

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

6/97

Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Hydraulique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En Vue de l'Obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en GENIE HYDRAULIQUE

Thème

**Contribution à l'étude du charriage
sous l'effet combiné
de la houle et du courant**

Proposé par :
M. B. REMINI

Etudié par :
M. Y. AIT BOUZIAO
M. K. BOUTEKDJIRET

Dirigé par :
M. B. REMINI
M. N. NEBACHE

Promotion 1997

DÉDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

- *ma très chère mère*
- *mon père*
- *mes frères*
- *ma sœur*

Kaïs

- *A ma mère, à ma mère, à ma mère*
- *A mon père*
- *A mes frères et sœurs*
- *A l'agent 32*

Je dédie ce modeste travail en guise de reconnaissance

Youcef

Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation durant toute notre vie d'élèves et d'étudiants, particulièrement ceux du département d'hydraulique.

Nous remercions nos promoteurs Mr. B. Remini et Mr. N. Nebache pour leurs conseils et aide durant l'élaboration du projet.

Nous exprimons nos sincères reconnaissances à Krime et Salah de la bibliothèque (E.N.P) ainsi qu'à notre ancienne secrétaire de département Cherifa et à Said du laboratoire d'hydraulique. Sans oublier Melle. S. Benmamar et Mrs A. Melboucy et A. Bermad pour leurs soutient et encouragements.

Nous aimerons exprimer notre profonde gratitude et notre profonde reconnaissance à Moh Touati et Mr Ait Bouziad Omar, ainsi qu'à toute l'équipe SACIP APC: Amara, Mekhlouf, Mhana, Abdelkader, Achour, Mohamed, Ali et Rabah, auprès des quels nous avons trouvé conseil, sympathie et encouragements.

Nous remercions Mr Saada, le responsable du laboratoire de génie minier ainsi que Melle N. Harbi du laboratoire de génie chimie de nous avoir accueillis au sein de leurs laboratoires.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Si le problème de transport solide par le courant s'avère être un problème hydraulique classique, celui causé par les houles et le courant est par contre moins étudié.

Dans ce sens, nous avons effectué une étude expérimentale sur fond mobile, afin de faire quelques prédictions sur ce phénomène au voisinage d'un fond marin ou estuaire.

Nos résultats nous permettent finalement de justifier les implications que peut avoir la houle sur le courant dans le domaine du transport sédimentaire.

Summary

If the problem of solid transport by current reveals to be a classical hydraulic problem, that caused both by current and waves is on the other hand less studied.

In this way, we have made an experimental study on movable ground, in order to do some predictions about this phenomenon near a sea-bed or estuary.

Finally, our results give us possibility to justify the implications that waves have on the current into the deposit transport field.

ملخص

إذا كانت مسألة النقل الصلب بالتيار اتضح أنها مسألة هيدروليكية كلاسيكية، فإن الذي يحدث بالأمواج و التيار معا هو بالمقابل مسألة معقدة.

في هذا الاتجاه، قمنا بإجراء دراسة تجريبية على قاع متحرك، لأجل القيام ببعض التوقعات على هذه الظاهرة بالقرب من قاع بحري أو مصب نهري.

نتائجنا تسمح لنا في النهاية بتبرير التضمنات التي يمكن للموجة ان تحدثها على التيار في ميدان النقل الرسوبي.

SOMMAIRE

Liste des symboles et abréviations

Liste des tableaux

Liste des photos

Liste des figures

Introduction générale..... 01

Etude bibliographique

INTRODUCTION..... 02

Premier chapitre : Comportement des sédiments sous l'action du courant

INTRODUCTION..... 03

I. PROPRIETES PHYSIQUES DES SEDIMENTS EN EAU CALME..... 04

I. 1. Vitesses de chute des particules élémentaires..... 04

I. 2. Vitesses de chute d'un ensemble de particules..... 05

I. 2. 1. Vitesse de chute entravée..... 05

I. 2. 2. Flocculation des fines particules..... 05

I. 3. Tassement des matériaux..... 06

I. 3. 1. Sédiments grossiers..... 06

I. 3. 2. Sédiments fins..... 06

I. 4. Cohésion et rhéologie des dépôts..... 07

I. 4. 1. Sédiments grossiers..... 07

I. 4. 2. Sédiments fins..... 07

I. 5. Le talus naturel d'équilibre des dépôts..... 09

I. 5. 1. Sédiments grossiers..... 09

I. 5. 2. Sédiments fins..... 10

II. DEBUT D'ENTRAINEMENT DES SEDIMENTS GROSSIERS..... 11

II. 1. Paramètres hydrauliques..... 11

II. 1. 1. Vitesses moyennes de l'écoulements..... 11

II. 1. 2. Force tractrice s'exerçant sur le fond..... 11

II. 1. 3. Vitesse de frottement sur le fond..... 12

II. 1. 4. Force tractrice de début d'entraînement..... 12

II. 1. 5. Relation entre les différents paramètres..... 12

II. 2. Paramètres adimensionnels..... 14

II. 2. 1. Reynolds étoilé..... 14

II. 2. 2. Paramètre du grains..... 14

II. 2. 3. Diamètre étoilé..... 14

II. 2. 4. Relation entre les différents paramètres..... 14

III. DEBUT D'ENTRAINEMENT DES ELEMENTS PELITIQUES..... 15

IV. DEBITS SOLIDE TRANSPORTES PAR LES COURANTS..... 16

IV. 1. Difficultés de mesure..... 16

IV. 2. Transport par charriage et saltation..... 16

IV. 2. 1. Formule de Du Boys..... 16

IV. 2. 2. Formule de Shields..... 17

IV. 2. 3. Formule de Meyer-Peter et Muler..... 17

IV. 2. 4. Formule de Yallin..... 17

IV. 2. 5. Formule d'Einstein-Brown..... 18

IV. 2. 6. Comparaison des formules..... 18

IV. 3. Transports en suspension..... 19

Deuxième chapitre : Théorie de la houle

INTRODUCTION.....	20
I. HOULE THEORIQUE.....	21
I. 1. Types de houles.....	21
I. 1. 1. Houles monochromatiques.....	21
I. 1. 2. Houles de Miche.....	21
I. 1. 3. Houles cnoidales.....	21
I. 1. 4. Ondes solitaires.....	21
I. 2. Caractéristiques des houles.....	23
I. 3. Trajectoire des particules liquides.....	24
I. 4. Vitesse des particules liquides et célérité.....	25
I. 5. Modèles mathématiques de la houle.....	26
A. Les hypothèses de base.....	26
B. Le problème.....	26
C. Les modèles.....	26
D. Les domaines d'utilisation.....	27
II. LA HOULE REELLE.....	28
II. 1. Houles formées.....	28
II. 2. Houles croisées.....	28
II. 3. Houles du vent.....	29
III. DEFORMATION DE LA HOULE AU COURS DE SA PROPAGATION.....	30
III. 1. déferlement.....	30
III. 2. Réflexion.....	34
III. 3. Réfraction.....	34
III. 4. Diffraction.....	36

Troisième chapitre : Comportement des sédiments sous l'action de la houle

INTRODUCTION.....	37
I. MOUVEMENTS D'EAU ENGENDRES PAR LA HOULE PRES DU FOND.....	38
I. 1. Vitesses alternatives sur les fonds.....	38
I. 2. Courants de translation et de compensation.....	40
I. 3. Courant littoral.....	40
I. 4. Courants de retour.....	41
I. 5. Courants d'expansion latérale.....	42
II. MOUVEMENTS DES FONDS MARINS ENGENDRES PAR LA HOULE.....	43
II. 1. Mise en oscillation des sédiments sous l'action des mouvements orbitaires.....	43
II. 1. 1. Sédiments grossiers.....	43
II. 1. 2. Sédiments fins.....	45
II. 2. Importance des volumes de matériaux brassés par la houle à différentes profondeurs.....	47
II. 3. Estimation des quantités de sable remis en suspension.....	47
III. MOUVEMENTS DES MATERIAUX PERPENDICULAIREMENT AU LITTORAL.....	48
III. 1. Sédiments grossiers.....	48
A. Pentes des plages.....	48
B. Epaisseur de la couche mobile.....	48
C. Importance des mouvements dans le profil.....	49
III. 2. Sédiments fins.....	49
A. Résultats de mesures au laboratoire.....	49
B. Observation en nature.....	50
IV. MOUVEMENTS DES MATERIAUX PARALLELEMENT AU RIVAGE.....	51
IV. 1. Sédiments grossiers.....	51
A. Description du phénomène.....	51
B. Transport par jet de rive.....	51
C. Transport au voisinage du déferlement.....	52
D. Estimation du transit littoral.....	53
IV. 2. Sédiments fins.....	54

Etude expérimentale

INTRODUCTION.....	55
I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	56
II. TECHNIQUES DE MESURES.....	56

Première étude : Etude à fond fixe

I. POSITION DU PROBLEME.....	58
II. CONDITIONS EXPERIMENTALES.....	59
III. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	60
III. 1. Vitesse de propagation, amplitude, longueur d'onde.....	60
III. 2. Contrainte de frottement au voisinage du fond.....	63
III. 3. Domaine de validité.....	65
IV. CONCLUSIONS DE L'ETUDE.....	66

Deuxième étude : Etude à fond mobile - courant

I. POSITION DU PROBLEME.....	67
II. CONDITIONS EXPERIMENTALES.....	69
III. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	69
III. 1. Etude qualitative.....	69
III. 2. Etude quantitative.....	71
IV. CONCLUSIONS DE L'ETUDE.....	75

Troisième étude : Etude à fond mobile - courant & houle

I. POSITION DU PROBLEME.....	76
II. CONDITIONS EXPERIMENTALES.....	76
III. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	78
IV. CONCLUSIONS DE L'ETUDE.....	86

Conclusion générale et perspectives.....	87
--	----

ANNEXES

ANNEXE 1 : Modèles mathématiques de la houle.....	88
ANNEXE 2 : Détermination du diamètre moyen.....	94
ANNEXE 3 : Détermination de la masse volumique.....	96

Glossaire

Références bibliographiques

Liste des symboles et abréviations

Paramètres

c	[LT ⁻¹]	célérité des houles
T _s	[ML ⁻³]	concentration
C _x	[-]	coefficient de trainée
C	[-]	coefficient de Chezy
d	[L]	diamètre de la particule solide
E	[MLT ⁻²]	énergie de la houle
g	[LT ⁻²]	accélération de la pesanteur
G	[L ² T ⁻²]	paramètre du grain
H	[L]	hauteur des lames
H _d	[L]	hauteur de la houle au déferlement
h	[L]	profondeur de l'eau
h _d	[L]	profondeur de déferlement
i	[-]	pente du fond
L	[L]	longueur d'onde de la houle
P	[ML ² T ⁻²]	pression de l'eau en un point
Q _s	[L ³ T ⁻¹]	débit solide en volume
q _s	[MT ⁻¹]	débit solide en poids / courant
q _s '	[MT ⁻¹]	débit solide en poids / courant-houle
Q	[L ³ T ⁻¹]	débit liquide en volume
Re	[-]	nombre de Reynolds
Re _w	[-]	nombre de Reynolds rapporté à la vitesse de chute
R _H	[L]	rayon hydraulique
t	[T]	temps
T	[T]	période de la houle
U _*	[LT ⁻¹]	vitesse de cisaillement sur le fond
U _{Max}	[LT ⁻¹]	vitesse orbitale maximale
U	[LT ⁻¹]	vitesse moyenne de l'écoulement horizontal
W	[LT ⁻¹]	vitesse de chute de la particule solide
α	[°]	obliquité de la houle
ν	[L ² T ⁻¹]	viscosité cinématique
γ	[-]	cambrure de la houle
γ _s	[ML ⁻² T ⁻²]	poids volumique du matériaux
γ ₀	[ML ⁻² T ⁻²]	poids volumique de l'eau
ρ	[ML ⁻²]	masse volumique de l'eau
ρ _s	[ML ⁻²]	masse volumique des particules solides
ε	[-]	densité relative
τ ₀	[ML ⁻² T ⁻²]	contrainte de cisaillement sur le fond
τ _{cr}	[ML ⁻² T ⁻²]	contrainte de cisaillement critique

Indices

c	courant
ch	interaction courant-houle
h	houle
s	sédiment

Abréviations

FCH	expérience sur fond fixe sous l'action combinée houle-courant
MC	expérience sur fond mobile sous l'action du courant
MCH	expérience sur fond mobile sous l'action combinée houle-courant

Liste des tableaux

Page

Etude bibliographique

Tableau B1 :	Vitesses de chute pour différents régimes d'écoulements.....	04
Tableau B2 :	Loi de début d'entraînement des sédiments.....	14
Tableau B3 :	Variation de la cambrure limite des lames déferlantes suivant la pente.....	33
Tableau B4 :	Relation entre la pente d'une plage et le diamètre des grains.....	48
Tableau B5 :	Triage granulométrique dans le profil.....	48

Etude expérimentale

Tableau E1 :	Expériences sur fond fixe : courant et houle.....	59
Tableau E2 :	Type des houles expérimentales.....	61
Tableau E3 :	Critère d'un régime d'écoulement combiné courant-houle.....	64
Tableau E4 :	Classification des particules de sédiments.....	68
Tableau E5 :	Expériences sur fond mobile : courant.....	69
Tableau E6 :	Evolution du lit durant les expériences à fond mobile sous l'action du courant.....	71
Tableau E7 :	Expériences sur fond mobile : courant-houle.....	78
Tableau E8 :	Présentation des résultats pour les expériences MC5 et MCH1.....	83

Annexes

Tableau A1 :	Résultats du tamisage.....	95
Tableau A2 :	Présentation des résultats du tamisage.....	95

Liste des Photos

	<u>Page</u>
Photo 1 : Plate forme experimentale.....	57
Photo 2 : Générateur de houles.....	57
Photo 3 : Etat du lit au début de charriage (courant).....	70
Photo 4 : Etat du lit à la fin de charriage (courant).....	70
Photo 5 : Rides de fond (courant).....	70
Photo 6 : Evolution du lit (courant et houle).....	77
Photo 7 : Rides de fond (courant et houle).....	77
Photo 8 : Phénomène de saltation (courant et houle).....	77

