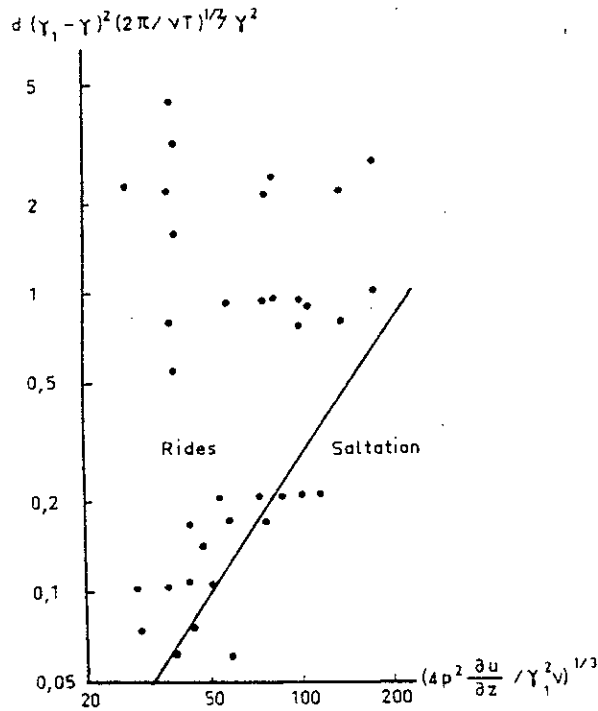


Figure II.15. – Critère d'apparition des rides selon P.Lhermite[26]

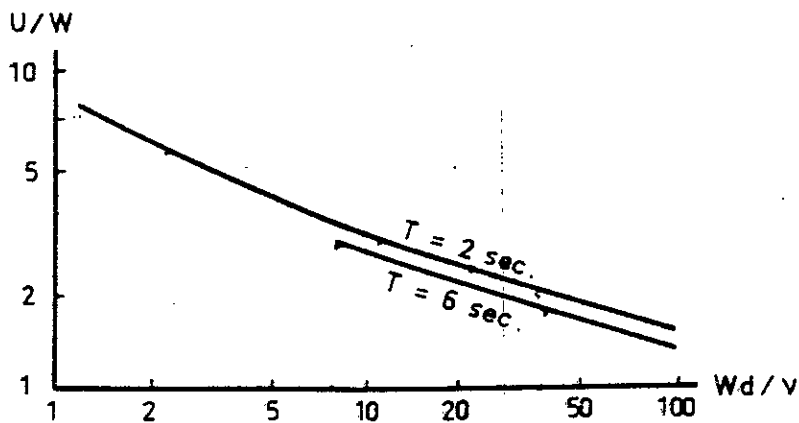


Figure II.16. - Critère d'apparition des rides proposé par J.Larras[26]

2°/ Dimensions des rides

Plusieurs auteurs ont étudié, la géométrie des rides *la longueur d'onde* λ et *le creux* δ de la ride, en fonction des caractéristiques des granulats (densité, diamètre médian des grains) et les caractéristiques de la houle (la vitesse d'oscillation sur le fond, l'excursion maximale du liquide sur le fond et la période).

Le paragraphe ci dessous relate les principaux résultats obtenus par les différents auteurs :

- 1- R.A.Bagnold (1946) et Th Scott(1954) [26], ont eu l'impression l'un et l'autre, que *la longueur d'onde* λ des rides, ne dépendait que de l'excursion maximale sur le fond A_0 du liquide dans ces oscillations sur le fond ; la même chose pour J. Larras [26] qui a arrivé au même résultat, en montrant que *la longueur d'onde de la ride* λ est de l'ordre de $0.8 A_0$, et quelle ne dépendait pratiquement pas de la densité et la granulométrie des matériaux. Mais c'est P.Lhermitte [26] qui a trouvé la solution précise du problème en montrant par des essais au laboratoire, que l'on a :

$$A_0 = k\lambda + \alpha \frac{\delta}{2}$$

- avec :
- A_0 : excursion maximale des oscillations sur le fond
 - λ : longueur d'onde des rides
 - δ : creux de la ride
 - k : nombre de ride moyen dans A_0
 - α : coefficient qui caractérise la granulométrie et la densité des granulats ($\alpha=1$ pour $D=0.28\text{mm}$
 $\alpha=2$ pour $D=0.75\text{mm}$ avec $\rho_s = 0.45$)

Cette formule de P.Lhermitte part de l'idée que les tourbillons, constituent l'élément essentiel de la formation puis du maintien des rides, et qu'on peut décomposer la longueur d'excursion A_0 du liquide sur le fond en deux parts, une part $k\lambda$ qui présente la longueur totale des k rides contenue dans cette longueur d'excursion, une autre part $r = \frac{\alpha}{2} \delta$ qui représente le parcours nécessaire pour la formation d'un tourbillon à l'aller ou au retour :

$$A_0 = k\lambda + r$$

- 2- J.LARRAS de sa part a montré en 1963 [26], que la longueur d'onde des rides ne dépend que de la vitesse maximale d'oscillation du liquide U sur le fond pour une nature de granulats, un liquide et une période d'oscillation donnée, ce critère est schématisé dans la figure II.17.
- 3- M.Manohar a montré en 1955 [26] que *le creux* δ des rides est proportionnelle au diamètre médian D des granulats et que *la longueur d'onde* λ est proportionnelle à la puissance 0,8 de ce diamètre médian D . Mais d'après J.LARRAS l'expérience ne semble pas vérifiée ces deux dimensions.

4- Nielson (1981) [48], a pu déterminer les dimensions des rides avec une précision acceptable, son travail est basé sur l'analyse des données naturelles et des expériences au laboratoire, il a conclu que :

- Le fond est influencé par les mouvements oscillatoires, et les rides du à la houle irrégulière sont plus courtes et moins épaisses par rapport aux rides du à la houle régulière.

- Les dimensions relatives des rides constatées dans la nature sont conformes, aux dimensions relatives des rides obtenues au laboratoire, en utilisant des paramètres significatifs de la houle.

Pour les conditions de laboratoire Nielson, propose les relations suivantes :

$$\frac{\delta}{A_0} = 0.275 - 0.022 \cdot M^{0.5}$$

$$\frac{\lambda}{A_0} = 2.2 - 0.345 \cdot M^{0.34}$$

pour les conditions naturelles Nielson, propose :

$$\frac{\delta}{A_0} = 21 \cdot M^{-1.85} \quad \text{pour } M \geq 10$$

$$\frac{\lambda}{A_0} = \exp\left(\frac{693 - 0.37 \ln^8 M}{1000 + 0.75 \ln^7 M}\right) \quad \text{pour } M \geq 10$$

avec : $M = \frac{U^2}{\rho \cdot g D_{50}}$ paramètre de mobilité

et

$$U = \frac{\pi H_s}{T \cdot \text{Sh}(2\pi d/L)} \quad \text{vitesse maximale d'oscillation sur le fond}$$

5- Van Rijn.C.L. en 1989 [48], et après une analyse des résultats obtenu au laboratoire avec la houle régulière et irrégulière, il exprime le creux et la longueur d'onde de la ride en fonction du paramètre de mobilité M et la longueur d'excursion maximale sur le fond A_0 . Les résultats obtenus sont :

$$\frac{\delta}{A_0} = 0.22 \quad \text{pour } M \leq 10$$

$$\frac{\delta}{A_0} = 2.8 \cdot 10^{-3} (250 - M)^5 \quad \text{pour } 10 < M < 250$$

$$\frac{\delta}{A_0} = 0 \quad \text{pour } M \geq 250$$

pour la longueur d'onde de la ride :

$$\frac{\delta}{\lambda} = 0.18 \quad \text{pour } M \leq 10$$

$$\frac{\delta}{\lambda} = 2 \cdot 10^{-7} (250 - M)^{2.5} \quad \text{pour } 10 < M < 250$$

$$\frac{\delta}{\lambda} = 0 \quad \text{pour } M \geq 250$$

Les deux modèles proposés par Nielson et Van Rijn sont donnés dans la figure II.18.

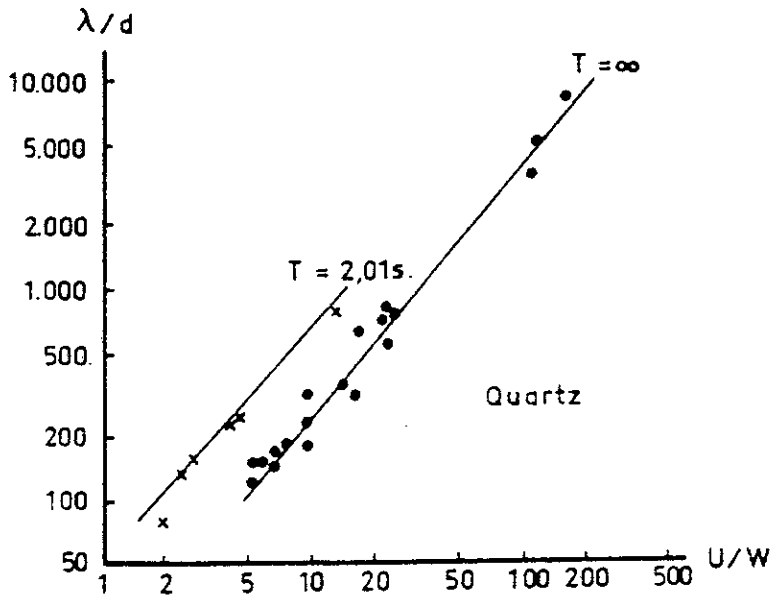


Figure II.17.- Dimensions des rides proposées par J.Larras[26]

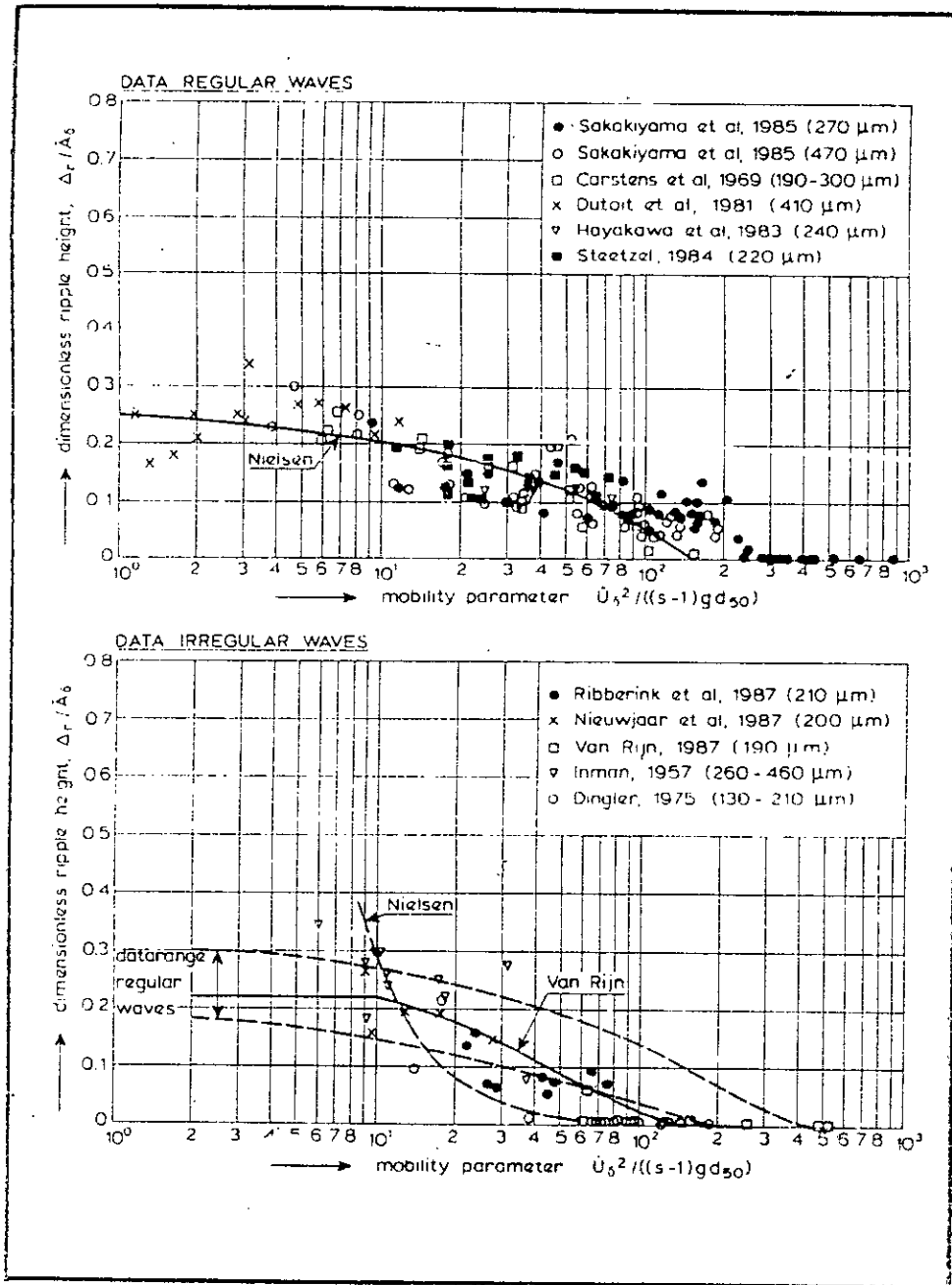


Figure II.18-a - Dimensions des rides proposées par Nielsen et Van Rijn[48]

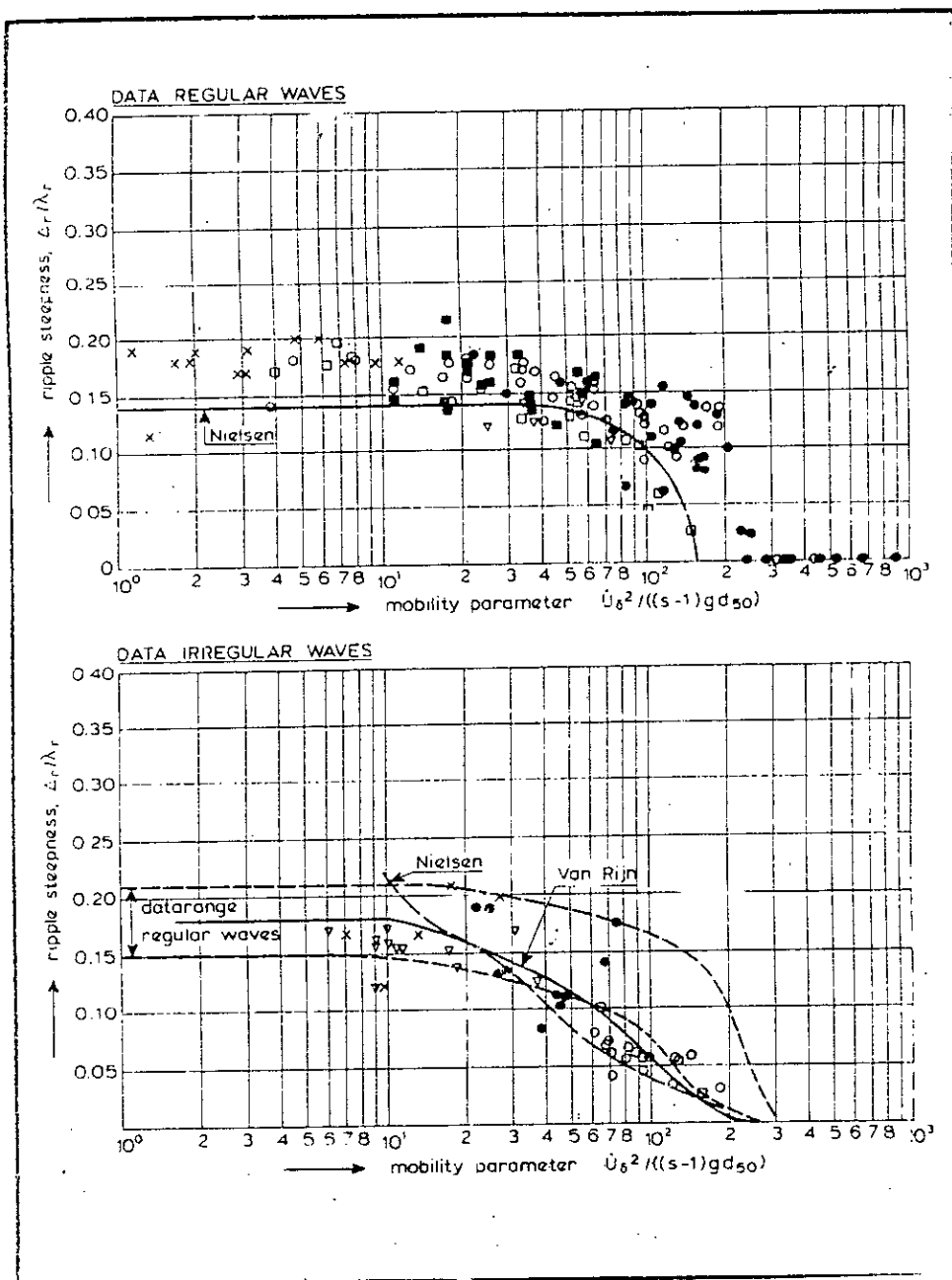


Figure II.18-b- Dimensions des rides proposées par Nielsen et Van Rijn [48]

CHAPITRE III

CRITERES DE SIMILITUDE DANS LES MODELES REDUITS PHYSIQUES MARITIMES

I- INTRODUCTION

Le milieu marin est constamment en mouvement, affecté de changement de configuration des fonds et des rivages sans cesse. Ce changement est la résultante des différentes interactions entre la phase liquide caractérisée par la houle et les courants marins, et la phase solide caractérisée par les matériaux tapissant le fond. En conséquence de ces interactions, des processus d'érosion et de sédimentation prennent naissance et engendrent par la suite des problèmes d'ensablement et d'envasement et d'affouillement dans les aménagements portuaires, et parfois l'érosion des rivages, les plus exposés aux flux d'énergie de la houle ce qui traduit parfois, par une altération irréversible de l'équilibre du littoral. Pour l'étude de tel phénomène et afin de prévoir et remédier, à ce genre de problème, les spécialistes font appel à deux types d'outils, la modélisation mathématique et la modélisation physique, et face aux difficultés rencontrées dans la modélisation mathématiques basées sur les modèles numériques, qui sont délicats à la résolution de ce genre de phénomène, le modèle physique s'avère le moyen le plus convaincant pour répondre aux questions des ingénieurs dans ce domaine. Pour mettre en évidence tous les paramètres qui interviennent dans ce genre de phénomènes, on utilise soit [7-8-9-29-23-39-43] :

- Des modèles *hydrauliques* (modèle à fond fixe) : qui servent à étudier des phénomènes hydrauliques relatifs aux écoulements des fluides à l'exclusion de tout transport solide.
- Des modèles *sédimentologiques* (modèles à fond mobile) : ils permettent d'étudier les modifications de fond dues au transport des sédiments.
- Des modèles *mixtes* : qui font intervenir les deux modèles à la fois.

II- PRINCIPAUX CRITERES DE SIMILITUDE

1°/ Similitude hydraulique

La modélisation de la *dynamique côtière* sous l'action de la houle, doit s'effectuer en respectant à la fois la similitude géométrique de la zone côtière (prototype), la similitude du régime de la houle et la similitude des conditions d'érosion et de sédimentation du fond

marin, c'est à dire qu'il est nécessaire dans la mesure du possible de garantir le maximum de similitude entre *le modèle et le prototype*.

Le processus d'établissement des conditions de similitude peut s'effectuer par deux procédés basé sur deux principes [3-43] :

- Le premier est le plus sûr, il consiste à appliquer le principe d'homogénéité aux systèmes d'équations qui régissent les lois élémentaires des phénomènes étudiés (pour le cas de la dynamique côtière, les équations à homogénéisées sont : l'équation de Navier Stokes, et les équations régissant le mouvement des sédiments) ; en appliquant ce principe aux systèmes d'équations qui régissent le phénomène, on pourra en ce moment déduire les relations d'échelles des différentes grandeurs physiques, qui servent par la suite à l'extrapolation des données naturelles sur le modèle réduit [7].
- Le deuxième procédé utilise l'analyse dimensionnelle et le théorème des π de Vaschy-Buckingham [3-22-29-43]. Ce théorème indique que toute loi physique exprimée avec des grandeurs physiques, peut être écrite avec des termes indépendants sans dimensions, et si ces termes sont égaux entre *le modèle et le prototype*, on aura la similitude complète ; donc il suffit de recenser les grandeurs physiques, et déduire les nombres adimensionnels, pour tirer l'ensemble des échelles de similitude. Ce procédé présente l'inconvénient, de ne pas donner une indication sur l'importance de chaque paramètre.

Or comme on ne peut pas satisfaire une similitude parfaite, mais seulement une similitude approchée, en négligeant certains paramètres ayant une faible importance par rapport aux autres, le premier procédé doit être préféré, car il permet de mieux utiliser les connaissances théoriques et empiriques confirmées.

La similitude hydraulique consiste à respecter en premier lieu, la similitude géométrique telle que les dimensions linéaire en modèle et celles du prototype, sont en rapport constant

$\lambda = \frac{L_m}{L_p}$, certains type de modèle sont distordu et l'échelle géométrique en plan est différente

à celle des hauteurs : $\Delta = \frac{\lambda_h}{\lambda_L}$; cela est appliqué en général pour les modèles sédimentologiques, comme notre cas, pour éviter le phénomène de capillarité et une reproduction des conditions aux limites.

La similitude dynamique, impose que le rapport des forces agissant sur des parties homologues des deux systèmes, est constant $\lambda = \frac{F_m}{F_p}$. Dans les écoulements à surface libre, les

forces agissantes sont :

$$F_g = \varpi L^3 \quad \text{force de pesanteur}$$

$$F_v = \mu \Omega \frac{dV}{dn} = \mu L V \quad \text{force de frottement du à la viscosité}$$

$$F_t = \sigma L \quad \text{force de tension superficielle}$$

$$F_r = f \frac{\varpi}{g} L^2 V^2 \quad \text{force de frottement du à la turbulence}$$

$$F_i = \frac{\omega}{g} L^2 V^2 \quad \text{force d'inertie}$$

Par l'application de la deuxième loi de Newton, l'équation qui régissent le mouvement de la houle est la suivante :

$$\overline{F_i} = \overline{F_g} + \overline{F_t} + \overline{F_v} + \overline{F_r}$$

la condition de similitude dynamique totale s'écrit alors :

$$\lambda_{F_i} = \lambda_{F_g} = \lambda_{F_t} = \lambda_{F_v} = \lambda_{F_r}$$

si on fait comparer les échelles de l'ensemble des forces par rapport à l'échelle des forces d'inertie on trouve :

$$\frac{\lambda_{F_i}}{\lambda_{F_g}} = \frac{\lambda_{F_t}}{\lambda_{F_t}} = \frac{\lambda_{F_v}}{\lambda_{F_v}} = \frac{\lambda_{F_r}}{\lambda_{F_r}} = 1$$

ce qui donne :

$$\frac{\left(\frac{V^2}{gL}\right)_m}{\left(\frac{V^2}{gL}\right)_p} = \frac{\left(\frac{\rho V^2 L}{g\sigma}\right)_m}{\left(\frac{\rho V^2 L}{g\sigma}\right)_p} = \frac{\left(\frac{VL}{\nu}\right)_m}{\left(\frac{VL}{\nu}\right)_p} = \frac{(f)_m}{(f)_p} = 1$$

et comme :

$$\frac{V^2}{gL} = F^2 \quad \text{est le nombre de Froude}$$

$$\frac{\rho V^2 L}{\sigma} = We \quad \text{est le nombre de Weber}$$

$$\frac{VL}{\nu} = Re \quad \text{est le nombre Reynolds}$$

f est le coefficient de frottement (rugosité ou coefficient de traîné)

Donc on se ramène à respecter les quatre critères précédents, chose qui est difficile à réaliser, mais fort heureusement, dans la majorité des problèmes pratiques d'hydraulique, en particulier le cas de la propagation de la houle, on peut admettre des simplifications.

Tout d'abord les forces de tension superficielle, sont négligeables devant les autres forces dans le prototype, il suffit qu'il soit ainsi dans le modèle pour ne pas avoir tenir le critère de Weber et, pour cela, il faut choisir une échelle géométrique suffisante.

En ce qui concerne le critère de Reynolds, on sait bien que les écoulements à surface libre, les pertes de charge sont dues surtout à la turbulence à partir d'un certain nombre de Reynolds, ce qui nous amène à prendre seulement le critère de Froude et le critère du coefficient de frottement, tout en assurant que le nombre de Reynolds est supérieur à la valeur critique(écoulement turbulent) dans le modèle.

Le problème de similitude du coefficient de rugosité sur les modèles est un problème très délicat, et l'on cherche toujours à ajuster ce paramètre par tâtonnement sur le modèle en cherchant la rugosité qui reproduit le même effet que celui observé dans la nature. Donc seul, le critère de Froude qui reste à appliquer, ce qui nous permet de donner les échelles des autres paramètres physiques, en fonction des échelles géométriques :

$$\lambda_{F^2} = \frac{\lambda_{\nu}^2}{\lambda_h} = 1$$

D'où l'échelle des vitesses : $\lambda_v = \sqrt{\lambda_h}$

Par conséquent l'échelle des temps : $\lambda_t = \frac{\lambda_h}{\lambda_v} = \sqrt{\lambda_h}$

On peut se limiter alors, à la similitude selon le critère de Froude, pour la simulation de la houle sur les modèles réduits physiques, tout en négligeant les forces de tension superficielle et les forces de viscosité par rapport aux forces d'inertie, de gravité et de frottement dus à la turbulence. Mais la similitude n'est complète pour les modèles sédimentologiques que lorsque, en tient en compte sur modèle de la déformation de la houle par déferlement et par réfraction :

- Le déferlement de la houle est respecté sur modèle, si l'échelle des hauteurs de la houle soit, égale à l'échelle des profondeurs :

$$\lambda_H = \lambda_h$$

- La réfraction de la houle est respectée en modèle, si l'échelle des longueurs d'onde de la houle est égale à l'échelle des profondeurs :

$$\lambda_L = \lambda_h$$

2°/ Similitude sédimentologique

De plus des critères de la similitude hydraulique, le modèle à fond mobile doit tenir compte des critères de similitude de l'évolution et de déformation des fonds, en choisissant un matériau artificiel dont le comportement sous des actions hydrodynamiques en similitude, soit analogue à celui des sables naturels. Cependant la réalisation d'un modèle sédimentologique semblable au prototype répond aux exigences suivantes :

- le début d'entraînement des sédiments survient en des points homologues pour des conditions hydrauliques semblable, cela revient à respecter *le critère de début d'entraînement des sédiments* sous l'action de la houle, en conservant la loi de début d'entraînement donnée par R.Bonnefille et L.Pernecker [8-26-34-43] :

$$D_* = f(R_*)$$

- Lorsque les particules solides se déplacent en suspension, en plus de la condition de similitude de mise en mouvement, il peut être parfois nécessaire d'imposer aux particules solides de décanter, suivant des trajectoires homologues dans le modèle et la nature, cela nous amène à respecter la loi de décantation des particules donnée par R.Bonnefille, qui s'exprime en fonction de diamètre sédimentologique D_* , et de nombre de Reynolds R_w lié à la vitesse de chute libre des particules en eau calme.

À travers ces critères, on détermine les échelles des dimensions des grains artificiels ainsi que l'échelle de la densité du matériau artificiel.

