

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale des Travaux Publics



Mémoire de magister génie civil

Présenté par :

HADDAD Malek

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics
Promotion 2002

Sujet :

**Etude expérimentale de l'interaction d'un
écoulement type houle avec un milieu granulaire**

| | | | |
|----------------------|--------------|-----------------------|-------|
| Président du jury | M. ZERZOUR | Maître de conférences | ENSTP |
| Directeur du Mémoire | M. HADID | Maître de conférences | ENSTP |
| Examineur | M. TAKI | Maître de conférences | ENSTP |
| Examinateur | M. BENSABIBI | Maître de conférences | USTB |
| Invité | M. RAHMANI | Maître assistant | ENSTP |

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu Le Tout Puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour mener à terme ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mon Directeur de mémoire, Monsieur Hadid Mohamed pour avoir dirigé ce travail.

Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je tiens à remercier M. Bouhellal, Président du Conseil Pédagogique et M. Adam, Responsable de Post-graduation, d'avoir accepté ma candidature à la post-graduation recherche.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur le Président du jury qui me fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens à remercier vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de mon mémoire.

Je remercie vivement MM. Latrache et Abcha, pour leurs conseils relatifs au Matlab et au traitement de signal.

Merci aussi à tous ceux qui m'ont aidé ou soutenu d'une manière ou d'une autre ; je pense notamment à ma famille et mes amis : Salah, Touati, Ameer, Sdeki, Bettahar, Abdeli, Alkma, Debih, Alaoui et les autres.

Je leur dédie à tous, ce modeste travail.

Liste de figures

| | |
|--|----|
| Figure (2.1) Caractéristiques de la houle | 05 |
| Figure (2.2) Houle trochoïdale de Gerstner | 07 |
| Figure (2.3) Différentes théories de houle | 10 |
| Figure (2.4) Différents écoulements en fonction du nombre de Reynolds | 14 |
| Figure (2.5) Courbe granulométrique | 15 |
| Figure (2.6) Profils d'équilibre des plages | 16 |
| Figure (3.1) Frottement pariétal sur un profil expérimental | 27 |
| Figure (3.2) Exemple d'histogrammes | 29 |
| Figure (3.3) Cas de réflexion en loi de Bragg | 30 |
| Figure (3.4) Réflexion de la houle : clapotis | 32 |
| Figure (3.5) Profils verticaux théoriques des vitesses de dérives Eulérienne | 35 |
| Figure (3.6) Représentation théorique des rides | 36 |
| Figure (3.7) Angle de repos en fonction de la taille et nature des sédiments | 37 |
| Figure (3.8) Technique du velocimètre par laser à frange | 38 |
| Figure (3.9) Phénomène de l'interférence | 39 |
| Figure (3.10) Diagramme de fréquence | 39 |
| Figure (3.11) Mouvement à l'interface | 40 |
| Figure (3.12) Profil de la vitesse verticale | 41 |
| Figure (4.1) Distinction entre les modes de transport par charriage et suspension | 44 |
| Figure (4.2) Modes de transport | 45 |
| Figure (4.3) Diagramme de Passega appliqué à la baie d'Alger | 46 |
| Figure (4.4) Ouvrages parallèles | 51 |
| Figure (4.5) Ouvrages perpendiculaires | 52 |
| Figure (4.6) Dignes anti-érosion | 52 |
| Figure (4.7) Gétube, Géocontainer et Géobag | 54 |
| Figure (4.8) Digue en géotube | 54 |
| Figure (4.9) Reconstruction d'une berge érodée par des Géotubes | 55 |
| Figure (5.1) Canal à houle | 60 |
| Figure (5.2a) Image réelle (en couleur) avant seuillage | 63 |
| Figure (5.2b) Image après seuillage (noir et blanc) | 64 |
| Figure (5.3) Surface libre de la houle monochromatique | 66 |
| Figure (5.4) Vue de cote d'un réseau de rides | 67 |
| Figure (5.5) Dispositif utilisé pour la capture des images des rides | 68 |
| Figure (5.6) Vue de dessus d'un réseau de rides | 68 |
| Figure (5.7) Histogramme de la ride la plus probable : images collées | 69 |
| Figure (5.8) Formation de barres dans le cas houle monochromatique | 69 |
| Figure (5.9) Histogramme en cas de houle monochromatique avec formation de barres | 70 |
| Figure (5.10) Surface libre de la houle bichromatique | 71 |

| | |
|--|----|
| Figure (5.11) Vue de dessus d'un réseau de rides en houle bichromatique | 91 |
| Figure (5.12) Histogramme des rides dans le cas de houle bichromatique | 91 |
| Figure (5.13) Vue de coté d'un réseau de rides en cas de houle bichromatique | 92 |
| Figure (5.14a). Spectre de l'énergie en cas de houle bichromatique sans sédiments | 93 |
| Figure (5.14b). Spectre de l'énergie en cas de houle bichromatique avec sédiments | 94 |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Chapitre 1- Introduction générale | 01 |
| Chapitre 2- Interaction houle - sédiment : notions essentielles et état d'art | 04 |
| 1. Introduction | 04 |
| 2. Différentes théories de houle | 06 |
| 2.1. Hypothèses | 06 |
| 2.2. Houle monochromatique | 06 |
| 2.2.1. Houle Gerstner | 06 |
| 2.2.2. Houle irrotationnelle de Stokes 1 ^{er} ordre | 08 |
| 2.2.3. Solution du 2 ^{ème} ordre | 09 |
| 2.3. Houle réelle | 12 |
| 2.3.1. Houle bichromatique | 12 |
| 3. Déformation de la houle au cours de sa propagation | 13 |
| 4. Régime des écoulements de la houle | 13 |
| 5. Sédiments marins | 14 |
| 6. Profils des plages | 15 |
| 7. Equations gouvernant l'écoulement dans le milieu poreux | 17 |
| 7.1. Définition d'un milieu poreux saturé | 17 |
| 7.2. Paramètres du milieu poreux | 17 |
| 7.3. Loi de Darcy | 19 |
| 7.4. Loi de Forchheimer | 20 |
| 7.5. Ecoulement instationnaire | 21 |
| 8. Conclusion | 23 |
| Chapitre 3- Morphodynamique du fond sédimentaire | |
| 1. Introduction | 24 |
| 2. Paramètres contrôlant la dynamique des rides | 24 |
| 3. Géométrie des rides et son processus de formation | 28 |
| 4. Formation des barres | 30 |
| 4.1. Loi de Bragg | 30 |
| 5. Intérêt de l'étude de la morphodynamique des rides | 34 |
| 6. Vitesse au contact du fond sédimentaire | 38 |
| 6.1. Vélocimétrie à laser | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2. Vitesse à l'interface houle – sédiment | 40 |
| 7. Conclusion | 42 |
| Chapitre 4- Transport sédimentaire | 43 |
| 1. Introduction | 43 |
| 2. Modes de transport sédimentaire | 43 |
| 2.1. Calcul du transit littoral par la formule de Bijker | 47 |
| 2.1.1. Charriage | 47 |
| 2.1.2. Suspension | 48 |
| 3. Début d'entraînement des sédiments | 49 |
| 4. Disposition vis-à-vis du transport sédimentaire | 51 |
| 4.1. Ouvrages parallèles | 51 |
| 4.2. Ouvrages perpendiculaires | 51 |
| 4.3. Dispositifs anti-érosion | 52 |
| 4.4. Géosystèmes | 53 |
| 5. Conclusion | 56 |
| Chapitre 5- Etude expérimentale de l'interaction houle – sédiment | 57 |
| 1. Introduction | 57 |
| 2. Dispositif expérimental et conditions des essais de l'interaction houle - sédiment | 58 |
| 2.1. Canal à houle | 59 |
| 2.2. Générateur de vagues | 59 |
| 2.3. Plage d'amortissement | 60 |
| 2.4. Surface libre | 60 |
| 3. Technique de traitement d'images | 61 |
| 3.1. Informations contenues dans une image | 62 |
| 3.2. Introduction à la transformation de Fourier | 64 |
| 4. Houle monochromatique sur un fond de sédiment plat | 66 |
| 4.1. Acquisition des images et discussion | 67 |
| 4.2. Discussion du résultat à la fin des essais | 69 |
| 5. Houle bichromatique sur un fond de sédiment plat | 70 |
| 5.1. Essais expérimentaux (1 ^{er} test, 2 ^{ème} test, 3 ^{ème} test) | 71 |
| 5.2. Discussion des graphes d'acquisition d'images | 90 |
| 5.3. Discussion du résultat de la morphodynamique | 91 |
| 6. Analyse de l'énergie des harmoniques | 93 |
| 7. Conclusion | 95 |

| | |
|--|----|
| Chapitre 6- Conclusion générale et perspectives | 96 |
| Bibliographie | 99 |

Annexe : Mémoire du DEA Sciences de l'ingénieur, 2003.

Chapitre 1

Introduction générale

Plus de la moitié de la population mondiale (trois milliards) est concentrée le long des côtes et des vallées qui occupent à peine 10 % de la surface des terres.

Cette zone littorale subit de fortes sollicitations hydrodynamiques, chimiques, anthropiques... Il en résulte souvent une pollution des eaux, une mise à mal de la faune et la flore et des manifestations **hydro-sédimentaires** telles que le recul des plages, l'engraissement des ports de l'embouchure des fleuves, la perte de puissance hydraulique de chenaux de navigation, l'érosion des falaises menaçant les constructions et aussi l'affouillement des pylônes ou piles des ponts.

L'écoulement dû aux vagues ou marées sculpte des rides ou dunes (barres) qui modulent le fond sableux : ces ondes de gravité, formées de crêtes et de creux d'origine diverses (vent, tempêtes, glissement de terrain, attraction lunaire ou solaire...) en se propageant, elles transmettent de l'énergie au fond et elles induisent par conséquent des courants très intenses, de la turbulence, de transport sédimentaire par la mise en suspension des sédiments ou par le charriage.

Les ouvrages côtiers et littoraux sont en permanence soumis à des efforts des courants ponctuels qui engendrent soit une érosion (transport sédimentaire vers le large) ou un ensablement (transport sédimentaire vers les ouvrages) ce qui met en danger la stabilité des plages et le tenue des ouvrages côtiers.

La connaissance de l'état de mer, surtout ces dernières années avec le changement climatique (activité humaine), est donc nécessaire pour une meilleure compréhension de la dynamique côtière et sédimentaire. Ainsi les études de l'hydrodynamique nous permettent de mieux appréhender les problèmes de stabilité des plages, d'ensablement des ports et de la tenue des ouvrages côtiers.

Sur le terrain, la complexité des écoulements et des formes rencontrées, la variété des sédiments et de la topographie marine, ne facilitent pas la tâche.

Par conséquent, les études théoriques, numériques, expérimentales sur des modèles réduits et simples, permettent d'appréhender les mécanismes de base des phénomènes physiques mis en jeu, et constituent un complément indispensable aux études de terrain.

Il existe beaucoup de travaux expérimentaux menés dans des laboratoires : bassin et canal à houle avec une couche de sédiment et une couche d'eau (hauteur d'eau convenable avec le canal). La houle dans le canal, générée par un batteur, se propage sur un fond de sédiment le long du canal. La houle est généralement représentée par une seule onde (fréquence : f).

Cette houle modifie le fond de sédiment en créant des ondulations au fond appelées rides et barres ; ces dernières avancent vers le sens de propagation de la houle et affecteront le transport sédimentaire par dissipation de l'énergie due au frottement au fond.

La morphodynamique du fond sédimentaire est intimement liée à la houle.

Dans la nature, la houle n'existe pas sous la forme régulière et harmonique (une seule fréquence), elle est un phénomène complexe comportant plusieurs ondes dans un train de vague.

Dans ce travail, nous proposons comme objectif d'étudier expérimentalement un écoulement de type bichromatique (ayant deux fréquences $2f$) sous un fond poreux saturé afin de se rapprocher de la houle réelle (houle irrégulière) et d'examiner les ondulations qui en résultent et de les comparer au cas de houle régulière appelée aussi houle monochromatique.

Dans notre étude expérimentale, on donnera l'importance à la réflexion partielle et faible de la houle (de l'ordre de 5 %), car elle est responsable de l'apparition des barres (ondulations à grande échelle par rapport aux rides) selon la loi de Bragg.

Notre étude expérimentale s'est tenue au Laboratoire Mécanique, Physique et Géosciences du Havre, 2003.

L'étude expérimentale est un bon moyen pour mesurer des grandeurs fondamentales grâce aux récents progrès des techniques d'instrumentation et d'acquisition de données informatisées telles que la vitesse, pression, transport sédimentaire...

Le travail effectué dans le cadre de cette recherche a été organisé de la manière suivante :

Au cours du deuxième chapitre, nous présentons quelques différentes théories de houle et sédiments aussi le type d'écoulement de houle dans un canal à houle et son écoulement dans les sols poreux saturés ; ces concepts sont essentiels pour la compréhension de la suite du travail.

Les travaux de recherche relatifs à mon étude ont été signalés d'emblée pour la bonne compréhension de l'interaction houle et sédiment.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'interaction houle et sédiment que se soit avec une houle régulière ou irrégulière ; aussi les conditions d'écoulement d'eau contrôlées dans cette expérience nous ont permis de caractériser les seuils de mise en mouvement des particules.

Les différents modes de transport sédimentaire et une description des dispositions et moyens utilisés pour faire face aux transports sédimentaires et à la houle, décrits de manière brève, ont fait l'objet du quatrième chapitre.

Le dispositif expérimental et les techniques de mesures par traitement d'images employés sont ensuite décrits dans le cinquième chapitre.

Dans ce même chapitre, on verra l'étude expérimentale qui est subdivisée en deux parties : interaction houle monochromatique (régulière) et fond de sédiment et ensuite interaction houle bichromatique (irrégulière) et fond de sédiment. On verra les phénomènes contrôlant le transport sédimentaire tel que l'énergie, la réflexion responsable de l'apparition des rides (à petite échelle) et des barres (à grande échelle). Une discussion des résultats a été fortement considérée.

Une conclusion générale et des recommandations pour une meilleure prise en compte de l'interaction houle et sédiment sont proposées dans le dernier chapitre.

Chapitre 2

Interaction houle - sédiment

Notions essentielles et état d'art

1. Introduction

En zone côtière, la houle et les courants jouent des rôles complémentaires sur la dynamique sédimentaire : la houle a pour effet de favoriser la mise en suspension des sédiments qui sont ensuite transportés par les courants moyens. La variation spatiale des taux de transport entraîne des phénomènes d'érosion ou d'accrétion, avec des conséquences importantes pour la gestion du littoral (falaises et rives) et les ouvrages construits au bord des mers.

Il est nécessaire de mener des études expérimentales sur des modèles réduits en bassins, canaux à houle et avec des outils de modélisation afin de permettre de prédire les taux de transport sédimentaire et les évolutions morphodynamiques qui en résultent.

Beaucoup d'études expérimentales ont été menées dans des laboratoires sur des modèles réduits consistant en l'étude de l'interaction de la houle avec les sédiments, structures, brises lames franchissables [60], corps flottants [27], plaques immergées [38]...

L'étude de la dynamique des rides en canal à houle a été menée en 2002 par Brossard et al., [10], [11].

L'intérêt de l'étude porte sur la dynamique des réseaux de rides qui se forment sur un fond meuble granulaire lorsqu'on le soumet à une excitation oscillante monochromatique (houle régulière avec une seule fréquence) produite par le mouvement d'un batteur plan en canal à houle. La houle générée étant linéaire.

L'analyse du réseau de rides s'appuie sur des visualisations couplées de vues de dessus et des vues de cotés sur une ligne. L'application de la transformée de Hilbert permet de visualiser les histogrammes de distribution de longueur d'onde des rides observées et de définir une longueur d'onde la plus probable. L'évolution de la forme de l'histogramme renseigne sur le mode de formation du réseau de rides.

La dynamique et la formation des rides dépendent de quelques paramètres, tels que le nombre de Reynolds et le nombre de mobilité.

Sont présentées dans ce chapitre, les différents types de houles et sédiments ainsi que les écoulements qu'elles induisent selon le régime de houle. Cette présentation est essentielle pour la compréhension de l'analyse de l'interaction houle-sédiment.

La figure 2.1, représente les différentes caractéristiques de la houle.

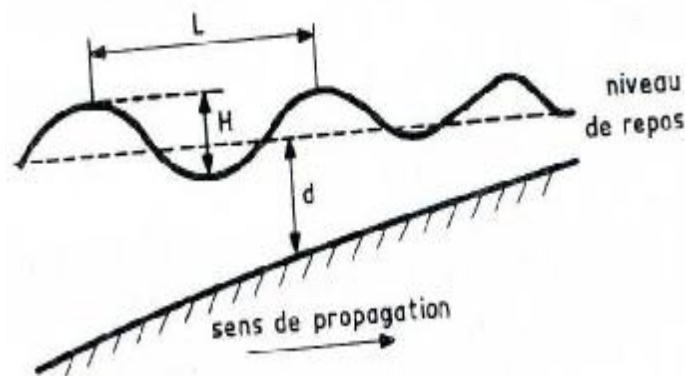


Figure (2.1) Caractéristiques de la houle [01]

H : hauteur

$\frac{H}{L}$: cambrure

T : période

L : longueur d'onde

d : profondeur

$$\frac{L}{T} = C : \text{célérité}$$

2. Différentes théories de houle

On s'intéresse aux différentes théories de houles monochromatiques qui ont une période et une longueur d'onde unique, au contraire de la houle réelle qui est un ensemble de houles harmoniques (houle irrégulière).

2.1. Hypothèses

L'écoulement est à deux dimensions $2D$; la vitesse est donnée par : $V(u, v)$

Il ne faut pas confondre la célérité qui est la vitesse de propagation de l'onde (déformation du milieu liquide ; courant ou l'écoulement) avec la vitesse des molécules d'eau qui ont pour

$$\text{composantes } u = \frac{dx}{dt} \text{ et } v = \frac{dz}{dt}$$

L'écoulement est homogène et incompressible : densité constante $\rho = ct$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} - \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{équation de continuité}$$

$$\text{Ou bien } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

L'écoulement est irrotationnel : $\text{rot} \vec{V} = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

L'irrotationnalité est, à part pour les fines couches limites sur le fond et à la surface libre, approximativement petite ; l'effet de la viscosité est usuellement pas importante pour la houle.

Le rotationnel (ou tourbillon) est, dans le cas d'une houle, un vecteur normal au plan (x, z) et

$$\text{de valeur : } \zeta = -\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (2.4)$$

ζ : coordonnée du mouvement

2.2. Houle monochromatique

2.2.1. Houle de Gerstner (1804): Houle trochoïdale

La houle de Gerstner se rapporte à une houle rotationnelle se propageant en profondeur infinie (Figure 2.2).

Son mouvement est défini par le mouvement d'une trochoïde ayant un rayon fixe.

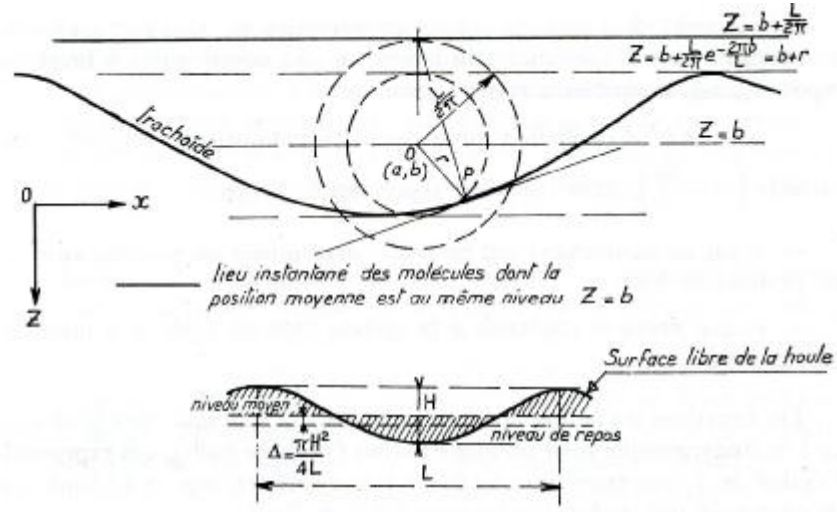


Figure (2.2) Houle trochoïdale de Gerstner [02]

$$x = a - \frac{L}{2\pi} e^{-\frac{2\pi b}{L}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{L} \right) \quad (2.5a)$$

$$z = b - \frac{L}{2\pi} e^{-\frac{2\pi b}{L}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{L} \right) \quad (2.5b)$$

g : pesanteur gravitationnelle

a, b sont des paramètres liés à la position de repos de la molécule qui a (x, y) comme coordonnées à l'instant t .

La condition de continuité et celle de pression constante en surface, exige que L et T satisfassent à:

$$T^2 = \frac{2L\pi}{g} \quad (2.6)$$

$$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} = \sqrt{g \frac{L}{2\pi}} \quad (2.7)$$

La molécule décrit un cercle de centre (a, b) et le rayon $r = \frac{L}{2\pi} e^{-\frac{2\pi b}{L}}$ décroissant

exponentiellement avec la profondeur et roule sans glisser.

Son mouvement est une trochoïde de forme :

$$\zeta = \frac{\pi H^2}{4L} - \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right) \quad (2.8)$$

x_0 : coordonnée à $t=0$

La houle de Gerstner est rotationnelle.

$$\text{Energie totale } E_p + E_c = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \left(1 - \frac{\pi^2 H^2}{2L^2} \right) \quad (2.9)$$

E_p : énergie potentielle ; E_c : énergie cinétique

2.2.2. Houle irrotationnelle de Stokes 1^{er} ordre

$$\text{Equation de continuité : } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\text{rot } \vec{v}(u, v) = 0$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \text{th} 2\pi \left(\frac{d}{L} \right) \quad \text{formule d'Airy} \quad (2.10)$$

Le mouvement de la surface libre est de la forme d'une sinusoïde d'amplitude H , qui se propage dans le sens x croissant avec la célérité.

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad (2.11)$$

N.B.

La trajectoire des particules est clairement visible si on intègre puis on élève au carré les termes de la vitesse u et v : on obtient l'équation du mouvement elliptique.

On a comme vitesse :

$$u = \frac{gHT}{2L} \times \frac{\text{th} 2\pi \frac{z+d}{L}}{\text{sh} 2\pi \frac{d}{L}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad (2.12a)$$

$$v = \frac{gHT}{2L} \times \frac{\text{sh} 2\pi \frac{z+d}{L}}{\text{sh} 2\pi \frac{d}{L}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad (2.12b)$$

$$\text{Energie totale : } E = \frac{1}{8} \rho g L H^2 \quad (2.13)$$

Cas particuliers

Profondeur infinie, les formules se simplifient comme suit :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad , \quad C = \frac{gT}{2\pi}$$

$$u = \frac{\pi H}{T} e^{2\pi \frac{z}{L}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad (2.14a)$$

$$v = -\frac{\pi H}{T} e^{2\pi \frac{z}{L}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad (2.14b)$$

Les orbites des particules sont circulaires, leurs rayons décroissent exponentiellement avec la profondeur : analogie avec la houle de Gerstner.

Si la profondeur est faible, on peut confondre $th2\pi \frac{d}{L}$ avec $2\pi \frac{d}{L}$

Il s'agit d'une onde de translation de 1^{er} ordre d'approximation ; les orbites sont alors pratiquement unidirectionnelles, aplaties et identiques.

2.2.3. Solution du 2^{ème} ordre

L'étude des ordres supérieurs se traduit par l'introduction d'harmoniques de 2^{ème} ordre ; l'équation de la surface libre est donnée en coordonnées de Lagrange.

L'expression de la surface libre est donnée par :

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right) + \frac{3\pi H^2}{8L} \frac{\coth 2\pi \frac{d}{L}}{\text{sh}^2 2\pi \frac{d}{L}} \cos 4\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right) + \frac{\pi H^2}{4L} \coth 2\pi \frac{d}{L} \quad (2.15)$$

Cette étude de 2^{ème} ordre introduit aussi une composante du courant horizontal arbitraire.