Liste des figures

	<u>Page</u>
<u>Etude bibliographique</u>	
Figure B1 : Influence de la concentration des particules solides sur la vitesse de chute entravée.....	05
Figure B2 : Influence de la concentration sur la vitesse de chute.....	05
Figure B3 : Influence de la salinité sur la vitesse de chute.....	05
Figure B4 : Variation de la concentration en fonction du temps.....	07
Figure B5 : Variation de la concentration en fonction de la profondeur.....	07
Figure B6 : Variation de la rigidité initiale en fonction de la concentration.....	08
Figure B7 : Exemple de pentes d'équilibre d'un talus	09
Figure B8 : Variation de l'angle du talus sous l'eau en fonction de l'angle de frottement interne.....	09
Figure B9 : Pente d'équilibre des vases immergées et émergées.....	10
Figure B10 : Vitesse moyenne nécessaire pour entraîner une particule	13
Figure B11 : Influence du milieu aqueux sur l'érosion des vases	15
Figure B12 : Comparaison des formules de charriage.....	18
Figure B13 : Contraintes de cisaillements sur fond de vase.....	19
Figure B14 : Domaines d'utilisation des différents types de houles.....	22
Figure B15 : Forme de la surface libre des houles.....	22
Figure B16 : Caractéristiques de la houle.....	23
Figure B17 : Trajectoires des particules liquides.....	24
Figure B18 : Domaines d'utilisation des différentes théories de la houle.....	27
Figure B19a: Profil des houles formées.....	29
Figure B19b: Crêtes des houles formées	29
Figure B20a: Profile des houles du vent.....	29
Figure B20b: Crêtes des houles du vent.....	29
Figure B21 : Types de déferlements.....	31
Figure B22 : Forme limite de la houle.....	32
Figure B23 : Réfraction de la houle.....	35
Figure B24 : Détermination de U_{max} et de U_*	39
Figure B25 : Mouvements orbitaires.....	39

Figure B26 :	Courants d'entraînement dans la masse fluide.....	
Figure B27 :	Processus du transport littoral induit par une houle oblique.....	40
Figure B28 :	Schéma général des courants près de la côte.....	42
Figure B29 :	Début d'entraînement des sédiments fins sous l'action de la houle.....	44
Figure B30 :	Mouvements de vase sous la houle.....	46
Figure B31 :	Remaniements théoriques à différentes profondeurs en fonction de l'amplitude.....	47
Figure B32 :	Déplacement d'une vase fluide ou plastique sous l'action de la houle.....	49
Figure B33 :	Transit des galets en fonction de l'amplitude et de l'angle d'approche de la houle.....	51
Figure B24 :	Schéma du mouvement des grains dans les brisants.....	52

Etude expérimentale

Figure E1 :	Cordonnées du système (expériences à fond fixe - courant et houle).....	58
Figure E2 :	Distribution de vitesse générée par la houle.....	58
Figure E3 :	Distribution de vitesse générée par le courant.....	58
Figure E4 :	Célérité des houles générées.....	60
Figure E5 :	Domaines d'utilisation des différents types de houles expérimentales.....	61
Figure E6 :	Vérification des vitesses.....	62
Figure E7 :	Variation de la contrainte sur le fond en fonction de la profondeur.....	63
Figure E8 :	Changement de la longueur d'onde de la houle en fonction du courant.....	65
Figure E9 :	Système de coordonnées (expériences à fond mobile - courant).....	67
Figure E10 :	Présentations des mesures expérimentales MC.....	71
Figure E11 :	Présentation des mesures de l'expérience MC1.....	72
Figure E12 :	Présentation des mesures de l'expérience MC2.....	73
Figure E13 :	Présentation des mesures de l'expérience MC3.....	73
Figure E14 :	Présentation des mesures de l'expérience MC4.....	74
Figure E15 :	Cordonnées du système (fond mobile - courant et houle).....	76
Figure E16 :	Débit charrié : expériences MC5 et MCH1.....	78
Figure E17 :	Comparaison des équations du charriage avec les expériences MC5 et MCH1.....	79
Figure E17a :	Zoom de la figure E17.....	79
Figure E18 :	Détermination de κ : cas du courant.....	81
Figure E19 :	Abaque de l'équation (E.3.4).....	82
Figure E20 :	Abaque de l'équation (E.3.4) pour les expériences MC5 et MCH1.....	84
Figure E21 :	Détermination de κ : cas du courant-houle.....	84
Figure E22 :	Débit solide : comparaison des expériences MC5, MCH1 et de l'équation (E.3.4).....	85

Annexes

Figure A1	Houle de GESTNER.....	88
Figure A2	Trajectoire des particules liquides.....	89
Figure A3	Houle de STOCKES.....	90
Figure A4	Houle au deuxième ordre d'approximation.....	92
Figure A5	Houle irrotationnelle.....	92
Figure A6	Houle rotationnelle.....	93
Figure A7	Courbe granulométrique.....	95
Figure A8	Détermination de la masse volumique : Procédé expérimental.....	96

Sous l'action du courant, ou des houles, les particules solides qui forment les sédiments que l'on rencontre dans les fleuves et le long des littoraux, peuvent être arrachées des fonds, entraînées en suspension ou par charriage.

Dans les régions côtières, marines ou estuaires, il existe différentes formes d'écoulements. La houle seule ou le couplage de la houle et du courant apparaissent comme les types d'écoulements les plus directement liés à l'arrachage et à l'entraînement des sédiments, l'ensemble de ces phénomènes génère par la suite des problèmes multiples tels que la déformation des plages et l'ensablement des ports.

De même, pour les grands canaux à tronçons rectilignes, il y a possibilité de formation de vagues, celles-ci influent considérablement sur l'affouillement du lit, provoquant des érosions ou des dépôts préjudiciables à l'équilibre naturel du site. Ainsi se pose le problème de prévision du transport solide par les vagues et le courant dans les grands canaux, rivières et retenues.

Objectif

Afin d'apporter une contribution à l'étude des problèmes liés aux phénomènes de transport sédimentaire dans le domaine d'hydraulique, une compréhension des phénomènes hydrodynamiques où fluides et solides réagissent l'un sur l'autre s'avère nécessaire.

Le but de notre étude est donc de faire une analyse expérimentale du charriage que peut générer les différents écoulements : courant seul et houle combinée avec courant, permettant ainsi de quantifier les phénomènes complexes mis en jeu.

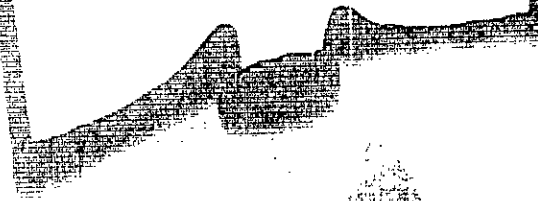
**Etude
Bibliographique**

La bibliographie sur un sujet aussi complexe qu'une étude du transport sédimentaire par l'action de la houle et/ou du courant, est assez vaste dans le cas du courant seul et un peu moins dans le cas de la houle seule, et peu développée dans le cas de l'interaction houle-courant.

Dans cette étude bibliographique, nous traiterons séparément les cas courant seul et houle seule, afin de comprendre les conséquences de ces deux types d'écoulements sur un fond de sédiments.

Premier Chapitre

Comportement des sédiments dans un courant



Une particule sédimentaire déposée sur les fonds ne peut être mise en mouvement, que si les forces hydrodynamiques qui agissent sur elle sont supérieures aux forces stabilisatrices de la pesanteur propres à l'élément considéré et à son imbrication dans l'ensemble des éléments.

Arrachées donc aux fond, les particules solides peuvent être transportées en charriage ou en suspension sur des distances plus ou moins grandes suivant les caractéristiques des fluides en mouvement et les sols sur lesquels ils coulent.

On dit qu'il y a charriage quand il y a progression de tout ou d'une partie des granulats dans le sens du courant en glissant et en roulant (ou bien en sautant légèrement) sur le fond.

On dit, par contre, qu'il y a saltation quand il y a une suite d'envols et de retombées successives à des distances relativement appréciables.

On dit, enfin, qu'il y a suspension quand les granulats progressent dans le sens du courant au sein même du liquide sans jamais retomber, sauf très épisodiquement sur le fond.

Les transports en suspension sont relativement faciles à mesurer et il suffit de connaître les vitesses et la turbidité des eaux. Par contre, les transports par charriage et saltation sont beaucoup plus difficiles à apprécier, et les techniques utilisées, donnent une évaluation globale du transport (pièges à sable, traceurs radioactifs, ..ect).

De même, à partir de l'évaluation du transport en suspension, on peut apprécier pour certaines catégories de rivières l'ordre de grandeur du charriage. Ce dernier serait d'environ 10 à 15% du transport en suspension.

Pour palier à ces difficultés de mesure, des efforts importants ont été réalisés, pour essayer à l'aide de formules de charriage de dégager des ordres de grandeur du transport solide.

I. PROPRIETES PHYSIQUES DES SEDIMENTS EN EAU CALME

I. 1. VITESSES DE CHUTE DES PARTICULES ELEMENTAIRES (W)

En eau calme, une particule solide (caractérisée par son diamètre, sa densité, sa forme et son état de surface) tombe sous l'effet de la gravité en étant retenue par la traînée hydrodynamique due à sa vitesse de chute W . Cette dernière est constante lorsqu'il y a équilibre entre [4] :

- D'une part, le poids apparent de la particule dans l'eau :

$$P = \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho) g d^3 \quad (\text{B.1.1})$$

- D'autre part, la traînée hydrodynamique :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_x \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) W^2 \quad (\text{B.1.2})$$

C_x : coefficient de traînée fonction du nombre de Reynolds de chute :

$$\text{Re}_w = \frac{d W}{\nu} \quad (\text{B.1.3})$$

Par ailleurs, suivant que le mouvement relatif du fluide par rapport à la particule est lent, moyen ou rapide, l'écoulement sera laminaire, semi-turbulent ou turbulent. Par suite, la vitesse de chute sera modifiée (tableau B1).

Tableau B1 : Vitesses de chute pour les différents régimes d'écoulements

Régime d'écoulement	LAMINAIRE (Stokes)	SEMI-TURBULENT (Allen)	TURBULENT (Newton-Rittinger)
Reynolds Re_w	$\text{Re}_w < 1$	$1 < \text{Re}_w < 1000$	$\text{Re}_w > 1000$
Type de particule	Vases, Limons et Argiles	Sables	Graviers, cailloux et Galets
Diamètre (mm)	$d < 0.12$	$0.12 < d < 2$	$d > 2$
Vitesse de chute W	$\frac{1}{18} \omega d^2 \frac{g}{\nu}$	$125 d$	$\sqrt{\frac{8}{3}} \omega d$
Coefficient de traînée C_x	$\frac{24}{\text{Re}_w}$	$\frac{2U}{\text{Re}_w} + C_0$	0.5

Remarques [14] :

- Notons l'influence de la viscosité de l'eau sur la vitesse de chute des particules, puisque en nature la décantation risque de ne pas être la même en été et en hiver pour les mêmes éléments fins.
- Pour les galets, il faudra avoir à l'esprit que leurs dimensions les mettent en dehors de la couche limite sur les fonds.

I. 2. VITESSES DE CHUTE D'UN ENSEMBLE DE PARTICULES

I. 2. 1. VITESSES DE CHUTE ENTRAVEE (W_e)

Si les particules tombent simultanément dans un fluide elles pourront se gêner, la vitesse de chute sera entravée.

Le rapport entre la vitesse de chute entravée et la vitesse de chute libre (W_e/W) est d'autant plus petit que la concentration de la suspension est grande, et la densité des particules est plus petite (figure B1).

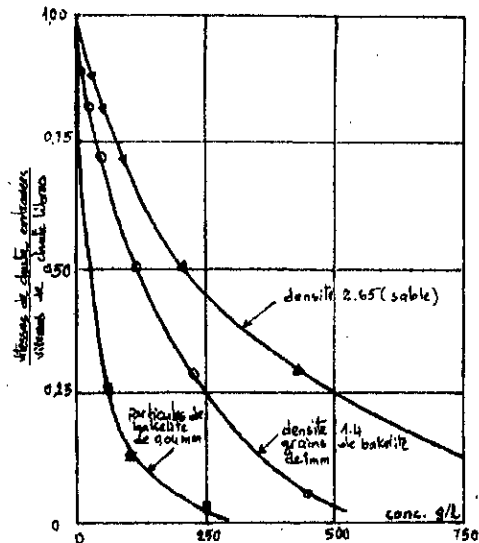


Figure B1

Influence de la concentration des particules solides sur la vitesse de chute entravée d'après GRANDIN

I. 2. 2. FLOCCULATION DES FINES PARTICULES

Les éléments péltiques (poudres, limons, vases et argiles) pourront s'agglomérer entre elles pour former des agrégats plus ou moins volumineux, riches en eau interstitielle, c'est la *floculation*.

Ce phénomène est d'autant plus poussé que la concentration en particules solides, la salinité et la température sont élevées (figures B2 et B3).

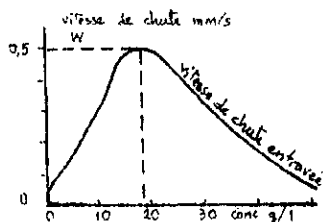


Figure B2 : Influence de la concentration sur la vitesse de chute

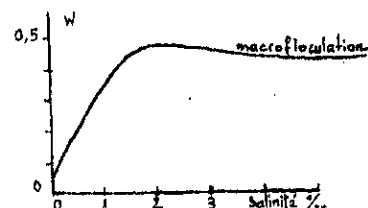


Figure B3 : Influence de la salinité sur la vitesse de chute

I. 3. TASSEMENT DES MATERIAUX

I. 3. 1. SEDIMENTS GROSSIERS

Les sédiments grossiers du type sables, galets et graviers, une fois déposés sur les fonds ne se tassent pratiquement pas, s'ils subissent une "mise en place" et une imbrication entre eux, on peut admettre qu'ils sont stables dans le temps (pas de consolidation).

I. 3. 2. SEDIMENTS FINS

Contrairement aux sédiments grossiers, ceux-ci se tassent en perdant leur eau interstitielle, et se consolident en passant d'un état fluide (suspension floculé très mobile) à un état plastique (phase d'élimination de l'eau interstitielle), puis solide (arrangement des particules avec évacuation difficile de l'eau) [4].

La concentration moyenne T_s du culôt de tassement, quelque soit son état de tassement croit logarithmiquement avec le temps (*figure B4*).

$$T_s = \alpha \text{Log } t + \beta \quad (\text{B.1.4})$$

α : facteur qui dépend principalement du diamètre des particules.

β : facteur lié au milieu aqueux.