- L'échelle de débit solide soit connue, ainsi que l'échelle des temps sédimentologiques.

a) Similitude de début d'entraînement des sédiments

La conservation des deux nombres adimensionnels R_* , D_* en rapport constant entre le modèle et la nature, assure théoriquement d'avoir la similitude de début de mouvement des

sédiments entre le modèle et le prototype. On peut déterminer l'ensemble des échelles de similitude soit, on impose :

$$- \lambda_{D_s} = 1 \text{ et } \lambda_{R_s} = 1 \quad \text{ce qui donne : } \lambda_{\gamma_s}^{1/3} \cdot \lambda_D = 1 \text{ et } \lambda_h^{1/8} \cdot \lambda_D = 1$$

par conséquent, on peut exprimer l'échelle des diamètres λ_D et des hauteurs λ_h en fonction de l'échelle des densités λ_{γ_s} :

$$\lambda_D = \lambda_{\gamma_s}^{-1/3} \quad \text{et} \quad \lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{8/3}$$

soit :

$$- \lambda_{D_s} = f(\lambda_{R_s}) \quad \text{ce qui revient à écrire, d'après la loi de début d'entraînement donnée par R. Bonnefille :$$

$$R_* < 12 \quad \lambda_{D_s} = \lambda_{R_s}^{4/5} \quad \text{d'où : } \lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{10/3} \cdot \lambda_D^2$$

$$12 < R_* < 1000 \quad \lambda_{D_s} = \lambda_{R_s}^{5/8} \quad \text{d'où : } \lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{64/15} \cdot \lambda_D^{24/5}$$

$$R_* > 1000 \quad \lambda_{D_s} = \lambda_{R_s}^{2/3} \quad \text{d'où : } \lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^4 \cdot \lambda_D^4$$

dans ce cas l'échelle des hauteurs λ_h est exprimée en fonction des deux échelles λ_D et λ_{γ_s} .

b) Similitude de la décantation des sédiments

La similitude des trajectoires dans les courants orbitaux et dans les courants secondaires est obtenue, en vérifiant la relation suivante :

$$\frac{\lambda_w}{\lambda_v} = \frac{\lambda_w}{\lambda_U} = \frac{\lambda_h}{\lambda_L}$$

Et compte tenu de la loi de la vitesse de chute donnée en fonction de D_* et R_w par la formule :

$$D_* = 2.5 R_w^{1/2}$$

d'où :

$$\lambda_{D_s} = \lambda_{R_s}^{1/2}$$

on obtient alors :

$$\lambda_w = \lambda_{\gamma_s}^{1/3} \cdot \lambda_D^{1/2}$$

par combinaison avec l'équation de la trajectoire, on trouve l'échelle des hauteurs :

$$\lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{4/9} \lambda_L^{2/3} \lambda_D^{2/3}$$

c) Similitude combinée de début d'entraînement et la décantation des sédiments

Comme le transport sédimentaire sous l'action de la houle, est caractérisé par deux modes de transport, le charriage et le transport par suspension, la simulation des trajectoires des particules, s'impose et on doit tenir compte à la fois des deux similitudes précédentes, et on cherche à nouveau les échelles de similitudes des différents paramètres du modèle :

- Cas où : $\lambda_{D_s} = 1$ et $\lambda_{R_s} = 1$:

Les équations à résoudre sont :

$$\lambda_{\gamma_s}^{1/3} \cdot \lambda_D = 1$$

$$\lambda_h^{1/8} \cdot \lambda_D = 1$$

$$\lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{4/9} \lambda_L^{2/3} \lambda_D^{2/3}$$

En choisissant un matériau de simulation, les solutions sont :

$$\lambda_D = \lambda_{\gamma_s}^{-1/3}$$

$$\lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{8/3}$$

$$\Delta = \lambda_{\gamma_s}^{-1}$$

- Cas où : $\lambda_{D_s} = f(\lambda_{R_*})$

Les équations à résoudre, dans le cas où $R_* < 12$ sont :

$$\lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{10/3} \cdot \lambda_D^2$$

$$\lambda_h = \lambda_{\gamma_s}^{4/9} \lambda_L^{2/3} \lambda_D^{2/3}$$

En choisissant un matériau de simulation et fixant l'échelle des diamètre λ_D la solution est :

$$\Delta = \lambda_{\gamma_s}^{-11/6} \cdot \lambda_D^{-1/2}$$

3°/ Echelle des débits solides et des temps sédimentologiques

La détermination de l'échelle des débits solides est nécessaire, pour le réglage du modèle ; la formule utilisée généralement par le LCHF [5-10-28-34-43], pour le calcul de transit littoral, est la suivante :

$$Q_s = Kf(\alpha)(g/C)H^2T$$

avec :

K : Coefficient du transport du matériau

C : Cambrure de la houle

α : l'angle des crêtes avec la ligne du côte

$f(\alpha)$: une fonction de l'angle α

H : amplitude de la houle

T : période de la houle

En terme d'échelle, le débit solide est exprimé par :

$$\lambda_{Q_s} = \lambda_K \cdot \lambda_H^2 \cdot \lambda_T$$

Pour la détermination de l'échelle des temps sédimentologiques, on utilise la relation classique :

$$Q_s = V_s/t \quad \text{avec } V_s = H \cdot L^2$$

D'où on obtient :

$$\lambda_t = \lambda_H^{1/2} \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^2 \lambda_K$$

CHAPITRE IV

MODELISATION PHYSIQUE DE LA DYNAMIQUE COTIERE

1°/ Description du modèle physique et choix du matériau de simulation

a) Description du canal

L'ensemble des essais présentés ultérieurement, ont été exécuté dans le canal à houle du L.E.M, au Centre d'Essais sur Modèles à Hydra. Ce canal a les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 30.0 m
- Largeur : 0.6 m
- Hauteur : 1.10 m

Il est équipé :

- D'un générateur de houle à l'extrémité aval du canal, qui comprend essentiellement un volet batteur oscillant produisant un front d'onde.
- D'une chambre de commande qui transmet au générateur de houle les caractéristiques de cette dernière sous forme de signal.
- D'une règle graduée pour les mesures des profondeurs, et le pied à coulis pour les mesures des dimensions des rides.
- D'une installation d'eau pour l'alimentation et la vidange du canal.
- De deux sondes permettant de mesurer les paramètres de la houle générée dans le canal.

Les équipements sont schématisés dans la figure (IV.1).

b) Matériau choisi

Le *Siporex* est choisit comme matériau de simulation sur modèle, sur des bases économiques et physiques. Le *Siporex* est disponible actuellement, avec un prix raisonnable sur le marché national. Il est caractérisé par une faible densité par rapport au sable naturel. Il possède les caractéristiques suivantes :

- La densité $d = 1.45$
- La compacité $C = 0.34$

Le protocole des essais est lié à chaque fois au type d'essai. Il consiste à mettre une couche de Siporex broyé et tamisé sur le fond du canal et générer la houle. Une prise des mesures est faite selon le type d'essai.

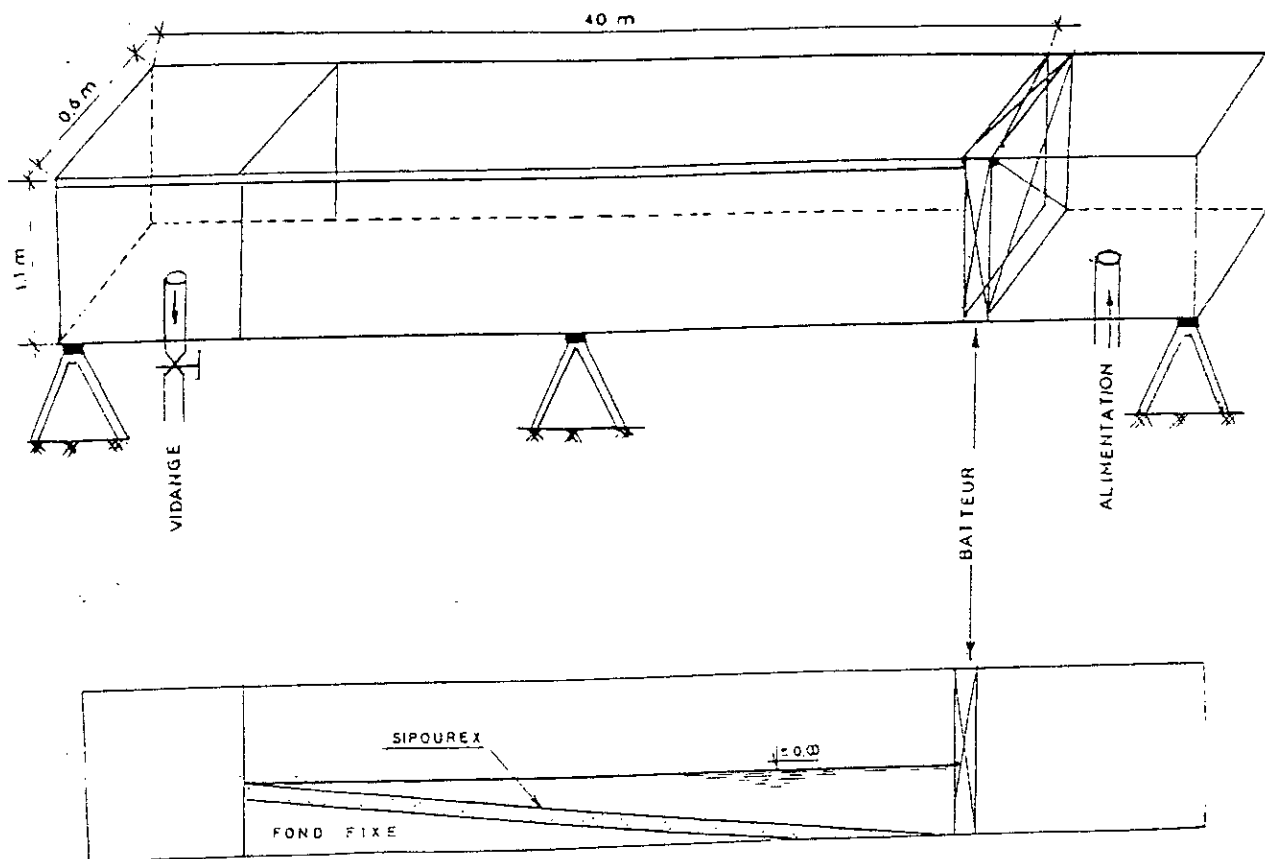


Figure IV.1 –Canal à houle

2°/ Critère de début d'entraînement du matériau artificiel

Le début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle ou du courant est toujours un thème d'actualité dans les laboratoires d'hydraulique. La nécessité de connaître le comportement des sédiments soumis à un écoulement d'une façon générale est imposée par le fait que l'ingénieur, est appelé à chaque fois à établir des modèles que se soient mathématiques ou physiques. Dans le domaine marin le sable naturel est toujours soumis à l'action de la houle, qui constitue l'élément moteur du transport solide. Le processus du transport solide commence par le début d'entraînement des sédiments qui dépend à la fois des conditions hydrodynamiques (régime d'écoulement de la houle : l'amplitude, la période et la longueur d'onde) et des caractéristiques des sédiments (la densité, les dimensions des grains).

Dans le but de mettre en évidence les critères de début d'entraînement du matériau *SIPOREX*, nous proposons La série d'essai ci-après.

a) Programme et résultats des essais

Dans cette partie nous traitons les critères de début d'entraînement de *SIPOREX* sous l'action de la houle. Ce dernier est lié aux caractéristiques physiques des sédiments d'une part (la densité, le diamètre, sa vitesse de chute) d'autre part aux caractéristiques de l'écoulement (régime d'écoulement, l'amplitude, la période et la longueur d'onde de la houle).

Le protocole des essais consiste à mettre dans le canal à houle un fond mobile (*SIPOREX*) de granulométrie variable allant des éléments fins aux grossiers $D_{50} \in (0.176, 2)$ mm et pour chaque gamme de granulométrie le fond est soumis à un mouvement oscillatoire (la houle) en faisant varier les caractéristiques de la houle (H_s, L, T) par palier progressif jusqu'à l'observation de début d'entraînement des sédiments. La pente du canal est nulle.

Les résultats des essais sont récapitulés dans le tableau suivant :

Vitesse de frottement $U^*(\text{cm/s})$	H_s/L (%)	Longueur d'onde $L(\text{cm})$	Période de la houle $T(\text{s})$	Diamètre des grains $D_{50}(\text{mm})$
0.71	1.93	93.6	0.77	0.17
0.86	2.50	99.8	0.8	0.41
1.00	2.24	125.0	0.9	0.59
1.09	1.85	156.0	1.0	0.69
1.16	1.59	188.0	1.1	0.89
1.23	1.37	225.0	1.2	1.05
1.09	1.21	263.0	1.3	1.13
1.09	1.21	263.0	1.3	1.23
1.36	1.11	306.0	1.4	1.31
1.40	0.99	351.0	1.5	1.37
1.59	0.99	351.0	1.5	1.45
1.53	0.90	400.0	1.6	1.55
1.55	1.00	400.0	1.6	1.74
1.63	0.95	451.0	1.7	1.86
1.79	0.99	505.0	1.8	2.00

Tableau IV.1 : Données et résultats des essais

Pour chaque valeur de diamètre D_{50} du grain est associé la valeur de l'amplitude de la houle H_s , sa longueur d'onde L et sa période T , pour laquelle le début d'entraînement est constaté.

Dans ce qui suit nous présentons une approche expérimentale qui précise les critères de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle.

Lors de la propagation de la houle le grain est soumis à une force d'arrachement du courant susceptible d'amorcer le charriage du grain ; A partir d'un certain seuil que l'on appelle «force critique», le grain est arraché. Il y a plusieurs méthodes pour la représentation de cette force :

- La vitesse du courant de translation U_c .
- La tension de frottement τ_c ou bien sa vitesse étoilée U_* .
- La représentation de la force critique de début d'entraînement par des rapports sans dimensions :
 - R_* : Reynolds étoilé
 - D_* : Diamètre sédimentologique
 - $\tau/(\rho_s - \rho)gD$: paramètre de Scheilds ou de mobilité.

α) Critère de la vitesse du courant de translation

Il n'est pas difficile de mesurer la vitesse du courant de translation induit par une houle d'amplitude H de longueur d'onde L et de période T, en utilisant la formule donnée par :

$$U_c = 1.376 U_{max}^2 T/L$$

avec, U_{max} : vitesse maximale d'oscillation.

U_c : vitesse du courant de translation dans la couche limite.

Le graphique ci-dessous nous montre que la vitesse critique du courant de translation est proportionnelle au diamètre de grain D_{50} pour le même matériau (SIPOREX).

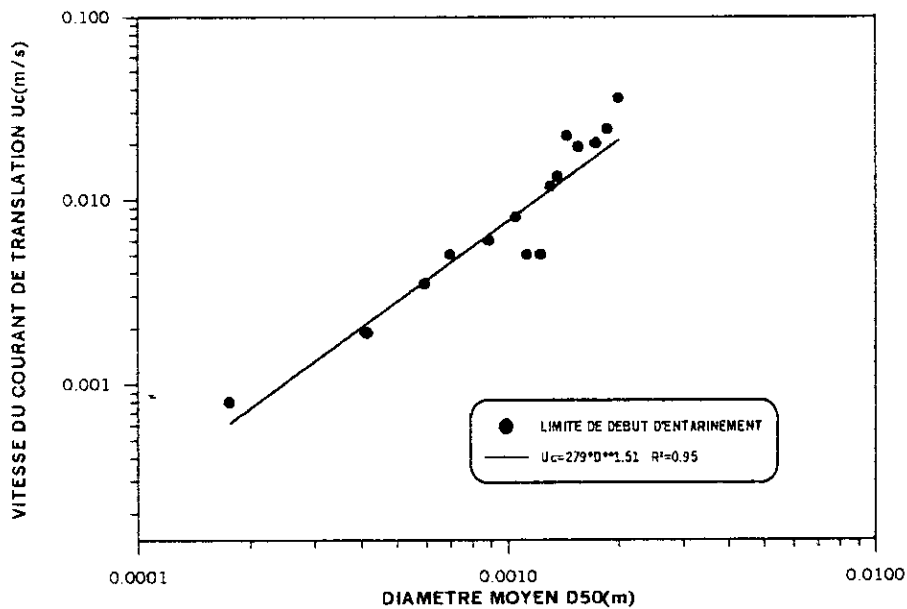


Figure IV.2 : Vitesse du courant de translation limite de début d'entraînement de Siporex

La corrélation entre la vitesse U_c et le diamètre D nous donne (méthode des moindres carrés) :

$$U_c = 279 \cdot D^{1.51} \quad \text{avec, } [U_c] = \text{m/s et } [D] = \text{m}$$

Cette formule confirme le raisonnement théorique, en décrivant que la force d'entraînement d'un granulat isolé (force proportionnelle au carré de la vitesse du courant de translation et à la section droite, donc au carré des dimensions géométriques du grain) fait équilibre à la force de frottement de ce même grain sur le fond (force proportionnelle au poids, donc au cube des dimensions du même grain). On peut d'ailleurs écrire tout aussi, que les moments des forces précédentes se font équilibre par rapport aux points d'appui du grain sur ses voisins.

β) Critère de la tension tangentielle critique τ_c

Dans cette partie, on préfère représenter la force du courant susceptible de provoquer le début d'entraînement d'un granulat donné par une certaine valeur de τ_0 de la tension de frottement à la paroi. La tension tangentielle est donnée par :

$$\tau_0 = \rho U_*^2$$

avec, ρ : masse volumique de l'eau et U_* : vitesse de frottement à la paroi

Donc, on cherche à déterminer la tension τ_{0c} pour laquelle l'entraînement des sédiments est amorcé pour une série de diamètre D.

Le graphique ci-dessous représente la tension tangentielle critique de début d'entraînement en fonction du diamètre du grain D_{50} . On remarque bien que τ_c est linéairement proportionnelle à D_{50} avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.98$ (méthode des moindres carrés) avec :

$$\tau_c = 144.25 D_{50} \quad \text{avec, } [\tau_c] = \text{N/m}^2 \quad \text{et } [D_{50}] = \text{m}$$

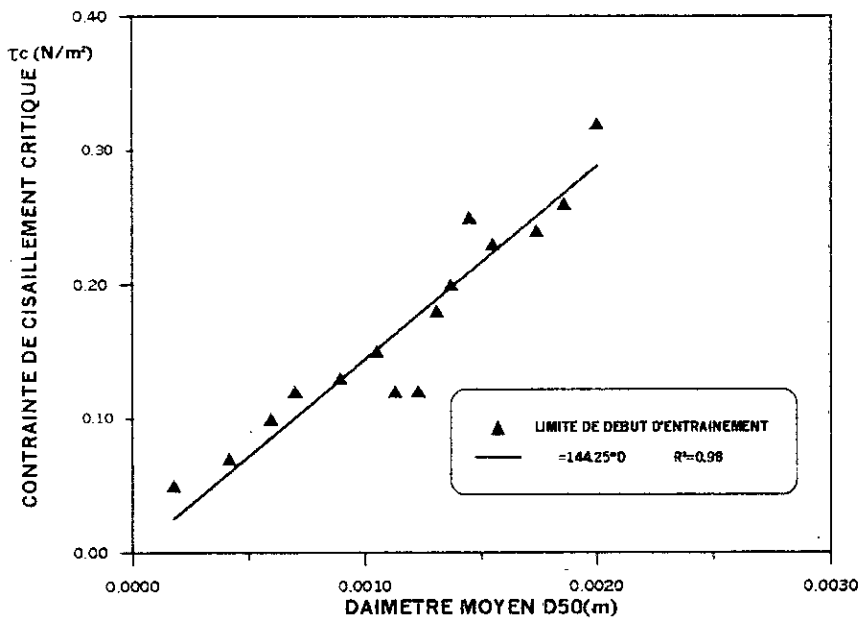


Figure IV.3 : Contrainte de cisaillement critique de début d'entraînement du Siporex

Le coefficient multiplicateur dépend de la nature des sédiments (la densité et la forme), pour cela nous utilisons, Le tracé du paramètre de Shields $\tau_c / (\rho_s - \rho)gD_{50}$ en fonction du diamètre D_{50} pour préciser ce coefficient. Le graphique ci-dessous montre que le rapport de Shields a une tendance décroissante avec le diamètre pour $D_{50} < 1.3\text{mm}$, à partir de cette valeur le rapport de Shields ne varie pas en fonction de diamètre moyen D_{50} .

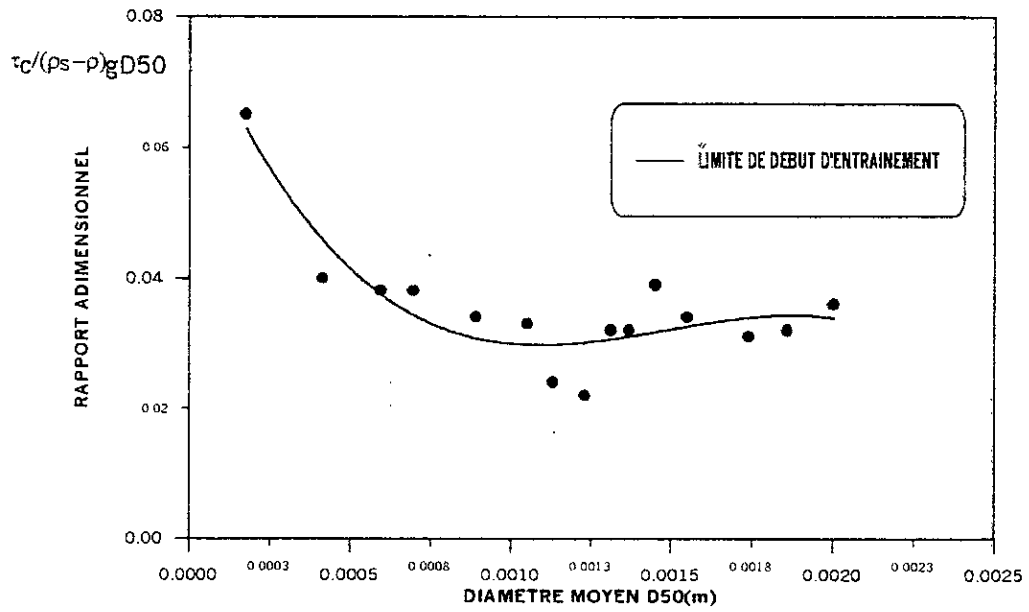


Figure IV.4 – Critère adimensionnel de début d’entraînement de Siporex

La tendance du paramètre de Shields pour $D_{50} \geq 1.3\text{mm}$ est représentée sur le graphique ci-dessous :

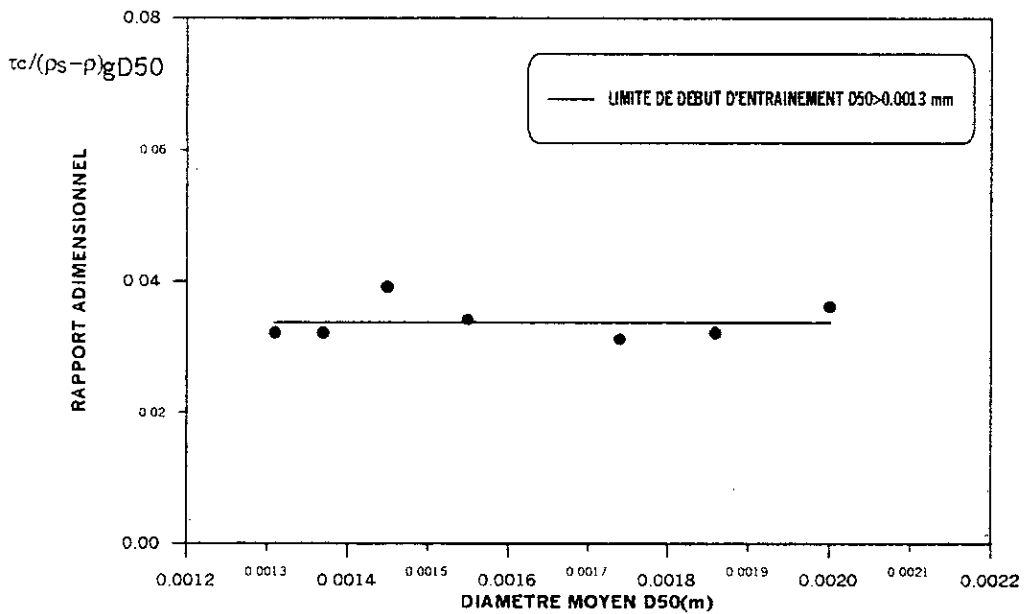


Figure IV.5– Critère adimensionnel de début d’entraînement de Siporex

Pour des valeurs $D_{50} \leq 1.3\text{mm}$, et d’après le graphique ci-dessous, on remarque bien que le rapport $\tau_c / ((\rho_s - \rho)gD_{50})$ est inversement proportionnel à D_{50} . Et cela est expliqué par l’effet de la cohésion entre les particules de faible diamètre $D_{50} < 1.3\text{mm}$.

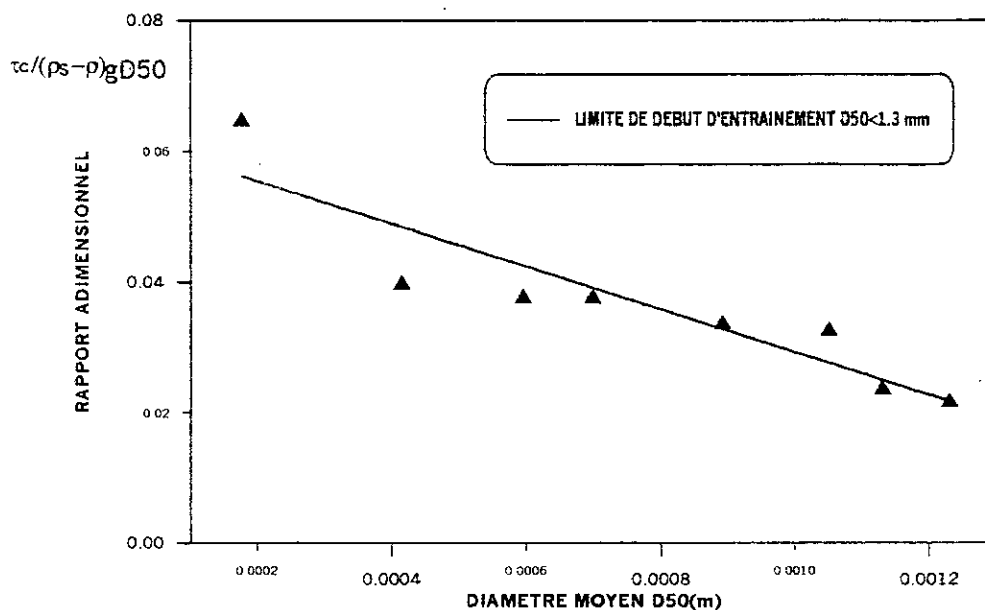


Figure IV.6– Critère adimensionnel de début d'entraînement du Siporex

χ) Critère des rapports adimensionnels

Dans ce paragraphe nous traitons le critère de début d'entraînement de Siporex sous l'action de la houle par des rapports adimensionnels. Dans le paragraphe précédent, on a trouvé que la tension tangentielle critique est proportionnelle au diamètre des granulats D_{50} , ainsi que leur poids volumique à l'intérieur du liquide $(\rho_s - \rho)g$. Mais Shields a montré dans ces travaux de recherche que la tension tangentielle critique dépend des rapports adimensionnels :

- R_* Reynolds étoilé
- M paramètre de Shields

Les résultats obtenus pour le matériau (SIPOREX) sont présentés dans le graphique qui suit :

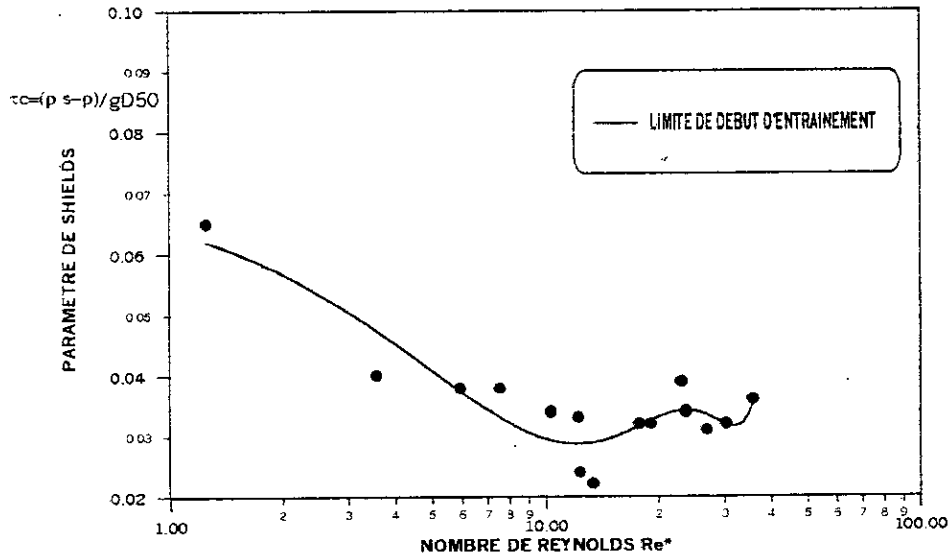


Figure IV.7- Début d’entraînement du Siporex en fonction de paramètre de Shields et Reynolds

La courbe ci-dessus montre clairement, que le rapport entre la force tangentielle et le poids sous l’eau $F^* = \tau_c / (\rho_s - \rho)gD_{50}$ dépend de Reynolds étoilé pour $R^* < 12$. A partir de cette valeur de $R^* = 12$, la tension tangentielle ne dépend pas de Reynolds étoilé, cela est expliqué par la nature de l’écoulement à l’intérieur de la couche limite.