Le rotationnel est :

$$2\eta = H^2 \left(\frac{dv}{dz_0} - \frac{2\pi^3}{TL^2} \frac{\text{sh} 4\pi \frac{z_0 + d}{L}}{\text{sh}^2 2\pi \frac{d}{L}} \right) \quad (2.16)$$

η : viscosité cinématique et z_0 coordonnée à $t=0$

Beaucoup d'autres théories de houle existent : houle elliptique, houle de Miche, houle conoïdale, houle soliton...

Il importe de signaler que ces différentes théories sont approximatives, il est raisonnable d'envisager des solutions numériques.

Cokelet en 1976 [19] obtint une solution numérique exacte pour un train de houles irrotationnelles avec une profondeur constante.

Néanmoins cette méthode numérique possède des inconvénients tels que la complexité de la procédure numérique.

Le graphe de la figure 2.3 montre ces différentes théories de houle monochromatique et leur domaine de validité en fonction de $\frac{H}{T^2}$ et $\frac{d}{T^2}$

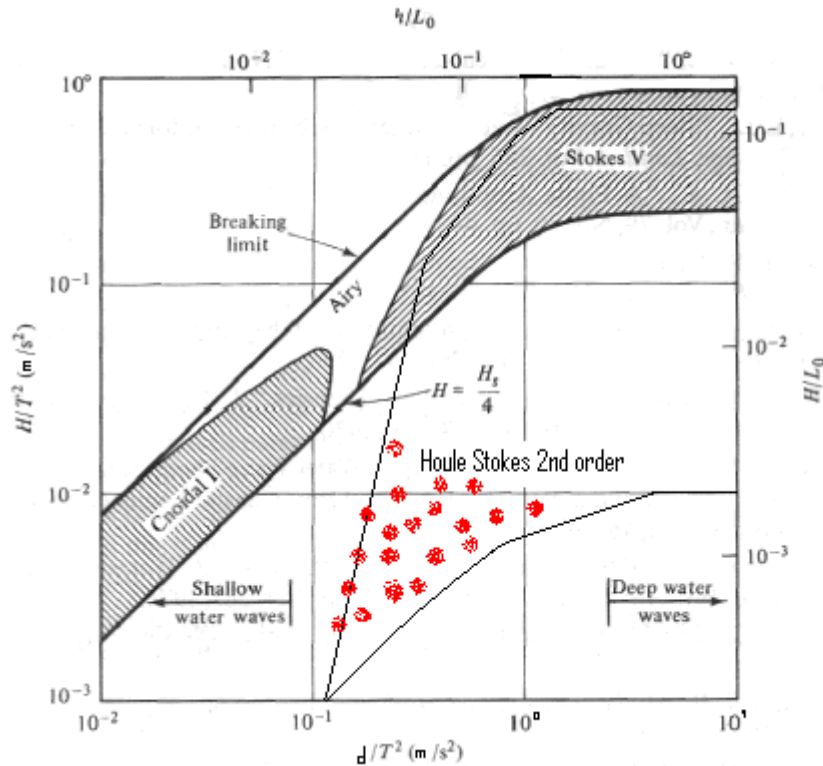


Figure (2.3) Différentes théories de houle (nuage points rouges : domaine des essais) [03]

L'étude expérimentale de l'interaction de soliton avec un fond sableux en eau peu profonde a été dirigée par Ezersky et al [11].

Les solitons sont générées sur le fond d'une onde harmonique, dans un canal utilisé en mode résonnant, c'est-à-dire que la houle générée par le batteur oscillant va subir une réflexion quasi parfaite par l'autre extrémité du canal (il n'y a pas de plage d'amortissement).

Si la condition du rapport $R=d/L \ll 1$ est vérifiée, alors on est dans le domaine des eaux peu profondes (L longueur d'onde et d hauteur d'eau au repos du canal). L est égale à la longueur du canal, à savoir 10 m.

Le soliton est le résultat de collision de la houle incidente avec la houle réfléchie à la partie centrale du canal.

L'amplitude du soliton augmente progressivement avec le temps jusqu'à ce qu'il soit établi ; la durée de cet établissement est d'environ 4 minutes (onde fortement non linéaire).

Lors de la propagation des solitons dans le canal, des rides apparaissent rapidement au niveau du fond sableux, à l'exception de la partie centrale du canal où le fond reste plat sur une

longueur de 40 cm (zone de collision). Les vitesses des particules fluides sont très faibles près du fond dans cette zone et la contrainte de cisaillement au fond reste inférieure à la valeur critique pour la mise en mouvement des sédiments. Ailleurs (hors de la zone centrale), la taille des rides augmente progressivement.

L'évolution temporelle de l'amplitude des solitons A_s et de la hauteur moyenne des rides h , montre clairement que l'amplitude des solitons diminue avec le temps alors que la hauteur moyenne des rides augmente. Un test a été effectué en l'absence de sédiments au dessus d'un fond plat indéformable pour les mêmes conditions de forçage hydrodynamique [53]. Ce test a montré que l'amplitude des solitons est constante dans le temps dès qu'ils sont établis.

La formation des rides sur le fond sableux est ainsi responsable de la diminution d'amplitude des solitons.

Cependant, l'amplitude de l'onde harmonique reste approximativement constante.

L_r longueur d'onde des rides est de l'ordre de 10 cm est beaucoup plus petite que la longueur d'onde L de la houle de surface (10 m).

La longueur d'onde du soliton est de l'ordre de 40 cm.

Les rides correspondent à des rugosités de petite échelle pour l'onde de surface.

Cette différence d'échelle ($L_r / L \approx 10^{-2}$) explique la diffusion de l'onde harmonique par les rides est très faible, et ainsi que l'effet des rides sur l'onde de surface. La décroissance de l'amplitude des solitons lors de la formation des rides peut s'expliquer par deux processus :

- la turbulence peut expliquer cette décroissance de l'amplitude car la mesure de nombre de Reynolds au fond nous fournit une valeur qui correspond à la valeur critique pour la transition vers le régime d'écoulement turbulent.
- Le deuxième processus pouvant expliquer cette décroissance correspond à la diffusion des solitons par les rides. L'échelle des solitons étant de ≈ 50 cm est beaucoup plus petite que celle de l'onde de surface, et du même ordre que celle des rides. La diffusion du soliton par la morphologie du fond sera ainsi plus forte que la diffusion de l'onde de surface.

De même que l'amplitude du soliton, le déphasage φ_s décroît significativement avec le temps.

2.3. Houle réelle

La houle réelle (irrégulière) n'est pas le phénomène ondulatoire simple décrit par les théories élémentaires précédentes ; la houle pure n'existe que très rarement. La houle réelle peut être assimilée à un ensemble de houles périodiques ayant chacune d'elle sa propre période et sa propre longueur d'onde, et dans chaque train de houle, l'ondulation se déplace avec sa propre célérité C_n .

Dans notre étude on donne importance à la houle irrégulière constituée de deux fréquences, c'est-à-dire la houle bichromatique.

2.3.1. Houle bichromatique est une houle possédant deux fréquences et deux longueurs d'onde différentes, de ce fait elle se rapproche un peu de la houle réelle.

Beaucoup d'études décrivent cette théorie de houle bichromatique ; cette théorie est de quatrième ordre est déduite de la méthode d'expansion type Stokes, elle est appliquée pour une houle multiple se propageant dans des directions multiples. Cette solution offre une approche intéressante de la houle réelle et elle coïncide bien avec la théorie de la houle périodique type Stokes. Cette méthode s'avère compliquée car elle utilise de strictes conditions aux limites et des paramètres difficiles à déterminer tels que l'énergie cinétique.

Pour la houle bichromatique, on peut citer les travaux de Baldock et al. [20].

Leur théorie de houle s'avère adéquate car elle est appliquée dans le cas de petites profondeurs et elle offre une surface libre proche de celle de l'expérimental.

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \frac{a_1 a_2}{2g} [C \cos(\phi_1 - \phi_2) - D \cos(\phi_1 + \phi_2)] \quad (2.17)$$

$\eta_{1,2}$: surface libre

$a_{1,2}$: amplitude

$\phi_{1,2}$: phase

C et D deux constantes

$$C = \frac{(2\omega_1\omega_2(\omega_1 - \omega_2)(1 + \alpha_1\alpha_2) + \omega_1^3(\alpha_1^2 - 1) - \omega_2^3(\alpha_2^2 - 1))(\omega_1 - \omega_2)(\alpha_1\alpha_2 + 1)}{\omega_1^2(\alpha_1^2 - 1) - 2\omega_1\omega_2(\alpha_1\alpha_2 - 1) + \omega_2^2(\alpha_2^2 - 1)} + (\omega_1^2 + \omega_2^2) - \omega_1\omega_2(\alpha_1\alpha_2 + 1)$$

$$D = \frac{(2\omega_1\omega_2(\omega_1 + \omega_2)(-1 + \alpha_1\alpha_2) + \omega_1^3(\alpha_1^2 - 1) + \omega_2^3(\alpha_2^2 - 1))(\omega_1 + \omega_2)(\alpha_1\alpha_2 + 1)}{\omega_1^2(\alpha_1^2 - 1) - 2\omega_1\omega_2(\alpha_1\alpha_2 + 1) + \omega_2^2(\alpha_2^2 - 1)} - (\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1\omega_2(\alpha_1\alpha_2 - 1)$$

ω : $_{1,2}$ vitesse circulaire (pulsation)

$$\alpha_1 : \coth(k_1 H) ; \alpha_2 : \coth(k_2 H); k_{1,2} = \frac{2\pi}{L}$$

3. Déformation de la houle au cours de sa propagation

Le creux de la houle ne peut pas prendre une valeur trop élevée, les valeurs ne sont plus stables lorsque leur cambrure $\frac{H}{L}$ atteint une valeur limite. Cette valeur critique peut être atteinte soit par accroissement local du creux soit par réduction de la longueur d'onde par suite de la diminution de la profondeur. Alors la vague est partiellement détruite et déformée : **la houle déferle**.

Lorsque la houle se propage dans un milieu à profondeur variable, sa célérité varie. La vitesse n'est plus la même ; les crêtes se déforment en plan : **la houle réfracte**.

Lorsque la houle aborde une paroi imperméable, elle se **réfléchit** partiellement : la houle réfléchie en se combinant à la houle incidente donne naissance à des oscillations stationnaires appelées clapotis, qui causent des érosions des digues sur fond sableux non rocheux.

Lorsque un ouvrage n'arrête qu'une partie de front de houle, des oscillations se manifestent derrière l'ouvrage ; la houle contourne l'ouvrage : **elle diffracte**.

4. Régime des écoulements de la houle

Le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité exprimé en Reynolds est indicateur sur le type d'écoulements de houle.

L'écoulement laminaire est caractérisé par ses lignes de courants qui sont parallèles à la direction de l'écoulement.

La turbulence est telle que les forces de viscosité deviennent négligeables devant les forces d'inertie ; les lignes de courant se rompent en se divisant à un grand nombre de particules.

La figure 2.4 suivante qui est en fonction de Reynolds R_e et le coefficient de frottement f_w , nous renseigne bien sur les différents écoulements de la houle.

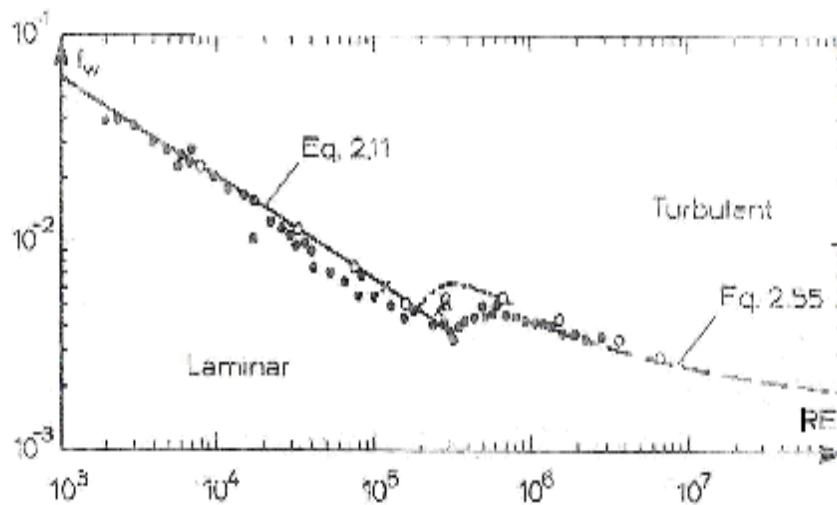


Figure (2.4) Différents écoulements en fonction du nombre de Reynolds [03]

5. Sédiments marins

Le sable de mer est le produit ultime d'érosion des roches cristallines par les fleuves et les glaciers disparus ; les galets et les boues sont les produits des côtes actuelles.

Le sable de mer se compose de grains de silice, de fragments de minéraux lourds (rubis, grenats, glauconie, etc.) qui sont d'excellents indicateurs de l'origine des sables, et des fragments calcaires surtout coquillés.

Le diamètre de sable varie entre 0,1 et 2 mm. Cette distinction provient de la particularité de la vitesse de chute ; en effet les sables correspondent à la zone intermédiaire entre les vases, pour lesquelles la résistance hydrodynamique varie proportionnellement à la vitesse de chute, c'est-à-dire tombent en régime laminaire, et les galets qui tombent en régime turbulent. L'analyse granulométrique d'un échantillon de sable est la meilleure méthode pour caractériser un sable. Les courbes granulométriques permettent de définir le *diamètre médian* D_m (50%), le *1^{er} décile* D_1 (10%), le *1^{er} quartile* D'_1 (25%), le *3^{ème} quartile* D'_3 (75%) et le *9^{ème} décile* D_9 (90%).

La courbe de fréquence granulométrique, dérivée de la courbe granulométrique, donne le mode D_0 diamètre le plus fréquent. Figure 2.5.

Le *coefficient de dispersion* : $\frac{D_{75}}{D_{25}}$ mesure l'évasement de la courbe de fréquence granulométrique, il varie de 1,5 à 3.

Le *coefficient de dissymétrie* de la courbe de fréquence par rapport à son sommet : $\frac{D_{25}D_{75}}{D_{50}^2}$

Le coefficient d'aplatissement de la courbe de fréquence : $\frac{D_{75} - D_{25}}{2(D_{90} - D_{10})}$

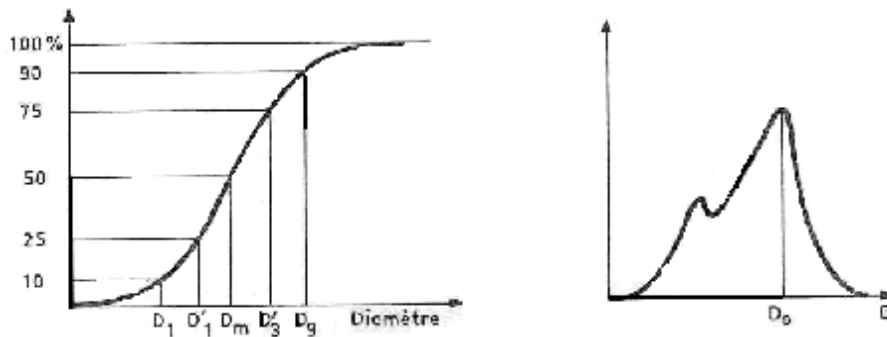


Figure (2.5) Courbe granulométrique [01]

Les sables peuvent être aussi caractérisés par leur forme, leur vitesse de chute et leur thixotropie (sables mouvants).

Les *gravillons* (2 à 26 mm) et les *galets* (2 à 50 cm) sont des morceaux de roches plus ou moins roulés ; ils proviennent de l'embouchure des fleuves torrentiels ou de l'érosion des falaises ; les éléments plus fins (moins de 60 microns) sont les *limons* (qui ne contiennent pas de matières organiques) et les *vases* plus ou moins liées par des colloïdes. Les vases sont cohérents, plastiques rigides (non visqueuses), mais thixotropiques, compressibles, non élastiques, lisses, difficiles à éroder et imperméables.

6. Profils d'équilibre des plages

La mer fait remuer et reclasser sans arrêt les matériaux du fond. Il est possible cependant de définir à tout instant un profil d'équilibre limite qui subsisterait si la houle et les courants conserveraient indéfiniment les mêmes caractéristiques.

L'implantation des digues et jetées se fait par rapport à cet équilibre qui garantit une bonne assise pour ces ouvrages maritimes vus qu'ils seront érigés à l'endroit propice, en dehors des fortes sollicitations.

Les plages de sable comportent une partie concave constamment immergée dont la pente diminue vers les grandes profondeurs et une partie dynamique alternativement couverte et découverte dans les mers à marée. Les fonds de la partie dynamique de la plage sont constamment remaniés par la houle ; ils comportent parfois des barres de lévigation séparées par des fosses de lévigation surtout dans le cas des mers sans marées et sur lesquelles se

forment les lignes successives de rouleaux de déferlement. Les barres se forment pour les houles de cambrure supérieure à 2,5% ; la hauteur d'eau sur les barres est de l'ordre de 6 % fois la hauteur d'eau qui existerait sans les barres ; la profondeur dans les fosses est de l'ordre de 1,7 fois la hauteur d'eau sur les barres (Figure 2.6).

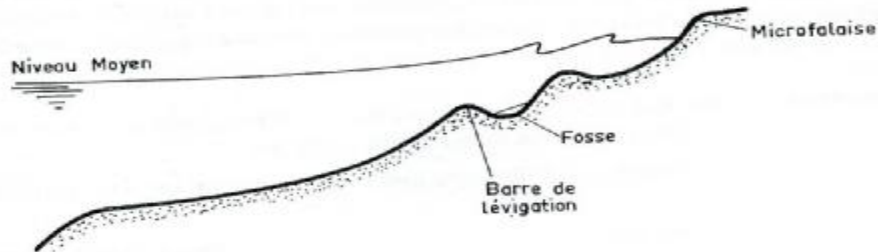


Figure (2.6) Profils d'équilibre des plages [01]

Les pentes des plages sont de l'ordre de 1 à 5 %

Aussi on distingue deux types de sédiments : le sédiments cohésifs (vase) et les sédiments non cohésifs (sable) qui ont des caractéristiques différentes, à savoir, la vitesse de chute des sédiments, floculation, tassement...

Notre étude se portera sur les sédiments non cohésifs.

7. Ecoulement dans un milieu poreux

Les équations décrivant les écoulements à surface se retrouvent à partir du système tridimensionnel des équations de Navier Stokes.

Les équations de Navier Stokes décrivent la mécanique des fluides de manière générale.

Elles font intervenir uniquement la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement.

Pour un fluide newtonien incompressible, on a :

Conservation de masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (2.18)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\partial u \otimes u) - \mu \Delta u + \Delta^2 p = \rho f \quad (2.19)$$

Incompressibilité du fluide :

$$\text{div}(u) = 0$$

$\rho = \rho(x, t)$: densité du fluide

$u = u(x, t)$: vitesse du fluide

$p = p(x, t)$: pression du fluide

μ : viscosité dynamique, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$: viscosité cinématique (unité en poiseuille = 1 kg/m s)

$f = f(x, t)$ force agissant sur le fluide (gravité)

7.1 Définition d'un milieu poreux saturé

Le milieu poreux est composé d'une matrice solide à l'intérieur de laquelle se trouvent des pores reliés entre eux ou éventuellement isolés. On peut distinguer :

Les matrices solides non consolidées où la phase solide est formée de grains, par exemple le sable, gravier, billes de verres ou d'acier...

Les matrices solides consolidées, par exemple les roches calcaires, grès, l'argile, le bois...

Dans le cadre de notre étude nous nous limitons au cas de la matrice solide non consolidée.

Le milieu poreux est saturé d'un fluide (eau) dont les pores permettent son écoulement.

7.2 Paramètres du milieu poreux

La distribution des pores et des grains est généralement très irrégulière. A cette échelle, la pression, la vitesse, l'atmosphère varient très irrégulièrement d'un point à l'autre du domaine.

On est donc amené à effectuer une moyenne spatiale de ces grandeurs. Le milieu est dit homogène, c'est-à-dire que les propriétés locales sur un volume élémentaire représentatif sont indépendantes de la position de celui-ci.

Porosité : elle est définie comme le rapport du volume vide occupé par les pores sur le volume total, soit :

$$n = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume total}} \quad (2.20)$$

La proportion occupée par la matrice est donc donnée par $1-n$

Dans les milieux naturels n n'excède pas 66 % (pour l'ardoise en poudre). Néanmoins cela peut être élevé pour des milieux poreux industriels (90 % en moyenne pour les fibres de verres)

Tortuosité : la complexité du chemin continu des fluides à travers le pore a une influence sur la porosité de transport du milieu.

On définit τ comme turtuosité.

$$\tau = \left(\frac{L_{cap}}{L'} \right)^2 \quad (2.21)$$

L_{cap} : longueur moyenne d'un tuyau capillaire ondulé et L' représente la longueur du milieu.

On a toujours L_{cap} supérieur à L' , $\tau \geq 1$

Plus τ est grand plus le milieu est tortueux, il joue donc un rôle important dans les problèmes de diffusion.

Perméabilité k : Elle se réfère à la capacité du milieu à laisser passer le fluide à l'intérieur des pores. Elle ne dépend que de la géométrie de la matrice solide, en particulier de la porosité et de la tortuosité. Ainsi le milieu est d'autant plus perméable que les pores sont connectés entre eux.

Généralement k est déterminée par des mesures expérimentales, par le biais de la loi de Darcy régissant le mouvement des fluides dans les milieux poreux.

Il existe de nombreux travaux répertoriant la perméabilité pour différents milieux. Tableau 2.1

| Nature | ordre de grandeur | degré de perméabilité |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Gravier moyen à gros | $10^{-2} < k < 10^{-1}$ cm/s | très élevé |
| petits graviers, sable | $10^{-3} < k < 10^{-1}$ cm/s | assez élevé |
| sable très fin, sable limoneux, loess | $10^{-5} < k < 10^{-3}$ cm/s | faible |
| silt compact, argile silteuse | $10^{-7} < k < 10^{-5}$ cm/s | très faible |
| argile franche | $10^{-10} < k < 10^{-7}$ cm/s | ~ imperméable |

Tableau (2.1) Quelques ordres de grandeurs de perméabilité.

Il existe beaucoup de formules théoriques pour évaluer la perméabilité k grâce à des géométries particulières du milieu, par l'intermédiaire de la porosité n et d'une dimension D caractéristique de la matrice solide à l'échelle du pore.

On note celle qui intéresse notre cas, à savoir la relation de Kozeny-Carman (1937) qui donne une estimation satisfaisante de k dans le cas d'un empilement de grains de forme approximativement identiques et dont la distribution des tailles des grains n'est pas éloignée de la taille moyenne D .

$$k = \frac{D^2 \theta^3}{36 C_o (1 - \theta)^2} \quad (2.22)$$

C_o , coefficient de forme compris entre 3,5 et 5

Il est égal à 4,8 pour les grains sphériques et dans ce cas D représente le diamètre de la sphère. Pour plus de détails sur les théories calculant k , on pourra consulter le travail de Delache [74] et Delinares [73].

L'écoulement de l'eau dans le sol est régi par deux lois d'hydrodynamique : la loi de Darcy et la loi de Forchheimer.

7.3. Loi de Darcy

L'écoulement dans un milieu Ω représentant un milieu poreux est gouverné par une loi de conservation de masse qui s'écrit, en faisant l'hypothèse d'incompressibilité :

$$\operatorname{div}(u) = q \text{ dans } \Omega \quad (2.23)$$

où q est un terme source et u la vitesse de Darcy.

Si on néglige la gravité, cette dernière sera donnée par la loi de Darcy :

$$u + k \nabla p = 0 \text{ dans } \Omega \quad (2.24)$$

Où p est la pression et k la perméabilité du milieu.