A l'intérieur du culôt de tassement, la concentration dépend de la profondeur h suivant la loi (*figure B5*):

$$T_s = T_{so} + n \text{Log } h \quad (\text{B.1.5})$$

T_{so} : étant la concentration en surface.

n : paramètre dépendant de la nature du complexe sol-eau.

Remarques [4] :

- Le tassement est un phénomène lent; par exemple après 3 mois, la concentration est seulement le double de la concentration initiale;
- Le tassement est initialement plus rapide en eau douce; mais après environ 2 mois de tassement les résultats atteints sont sensiblement les mêmes;
- De même, le tassement est initialement plus rapide pour un milieu peu concentré, et la concentration limite est d'autant plus élevée que la concentration initiale est faible.
- Il est possible de modifier le tassement en agissant sur le milieu aqueux ou sur la charge électrique des particules.

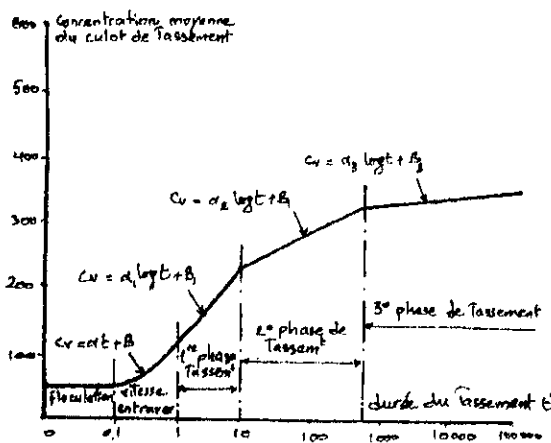


Figure B4 : Variation de la concentration en fonction du temps

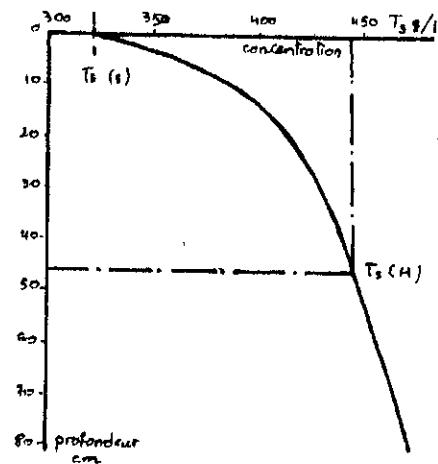


Figure B5 : Variation de la concentration en fonction de la profondeur

I. 4. COHESION ET RHEOLOGIE DES DEPOTS

I. 4. 1. SEDIMENTS GROSSIERS

Les sédiments grossiers n'ont pas de cohésion propre mais leur équilibre dépend de leur angle de frottement interne ϕ qui peut être déduit des contraintes normales σ_n et tangentielles σ_t [14].

$$\sigma_t = \tan \phi \sigma_n \quad (\text{B.1.6})$$

I. 4. 2. SEDIMENTS FINS

Plus la concentration en particules est plus forte et plus le milieu aqueux est floculant, plus la cohésion de ces éléments est importante.

On peut quantifier l'état d'un dépôt en mesurant sa "rigidité" τ_y qui permettra de prévoir son comportement sous des actions hydrodynamiques.

On appelle "rigidité" d'un matériau cohésif le couple qu'il faut développer pour faire tourner un cylindre lisse d'un diamètre donné dans la masse de ce matériau, lorsque ce dernier se trouve en dépôt dans l'eau [10].

La rigidité initiale est d'autant plus grande que les particules élémentaires sont plus petites. Elle varie très rapidement avec la concentration (figure B6).

$$\tau_y = n \cdot T_s^{4 \text{ à } 5} \quad (\text{B.1.7})$$

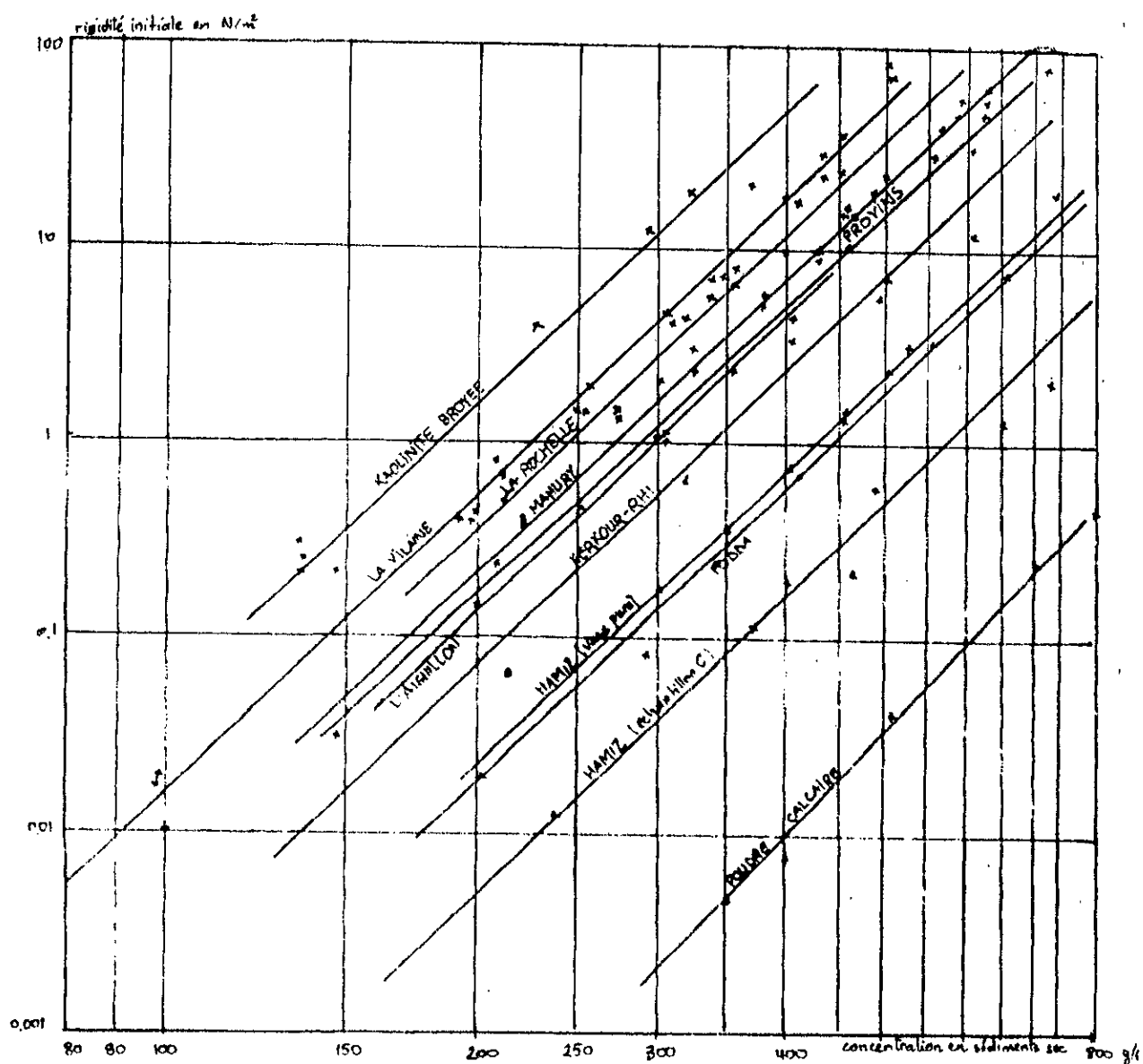


Figure B6

Variation de la rigidité initiale en fonction de la concentration

I. 5. LE TALUS NATUREL D'EQUILIBRE DES DEPOTS

I. 5. 1. SEDIMENTS GROSSIERS

Pour les éléments grossiers, n'ayant pas de rigidité initiale propre ou de cohésion, cette pente ne sera autre que l'angle de frottement du matériau.

D'une façon plus générale on admet que sous l'eau [14] :

- La pente d'équilibre du dépôt croît comme la racine carrée du diamètre des éléments moyens

$$\operatorname{tg} \theta = k (d_{50})^{1/2} \quad (\text{B.1.8})$$

- La pente croît avec la diminution de la densité du matériau (figure B7)
- Lorsque le matériau est homogène et isotrope, l'angle de stabilité θ est inférieur à l'angle de frottement interne ϕ (figure B8), on a :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \phi}{1+f} \quad (\text{B.1.9a})$$

$$f = n \frac{\rho_s}{\rho} \quad (\text{B.1.9b})$$

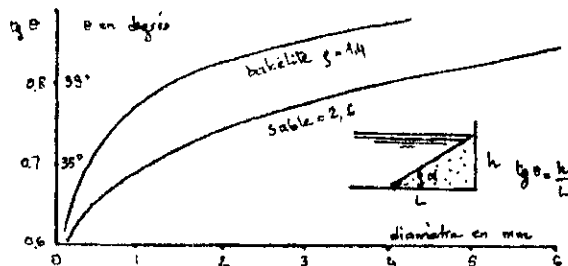


Figure B7 : Exemple de pentes d'équilibre d'un talus

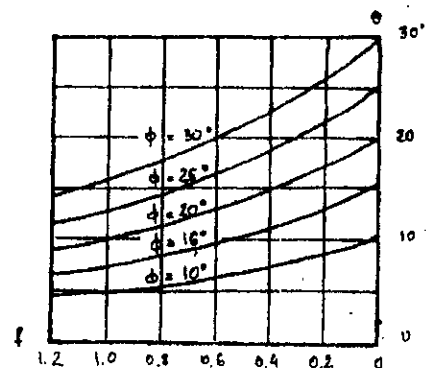


Figure B8 : Variation de l'angle du talus sous l'eau en fonction de l'angle de frottement interne

I. 5.2. SEDIMENTS FINS

Le "talus naturel d'équilibre" des limons et des vases dans l'eau, dépend de leur nature sédimentologique, de leur rigidité initiale, de leur concentration initiale et de la composition chimique de l'eau (milieu aqueux) [14].

Les talus naturels d'équilibre des vases sableuses sont pratiquement les mêmes lorsque celles-ci contiennent moins de 30% d'élément sableux [4].

Pour une même concentration en particules, un talus émergé présentera une pente d'équilibre inférieure à celle d'un talus immergé (*figure B9*).

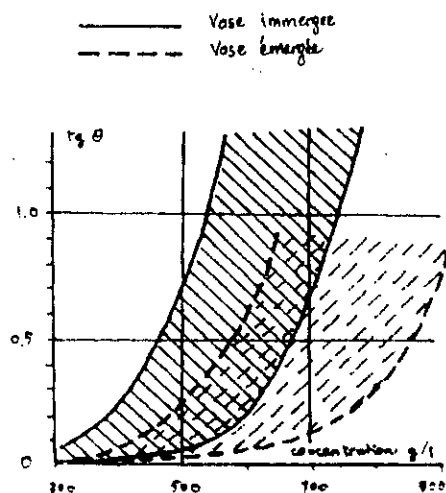


Figure B9

Pente d'équilibre des vases immergées et émergées

II. DEBUT D'ENTRAÎNEMENT DES SEDIMENTS GROSSIERS

II. 1. PARAMETRES HYDRAULIQUES

II. 1. 1. VITESSES MOYENNES DE L'ÉCOULEMENT

La vitesse d'un courant peut être donnée par la formule de Manning-Strickler :

$$\bar{U} = k R_H^{2/3} i^{1/2} \quad (\text{B.1.10})$$

\bar{U} : Vitesse moyenne du fluide

R_H : Rayon hydraulique

i : Pente de la ligne d'eau

k : Coefficient de Manning-Strickler (voisin de 100 pour un sol parfaitement lisse)

Elle peut être aussi, donnée simplement par le rapport :

$$\bar{U} = \frac{Q}{S} \quad (\text{B.1.11})$$

Q : Débit liquide

S : Section transversale

Ce paramètre nous permet d'approcher la vitesse critique d'entraînement d'un grain U_c qui dépend de la hauteur d'eau h au-dessus du matériau :

$$\bar{U}_c = f h^{1/6} \quad (\text{B.1.12})$$

II. 1. 2. FORCE TRACTRICE S'EXERCANT SUR LE FOND

Le début d'entraînement d'un grain peut être caractérisé aussi bien par la vitesse critique d'érosion, que par la force tractrice τ_0 s'exerçant sur les fonds, donnée par [10] :

$$\tau_0 = \rho g R_H i \quad (\text{B.1.13})$$

ρ : Masse spécifique de l'eau [kg/m^3]

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2]

R_H : Rayon hydraulique [m]

i : Pente de la ligne d'eau [m/m]

II. 1. 3. VITESSE DE FROTTEMENT SUR LE FOND

De même, il est possible de rattacher le début d'entraînement (d'érosion) d'une particule à la vitesse de frottement U_* déduite des mesures de vitesses U_y au-dessus des fonds, au biais de l'expression suivante :

$$\frac{U_y}{U_*} = 5.75 \operatorname{Log} \left(\frac{y}{0.108 \frac{v}{U_*} + 0.033 k_s} \right) \quad \text{pour } y \leq 0.16 h \quad (\text{B.1.14})$$

U_y : La vitesse mesurée à une distance y du fond

k_s : Coefficient de rugosité de Nikuradse

II. 1. 4 FORCE TRACTRICE DE DEBUT D'ENTRAINEMENT

Le début d'entraînement d'une particule sédimentaire nécessite une force tractrice, ou contrainte tangentielle critique τ_c permettant sa mise en mouvement [17] :

$$\tau_c = A (\gamma_s - \gamma_0) d_{s_0} \quad (\text{B.1.15})$$

τ_c : [N/m^2]

γ_s et γ_0 : poids volumiques du matériau et du fluide [$\gamma = \rho g$]

d : Diamètre moyen du grain (mm)

A : Paramètre compris entre 0.04 et 0.06 (moyenne 0.05)

Au fait, la valeur exacte de la force tractrice de début d'entraînement dépend du critère que l'on s'est fixé pour caractériser le mouvement. Suivant que l'on prend comme définition le départ d'un grain, de quelques grains ou d'un mouvement généralisé [14].

II. 1. 5. RELATION ENTRE LES DIFFERENT PARAMETRES

La vitesse de frottement U_* est rattachée à la force tractrice τ_0 par l'expression

$$U_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} = (g R_H i)^{1/2} \quad (\text{B.1.16})$$

Cette vitesse de frottement, peut également être rattachée en régime uniforme à la vitesse moyenne \bar{U} par le coefficient C de Chezy :

$$\frac{\bar{U}}{U_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{k R_H^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad (\text{B.1.17})$$

$$C = 24 \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \quad (\text{B.1.18})$$

Connaissant la force tractrice, on peut en déduire la vitesse de frottement U , et la vitesse moyenne \bar{U} nécessaires pour déplacer une particule.