L’épaisseur de la couche limite laminaire est donnée par : $\delta = 11.6 \nu / U^*$

Ce qui revient à écrire : $R^* = U^*D_{50} / \nu = 11.6 D_{50} / \delta$

D’après la courbe ci-dessus, on constate que le rapport $\tau_c / (\rho_s - \rho)gD_{50}$ passe par un minimum lorsque $D_{50} = \delta$, c’est à dire $R^* = 11.6$, ce qui nous permet de distinguer trois cas :

1- Si $D_{50} < \delta$ ($R^* < 11.6$) les granulats restent constamment noyés dans la sous couche laminaire, la force qui tend à les tirer de leur position de repos correspond donc à la tension de glissement à l’intérieur de la sous couche laminaire, elle même dépend de la viscosité du liquide. Donc la force de frottement due à la viscosité est responsable de l’arrachement du grain lorsque ce dernier est noyé dans la sous couche laminaire.

2- Lorsque $D_{50} = \delta$, les granulats émergent plus ou moins de la sous couche laminaire, qui se déchire, et leurs saillies en dehors de la sous couche donnent naissance à des sillages turbulents. La force qui tend à tirer les granulats de leur position de repos participe donc à la fois d’une tension de glissement à l’intérieur de la sous couche laminaire (force de viscosité) et d’une résistance quadratique à l’intérieur d’un écoulement turbulent.

3- Lorsque $D_{50} > \delta$, la sous couche laminaire est d’autant plus déchirée que D_{50}/δ est plus grand. Et qu’on peut négliger plus aisément l’épaisseur de ce qui reste par rapport aux saillies des granulats. La force qui tend à tirer ces derniers, de leurs positions de repos



s'apparente donc de plus en plus à une résistance quadratique à l'intérieur d'un écoulement turbulent et le rapport $\tau / (\rho_s - \rho)gD_{50}$ tend dès lors vers une valeur fixe quand D_{50}/δ augmente indéfiniment.

On peut donner aussi, le critère de début d'entraînement de Siporex sous l'action de la houle, exprimé par les paramètres donnés par R.Bonnefille:

$$D_* = F(R_*)$$

La figure ci-dessous montre la relation entre D_* et R_* avec légère brisure pour $R_* = 12$.

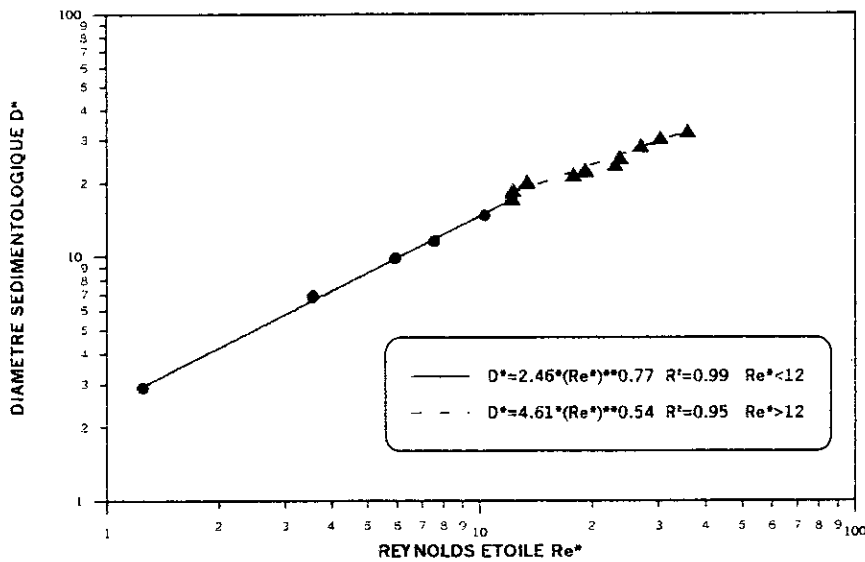


Figure IV.8 Début d'entraînement de Siporex en fonction de diamètre sédimentologique et le nombre de Reynolds

En résumé les critères correspondant au début d'entraînement du matériau proposé (SIPOREX) pour la simulation du sable naturel en modèle réduit physique sont :

$$D < \delta \quad (R_* < 12) : D_* = 2.46R_*^{0.77}$$

$$D > \delta \quad (R_* > 12) : D_* = 4.61R_*^{0.54}$$

Et on peut réduire ces deux critères à un seul voir figure ci-dessous :

$$D_* = 2.18R_*^{0.78}$$

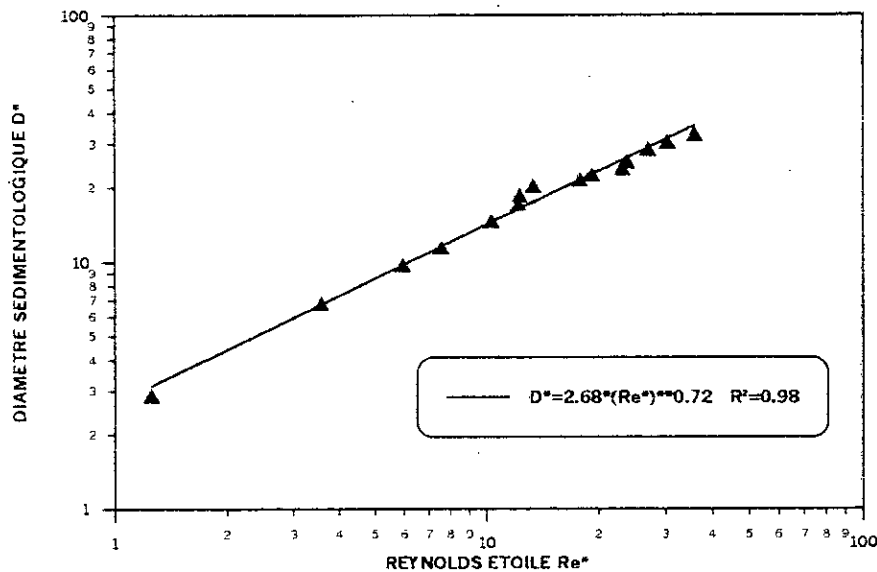


Figure IV.9 : Début d'entraînement du Siporex en fonction de diamètre sédimentologique et le nombre de Reynolds

3°/ Profil d'équilibre de plage et critère de classification

Après avoir examiné le *critère de début d'entraînement* de Siporex, la *forme de plage* donnée par ce matériau est la phase la plus importante dans la recherche du matériau de simulation des sédiments naturels. D'une façon générale, la forme de plage est présentée sous deux formes de profils bien distincts et cela d'après les références [5, 8, 14, 23, 43 et 49], l'une représente le profil de la saison estivale et l'autre représente le profil de la saison hivernale.

Plusieurs critères ont été donnés pour distinguer les deux types de profils, en fonction des conditions hydrodynamiques et sédimentaires. Le critère le plus récent est celui donné par DEAN en 1973 [14], qui fait la distinction des deux profils à l'aide des deux paramètres : la cambrure de la houle H/L et le paramètre adimensionnel lié à la vitesse de chute des particules $\pi W/gT$

On a d'après DEAN :

- un profil estival lorsque $H/L < 1.7 \pi W/gT$
- un profil hivernal lorsque $H/L > 1.7 \pi W/gT$

DEAN a utilisé comme matériau de simulation le sable naturel, le fond mobile a une pente moyenne de 10%. Dans le but de donner la forme générale de la plage et le critère de distinction des deux profils (*estival et hivernal*) pour le matériau de simulation proposé (SIPOREX), et estimer le volume des sédiments accumulés dans la barre, la série d'essais suivante intervient pour comparer les résultats obtenus avec ceux donnés par DEAN.

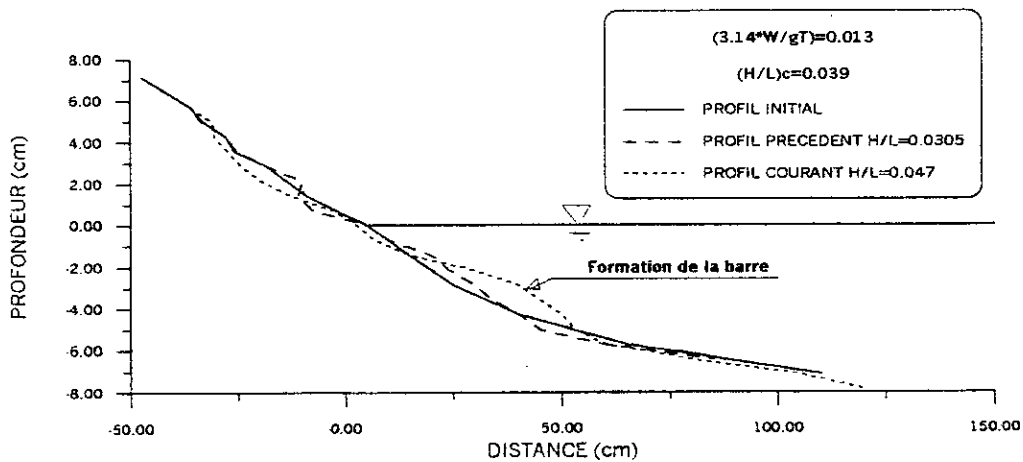
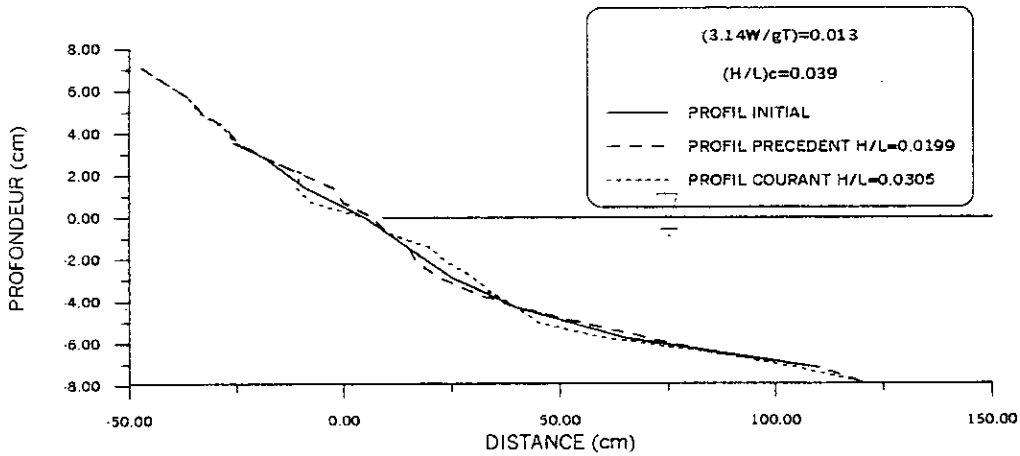
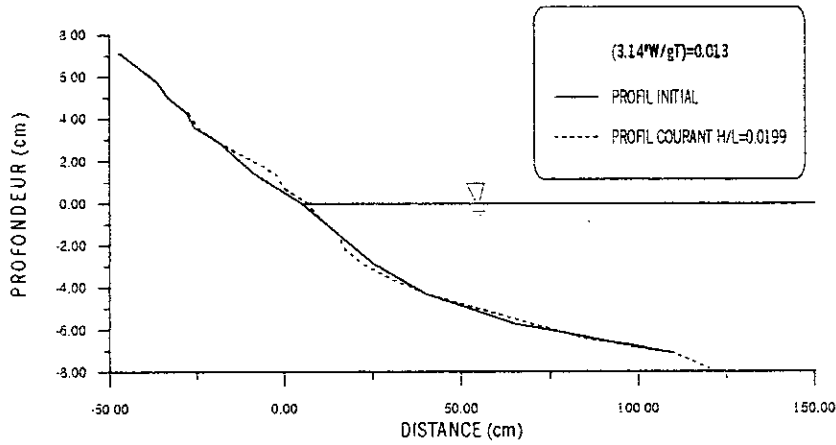
Quatre séries d'essais ont été proposées. Pour chaque série d'essais la période de la houle est fixe. La granulométrie est caractérisée par un diamètre moyen $D_{50} = 0.500\text{mm}$. La pente moyenne du fond est de 2.5%. Le protocole des essais consiste à générer la houle par palier progressif, en faisant augmenter la cambrure H/L jusqu'à l'obtention du profil hivernal qui correspond en ce moment à une valeur seuil de la cambrure $(H/L)_c$. Ce profil est caractérisé par la formation de la barre. Un levé des profondeurs est effectué à chaque fin de test. Les données des essais sont données le tableau suivant :

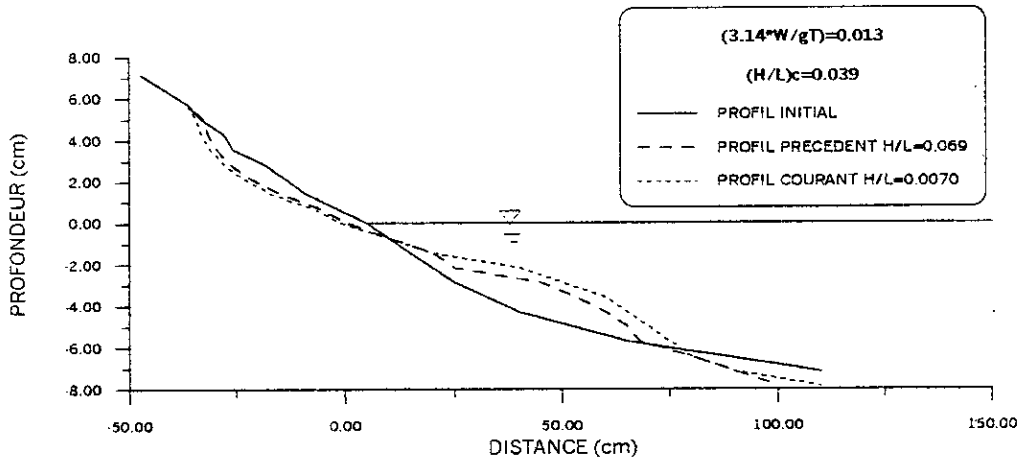
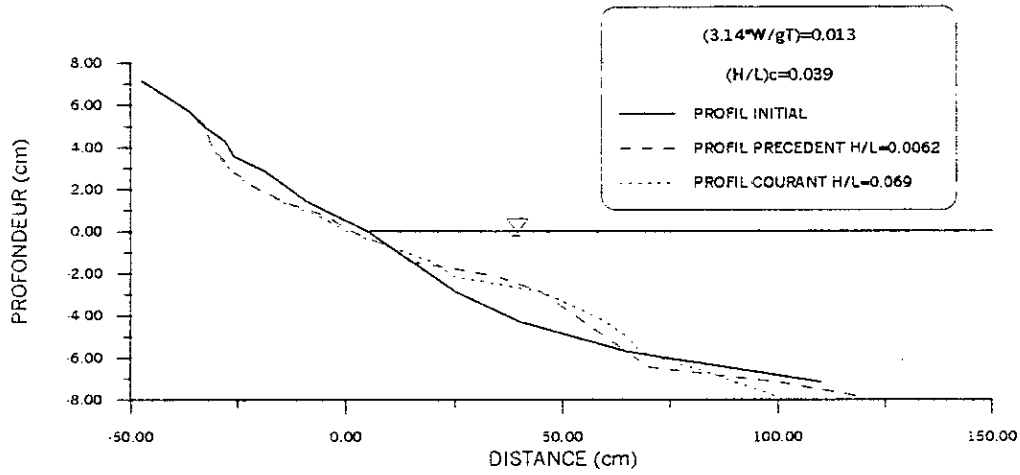
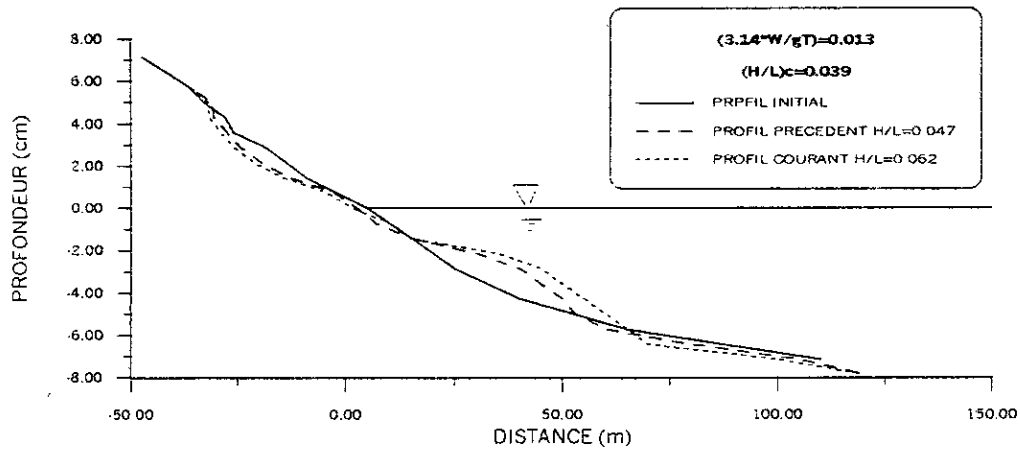
SERIE N°	T(s)	Hs(cm)	H/L(%)	$\pi W/gT$	Type de profil obtenu	
					Estival	Hivernal
01	0.71	1.57	1.99	0.0130	X	
		2.4	3.05	0.0130	X	
		3.7	4.70	0.0130		X
		4.87	6.20	0.0130		X
		5.40	6.90	0.0130		X
		5.56	7.07	0.0130		X
		5.57	7.09	0.0130		X
02	0.95	7.08	9.00	0.0130		X
		4.25	3.02	0.0097	X	
		4.68	3.32	0.0097	X	
		4.77	3.39	0.0097		X
		6.74	4.79	0.0097		X
		8.55	6.07	0.0097		X
		8.72	6.19	0.0097		X
03	1.19	9.56	6.80	0.0097		X
		10.27	7.29	0.0097		X
		3.84	1.73	0.0077	X	
		7.08	3.20	0.0077		X
04	1.43	10.45	4.70	0.0077		X
		14.05	6.36	0.0077		X
		2.55	1.34	0.0064	X	
		11.04	3.46	0.0064		X
		13.55	4.24	0.0064		X
		14.98	4.69	0.0064		X

Tableau IV.2 : Données et résultats des 04 séries d'essais

a) Classification des profils de plage

□ Les profils obtenus pour la première série sont représentés dans les graphiques ci-après :





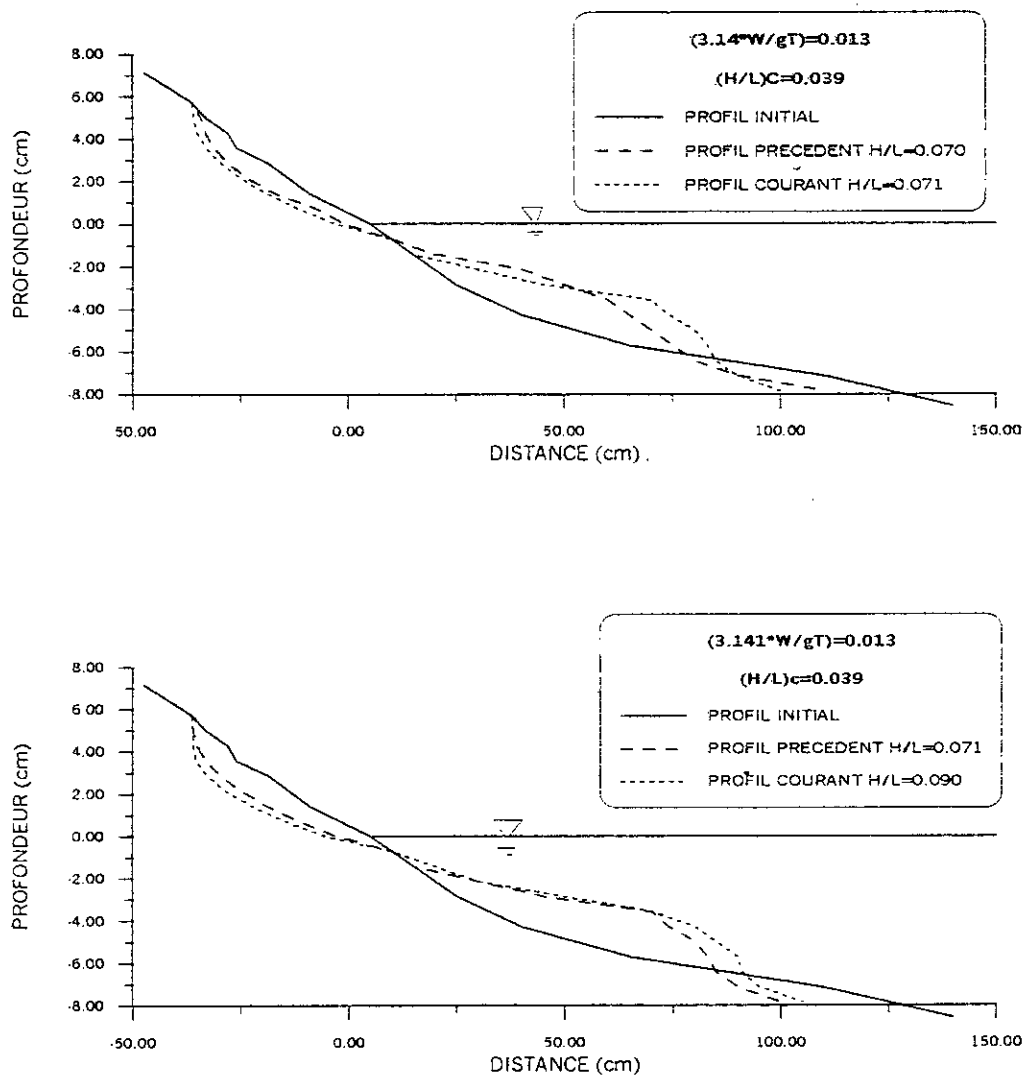
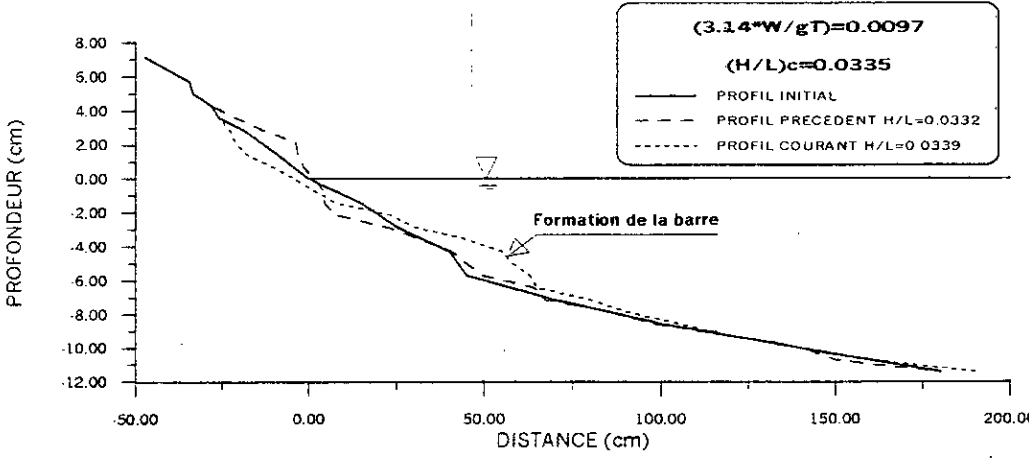
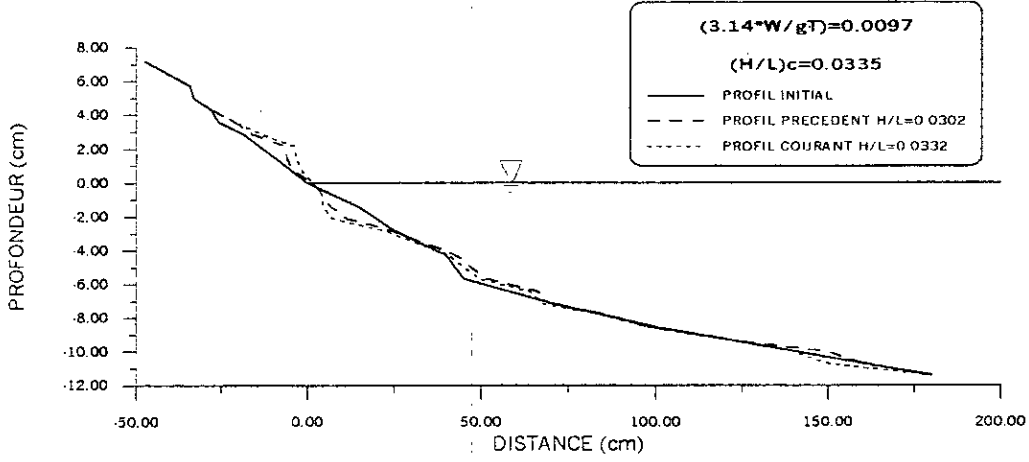
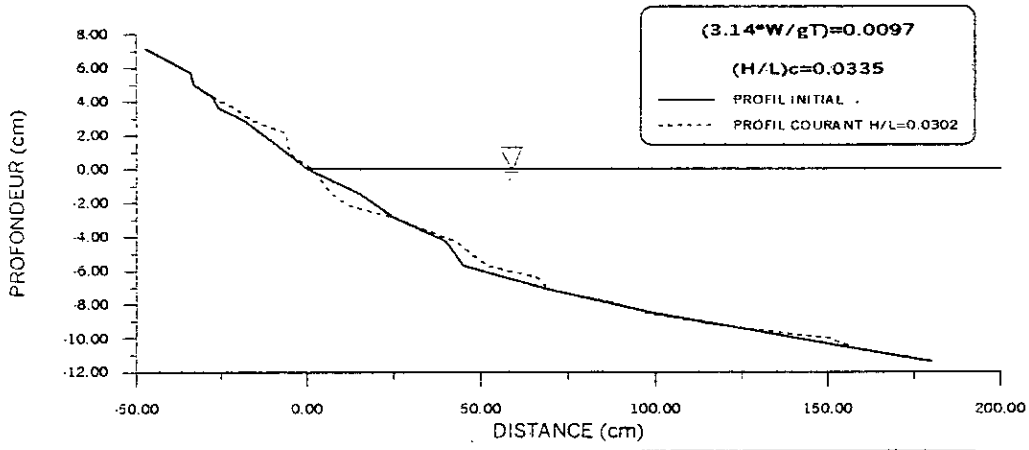


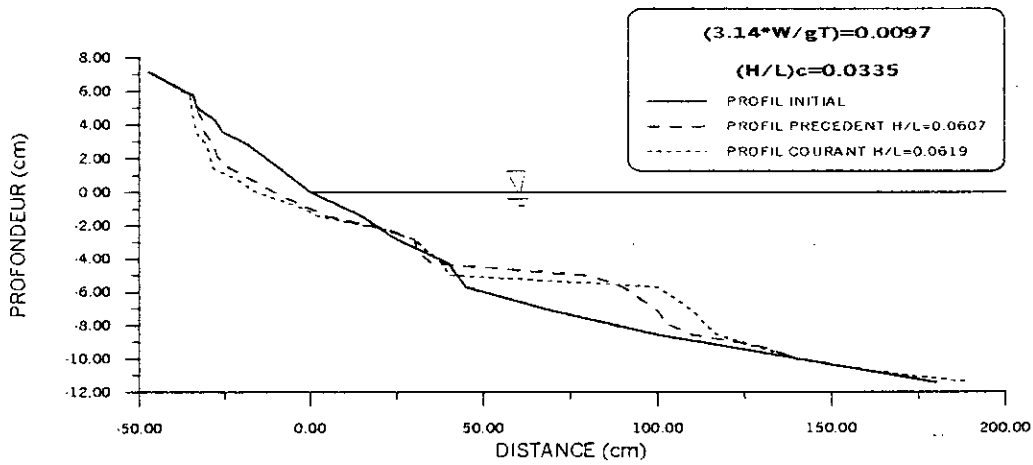
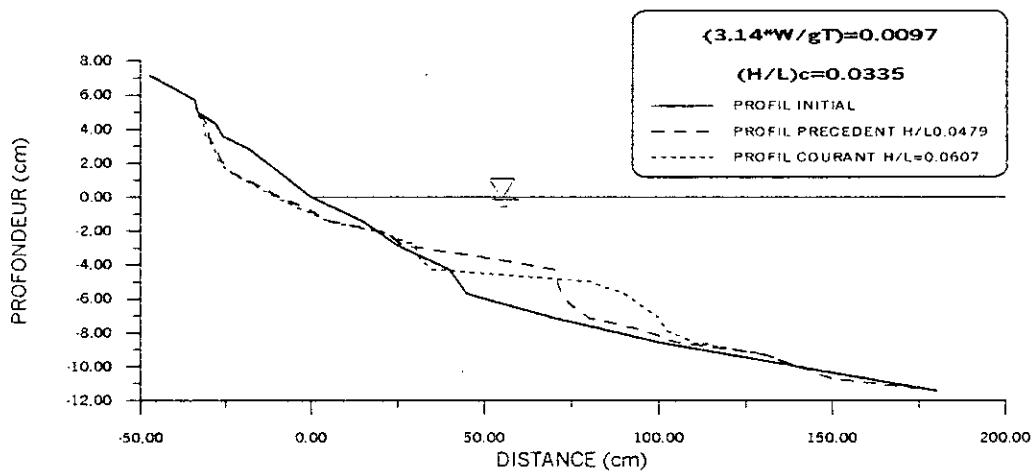
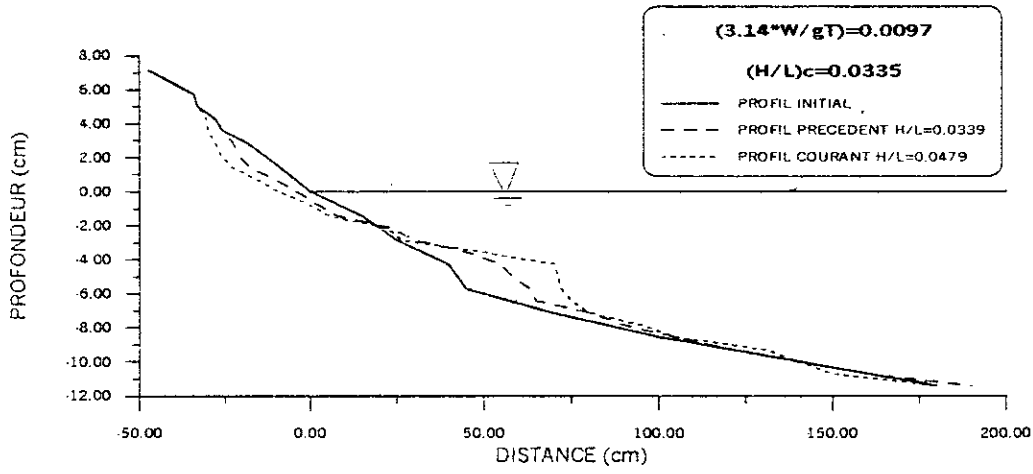
Figure IV.10 – Forme de la plage obtenue pour la série 1

D'après les graphiques précédents, on constate que le profil de plage passe d'un profil estival à un profil hivernal à partir de $(H/L)_c = 0.039$ et pour $\pi W/gT = 0.013$, donc pour les houles qui ont une cambrure de la houle inférieure à la valeur critique $(H/L)_c = 0.039$. La forme de plage est caractérisée par une sédimentation de la partie hors d'eau et une érosion de la partie immergée. Pour les valeurs de la cambrure de la houle supérieure $(H/L)_c = 0.039$, la plage a une tendance à s'éroder dans sa partie émergée et la sédimentation est remarquable par la formation de la barre dans la partie immergée.