Une autre écriture plus simple qu'on pourra vérifier avec des expériences de percolation d'eau à travers une colonne de sable de hauteur H et de surface S peut être définie comme suit :

$$Q = k^1 S \frac{\Delta P_m}{H} \quad (2.25)$$

Avec Q le débit de l'eau percolant la colonne de sable, ΔP_m la différence de pression motrice entre le haut et le bas de la colonne et k^1 est une constante dépendant de la perméabilité de la couche poreuse de milieu poreux.

$$k^1 = \frac{k}{\mu_f}$$

Avec μ_f la viscosité dynamique

Cette loi s'applique aux écoulements laminaires et permanents, caractérisés par une vitesse lente, et les gouttes d'eau se déplacent en ligne droite. En général, dans les sols, un écoulement est laminaire si la vitesse est inférieure à 1 m/s, car les vitesses supérieures signalent un écoulement turbulent.

D'autres part, l'écoulement est permanent si, en un point précis, la vitesse et la pression ne varient pas en fonction du temps.

Toutefois, les écoulements d'eau à travers les sols composés de gravier, cailloux ou de blocs et comportant de gros vides peuvent être turbulents : l'équation de Darcy pourra être source d'erreurs.

7.4 Loi de Fochheimer

Lorsque la vitesse débitante augmente pour des phénomènes où les vitesses d'écoulement sont élevées, dans ce cas on montre expérimentalement que pour un gradient de pression fixe, le débit mesuré est plus petit qu'il ne le serait avec la loi de Darcy. Pour prendre en compte cet effet, Fochheimer [16] fut le premier en 1901 à proposer une modification empirique de la loi de Darcy en reliant non linéairement (par un polynôme de second ordre) la vitesse de filtration et le gradient de pression.

La formulation la plus utilisée est :

$$\vec{V}_f + c_F \frac{k^2}{\mu_f} \cdot \|\vec{V}_f\| \cdot V_f = -\frac{k}{\mu_f} (\Delta^2 P^* - \rho f g) \quad (2.26)$$

Le premier paramètre de la gauche du signe égal (=) est dû au frottement visqueux et le deuxième paramètre à droite, aux pertes inertielles.

c_F est une constante reflétant la géométrie du milieu et $\|\cdot\|$ la norme euclidienne de R^3 .

c_F est approximativement égal à 0,55 et dans le cas d'un empilement de sphères, il est défini par :

$$c_F = 0,55 \left(1 - 5,5 \frac{d}{D_e} \right)$$

Avec d le diamètre des billes et D_e le diamètre équivalent de la couche.

Muskat propose en 1946 une classification de domaine de validité des lois de Darcy et de Forchheimer. Il distingue trois zones en fonction de nombre de Reynolds relié aux pores R_{ep}

Zone 1 correspond à un R_{ep} très faible : $R_{ep} \prec 1$ loi Darcy valable

Zone 3 correspond à un R_{ep} fort : $10 \succ R_{ep} \succ 1$ loi Forchheimer est valable

Zone 2 correspond à une zone de transitions entre les faibles et les grands nombres de Reynolds.

Frih et al [16] ont présenté un modèle numérique d'écoulement pour un fluide monophasique incompressible dans un milieu poreux fracturé ; l'écoulement dans la fracture est un écoulement supposé assez élevé pour que les termes d'inertie ne soient pas négligés. Il est alors gouverné par la loi de Forchheimer. Dans les sous domaines, les effets d'inertie sont négligeables et l'écoulement est gouverné par la loi de Darcy.

7.5 Ecoulement instationnaire

Dans le cas d'un écoulement instationnaire, il existe un modèle appelé modèle de **Polubarinova-Kochina** [43] qu'est utilisé pour décrire un écoulement instationnaire engendré par la houle dans un milieu poreux, ce modèle introduit des coefficients de masse ajoutée et de perméabilité intrinsèque.

Des expériences réalisées en canal à houle avec une mesure très précise de la surface libre permettent de quantifier ces coefficients.

Les champs de vitesse dans le milieu externe et dans le milieu poreux peuvent alors être déterminés, en utilisant la technique de mesure de surface à effet Doppler [61] avec la quelle nous avons pu déterminer ces coefficients par mesures de la longueur d'onde et du coefficient d'amortissement.

Le modèle de Polubarinova-Kochina [43] découle aussi des équations de Navier Stokes.

Il permet d'expliquer les forces résistantes à l'échelle macroscopique :

$$-\frac{\nu}{k} \bar{u} - \frac{f_w}{\sqrt{k}} \bar{u} \bar{u} - \frac{1-n}{n^2} C_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (2.27)$$

n : porosité

k : perméabilité intrinsèque

ν : viscosité cinématique

\bar{u} : vitesse

La perméabilité intrinsèque peut être définie par l'expression :

$$k = \frac{n^2 d^2}{\tau (1-n)^3} \quad (2.28)$$

d est le diamètre des particules, et τ coefficient de tortuosité .

Le premier terme de l'équation (2.27) est linéaire : c'est le terme de Darcy.

Le deuxième terme de l'équation (2.27) est associé aux termes de convectifs (à l'échelle du pore) soit à la turbulence (f_w coefficient de frottement).

Le dernier terme est un terme d'inertie associé à l'instationnarité de l'écoulement, il fait intervenir un coefficient de masse ajoutée C_m .

8. Conclusion

L'interaction houle fond meuble est un domaine d'étude expérimentale qui nécessite un dispositif de matériel : canal à houle où des houles régulières et irrégulières sont produites par un batteur hydraulique.

Ces houles, générées au dessus d'un fond de sédiment monodisperse et non cohésif, provoque un mécanisme de formation d'ondulation au fond.

Afin de comprendre ce mécanisme, on a abordé les différents types de houle et sédiments et les écoulements au travers les milieux poreux.

Nous avons vu différentes formules de vitesse de houle et écoulements qui sont intimement liés aux phénomènes tels que le transport sédimentaire.

Ces notions essentielles mises en évidences dans ce chapitre, nous aideront à comprendre le mécanisme du transport sédimentaire et la formation des ondulations qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Morphodynamique du fond sédimentaire

1. Introduction

La houle quand elle avance, elle fait apparaître au fond des ondulations appelées rides, dunes et barres ; ces dernières apparaissent pour des conditions qui contrôlent la dynamique sédimentaire.

On distingue à travers notre étude essentiellement les rides et les barres. Les rides sont liées à la vitesse de la houle au fond et les barres sont des grandes ondulations dues à la réflexion de la houle.

La vitesse au fond calculée par la vélocimétrie à laser, est intimement liée au frottement au fond et par conséquent au transport sédimentaire qui est responsable des dégâts tels que l'érosion et l'ensablement dont le processus de formation fera l'objet du chapitre qui suit.

2. Paramètres contrôlant la dynamique des rides

- **Densité relative « s »**: rapport entre la densité du sédiment et celle de l'eau : $s = \frac{\rho_s}{\rho}$

- **Contrainte de cisaillement** sur le fond en écoulement laminaire sur fond plat :

$$\tau_m = U_m \times \sqrt{\omega \times \nu} \quad (3.1)$$

U_m : vitesse de sortie en couche limite

ω : pulsation

- **Nombre de Reynolds**

$$R_e = \frac{\omega_s \times d_i}{\nu} \quad (3.2)$$

- **Vitesse de chute de sédiment** en eau calme : $\omega_s = \sqrt{\frac{4(s-1)g \times d_i}{3C_D}}$ (3.3)

- Pour une sphère, le coefficient de frottement C_D est donné par :

$$C_D = \frac{25}{R_e} \text{ et } R_e = \frac{\omega_s \times d_i}{\nu} \text{ si l'écoulement est laminaire.}$$

- **Nombre de Shields** θ (1936) : Correspond à un nombre adimensionnel caractéristique du rapport des forces hydrodynamiques inertielles sur la force de pesanteur :

$$\theta = \frac{\tau_0}{\rho(s-1)g \times d_i} \quad (3.4)$$

d_i : profondeur d'eau

- **Paramètre de Shields critique** : C'est la valeur du paramètre de Shields au delà duquel le mouvement est amorcé ; cette valeur dépend des caractéristiques du fond et du fluide. Pour un fond sableux et de l'eau, il convient de le prendre égal à 0,05.
- **Nombre de mobilité** : Il correspond au rapport entre la force de traînée et la pesanteur.

$$\psi = \frac{(a \times \omega)^2}{(s-1)g \times d_i} \quad (3.5)$$

a : amplitude

- **Coefficient de frottement f_w**

La morphodynamique côtière n'est plus jamais devenue un enjeu de la gestion du littoral. Or une bonne prévision des évolutions morphodynamiques qui sont dues principalement à l'interaction des structures côtière avec l'hydrodynamique (courant et houle) passe par la prédiction du transport sédimentaire, ce qui nécessite une bonne connaissance du frottement de fond associé à cette hydrodynamique pour un fond donné.

Dans un premier temps, des houles régulières ont été étudiées (Soulsby [03]) à l'aide d'expériences ou de modèles numériques.

Le frottement de fond f_w est défini par la contrainte de cisaillement maximum τ_{\max} pour une houle sinusoïdale d'amplitude U et de pulsation ω sur un fond rugueux.

$$\frac{\tau_{\max}}{\rho} = f_w \frac{U^2}{2} \quad (3.6)$$

ρ : étant la masse volumique

Il existe beaucoup de formules pour f_w :

$$\text{Soulsby [03] propose sur des expériences : } f_w = 1,39 \left(\frac{A}{z_0} \right)^{-0,52} \quad (3.7)$$

$$\text{Où } A = U / \omega \quad \text{et } z_0 = \alpha \exp \left[\beta \left(\frac{A}{k_n} \right)^y \right]$$

Avec $\alpha = 0,00251$, $\beta = 5,21$ $y = -0,19$ $k_n = 25h^2 / L$; (h : hauteur crête - creux de la ride et L : longueur d'onde de la ride)

Temperville et al (1990) [67] ont ajusté une formule paramétrée de la même forme à partir de leur simulations numériques, les conduisant aux coefficients suivants :

$$\alpha = 0,00278, \quad \beta = 4,65 \quad y = -0,22$$

Do Carmo [67] propose d'améliorer cet ajustement en prenant :

$$\alpha = 0,0014, \quad \beta = 4,584 \quad y = -0,134$$

Il suggère aussi d'améliorer cette formule afin de reproduire les variations temporelles de la contrainte de cisaillement de fond en introduisant un paramètre de frottement instantané $f_w(t)$ ainsi qu'un déphasage θ .

$$\frac{\tau(t)}{\rho} = \frac{f_w(t+\theta)}{2} U(t+\theta) \|U(t+\theta)\| \quad (3.8)$$

$$\text{avec } f_w = \alpha_1 \exp \left[\beta_1 \left(\frac{A(t)}{k_n} \right)^{y_1} \right], \quad A(t) = \frac{U(t)}{\omega}, \quad \theta = 0,0443 \frac{2\pi}{\omega} \left(\frac{k_n}{0,05} \right)^{0,143} \left(\frac{A}{k_n} \right)^{0,0176}$$

$$\text{et } U(t) = U \sin(\omega t)$$

Cette paramétrisation de la contrainte de cisaillement de fond est généralisée pour le cas de houles régulières et irrégulières du fait de la bonne concordance des résultats théorique avec ceux de l'expérimentale.

KouaKou et al [41], ont fait une étude numérique et analytique d'un écoulement pour calculer et voir comment cet écoulement cisailé, incident, laminaire est perturbé par une bosse de ride dans un canal à houle.

La résolution numérique s'est faite avec le code CASTEM 2000 pour différent nombre de Reynolds : R_e variant de 0 à ∞ (infini).

Pour $R_e = 0$, la comparaison de la solution numérique avec l'analyse analytique montre un accord correct.

Cependant on n'arrive pas à avoir un accord correct en diminuant le nombre de Reynolds en dessous de 1.

Pour des nombres de Reynolds grand, l'accord est d'autant meilleur.

Dans cette même étude, les profils des rides sont enregistrés par une caméra CCD (160 x 120 pixels).

Grâce à un échange homogène, la luminance permet de déterminer l'élévation de la surface granulaire, c'est-à-dire le relief ou l'amplitude.

Aussi, les auteurs de cette étude se sont intéressés à calculer numériquement le frottement à l'aide du code CASTEM 2000.

Pour un $R_e = 300$, sur une ride créée par un écoulement de 03 cm de hauteur d'eau.

Une seule ride est représentée dans le graphe 3.1.

Sur cette ride on constate que le frottement est maximum en amont de la bosse. La partie de la crête exposée à l'écoulement est le siège d'une érosion plus importante.

On observe que le frottement pariétal est en phase avec la bosse.

D'autre part, le frottement devient négatif en aval de la ride, signature d'un courant de retour.

Il est à noter que les rides présentant une zone de recirculation sont dénommées « rides à tourbillon ».

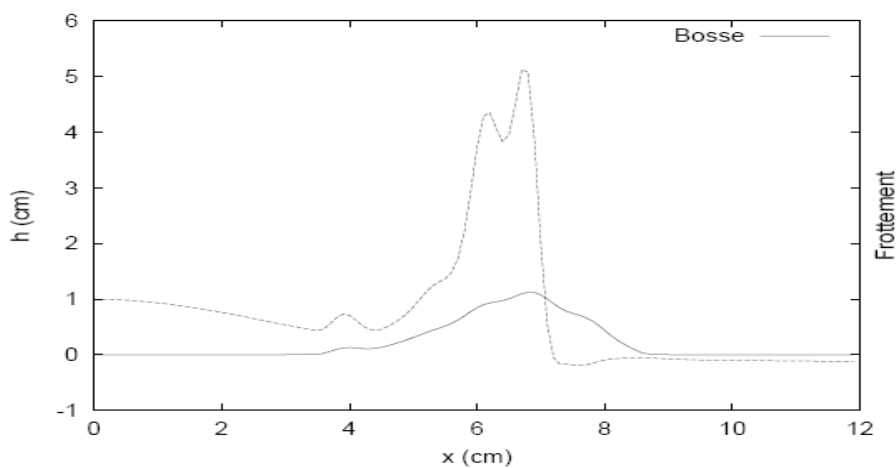


Figure (3.1) Frottement pariétal sur un profil expérimental (une bosse de ride)

3. Géométrie des rides (processus de formation des rides)

Le processus de formation des rides a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux permettant d'établir des relations entre les caractéristiques des rides et celles de l'onde progressive. Parmi ces travaux, nous citons ceux de Bagnolds (1946), Castens (1984) et Sleath en 1984 [03].

Bagnolds [03] est l'un des précurseurs de l'étude de formation des rides de sable. Les expériences qu'il a menées sur un fond meuble ont permis de les classer en deux catégories : rides de grain roulant et rides de vortex.

- les rides de grains roulants (rolling grain ripples) apparaissent pour des conditions de houle relativement peu sévères. Bagnolds [03] a caractérisé ces rides comme étant des rides stables pour des vitesses inférieures à deux fois celles de la mise en mouvement des sédiments. Ces rides sont caractérisées par leur rapport hauteur sur longueur d'onde inférieur à 0,1. La formation de ces rides s'effectue par décollement des grains de sable du fond puis par roulement de ces grains et enfin par leur accumulation pour former de petites côtes. L'écoulement ne semble pas se décoller derrière ce type de rides et cela a permis à Sleath [03] (1976) de prédire leur longueur d'onde à l'aide d'un modèle d'analyse de stabilité basé sur un écoulement laminaire sans écoulement au dessus d'un fond sinusoïdal.
- Ensuite l'écoulement se décolle au voisinage des sommets de rides pour former un petit tourbillon. Ce tourbillon peut entraîner le sable du creux vers la crête de la ride donc accroître sa pente. C'est ainsi que l'on voit apparaître les rides de vortex (vortex ripples) caractérisées par leur rapport sur longueur d'onde compris entre 0,1 et 0,25

Ce type de rides est alors désigné par Wiberg et Harris (1994) sous le nom de ride orbitale, afin de refléter le fait que la longueur de ces rides augmente avec l'amplitude jusqu'à atteindre une géométrie stable (figure 3.2).

Sleath [03] en 1984 a fait une synthèse sur les différents types de rides pouvant exister en écoulement oscillant.

Les rides à grains roulant apparaissent les premières ensuite les rides de vortex pouvant elle-même se développer en rides de modèle de brique (brick patterns ripples)

La réflexion est définie comme étant le rapport de l'amplitude incidente sur l'amplitude

réfléchi $r = \frac{a_i}{a_r}$; ce coefficient est fourni par la méthode de deux sonde fixes à effet résistif

[25]. Chacune de ces sondes est constituée de deux conducteurs parallèles et inoxydables.

La tension délivrée est sensiblement proportionnelle à la hauteur instantanée de la sonde qui est régulièrement l'objet d'un étalonnage. Pour pouvoir traiter le signal nous utilisons l'outil informatique qui analyse le spectre et détermine la fréquence et l'amplitude de la houle (coefficient de réflexion). Un programme sous LABVIEW (logiciel de commande et de mesure à partir d'un PC) est développé à cet effet au Laboratoire Mécanique, Physique et Géoscience du Havre LMPG par J. Brossard [25].

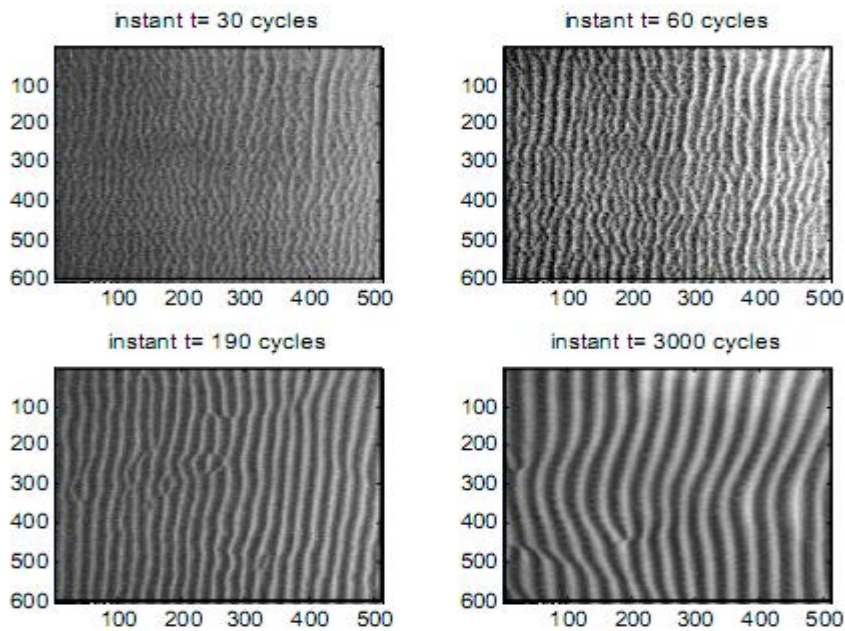


FIG. 1 – Exemples d’images traitées ($\psi = 6,8$).

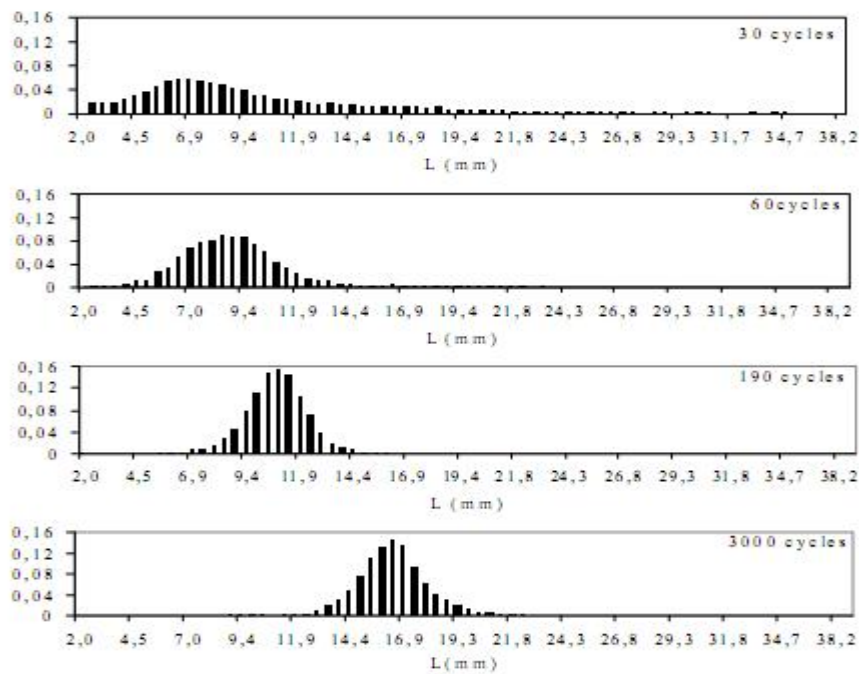


Figure (3.2) Exemple d’histogrammes $\psi = 6,8$

4. Formation des barres

Quand la houle aborde une digue ou un quai, elle se réfléchit. Cette onde réfléchiée va se superposer avec l’onde incidente et cela donne une houle appelée clapotis qui contient des creux et des ventres avec des points fixes qui ne bougent pas (onde stationnaire).

Les ondulations dues à la réflexion et qui se forment au fond ont des dimensions qui justifient la loi de Bragg.

Qu’est-ce que c’est la loi de Bragg.

4.1. Loi de Bragg

La loi de Bragg est la loi régissant la diffraction des ondes électromagnétiques par un cristal. Elle fut découverte par Sir William Henry Bragg et William Lawrence Bragg vers 1915. Cette loi établit un lien entre la distance séparant les atomes d'un cristal et les angles sous lesquels sont principalement diffractés des rayons X envoyés sur le cristal. Figure 3.3.

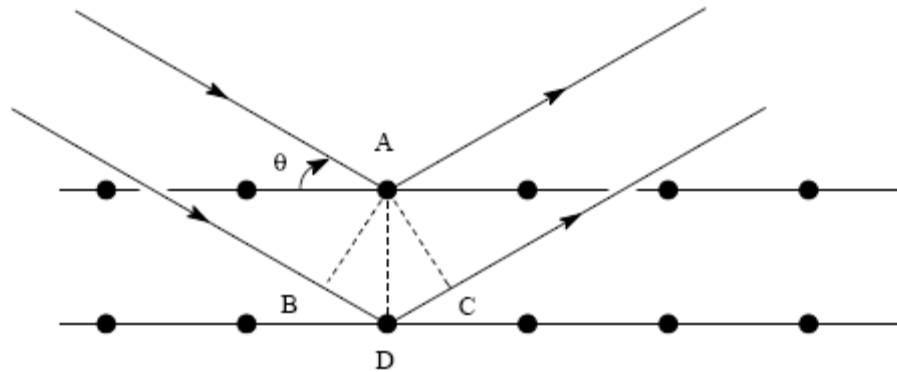


Figure (3.3) Cas de réflexion en loi de Bragg.

Un faisceau de lumière de longueur d'onde λ arrive sur une matière ordonnée caractérisée par la répétition périodique de plans atomiques distants d'une longueur d . Le faisceau arrivant sur un premier plan d'atomes est en partie réfléchi par ceux-ci, tandis qu'une autre partie poursuit son trajet en ligne droite. Le faisceau traversant le premier plan peut également se réfléchir en partie sur le plan d'atomes suivant, séparé du premier plan de réflexion par la distance d , et ainsi de suite...

On s'intéresse au faisceau réfléchi, résultant de la superposition des ondes réfléchies sur les différents plans successifs. Compte tenu du dessin, il est évident que l'onde qui se réfléchit sur un plan d'atome parcourt moins de distance que celle qui se réfléchit sur le plan suivant.