Ces paramètres permettent de caractériser l'écoulement et de définir la mise en mouvement d'une particule solide par des mesures du débit, de pente de la ligne d'eau, ou de la répartition des vitesses au-dessus des fonds.

En admettant une répartition logarithmique des vitesses au-dessus des fonds, on peut apprécier la vitesse moyenne d'entraînement d'une particule déterminée pour différentes hauteurs d'eau (*figure B10*).

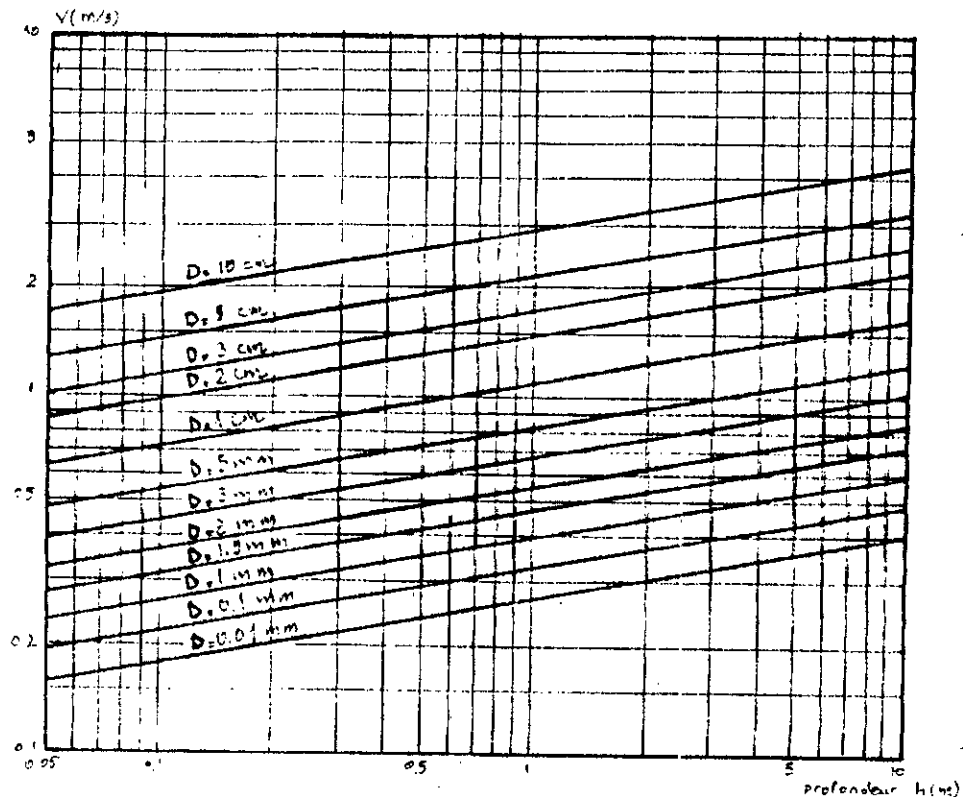


Figure B10

Vitesse moyenne nécessaire pour entraîner une particule

Dans le cas naturel (mer) la répartition des vitesses (dues aux courants de marées) n'est pas logarithmique, et les vitesses d'érosion par conséquent, sont plus faibles que celles citées, pour une même profondeur [14].

II. 2. PARAMETRES ADIMENSIONNELS

II. 2. 1. REYNOLDS ETOILE (Re_*)

C'est le nombre de Reynolds rapporté à un grain sphérique de diamètre d

$$Re_* = \frac{U_* d}{\nu} \quad (\text{B.1.19})$$

II. 2. 2. PARAMETRE DU GRAIN (G)

Introduit par J.VALEMBOIS (1960) [C.E.R.C], caractérisant le comportement des grains dans les fluides

$$G = \frac{Re_*^2}{\tau_0} = \frac{\rho g d^3}{\nu^2} \quad (\text{B.1.20})$$

II. 2. 3. DIAMETRE ETOILE (d_*)

Introduit par BONNEFILLE, il est appelé aussi le diamètre sédimentologique

$$d_* = G^{1/3} = \left(\frac{\rho g}{\nu^2} \right)^{1/3} d \quad (\text{B.1.21})$$

II. 2. 4. RELATION ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES

Le début d'entraînement correspond à :

$$d_*^3 = f(Re_*^2) \quad (\text{B.1.22})$$

A priori f peut dépendre de la nature du fond (diamètre, densité relative, forme, granulométrie des grains). Mais l'expérience [4] montre que dans le cas de grains homogènes non cohésifs f ne dépend que du diamètre d , caractéristique des matériaux du fond, en mettant en évidence les relations linéaires entre Re_* et d_* .

Tableau B2 : Loi de début d'entraînement des sédiments

$0.3 < Re_* < 12$	$d_* = 2.5 Re_*^{4/5}$
$12 < Re_* < 1000$	$d_* = 3.8 Re_*^{3/8}$
$Re_* > 1000$	$d_* = 2.7 Re_*^{2/3}$

Il est intéressant de remarquer que la valeur critique $Re_* = 12$ est atteinte quand le diamètre du grain est sensiblement égal à l'épaisseur de la couche limite laminaire (selon la théorie de Prandtl, là où l'écoulement est sous l'influence prépondérante de la viscosité) définie par :

$$\frac{U_* \sigma}{\nu} = 11.6 \# 12 \quad (\text{B.1.23})$$

III. DEBUT D'ENTRAINEMENT DES ELEMENTS PELITIQUES

Le paramètre important dans le début d'entraînement d'un fond cohésifs est la concentration des sédiments en surface (*figure B11*), donc, la rigidité initiale du dépôt d'où l'état de tassement et la nature du complexe sol-eau [14].

Etat initial : Des vases fraîchement déposées, ou des vases contenant des ions très hydratés, se comporteront comme un fluide dense et l'on constatera à l'interface de l'eau et de la vase la formation d'ondes qui pourront littéralement déferler en remettant une grosse partie des dépôts en suspension.

Début de consolidation : Des vases, ayant subi un début de consolidation et prenant un aspect plastique au contraire, offriront une certaine résistance au courant et l'on observera, au début de l'action du fluide des figures d'étirement du dépôt avec arrachement de coupons puis « explosion » du sol, suivant :

$$U_{*C} = k \tau_Y^{1/2} \quad (\text{B.1.24})$$

U_{*C} : Vitesse critique d'érosion [m/s]

τ_Y : rigidité initiale [N/m^2]

k : coefficient = 0.030 (entraînement généralisé)
= 0.016 (début entraînement)

Tassement prolongé : Après un stade de tassement prolongé les dépôts cohésifs présenteront une très grande résistance à l'érosion et seuls des copeaux et des blocs de vases pourront être entraînés pour les très grandes vitesses.

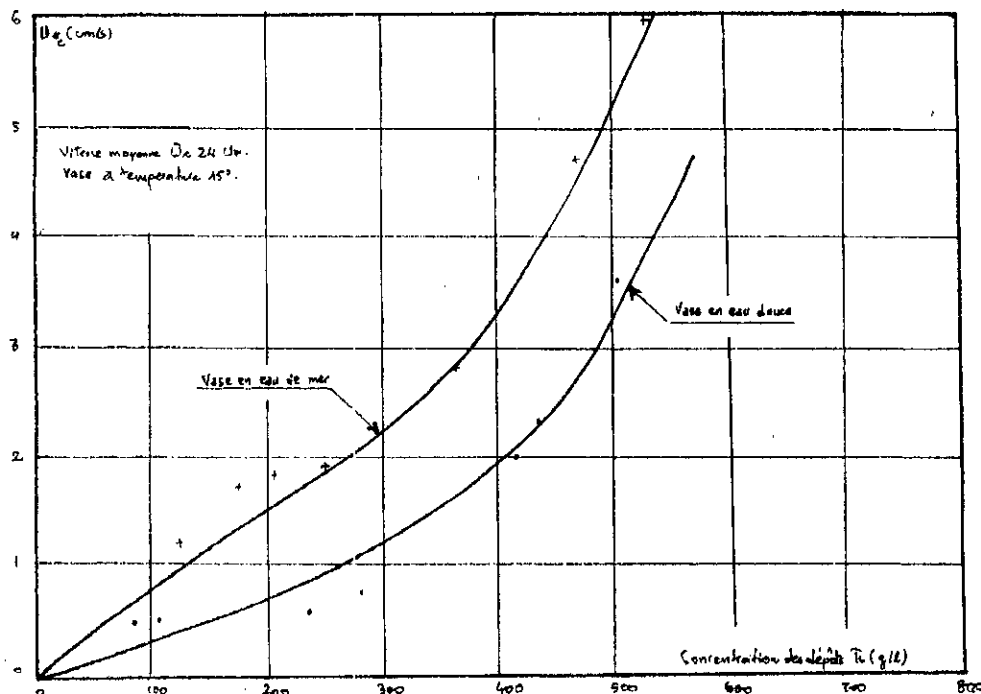


Figure B11 : Influence du milieu aqueux sur l'érosion des vases

IV. DEBITS SOLIDES TRANSPORTE PAR LES COURANTS

IV. 1. DIFFICULTES DE MESURE

Une bonne formule de transport doit répondre aux quatre critères fondamentaux suivants [14] :

- La formule doit décrire aussi bien que possible toutes les phases du transport. Les résultats doivent être exacts aussi bien pour les petits que pour les moyens et grands transports;
- La formule doit être utilisable pour un domaine aussi grand que possible, c'est-à-dire aussi bien pour les mesures en laboratoires que pour les cours d'eau naturels, pour les matériaux légers que pour les matériaux lourds, pour les matériaux uniformes que pour les matériaux à granulométrie étendue. Cette condition est surtout importante pour la technique des modèles réduits.
- La formule doit être de construction simple et doit pouvoir s'employer de manière aisée sans trop de diagrammes et sans calculs compliqués par ce que l'exactitude que l'on peut ainsi atteindre n'est qu'apparente par rapport à l'incertitude des données.
- La formule doit être homogène, c'est-à-dire que les dimensions des différents éléments doivent correspondre les unes aux autres et les constantes qui ont une dimension doivent être éliminées.

IV. 2. TRANSPORTS PAR CHARRIAGE ET SALTATION

Plusieurs formules ont été proposées pour le transport des sédiments par le charriage. Certaines sont basées sur le concept de force tractrice et vitesse moyenne donnant un débit solide nul lorsqu'un seuil de début entraînement n'a pas été franchi ($\tau \leq \tau_c$). D'autres sur le concept de la turbulence qui donnent une valeur continue de q_s au faible transport solide. Mais tous les essais furent réalisés dans les conditions d'écoulement supposés uniformes et permanent [10].

IV. 2. 1. FORMULE DE DU BOYS (1879)

Selon laquelle on admet que le transport s'effectue dans une série de couches superposées, d'une épaisseur approximativement égale au diamètre d'une particule, et que la vitesse des couches superficielles décroît linéairement [9].

$$q_s = \psi_D \tau_0 (\tau_0 - \tau_c) \quad (\text{B.1.25})$$

q_s : débit solide en poids par mètre de largeur

τ_0 : force tractrice sur le fond exercée par le fluide (kgf/m^2)

τ_c : force tractrice critique de début entraînement

ψ_D : coefficient représentatif de la mobilité des granules

IV. 2. 2. FORMULE DE SHIELDS (1936)

C'est la formule :

$$q_s = 109,1 \frac{(\tau_0 - \tau_c)}{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}\right)^2} d_{50} \quad (\text{B.1.26})$$

q_s : débit volume par unité de largeur du lit
 j : pente de la ligne d'énergie

La formule de *Shields* a été établie à l'aide d'essais en canal de laboratoire [9]. Les densités des sédiments utilisés étaient comprises entre 1.06 et 4.2 et les diamètres moyens allaient de 1.56 mm à 2.5 mm.

IV. 2. 3. FORMULE DE MEYER-PETER ET MULDER (1948)

Cette formule présente l'avantage de faire intervenir une correction de parois et une distinction entre la rugosité due aux berges et aux grains.

$$q_s = 8 \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right)^{1/2} (\tau_0 - \tau_c) \quad (\text{B.1.27})$$

La formule a été établie en canal pour des écoulements uniformes et pour des pentes comprises entre 0.04 et 0.02 [10].

La profondeur du canal dans les expériences allait de 1cm à 120cm. Le sédiment était tantôt uniforme, tantôt à granulométrie étendue. La gamme de ρ_s / ρ couverte allait de 1.25 (charbon) à 4 (baryte). d_{50} était dans les expériences entre 0.4mm et 30mm.