On constate aussi que le volume accumulé dans la barre est proportionnel à la cambrure de la houle.

- Les profils obtenus pour de la deuxième série, avec $\pi W/gT = 0.0097$ sont représentés dans les graphiques ci après :





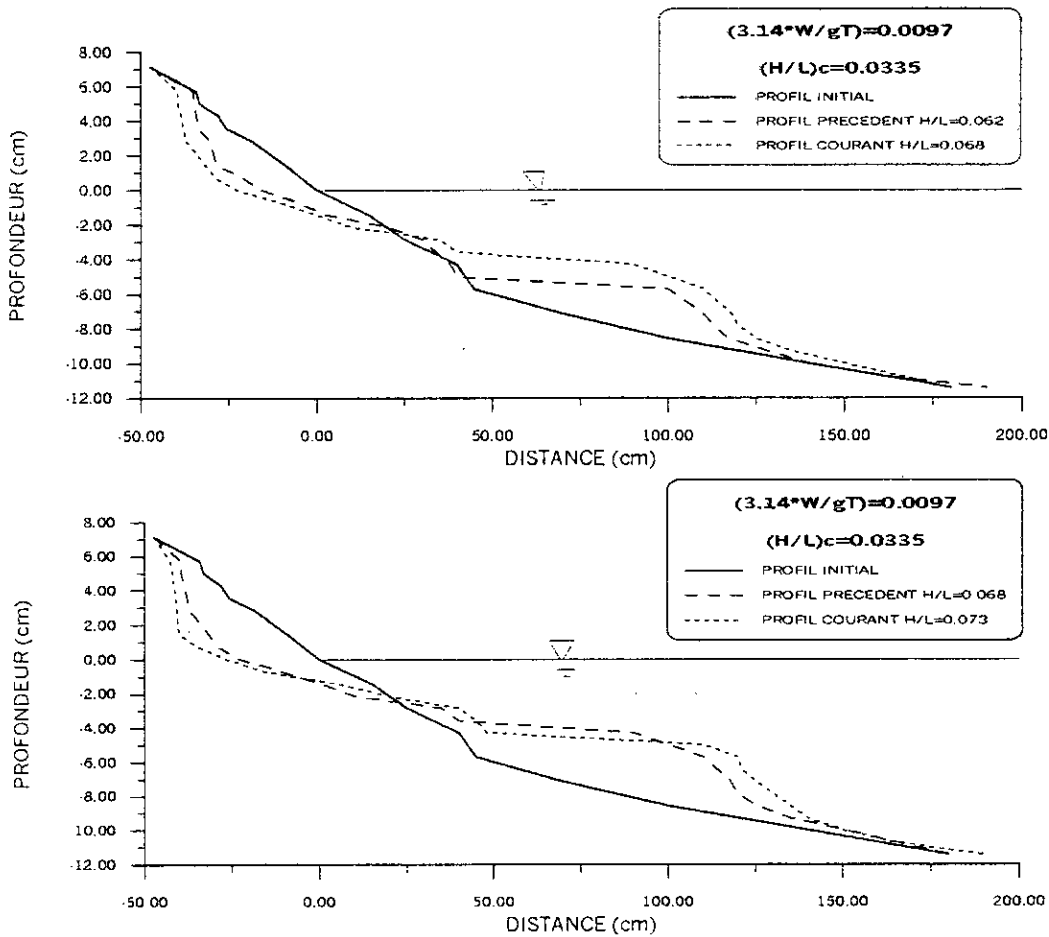
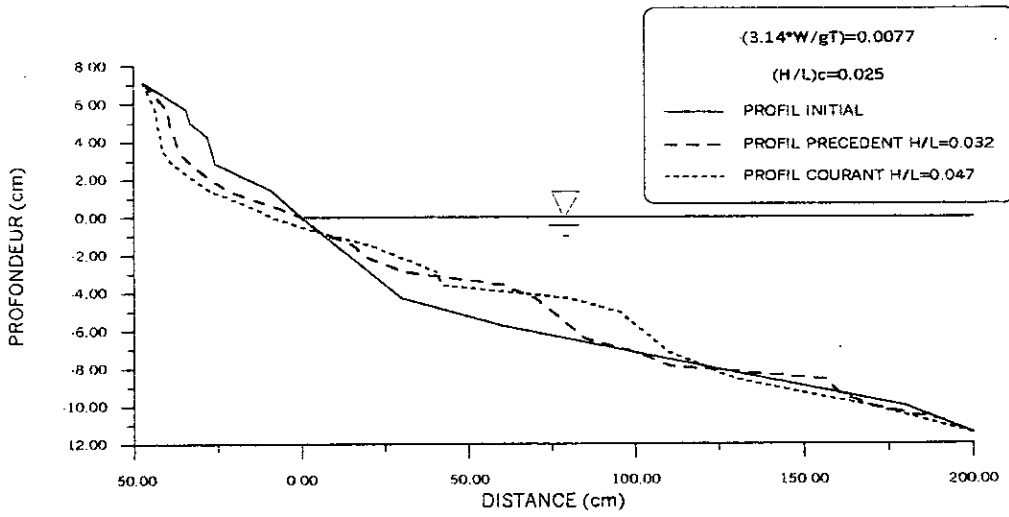
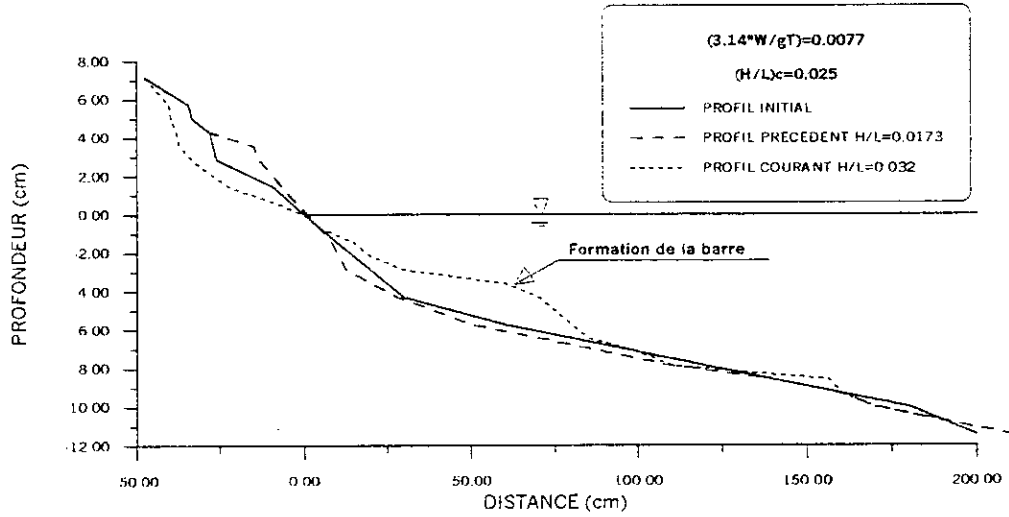
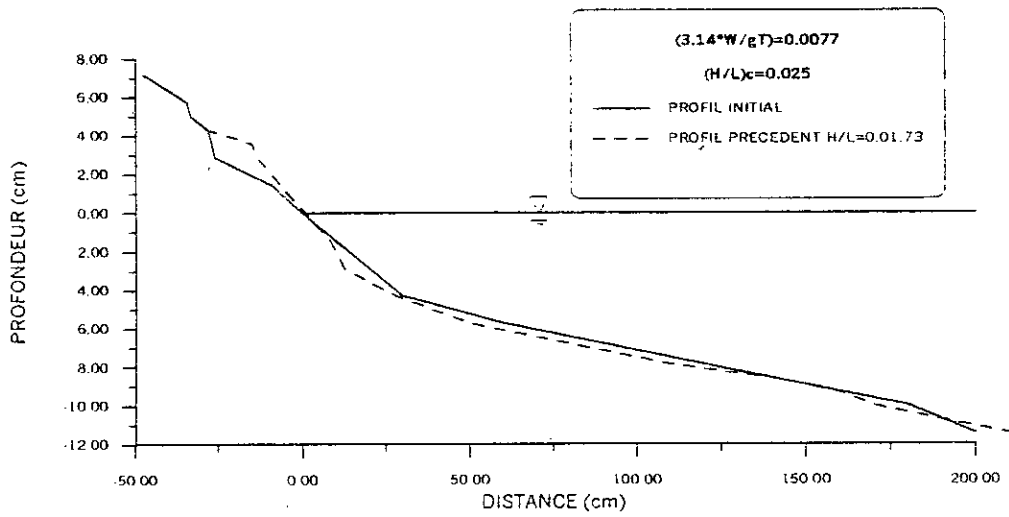


Figure IV.11– Forme de la plage obtenue pour la série 2

Dans cette deuxième série d’essais, où le paramètre adimensionnel lié à la vitesse de chute est égal $\pi W/gT = 0.0097$, la cambrure critique pour laquelle le profil de plage passe du profil estival au profil hivernal (apparition de la barre) est donnée par $(H/L)_c = 0.0335$. On remarque aussi dans cette série d’essais, que le volume déposé dans la barre est proportionnel à la cambrure de la houle pour une période donnée.

- Les profils obtenus pour la troisième série, avec $\pi W/gT = 0.0077$ sont donnés dans les graphiques ci après :



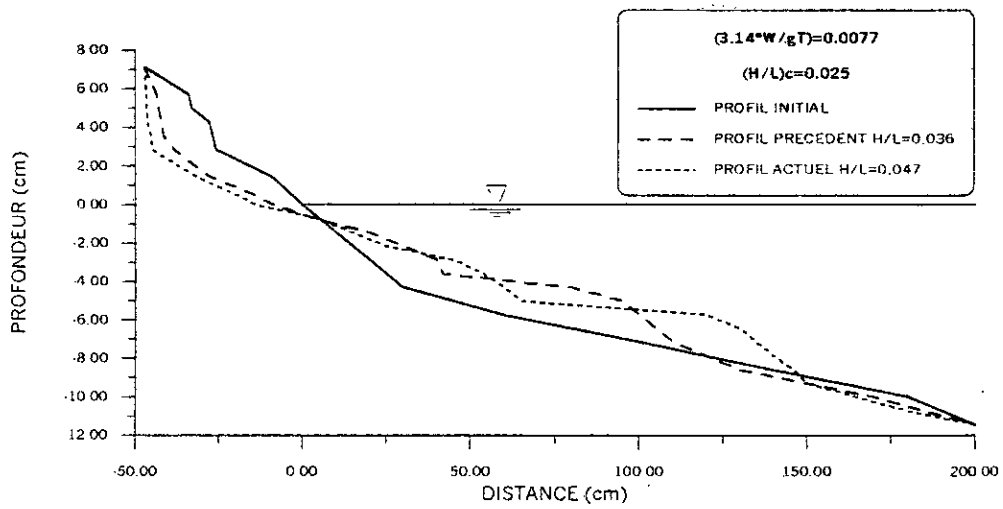
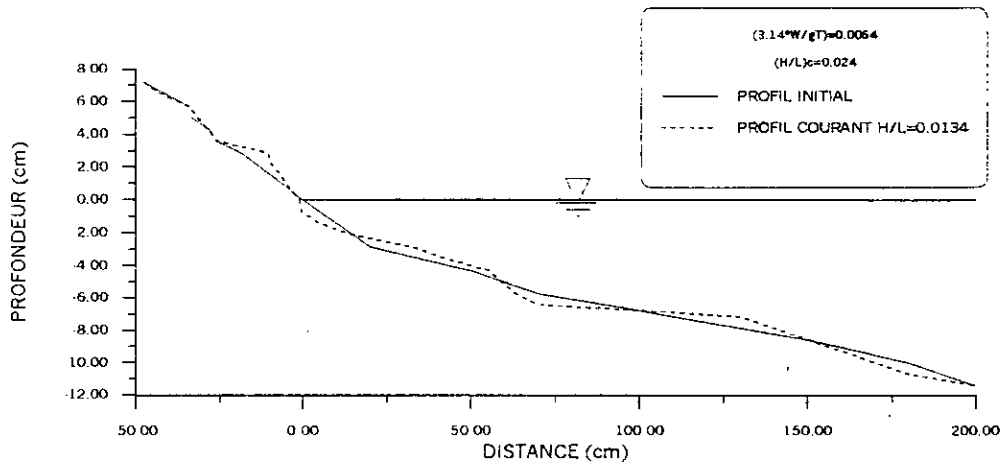


Figure IV.12 – Forme de la plage obtenue pour la série 3

Dans cette série, la barre se forme pour une cambrure critique de la houle $(H/L)_c = 0.025$, et à partir de là la forme de plage est érodée dans sa partie émergée.

□ Les profils obtenus de la quatrième série, avec $\pi W/gT = 0.0064$ sont donnés dans les graphiques ci après :



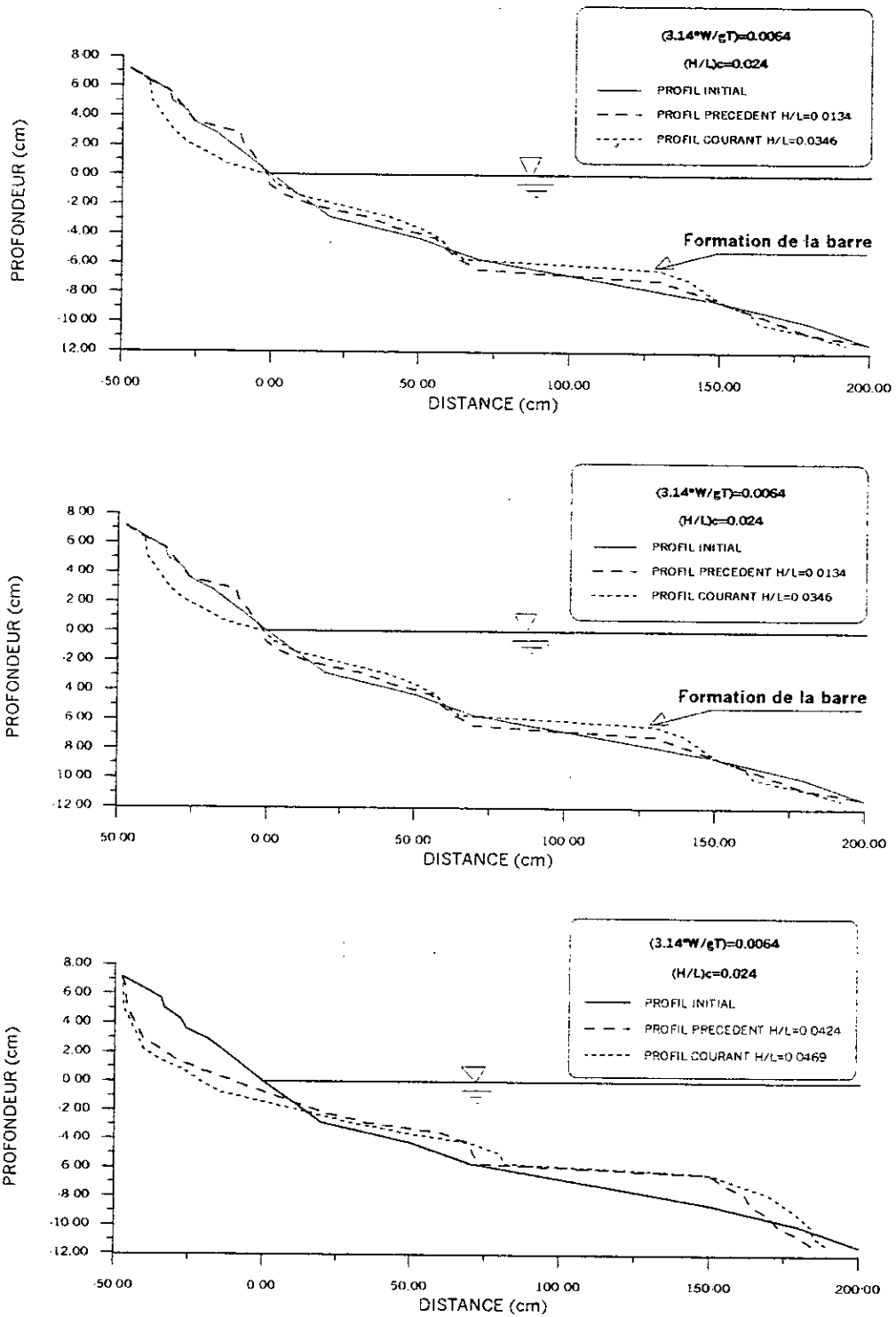


Figure IV.13 – Forme de la plage obtenue pour la série 4

Dans cette série, la barre se forme pour une cambrure critique de la houle $(H/L)_c = 0.024$, en d'autre terme le profil hivernal apparaît à partir de la cambrure $(H/L)_c = 0.024$.

Les quatre séries d'essais ont montré que, la forme de plage est caractérisée par deux types de profils bien distincts, un profil estival et un profil hivernal. Le profil estival est caractérisé par la sédimentation de la partie hors d'eau et l'érosion de la partie immergée. Par contre le profil hivernal est caractérisé par l'érosion de la partie hors d'eau, et la sédimentation de la partie immergée où se forme la barre. Pour les quatre séries la cambrure critique $(H/L)_c$ est donnée en fonction du paramètre adimensionnel $\pi W/gT$. La figure (IV.14) illustre la forme de plage en fonction des deux paramètres caractéristiques de la houle et le fond marin. En utilisant la méthode des moindres carrés, on a pu déterminer la corrélation entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation acceptable $R^2 = 0.99$, la relation est donnée par :

$$(H/L)_c = 3.28(\pi W/gT)$$

- et on a :
- un profil estival lorsque : $(H/L)_c \leq 3.28(\pi W/gT)$
 - un profil hivernal lorsque : $(H/L)_c > 3.28(\pi W/gT)$

Si on compare ce résultat avec celui donné par DEAN (1973) [14], on remarque qu'il y a une différence dans le coefficient multiplicateur, cette différence est due à la différence de pente, DEAN a pris une pente très raide $I_m = 10\%$, ce qui favorise la formation de la barre pour des faibles cambrures de la houle par rapport à une pente de $I_m = 2.5\%$ (cas de nos essais).

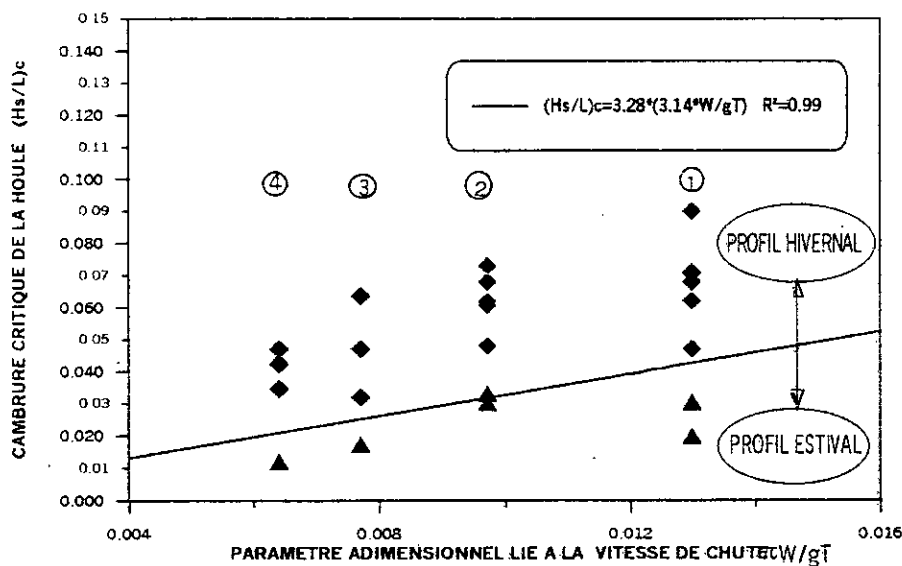


Figure IV.14 : Classification de la forme de plage en fonction de la cambrure de la houle H/L et le paramètre adimensionnel $\pi W/gT$

Cette classification présente un intérêt très remarquable, car l'utilisation d'un matériau de simulation sur modèle réduit physique nécessite la connaissance parfaite du comportement de ce matériau sous l'action de la houle, et en particulier la forme de plage et sa classification en fonction des données hydrosédimentaires.

Le critère de distinction des deux profils, permet aussi de choisir les échelles de similitude adéquates dans les modèles réduits physiques.

b) Estimation du volume de la barre

Comme on l'a déjà vu dans la partie précédente, le profil hivernal est caractérisé par la formation de *la barre* dans sa partie immergée. Et comme *la barre* se forme à partir d'un certain *seuil de la cambrure de la houle*, le volume des sédiments est proportionnel à l'amplitude de la houle qui dépasse l'amplitude de la houle seuil H_c . Le but de ce paragraphe est d'évaluer le volume déposé dans la barre en fonction de l'écart entre la houle significative H_s et la houle significative critique de la houle H_c .

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure (IV.15). On remarque bien que le *volume* déposé dans la barre est proportionnel au carré de l'écart entre l'amplitude de la houle H_s et l'amplitude critique de la formation de la barre H_c . Le volume est exprimé par la relation suivante:

$$V(\text{cm}^3/\text{cm}) = 8(H - H_c)^2$$

avec, V : le volume déposé dans la barre en (cm^3/cm)

$H - H_c$: la hauteur de la houle au-dessus de la hauteur de la houle critique correspondant à la formation de la barre, en (cm).

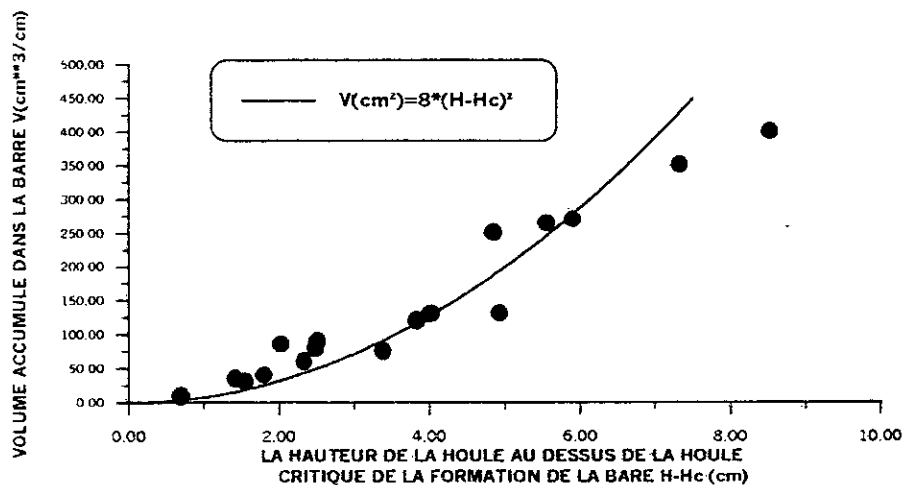


Figure IV.15 - Evaluation du volume de la barre en fonction de la houle significative

En conclusion le Siporex est un matériau *potentiel* pour la simulation sur modèle réduit physique, car il reproduit la forme de la plage sous l'action des conditions hydrodynamiques analogues à ceux de la nature, et l'évaluation des dépôts dans la barre est exprimé en fonction de l'amplitude de la houle.

4°/ Système des rides

La mise en oscillation des sédiments par les houles, clapotis et mers de vent, peut entraîner l'apparition d'ondulations symétriques sensiblement régulières qui ne dépassent pas en général quelques centimètres de hauteur et quelques décimètres de longueur en nature, ces ondulations ont été appelées «rides d'ondulation» par opposition avec «les rides d'écoulements» souvent dissymétriques et dues à un courant unidirectionnel.

Les rides de houles ont leurs crêtes parallèles aux crêtes des vagues, leur hauteur et longueur varient suivant les conditions hydrosédimentaires (la houle le sédiment).

L'influence de rides sur l'écoulement est généralement prise en compte par une augmentation du coefficient de rugosité équivalente. Ce coefficient peut être prescrit en fonction des dimensions des rides (hauteur δ longueur d'onde λ). Des études dans ce sens ont été entamées par plusieurs expérimentateurs. Les premières ont été réalisées en houles régulières par VINCENT (1957), ainsi qu' en houle et courant superposés (VAN RIJN, 1990) [51], ces études ont abouti à exprimer le coefficient de frottement en fonction de dimensions des rides.

Dans le but de définir les conditions d'apparition et les dimensions des rides en fonction des paramètres hydrosédimentaires (la houle : H , T , L ; le sédiment : ρ_s , D_{50}). Après une description du processus de formation des rides, la série d'essais ci-après intervient pour contribuer aux essais rapportés dans la littérature.

a) **Processus de formation des rides sous l'action d'un mouvement oscillatoire**

La formation des rides est liée à l'existence d'un tourbillon provoqué par le mouvement d'aller et de retour du liquide. Au cours de la première demi-période d'oscillation un tourbillon est provoqué à l'aval de la ride, les tourbillons montent au-dessus du fond, puis disparaissent après une brève période d'instabilité, lorsque la vitesse du liquide diminue et finit par changer de sens. Cette ascension des tourbillons s'accompagne d'une mise en suspension des granulats sur la face aval de chacune des rides.

Le mouvement de retour du liquide rabat les granulats en suspension sur les faces (devenues faces amont), qu'ils venaient de quitter, et le mouvement se poursuit par la formation de nouveaux tourbillons, au cours de la deuxième période d'oscillation. Mais

l'existence d'un transport de masse du liquide due à un mouvement d'aller et de retour du liquide non rigoureusement symétriques, engendre un cheminement des rides lent (avec une certaine dissymétrie de forme) dans le même sens que le transport de masse du liquide.

b) Critères d'apparition des rides

L'objectif final de cette série d'expériences est de donner ou définir un critère d'apparition des rides sur le fond en régime oscillatoire, en fonction des conditions hydrodynamiques, c'est à dire les caractéristiques de la houle :

- Amplitude de la houle H_s ,
- Période de la houle T ,
- Longueur d'onde de la houle L .