Par construction, nous avons $\overline{BAD} = \overline{DAC} = \theta$ (angles à côtes perpendiculaires)

La différence de marche entre les deux rayons est $\delta = BD + DC = d \sin \theta$, soit : $\delta = 2d \sin \theta$

Si θ est l'angle d'incidence

C'est ici qu'intervient le caractère ondulatoire de la lumière. Lorsque plusieurs ondes se rencontrent en un même point de l'espace, elles donnent lieu au phénomène d'interférence. En particulier pour observer un maximum de lumière (tache lumineuse intense) il faut que la différence de marche entre ces ondes soit un multiple entier de la longueur d'onde $\delta = m\lambda$. Ainsi, elles sont toutes en phase et se somment constructivement. La condition d'obtention d'un maximum d'intensité s'écrit donc:

$$2 \times d \times \sin \theta' = n' \times \lambda \quad (3.9)$$

que l'on appelle condition de diffraction de Bragg avec :

- d : distance inter-réticulaire, c'est-à-dire distance entre deux plans cristallographiques
- θ' : demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur)
- n' : ordre de diffraction (nombre entier)
- λ : longueur d'onde des rayons X.

Si $n'=1$ il s'agit d'une réflexion du premier ordre, si $n'=2$ au second ordre et ainsi de suite.

Davies et al [18] décrivent la formation des barres de sable qui ont un espacement égal à la demi longueur d'onde de la houle peuvent être formées par l'action d'onde partiellement stationnaire sur un fond meuble s'abattant sur une paroi oblique (réflexion). Un système ultrason pour suivre à la fois l'évolution du profil et celle de l'onde de surface. Les barres se forment avec une longueur satisfaisant à la condition de Bragg et les crêtes se situent en aval des ventres de l'onde de surface, cela conduit à une augmentation du coefficient de réflexion global de l'ensemble des barres au cours de leur croissance.

En résumé, **la barre est une grande ride** ayant des dimensions justifiant la loi de Bragg.

Lorsque la houle aborde sans déferler un obstacle à sa direction de propagation, la vitesse de chaque particule d'eau se réfléchit sur la paroi imperméable. Une onde réfléchie identique à l'onde incidente, mais de direction opposée, prend naissance : le clapotis, figure 3.4.

Au 1^{er} ordre d'approximation, on peut superposer les deux ondes. Les trajectoires des particules sont des droites, horizontales aux nœuds d'oscillation *N*, verticales aux ventres *V*.

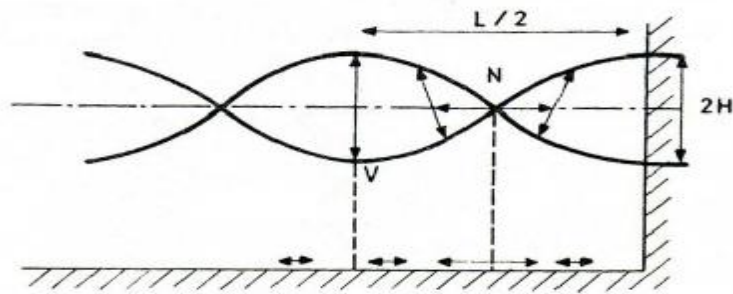


Figure (3.4) Réflexion de la houle : clapotis [01]

L'équation de la surface libre est :

$$\eta = H \cos 2\pi \frac{x}{L} \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad (3.10)$$

L'amplitude totale aux ventres est $2H$.

Au fond, la vitesse est :

$$u = \frac{2\pi H}{T \operatorname{sh} 2\pi \frac{d}{L}} \sin 2\pi \frac{t}{T} \sin 2\pi \frac{x_0}{L} \quad (3.11)$$

Elle est maximale au droit des nœuds d'oscillation et a une intensité double de celle de la houle simple ; la vitesse au fond est nulle sous le ventre d'oscillation.

Lorsque la paroi réfléchissante a un plan faisant un angle α avec l'horizontal, la réflexion n'est que partielle. Lorsque la cambrure est forte, une partie de l'énergie est détruite par déferlement. D'après Miche (1944) [01], la cambrure maximale d'une houle non déferlante se propageant sur un plan incliné est :

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \times \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} = 0,254 \times \sqrt{\alpha} \sin^2 \alpha \quad (3.12)$$

Les houles moins cambrées réfléchissent totalement ou partiellement ; le coefficient de réflexion est fonction de l'angle α du talus ; il est fonction de la cambrure au large, il diminue quand elle augmente ; enfin il dépend de la surface du talus.

$$r = \frac{k'}{\gamma_0} \frac{2\alpha \sin^2 \alpha}{\pi \pi} \quad (3.13)$$

Avec $k' = 0,9$ à 1 revêtement lisse en béton,

$k' = 0,7$ à $0,8$ revêtement en maçonnerie,

$k' = 0,6$ à $0,7$ enrochement en pierre,

$k' = 0,5$ massif de blocs d'enrochement.

Les rides n'ont qu'un faible effet sur la réflexion, cependant ces rides ont un grand effet sur la dissipation de l'énergie dans le canal : les facteurs de dissipation sont de l'ordre de 3 à 4 fois plus grand que leurs homologues pour un écoulement laminaire au dessus d'un fond lisse [03].

La formation des barres en monochromatique, dues au phénomène de Bragg, est lent ; ces barres sont planes et symétriques le long du canal et se propagent très lentement vers l'avant : direction de la houle.

La formation des barres dans le cas général forme dans un fond meuble un creux qui correspond à une érosion car la vitesse fait déterrer le sable de part et d'autres et forme un ventre correspondant à un engraissement (cumul de sable).

Dans les ouvrages portuaires, on doit veiller à ce que la houle soit absolument amortie et absorbée par la digue car l'érosion (du fait des creux des barres) pourrait causer l'effondrement de l'ouvrage par creusement au pied.

5. Intérêt de l'étude de la morphodynamique des fonds marins

Lorsqu'un écoulement de type houle se propage au-dessus d'un fond sableux, il se forme souvent des ondulations de fond ou rides. Ces rides affectent significativement la distribution de vitesse dans la couche limite de fond, le transport sédimentaire, l'atténuation de la hauteur de la houle lors de sa propagation par dissipation d'énergie au fond (frottement car fond rugueux) et la dispersion de polluants. La dissipation énergétique fera l'objet d'une étude expérimentale dans le chapitre cinq de l'étude expérimentale.

Les mouvements internes de la couche de sable peuvent également déterrer et faire remonter en surface des objets comme des déchets ou de mines enfouis à faible profondeur.

Parmi l'intérêt de l'étude de la morphodynamique du fond sédimentaire, on signalera le travail effectué par Marin [14] où il a comparé les modèles théoriques décrivant les phénomènes hydrodynamiques avec les résultats obtenus expérimentalement. Il en ressort que la fiabilité des modèles théoriques est remise en cause dans certains cas d'étude.

Ces études ont été réalisées à l'Université du Havre dans un canal à houle de 9m de long, 0,8m de large et 1m de haut. Le coefficient de réflexion est inférieur à 5% pour l'ensemble des tests.

Le modèle de Longuet-Higgins [14] pour le transport de masse généré par la houle au-dessus d'un fond lisse en régime laminaire, a été comparé avec le modèle expérimental : on constate la non concordance des résultats car il y a lieu de prendre en compte le paramètre de rugosité du fond marin, appelé la rugosité équivalente de Nikuradse k_n ($k_n = 25h^2 / L$) h étant la hauteur crête- creux des rides et L est longueur d'onde des rides.

La rugosité, c'est-à-dire les rides du fond marin qu'est rarement lisse en nature, provoque un écoulement souvent turbulent.

L'autre cas d'étude est le modèle de Davies et Villaret [14] pour l'estimation des courants de dérive dans la couche limite du fond qu'est comparé aux mesures du courant réalisées par vélocimétrie Doppler laser (VDL). On montre que l'estimation des profils verticaux de vitesse de dérive par le modèle Davies et Villaret [14] peut significativement être amélioré dans le cas où $1,3 < a / k_n < 2,9$ (a : amplitude orbitale des particules fluides juste à l'extérieur de la couche limite du fond), en modifiant la valeur du coefficient du modèle.

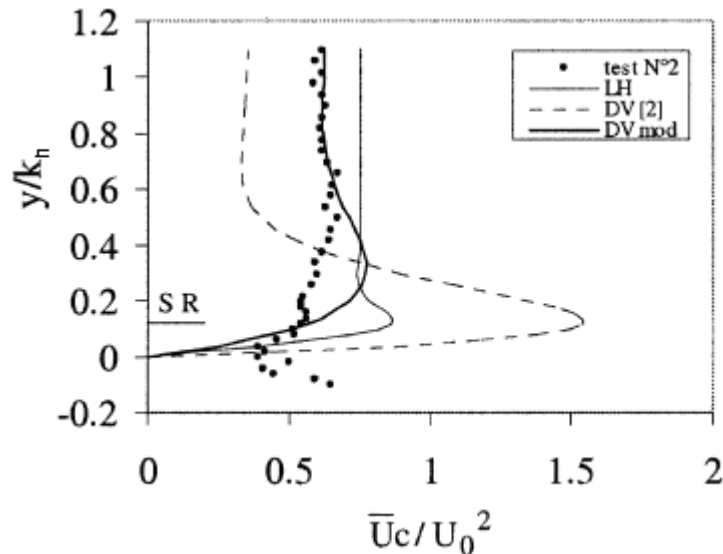


Figure (3.5) Profils verticaux théoriques et mesures de vitesses de dérives Eulériennes [11].

On note dans le bas du graphe 3.5 ci-dessus, la couche limite à ($y/k_n < 0,6$) (U étant vitesse verticale), une divergence entre le courant de dérive mesuré et le profil théorique de Davies modifié « *DV mod* » de Davies et Villaret. Ceci est probablement dû au fait que l’approche utilisée par ces auteurs ne permet pas une description détaillée de la formation et du détachement des structures tourbillonnaires au voisinage immédiat du fond.

Enfin ces travaux sont à compléter par des expériences avec un fond mobile afin d’être proche des conditions rencontrées sur site.

L’étude de la morphodynamique des rides par la méthode de traitement d’images nous amène à tirer une autre caractéristique des rides qu’est importante dans l’étude du transport sédimentaire : il s’agit de l’amplitude des rides ou bien la valeur de Nikuradse k_n ($k_n = 25h^2 / L$)

Cette valeur de k_n est importante à évaluer car elle influe direct sur le transport sédimentaire du fait qu’elle présente la rugosité au fond et par conséquent un frottement qui se fait et qui mène à la dissipation de l’énergie responsable du transport.

Nous avons établi une méthode simple et approximative dans l’estimation de k_n .

On introduit dans notre méthode approximative les valeurs caractéristiques d’un sol saturé, à savoir, l’angle de frottement ϕ et la cohésion C .

ϕ représente l’angle ou la pente naturelle du sol de sédiment.

Connaissant l'angle de frottement et la longueur de l'onde tirée de la méthode du traitement d'images (qu'on verra dans le chapitre 5), on peut estimer approximativement k_n par le schéma de la figure 3.6.

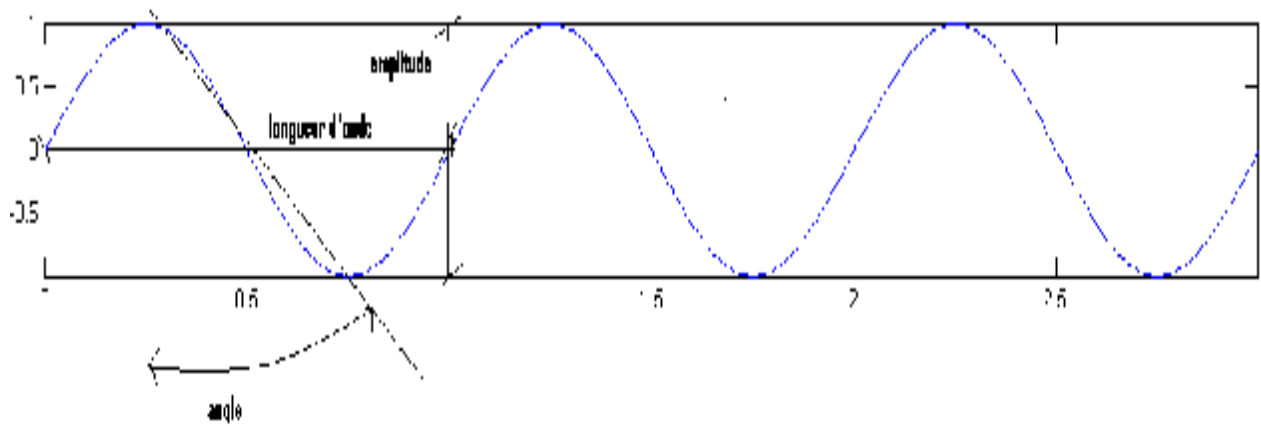


Figure (3.6) Représentation théorique des rides

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{0,5L} \Rightarrow a = \frac{L}{2} \operatorname{tg} \varphi \quad (3.14)$$

a : amplitude

L : longueur d'onde de la ride

Φ : angle de frottement

On peut dire que l'amplitude est égale à un pourcentage % de la longueur d'onde des rides.

L'angle de frottement ou l'angle de repos du sédiment est important à décrire, car il est l'angle pour laquelle des phénomènes tels que le glissement et l'érosion peuvent apparaître sous l'effet des forces de gravité ou forces des courants.

Elle varie avec la taille des sédiments, forme, densité ou nature.

La courbe de la figure (3.7) nous renseigne sur l'angle de repos en fonction de ces variations.

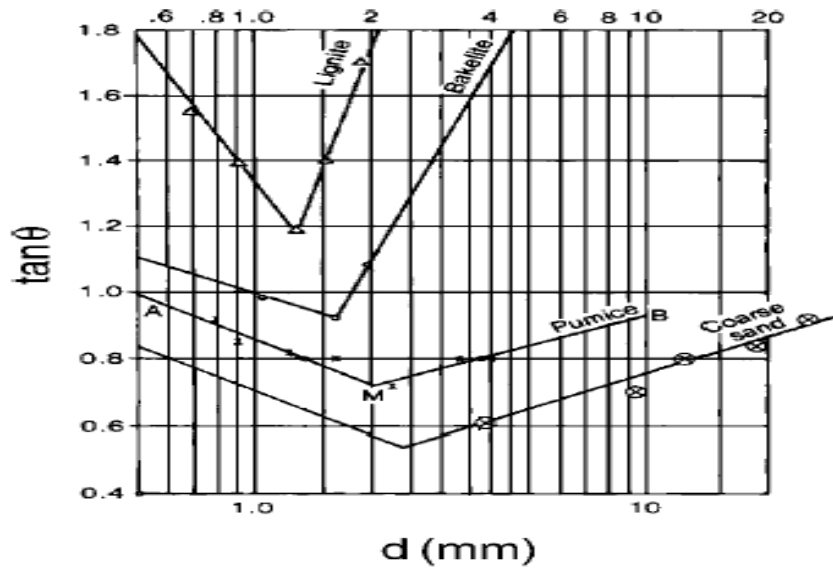


Figure (3.7) Angle de repos en fonction de la taille et nature des sédiments (Simon et Senturk ,1992)

Parmi les autres buts de l'étude des rides, on peut énumérer :

- Connaître la direction du rivage ou de la houle qu'est perpendiculaire aux rides, et ce dans le cas des marées basses où il y a un brouillard empêchant de voir loin.

- l'analogie avec les phénomènes électromagnétiques sur des modèles réduits [11].

- La valeur de la longueur des rides sous une profondeur connue d'eau peut nous renseigner sur la valeur de la vitesse de la houle qu'est proportionnelle à cette longueur d'onde des rides.

- La vitesse de la houle nous renseigne sur le transport des produits hydrocarbonés (marrée noire), et elle peut être un moyen pour se débarrasser des produits radioactifs qu'elle transporte dans les grandes profondeurs des océans où la dangerosité et l'effet de ces produits peut s'annuler et ne pas porter atteinte à la faune et la flore marine qu'est inexistante dans ces profondeurs.

- Le dérèglement climatique de ces dernières années, provoque souvent des perturbations marines (tsunami) qui engendre bien des dégâts sur les rivages et le transport marin, d'où une nécessité de prendre les précautions vis-à-vis des phénomènes hydro-sédimentaires qui pourraient être révélateurs de catastrophes.

6. Vitesse au contact du fond sédimentaire

6.1. Vélocimétrie à laser

La vitesse au fond, au contact des sédiments est importante à connaître car elle renseigne sur l'énergie et le taux de variation de la vitesse à cette interface.

Afin de déterminer cette vitesse, on utilisera la technique de vélocimétrie par laser.

La vitesse de la surface libre est régie par la commande du batteur et son contrôle et suivi peut être assurés par des méthodes utilisant les sondes électriques qui sont immergées dans de l'eau du canal et qui sont proportionnelles au voltage qui se rapporte à l'immersion et à la périodicité de la houle.

La vitesse de la surface libre diminue avec la profondeur et surtout au contact avec le sédiment.

On s'intéressera à la vitesse au fond et on décrira la technique de mesure élaborée dans le Laboratoire ONERA, France.

Le schéma suivant nous montre de quoi le velocimètre à laser est essentiellement composé.

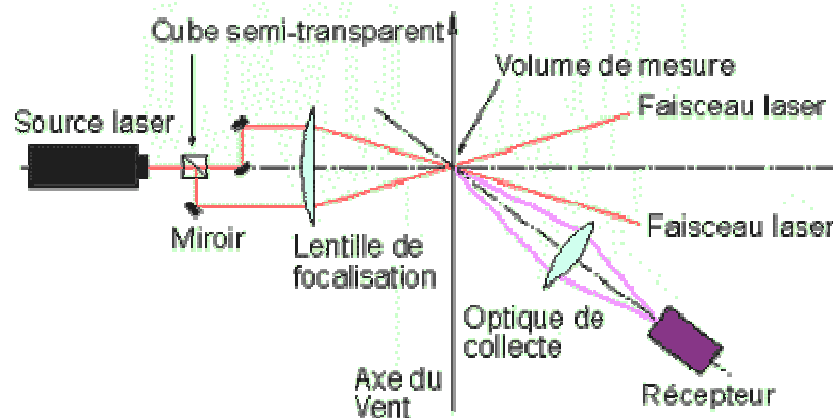


Figure (3.8) Technique du velocimètre par laser à frange.

On prend la source laser, et avec le cube semi-transparent, on divise le faisceau en deux parts égales. A l'aide de trois miroirs, repliez les deux faisceaux obtenus pour qu'ils soient parallèles. Placez une lentille convergente sur leur trajet. Ainsi, les faisceaux se croisent au point focal de la lentille comme le montre la figure 3.8.

Si on examine la zone de recouvrement des faisceaux, on verra un réseau de franges d'interférence. C'est une succession de plans lumineux parallèles et équidistants. Cette zone est appelée volume de mesure.

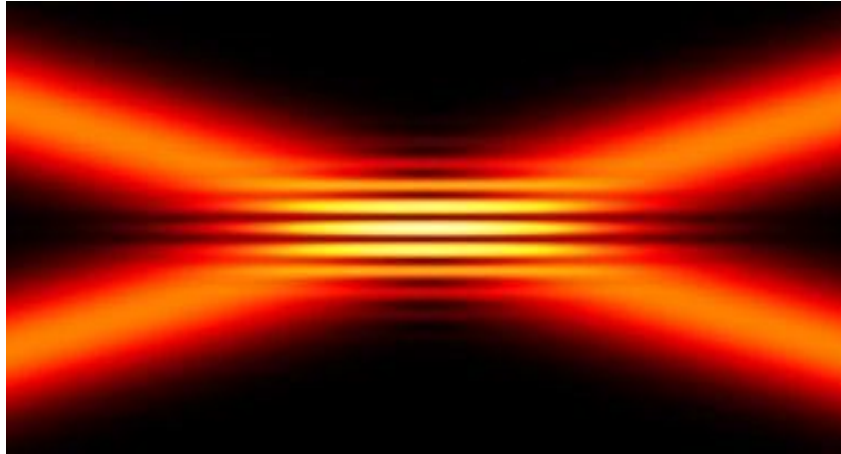


Figure (3.9) Phénomène de l'interférence.

Quand un grain de poussière ou une minuscule goutte d'huile, entraîné par un courant de fluide, traverse le volume de mesure, il est alors possible de le voir scintiller au passage des plans lumineux. Les plans étant parallèles et équidistants, la cadence du scintillement est proportionnelle à la vitesse de la particule.

Avec la seconde lentille, on récupère l'information (incidence de la lumière) que la photodiode reçoit en la transformant à un courant électrique, que l'oscilloscope et l'ordinateur nous présentent un diagramme comportant plusieurs pics correspondant aux différents passages de la particule.

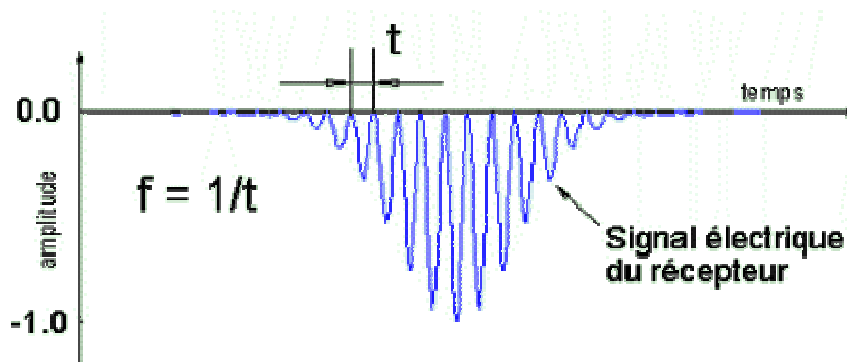


Figure (3.10) Diagramme de fréquence.

La distance entre les franges d'interférence est supposée connue (d), on pourra alors

écrire $t = \frac{d}{v} \Rightarrow f = \frac{v}{d}$.

Ainsi la vitesse est déterminée.

6.2. Vitesse à l'interface houle - sédiment

Dans le cas de houle agissant sur un fond de sédiment cohésif ou non, il se développe au fond une couche limite épaisse où les pertes d'énergie par frottement sont plus importantes que dans l'eau. Un mouvement analogue à celui de l'eau claire se fait sentir dans la masse de sédiment, mais avec une amplitude plus faible et un déphasage variant avec la viscosité et la profondeur dans le fond. Figure 3.11.

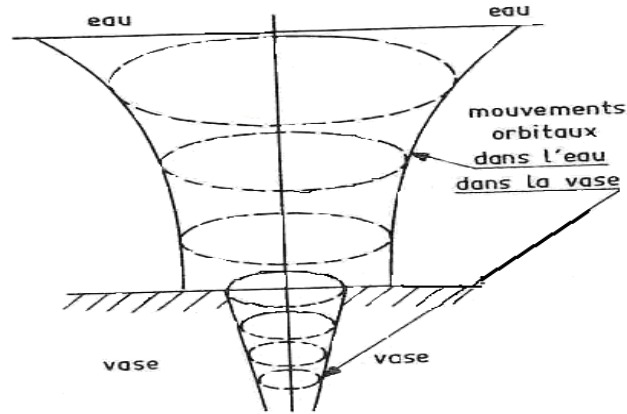


Figure (3.11) Mouvement à l'interface [01].

Près du fond, existe une couche d'épaisseur δ où l'écoulement est sous l'influence prépondérante de la viscosité.

$$\frac{u_* \delta}{\nu} = 11,6 \quad (3.15)$$

u_* étant la vitesse de cisaillement.

Si la période T est assez courte, la couche limite laminaire ne peut pas se former complètement. Dans ce cas, l'écoulement laminaire doit assurer la transition entre le fond où la vitesse est nulle et le fluide non perturbé à la distance δ où la vitesse varie alternativement avec le temps t .

$$u = U_0 \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (3.16)$$

$$U_0 = \frac{\pi H}{Tsh2\pi \frac{d}{L}} \quad (3.17)$$

H et L désignent la hauteur et la longueur d'onde de la houle.

Le digramme de la vitesse verticale u est d'une forme telle que il s'annule brusquement au fond. Figure 3.12.