IV. 2. 4. FORMULE DE S.YALIN (1965)

Les recherches de *S.Yalin* sur la similitude des transports solides dans les écoulements liquides l'ont conduit à s'occuper des relations que certains rapports de similitude peuvent présenter entre eux, et à apprécier ces relations au cours d'essais comparatifs sur des granulats quartzeux de 1,35mm de diamètre et des granulats de polystyrène de 0.375mm de diamètre, en 1965 [9].

$$q_s = 0.003 \gamma_s d \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \left(\frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_0}\right)^3 \quad (\text{B.1.28})$$

γ_s : poids volumique du sédiment ($\gamma_s = \rho_s g$)
 q_s : débit solide en kg/m/s

IV. 2. 5. FORMULE D'EINSTEIN-BROWN (1950)

En se fondant sur l'expérience [10], et en se basant sur des considérations de probabilité, compte tenu des fluctuations turbulentes de la vitesse d'écoulement du liquide, *Einstein* est arrivé à la conclusion que les particules sont transportées le long du lit suivant une série d'étapes dont la longueur, est en moyenne, proportionnelle à la taille de la particule. Pour que le lit soit stable le taux de sédimentation doit être égal au taux d'érosion.

$$\phi = 40 \left(\frac{1}{\psi} \right)^3 \quad \text{pour} \quad \frac{1}{\psi} \geq 0.09 \quad (\text{B.1.29a})$$

$$\text{avec :} \quad \psi = \left(\frac{\gamma_s - \gamma_0}{\tau_0} \right) d \quad (\text{B.1.29b}) \quad \phi = \frac{q_s}{A \gamma_s} \left(\frac{1}{\varepsilon g d^3} \right)^{1/2} \quad (\text{B.1.29c})$$

$$A = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{\varepsilon g d^3}} - \sqrt{\frac{36 v^2}{\varepsilon g d^3}} \quad (\text{B.1.29d})$$

Les diamètres moyens des sédiments utilisés allaient de 0.3mm à 7mm

IV. 2. 6. COMPARAISON DES FORMULES

Pour pouvoir comparer ces formules, on les présente en fonction de :

$$\frac{Q_s}{\sqrt{\varepsilon g d^3}} \quad (\text{B.1.30}) \quad f = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_0) d} \quad (\text{B.1.31})$$

$$\text{avec :} \quad \varepsilon = (\rho_s - \rho) / \rho$$

En mettant ces équations sous une forme graphique on constate que pour une même valeur de la force tractrice et des caractéristiques du sédiment, on peut obtenir des écarts assez nets, entre les volumes transportés (*figure B12*).

$$\text{Kalinske: } Q_s / (\varepsilon g d^3)^{1/2} = 10 f^{5/2}$$

$$\text{Meyer-Peter: } Q_s / (\varepsilon g d^3)^{1/2} = 8 (f - 0.047)^{3/2}$$

$$\text{Einstein: } Q_s / (\varepsilon g d^3)^{1/2} = 32.6 f^3$$

$$\text{Shields: } Q_s / (\varepsilon g d^3)^{1/2} = 10 C_* (f - 0.076)$$

$$\text{Bonnefille: } Q_s / (\varepsilon g d^3)^{1/2} = 5.5 f^{3/2} (4.62 f^{1/2} - 1)^{1.25}$$

$$(\text{B.1.32, 33, 34, 35, 36})$$

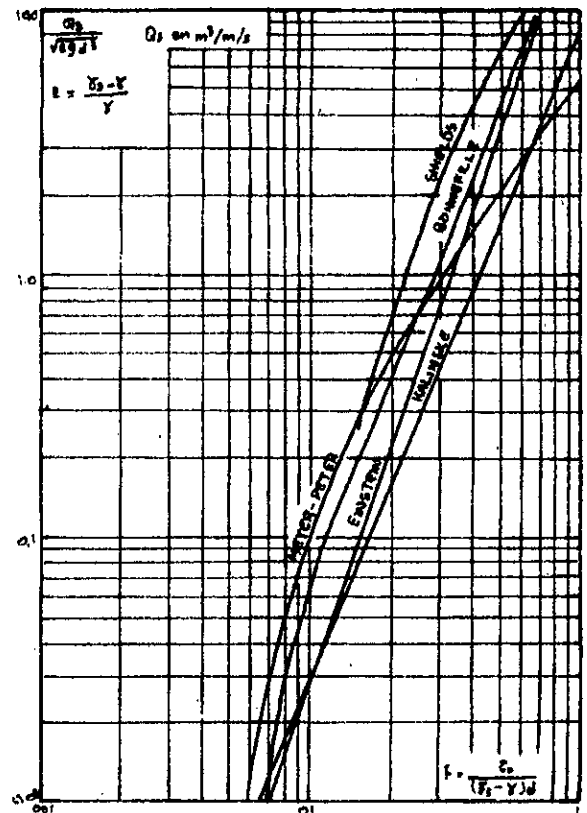


Figure B12 : Comparaison des formules

IV. 3. TRANSPORTS EN SUSPENSION

Pour qu'une vase s'écoule en suspension, elle doit se comporter comme un fluide homogène, dont les particules suivent parfaitement le mouvement de l'eau, donc d'après la mécanique des suspensions;

$$\frac{dU_*}{v} \leq 2 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/2} \quad (\text{B.1.37})$$

d : diamètre de la particule ($d \leq 0.012\text{mm}$)

U_* : vitesse de frottement

ρ : masse volumique de l'eau

ρ_s : masse volumique du sédiment

Une mixture de vase est plus dense que l'eau pure, et elle a une viscosité beaucoup plus forte. D'où pour qu'elle reste en suspension, l'écoulement doit être turbulent.

Les vases peuvent être transportées par les courants de rivières si le débit par unité de largeur, et le tirant d'eau (figure B13) sont supérieurs aux valeurs minimales suivantes [14]:

$$Q_{\min} = 500 v \frac{1 + \frac{\alpha}{2}}{(1 - \alpha)^2} \quad (\text{B.1.38})$$

$$\alpha = \frac{\tau_y}{\rho_m g h_0 i} \quad (\text{B.1.39})$$

γ : viscosité cinématique de la mixture

τ_y : rigidité initiale de la mixture, en dessous de laquelle il n'y a pas d'écoulement

ρ_m : densité de la mixture

h_0 : tirant d'eau

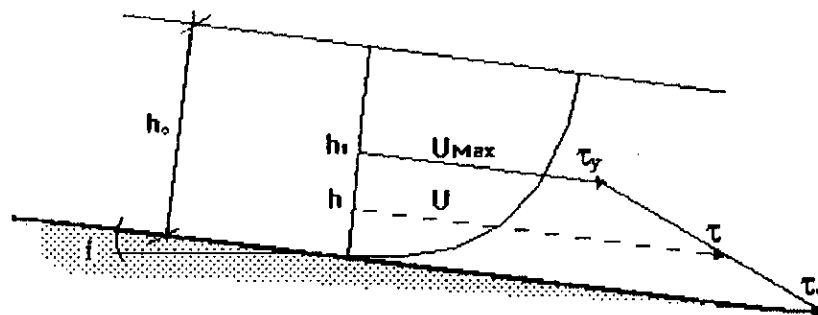
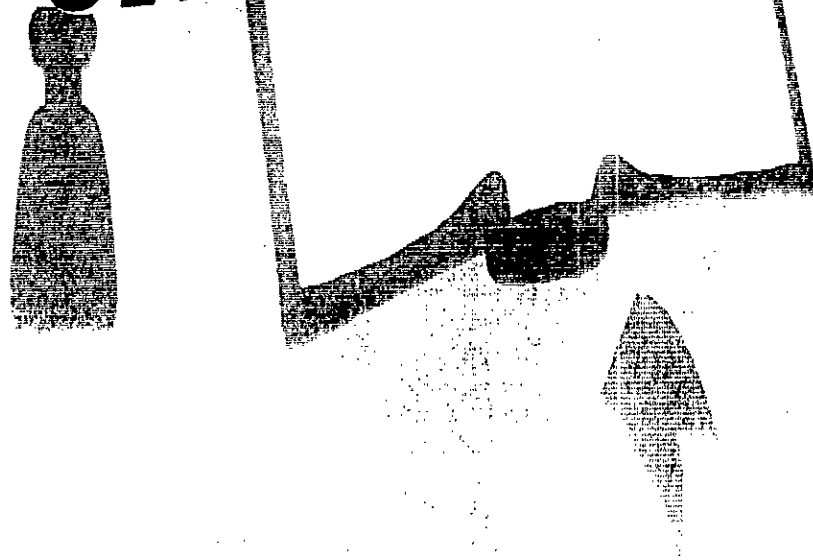


Figure B13 : Contraintes de cisaillement sur fond de vase

Deuxième Chapitre

Théorie de la houle



Le premier qui ait entrevu, par son génie, le mécanisme réelle de la houle marine fut LEONARD DE VINCI dans son livre d'or du mouvement et de la mesure de l'eau 1923.

Par d'heureuses images agrestes, il a le premier affirmé que, dans les ondes d'oscillation du large soulevé par les vents marins, il n'y a pas de translation de masses mais seulement propagation de mouvement.

Voici d'ailleurs comment il s'exprime : « Il arrive très souvent que la vague fuit le lieu de sa création, mais sans que l'eau change de place. Ne voit-on pas de même au mois de MAI courir par les compagnes d'ondulation que fait le vent dans les blés, et pourtant les blés n'ont pas changé de place ».

La nature oscillatoire de la houle du large est exprimée d'une autre façon par VINCI quand il traduit ce phénomène par une autre image heureuse : « plutôt tremblement que mouvement ».

I. HOULE THEORIQUE

L'agitation à la surface de la mer a pour cause essentielle le vent, quand celui-ci souffle avec une faible intensité il se produit des ondulations très faibles assimilables à des rides. Avec l'augmentation de l'intensité des vents, l'agitation à la surface de la mer augmente et les ondulations deviennent très nettes (agitation à trois dimensions).

A grande distance les vagues se propagent dans des étendues marines, où le vent n'a pas de rapport avec celui qui régnait dans la zone de génération : les lames sont alors constituées d'ondulations relativement régulières en direction comme en période, l'agitation devient un phénomène à deux dimensions, que l'on appelle la houle.

I. 1. TYPES DE HOULES (figures B14, B15)

I. 1. 1. HOULES MONOCHROMATIQUES

On les appelle aussi houles simples ou sinusoïdales, dont on doit l'étude mathématique à GESTNER (1809), POISSON(1816), STOKES(1847), STRUIK(1926), RAYLEIGH(1876), NEKRASSOV(1951), HENDRICKSON(1960), et qui doivent leur nom de sinusoïdales à la possibilité de représenter leur évolution en un point quelconque par une fonction sinusoïdale du temps sans aucune sorte d'harmonique.

I. 1. 2. LES HOULES DE MICHE

Modèle proposé pour une eau non hydrostatique, dont on doit la découverte à l'étude mathématique de MICHE (1944).

I. 1. 3. LES HOULES CNOIDALES

Très utile lorsque la profondeur d'eau est faible et la valeur du rapport H/L devient inférieur à 10%. Ces houles doivent leur nom à la fonction cosinus elliptique représentée traditionnellement par le symbole cn, dont on doit l'étude mathématique à KORTEWEG et DE-VRIES (1895), WIEGEL(1960)..etc

I. 1. 4. LES ONDES SOLITAIRES

On appelle onde solitaire une intumescence cylindrique de période temporelle et spatiale infinie qui se propage sans déformation, à une vitesse uniforme dans un milieu liquide de profondeur constante. Ce type de houle correspond donc au cas limite des houles cnoïdales de périodes et de longueurs d'ondes infinies, solution proposée par RUSSEL(1844), BOUSSINESQ(1871) et WEINSTEIN(1926).

En nature, on peut voir des lames venant du large passer progressivement du stade de la houle sinusoïdale à celui de la houle de MICHE, puis de la houle cnoïdale et de l'onde solitaire avant de se briser et de déferler lorsqu'elles arrivent sur les plages en pente douce.

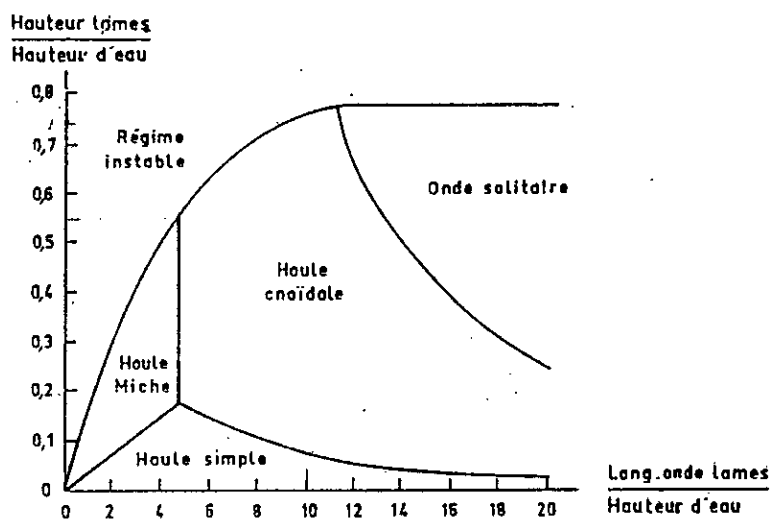


Figure B14 : Domaines d'utilisation des différents types de houles

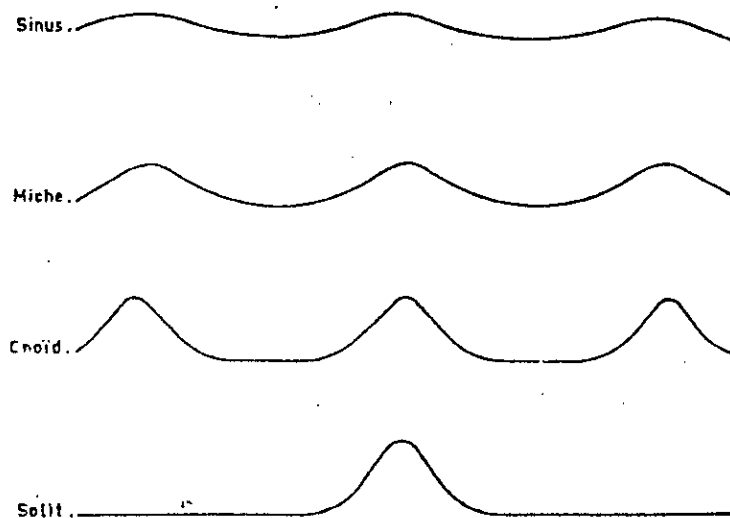


Figure B15 : Forme de la surface libre

I. 2. CARACTERISTIQUES DES HOULES (figure B16)

- **La hauteur H des lames** : c'est la dénivellation maximale entre creux et crêtes successives $H=2a$ (a est l'amplitude de la houle).
- **La longueur d'onde L** : c'est la distance qui sépare deux crêtes successives .
- **La période T** : c'est l'intervalle de temps qui sépare le passage de deux crêtes consécutives au même point.
- **La vitesse de propagation ou célérité C** : C'est la vitesse avec laquelle le mouvement reproduit se propage sans altération de forme $C=L/T$
- **La profondeur d'eau h** : c'est la distance du niveau de repos des eaux par rapport au fond.
- **Cambrure γ** : on notera $\gamma = H/L$
- **Niveau de repos** : c'est le niveau de la surface libre au repos.
- **Niveau moyen** : c'est le niveau équidistant des crêtes et des creux.
- **Côte de la surface libre** : $y(x,t)$ calculé par rapport au niveau de repos.
- **Vitesse des particules** : au point (x,z) à l'instant t ; $u(x,z,t)$ sur ox
et $w(x,z,t)$ sur oz

Figure B16 :Caractéristiques de la houle

I.3. TRAJECTOIRE DES PARTICULES LIQUIDES :

Le mouvement de chaque particule liquide résulte de la combinaison particulière de deux mouvements bien distincts (*figure B17*) :

1. Un mouvement arbitraire plus ou moins elliptique, dans lequel la particule tourne à vitesse aréolaire sensiblement constante, à raison d'un tour par passage de lame, autour de la position de repos.
2. Un mouvement de translation continue, qu'on appelle le « transport de masse », de sorte que les particules ne parcourent jamais de trajectoires rigoureusement fermées.