Et les caractéristiques du sédiment :

- La densité : d_s ,
- Le diamètre moyen : D_{50} .

Les essais ont été effectués dans le canal à houle présenté dans la figure V.1, équipé d'un générateur de houle et d'un système d'acquisition des résultats sous forme de signal électrique. Une couche de sédiment non cohésif constituée par le Siporex de densité $d_s = 1.45$ est disposé sur 5 cm d'épaisseur au-dessus de la plate-forme.

Le protocole des essais consiste à mesurer la profondeur critique pour laquelle les premières rides apparaissent pour trois classes granulométriques différentes $D_{50} = 0.191\text{mm}$, 0.500mm et 0.870mm en faisant augmenter l'intensité de la houle. Les paramètres hydrosédimentaires et les résultats des différents essais sont récapitulés dans le tableau IV.3 ci-dessous :

Série N°	Granulométrie	Caractéristiques de la houle				Etat des fonds	Profondeur critique d'apparition des rides
		D50(mm)	H _s (m)	T(s)	L(cm)		
1	0.191	1.83	0.77	93.6		Non	-
		4.33	0.90	127.4	20.8	Oui	13.7
		4.57	0.92	133	18.0	Oui	16.0
		5.95	1.16	209	25.3	Oui	20.0
		6.15	1.03	166.4	25.5	Oui	18.0
		6.60	1.17	252	27.0	Oui	23.0
		7.40	1.03	166.4	14.2	Oui	33.0
		8.13	1.29	260	22.4	Oui	33.0
2	0.500	11.7	1.55	374.4	31.0	Oui	42.0
		0.71	0.82	78.6	1.6	Oui	21.4
		1.72	1.09	140	5.2	Oui	24.8
		4.28	1.38	224	13.1	Oui	32.4
		4.41	0.8	76	9.7	Oui	21.6
		4.5	1.38	224	17.6	Oui	26.2
3	0.870	4.6	1.38	224	13.2	Oui	34.5
		2.5	1.23	250		Non	-
		5.0	1.41	312		Non	-
		7.19	1.59	400	39.2	Oui	22.6
		9.03	1.68	440	38.5	Oui	29.8
		10.31	1.77	488	59	Oui	23.8
		13.10	1.94	587	73.2	Oui	26.7
18.75	2.12	701	82.7	Oui	36.8		

Tableau IV.3 – Données et résultats des essais

Le fond initial n'est pas ridé pour chaque test, et l'apparition des rides est constatée à partir d'une certaine profondeur critique d_c pour laquelle les premières petites ondulations apparaissent et cela s'effectue en allant du large vers la cote. D'après le tableau ci-dessus, on

remarque bien que la profondeur critique d_c a une tendance à augmenter avec les paramètres caractéristiques de la houle (H_s , L , T) qui se traduit par la nature du régime d'écoulement de la houle près du fond mobile et la vitesse orbitale maximale sur le fond U , d'une part et d'autre part la granulométrie (D_{50}) qui se traduit par la vitesse de chute de la particule W et le nombre de Reynolds lié à la vitesse de chute de la particule $Re = W.D/v$

α) Influence de la nature du régime d'écoulement dans la couche limite sur l'apparition des rides

Ce paragraphe illustre l'influence de la nature de la couche limite sur l'apparition des rides, en d'autre terme l'existence des rides est liée à l'existence d'un écoulement turbulent dans la couche limite. Dans le graphique ci-dessous on représente le domaine d'apparition des rides en fonction de l'épaisseur relative de la couche limite δ/D_{50} (rapport entre l'épaisseur de la couche limite et le diamètre des particules D_{50}) et le rapport d_c/L (profondeur critique/longueur d'onde de la houle).

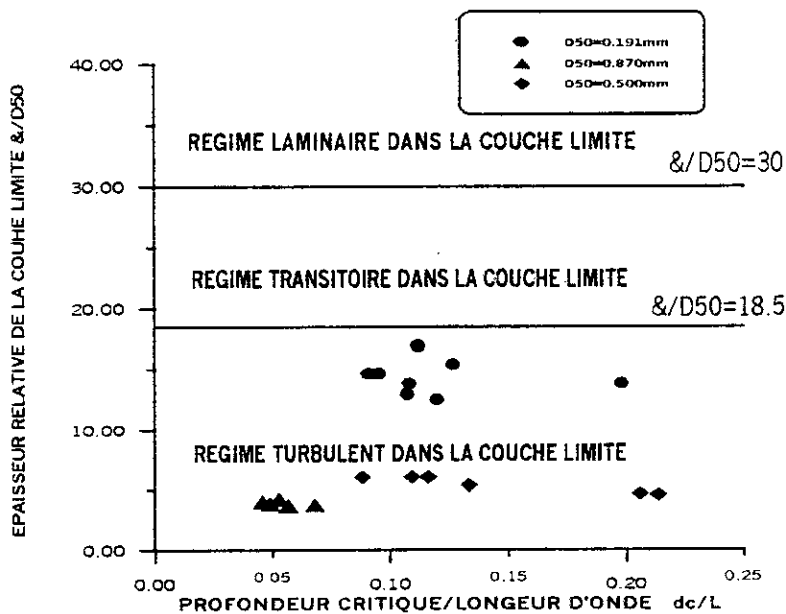


Figure IV.16 – Influence de la nature de la couche limite sur l'apparition des rides

Dans le graphique précédent on remarque bien l'influence du régime d'écoulement dans la couche limite sur l'apparition des rides, pour les trois séries d'essais de granulométries différentes $D_{50} = 0.191\text{mm}$, 0.500mm et 0.870mm . Les rides apparaissent pour des valeurs de $\delta/D_{50} < 18.5$ c'est à dire pour une couche limite turbulente (prépondérance de la turbulence par rapport à la viscosité).

D'après ces résultats, on note que la turbulence est un élément nécessaire pour l'apparition des rides sur un fond mobile soumis à un écoulement oscillatoire: Cela est expliqué par le fait que dans un régime laminaire ou transitoire le courant de translation parallèle au fond ne suffit pas pour la mise en suspension des sédiments dans le tourbillon dû au mouvement d'aller et de retour du liquide, alors que la mise en suspension des sédiments est nécessaire pour la formation des rides. Par contre, pour un écoulement turbulent dans la couche limite la turbulence intervient dans la mise en suspension des sédiments dans le tourbillon qui forme par la suite les rides.

β) Influence de la vitesse orbitale maximale U sur l'apparition des rides

Un autre critère qui résume l'action de la houle sur les sédiments et l'apparition des rides, est exprimé par la vitesse orbitale maximale sur le fond (U).

Ce critère a été proposé par LARRAS (1963) [26], en montrant que la vitesse orbitale maximale sur le fond ne dépendait que d'une relation relativement indépendante d'oscillation du liquide entre les deux rapports sans dimensions suivants :

- Rapport U/W entre la vitesse maximale U d'oscillation du liquide sur le fond et la vitesse W de chute libre des granulats dans le liquide.
- Nombre de Reynolds WD_{50}/ν du mouvement de chute libre des granulats dans le liquide à l'échelle de leur diamètre médian D_{50} .

Pour notre cas les résultats obtenus sont représentés dans le graphique ci après :

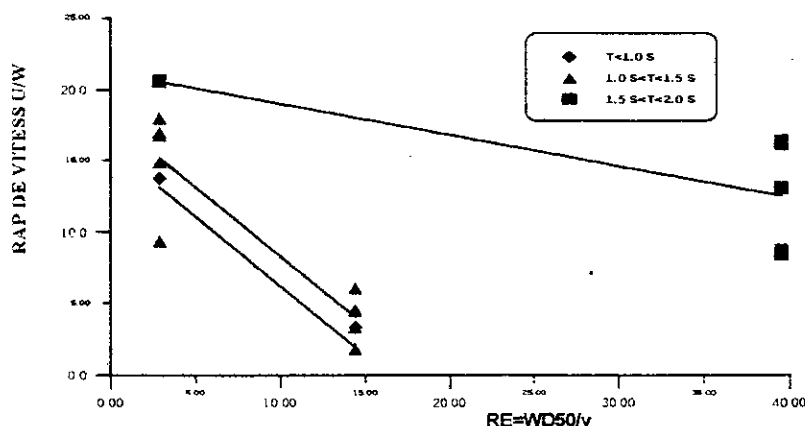


Figure IV.17-Apparition des rides en fonction des rapports U/W et WD_{50}/ν

D'après le graphique précédent, on remarque bien que l'apparition des rides est liée à la vitesse orbitale maximale sur le fond, à la période de la houle et au nombre de Reynolds lié au mouvement de chute libre des grains. Par exemple, pour un fond qui présente un diamètre moyen $D_{50} = 0.500\text{mm}$ ($Re = 14.4$), la vitesse orbitale d'apparition des rides est de :

- 2cm/s pour la classe des périodes $T < 1.0$ s
- 4cm/s pour la classe des périodes $1.0 \text{ s} < T < 1.5$ s
- 18cm/s pour la classe des périodes $1.5 \text{ s} < T < 2.0$ s

Donc la vitesse orbitale maximale nécessaire pour l'apparition des rides est proportionnelle à la période de la houle pour la même granulométrie. Pour le même rapport entre la vitesse orbitale maximale et la vitesse de chute par exemple $U/W=15$, les rides apparaissent à partir d'une certaine gamme de granulométrie suivant la classe des périodes :

- pour la classe des périodes $T < 1.0$ s, les rides apparaissent partir d'un diamètre moyen des grains $D_{50} = 0.154\text{mm}$, avec $U=22.5\text{cm/s}$.
- pour la classe des périodes $1.0\text{s} < T < 1.5$ s, les rides apparaissent à partir d'un diamètre moyen des grains $D_{50} = 0.300\text{mm}$, avec $U = 30.0\text{cm/s}$.
- pour la classe des périodes $1.5 \text{ s} < T < 2.0$ s, les rides apparaissent à partir d'un diamètre moyen des grains $D_{50} = 0.700\text{mm}$, avec $U= 60.0\text{cm/s}$.

On remarque bien que pour le même rapport de vitesse U/W , la vitesse orbitale nécessaire pour la formation des rides est proportionnelle simultanément à la période de la houle et au diamètre moyen des grains constituant le fond.

c) Dimensions des rides à l'équilibre

L'influence des fonds sur l'écoulement général est toujours l'objet des études expérimentales, que ce soit pour les courants ou les mouvements oscillatoires. L'état des fonds est généralement pris en compte par le coefficient du rugosité relative qui intervient dans le coefficient de frottement, par conséquent sur le régime d'écoulement et le transport des sédiments. Ce coefficient peut être prescrit en fonction des dimensions des rides, eux même sont exprimées en fonction des caractéristiques hydrodynamiques (la houle : l'amplitude H_s , la période T , la longueur d'onde L), sédimentaire (la densité d_s , le diamètre moyen D_{50}). Dans le but d'exprimer les dimensions des rides :

- la longueur d'onde de la ride : λ
- le creux de la ride : δ

en fonction des caractéristiques de la houle ainsi que de la granulométrie du fond, la série d'essai ci-dessous intervient pour mettre en évidence l'influence du mouvement oscillatoire sur les caractéristiques des rides.

Les expériences ont été réalisées dans le canal à houle présenté dans la figure IV.1. Le canal est équipé d'un batteur de type piston pour la génération de la houle avec un système de génération des données et d'acquisition des résultats. Une couche de sédiment non cohésif est disposée sur 5 cm d'épaisseur au-dessus de la plate forme. Le fond est soumis à deux types de houle :

- La houle irrégulière (progressive) avec une granulométrie caractérisée par un diamètre moyen $D_{50} = 0.191\text{mm}$.
- La houle régulière avec un fond de granulométrie caractérisée par un diamètre moyen $D_{50} = 0.500\text{mm}$.

Chaque test consiste à générer la houle avec les caractéristiques (H_s , T , L), jusqu'à l'obtention de l'état d'équilibre des dimensions des rides. Le pied à coulis est utilisé pour la mesure des dimensions de la ride (la longueur d'onde λ , le creux δ). Les paramètres hydrodynamiques et sédimentaires des différents essais sont récapitulés dans les deux tableaux ci-après :

Caractéristiques de la houle					Dimensions de la ride		
T(S)	H/L(%)	U(cm/s)	A ₀ (cm)	D(cm)	λ(cm)	δ (cm)	δ/λ(%)
0.90	3.4	20.9	11.1	13.5	3.21	0.41	11.9
0.90	3.4	32.7	19.7	9.0	4.30	0.61	14.18
0.90	3.4	49.9	28.6	6.0	5.04	0.74	14.6
1.03	4.1	16.1	10.5	30.0	2.75	0.30	10.9
1.03	4.1	20.5	13.4	25.0	3.54	0.40	11.3
1.03	4.1	27.1	17.7	20.0	4.34	0.50	11.5
1.03	4.1	30.6	20.1	18.0	4.65	0.52	11.1
1.03	3.7	29.1	19.1	16.0	3.31	0.34	10.2
1.03	4.1	34.9	22.9	16.0	4.97	0.58	11.6
1.03	4.1	42.2	27.6	13.5	5.37	0.65	12.1
1.03	3.7	35.0	22.9	13.5	3.82	0.45	11.7
1.16	2.8	15.7	11.6	30.0	2.77	0.32	11.6
1.16	2.8	19.6	14.5	25.0	3.52	0.47	13.3
1.16	2.8	25.4	18.7	20.0	4.28	0.59	13.7
1.16	2.8	28.5	21.1	18.0	4.58	0.65	14.2
1.16	2.8	32.4	23.9	16.0	4.88	0.70	13.4
1.16	2.8	38.8	28.6	13.5	5.25	0.76	14.5
1.29	3.2	25.0	20.5	30.0	5.30	0.76	14.3
1.29	3.2	30.8	25.3	25.0	5.72	0.79	13.8
1.29	3.2	39.3	32.3	20.0	6.14	0.84	13.6
1.29	3.2	44.0	36.2	18.0	6.30	0.85	13.5
1.29	3.2	49.8	40.9	16.0	6.47	0.87	13.4
1.29	3.2	59.9	48.9	13.5	6.68	0.89	13.3
1.55	3.1	38.1	37.6	35.0	7.32	0.88	12.0
1.55	3.1	45.0	44.5	30.0	7.59	0.95	12.5
1.55	3.1	54.7	54.1	25.0	7.87	1.01	12.8
1.55	3.1	69.1	68.3	20.0	8.15	1.08	13.6
1.55	3.1	77.1	76.2	18.0	8.26	1.11	13.4
1.55	3.1	87.1	85.9	16.0	8.36	1.13	13.5
1.55	3.1	103.5	102.2	13.5	8.50	1.16	13.6

Tableau IV.4 : Essai avec la houle irrégulière, $D_{50} = 0.191\text{mm}$, $W = 1.5\text{ cm/s}$.

Caractéristiques de la houle					Dimensions de la ride		
T(S)	H/L(%)	U(cm/s)	A ₀ (cm)	d(cm)	λ(cm)	δ(cm)	Δ/λ(%)
0.71	5.6	15.00	6.78	13.5	14.25	3.50	24.6
0.71	5.6	11.78	5.32	16.0	13.37	3.11	23.3
0.71	5.6	9.81	4.44	18.0	12.67	2.88	22.7
0.71	5.6	8.23	3.72	20.0	11.96	2.72	22.7
0.95	1.22	8.89	5.38	13.5	17.10	3.55	20.7
0.95	1.22	7.32	4.43	16.0	16.30	3.20	19.6
0.95	1.22	6.37	3.85	18.0	15.53	2.91	18.7
0.95	1.22	5.59	3.38	20.0	14.10	2.80	19.9
1.20	2.01	30.60	23.39	13.5	24.85	3.60	14.5
1.20	2.01	25.58	19.55	16.0	22.35	3.35	15.0
1.20	2.01	22.54	17.22	18.0	20.35	3.17	15.5
1.20	2.01	20.09	15.35	20.0	18.60	2.97	16.0
1.20	2.01	15.62	11.93	25.0	16.40	2.50	15.2

Tableau IV.5 : Essai avec la houle régulière, $D_{50} = 0.500\text{mm}$, $W = 2.88\text{ cm/s}$.

α) Variation des dimensions de la ride (λ , δ) en fonction de la profondeur du fond

L'action de la houle sur le fond est liée à la profondeur du fond par rapport à la surface libre du plan d'eau, en allant du large vers la côte l'influence de la houle sur le fond est accentuée ce qui traduit par un mouvements des sédiment très important et par la formation des rides près des côtes.

Le paramètre à explorer dans ce paragraphe est l'influence de la profondeur sur les dimensions des rides (λ , δ) pour les deux types de houle. A cet effet, les résultats obtenus d'après les tableaux précédents montrent que la longueur d'onde et le creux de la ride sont inversement proportionnelle à la profondeur du fonds pour une période de houle donnée (H_s amplitude fixe). Par exemple :

pour $T = 1.29\text{ s}$ (la houle irrégulière) :

- $\lambda = 6.68\text{ cm}$, $\delta = 0.89\text{ cm}$ pour $d = 13.5\text{ cm}$
- $\lambda = 6.47\text{ cm}$, $\delta = 0.87\text{ cm}$ pour $d = 16.0\text{ cm}$
- $\lambda = 6.30\text{ cm}$, $\delta = 0.85\text{ cm}$ pour $d = 18.0\text{ cm}$

pour $T = 1.20\text{ s}$ (la houle régulière) :

- $\lambda = 24.85\text{ cm}$, $\delta = 3.60\text{ cm}$ pour $d = 13.5\text{ cm}$
- $\lambda = 22.35\text{ cm}$, $\delta = 3.35\text{ cm}$ pour $d = 16.0\text{ cm}$
- $\lambda = 20.35\text{ cm}$, $\delta = 3.17\text{ cm}$ pour $d = 18.0\text{ cm}$

En plus de la relation entre les dimensions des rides et la profondeur, on note aussi que l'ordre de grandeur des dimensions des rides est lié au type de houle générée (l'ordre de grandeur des dimensions des rides dû à la houle régulière sont plus importantes à ceux de la houle irrégulière).

• *La houle irrégulière*

Les quatre graphes ci-dessous montrent l'influence de la profondeur du fond sur les dimensions des rides pour la série de période suivantes : $T= 0.90, 1.03, 1.16, 1.29$ et 1.55 s.

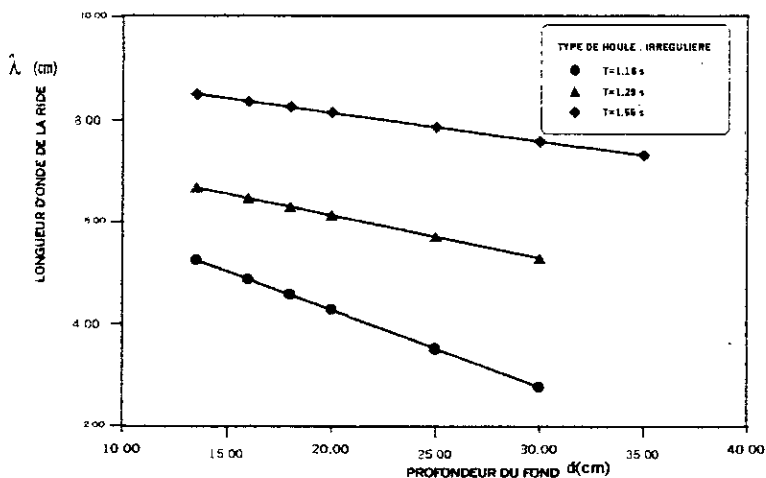
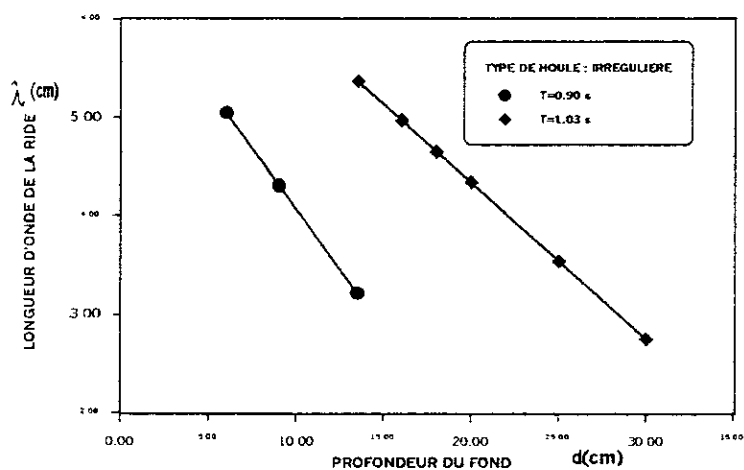


Figure IV.18 – Variation de la longueur d'onde de la ride en fonction de la profondeur du fond

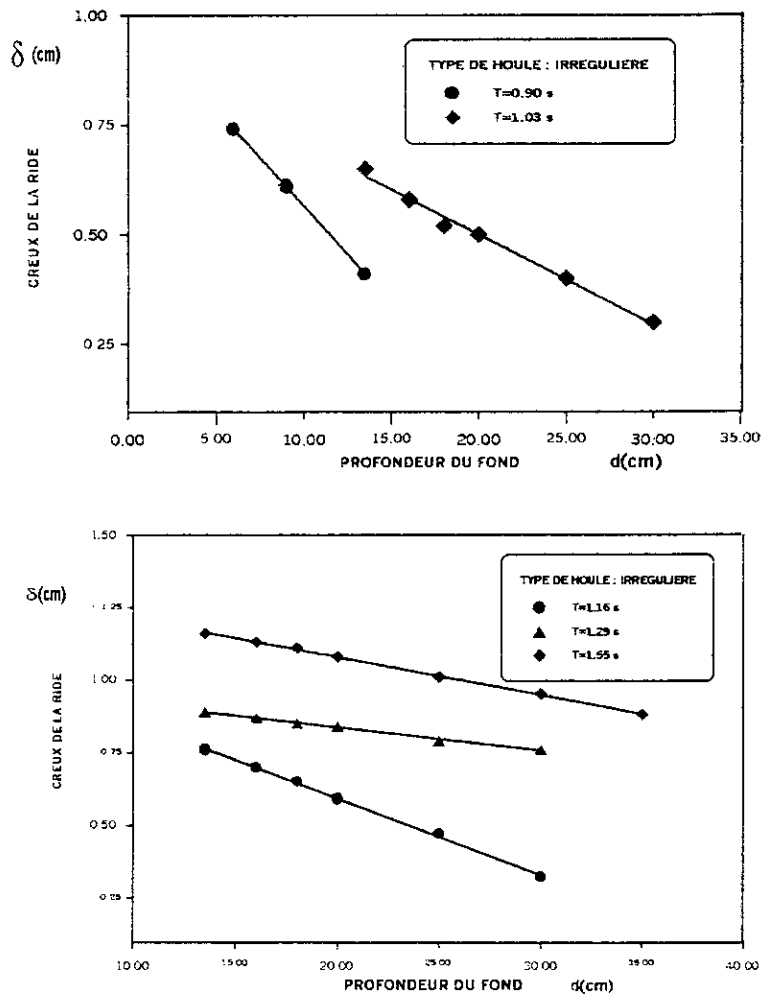


Figure IV.19 – Variation du creux de la ride en fonction de la profondeur du fond

D’après les graphes précédents, on remarque que la longueur d’onde de la ride λ est comprise entre 2.75 à 8.5cm, pour des creux δ de l’ordre de 0.3 à 1.16 cm pour la série des périodes $T = 0.90, 1.03, 1.16, 1.29$ et $1.55s$. Ces dimensions sont inversement proportionnelles à la profondeur du fond pour une période de houle donnée. Par exemple pour $T=1.16 s$:

- $\lambda = 5.25$ cm, $\delta = 0.76$ cm pour $d=13.5$ cm
- $\lambda = 4.88$ cm, $\delta = 0.70$ cm pour $d=16.0$ cm
- $\lambda = 4.58$ cm, $\delta = 0.65$ cm pour $d=18.0$ cm
- $\lambda = 4.28$ cm, $\delta = 0.59$ cm pour $d=20.0$ cm
- $\lambda = 3.52$ cm, $\delta = 0.47$ cm pour $d=25.0$ cm

• *La houle régulière*

Les résultats obtenus sont représentés dans les graphes ci après :



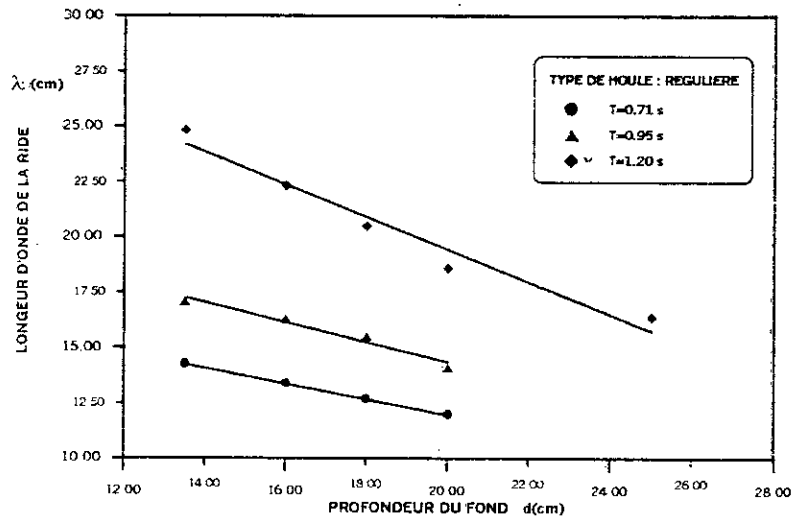


Figure IV.20 - Variation de la longueur d'onde de la ride en fonction de la profondeur du fond

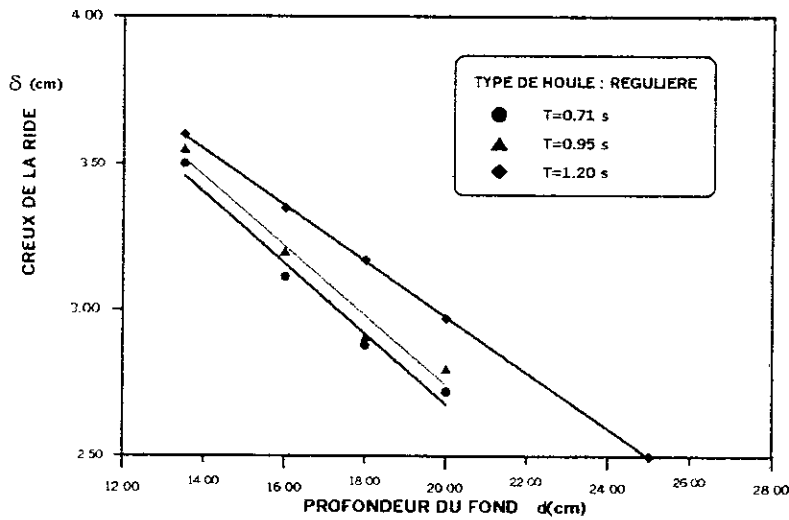


Figure IV.21 Variation du creux de la ride en fonction de la profondeur du fond

La variation des dimensions des rides sous l'action de la houle régulière montre que la longueur d'onde de la ride δ est comprise entre 11.95 à 24.85 cm, pour un creux de 2.40 à 3.60 cm. Cette variation est inversement proportionnelle à la profondeur du fond pour chaque période de houle donnée, par exemple pour $T=1.20$ s :

- $\lambda = 24.85$ cm, $\delta = 3.60$ cm pour $d=13.5$ cm
- $\lambda = 22.35$ cm, $\delta = 3.35$ cm pour $d=16.0$ cm
- $\lambda = 20.35$ cm, $\delta = 3.17$ cm pour $d=18.0$ cm
- $\lambda = 18.60$ cm, $\delta = 2.97$ cm pour $d=20.0$ cm

$$-\lambda = 16.40 \text{ cm}, \delta = 2.50 \text{ cm} \quad \text{pour } d=25.0 \text{ cm}$$

En conclusion les dimensions des rides sont inversement proportionnelles à la profondeur du fond pour une période de houle donnée, le type de houle généré a une influence sur l'ordre de grandeur des dimensions des rides (les rides dues à la houle régulière sont plus importantes à ceux de la houle irrégulière).