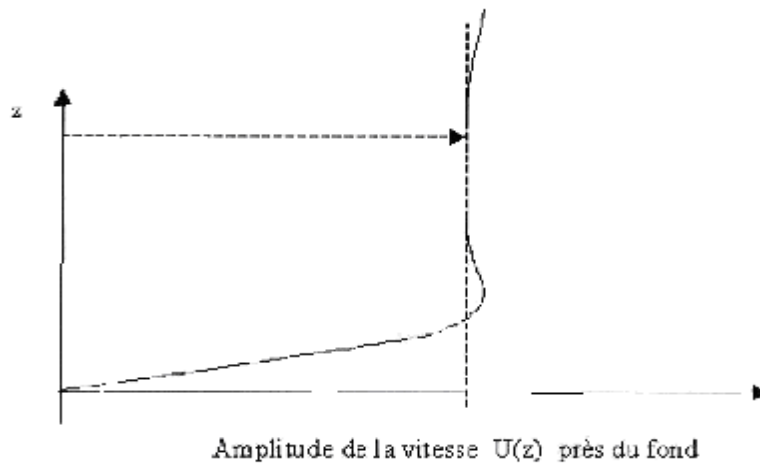


Figure (3.12) Profil de la vitesse verticale

Il existe d'autres relations de la vitesse verticale, telles que la relation d'Eagleson décrite dans l'ouvrage de Bonnefille (Cours d'Hydraulique Maritime, page 82) [01].

7. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons abordé la littérature des paramètres qui contrôlent la géométrie des ondulations qui sont responsables de la dissipation au fond par frottement et cela est calculable par le vélocimètre à laser qui donne une bonne mesure de la vitesse au fond.

L'étude de la morphodynamique mène à optimiser les formules de calcul du transport sédimentaire comme cela a été justifié par Marin [14] par l'intérêt qu'il donne aux résultats expérimentaux et le paramètre de Nikuradsé qui est révélateur de la rugosité au fond qu'il faut prendre au compte.

Il est intéressant de prendre en considération la morphodynamique couplée des rides et barres au même temps car cela a un effet sur le frottement au fond.

Quand les ondulations se forment, elles subissent un transport vers le sens de la houle soit par charriage ou suspension.

Chapitre 4

Modes de transport sédimentaire

1. Introduction :

Afin de maintenir les profondeurs navigables dans les chenaux d'accès, les ports doivent draguer les fonds en permanence.

Dans le but de mieux comprendre les mouvements sédimentaires, l'évolution des dépôts et pour l'optimisation des dragages, il s'avère important de mettre sous la lumière les différents modes de transport des sédiments et les solutions envisageables pour les dégâts importants qu'ils pourraient causer (ensablement et érosion).

2. Modes de transport sédimentaire

Le mouvement des grains se décrit selon l'intensité de l'écoulement qui les met en mouvement.

En deçà d'un seuil, l'écoulement est trop faible pour faire bouger les sédiments, puis le débit augmente, quelques grains commencent à bouger par roulement et saltation. Ce mouvement s'étend ensuite à l'ensemble des sédiments de surface.

Dans le cas de sédiments grossiers, la mobilisation nécessite des conditions hydrauliques extrêmes, alors qu'elle est courante dans le cas de lits de sable.

Le processus de transport en charriage s'effectue au proche du fond, et le transport en suspension s'effectue dans la colonne d'eau.

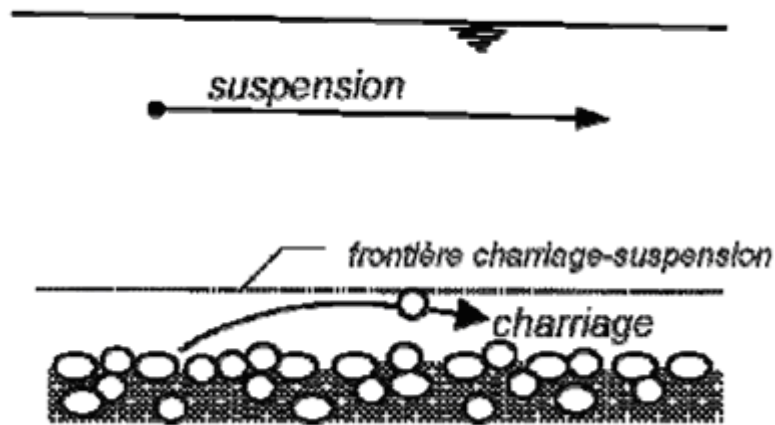


Figure (4.1) Distinction entre les modes de transport par charriage et suspension [69]

Les phénomènes sédimentologiques du transport sédimentaire sont nécessaires pour l'emplacement de la passe d'entrée d'un port car l'équilibre sédimentaire est menacé par deux phénomènes de transport :

- Le transport dans le sens transversal à la plage, avec le risque de perte de matériaux légers vers le large. Les mouvements significatifs dans le profil font suite aux fortes tempêtes. Il s'agit de variations à court terme du littoral, avec différents remaniements au cours d'une année.

- Le transport dans le sens parallèle au trait de côte. Ce sont les transits longitudinaux engendrés par les courants littoraux de houle qui font suite au déferlement des houles obliques par rapport au trait de côte. Ces mouvements sont généralement à long terme. Par tempête, le débit de matériaux transportés dans un sens ou dans l'autre est plus important que par une houle courante, mais les durées des tempêtes sont faibles, si bien qu'au bilan global sur plusieurs années, ce sont généralement les petites houles mais de longue durée qui contribuent au mouvement des matériaux dans le sens parallèle à la plage.

La granulométrie du fond marin et l'intensité de l'écoulement favorisent le mode de transport : charriage ou expansion (figure 4.2).

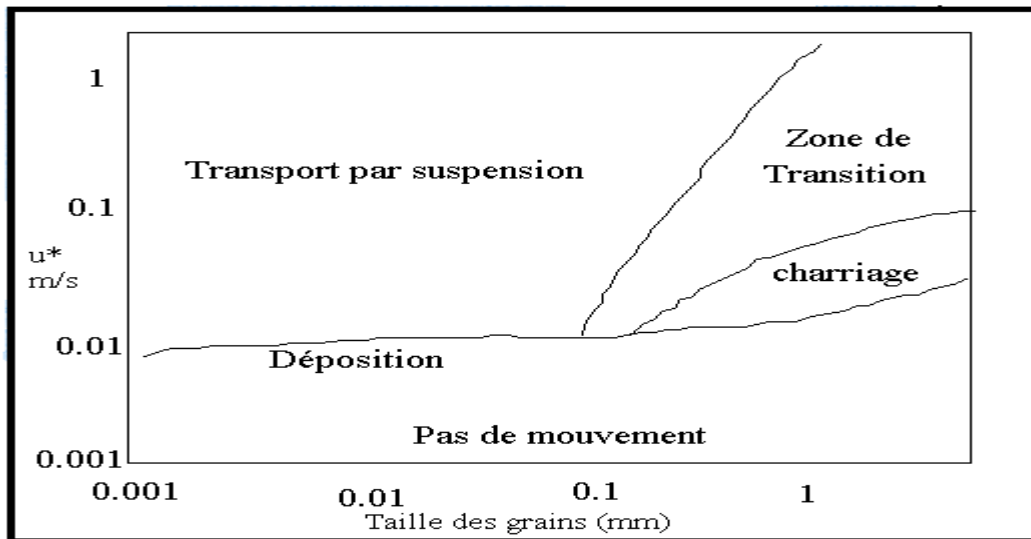


Figure (4.2) Modes de transport.

Le transit littoral a été estimé à partir des formules de la littérature marine. Nous avons essentiellement exploité la formule de Bijker [03], laquelle permet d'intégrer la taille des sédiments et de répartir les débits de transit littoraux sur le profil de la plage.

L'utilisation de telles formules ne conduit qu'à des estimations souvent grossières des débits.

Passaga (1967) [45] a proposé afin de définir le mode de mise en place du sédiment une méthode d'interprétation des données granulométriques qui utilise la valeur du D_{90} et la médiane (D_{50}).

Nous prenons l'exemple de l'étude granulométrique de la **baie des Pins Maritimes d'Alger**.

Le diagramme obtenu montre que la majorité des points se situent dans les branches *PQ* et *QR*. Figure 4.3.

Le segment *PQ* caractérise les sédiments dont les grains auraient été transportés par roulement à la surface de la suspension gradée.

Ce type de transport se fait généralement dans des zones de hautes énergies où le matériel sédimentaire présent dans le secteur est en perpétuel remaniement. Le dépôt se fait pendant les périodes calmes par perte de charge.

Cette branche englobe la majorité des échantillons prélevés sur les fonds sujets au déferlement.

Le segment *QR* englobe les sédiments dont les grains sont transportés en suspension gradée. Ces sédiments se situent dans la zone de faible énergie qui se situe au large de la barre de déferlement.

SR représente le dépôt de suspension homogène.

PO représente le dépôt de roulement sur le fond.

Cette classification, bien qu'établie pour les applications d'hydraulique continentale (fleuve, rivière, ...), est utilisée en dynamique sédimentaire marine avec précaution.

Elle permet essentiellement à établir la relation liant le diamètre du grain au degré d'énergie susceptible de le déplacer.

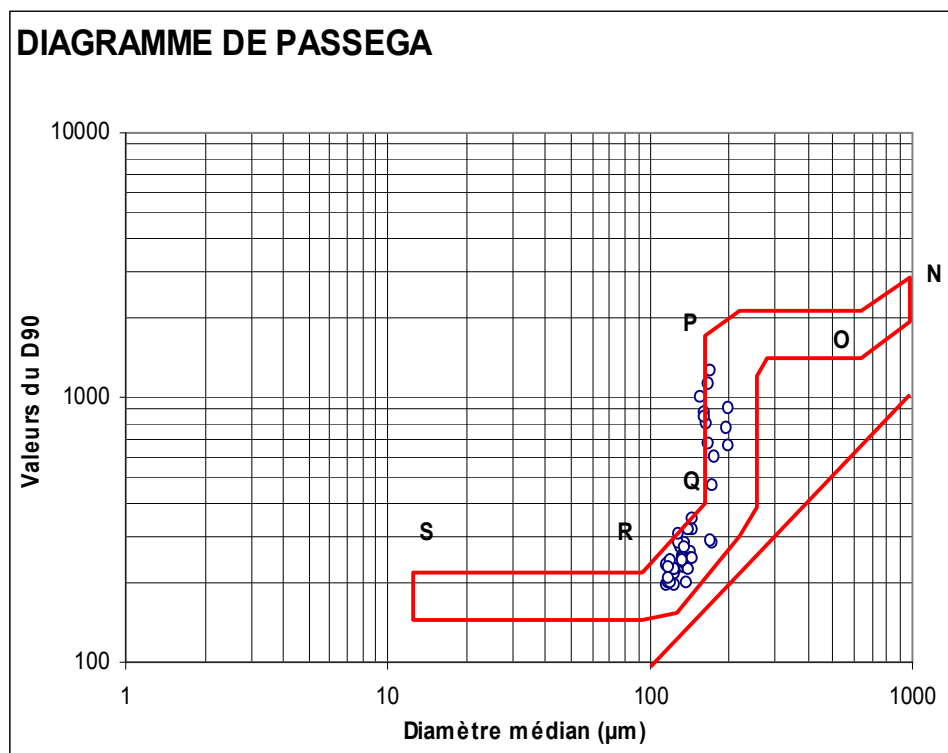


Figure (4.3) Diagramme de Passega appliqué à la **baie d'Alger**

A titre d'information, le débit résultant global de la baie d'Alger est d'environ 45 000 m³/an.

2.1. Calcul du transit littoral par la formule de Bijker

Le modèle de Bijker considère que la houle rend les sédiments mobiles et que le courant littoral, généré par cette même houle, les transporte. Il existe deux modes de transport, l'un par

charriage, l'autre par suspension. L'approche de Bijker va consister à déterminer ces débits par tranche de largeur unité du fond marin.

Le transport sédimentaire Q est exprimé comme suit :

$$Q = Q_b + Q_s \quad (4.1)$$

Q_b : transport par charriage en m^3/s ;

Q_s : transport par suspension en m^3/s .

2.1.1. Transport par charriage est évalué par la formule de Frijling [03] (1952) qui fait la synthèse des formules de débit solide de Kalinske, Einstein, Meyer-Peter et Müller :

$$Q_b = 5D \left(\frac{\mu \tau_c}{\rho} \right)^{1/2} \exp \left(-0.27 \Delta D \frac{\rho g}{\mu \tau} \right) \quad (2.2)$$

D : diamètre des sédiments en mètre

μ : 'ripple coefficient' indique la part de la contrainte totale au fond utilisable pour transporter des sédiments

τ_c : contrainte au fond due au courant seul i.e. $\rho g V^2 / C^2$

τ : contrainte au fond provenant de l'action simultanée des vagues et des courants en $kg/m^2/s^2$

Δ : densité relative apparente

ρ : masse volumique en kg/m^3

Le 'ripple coefficient' μ s'écrit :

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{1.5} \quad (4.3)$$

C : coefficient de Chezy i.e. $1.81 \log_{10}(1.2h/\varepsilon)$

C_{90} : résistance due aux gros grains de diamètre égal à D_{90} (premier refus 10 % de la courbe granulométrique) i.e. $1.81 \log_{10}(1.2h/D_{90})$

h : profondeur locale

ε : moitié de la hauteur des rides (de l'ordre du diamètre des cailloux s'ils sont grossiers).

La contrainte résultante (force tractrice due au courant littoral augmentée de la force tractrice due à la houle) s'écrit :

$$\tau = \left[1 + \frac{\left(\xi \frac{u_0}{v} \right)^2}{2} \right] \tau_c \quad (4.4)$$

u_0 : amplitude de la vitesse orbitale au fond en m/s i.e. $u_0 = \left(\frac{\pi H}{T} \right) / \operatorname{sh} \left(\frac{2\pi h}{L} \right)$

H : hauteur spécifique de la vague

L : longueur d'onde

v : courant littoral en m/s

ξ : coefficient empirique = $0.45\kappa C / \sqrt{g}$

κ : constante de Von Karman = 0.4

T : période

2.1.2. Transport par suspension Q_s : Les rides avancent doucement vers l'avant par suspension ; ce transport est évalué comme suit, en partant de l'hypothèse que la répartition des vitesses horizontales dans l'écoulement suit une loi logarithmique au-dessus d'un fond rugueux où la hauteur des rugosités est supposée être égale à la moitié des hauteurs des rides :

$$Q_s = R Q_b \left[I_1 \ln(3.3h/\varepsilon) + I_2 \right] \quad (4.5)$$

$$R = 0.394 (\varepsilon/h)^{\beta-1} (1-\varepsilon/h)^{-\beta} \quad (4.6)$$

$$\beta = \frac{W}{\kappa \sqrt{\tau/\rho}} \quad \text{où } W: \text{ vitesse de chute des sédiments en } m/s$$

$$I_1 = \int_{\varepsilon/h}^1 [(1-x)x]^\beta dx \quad (4.7)$$

$$I_2 = \int_{\varepsilon/h}^1 [(1-x)x]^\beta \ln(x) dx \quad (4.8)$$

3. Début d'entraînement des sédiments

Le mouvement de sable induit par les vagues avant qu'elles ne déferlent est estimé de manière à évaluer à partir de quelle profondeur le sable est réellement déplacé ou mis en suspension. L'approche est fondée sur les paramètres suivants :

- Comparaison du paramètre $\theta_w = \frac{\tau_w}{g(\rho_s - \rho)d}$ à $\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d}$ avec
 - τ_w et τ_{cr} contraintes tangentielles au fond associées aux vagues dépendant des caractéristiques du sédiment
 - g accélération de la gravité ($=9,81 \text{ m.s}^{-2}$)
 - ρ_s et ρ sont les masses volumiques du sable et de l'eau de mer (2.65 t/m^3 and 1.025 t/m^3)
 - d est la taille des grains
- Comparaison du paramètre $u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ à la vitesse de chute w_s d'un grain isolé.

A partir de la connaissance de ces paramètres, les hypothèses suivantes peuvent être avancées :

- Si $\theta_w < \theta_{cr}$, le fond est immobile
- Si $\theta_{cr} < \theta_w < 0.8$, le fond est mobile et ridé
- Si $\theta_w > 0.8$, le fond est mobile et remanié
- Si $u^* < w_s$, il n'y a pas de suspension
- Si $u^* > w_s$, il y a suspension des sédiments

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w u_w^2 \quad (4.9)$$

$$f_w = \max(f_{wr}, f_{ws}) \quad (4.10)$$

$$f_{wr} = 1.39 \left(\frac{A}{z_0} \right)^{-0.52}$$

$$f_{ws} = b (R_w)^{-a}$$

$$A = \frac{u_w}{\omega}, \quad R_w = \frac{A u_w}{\nu}, \quad z_0 = \frac{d}{12}$$

si $R_w < 5.10^5$, $b=2$ et $a=0.5$

si $R_w > 5.10^5$, $b=0.052$ et $a=0.187$

u_w : vitesse orbitale au fond associée à la vague de hauteur H_{rms}

$$\text{Vitesse de chute } w_s = \frac{v}{d} \left(\sqrt{10.36^2 - 1.049D^{*3}} - 10.36 \right) \quad (4.11)$$

$$D^* = d \left[\frac{g}{v^2} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.12)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D^*} + 0.055 \left(1 - \exp(-0.02D^*) \right) \quad (4.13)$$

La variation spatiale des taux de transport entraîne des phénomènes d'érosion ou d'accrétion, avec des conséquences importantes pour les ouvrages maritimes et la gestion du littoral. Il est nécessaire de construire des outils de modélisation permettant de prédire précisément les taux de transport et les évolutions morphodynamiques qui en résultent.

Il existe des modèles du système hydro-informatique tels que TELEMAC [12], SISYPHE [26], MIKE 21 [26], qui prennent en compte l'effet de la houle sur la dynamique sédimentaire par une modélisation intégrée de forçage hydraulique (houle, courant de houles et de marée) et du transport sédimentaire.

4. Dispositions vis-à-vis le transport sédimentaire

La houle est une énergie gratuite, non polluante et renouvelable ; elle est aussi destructrice et disgracieuse pour les ouvrages et les rivages.

L'ensablement des ports est pénalisant sur les tonnages des bateaux (pétroliers, fret) et par conséquent l'économie basée sur l'importation et l'exportation est mise en danger.

L'érosion des côtes de nature calcaire progresse chaque jour (fréquent sur les côtes anglaises).

Pour une meilleure gestion maritime, il y a lieu de prendre des dispositions.

L'ensablement des ports doit être surveillé afin de maintenir des profondeurs navigables dans les chenaux d'accès, alors des programmes d'opérations de prévention et d'entretien périodiques tels que le dragage qui consiste à terrasser sous l'eau au moyen d'un engin flottant, ils comprennent les trois phases classiques d'une opération de terrassement (extraction, transport et mise en dépôt (terre plein)).

Le dragage permet d'avoir un tirant d'eau acceptable et aussi l'amélioration des chenaux, les avant-ports et bassins.

Les engins mis en disposition sont :

- drague à bennes preneuses
- drague à cuiller
- drague à aspiratrice

Les ouvrages de protection des côtes : on en distingue quatre types.

4.1. Ouvrages parallèles au rivage : Ses ouvrages sont placés sur le haut de la plage et servent à protéger les côtes, et agissent soit par leur poids ou soit par ce qu'ils détruisent une partie de l'énergie de la houle avant qu'elle aborde le rivage. Ils fixent la ligne de rivage en formant un barrage aux courants normaux à la côte susceptibles d'éroder le rivage, et le sédiment est stoppé. Figure 4.4.

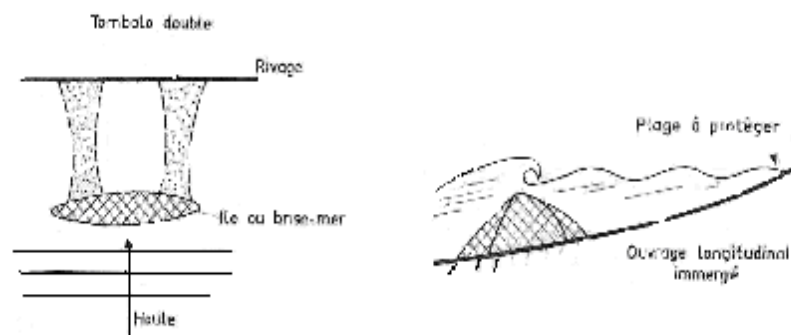


Figure (4.4) Ouvrages parallèles.

4.2. Ouvrages perpendiculaires au rivage (épis) : Ils sont disposés en série avec un espacement variant entre 1,5 à 2 fois leur longueur. Si il y a une houle dominante, il y a intérêt d'orienter les épis normalement à cette direction de façon à éviter les tourbillonnements.

Ces ouvrages ont pour but de réduire le transport par jet de rive ou le transport par rouleaux de déferlement. Comme les ouvrages perpendiculaires aux rivages arrêtent le transport sédimentaire, ils produisent un engraissement d'une côte et une érosion de l'autre. Figure 4.5.

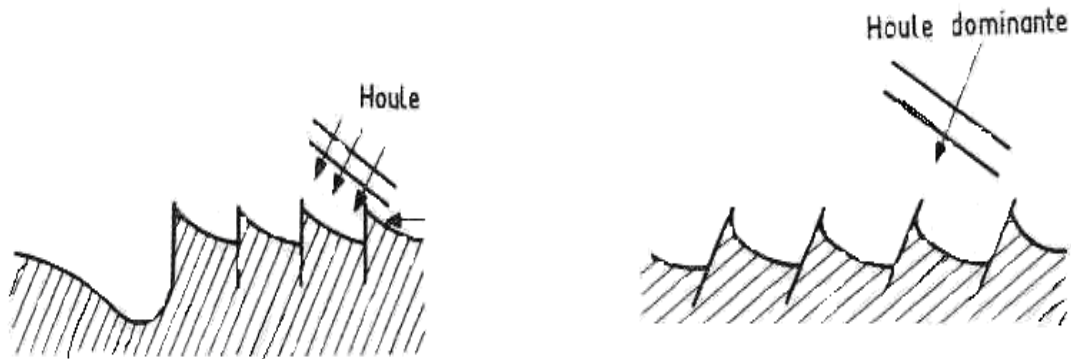


Figure (4.5) Ouvrages perpendiculaires.

4.3. Dispositifs anti-érosion

Comment on l'a vu dans le chapitre précédent, si la houle réfléchit, il se produit un clapotis d'où augmentation de l'agitation au fond (formation de barres avec des creux et ventres). Donc, il y a formation d'érosion de sable et leur transport par les différents courants de houle. La côte du fait de l'érosion (creux de barre) peut alors disparaître et l'ouvrage affouillé se déchausse ou bascule dans le fossé creusé dans le sable.

La protection contre les affouillements est obtenue en disposant des rideaux de palplanches ou un massif palplanche. Figure 4.6.

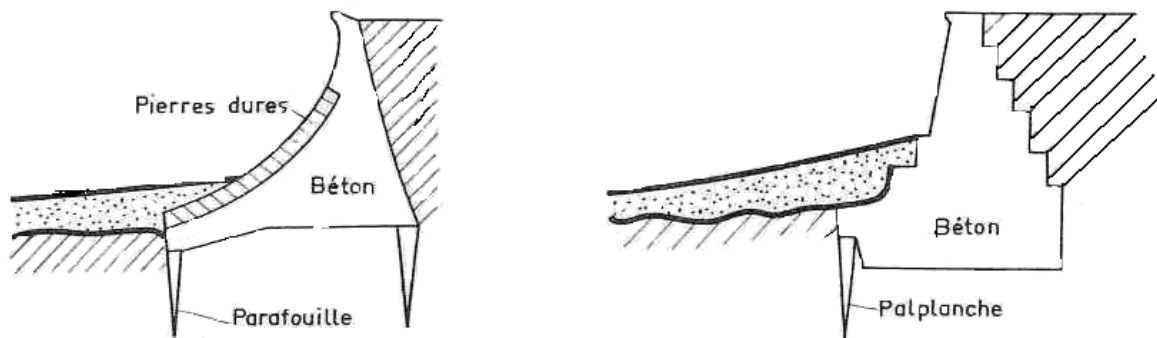


Figure (4.6) Digues anti-érosion.