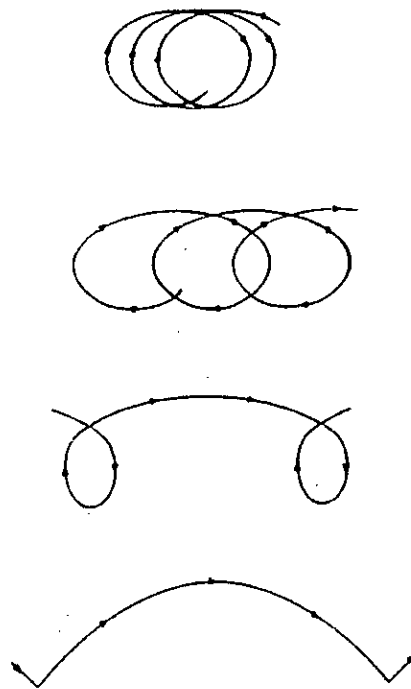


Figure B17 : Trajectoire des particules liquides

I.4. VITESSE DES PARTICULES LIQUIDES ET CELERITE

Les vitesses maximales des particules liquides de part et d'autre de leur position moyenne sont égales au quotient des demi excursions complètes des particules par la période d'oscillation de la houle. Les vitesses d'oscillation de l'eau vont donc, la aussi en décroissant vers le fond.

La vitesse apparente de propagation, ou *Célérité*, des houles dépend étroitement de leur longueur d'onde.

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi h}{L}} \quad (\text{B.2.1})$$

La célérité C ne dépend donc presque pas de la hauteur des lames, et l'expression précédente correspond à :

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g} \operatorname{coth} \frac{2\pi h}{L}} \quad (\text{B.2.2})$$

Les deux formules précédentes se réduisent à :

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} \quad C = \frac{gT}{2\pi} \quad (\text{B.2.1a})$$

dans les grandes profondeurs (infinies) où l'on peut assimiler les tangentes et les cotangentes hyperboliques à l'unité : la célérité des lames est alors directement proportionnelle à leur période .

Les même formules que ci-dessus se réduisent par contre à :

$$C = \sqrt{gh} \quad (\text{B.2.1b}) \quad T = \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad C = \frac{ghT}{L}$$

dans les profondeurs très faibles où l'on peut assimiler les tangentes et les cotangentes hyperboliques à leurs arguments. La célérité est alors totalement indépendante de la longueur d'onde et de la période des lames, et ne dépend que de la hauteur d'eau h dans laquelle celle-ci se propage.

Dans le cas où l'on ne peut plus négliger la hauteur des lames H par rapport à la hauteur d'eau h , l'expérience [11] montre, comme le calcul, qu'on a finalement :

$$C = \sqrt{g(h+H)} \quad (\text{B.2.3})$$

I.5. MODELES MATHÉMATIQUES DE LA HOULE

A. Les hypothèses de base

L'étude théorique de la houle consiste à décrire ce phénomène physique très complexe au moyen des formules mathématiques.

De nombreux modèles mathématiques ont été développés depuis le 19^e siècle par de nombreux mathématiciens pour traduire les caractéristiques physiques de la houle en se basant sur les hypothèses suivantes [4] :

- Fluide parfait, homogène et pesant.
- Mouvement cylindrique.
- Problème plan : - Axe des (x) horizontal.
- Axe des (z) vertical ascendant : origine des coordonnées prise sur la surface de repos du fluide.
- La pression à la surface libre agitée de côte ξ est la pression atmosphérique supposée partout constante.
- Fond imperméable supposé horizontal [les théories (approchées) restent valables même si la profondeur varie lentement].

B. Le Problème déterminer le mouvement des particules fluides tel que la surface libre présente une suite d'oscillations périodiques se propageant dans une direction donnée.

C. Les modèles (Annexe 1)

- La houle de GESTNER
- La houle irrotationnelle de STOKES
- La houle au deuxième ordre d'approximation
- La houle elliptique

D. Les domaines d'utilisation

La figure B18 représente les domaines d'application, des différentes théories citées auparavant, dans un plan adimensionnel $[H/gT^2, h/H^2]$, qui se divise en trois parties :

- *Eaux peu profondes* : ($h/L \leq 0.04$) : domaine des ondes de translation
Les vitesses des particules sont presque horizontales
($c = \sqrt{gh}$)
- *Eaux profondes* : ($h/L > 0.5$) : domaine de la théorie de GESTNER
Les orbites des trajectoires sont pratiquement circulaires
($L = \frac{gT^2}{2\pi}$)
- *Profondeurs transitoires* : ($0.5 > h/L \geq 0.04$)
($\frac{H}{gT^2}$ croît avec $\frac{h}{L}$)

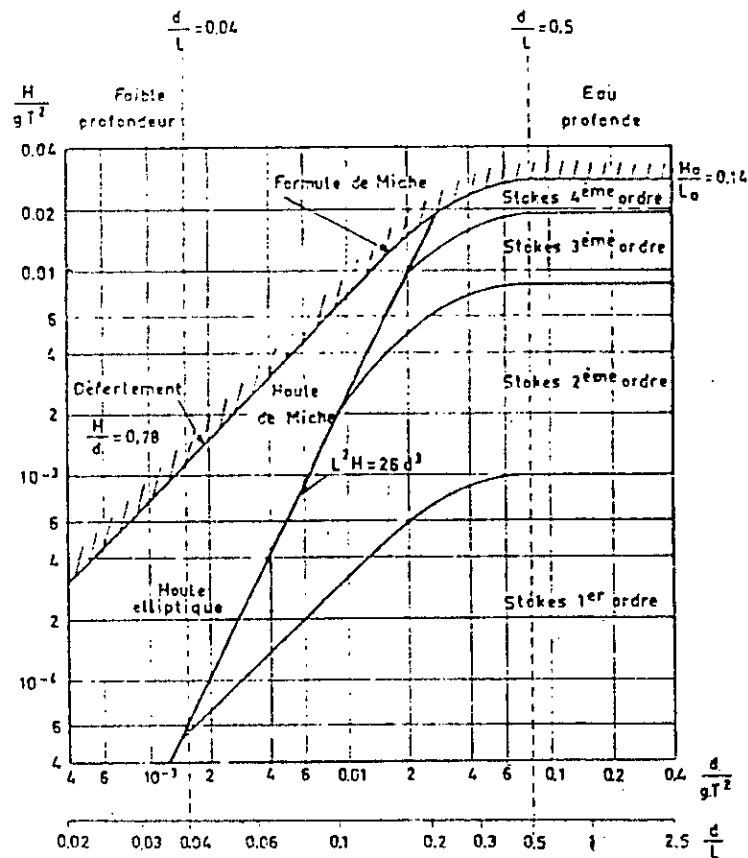


Figure B18 : Domaines d'utilisation des différentes théories de la houle

II. LA HOULE REELLE

La houle réelle n'est pas le phénomène ondulatoire simple décrit par les théories élémentaires; la houle pure n'existe que très rarement. on rencontre en général des ensembles de houles complexes, dont l'étude est un problème de statistique.

On constate sur la surface de l'eau le passage de crêtes plus ou moins longues, de longueurs d'ondes très diverses et de périodes très variables. Les petites lames sont donc dépassées par les grandes qui ont une vitesse plus grande.

Chaque ondulation de train de houle se déplace avec sa célérité propre, fonction de la longueur d'onde, mais l'ensemble du train de houle se propage avec une vitesse beaucoup plus faible, appelée vitesse de groupe.

La surface des eaux est apparemment le siège de mouvements désordonnés. Les lames n'avancent pas toutes dans la même direction, et leurs caractéristiques sont différentes. La superposition des crêtes forme une agitation complexe qui paraît difficile à analyser.

II. 1. HOULES FORMEES

Elles correspondent à la majorité des houles naturelles en dehors de leur zone de formation sous l'action du vent. C'est des houles naturelles libres, elles représentent une bonne périodicité du profil, et un bon parallélisme des crêtes (*figures B19a, B19b*).

Ces houles ont à 5 ou 10% près les mêmes propriétés que les houles simples dont nous avons indiqu² les propriétés dans le chapitre précédent, et dont elles ont, en gros, le profil.

II. 2. HOULES CROISEES OU GAUFREES

Résultantes de la rencontre de deux ou plusieurs houles libres de directions différentes.

Les lames n'avancent pas toutes dans la même direction, et leur superposition forme une mer gaufrée, pour ces houles il est beaucoup plus difficile de parler de périodicité du profil ou de strict parallélisme des crêtes.

Le principe de superposition des petits mouvements permet de considérer les propriétés linéaires de ces dernières comme la somme arithmétique des propriétés linéaires des houles libres dont elles constituent l'addition.

II. 3. HOULES DU VENT OU MER DU VENT

Elles agissent sur les aires de formation sous l'action du vent, il s'agit de houles forcées ne présentant plus les mêmes caractères de périodicité de profil (figure B20a) et du parallélisme des crêtes (figure B20b) des houles libres.

L'agitation a une grande complexité qui parait défier toute analyse. Il n'y a pas d'autres guides que l'expérience et l'intuition pour apprécier dans quelle mesure, et avec quels risques d'erreur, l'on peut utiliser notre connaissance des propriétés de la houle libre dans le cas, moins accessible à l'expérience, des grandes houles de la mer de vent.

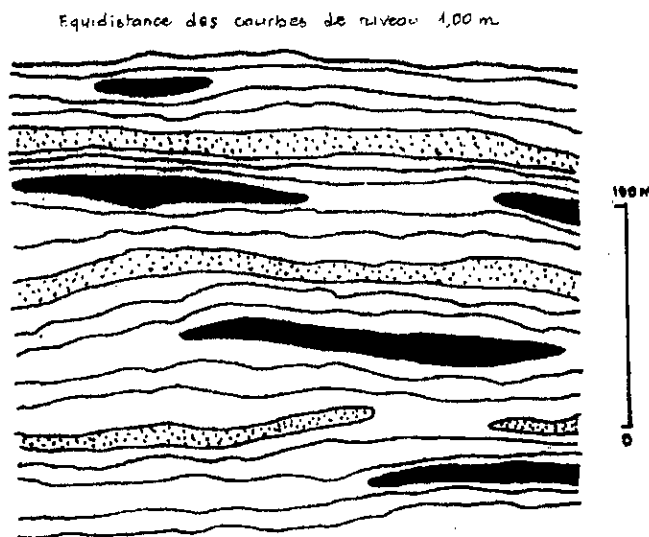


Figure B19a : Profil des houles formées

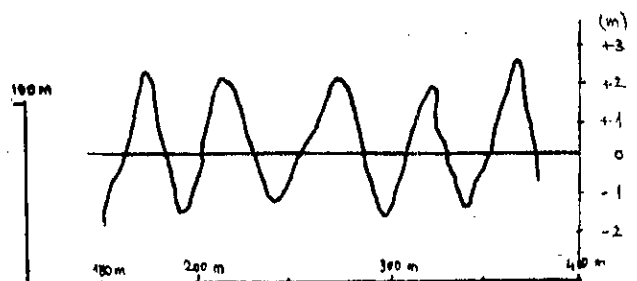


Figure B19b : Crêtes des houles formées

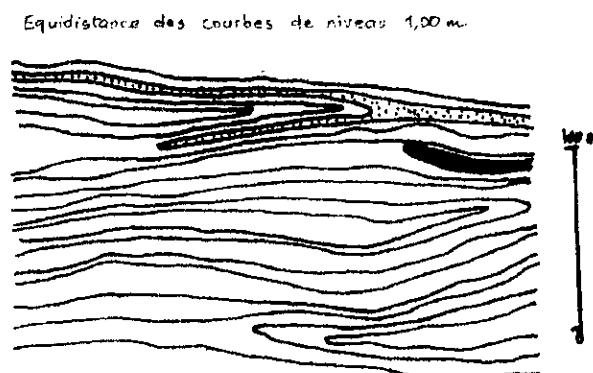


Figure B20a : Profil des houles du vent

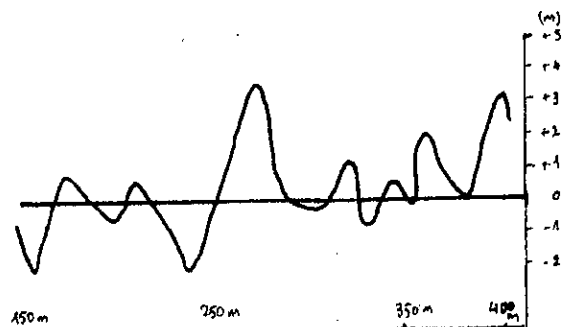


Figure B20b : Crêtes des houles du vent

III. DEFORMATION DE LA HOULE AU COURS DE SA PROPAGATION

III. 1. DEFERLEMENT

III. 1. 1. Le déferlement est un cas limite de la déformation pour lequel la cambrure de la houle (H/L) atteint une certaine limite, au-delà de laquelle la lame n'est plus stable. Sa crête écume; il y a déferlement partiel qui dissipe l'excès d'énergie que ne peut emmagasiner la lame avec sa longueur d'onde et sa cambrure actuelle.

Les vents et courants contraires, tendent à ralentir la vitesse de propagation des crêtes et à majorer la cambrure des lames en la rapprochant de sa valeur critique à partir de laquelle elles ne peuvent plus avoir de profil stable en profondeur infinie.

Cette stabilité se traduit par une brisure de la partie haute du profil en travers, qui devient alors le siège d'un bouillonnement d'écume appelé *mouton* (figure B21).

Sur les plages à pente douce (avec une diminution de la profondeur, donc une diminution progressive de la hauteur d'eau), La cambrure augmente au fur et à mesure. La vitesse des particules se rapproche de la valeur de la célérité, jusqu'à l'atteindre : c'est la forme limite de la houle, le déferlement commence alors; les lames changent complètement d'aspect, et libèrent brutalement leur énergie sous une forme violemment tourbillonnaire.

Le déferlement peut prendre des formes extrêmement diverses, on distingue généralement les cas suivants (figure B21) [4]:

A. *Plunging breaking* : déferlement plongeant (en volute, en cataracte, basculant)

Dans lequel les lames prennent très rapidement une forme dissymétrique, avec une face intérieure concave parfaitement lisse et presque verticale que la crête finit par surplomber avant de retomber brutalement en nappe déversante.