β) Variation des dimensions des rides en fonction de la période de la houle

Ce paragraphe traite l'influence de la période de la houle sur les dimensions des rides (λ, δ), d'après les graphes précédents on remarque que les dimensions des rides sont proportionnelles à la période de la houle pour la même profondeur. Par exemple pour la profondeur $d=13.5 \text{ cm}$ (la houle irrégulière) :

$$\begin{aligned} -\lambda &= 3.21 \text{ cm}, \delta = 0.41 \text{ cm} && \text{pour } T=0.90 \text{ s} \\ -\lambda &= 5.53 \text{ cm}, \delta = 0.65 \text{ cm} && \text{pour } T=1.03 \text{ s} \\ -\lambda &= 5.25 \text{ cm}, \delta = 0.76 \text{ cm} && \text{pour } T=1.16 \text{ s} \\ -\lambda &= 6.68 \text{ cm}, \delta = 0.89 \text{ cm} && \text{pour } T=1.29 \text{ s} \\ -\lambda &= 8.50 \text{ cm}, \delta = 1.16 \text{ cm} && \text{pour } T=1.55 \text{ s} \end{aligned}$$

On constate bien que la longueur d'onde et le creux de la ride sont proportionnelle à la période de la houle, la deuxième valeur de la longueur d'onde qui correspond à la période $T=1.03 \text{ s}$ $\lambda=5.53 \text{ cm}$ est élevée à cause de la valeur élevée de l'amplitude de la houle ($H/L=4.1\%$). Ce qui montre que la période et la profondeur ne sont pas les seuls paramètres qui influent sur les dimensions des rides.

γ) Variation des dimensions des rides en fonction de l'amplitude de la houle

Ce paragraphe illustre l'influence de l'amplitude de la houle sur les dimensions des rides, pour une période et profondeur donnée ; le graphique ci dessous montre cette variation :

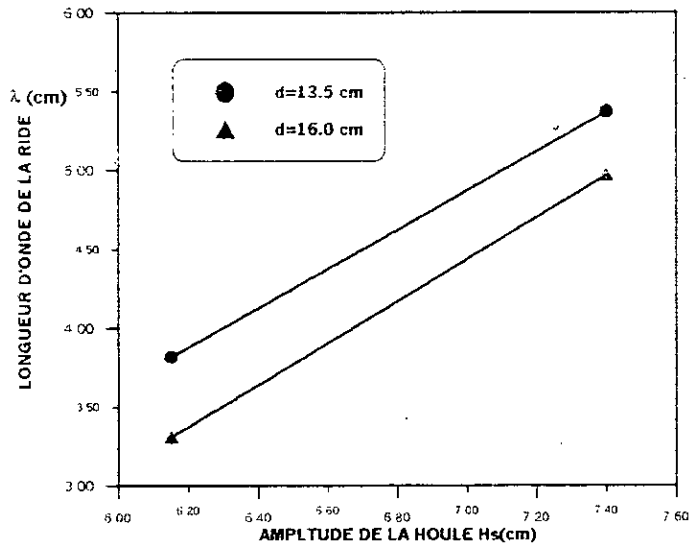


Figure IV.22– Influence de l’amplitude de la houle sur la longueur d’onde de la ride

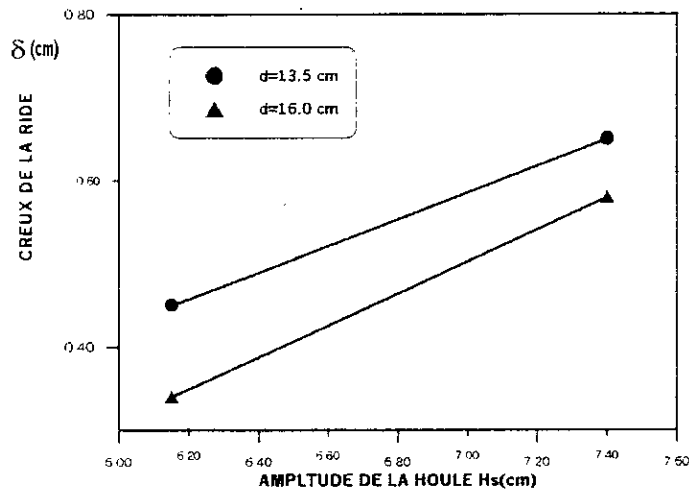


Figure IV.23 – Influence de l’amplitude de la houle sur le creux de la ride

La variation de la longueur d’onde λ et le creux δ est proportionnelle à l’amplitude de la houle H_s pour la période $T=1.03$ s, pour les profondeurs $d=13.5$ cm et 16 cm.

En conclusion les dimensions des rides sont proportionnelles à la période et l’amplitude de la houle et inversement proportionnelle à la profondeur de la houle ; dans le paragraphe qui suit nous présentons la variation des dimensions des rides en fonction de la vitesse orbitale sur le fond qui tient en compte à la fois les paramètres précédents (la profondeur d , la période T et l’amplitude H_s).

δ) Variation des dimensions des rides en fonction de la vitesse orbitale U

La variation des dimensions des rides est liée à la fois à la profondeur, la période et à la hauteur significative de la houle ; ces paramètres peuvent être exprimé en fonction de la vitesse orbitale maximale sur le fond , les graphiques ci dessous montrent l'influence de la vitesse orbitale sur la longueur d'onde λ pour les deux types de houle :

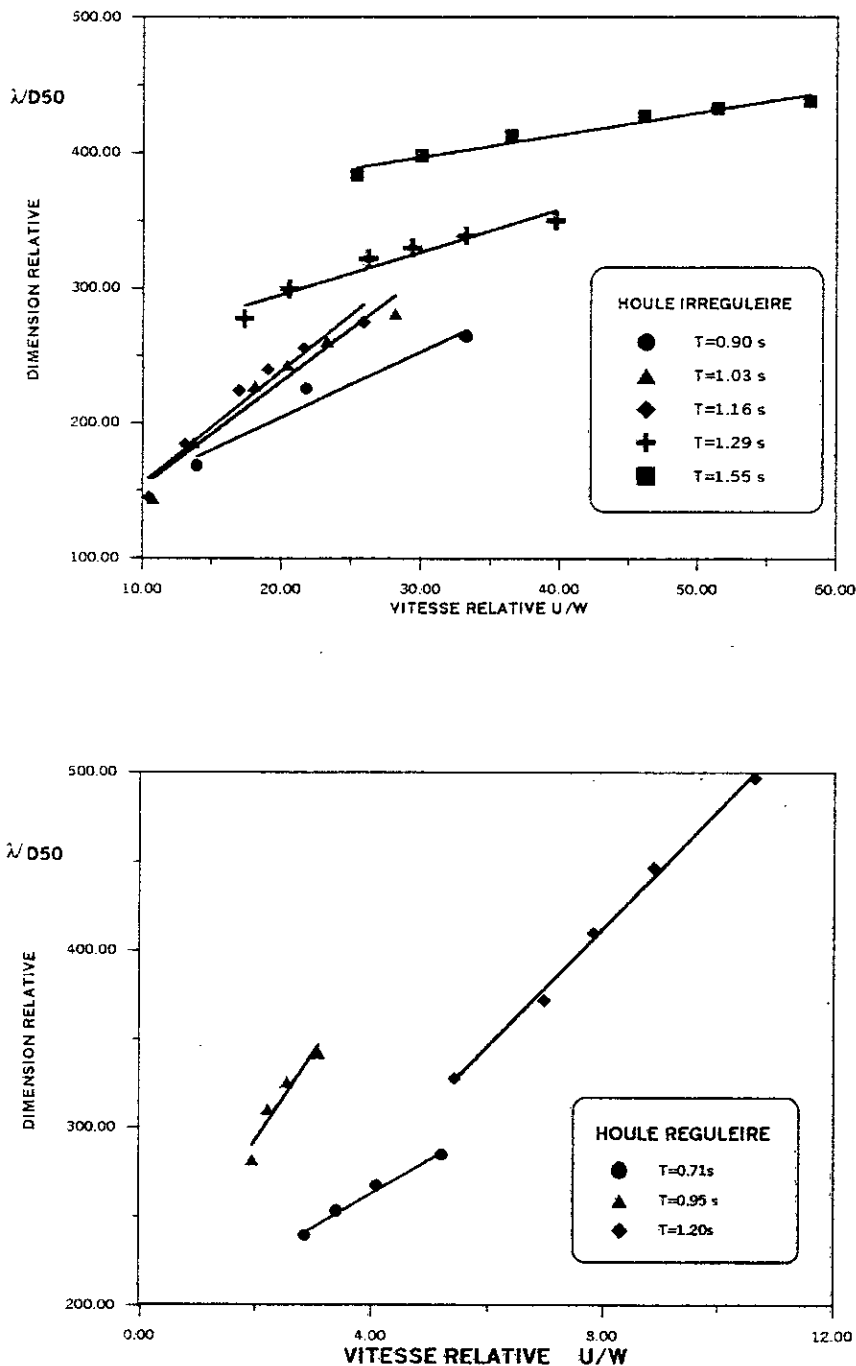


Figure IV.24 – Influence de la vitesse orbitale sur la longueur d'onde de la ride

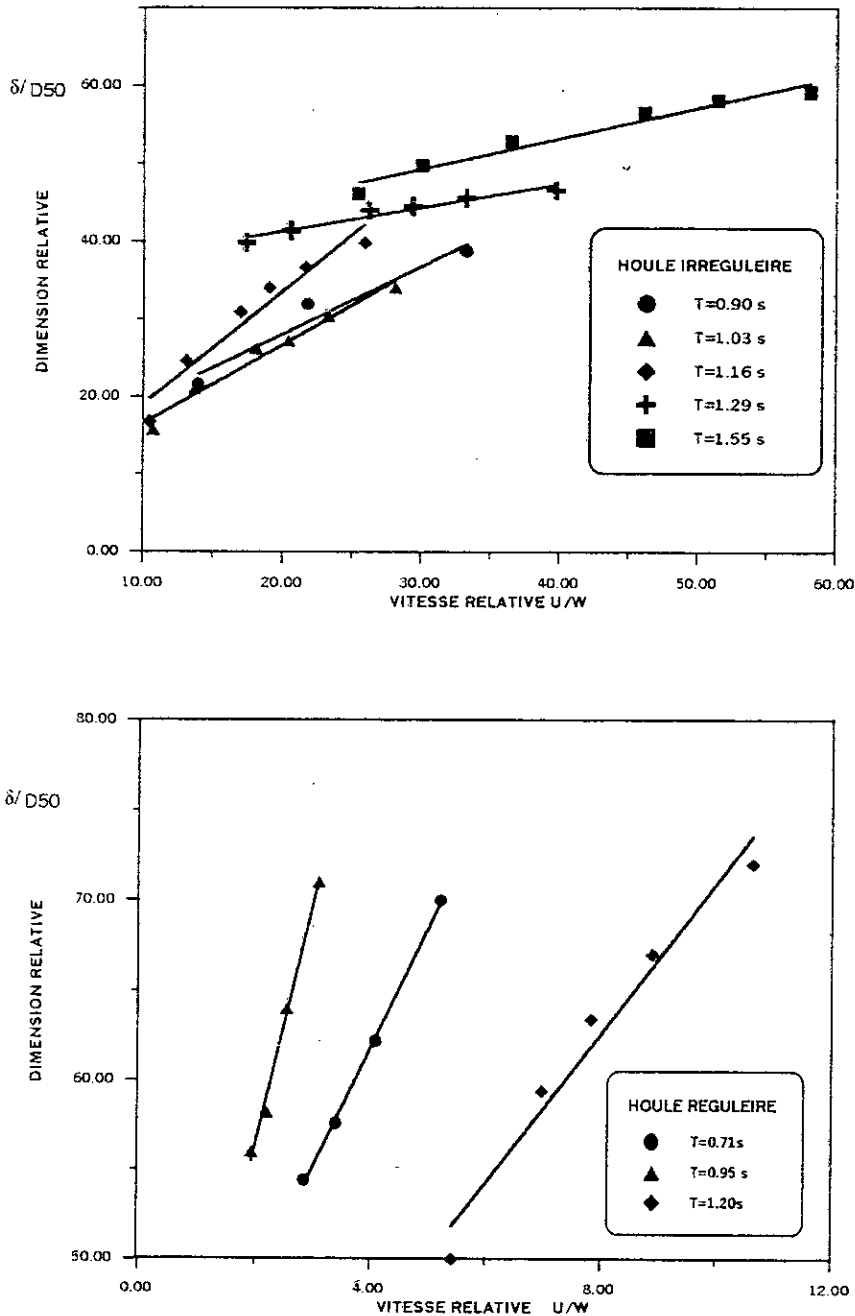


Figure IV.25 – Influence de la vitesse orbitale sur le creux de la ride

D'après les graphiques précédents on constate que pour les deux types de houles (irrégulière et régulière) la longueur d'onde λ et le creux δ des rides dépendent de la vitesse maximale U d'oscillation du liquide sur le fond pour une nature de granulat, un liquide et une période d'oscillation donnée lorsqu'on prend le diamètre moyen des sédiments $D50$ comme unité de longueur et leur vitesse de chute libre W comme unité de vitesse.

D'après les graphes précédents on remarque que le rapport λ/A_0 est linéaire par rapport à la fonction logarithmique du paramètre de mobilité $M=U^2/(d_s-1)gD_{50}$; en utilisant la méthode des moindres carrés le rapport λ/A_0 est exprimé en fonction de $M=U^2/(d_s-1)gD_{50}$ par l'équation suivante :

1- La houle régulière : $\lambda/A_0 = -1.02 \cdot \log(M) + 4.43$ $R^2=0.95$

2- La houle irrégulière : $\lambda/A_0 = -0.05 \cdot \log(M) + 0.45$ $R^2=0.95$

• Variation de la cambrure de la ride δ/λ

La cambrure de la ride caractérise l'échelle des dimensions horizontales et verticales de la ride ; l'influence des conditions hydro-sédimentaires sur ce rapport est représentée sur les graphiques ci dessous pour les deux types de houle :

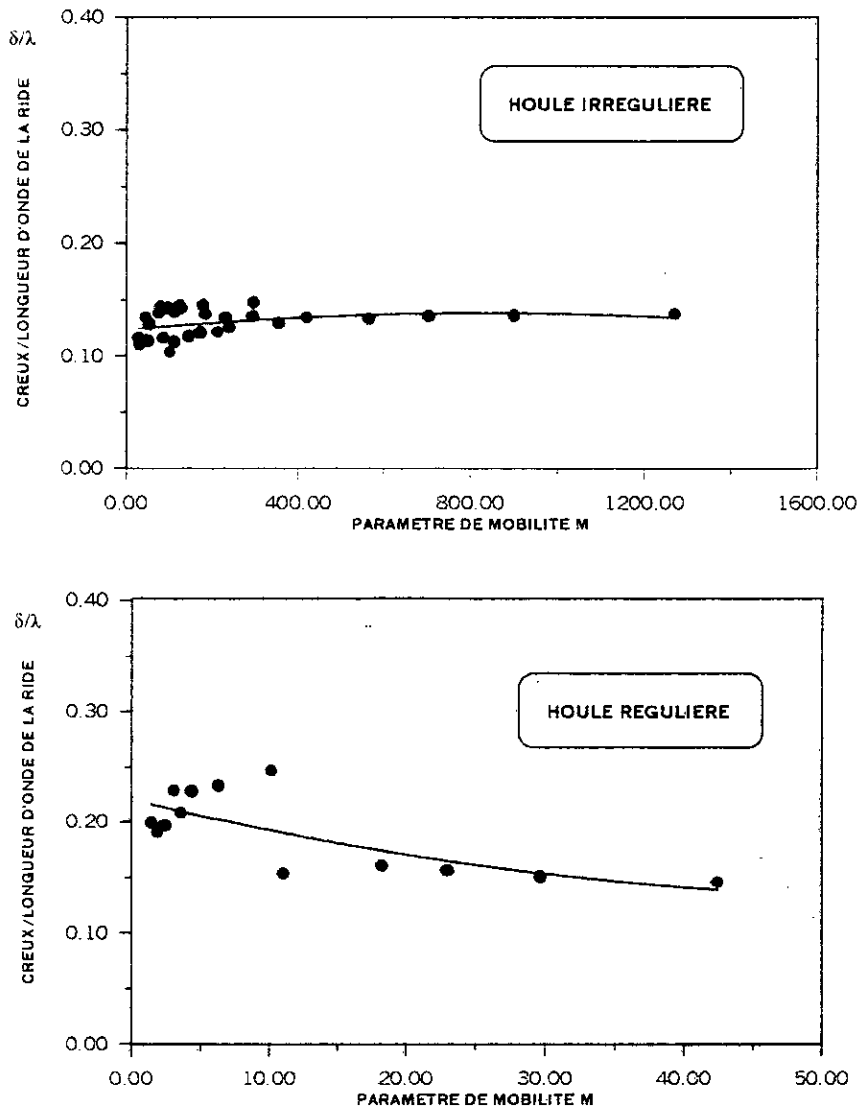


Figure IV.27 – Influence du paramètre de mobilité sur la cambrure de la ride

On remarque bien que la cambrure de la ride δ/λ , a une tendance à converger vers une valeur fixe en faisant augmenter le paramètre de mobilité $M=U^2/(ds-1)g D_{50}$, pour les deux types de houle.

Pour la houle irrégulière, la cambrure de la ride a une variation croissante avec le paramètre de mobilité M pour $M < 400$; à partir de cette valeur, la cambrure de la ride n'a pas de variation avec le paramètre de mobilité ($\delta/\lambda = 0.15$, pour $M > 400$), en résumé :

- pour $M < 400$ $\delta/\lambda = 0.10$ à 0.15
- pour $M > 400$ $\delta/\lambda = 0.15$

Pour la houle régulière, la cambrure de la ride a une variation décroissante avec le paramètre de mobilité M , pour $M < 20$, à partir de cette valeur, la cambrure de la ride δ/λ n'a pas de variation avec la paramètre de mobilité ($\delta/\lambda = 0.15$, pour $M > 20$), en résumé :

- pour $M < 20$ $\delta/\lambda = 0.20$ à 0.15
- pour $M > 20$ $\delta/\lambda = 0.15$

En conclusion finale, la cambrure de la ride a une tendance à converger vers une valeur fixe ($\delta/\lambda = 0.15$), pour les deux types de houle, avec une légère différence pour les petites valeurs du paramètre de mobilité M .

CHAPITRE V

RECOMMANDATIONS POUR L'EXPLOITATION DES RESSOURCES SEDIMENTAIRES MARINES

Introduction

L'étude proposée, concerne la baie d'Alger où la demande des matériaux est accentuée pour la réalisation du terminal à conteneurs dans le port d'Alger. Cette étude permet de faire une approche des phénomènes liés à l'hydrodynamique sédimentaire sous l'action de la houle et de prévoir l'influence de l'extraction des sédiments en mer sur l'équilibre du littoral en fixant *la profondeur critique* à partir de laquelle ces *extractions* pourraient être *autorisées*.

Cette étude comporte les phases suivantes :

- 1- Analyse des données de base.
- 2- Conception et réalisation du modèle.
- 3- Réglage hydraulique et sédimentologique du modèle.
- 4- Prévisions de l'évolution des fonds en fonction des souilles draguées à la profondeur -8, -10 et -12m.

1°/ Analyse des données de base

Dans ce paragraphe nous présentons l'ensemble des données de base intervenants dans cette étude :

a) Cadre géographique :

La baie d'Alger correspond au débouché du bassin de la Mitidja. Elle est limitée à l'Ouest par le massif de Bouzareah et à l'Est par le Cap de Matifou, au Sud par le bassin de la Mitidja et au Nord par la mer Méditerranée (Figure V.1).

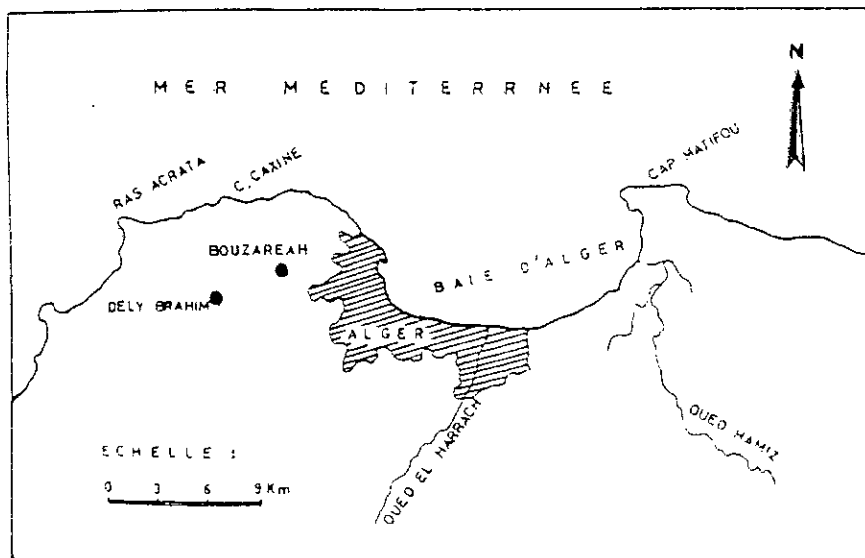


Figure V1- Cadre géographique

b) Données géotechniques

La réalisation d'une campagne géotechnique (sismique-réflexion) a permis de mettre en évidence la couche meuble des fonds (couverture sédimentaire) au-dessus du substratum rocheux.

La figure (V.2) représente 03 profils parallèles à la côte -5m, -10m et -20m. On remarque bien que la couche meuble est importante au niveau de Oued El Harrach qui correspond à l'ordonnée $x = 5500$ m, ce qui justifie le choix du site de dragage des sédiments.

La variation de la couche meuble dans le profil est représentée dans la figure V.3. On remarque bien que l'épaisseur de la couche meuble est décroissante du large vers la côte.

D'après ces résultats de la campagne géotechnique, on remarque que le site possède une réserve sédimentaire très importante face à Oued El Harrach et ces réserves sont plus importantes de plus en plus en allant vers le large de la baie d'Alger.

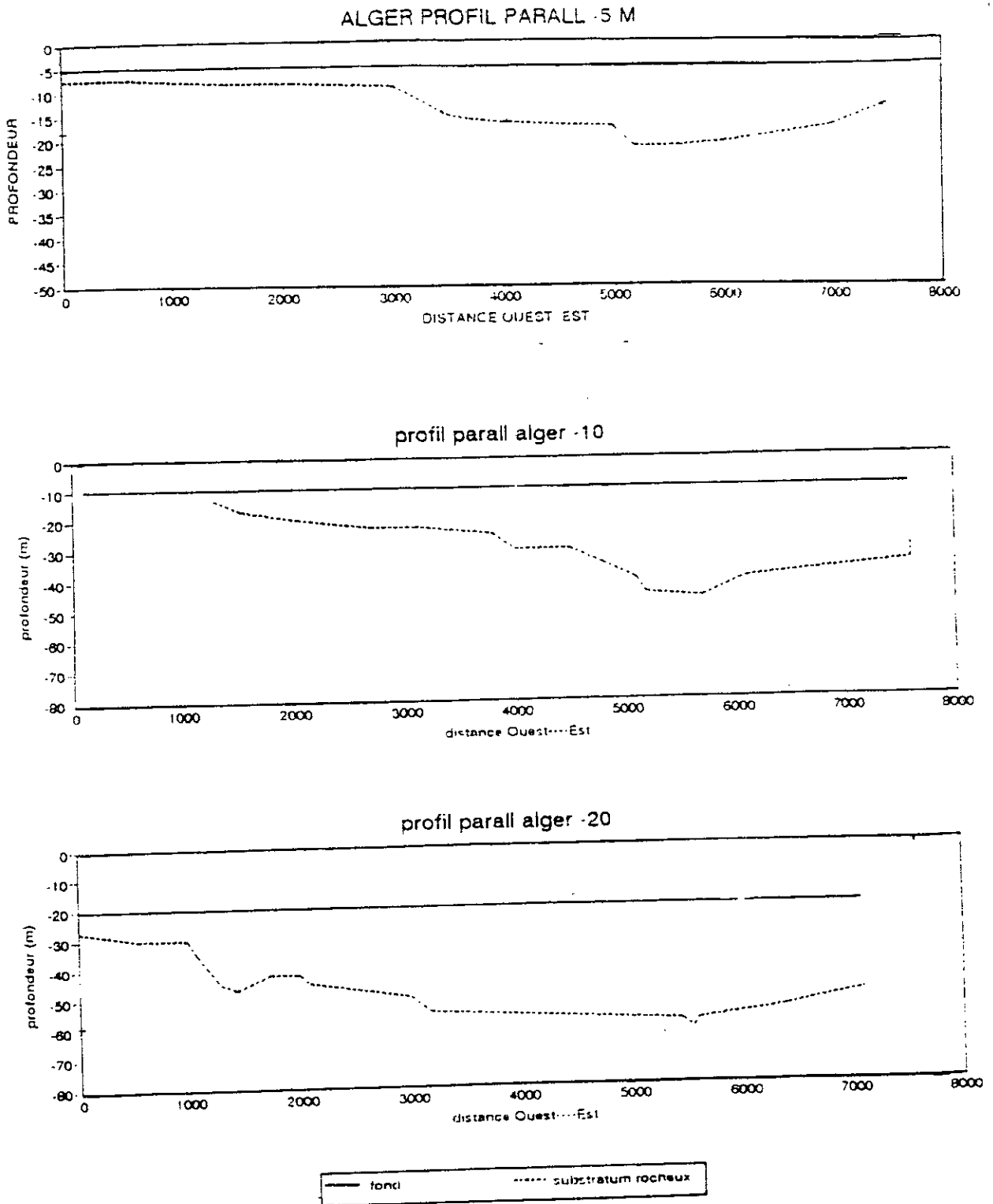


Figure V.2- Variation de l'épaisseur de la couche meuble parallèlement à la côte

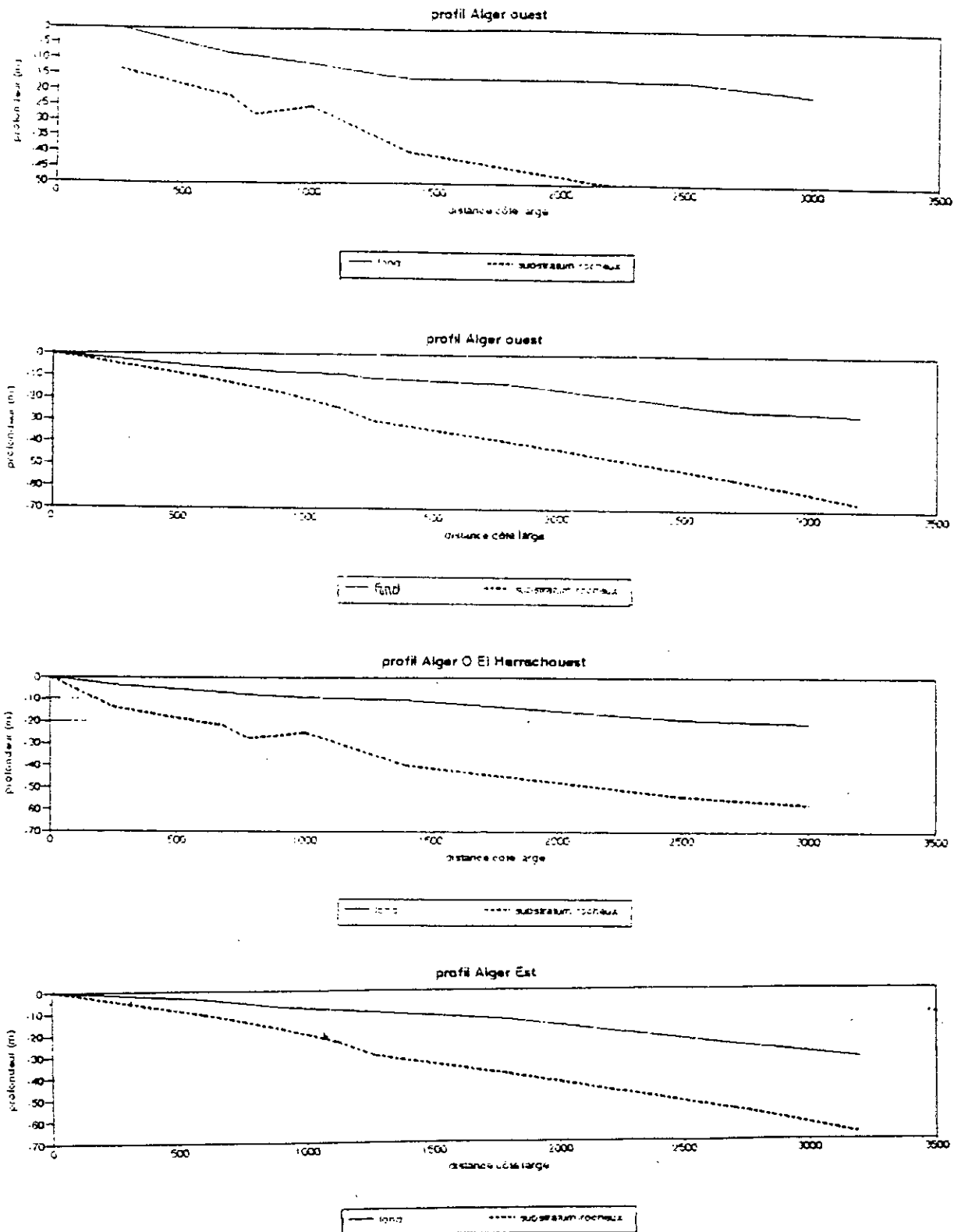


Figure V.3 - Variation de l'épaisseur de la couche meuble perpendiculairement à la côte

c) Données sédimentologiques

L'analyse granulométrique des échantillons des sédiments prélevés en nature (baie d'Alger) montre que les caractéristiques granulométriques varient selon la profondeur sur le même profil perpendiculaire à la côte.