Dans le cas des digues verticales, la houle est arrêtée par réflexion (contrairement à la digue à talus où la houle est arrêtée par destruction de son énergie).

Il faut renoncer à édifier des jetées verticales sur des fonds meubles afin d'éviter l'érosion (à préférer un fond rocheux).

Il existe d'autres moyens de protection plus modernes et qui répondent bien aux normes de protection des rivages ; il s'agit des géosytèmes ou gétexiles qui sont des nappes de polèrène très résistant et qui offrent des caractéristiques mécaniques meilleurs.

4.4. Géosystems sont des géotextiles encapsulant des sols qui peuvent remplacer des enrochements sous forme d'éléments de construction en structure d'ingénierie marine et hydraulique. Les géosystems ont tendance à être plus stables hydrauliquement et géotechniquement du fait de leur poids unitaire plus élevé avec des ratios de largeur plus important que la hauteur et avec des zones de contact avec les éléments adjacents bien meilleurs. Les enrochements ne sont pas toujours disponibles de manière économique du fait des coûts de transport élevés pour les travaux dans les cours d'eau, lacs, côtes ou les constructions sous-marines. Parfois, l'utilisation des enrochements n'est pas souhaitable du fait des risques importants qu'ils peuvent provoquer en cas de choc avec les bateaux alors que les géosystems génèrent un contact non agressif. Les géosystems offrent souvent des solutions compétitives pour l'ingénierie marine et hydraulique permettant d'utiliser des matériaux plus fins en tant qu'éléments de remblai pour la construction de structure en application marine et hydraulique.

Il existe trois sortes de géosystems, figure 4.7 :

- 1- Géotube : est un long tube en géotextile, rempli hydrauliquement avec des matériaux utilisés pour la construction d'ouvrages marins et hydrauliques. Géotube est fabriqué sur mesure selon les besoins de l'ouvrage et il est disponible en dimensions et longueurs variables pour correspondre aux spécifications de l'ouvrage et de l'étude. Il est idéal pour une installation à sec ou à des profondeurs d'eau n'excédant pas 5 mètres. Le volume varie en général de 2 à plus de 10 m³ par mètre linéaire de Géotube.
- 2- Géocontainer : est un sac géotextile très large rempli avec des matériaux. Un hydro clap ou chaland à clapet est utilisé pour la mise en forme, le transport, et l'installation de Géocontainer. Géocontainer est adapté à la taille de la barge. Il est généralement installé à des profondeurs d'eau supérieure à 5 mètres. Chaque élément peut contenir de 100 à 1000 m³ de matériaux.
- 3- Géobag : est un sac en géotextile destiné à être rempli de matériaux utilisés pour la construction de structures marines et hydrauliques. Géobag est fabriqué sur mesure et sous différentes formes pour s'adapter aux spécifications de l'ouvrage et de l'étude. Il est idéal en pose à sec ou sous eau à toute profondeur. Chaque élément peut avoir une contenance de 1 à plus de 10 m³ de matériaux.

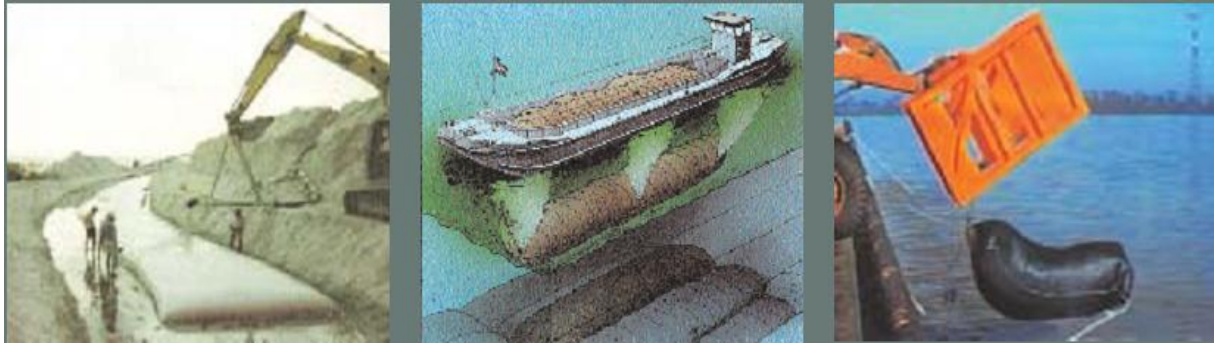


Figure (4.7) Gétube, Géocontainer et Géobag

Les géosystème présente des avantages tels que :

- Le géotube joue le rôle de digue de confinement pour stopper l'érosion d'une île.
- Une cadence de 1800 m³ par heure peut être éteinte dans la construction d'une digue, d'où un gain de temps énorme.
- La jetée a été construite sur une hauteur de 4 mètres, utilisant une structure empilée de 1-2-3 de Géotube.
- Le sable de la plage a été utilisé pour remplir Géotube par pompage.

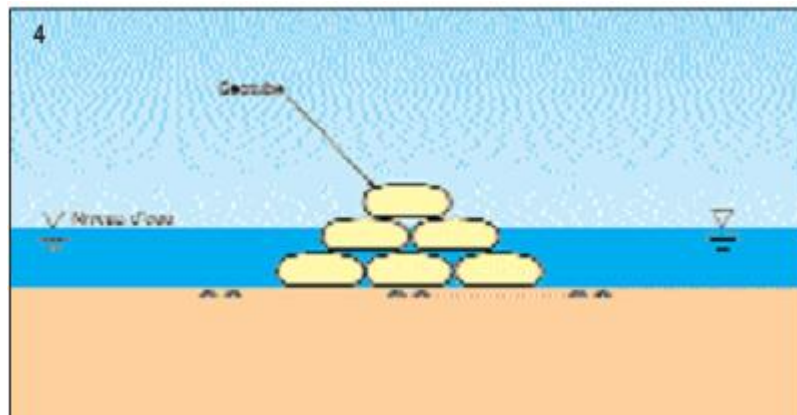


Figure (4.8) Digue en géotube

- Eventuellement, il est conseillé de construire une brise-lame immergée avec Géotube à environ 300 mètres pour créer des plages artificielles.
- Géotube pour un revêtement de littoral pour reconstituer une berge très érodée.

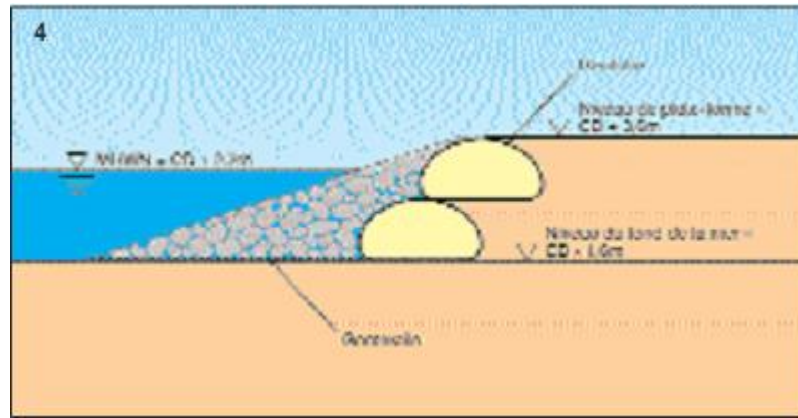


Figure (4.9) Reconstruction d'une berge érodée par des Géotubes

5. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les différents modes de transports sédimentaires et les différents ouvrages qui font face aux phénomènes hydrodynamiques désastreux.

Compte tenu des quantités énormes des matériaux dragués dans les ports ensablés, il est judicieux de signaler l'importance des géosystèmes dans ce cas, car la disponibilité des

matériaux dragués et la facilité de mise en œuvre des ces derniers (remplissage des tubes géosystèmes) sont des atouts énormes : on propose des digues en géosystèmes dans les ports présentant une tendance à l'ensablement.

L'évolution des fonds sédimentaires doit être simulée avec un degré de certitude acceptable. D'où des études numériques et expérimentales de la morphodynamique sont indispensable pour une meilleure gestion du littoral et les ouvrages maritimes.

Dans le chapitre qui suit, notre étude expérimentale s'est tenue dans le but de répondre à quelques soucis de la morphodynamique.

Chapitre 5

Etude expérimentale de l'interaction houle - sédiment

1. Introduction

Notre étude s'est tenue au Laboratoire Mécanique, Physique et Géosciences du Havre, de février au septembre 2003.

Dans notre étude expérimentale, nous avons représenté sous un modèle réduit le milieu naturel et le fond marin par un canal à houle.

La houle est donnée par une formulation de la houle de **Stokes du second ordre** (voir figure 2.3 nuage de points rouges) qui sera responsable de la formation des rides et du transport sédimentaire par suspension.

Le réseau des ondulations sédimentaires est constitué de rides et de barres ; leur suivi et contrôle sont réalisés par une approche expérimentale constituée d'un canal à houle contenant un lit de sédiment en guise de milieu granulaire, surmonté d'une hauteur d'eau au repos de 27 cm (eau peu profonde).

Le batteur du canal à houle génère des houles qui induiront le remaniement du fond sédimentaire ; ces houles vont être par la suite réfléchies partiellement à 5 % par la plage d'amortissement.

Les images des ondulations prises par caméra seront traitées numériquement.

On présentera dans ce chapitre des notions essentielles pour la compréhension de la technique de traitement d'image, essentiellement la lumière et la FFT.

Notre étude expérimentale est subdivisée en deux étapes :

- Interaction de houle monochromatique avec milieu granulaire
- Interaction de houle bichromatique avec milieu granulaire

Une comparaison de ces résultats a été considérée afin d'étudier les phénomènes hydrodynamiques et de visualiser qu'elle est l'apport qui résulte quand on se rapproche de la houle réelle (houle bichromatique) et les conditions du milieu naturel (cas de réflexion).

2. Dispositif expérimental et les conditions des essais de l'interaction houle - sédiment

Les mesures de notre essai sont basées sur une approche expérimentale ; le canal à houle est réalisé au Laboratoire Mécanique, Physique et Géoscience du Havre.

L'approche expérimentale repose sur des observations et des mesures in situ.

Les équipements se perfectionnent du jour au jour et offrent un large champ d'investigation : relevé de vitesse à divers hauteurs dans la colonne d'eau (courantomètre électronique, VLD ou VLF Vélocimétrie à Laser à Frange ou Doppler), relevés de la cote de la surface libre (marégraphe, bouées, radar, télédétection), mesure de la turbidité, sédiment mis en suspension, etc.

Ces moyens d'investigation sont utiles à la compréhension générale des écoulements côtiers et des processus physiques induisant les courants et le transport sédimentaire.

Modèle réduit ou maquettes qui reproduisent à petite échelle la zone d'étude. Ils sont utilisés notamment lorsque la physique est complexe et les apports de chaque processus sont difficilement appréciables et quantifiables pour permettre d'en négliger certains devant d'autres. En fait, ils se ramènent à une étude expérimentale d'un petit domaine relié aux grandeurs réelles par des lois de similitude telles que **Reynolds** et **Froude** [22].

Ils permettent, outre l'étude fondamentale des processus mis en jeu, de tester des scénarii d'aménagement et d'appréhender la réponse du système à toute modification du milieu.

La reproduction sur modèle à échelle réduite d'un phénomène hydrodynamique requiert l'égalité de certains nombres adimensionnels caractéristiques entre le cas réel et le modèle.

Il est donc nécessaire d'appliquer un traitement adimensionnel aux équations locales du mouvement du fluide afin de définir les paramètres de similitudes.

D'où l'on obtient les nombres caractéristiques de Reynolds (Re) et de Froude (Fr) :

$$Re = \frac{V_0 L}{\nu} = \rho \frac{V_0 L}{\mu} \quad Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gL}}$$

Avec :
 V_0 : vitesse caractéristique (vitesse orbitale, célérité, etc.),
 g : accélération de la pesanteur,
 L : dimension caractéristique (niveau d'eau, hauteur de houle, etc.).
 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$: viscosité cinématique (poiseuille = 1 kg/m s)

La similitude adoptée en génie maritime doit laisser invariant le nombre de Froude.

Les rapports de réduction des principales grandeurs caractérisant les phénomènes intervenant dans ces essais se déduisent de la relation d'invariance du nombre de Froude :

| Grandeur | Formule |
|----------|---------|
|----------|---------|

| | |
|----------|----------------------------------|
| Longueur | $L_{réelle}=E.L_{modèle}$ |
| Surface | $S_{réelle}=E^2.S_{modèle}$ |
| Vitesse | $V_{réelle}=\sqrt{E}.V_{modèle}$ |
| Temps | $T_{réelle}=\sqrt{E}.T_{modèle}$ |
| Volume | $V_{réelle}=E^3.V_{modèle}$ |

Tableau 5.1 *Similitude des paramètres*

Notre dispositif expérimental est composé de :

2.1. Canal à houle : Le canal à houle à paroi de verre permet de réaliser des films rideaux pour suivre la formation et l'évolution d'un fond de sédiments initialement plat.

Le canal contient un batteur ou générateur de houle situé au bout du canal, et à l'autre bout il y a une plage d'amortissement en guise de digue ou de quai. Le canal est équipé du matériel d'acquisition suivant :

- Sondes électriques immergées dans l'eau, elles libèrent proportionnellement à la profondeur d'eau les amplitudes des houles
- Caméra bâton aussi immergée dans l'eau et reliée à l'ordinateur par une interface ; elle permet la prise d'images des rides

La longueur totale du canal est de 5,4 m, sa largeur 0,32 m et sa hauteur de 0,36 m. on fera étaler un lit de sédiment au fond. Figure 5.1.

2.2. Générateur de vagues : C'est un batteur plan dont le mouvement alternatif de rotation autour de son axe est assuré par un vérin hydraulique. Le réglage de la vitesse de rotation du batteur est assuré par un modulateur électronique agissant sur la consigne d'alimentation du moteur. Ce modulateur lui-même reçoit les paramètres de la houle (fréquence, voltage...).

Ce batteur a la particularité de permettre aussi de générer deux fréquences à la fois, à savoir la houle bichromatique.

2.3. Plage d'amortissement : La réflexion de la houle est limitée à < 10 % grâce à une plage d'amortissement reposant sur le fond du canal conçu de façon à amortir la houle par déferlement et frottement visqueux.

Dans notre étude, on utilisera un tissu fibreux garantissant un frottement avec la houle.

2.4. Surface libre : Le mouvement de la houle est visible, et on fera varier les paramètres de la houle jusqu'à ce qu'on réalise des houles régulières (bien régulières non perturbées) qui conviennent avec les dimensions du canal à houle, afin d'éviter le débordement et le déferlement.

Sédiments utilisés : Nos études sont faites sur un sédiment constitué de particules de poudre PVC, dont le diamètre moyen est de l'ordre de 164 μm et une densité de 1,36. Ces particules de sédiments sont réparties sur le fond du canal en formant un lit avec une épaisseur de 2,5 cm

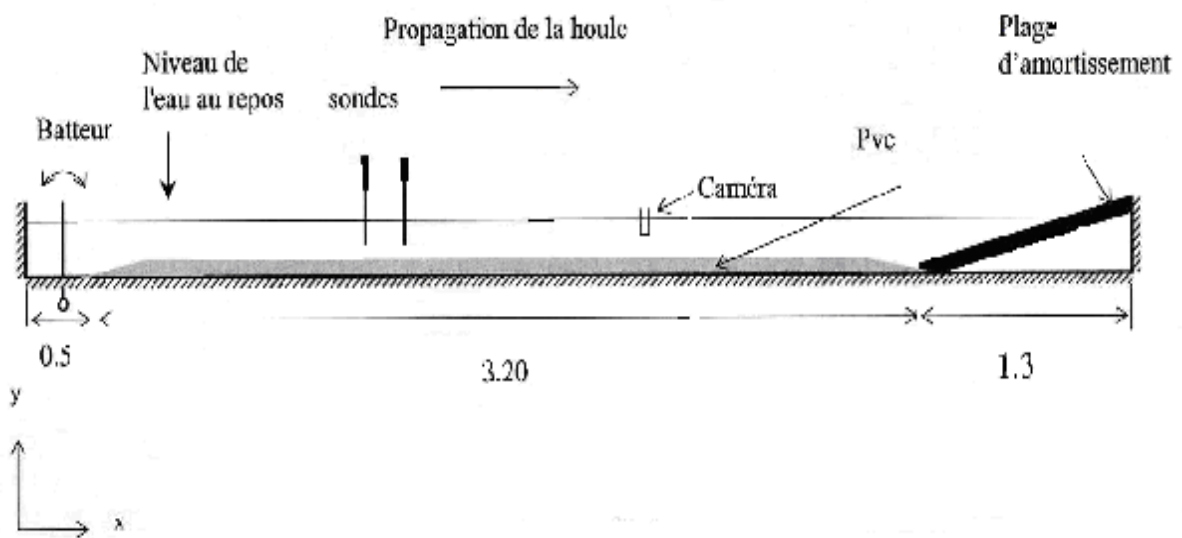


Figure (5.1) Canal à houle

Notre houle est une houle de Stokes de second ordre (figure 2.3) et le transport sédimentaire se fera par suspension.

La morphodynamique des rides est abordée par une double observations : la vue de dessus sera réalisée par une **caméra bâton** immergée dans le canal et la vue de coté sera réalisée par un relevé à main levée sur des feuilles millimétrées.

Durant les deux étapes d'essai, la plage d'amortissement fournira une réflexion partielle de l'ordre de (5 %) ($r = A_r / A_i$) (A_r, i : amplitude réfléchi et incidente de la houle) ; cela est vérifiable par l'interface du logiciel LAB VIEW qui utilise la mesure de la houle par la

technique de deux sondes mobiles [25], qui consiste à déplacer le long du canal à la même vitesse V , mais de sens opposé, les deux sondes résistives de mesure, cela permet de séparer les modes incidents et les modes réfléchis par l'effet Doppler.

3. Technique du traitement d'images

Dans notre étude expérimentale, on s'est intéressé aux images des rides prises par la caméra bâton qui seront traitées comme des signaux sous le logiciel **Matlab**.

Cette technique de traitement d'image nous fournissent deux types de graphes : histogrammes et spectres.

- Les **histogrammes** sont des graphes représentant la fréquence ou le nombre d'apparition des longueurs d'onde, et surtout la longueur la plus probable (pic de l'histogramme)
- Les **spectres** sont des graphes représentant l'énergie associée à la fréquence spatiale qui n'est que la valeur inverse de la longueur d'onde, soit $f=1/L$ (cm^{-1})

Afin de comprendre la suite de l'étude, nous avons trouvé important de passer par quelques notions du traitement de signal indispensable à la compréhension des essais.

Matlab (**Matrix Laboratory**) est un logiciel très puissant et facile à manipuler dans la programmation et le traitement des matrices (signal, image...). Il fournit une interface graphique très complète permettant tous les niveaux de sophistication désirés et fournit aussi des outils prêts à l'emploi (algorithmes tels que FFT, seuillage, filtrage...).

L'image à deux dimensions est définie comme une matrice $I(N,M)$ de N lignes et M colonnes. Le point (i, j) est appelé pixel, sa valeur $I(i, j)$ réelle traduit le degré de luminosité de l'image au point (i, j) : on l'appelle niveau de gris de l'image au point (i, j) .

La couleur est une propriété de la lumière qui est une onde électromagnétique. Comme toutes les ondes, elle peut avoir des fréquences différentes qui lui donnent justement sa couleur.

Quand les longueurs d'ondes sont courtes – vers 380 nm – elles sont perçues comme du bleu – violet par un œil humain standard, et quand elles sont plus longues – vers 700 nm – elles sont perçues comme rouge. L'ensemble des ondes visibles s'appelle le spectre de la lumière visible. Au-delà du spectre visible pour l'homme se trouvent les ultraviolets et les infrarouges, entre autres. On obtient traditionnellement un spectre de la lumière du soleil si on la fait passer à travers un prisme ou encore à travers des gouttelettes d'eau. Ce qui peut créer un arc-en-ciel dans certaines conditions.

3.1. Informations contenues dans une image

Une image est formée par la cornée et projetée au fond de l'œil, sur la rétine. Celle-ci est littéralement tapissée de cellules nerveuses – les photorécepteurs – sensibles à la lumière en quantité – la luminosité – grâce aux **bâtonnets**, mais aussi en qualité – les couleurs – grâce aux **cônes**. Les cônes (sensibles donc aux couleurs) ne sont pas tous sensibles à la couleur de la lumière de la même façon. Certains sont surtout sensibles dans le rouge, d'autres dans le vert et enfin les derniers dans le bleu.

Pourtant l'œil voit bien toutes les couleurs du violet au rouge de manière continue donc c'est par le mélange de ces trois couleurs (**Rouge Vert Bleu** : couleurs primaires additives) que le cerveau est capable de fabriquer, de reconstituer toutes les autres couleurs.

Des chercheurs ont réussi à modéliser numériquement la complexité des couleurs. Ils ont dû partir du fonctionnement de base des ordinateurs, c'est-à-dire des **0** et des **1** (on appelle cela un bit).

Pour afficher une infinité (nuance) de la même couleur, j'ai donc besoin de plus d'un bit ?

- Avec un chiffre : **0** ou **1** me donne 2 possibilités. Mon signal est codé sur un bit qui s'écrit 2 puissance 1 : 2^1 (éteint ou claire)
- Avec deux chiffres : **00** ou **01** ou **10** ou **11** me donne 4 possibilités de niveaux de luminosité : éteint, foncé, claire, très claire. Mon signal est codé sur 2 bits, soit 2^2
- Avec trois chiffres : **000** ou **001** etc. me donne 8 possibilités. Mon signal est codé sur trois bits, soit 2^3
- Et ainsi de suite ... mais jusqu'à combien ?

En 1930, après avoir réalisé des tests sur de nombreux êtres humains, les chercheurs de la Commission Internationale de l'Eclairage **CIE**, ont constaté qu'il fallait, dans le meilleur des cas, 200 nuances dans un dégradé d'une couleur pour qu'il soit perçu comme **continu**.

Alors notre résultat est de 2 puissance 8 (2^8) = 256 niveaux possible de 0 à 255, et cela pour chaque couleur. J'ai donc 256 x 256 x 256 combinaisons possibles soit plus de 16,7 millions !!!

On dit que le signal est codé en 24 bits (3 x 8 bits) donc sur trois octets puisque un octet = 8 bits. Chaque signal est donc une succession de huit 0 et 1 et cela trois fois pour les trois couleurs primaires **RVB**.

Un signal **RVB** s'écrit donc sous la forme d'une donnée numérique 255, 112, 44 par exemple (le rouge complètement allumé, le vert à 112 et le bleu à 44 soit relativement sombre).

On admet une image à 256, alors le niveau de pixel varie entre 0 et 255 = $256 - 1 = 2^8 - 1$

La FFT (transformée de Fourier rapide) est applicable pour les échantillons qui s'écrivent en 2^n , d'où une facilité et concordance à traiter les signaux de lumière : notre cas d'étude.

Dans cette analyse des images de rides, on citera le travail de Doppler[21], basé sur l'algorithme **seuillage** et **profil** que fournit Matlab.

Le **seuillage** d'une image consiste à choisir un nombre réel '**s**' et de tester les pixels de l'image point par point et ligne par ligne. Tout niveau de gris inférieur au seuil **s** est mis à zéro (noir) sinon il est mis à 255 (blanc) ou 1 : **binarisation**.