B. *Surging breaking* : déferlement frontal (à gonflement)

Dans lequel la face antérieure des lames prend une forme dissymétrique de plus en plus bombée dans les hauts et se résout en masse d'eau fortement tourbillonnante à mi-hauteur.

C. *Spilling breaking* : déferlement glissant (à déversement)

Dans lequel les lames sont à peine dissymétriques et dont la crête s'accompagne d'une sorte de petite cascade d'eau bouillonnante qui glisse vers le rivage avec elle.

La réalité est beaucoup plus complexe que laisse prétendre le classement précédent, la destruction des lames n'est, en effet, totale qu'au bout de plusieurs déferlements successifs (brisants, lignes de rouleaux) au cours desquels les lames passent progressivement d'un des types du classement à l'autre et s'effectue généralement dans le sens plongeant-gonflement-deversement.

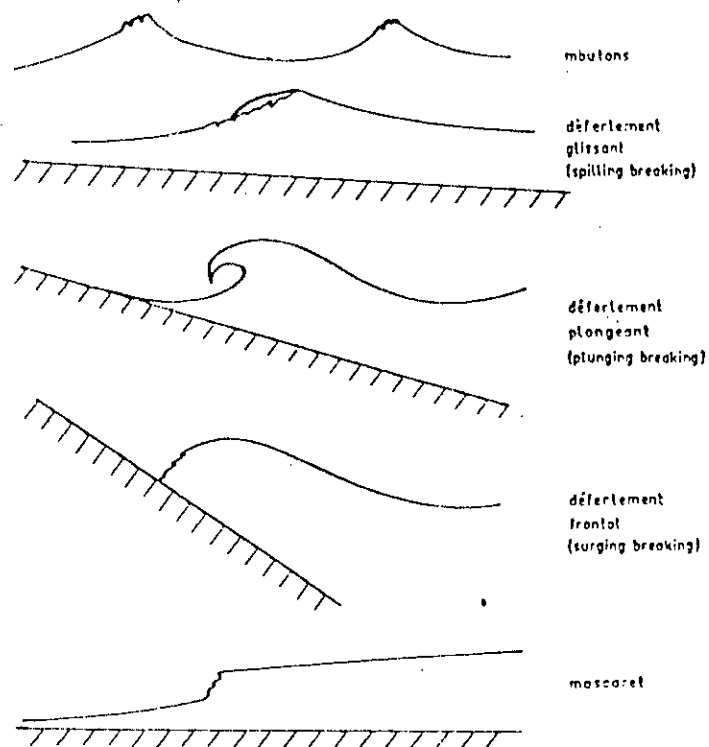


Figure B21 : Types de déferlement

III. 1. 2. Le déferlement est un phénomène au cours duquel l'onde est partiellement ou totalement détruite; il est caractérisé par un haut degré de turbulence et une grande dissipation d'énergie.

Du point de vue hydrodynamique, le phénomène se produit lors des éventualités suivantes [11] :

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

Pour les houles progressives irrotationnelle, le déferlement est lié à une valeur maximale de la cambrure les formules sont diverses et on peut en citer les suivants :

En houle de STOCKES (1980), la forme limite correspond à un point anguleux de (120°) au sommet (*figure B22*), tout en restant symétrique par rapport à la verticale des crêtes.

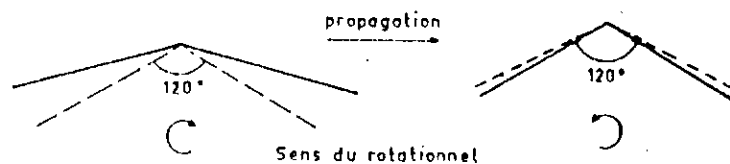


Figure B22 : Forme limite de la houle

Les études de MICHE (1944) ont permis l'extension de ce calcul à un ordre d'approximation supérieure et la mise en relief du rotationnel près du sommet

De ce fait un rotationnel opposé au sens de propagation permet à la houle d'être plus cambrée, c'est un facteur de stabilité (*figure B22*).

Le calcul de MICHE (1944), et l'expérience (DANEL 1942) montrent que la cambrure de la houle sinusoïdale ne peut pas dépasser :

14% en profondeur infinie (MICHELL 1892, HAVELOCK 1819).

Ni $0.140th2\pi \frac{h}{L}$ en profondeur finie (MICHE 1944) (résultat en accord avec ceux de MICHELL en eau profonde ($\gamma = 0.142$)).

Remarque : en eau peu profonde $2\pi \frac{h}{L} \approx \frac{h}{L} \rightarrow \frac{h}{L} = 1.14$

Pour étudier le déferlement MUNK (1949) a proposé de considérer chaque vague prête à déferler comme une onde solitaire. Dans ces conditions le creux au déferlement (H_d) est lié au creux et à la cambrure du large par la relation :

$$\frac{H_d}{H_0} = 0.3 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/3} \quad \frac{h_d}{H_d} = 1.28$$

En résumé :

- $\frac{H}{L} < 0.142$ en eau profonde (MICHELL-1893) (B.2.5)
- $\frac{H}{L} < 0.142 \text{th} 2\pi \frac{h}{L}$ (MICHE-1944) (B.2.6)
- $\frac{H}{h} < 0.78$ en eau peu profonde (MUNK-1949) (B.2.7)

Remarque :

L'expérience (IPPEN et KULIN 1954) [4] montre que le rapport H/h n'est pas constant, et qu'il dépend de beaucoup de la pente du fond pour l'onde solitaire proprement dite (en canal de laboratoire tout au moins)

On est donc loin d'avoir $H/h=0.78$ du fait de la ressemblance extérieure des lames déferlantes et les ondes solitaires (*tableau B3*) [11].

Tableau B3 : Variation de la cambrure limite suivant la pente

<i>pente</i>	<i>H/h</i>
0 %	0.83
5 %	1.05
10%	1.19
20%	1.32

III. 2. REFLEXION

Lorsque la houle aborde sans déferler un mur vertical, la vitesse de chaque particule d'eau se réfléchit sur la paroi. Une onde réfléchie identique à l'onde incidente mais de direction opposée prend alors naissance.

Nous disposons de toute une série de méthodes pour aborder l'étude de la houle réfléchie par le calcul, et l'on retrouve la même distinction que pour les ondes périodiques simples.

- Au premier ordre d'approximation, on peut superposer les deux ondes. Les trajectoires des particules sont des droites, horizontales aux nœuds, d'oscillation verticales aux ventres.

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 les ventres d'oscillation.

- Au deuxième ordre d'approximation le problème est important, MICHE a donné une solution telle que le mouvement ait pour amplitude totale $2H$ en surface et qu'il s'effectue verticalement le long des plans équidistants d'une demi-longueur d'onde.

Les trajectoires des particules sont des paraboles à axe vertical pour les particules situées au repos et à axe oblique pour les autres positions de repos.

Remarques :

- Lorsque la paroi réfléchissante est un plan incliné, la réflexion n'est que partielle.
- Lorsque la cambrure est forte, une partie de l'énergie est détruite par déferlement.
- Dans le cas d'une réflexion oblique, on parle de clapotis gaufré.

III. 3. REFRACTION

La vitesse de propagation de chacune des composantes de la houle est donnée par :

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL \tanh 2\pi h/L}{2\pi}} \quad (\text{Cf. B.2.1})$$

En eau profonde:

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad L = \frac{g}{2\pi} T^2 = 1.56 T^2 \quad (\text{Cf. B.2.4})$$

En eau peu profonde:

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gH} \quad (\text{Cf. B.2.1b})$$

Dans ce cas, la vitesse ne dépend pas de la période.

La houle se propageant sur le fond a pente douce, voit sa célérité diminuer avec la profondeur et donne naissance aux conséquences suivantes (*figure B23*):

- Lorsque la houle se propage normalement aux lignes bathymétriques, sa longueur d'onde diminue, et les lignes de crête ne sont plus serrées au voisinage du rivage.
- Lorsque la direction de la houle est quelconque par rapport aux lignes d'égales profondeurs, les célérités sont différentes en deux points voisins d'une même crête de houle. Les lignes de crêtes ne sont plus parallèles (elles sont serrées au niveau des petites profondeurs).

Le résultat est que les lignes de crête de la houle sont incurvées : la houle tourne de façon à ce que ses lignes de crête deviennent parallèles aux lignes bathymétriques.

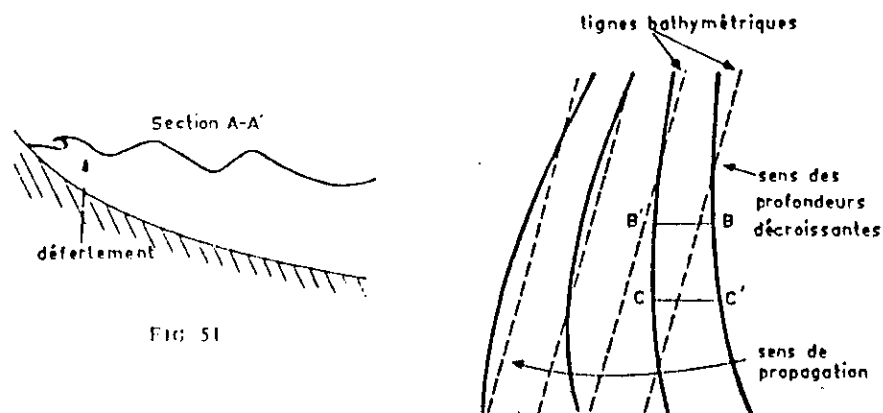


Figure B23 : Réfraction de la houle

PLAN DE VAGUES

C'est la figure obtenue en reportant la position des crêtes de houle à un instant donné sur une carte des fonds, elle permet :

- De voir comment l'énergie de la houle se concentre ou s'épanouit à l'approche des ouvrages.
- D'évaluer l'angle que les crêtes de houle font avec les ouvrages ou bien la côte.

Il existe deux méthodes pour établir un plan de vagues [5] :

a. Méthode des crêtes : basée sur l'utilisation de ce qu'on appelle en optique la construction de HUYGENS appelée *méthode des cercles de HUYGENS*.

b. Méthode des orthogonales : basée sur la loi de réfraction des ondes lumineuses (loi de DESCARTES), il s'agit de tracer directement les orthogonales aux crêtes comme le montre l'expérience (DJOUNKOVSKI et BOJITCH 1959).

$$\frac{\cos \phi}{c} = \frac{\cos \phi_0}{c_0} \quad (\text{B.2.8})$$

c : célérité à profondeur donnée

c_0 : célérité en eau profonde

ϕ : angle entre les lignes de crête à profondeur donnée

ϕ_0 : angle entre les lignes de crête en eau profonde

La méthode moderne consiste à intégrer à l'aide d'ordinateurs l'équation différentielle des orthogonales aux crêtes de la houle. Les applications manuelles tendent à disparaître.

Dans la version mise au point par le professeur DESCARTES, on procède directement à la détermination de l'angle ϕ à l'aide d'un abaque [5].

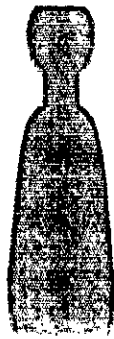
III. 4. DIFFRACTION

On dit que la houle se diffracte lorsque plusieurs orthogonales aux crêtes passent par un même point tel que l'extrémité d'un cap ou d'une pointe (la longueur d'onde et la période ne sont pas modifiées par la diffraction).

Les théories élaborées s'appliquent pour des zones de profondeur constante et servent surtout à déterminer les houles résiduelles à l'intérieur des ports, ce qui a priori concerne peu les houles sollicitant les ouvrages de défonce des côtes.

T oisième Chapitre

Comportement des sédiments sous l'action de la houle



*L'*action de la houle sur les sédiments déposés sur les d'une part; l'action des mouvements orbitaire au voisinage du fond, d'autre par l'action des courants associés, dont les courants couche et les courants de compensation, suivant le rotationnel du mouvement.

Les transports de sédiments dus à l'action de la houle peuvent être répartis en deux catégories.

On distingue d'une part les mouvements perpendiculaires à la plage, aussi appelés mouvements dans le profil, et les mouvements parallèles à la plage désignés plus généralement par l'expression du transit littoral ou transport littoral.

I. MOUVEMENTS D'EAU ENGENDRES PAR LA HOULE PRES DU FOND

I.1. VITESSES ALTERNATIVES SUR LES FONDS

Au voisinage du fond, les particules solides ne seront entraînées par les courants alternatifs générés par la houle (*figure B25*), que si leurs vitesses (appelées vitesses orbitales) sont supérieures à la vitesse critique d'entraînement des sédiments.