Dans le profil :

Le diamètre médian décroît de la côte vers le large. La médiane varie de 300 μ m à 200 μ m. Entre la côte et l'isobathe -15m, sa valeur décroît jusqu'à 140 μ m entre l'isobathe -15m et -24m. Cette décroissance est expliquée par l'action frontale de la houle.

Parallèlement à la côte :

La variation des dimensions des grains le long d'une même isobathe est pratiquement négligeable.

Pour la présente étude, la répartition granulométrique adoptée est représentée par deux courbes granulométriques couvrant les zones qui se situent respectivement entre les fonds : 0 à -11m et -11m à -24m avec les diamètres caractéristiques représentés dans le tableau suivants :

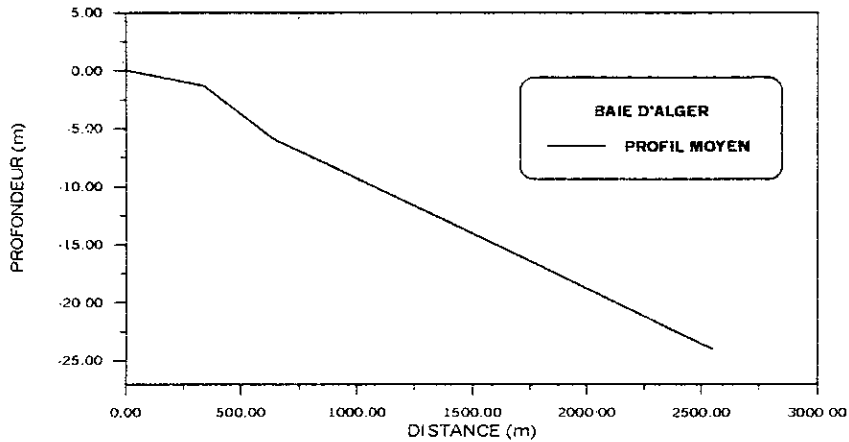
ZONE N°	PROFONDEUR (m)	DIMENSIONS CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS		
		D ₂₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₇₅ (mm)
1	0 à -11	0.170	0.300	0.477
2	-11 à -24	0.113	0.140	0.166

Tableau V.1 : Répartition des dimensions des grains dans la baie d'Alger

d) Données bathymétriques :

Le site d'études est caractérisé par une bathymétrie régulière avec des pentes faibles allant de 0.4 à 1.50% entre l'isobathe 0 et 24m. Le profil moyen représentant le site relevé en 1995 est illustré dans la figure V.3 ci dessous :

FIG.V3: LEVE BATHYMETRIQUE 1995 PERPENDICULAIRE A LA COTE
(face à l'embouchure de Oued El Harrach)



e) Conditions océanographiques

α) La houle

Le principe de l'analyse de la houle au large est basé sur des observations faites à bord de navires. Les données sont reprises d'un document l'U.S Naval Weather Command intitulé « SOMMERY OF SYNOPTIC METEOROLOGICAL OBSERVATION » (SSMO Tome 2, Zone ALGIERS) [46].

Ces données s'étalent sur une période de 08 ans (1963-1970) et couvrent une zone au large des côtes Algériennes située en longitude Est 2° et 5°, en latitude Nord entre 36.5° et 38°. Après analyse de ces données, on a aboutit aux résultats suivants :

❖ Relation amplitude-direction

Le tableau N° 2 ci-dessous précise la fréquence d'apparition de la houle en fonction de l'amplitude significative et la direction de provenance.

Amplitude de la houle (m)	Direction de la houle				
	Ouest	Nord Ouest	Nord	Nord Est	Est
< 0.25	2.90	1.10	2.00	2.70	4.00
0.25 - 0.75	6.20	2.00	2.90	7.00	9.30
0.75 - 1.75	10.90	2.70	2.60	7.50	9.10
1.75-2.75	4.33	0.60	0.70	1.20	0.90
2.75-3.75	0.90	0.10	0.10	0.00	0.10
>3.75	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	25.50%	6.50%	8.30%	18.40%	23.40%

Tableau V.2 : Fréquence par direction et amplitude de la houle au large.

On remarque bien que :

- Les houles les plus fréquentes sont celles de direction Ouest et Est.
- Les houles de tempêtes proviennent essentiellement du secteur Ouest.
- Pour le secteur Nord et Nord Ouest, les fréquences d'apparition sont plus faibles.

❖ Relation amplitude-période

Le tableau N°3 illustre la fréquence d'apparition de la houle en fonction de l'amplitude significative et la période de la houle :

Amplitude de la houle (m)	Période de la houle (s)					
	< 6	6 - 7	8 - 9	10 - 11	11 - 12	13
< 0.25	5.20	0.10	-	-	-	-
0.25 - 0.75	20.80	1.90	0.40	-	-	-
0.75 - 1.75	24.60	13.10	2.70	0.50	0.20	-
1.75 - 2.75	2.60	5.40	3.10	0.90	0.20	-
2.75 - 3.75	0.40	1.10	1.00	0.60	0.20	-
> 3.75	0.10	0.50	0.30	0.30	0.30	-
TOTAL	53.70%	22.10%	7.50%	2.30%	%0.90	-

Tableau V.3 : Fréquence par période et amplitude de la houle au large

On remarque bien que plus 75% des houles qui apparaissent ont une période inférieure à 8s.

β) La marée

En Méditerranée, les marées sont faibles et sont le plus souvent masquées par la surélévation ou l'abaissement du niveau de l'eau engendré par des variations de conditions climatologiques (pression atmosphérique, vent).

χ) Les courants

Les seuls courants susceptibles d'avoir une influence sur les mouvements sédimentaire sont les courants de la houle. Les courants de marée sont quasiment nuls du fait de la faible amplitude des marées. Le courant général qui longe la côte Algérienne porte en général vers l'Est. Il circule à au moins 5 km du littoral, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 0.25m/s, ce qui minimise l'influence des courants de marée sur la dynamique sédimentaires.

δ) Les courants engendrés par la houle

Les houles en abordant le rivage engendrent différent type de courants:

- des courants d'oscillation sur le fonds pouvant atteindre plusieurs mètres par seconde,
- des courants de translation dans la couche limite ayant une vitesse de quelques centimètres par seconde,
- des courants de compensation et courants littoraux parallèles à la côte avec des vitesses de 1.5 à 2m/s en tempête.

Cet ensemble de courants contribue à mettre les sédiments en mouvement, à les transporter à les disperser.

3°/ Conception et réalisation du modèle

a) Echelle de similitude

α) *Similitude géométrique*

Les échelles de similitude géométrique du modèle ont été déterminées à partir des considérations théoriques et pratiques. Ceci a permis de fixer les échelles de similitude Suivantes :

- 1/160 : échelle en plan
- 1/44 : échelle des hauteurs
- $\Delta = 3.63$: la distorsion

β) *Similitude dynamique*

La similitude géométrique doit être complétée par une similitude dynamique où les forces qui règnent en des points homologues dans le modèle et sur le prototype devront être en relation constante.

Pour les écoulements à surface libre, en particulier la houle, les forces prépondérantes sont les forces d'inerties, de turbulence et de gravité. Pour cela, la similitude de FROUDE satisfait ce critère. Elle est applicable aux modèles sédimentologiques dans le cas où le déferlement et la réfraction de la houle doivent être reproduits correctement. Ceci exige que l'échelle de réduction des amplitudes et des longueurs d'onde de la houle soient à l'échelle des hauteurs.

χ) Similitude sédimentologique

Pour reproduire sur le modèle des mouvements sédimentaires homologues à ceux de la nature, il est nécessaire de définir un matériau artificiel dont le comportement soit analogue à celui des sédiments naturels, sous des actions hydrauliques en similitude.

❖ Echelle du matériau artificiel

Il s'agit de déterminer la densité et la granulométrie du matériau artificiel. L'analyse dimensionnelle du phénomène de transport des sédiments sous l'action de la houle et des courants qu'elle engendre montre qu'il est caractérisé par deux paramètres adimensionnels D_* et R_* .

Ces paramètres s'écrivent :

$$D_* = \left(\frac{\varepsilon \times g}{\nu^2} \right)^{1/3} \times D$$

$$R_* = \frac{U_* \times D}{\nu}$$

avec :

ε : densité apparente du matériau sous l'eau.

U_* : vitesse de frottement sur le fond.

$$U_* = \left[\frac{8\pi\nu H^2}{T^3 Sh^2 \frac{2\pi d}{L}} \right]^{1/4}$$

avec :

H = Amplitude de la houle

T = Période de la houle

L = Longueur d'onde de la houle

D = Diamètre caractéristique du matériau

ν = Viscosité cinématique de l'eau

d = Profondeur du fond

g = Accélération de la pesanteur

En plus de la conservation de la loi de début d'entraînement, la similitude doit être complétée par une similitude des trajectoires dans les courants secondaires en tenant compte de la loi de vitesse de chute des sédiments en eau calme $R_w = f(D_*)$.

avec : $R_w = \frac{WD}{\nu}$: nombre de Reynolds lié à la vitesse de chute.

Le matériau choisi est le Siporex broyé de densité 1.45 avec un grossissement de grain en modèle de 1.32.

L'ensemble des échelles de similitudes des différents paramètres, sont récapitulées dans le tableau suivant :

Paramètre	Echelle de similitude du modèle.		
Longueurs	λ_L	1/160	
Hauteurs	λ_h	1/44	
Distorsion	Δ	3.63	
Surface {	Horizontale	λ_L^2	1/25600
	Verticale	$\lambda_L \times \lambda_h$	1/7040
Vitesses	$\lambda_h^{1/2}$	1/6.63	
Temps hydrauliques	$\lambda_h^{1/2}$	1/6.63	
Houle {	Amplitude	λ_h	1/44
	Période	$\lambda_h^{1/2}$	1/6.63
	Longueur d'onde	λ_h	1/44
	Célérité	$\lambda_h^{1/2}$	1/6.63

Tableau V.4 : Echelles de similitude

δ) Echelle des temps sédimentologiques :

Cette échelle est égale au rapport entre les durées modèle/nature qui provoquent, pour les mêmes conditions hydrauliques, des mouvements de fonds identiques aux échelles de similitude.

Cette échelle peut être déterminée théoriquement en se basant sur les équations du transit littoral et en tenant compte du coefficient empirique « K_m » du matériau artificiel et « K_n » Des sédiments naturels ainsi que des échelles géométriques en plan et en hauteur.

En fait, sur un modèle distordu, l'échelle des temps sédimentologiques est égale au rapport entre l'échelle des volumes et l'échelle des débits sous l'action de la houle. Elle est déterminée à partir des équations donnant le débit solide, ce qui conduit :

$$\lambda_t = \frac{K_n}{K_m} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_L} \right)^2 \lambda_n^{-1/2}$$

Sur le modèle, l'échelle des temps sédimentologiques théorique applicable est :

$$\lambda_t = \frac{1}{2190}$$

C'est à dire qu'un an en nature est représenté sur le modèle en 04 heures.

b) Description du modèle

Les essais ont été effectués dans un canal possédant les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 30.0m
- Largeur : 0.6m
- Hauteur : 1.10m

Il est équipé :

- D'un générateur de houle installé à l'extrémité aval du canal et qui comprend essentiellement un volet batteur oscillant produisant un front d'onde.
- D'une chambre de commande qui transmet au générateur de houle les caractéristiques de cette dernière sous forme de signal.
- D'une règle graduée pour les mesures des profondeurs.
- D'une installation d'eau pour l'alimentation et le vidange du canal.
- De deux sondes permettant de mesurer la houle générée dans le canal.

Les équipements sont schématisés dans la figure IV.1.

c) Réglage du modèle

Avant de passer aux essais proprement dits, le modèle doit être réglé et ajusté pour qu'il soit apte à prédire des évolutions futures. Ce réglage consiste à ajuster les paramètres hydrauliques et sédimentologiques.

α) Réglage hydraulique

Le réglage hydraulique du modèle réduit a pour but, d'une part de procéder au réglage de l'appareillage, et d'autre part d'ajuster les conditions expérimentales de manière à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques soit reproduit conformément à la nature.

L'étalonnage du générateur de houles ayant été effectué et la reproduction correcte des houles sur le modèle en amplitude et en période ayant été vérifiée, il est important de régler le cycle annuel de houles, établi théoriquement à partir des statistiques des houles relevées en nature.

Le cycle a été décomposé en deux périodes dites d'été et d'hiver ayant des durées respectivement de 06 mois en nature. Ce cycle est représenté dans la figure V.5. Lors du réglage, il a été remarqué que le déferlement se produit conformément à la nature. Notons que l'on admet, compte tenu des statistiques de houle, que la période soit reliée à l'amplitude de la façon suivante :

Amplitude (m)	Période (s)
0-1.5	6
1.5-3.5	8
>3.5	10-12

Tableau V.5 : Relation entre l'amplitude et la période de la houle

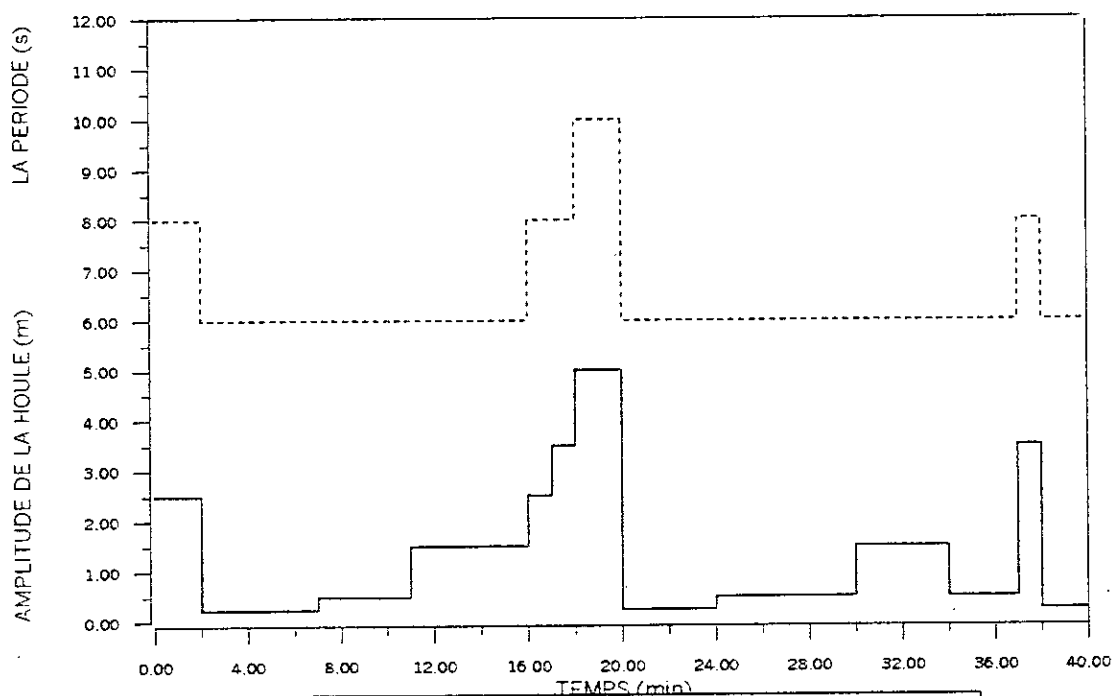


Figure V.5-a : Cycle de houle de la période estivale

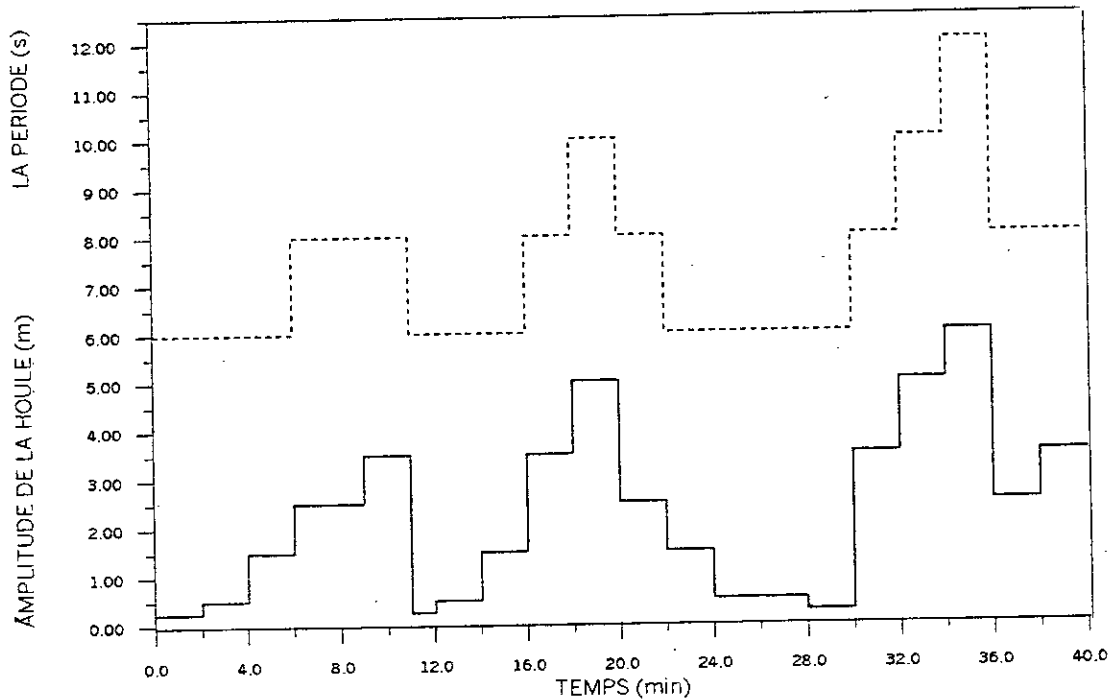


Figure V.5-b : Cycle de houle de la période hivernale

β) Réglage sédimentologique

Le but du réglage sédimentologique est de préciser les caractéristiques du matériau artificiel devant schématiser les sédiments naturels et d'adapter le cycle annuel afin d'obtenir des évolutions de fonds homologues à celles de la nature.

L'objet des essais de réglage sédimentologique est de vérifier les principaux critères de fidélité inhérents aux problèmes sédimentologiques :

- Schématisation du transport solide dans le profil (débit solide) ;
- Triage granulométrique des sédiments le long du profil.

❖ Schématisation du transport solide dans le profil

L'inexistence des mesures en nature des apports sédimentaires dans la baie d'Alger a nécessité le recours à l'estimation empirique de l'ordre de grandeur du débit solide dans le profil. Nous avons pour cela utilisé les formules de : MEYER-PETER et BONNEFILLE.

Ceci a permis d'approcher ce problème en tenant compte par ailleurs, du nombre de jours d'action des houles ayant une amplitude déterminée. Il faut que par ce calcul, on évalue la

masse totale des sédiments qui oscillent sur le fonds, mais non son déplacement dans un sens préférentiel.

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Comparaison des volumes théoriques remaniés par la houle			
Profondeur(m)	-8	-10	-12
MEYER PETER	90	23	16
BONNEFILLE	120	50	34

Tableau V.6 : Volumes théoriques remaniés par la houle

Les résultats obtenus en modèle sont les suivants :

Profondeur (m)	-8	-10	-12
Volume (m ³ /m/an)	110	40	21

Tableau V.7 : Volumes remaniés par la houle en modèle

La courbe représentée dans la figure V.6 donne la comparaison entre les résultats obtenus en modèle et ceux obtenus à partir des formules empiriques.

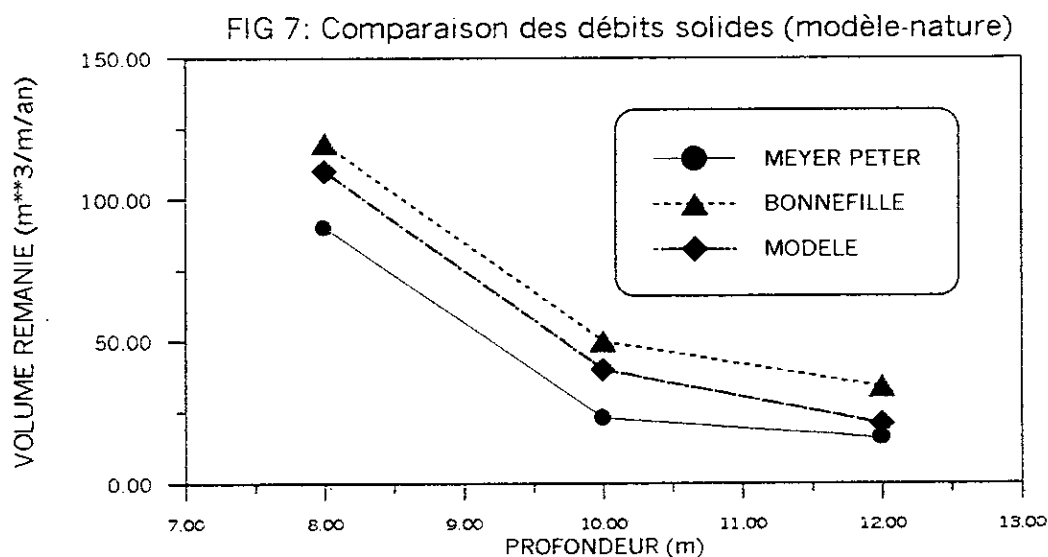


Fig. V6 : Comparaison des débits solides (modèle-nature)

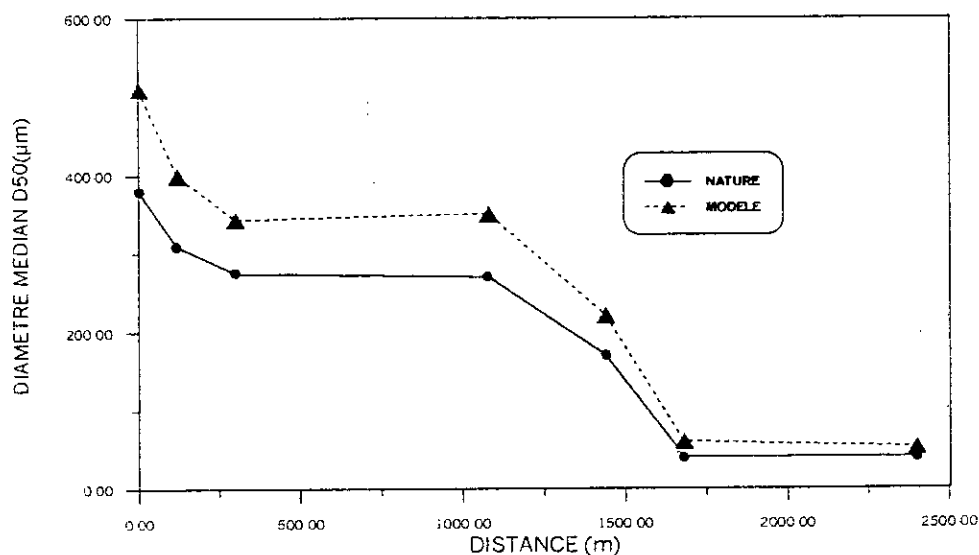
On remarque bien que le débit solide généré en modèle a le même ordre de grandeur que ceux obtenus sur site à travers les deux formules empiriques.

Il est à noter que ces résultats sont obtenus après réglage sédimentologique et ajustement du cycle annuel de la houle.

❖ Triage granulométrique dans le profil

Cette phase consiste à comparer la répartition des sédiments perpendiculairement à la côte entre le modèle et celle relevée en nature. Les résultats sont montrés dans la courbe suivante (Figure V.7) :

Fig V.7: Représentation du triage granulométrique naturel en modèle



On remarque bien qu' il y a un triage décroissant des dimensions des grains allant de la côte vers le large identique à celui observé en nature.

d) Etude des souilles de dragage

Pour mieux cerner le problème de l'influence des dragages de sédiment en mer sur l'équilibre du littoral, notamment les côtes sableuses, plusieurs souilles d'emprunts de matériaux installées à différentes profondeurs ont été étudiées.

Ces souilles expérimentales avaient un profil trapézoïdal dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Largeur au sommet : 62.5 - 127m.
- Largeur à la base : 37.5 - 100m
- Hauteur : 2.88 - 4m

Les souilles ont été représentées sur toute la largeur du canal, au total 03 souilles de dragages ont été réalisées à différentes profondeurs : -8.0m, -10,0m et -12.0m.