Un algorithme de seuillage est appliqué à chaque image. Tous les pixels dont le niveau de gris est inférieur à la valeur seuil choisie sont codés en blanc (0) et les autres en noir (1) : on obtient alors une image similaire à la figure 5.1.

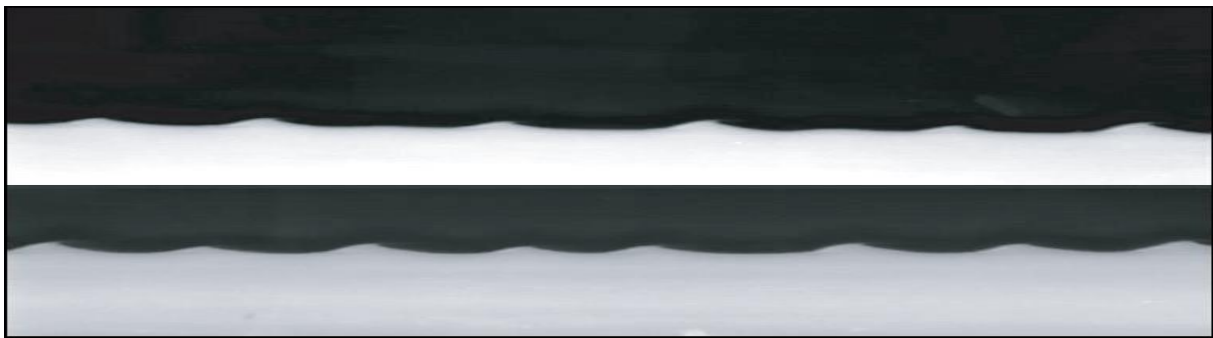


Figure (5.2a) Image réelle (en couleur) avant seuillage [73]



Figure (5.2b) Image après seuillage (noir et blanc) [73]

Ces films binarisés sont enregistrés, les traitements postérieurs sont réalisés sous le logiciel Matlab.

Les parties haute et basse de l'image sont traitées séparément. Le repérage de l'interface est réalisé en balayant successivement chaque colonne jusqu'à détection du passage du blanc au noir : donc une excellent idée de la séparation entre quelque chose qu'est claire et quelque chose qu'est foncée dans l'image.

Le **profil** est un autre outil géométrique très utile pour détecter le profil des niveaux de gris d'une image ; cette fonction est exécutée en choisissant à l'aide de la souris de l'ordinateur une ligne de l'image et on obtient un graphe indiquant le profil du niveau de gris le long de cette ligne.

A cette ligne, on applique une FFT. (Cette ligne est équivalente sous Matlab à une ligne de matrice qu'on demande à logiciel de lire par la commande $A(k, :)$ ligne K .

Qu'est un algorithme de Fourier.

3.2. Introduction à la transformation de Fourier

Un signal peut être assimilé à une fonction de temps $S(t)$. L'information contenue dans $S(t)$ peut être représentée également dans le domaine fréquentiel grâce à la transformation de Fourier.

$$S(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} C_n e^{j2\pi n t} \quad ; \quad f = \frac{1}{T} : \text{constante}$$

Les coefficients de Fourier C_n sont définis en fonction du signal $S(t)$ par :

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) e^{-j2\pi n t} dt \quad ; \quad n \in \mathbb{Z} : \text{ensemble des entiers relatifs}$$

Ce signal $S(t)$ est la représentation physique de l'information.

La représentation d'un signal temporel dans la base orthonormée discrète $\exp(j2\pi n t)$ revient à représenter ce signal dans le domaine des fréquences discrètes.

Bien que la représentation graphique de ce signal ait changé en passant du domaine temporel vers le domaine fréquentiel, il n'en demeure pas moins que le contenu informatif est identique dans les deux représentations.

Analogie : Un litre d'eau prend la forme du contenant (récipient) dans lequel elle est versée, sans pour autant changer de volume.

Propriétés

La série de Fourier d'une distribution impaire est une série de sinus ;

La série de Fourier d'une distribution paire est une série de cosinus.

La série de Fourier est une approximation ou estimation d'un signal périodique par une somme pondérée de sinusoïdes.

Le signal sinusoïdal n'a qu'une composante fréquentielle (une seule raie) située à une fréquence $f = 1/T$: **fréquence fondamentale ou la fondamentale.**

Tout autre signal périodique de période T se compose de plusieurs fréquences dont l'écart minimum est de $1/T$.

Ce qui équivaut donc à dire que tout signal est composé de sinusoïdes de fréquences multiples (n/T) qu'on appelle **les harmoniques**.

D'où l'idée de la décomposition d'un signal en une somme d'un signal fondamental ($f = 1/T$) et les signaux monochromatiques de (n/T) : les harmoniques.

L'usage est très répandu de la transformée de Fourier discret dans le traitement de signal et cela provient des simplifications de calculs numériques dues à l'algorithme de transformation de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transformation).

La simplification de la FFT est exprimée sous forme d'un tableau d'équation.

Le nombre approximatif d'opérations arithmétiques avec la TFD est ramené à N^2 opérations (concordance avec l'écriture de la matrice d'image).

Le passage d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle du signal est assuré automatiquement par la FFT. Cette théorie est basée sur le fait que toute fonction périodique est décomposable sur une base de sinus et cosinus. Ainsi, on peut passer d'une représentation temporelle (dans le repère temporel classique) du signal à une représentation en fréquence sur une base de sinus et cosinus (dans le repère fréquentiel).

La puissance de cet outil réside dans le fait que cette transformée est réversible et qu'elle peut être étendue aux signaux non périodiques qu'on considère alors comme des périodes infinies.

Toutes les informations extraites de l'expérience sont contenues dans le diagramme spatio-temporel. Son observation fournit donc de nombreux détails sur chaque expérience.

Les techniques suivantes ont été développées dans le but de mesurer la longueur d'onde des rides, leur amplitude, leur vitesse qui seront données dans des graphes exploitables : les histogrammes et les spectres. L'histogramme renseigne sur les rides dont la longueur se répète comme une forme fréquentielle. Il nous fournit directement la valeur de la ride et la même chose pour son amplitude.

4. Houle monochromatique sur fond de sédiment plat

Vu les conditions des essais (profondeur, période...) notre houle monochromatique est une houle de Stokes second ordre qui aura la forme théorique sinusoïdale.

$$y = A \sin(\omega x)$$

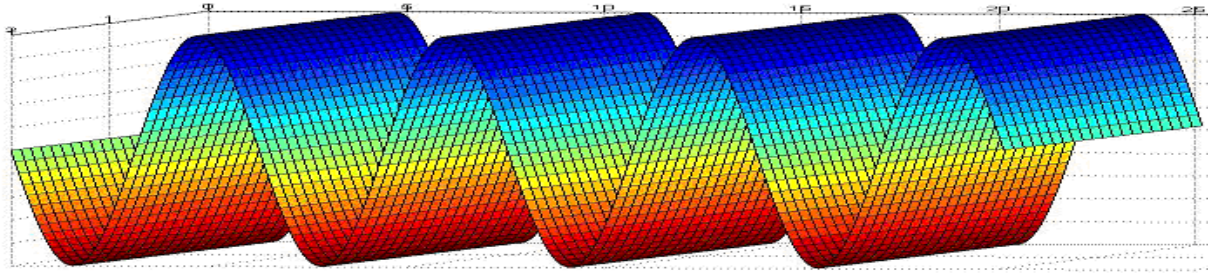


Figure (5.3) Surface libre de la houle monochromatique (Matlab)

On caractérisera la houle régulière par sa période et son amplitude :

On étudiera six (0.6) essais de houles régulières et on étudiera son évolution dynamique [10], aussi c'est houles seront étudiées par la suite pour formes les houles bichromatiques.

| | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| Houle (s ; mm) | 1.19s /13mm | 0.75s /23mm | 0.75s /13mm | 0.97s /13mm | 0.97s /17mm | 0.92s /15.5mm |
| Longueur de la ride (cm) | 2.29 | 1.245 | 0 | 1.893 | 1.891 | 1.718 |

Tableau 5.2 Tableau des différents essais des houles monochromatiques

La surface libre est bien régulière et elle se propage jusqu'à la plage d'amortissement ou elle s'abat et se réfléchit seulement à moins de 5 %.

La houle quand elle se propage sur le fond, elle fera bouger et perturber les sédiments quand les conditions d'entraînement sont fortes (transport par suspension). Alors le fond se déforme. Deux paramètres, à savoir le nombre de mobilité ψ et le nombre de Shields θ vus dans le chapitre précédent, sont d'une importance prédominante sur l'évolution et l'apparition des rides.

Les nombres de mobilité testés dans nos essais varient entre 2 à 15.

On constate dans cette première étape d'essai que les rides formées sur le fond ont une allure d'un tracé sinusoïdal le long de tout le canal.

La distribution de la vitesse au fond est la même le long du canal et par conséquent l'énergie de la houle qui perturbe le fond initialement plat est identique.

La monotonie de la vitesse justifie la régularité des rides le long du canal comme la montre la figure 5.4.



Figure (5.4) *Vue de cote d'un réseau de rides*

4.1. Acquisition des images et discussion

La technique de traitement d'images qu'on utilisera dans notre étude consiste à appliquer un programme sous Matlab sur un groupe d'image de rides de sables prises par la caméra bâton et ensuite exploiter et recueillir les informations utiles telles que la longueur d'onde de la ride la plus fréquente et son amplitude, et éventuellement d'autres données (telles que les barres qui sont dues à la réflexion).

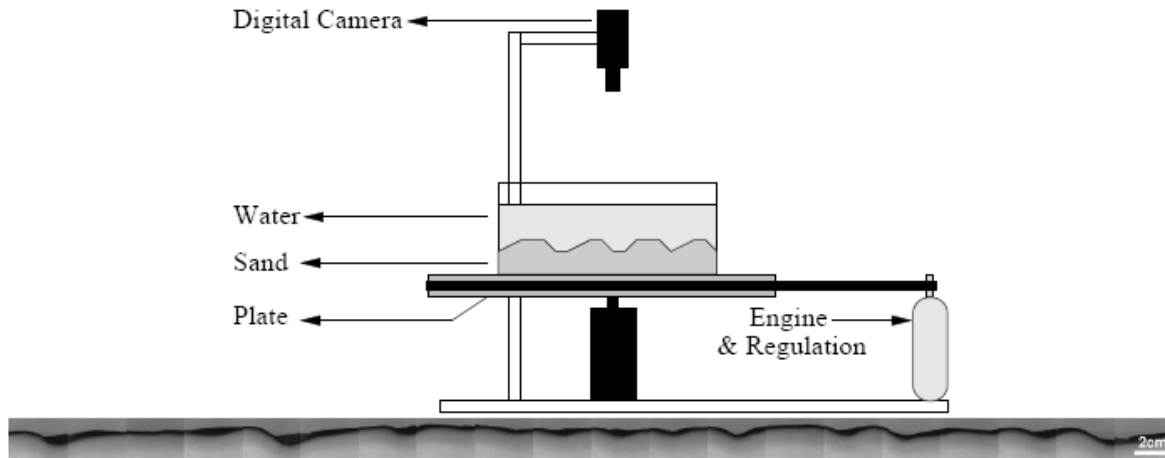


Figure (5.5) *Dispositif utilisé pour la capture des images des rides*

De vue de dessus, on constate aussi une régularité de la longueur des rides le long du canal, enregistrés par caméra bâton qu'on fera avancer par intermittence le long du canal et cela dans une obscurité qui permet de prendre de bonnes images traitables.

Pour une meilleure prise d'images par la caméra, on arrêtera à chaque fois le batteur hydraulique par ce que les sédiments en suspension faussent carrément les données, et on prendra notre image et ensuite on fera glisser la caméra sur une coulisse afin de prendre l'image suivante sur la même longueur prise d'image ' L_{image} ' :

Notre image est de dimension de 22x28 cm et une résolution de 0,49 mm / pixel

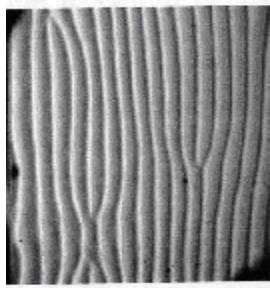


Figure (5.6) *Vue de dessus d'un réseau de rides*

La technique du traitement d'image nous fournit un histogramme avec un pic indiquant la longueur d'onde la plus probable sur une image et le même histogramme pour des images collées à la fois représentant ainsi tout le fond du canal (du batteur à la plage d'amortissement).

On appliquera le programme du traitement d'image sur un ensemble d'images collées les uns aux autres afin d'obtenir une moyenne de la ride de tout le canal.

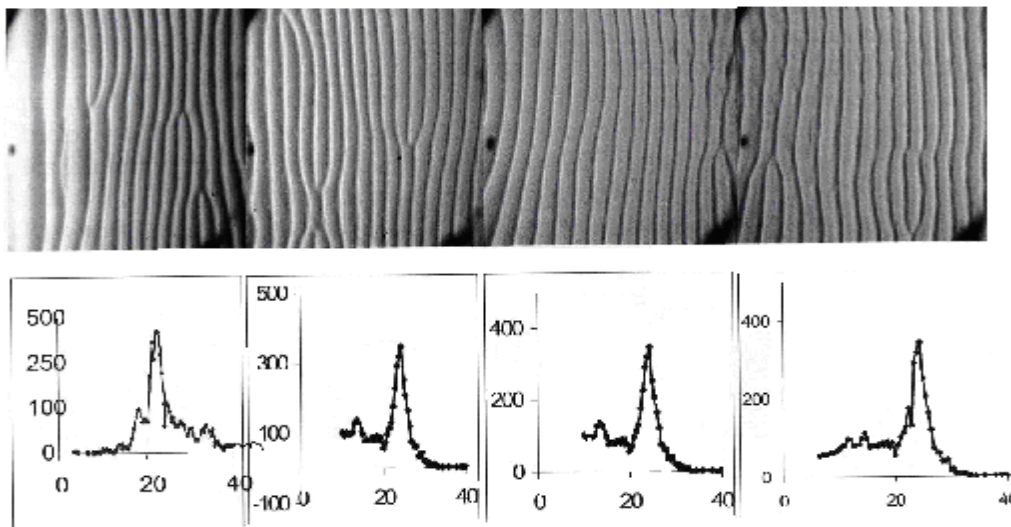


Figure (5.7) *Histogramme de la ride la plus probable : images collées*

L'histogramme fourni par la méthode traitement d'images est un pic montrant la longueur d'onde de la ride la plus probable avec une valeur de répétition très grande. Ce pic est caractéristique de la fréquence de la houle.

4.3. Discussion du résultat à la fin d'essai

- Au fur à mesure, et au bout de quelque heures de début d'essai de houle monochromatique (2 heures en moyenne), on constate apparition du phénomène des barres qui sont des ondulations de grandes échelles comportant un creux et un ventre.

- La vitesse au nœud est responsable du creux car elle déterre le sol en basculant les sédiments de part et d'autre du canal. Et de l'autre côté le ventre s'amoncelle en formant une

dune dont la longueur est égale à la moitié de l'onde de la houle incidente et cela vérifie la loi de Bragg.

Les barres sont multiples et symétriques



Figure (5.8) Formation de barres dans le cas houle monochromatique

- Durant la formation des barres, on constate que ces dernières avancent très lentement vers l'avant (propagation de la houle) : quasiment nulle.

La technique de traitement d'image est intéressante à appliquer dans ce cas de formation de barres.

- Dans le cas d'apparition des barres et rides (présence de la réflexion), on constatera une diversité des rides et de leur dimensions (grande amplitude de la ride au ventre de la barre et petite amplitude au creux de la barre (voir figure 5.8)).

Cette constatation est importante à souligner, car la valeur du coefficient de Nikuradse k_n n'est pas la même le long du canal : elle varie d'un point à l'autre et sous forme d'une fonction sinusoïdale.

Cette variation de la valeur de Nikuradse est intimement liée au frottement et par conséquent augmentation du coefficient de frottement (Temperville et al. 1999) [67].

- On distingue une forme arrondie du pic de l'histogramme (présence de barres) du fait que la longueur de la ride la plus probable est plurielle le long du canal car la vitesse n'est pas fixe et elle varie d'un point à l'autre (du creux au ventre de la barre).

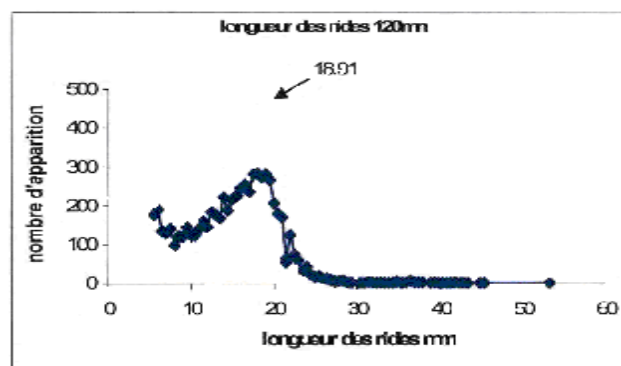


Figure (5.9) Histogramme en cas de houle monochromatique avec formation de barres

5. Houle bichromatique sur fond de sédiment plat

La houle bichromatique d'une houle ayant deux fréquences ; sa surface libre est régulière avec deux ondes superposées bien distinctes. On peut donner une approche de cette houle sous la forme :

$$y = A\sin(f_1 x) + B\sin(f_2 x), \text{ avec un déphasage nul.}$$

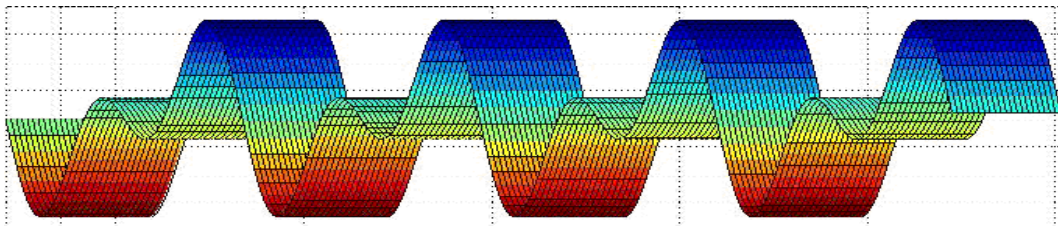


Figure (5.10) Surface libre de la houle bichromatique, Matlab

Dans cette étape, il y a lieu de distinguer le début de l'essai et la fin qui suit l'après formation des barres.

5.1. Essais expérimentaux

On exposera trois essais sur la houle bichromatique constituée de deux houles monochromatiques dont leur analyse a été effectuée auparavant (longueur de la rides et sa fréquence spatiale) ; une comparaison à la fin des essais pour voir quel est le changement qui s'effectue par rapport au cas de houle monochromatique.

| Tests | Houle bichromatique | |
|------------------------|---------------------|------------------|
| 1 ^{er} teste | 0.75 s / 13 mm | 0.97 s / 13 mm |
| 2 ^{ème} teste | 1.19 s / 13 mm | 0.75 s / 23 mm |
| 3 ^{ème} teste | 0.97 s / 17 mm | 0.92 s / 15.5 mm |

Tableau 5.3 Tableau des différents essais des houles bichromatiques

1^{er} test

Houle bichromatique : (0,75 s / 13 mm ; 0,97 s / 13 mm)

Cette houle contient deux houles monochromatiques

La première composante de la houle est la période (s : seconde), la deuxième est l'amplitude de la ride (mm).

Pour l'essai monochromatique, on trouvera la ride la plus probable égale à :

- (0,75 s / 13 mm) 1^{ère} houle, sa longueur de ride est 2,29 cm et sa fréquence spatiale est 0,43 (valeur inverse de la longueur de la ride)
- (0,97 s / 23 mm) 2^{ème} houle, sa longueur de ride est 1,245 cm et sa fréquence spatiale est 0,8 (valeur inverse de la longueur de la ride)
- Le suivi des histogrammes s'effectuera par intermittence durant les temps (en minutes) : 5', 10', 15', 30', 45', 60', 75', 90', 105', 120' ...1020'

5.2. Discussion des graphes d'acquisition d'images

On distinguera trois sortes de graphe dans cette études : histogramme, graphe de l'évolution des rides et les spectres.

Les histogrammes du 1^{er} test, nous renseignent qu'au début (vers 10 mn) il y a une apparition forte de la longueur d'onde de la ride qui est de environ 2,29 cm . (longueur d'onde de la ride de la 1^{er} houle)

Cette forte apparition estimée à 4000 au début, va chuter jusqu'aux environs 2500 nombre d'apparition et elle va se stabiliser à partir de 02 heures.

Du temps $t = 75$ à 105 mn , on constate apparition de la longueur d'onde de la ride de 2^{ème} houle (petit pic environ 1,245 cm) ; mais ce pic disparaîtra.

Cette chute est due au fait de l'apparition d'une autre longueur d'onde de la ride : la deuxième composante de la houle bichromatique et aussi aux autres houles harmoniques qui sont des couples des deux houles de la houle bichromatique.

La dernière figure de (page 80), montre l'évolution des rides au cours du temps ; on distingue bien le début non stable du fait d'apparition d'autres rides, et la fin qu'est stable.

En ce qui concerne les spectres (page 81 à 83), on trouve toujours l'énergie est maximale pour la petite fréquence spatiale de la houle et elle est moins grande pour la deuxième composante de la houle bichromatique, et aussi on constate d'autres fréquences qui sont les fréquences harmoniques avec de faibles énergies ($f1+f2$, $2f1$, $2f2...$).

La même constatation est à faire pour les deux autres tests.

Il est intéressant de lier la visualisation de la morphodynamique du fond sédimentaire avec les résultats de l'acquisition d'images.

Dans un premier lieu, l'histogramme de la longueur d'onde ressemble à celui de la houle monochromatique, mais au moins d'une heure on constate formation de barres désignée par effondrement du pic de l'histogramme (très visible au teste N°02 au $t = 60 \text{ mn}$).

5.3. Discussion du résultat de la morphodynamique

- L'apparition des barres dans ce cas de houle bichromatique est relativement rapide car l'énergie dans ce cas est grande, formée par la somme des deux houles.

L'image prise par la caméra bâton montre des rides très variées avec des reliefs et des creux pas vraiment réguliers.



Figure (5.11) *Vue de dessus d'un réseau de rides en houle bichromatique.*

- Les rides ont une forme non monotone et elles sont différentes d'un point à l'autre du fait de la perturbation de la distribution de vitesse le long du canal.

L'histogramme de la ride la plus probable présente en effet une multitude de pics correspondant essentiellement aux deux fréquences de la houle bichromatique (f_1 et f_2) et en plus on distingue les fréquences des houles harmoniques qui sont en fonction de f_1 et f_2 : f_1+f_2 , $2 f_1$, $2 f_2$, f_1-f_2 ...

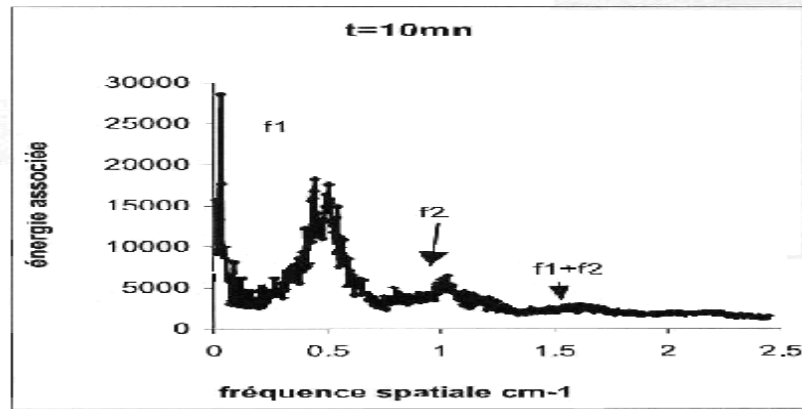


Figure (5.12) Histogramme des rides dans le cas de houle bichromatique

- Le pic le plus haut est relatif à la houle la plus grande en énergie (haute fréquence) et l'autre pic correspond à la fréquence moindre car son énergie est petite.