Chaque souille a été soumise à l'action d'un cycle de houle annuel représenté dans la figure 5-a et la figure 5-b. Des levés de profils de plages en modèle ont été effectués avant et après chaque essai pour mieux comprendre l'évolution des fonds avoisinant de la souille et quantifier le volume de déposer dans la souille en fonction du temps, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau et les figures Figure 9-a, Figure 9-b et Figure 9-c ci-dessous :

Position De la Souille	Volume utile de la souille (m ³ /m)	Comblement de la souille	Volume Déposé Dans la souille (m ³ /m)		Volume déposé dans la souille sous l'action d'une année marine Moyenne (m ³ /m)	Impact sur l'équilibre du littoral
			01 an	02 ans		
Souille à -8 m	412	Son comblement se fait au détriment du littoral (érosion de la côte).	106	140	34	Néfaste
Souille à -10 m	167	Son comblement a causé une érosion des fonds au delà de -7m	58	82	24	Néfaste
Souille à -12 m	335	Son comblement n'affecte que les fonds avoisinants et n'atteint pas les fonds littoraux.	50	67	17	Tolérable

Tableau V.8 : Résultats obtenus en modèle

Fig.v8-a:Evolution des fonds avoisinant de la souille

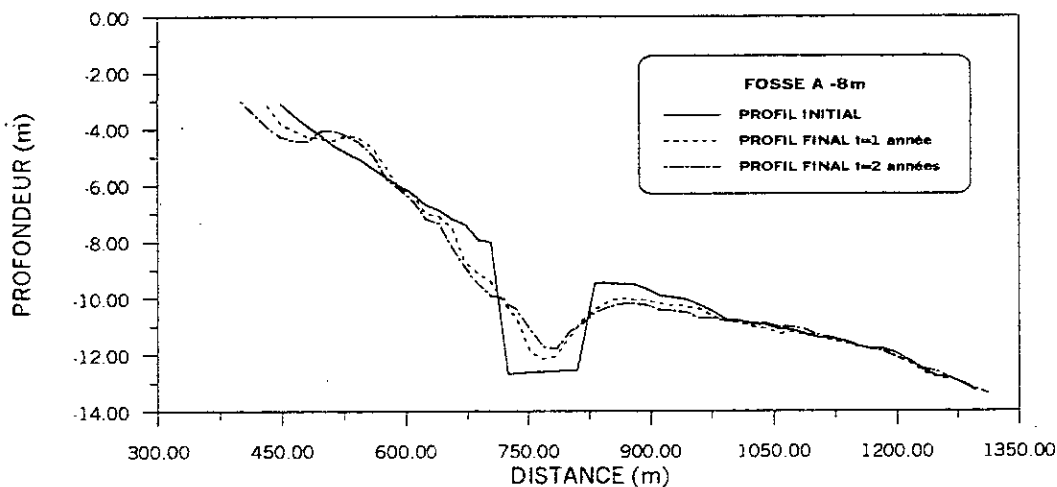


Fig.V8-b: Evolution des fonds avoisinants de la souille

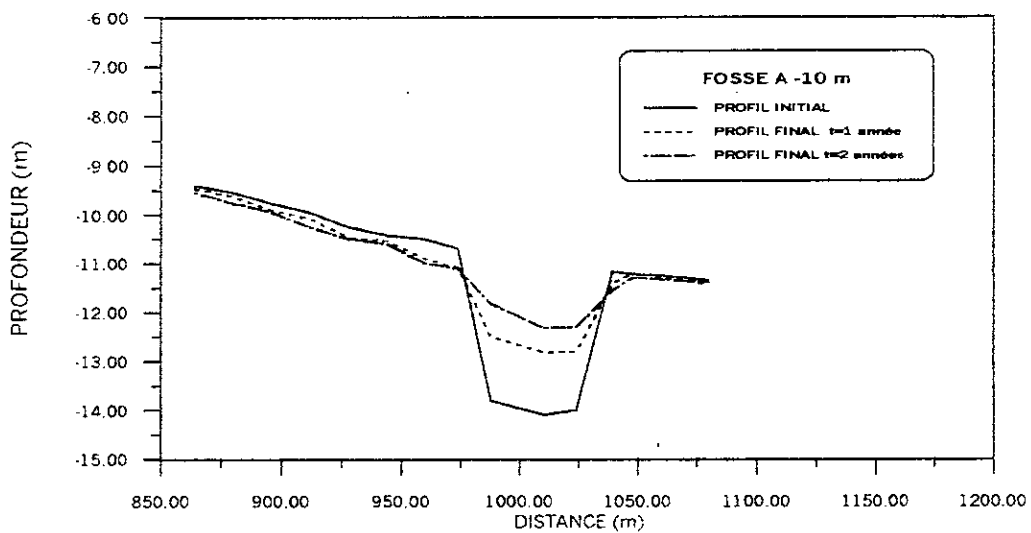
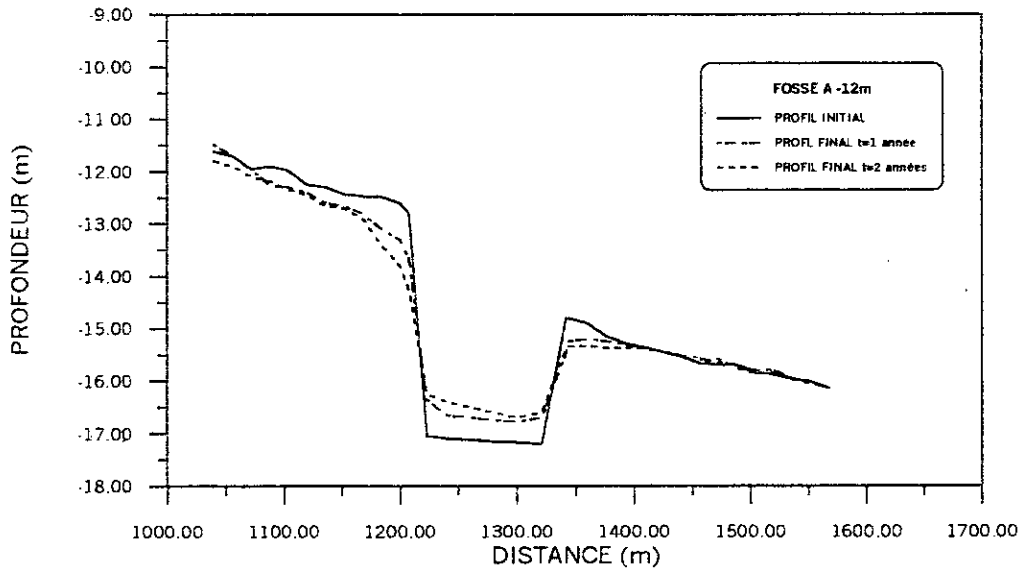
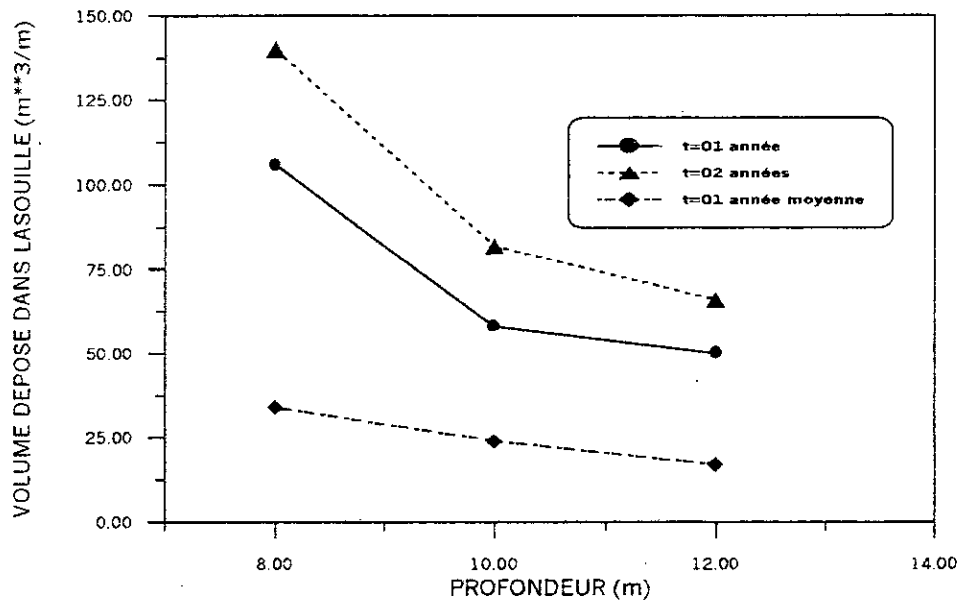


Fig.V8-c: Evolution des fonds avoisinants de la souille



On remarque bien d'après le tableau précédent que le degré de comblement de la souille est inversement proportionnel à la profondeur de leur emplacement. La figureV.10 ci-dessous montre cette variation :

Fig.V9 : VOLUME DEPOSE DANS LA SOUILLE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET LE TEMPS

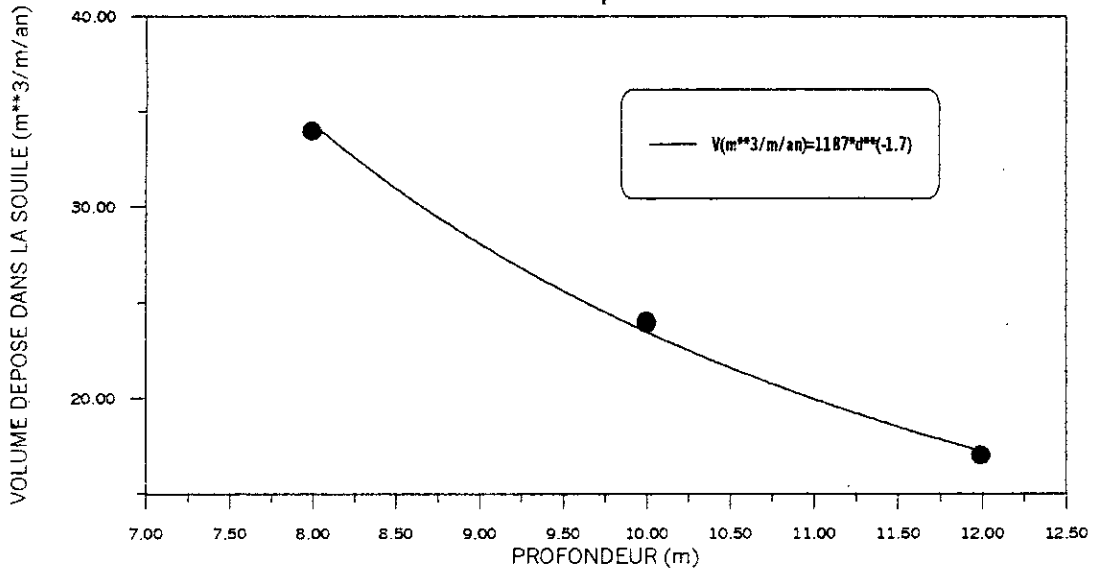


Sur une année moyenne les dépôts par mètre linéaire de souille seraient donnés, dans le cas de la baie d'Alger et pour des profondeurs comprises entre -8 et -12m par l'expression :

$$V(m^3 / m / an) = 1187.04 \times d^{-1.7}$$

Le graphique ci dessous (Figure V.11) montre cette corrélation donnée par la méthode des moindres carrés avec un coefficient de corrélation $R^2=0.99$.

**Fig.V10: Variation du volume déposé dans la souille
en fonction de la profondeur**



L'impact des souilles sur l'équilibre littoral diminue avec l'augmentation de la profondeur de positionnement de la souille. Ce qui signifie qu'en limitant les dragages en mer à des profondeurs supérieures ou égales -12m, les conséquences sur l'équilibre seront moins ressenties

En résumé :

- Les volumes déposés dans les souilles de dragage augmentent très rapidement lorsque la profondeur de la souille diminue ; sur une année marine moyenne les dépôts par mètre linéaire de souille seraient donnés, dans le cas de la baie d'Alger et pour des profondeurs comprises entre -8 et -12m par l'expression :

$$V(m^3 / m / an) = 1187.04 \times d^{-1.7}$$

Avec, d : la profondeur à laquelle la souille est draguée.

C'est à dire qu'une souille de volume utile $V_s = 412m^3 / m$ draguée à -8m de profondeur sera complètement comblée après 09 années d'action de la houle.

- Les érosions côté terre de la souille se propagent jusqu'aux fonds de -2m pour la souille draguée à la profondeur -8m, pour celle draguée à la profondeur -10m les érosions

se propagent jusqu'à la profondeur -7m , pour la souille à -12m , ces érosions se trouvent limitées au voisinage immédiat de la souille.

- Les souilles d'extraction d'agrégats réalisées entre les fonds de -8m et -10m entraînent très rapidement une érosion du littoral, en draguant par des profondeurs supérieures ou égales à -12m l'influence sur l'équilibre du littoral est négligeable.

- Sur une longue durée on peut prévoir la durée nécessaire pour combler une souille à -12m présentant un volume capacitaire total de $335\text{m}^3/\text{m}$, cette durée est estimée à 16 ans. Ce taux de sédimentation est intéressant, vu le cycle moyen annuel qui présente des houles qui ne dépassent pas les houles de tempêtes.

Pour une souille de caractéristiques (125.3m de longueur, 100m de largeur et 3m de profondeur) réalisée dans un fond sableux avec une pente de 23.5% des berges et dont la granulométrie moyenne est de 300 à 140 microns, on peut estimer qu'il n'y aura pas de répercussions sensible sur le littoral si cette souille est implantée par des profondeurs supérieures ou égales à -12m sous le niveau de zéros hydrographique et si l'amplitude de la houle reste inférieure à 6m .

Pour généraliser ces résultats et pouvoir donner les autorisations nécessaires aux extractions d'agrégats en mer il serait souhaitable de compléter ces premières recherches par une étude en modèle tridimensionnel pour pouvoir prendre en compte l'effet de la houle oblique et le transit littoral ainsi que l'influence de la forme de la souille de dragage et leurs conditions d'exécution.

Dans l'étude actuelle, ces premiers résultats donnent un aperçu des possibilités offertes pour exploiter les ressources sédimentaires marines sans risque appréciable d'entraîner des dégradations irréversibles de notre littoral.

CONCLUSION

Conclusion

L'étude expérimentale en modèle réduit physique, nous a permis de mettre d'abord en évidence l'influence des différents paramètres sur le comportement hydrodynamique et sédimentologique du littoral.

Les zones côtières sont soumises actuellement à une exploitation sauvage et abusive des réserves sédimentaires marines, ayant pour conséquences dramatiques, non seulement par l'atteinte de la faune et la flore, mais aussi par la disparition parfois de certaines plages, aménagements et sites touristiques. Devant cette situation, nous avons pris dans notre étude, le site de la baie d'Alger où la demande des sédiments marines est très élevée, pour la réalisation du terminal à conteneurs du port d'Alger.

Les études d'impacts des souilles d'emprunts de sable en mer sur l'équilibre du littoral, en modèle réduit physique reste le plus souvent, le seul outil scientifique capable de définir expérimentalement l'implantation optimale des dragages en mer, permettant ainsi la préservation de l'espace littoral à l'état naturel.

La recherche bibliographique nous a permis de définir les principaux facteurs qui régissent la dynamique côtière, en définissant le climat de houle ainsi que les différentes théories de la houle, le mécanisme du transport sédimentaire sous l'action de la houle et la morphologie côtière.

Cette recherche nous a permis clarifier les différents critères de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle, et le système des rides ainsi que la forme générale des profils de plages et leurs classifications. Par la suite on a donné les différents critères qu'il faut respecter pour la simulation des phénomènes liés à la dynamique côtière, sur modèle réduit physique ; cette étape consiste en premier la recherche des échelles de similitude en utilisant la similitude de Froude, et reproduire le climat de houle sur modèle, en deuxième lieu choisir un matériau artificiel substituant le sable naturel en modèle réduit physique. Pour cela et après des investigations sur les matériaux disponibles, on a opté pour le Siporex, qui a montré à travers les essais, une reproduction fidèle de la dynamique et la morphologie côtière.

Et après avoir choisir le matériau artificiel, substituant le sable naturel, on a entamer l'étude des souilles de dragage au sein de la mer, qui a montré que le dragage à des profondeurs de -8 et -10m a des conséquences néfastes et irréversibles sur l'équilibre du littoral ; par contre le dragage à -12 m n'a pas de conséquences néfastes sur l'équilibre du littoral. Ce qui nous a permis d'estimer qu'il n'y aura pas de répercussion sensible sur le littoral, si la souille de dragage est implantée par profondeurs supérieures ou égales à -12 m, sous le niveau de zéro hydrographique.

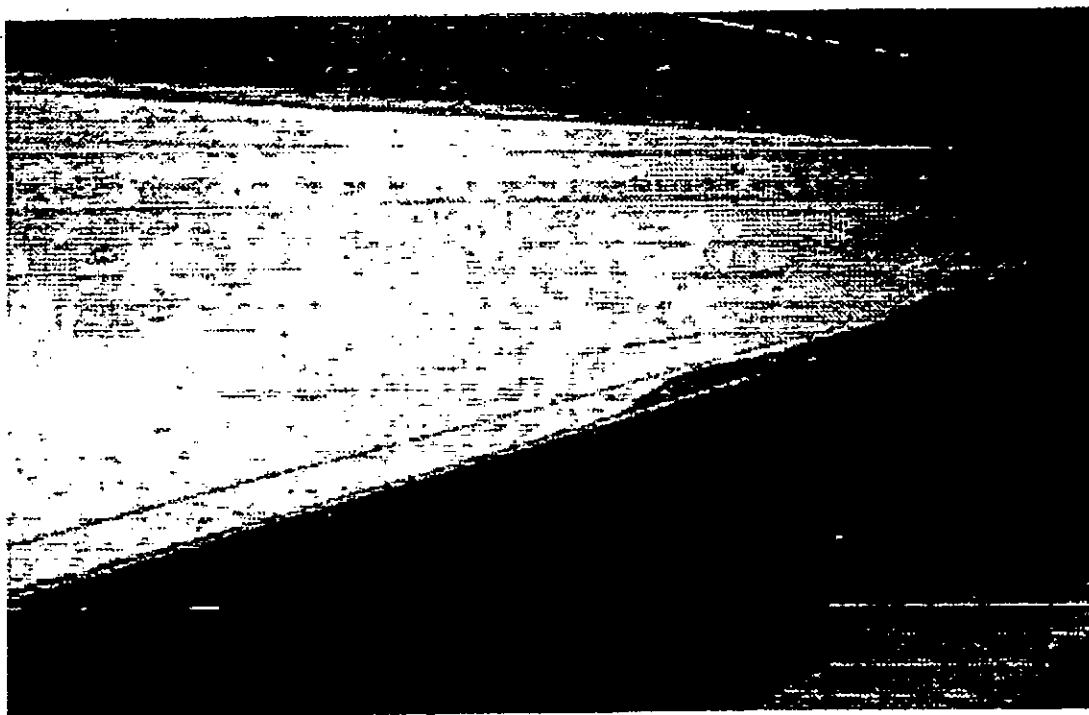
BIBLIOGRAPHIE

- [1] AIPCN, 1979 « *Disponibilité des ports et terminaux* » Rapport de travail, annexe au Bulletin N°32 (vol.1/1979) de l'AIPCN.
- [2] ALBANIS, S 1989 « *A one-dimensional, for the transport of the sediment mixture in non equilibrium conditions* », JHR vol :27-1989 N° 3.
- [3] BLANCHET, C « *Modèles hydrauliques fluviaux* » Technique d'Ingénieur N° C 184.
- [4] BELSSORT , B 1968 « *Etude de la nacre artificielle* » Note interne LCHF 1968.
- [5] BELSSORT , B 1994 « *Rechargement des plages moyens et problèmes* » Séminaire sur la conception et réalisation des digues portuaires-à l'IPER (LE HAVRE 14-18/09/1994).
- [6] BERCHICHE, S 1991 « *Etude sédimentologique de la zone de côtière de Mazafran implication pour l'aménagement du littoral* » Thèse PFE 1991 Institut géologie USTHB1991.
- [7] BERKANI, M 1995 « *Cours de la modélisation hydraulique* » ENP 1995.
- [8] BONNEFILLE, R 1980 *Cours d'hydraulique maritimes* » Ed : EYROLLES 1980.
- [9] CARLIER, M 1980 « *Hydraulique générale et appliquée* » Ed : EYROLLES 1980.
- [10] CARDSO, A.H & NEVES, G.O 1994 « *Prévision du transport solide total, évaluation des formules existantes* » La Houille Blanche : H/B N°1994.
- [11] CHAPON, J 1984 « *Travaux maritimes* » T1 et T2 Ed : EYROLLES 1984.
- [12] COLLINS, J.I & CHESNUT, C.B 1980 « *Essai sur modèle sur les profils de plage et sur l'influence de la granulométrie et la forme de grain* » Coastal Engening série N° 15 1980.
- [13] COTTIN, T & PERDRAU, N 1983 « *Modèles réduits de plage – choix du matériau mobile* » Rapport LCHF 1983.
- [14] DALRYMPLE, R.A 1985 « *Physical modelling in coastal engineering* » rapport de l'University of Delaware, Newark USA 1985.
- [15] Département de l'Equipement de la Martinique France 1983 « *la houle comment s'en protéger – dossier technique* » 1983.
- [16] DJEHA, L 1995 « *Etat du littoral de la Wilaya de Boumerdes* » Journées d'études sur l'exploitation des sablières et la protection de l'environnement à Boumerdes 30/01/1995 .
- [17] DJEHA, L 1994 *Economie et gestion de l'environnement* » Séminaire : gestion du littoral à Boumerdes 19-21/12/1994.
- [18] FEUILLET, J & autres 1987 « *Le dimensionnement des digues à talus- collection de la direction des études et recherches et d'électricité- France* » Ed : EYROLLES 1987.

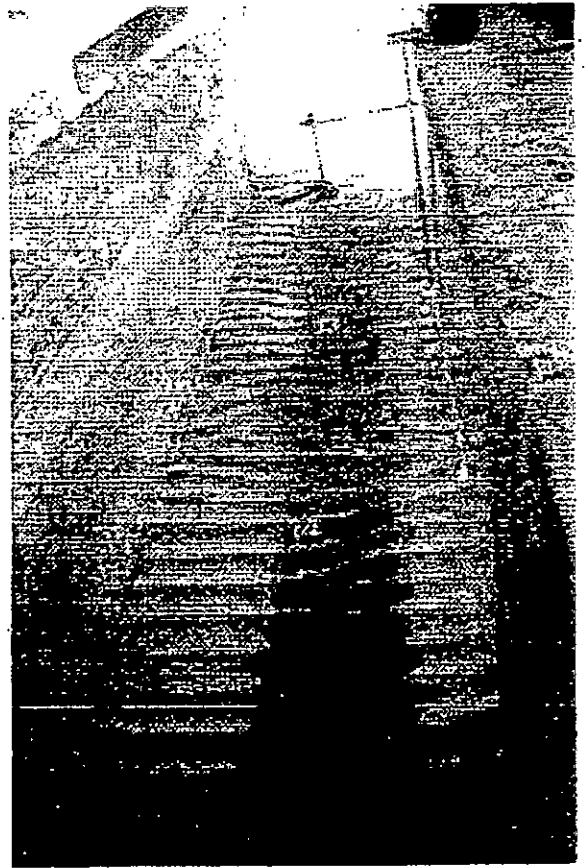
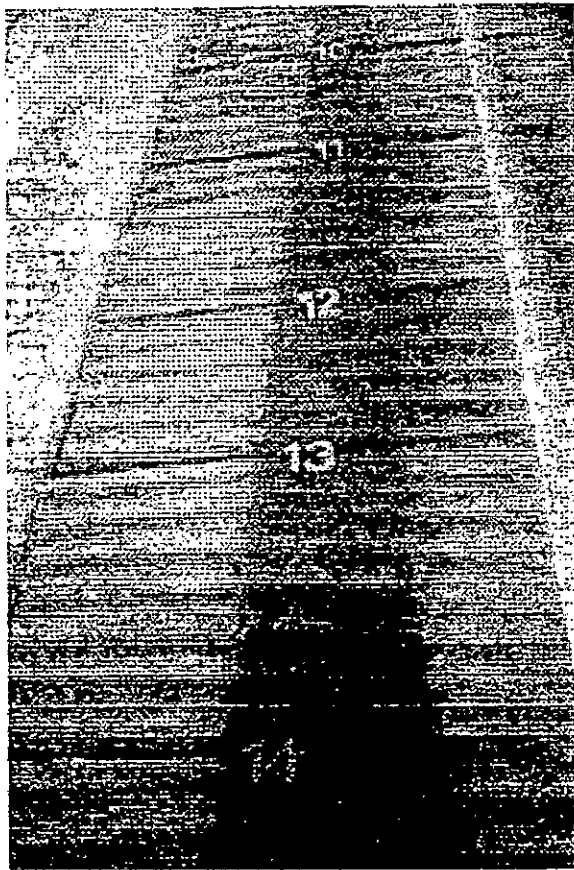
- [19] GRESLOU, L 1988 «*Modèles réduits à fond mobile pour l'étude des aménagement maritimes* » SOGREAH 1988.
- [20] GUETTACHE, R 1989 «*les modèles sédimentologiques* » Rapport de stage à SOGREAH 03/1989 LEM 1989.
- [21] GYR, A & SCHIMID, A 1989 «*Les différents mécanismes de formation des rides* » JHR vol :27.1989 N°1.
- [22] KAMPHUIS, J.W 1982 « *Modèles côtiers à fond mobile situation en 1982* » Rapport de l'Université de Queen 1982 Kingston, Canada.
- [23] KELLAL, M & IGHILAHIRIZ, N 1992 «*Contribution à la réalisation d'un modèle sédimentologique – Port de Skikda* » Thèse de PFE ENP 1992.
- [24] LARID, M 1995 «*Synthèse des cours sur le dragage en mer* » ISMAL 1995.
- [25] LARID, M 1995 «*Cours d'aménagement et protection du littoral* » ISMAL 1995.
- [26] LARRAS, J 1972 «*Hydrauliques et granulats* » Ed : EYROLLES 1972.
- [27] LARRAS, J 1979 «*Physique de la houle et des lames* » Ed : EYROLLES 1979.
- [28] LARRAS, J 1979 «*Cours d'hydraulique maritimes et travaux maritimes* » Ed : EYROLLES 1979.
- [29] LEBRETON, J.C 1980 «*Dynamique fluviale* » Ed : EYROLLES 1980.
- [30] MARCHAL, J 1988 «*Approche physique des phénomènes de propagation et de l'action des houles régulières et déferlantes* » JHR Vol : 26 1988 N°2.
- [31] MCDOWELL, D.M 1989 «*Agénéral formula of estimation of the rate transport of non-cohesive bed-load* » JHR Vol :27 1989 N°3.
- [32] MIGNIOT, C & VIGUIER, J 1979 «*Influence de l'extraction du sable sur l'équilibre du littoral* » Synthèse des études LCHF 1979.
- [33] MIGNIOT, C 1989 «*Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et la sédimentation du littoral* » Rapport SOGREAH 1989.
- [34] MIGNIOT, C 1989 «*Action des courants sur les sédiments* » Rapport SOGREAH 1989.
- [35] MIGNIOT, C 1972 «*Représentation des transports et des dépôt de sédiments dans les modèles réduits physiques maritimes* » Rapport LCHF 1972.
- [36] MIGNIOT, C & LORIN, J 1986 «*Etude de la remise en suspension des sables sous l'action de la houle* » La Houille Blanche N°7/1986.
- [37] MIGNIOT, C 1968 «*Etude des propriétés physiques des différents sédiments très fins et leurs comportements sous les actions hydrodynamiques* » La Houille Blanche N°7/1968.
- [38] MIGNIOT, C 1977 «*Action des courants, de houle et du vent sur les sédiments* » La Houille Blanche N°7/1986.

- [39] MIHOUBI, M.K 1995 « *Approche méthodologique et de calcul de l'interaction de la houle sur les courants de rejets de mer* » Thèse de Magister 128 pages ENSH BLIDA 1995.
- [40] MIHOUBI, M.K & HASSANE, M 1997 « *Les études de similitude de l'interaction houle-courant de rejet de mer* » Revue : Travaux recherche et information scientifique et technique N°3/1997.
- [41] NOVAK, P & NALLURT, C 1984 « *Incipient motion of sediment particles over fixed beds* » *JHR Vol : 22/1984 N°3*.
- [42] Office of International Coopération – Bureau of Ports and Harbours Ministry of Transport Japan 1983 « *Littoral Drift* » Ed : SEIYU PINT LTD Japan 1983.
- [43] OUCHEIKH, M & BENGHERIFA, S 1995 « *Contribution à la réalisation d'un modèle réduit à fond mobile Baie de Zeralda* » Thèse de PFE ENP 1995.
- [44] ROQUS, J.N 1985 « *Aménagement du débouche en mer de la rivière AUDIE, étude en modèle sur modèle mathématique et physique* » LCHF 11/1985 LCHF.
- [45] STOKER, J.J 1957 « *Water waves. the mathematical theory with applications* » Ed : Interscience Publishers, INC New York 1957.
- [46] U.S Naval Weather Command USA 1971 « *Sommary of Synoptic Meteorological Observation* » SSMO Tome 2 zone Algiers USA 1971.
- [47] VALEMBOIS, J « *Etude sur modèle de transport littoral conditions de similitude* » Coastal engineering N°15 1980.
- [48] VAN RIJN, Leo.C 1989 « *Sédiment transport by currents and waves* » Rapport H461 DELFT HYDRAULIC Danemark June 1989.
- [49] VELLINGA, P 1986 « *Beach and dune érosion during storm surg* » Rapport DELFT HYDRAULIC 1986 Danemark.
- [50] VIGUIER, J « *Modèles en hydraulique maritimes* » Technique de l'Ingénieur Série C182.
- [51] VILLARD, M & ATTEUX, B 1994 « *Etude expérimentale du transport de sable fin en suspension sous l'action de la houle et du courant* » La Houille Blanche N°4/1994.

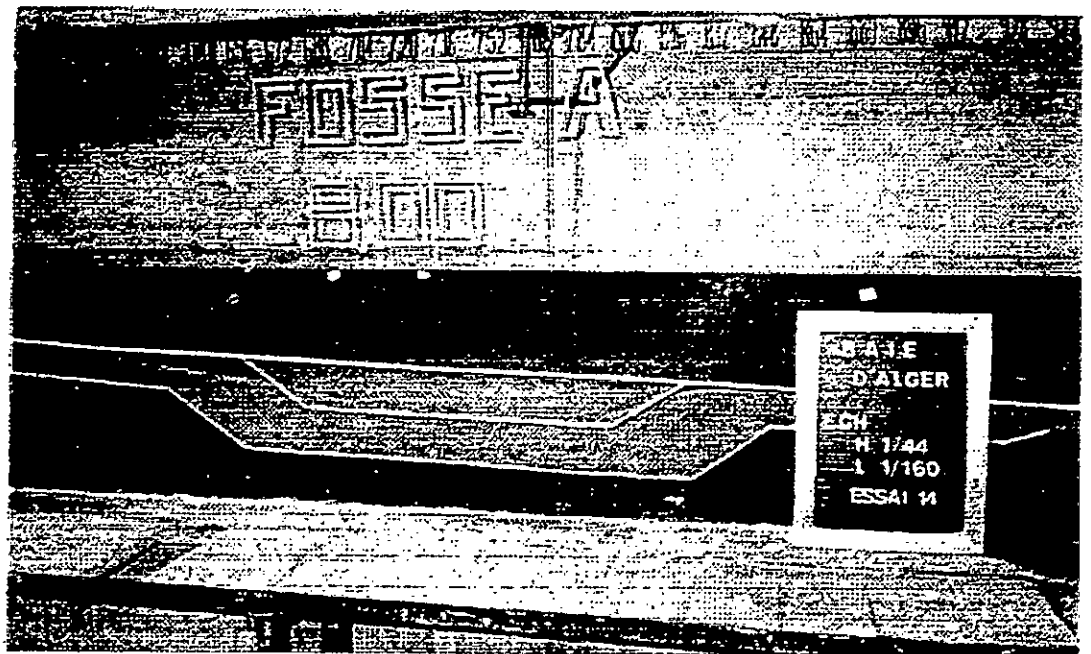
ANNEXE



Forme de plage obtenue par le Siporex



Rides du fond obtenues par le Siporex



**Etude des souilles de dragage sur
modèle réduit physique**