L'étude de la morphologie des rides en bichromatique donne des formes différentes qui sont dues à la réflexion des ondes, et on constate une légère augmentation du taux de réflexion qu'on pourrait attribuer aux rides et surtout aux barres car elle affectent la houle au fond qui se traduit par réflexion en haut.

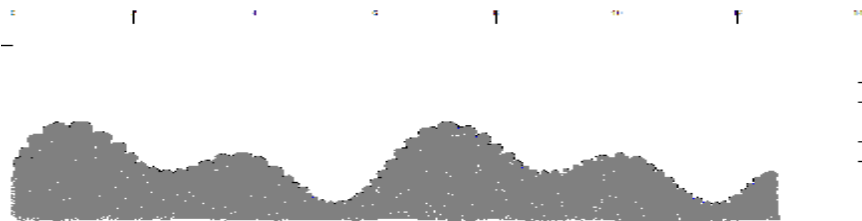


Figure (5.13) Vue de côté d'un réseau de rides en cas de houle bichromatique

- La demie longueur de la barre (la loi de Bragg) n'est pas visible car les longueurs des barres dans ce cas sont multiples, en reliefs et il n'est pas facile d'attribuer l'origine des barres, mais la distinction est claire si on admet l'hypothèse de superposition des barres dans ce cas.
- Le nombre de Nikuradse dans ce cas est important à signaler car la morphodynamique est complètement changée.

- Ces barres avancent relativement vite vers l'avant du fait de la bi-énergie de la houle bichromatique (10 cm/heure)

- La barre de l'onde f_1 s'ajoute dans des endroits à la barre de l'onde f_2 et elle s'ajoute d'une manière à ce que le creux ou le ventre soit impressionnant ou, au contraire elle s'ajoute d'une manière opposée si les deux houles (f_1 et f_2) présentent des déphasages.

- La superposition des barres est assimilable à la superposition des fonctions de sinus et cosinus et une modélisation sous un logiciel numérique montre explicitement ce couplage de houles bichromatiques et même multi – chromatiques.

On pourra généraliser dans ce cas le phénomène de formation de barres dans le cas de réflexion à un couplage de deux houles, trois ou n'importe quel nombre de houle. Cela donne une idée de la forme des barres dans le cas d'une houle réelle assimilable à une fonction comprenant un multiple de houles monochromatiques.

On pourra conclure et cela est justifié par l'expérience que dans notre cas, la barre dont la longueur est grande est attribuée à la houle dont l'énergie est grande.

- La vitesse d'avancement des barres dans ce cas est importante comparativement à celle de la houle monochromatique. Cette vitesse est de l'ordre de 10 cm/heure .

- Le creux et le ventre dans ce cas sont impressionnants est sont en relief. La longueur d'onde au creux est visiblement très petite à celle de la ride du ventre.

6. Analyse de l'énergie des harmoniques

L'analyse des fichiers de la surface libre montre qu'en cas de houle monochromatique que l'énergie importante est associée seulement à la fréquence de la houle ; les harmoniques ont une faible énergie devant le grand pic du fondamental f_1 , alors qu'en cas de houle bichromatique on constata que l'énergie se focalise sur les harmoniques qui sont proches des deux fréquences de la houle bichromatique, elle est essentiellement importante dans les pics de f_1 , f_2 , f_1+f_2 .

L'énergie dans le cas de la houle bichromatique sur un fond sans sédiment diminue par rapport au cas où il y a sédiment et dans le cas de formation des barres.

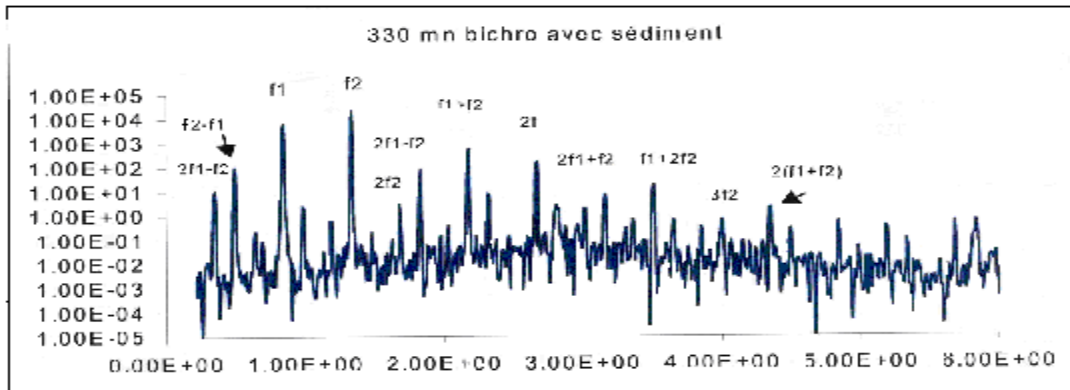


Figure (5.14a). Spectre de l'énergie en cas de houle bichromatique sans sédiments

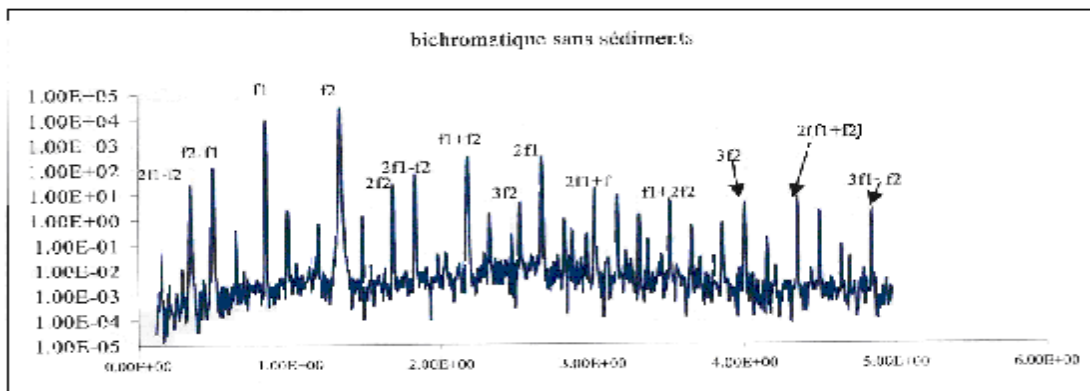


Figure (5.14b). Spectre de l'énergie en cas de houle bichromatique avec sédiments

$f1(0.84 ; 8.82 \times 10^3)$ sans sédiments, elle passe à $f1(0.84 ; 6.03 \times 10^3)$ avec sédiments.

$f2(1.33 ; 2.58 \times 10^4)$ sans sédiments, elle passe à $f2(1.33 ; 2.14 \times 10^4)$ avec sédiments.

L'énergie est affaiblie par le frottement avec les sédiments surtout au contact avec les rides et les barres qui sont en reliefs, donc amortissent les vitesses.

Le taux de dissipation de l'énergie est en moyen de l'ordre de 30% dans le cas de la petite fréquence $f1=0,84 \text{ Hz}$, et il est de 20% dans le cas de la petite fréquence $f2= 1,33 \text{ Hz}$.

Le transport sédimentaire est aussi diminué et propage moins par rapport au cas sans rides étant donné que l'énergie responsable du dynamisme des sédiments est faible.

7. Conclusion

La houle est responsable de la déformation de la surface du fond marin et du transport sédimentaire. La houle quelle soit régulière ou non, elle a un effet modificateur de la surface et l'allure du fond avec les conditions imposées : vitesse de houle, réflexion, résonance....

Dans le cas de houle monochromatique, la formation des rides est monotone sur tout le long du canal ; son histogramme indique un pic relatif à la fréquence de la houle.

Au fur et à mesure que la réflexion agit lentement, on constate formation de barres qui obéit à la loi de Bragg (demi longueur de l'onde de la houle égale à la longueur de la barre), et on constate que le pic de l'histogramme passe à la forme arrondie car il y a multitude de rides variées le long du canal.

La vitesse d'avancement des barres est relativement petite et cela est relié à l'énergie de la houle qu'est elle-même insignifiante.

Dans le cas de houle bichromatique, l'histogramme nous renseigne sur la variété des rides relatives aux fréquences constituant la houle bichromatique et les harmoniques ; essentiellement f_1 , f_2 , f_1+f_2 , $2f_1$, $2f_2$...

L'histogramme au début représente un pic et à l'apparition des barres on constate effondrement du pic.

La formation des barres est rapide par rapport au cas de houle monochromatique, cela s'explique par le fait que l'énergie est grande dans ce cas (énergie des deux fréquences : bi-énergie), contrairement à la houle monochromatique constituée d'une énergie (mono-énergie).

La réflexion est responsable aussi dans ce cas, de la formation des barres et il n'est pas facile de distinguer à quelle fréquence on attribue telle barre à telle fréquence, du fait que la superposition des barres modifie les longueurs des barres. Les barres dans ce cas où l'énergie est fournie par les deux houles, possèdent une vitesse importante par rapport à celle de la houle monochromatique et par conséquent on s'attendra à un transport sédimentaire important par suspension et même par charriage.

Chapitre

Conclusion générale et perspectives

Le transport sédimentaire est souvent désastreux pour les plages et les ouvrages par les dégâts qu'ils causent : érosion, ensablement, stabilité des plages et la tenue des ouvrages côtiers.

Il est important de rapprocher ce phénomène par différentes approches afin d'étudier son mécanisme de formation dans le but de minimiser ses dégâts.

Dans cette étude expérimentale de l'interaction houle et milieu granulaire, on a mis en évidence au premier lieu, les différents types de houle et sédiments ; cette recherche bibliographique est nécessaire pour comprendre les phénomènes hydrodynamiques tels que le transport sédimentaire, érosion, réflexion...

Ensuite notre intérêt s'est porté sur l'interaction qui se produit entre la houle et le sédiment à travers l'étude des mécanismes de formation des rides et des barres, les modes de transport sédimentaire et les ouvrages qui y font face ; aussi une description des moyens mis en oeuvre pour étudier expérimentalement le modèle réduit de l'interaction houle et sédiment et aussi

pour exploiter les informations contenues dans les images des rides, à savoir : logiciel Matlab, vélocimètre à Laser, canal à houle.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus dans une expérience constituée d'un canal à houle dans lequel on a posé un lit de sédiments de PVC sur lequel s'écoule de l'eau.

On s'est intéressé aux rides et barres qui se forment sur le fond ; pour cela, une technique de traitement d'image a été élaborée pour traiter l'information contenue dans les images prises par caméra bâton.

Le logiciel Matlab nous fournit des algorithmes puissants tels que FFT, seuillage...qui permettent de renseigner sur la longueur d'onde de la ride la plus probable et son amplitude.

A la première étape de l'étude des essais, on s'est intéressé à la houle monochromatique s'écoulant sur le fond granulaire plat. Le déroulement du processus de formation des rides est visible dans les premières minutes de l'essai qui sont en fonction des paramètres tels que nombre de mobilité, nombre de Shields et Reynolds.

On constate formation des rides le long du canal et son traitement par la technique du traitement d'images nous renseigne sur la longueur de l'onde la plus probable par un histogramme comportant un pic.

Avec le déroulement de l'expérience (environ 2 heures), on constate formation de barres multiples et symétriques, et l'histogramme change du pic pointu à un pic à la forme arrondie du fait de régénération d'autres rides sous l'effet de la réflexion tout en obéissant à la loi de Bragg.

A la deuxième étape de l'étude, on s'est intéressé à la houle bichromatique (formée par deux fréquences f_1 et f_2). L'histogramme de la longueur d'onde de la ride est d'une forme multi-pics correspondant essentiellement aux fréquences f_1 , f_2 et les harmoniques f_1+f_2 , $2f_1$, $2f_2$...

Les barres qui se forment dans cette étape comportent des creux et des ventres impressionnants (en relief) par rapport à ceux de la houle monochromatique.

Les barres dans ce cas se superposent en formant des creux et ventres en reliefs qui sont périodiques difficilement distinguables (superposition des barres)

Le transport sédimentaire s'effectue en suspension durant tous les essais, et a été estimé par sa vitesse d'avancement qu'est lente dans le cas de houle monochromatique et est plus rapide dans le cas bichromatique car l'énergie est importante formée par celles des deux houles constitutives.

Perspectives

Le travail présenté ici est bien sûr incomplet. De nombreux essais et modélisations qui auraient eu lieu dans ce mémoire n'ont pas été effectués par manque de moyens (matériels et informatiques).

Il serait intéressant de mener les essais avec un modèle numérique généralisant les différents types de houles constituées de N houles, avec N variant de 2 jusqu'à un nombre fixe de fréquences afin de se rapprocher plus de la houle réelle.

Une meilleure prise en compte matérielle est souhaitable pour mesurer le transport sédimentaire avec des paramètres influant sur ce phénomène tel que : la réflexion, déferlement et la rugosité du fond représentée par les rides et barres.

La correction du coefficient de Nikurades k_n dans le cas de formation des barres est souhaitable, car elle influe directement sur les formules de transport sédimentaire et cela donnera une bonne estimation du taux de transport entre celui calculé expérimentalement et celui calculé mathématiquement.

Nos essais sont réalisés dans des conditions idéales à savoir des sédiments monodispersés de PVC (densité 1,36) facilement déplaçables loin de la granulométrie multi-classe des sédiments (mélanges de plusieurs classes de taille de sédiments) représentatifs de ceux trouvés dans les plages et les côtes, un canal d'une largeur petite qui gênerait par son frottement avec la paroi, une épaisseur de la couche sédiment et celle de l'eau étant fixe, une topographie idéale sans présence de pente comme cela est constaté dans les plages. Toutes ces considérations idéales donne une estimation loin et non réelle des mesures hydrodynamiques : réflexion, transport sédimentaire, vitesse... Alors il serait intéressant de mener des études avec toutes ces considérations.

Enfin, l'emploi des techniques de mesure innovantes de l'évaluation des vitesses et de transport sédimentaire est nécessaire pour pouvoir progresser significativement dans la validation des formulations.

BIBLIOGRAPHIE

1. R. Bonnefille, Cours d'hydraulique maritimes 2^{ème} édition Masson 1980
2. J. Larras, Cours d'hydraulique maritime et de travaux maritimes édition Dunod 1961
3. R. Soulsby, Dynamics of marine sands HR Wallingford 1997
4. Cours de 4^{ème} et 5^{ème} année des Travaux Maritimes, Ecole Nationales des Travaux publics
5. J. Chapon, Travaux maritimes tome I & II 4^{ème} édition Eyrolles 1982
6. A. Ouahabi, Fondements théoriques du traitement du signal, OPU, Alger 1993
7. M. Rivoire, J. L. Ferrier, Matlab, Simulink, Stateflow, édition Technip 2001
8. E.A. Brun, A. M. Lagarde, J. Mathieu, Mécanique des fluides, édition Dunod 1970
9. M. Haddad, F. Marin et A. D. Jarno, Mémoire de stage de DEA sur Interaction d'un écoulement de type houle avec un milieu granulaire, Laboratoire Mécanique du Havre, 2003
10. A. D. Jarno, J. Brossard, F. Marin, Dynamical evolution of ripples in a wave channel, 2004
11. F. Marin, N. Abcha, J. Brossard, A. Ezersky, Interaction soliton-sable dans un canal en eau peu profonde, 2005
12. C. Faraci, E. Foti, Geometry and evolution of small-scale bedforms generated by regular and irregular waves, 2002
13. K. H. Andersen, C. Faraci, The wave plus current flow over vortex ripples at an arbitrary angle, 2002
14. F. Marin, Etude expérimentale des courants de dérives induit par la houle au dessus d'un fond ridé, 2000
15. C. Villaret, Modélisation du transport littoral, 2004
16. N. Frih, J. E. Roberts, A. Saad, un modèle Darcy-Forchheimer pour un écoulement dans un milieu poreux fracturé
17. W. Zaki, T. basbous, R. Younes, R. Raad, Modélisation de la houle au port de Beyrouth Transport solide par charriage sous une interaction houle-courant
18. V. Rey, A. G. Davies, M. Belzons, On the formation of bars by the action of waves on an erodible bed, 1995, Journal of Coastal Research 11(4) 1180 à 1194, Fort Lauderdale (Florida)
19. E. Cokelet, Longuet Higgins, The deformation of steep surface waves on water, numerical method of computation, 1976
20. T. E. Baldock et al, A laboratory study of nonlinear surface waves on water
21. J. Brossard, Théorie de la houle, DESS Génie portuaire et côtier, Novembre 2002

22. R. Bettahar, Mémoire de DESS génie côtier, 2005, Université du Havre
23. T. E. Baldock, C Swan, P. H. Taylor, A laboratory of nonlinear surface waves on water, Philosophical transactions: mathematical, physical and engineer sciences
24. T. Ohyama, D. S. Sheng, R. C. Hsu, Fourth order theory of multiple wave interaction, Coastal engineering 25(1995) 43 à 63
25. J. Brossard, A. Hémon, E. Rivoalen, Improved analysis of regular gravity waves and coefficient of reflexion using one of two probes, Coastal engineering 39, 193 à 2000
26. V. Rey, E. Guazzelli, C. C. Mei, Resonant reflexion of surface gravity waves by one dimensional doubly sinusoidal bed, 1996, American Institute of Physics
27. T. Ohyama, R. C. Hsu, Nonlinear wave effect on the slow drift motion of a floating body, Applied Ocean Research 17(1995) 349 à 362, Elsevier Science 1996
28. E. Baldock, D. A. Huntley, P.A.D. Bird, T.O. Hare, G. N. Bullock, Breakpoint generated surf beat induced by bichromatic wave groups, Coastal engineering 39(2000) 213 à 242
29. E. Guazzelli, V. Rey, M. Belzons, Higher order Bragg reflexion of gravity surface waves by periodic beds, Journal Fluid Mechanics
30. E. Guazzelli, V. Rey, M. Belzons, Subharmonic Bragg resonance for surface water waves, Europhysics Letter 16(2) 189 à 194
31. V. Rey, Propagation and local behaviour of normally incident gravity waves over varying topography, European Journal of Mechanics, Vol 11, N 2, 1992
32. Y. Goda, Y. Suzuki, Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, 15th Coastal engineering conference, Hawaii 1976
33. D. A Lyn, Purdue University, Sediment transport in open channels
34. M. Chagdali, J. Brossard, V. Rey, Ecoulement engendré par la houle dans un milieu poreux, 2004
35. A. G. Davies, C. Villaret, Modeling the effect of wave induced ripples on littoral sand transport, 2004
36. C. Villaret, Modelisation du transport solide par la formule de Bijker, 2001
37. P.L. Wiberg, C. K. Harvis, Ripple geometry in wave dominated environements, 1994
38. S. Huberson, J. Brossard, E. Rivoalen, C. Olivier, Etude non linéaire du comportement hydrodynamique d'un caisson Jarlan
39. N. Garcia, L. Javier, J. Losada, Etude numérique de l'interaction houle / brise lames franchissables.
40. J.M. Beynet, J. Bougis, F. Carnus, P. Fehlmam, Etude pour minimiser les impacts dans une baie au chenal d'accès à la marina Puerto Bonito

41. K. J. Kouakou, H. Caps, P.Y. Lagrée, Comparaisons numériques, analytiques, asymptotiques pour un écoulement sur une dune sous marine
42. O. Besson, Equation de Navier – Stokes à densité variable
43. Polubarinova – Kochina, Theory of ground water movement, Princeton University Press Moscow, 1952
44. F. Engelund, On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand, Danisch Acad. Tech, 1953
45. Etude de la future marina d'Alger, Laboratoire des Etudes Maritimes d'Alger
46. C. K. Solitt, R. H Cross, Wave transmission through permeable breakwater, 13th Coastal Engineering Conf, QSCE Vancouver, 1972
47. P D. Komar, D. L. Inman, Longshore Sand Transport Solide, Journal of Geophysical Research, 1970
48. C. Villaret, Intercomparaison des formules de transport solides, programme biparti, 2003
49. D. H. Swart, Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Deft Hydraulics report, 1976
50. Longuer-Higgins, The mechanics of the surf zone, HR Wallingford, T. Telford Publications
51. J.-M. Hervouet, Hydrodynamique des écoulements à surface libre, modélisation numérique avec la méthode des éléments finis, Presses des Ponts et Chaussées, 2003
52. E. K. Bijker, Mechanics of Sediment transport by the combination of waves and currents, Conf. on Coastal Engineering, 1992
53. P. P. Mathisen, O. S. Madsen, Waves and currents over a fixed rippled bed, bottom and apparent roughness experienced by current in the presence of waves, journal Geophysics Research
54. F. Marin J. F. Q Sleath, Mass transport over rippled bed in sediment transport mechanisms in coastal environments and rivers, World Scientific Singapore, 1994
55. D. H. Swart, Predictive equation regarding coastal transports, 15th International Conference on Coastal Engineering, Nez York, 1976
56. C. Faraci, E. Foti, Geo,etry, migration and evolution of small-scale bedforms generated by regular and irregular waves, Coast. Engineering, 2002
57. P. Traykovski, A. E. Hay, J. D. Irish, J. F. Lynch, Geometry, migration and evolution of wave orbital ripples LEO – 15, Geophysics Research
58. P. Nielsen, Dynamics ans geometry of wave generated ripple, J. Geophysics Research
59. Hsu, T. J. Sakakiyama, T. Kiu, A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composit breakwater

60. B. Boulier, A. Hémon, E. Rivoalen, J. Brossard, Etude expérimentale et numérique de l'écoulement au voisinage d'une plaque immergée dans la houle, 6th Journées hydrodynamiques, Nantes, 1997
61. J. Brossard, A. Hémon, Analyse spectrale par analyse Doppler de la propagation de la houle, Qcadémie des Sciences, 1995
62. J. Brossard, propagation d'une onde sur une plaque immergée, 1^{ère} journées génie civil - génie côtier, Université du Havre, 1990
63. R. Ben Amor, Hydrodynamique sédimentaire au large du Gif Gabès, DEA Géologie appliquée à l'environnement
64. R. Ben Amor, M. Brahmi, M. Guedarri, Essai d'interprétation de la dynamique sédimentaire par l'analyse granulométrique et minéralogique au large du Golf Gabès
65. T. Garlan, Apport de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente, Université de Sciences et Technologies, Lille 2, 2004
66. P. Sergent, B. Zhang, Modélisation de l'évolution du dépôt de Knick, Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales.
67. A. Temperville, K. Guizien, Frottement de fond sous une houle irrégulière linéaire, 1999
68. D. Idier, R. Pedreros, C. Oliveros, A. Sottolichio, L. Choppin, X. Bertin, Contributions respectives des courants et de la houle dans la mobilité sédimentaire d'une plate-forme interne estuarienne. Exemple : le seuil interinsulaire, au large du pertuis d'Antioche, France
69. B.T. Grasmeijer, M.G. Kleinhan, Observed and predicted bed forms and their effect on suspended sand concentrations
70. James B. Taylor, Andres L. Carrano, Satish G. Kandlikar, Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow-past, present, and future
71. M. Sanchez, Estimation du coefficient de réflexion en canal à houle
72. K. Spielmann, D. Astruc, O. Thual, Modélisation de la morphodynamique d'un profil de plage
73. M. De Linares, modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide de la dynamique fluviale, 2007
74. A. Delache, Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux : comparaison avec l'expérience, 2005
77. D. Drevard, Etude expérimentale et numérique de la propagation d'ondes de gravité en zone de déferlement, 2006
76. D. Doppler, Stabilité et dynamique de pentes granulaires sous-marines, 2005
77. F. Marin, Etude expérimentale de l'écoulement généré par la houle au-dessus d'un fond de rides, Université du Havre 1992

Internet :

www.sciencedirect.com

www-cfm2005.utt.fr publications du Congrès Français de la Mécanique

www.cetmef.equipement.gouv.fr publications des Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004.

www.onera.fr

www.lem-dz.com Laboratoire d'Etudes Maritimes d'Alger