La vitesse orbitale maximale sur le fond est :

$$U_{Max} = \frac{\pi H}{T sh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)} \quad (\text{B.3.1})$$

Sachant que la vitesse orbitale instantanée est :

$$U = U_{Max} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (\text{B.3.2})$$

La vitesse de frottement U_* sur le fond :

$$U_* = \left(\frac{8\nu U_{Max}^2}{\pi T} \right) \quad (\text{B.3.3})$$

D'ou la force tractrice :

$$\tau_0 = \rho U_*^2 = \left(\frac{8D}{\pi T} \right)^{1/2} \rho U_{Max} \quad (\text{B.3.4})$$

ρ : masse volumique de l'eau [1000 kg/m³]

ν : viscosité cinématique de l'eau [10⁻⁶ m²/s (à 20°C)]

T : période de la houle [s]

h : profondeur d'eau [m]

H : hauteur des lames (amplitude totale de la houle) [m]

L : longueur d'ondes [m]

On peut déterminer directement la valeur de U_{Max} et de U_* à partir des abaques, en connaissant la profondeur et les caractéristiques de la houle (*figure B24*)

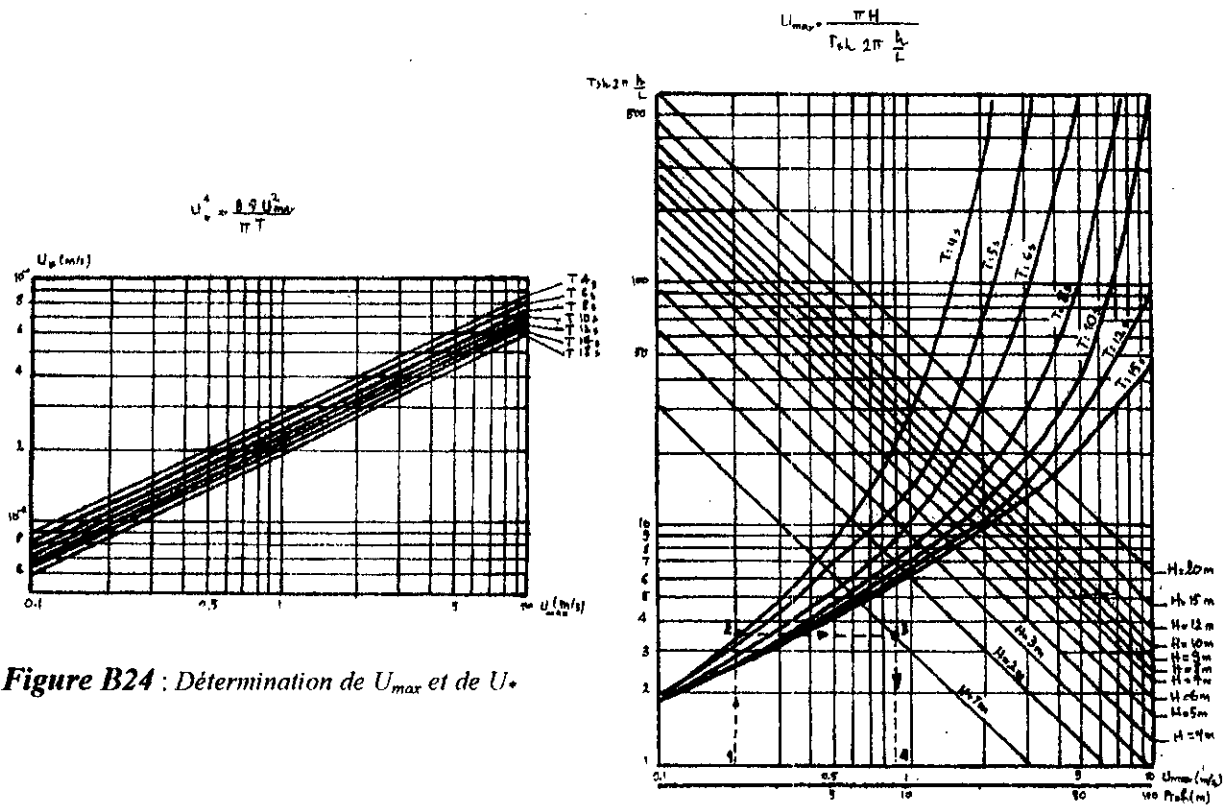


Figure B24 : Détermination de U_{max} et de U .

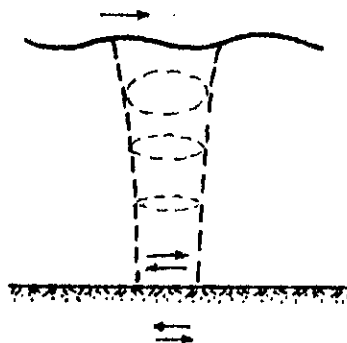


Figure B25 : Mouvements orbitaires

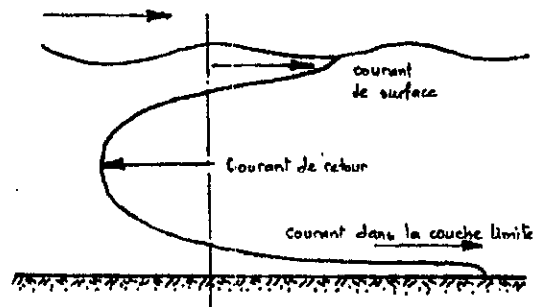


Figure B26 : Courants d'entraînement dans la masse du fluide

I.2. COURANTS DE TRANSLATION ET DE COMPENSATION

Oscillant alternativement sur les fonds, sous l'action de la houle, les molécules d'eau peuvent être soumises en plus à des déplacements du large vers la côte dans les courants de translation qui prennent naissance dans la couche limite lorsque celle-ci est laminaire, sa vitesse moyenne (d'après P. LHERMITTE) est :

$$U_{CL} = kU_{\max}^{1,6} h^{-0,6} \quad (\text{B.3.5}) \quad k = 1/18 \text{ en c.g.s}$$

Si la couche limite devient turbulente, ce qui est le cas le plus souvent en tempête ou lorsque l'action du vent se superpose à la houle, il n'existe plus de courants de translation au voisinage du fond (*figure B26*), mais des bouffées de turbulence qui peuvent contribuer à mettre les sédiments en suspension sur une certaine épaisseur au-dessus des fonds. Les particules pourront alors être entraînées vers le large par les courants de compensation.

I.3. COURANT LITTORAL

Le courant littoral ou courant de houle est un courant qui naît sous l'action des houles obliques. Il se dirige parallèlement à la côte, formant un véritable « fleuve littoral » susceptible de transporter en suspension ou par charriage, des masses considérables de sédiments apportés du large par le courant de translation sur les fonds ou arrachés à la côte par la houle (*Figure B27*).

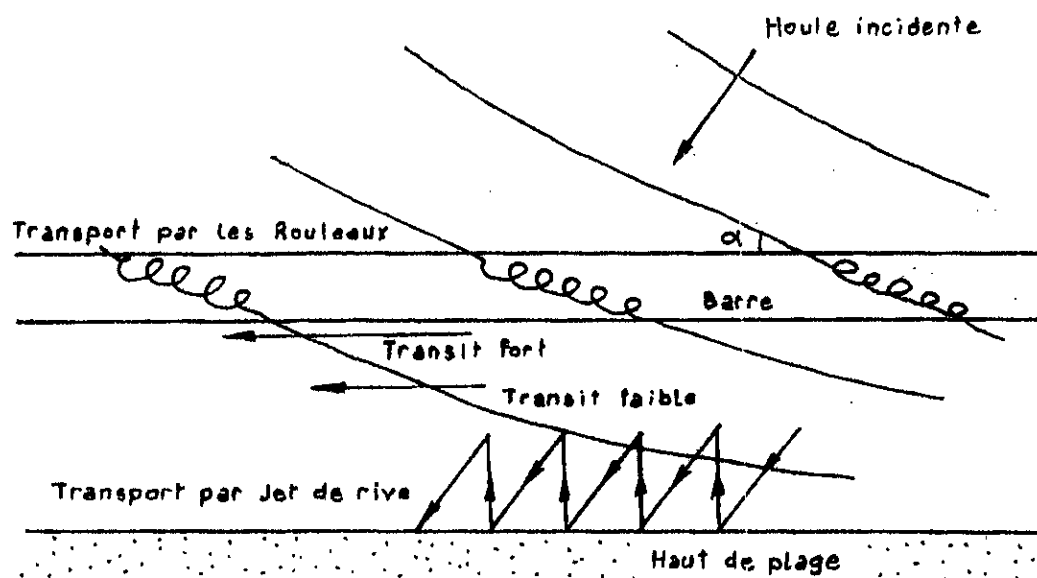


Figure B27 : Processus du transport littoral, induit par une houle oblique

De nombreuses formules ont été proposées par le C.E.R.C (Coastal Engineering Research Center) pour déterminer la vitesse des courants de houle en fonction des différents paramètres caractérisant la houle et les fonds sous-marins.

$$V = 20,7 i (gH_d)^{1/2} \sin 2\alpha \quad [\text{Longuet-Higgins}] \quad (\text{B.3.6})$$

$$V = 2,6 \left(\frac{gh_d^2 i \sin 2\alpha}{T} \right)^{1/3} \quad [\text{J.Larras}] \quad (\text{B.3.7})$$

H_d : amplitude de la houle déferlante

i : pente moyenne de la plage

α : obliquité des lames du large avec le rivage

I.4. COURANTS DE RETOUR

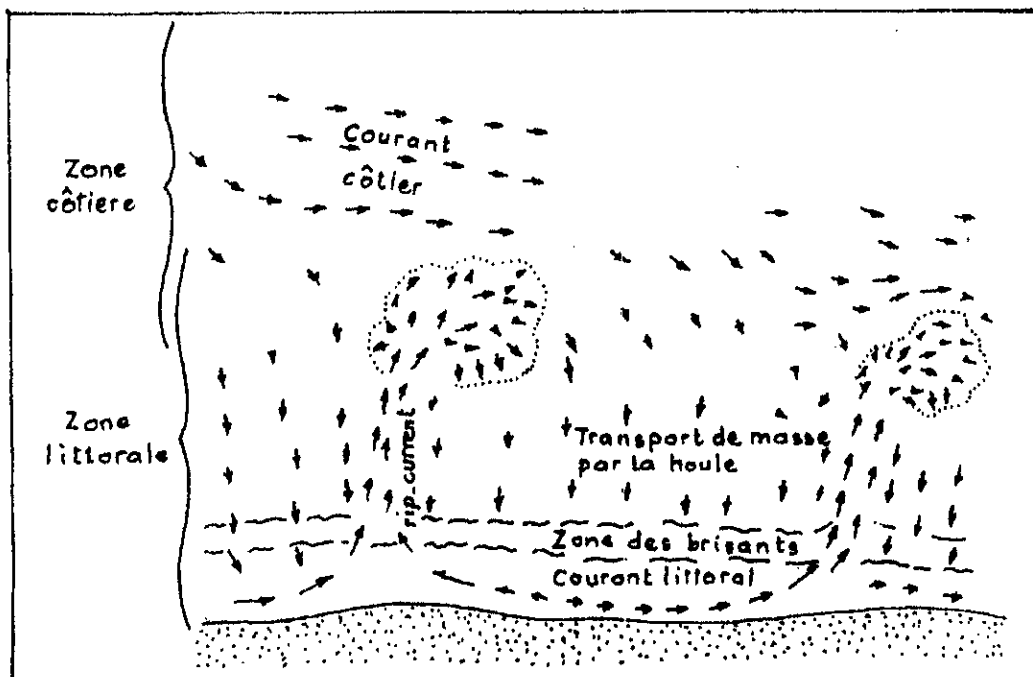
Les fluctuations du niveau de l'eau entre le déferlement et la côte peuvent, comme il a été dit, engendrer des accumulations et des vidages d'eau avec une période qui sera égale à celles des trains d'ondes de la houle.

Les masses d'eau en mouvement par ce processus sont importantes et les échanges dans la zone de déferlement peuvent atteindre 40 à 50 m³ par mètre linéaire de plage, au cours de tempêtes, qui s'évacueront vers le large en une trentaine de secondes. Ces courants de retour, proches du fond, peuvent être accentués lorsque le vent souffle du large, et sont fréquemment appelées *undertow* (figure 28).

Ces courants de retour peuvent se concentrer en des points privilégiés, séparés de façon régulière, et formeront les *rip-currents* qui prendront naissance aux points où l'amplitude de la houle est la plus faible.

Sur une plage rectiligne l'espacement des *rip-currents* varierait comme le carré de la période et serait sensiblement égal à la longueur d'onde des *edge-waves*. [18]

Les vitesses dans les *rip-currents* peuvent être très élevées et atteindre plusieurs mètres par seconde, l'action de 'jet' se faisant sentir au-delà du déferlement et pouvant être à l'origine de certaines formations sédimentaires.



*Figure B28 : Schéma général des courants près de la côte
(D'après SHEPARD et INMAM -1950)*

I.5. COURANTS D'EXPANSION LATÉRALE

Ce type de courants est dû au déplacement des masses d'eau d'une zone où l'amplitude de la houle est forte vers une zone où l'amplitude est plus faible.

Un tel phénomène se produit lorsque l'on est en présence d'une topographie des fonds qui conduit à des concentrations de la houle en certains points ou à l'ombre d'ouvrages portuaires qui apportent, par effet de diffraction, des modifications dans la propagation de la houle [14].

II. MOUVEMENTS DES FONDS MARINS ENGENDRES PAR LA HOULE

Les mouvements engendrés par la houle dans la masse fluide, que ce soit les mouvements orbitaires sur les fonds, les courants littoraux ou de retour..., vont agir sur les sédiments provoquant dans certains cas leur déplacement en masse vers des secteurs privilégiés.

Ces mouvements sédimentaires s'effectueront de façon très différente suivant les caractéristiques des matériaux, la profondeur à laquelle ils se trouvent et les conditions océanographiques existantes.

II. 1. MISE EN OSCILLATION DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DES MOUVEMENTS ORBITAIRES

II. 1. 1. SEDIMENTS GROSSIERS

Les matériaux non cohésifs du type sables, graviers et galets pourront être mis en mouvement dès que les vitesses des courants alternatifs développées par la houle sur les fonds seront supérieures à la vitesse critique d'entraînement des sédiments.

En effet dans la plupart des matériaux, les mouvements orbitaires ne seront pas limités à l'interface sol-eau, mais pourront se propager à l'intérieur de la masse sédimentaire provoquant des sous-pressions favorables à la mise en mouvement des particules.

De nombreux auteurs ont essayé de rattacher le début d'entraînement des particules de différents diamètres d à la vitesse maximale U_{Max} engendrée par la houle sur les fonds.

1. $U_{Max(crit)} = 32.4 a^{2/3} T^{1/3} d^{0.433}$ BAGNOLD - laminaire
2. $U_{Max(crit)} = 0.025 (ag) v^{-1/2} T^{1/2} d$ MANOHAR - laminaire
3. $U_{Max(crit)} = 7.45 (ag)^{0.4} v^{0.2} d^{0.2}$ MANOHAR - turbulent
4. $U_{Max(crit)} = W + 95 a^{1/3} v^{1/2} T^{-1/2}$ LARRAS - laminaire
5. $U_{Max(crit)} = 0.33 (ag)^{2/3} v^{1/24} T^{3/8} d^{1/4}$ GODDET - laminaire
6. $U_{Max(crit)} = 1.73 (\rho_s - \rho)^{1/2} g^{1/2} d^{1/2}$ GODDET - turbulent
7. $U_{Max(crit)} = 0.175 (ag)^{3/4} T^{1/2} d^{1/4}$ VALEMBOIS - laminaire
8. $U_{Max(crit)} = 0.11(ag)^{4/5} v^{-1/10} T^{1/2} d^{2/5}$ MOGUILNY - laminaire
9. $U_{Max(crit)} = 0.385 (ag)^{2/3} T^{1/3} d^{1/3}$ SATO - laminaire
10. $U_{Max(crit)} = 0.063 (ag)^{5/6} v^{-1/6} T^{1/2} d^{1/2}$ BONNEFILLE & PERNECKER - laminaire
11. $U_{Max(crit)} = 1.05 (ag)^{4/7} T^{1/7} d^{3/7}$ RANCE & WARREN - turbulent
12. $U_{Max(crit)} = 0.30 (ag)^{2/3} T^{1/3} d^{1/3}$ KOMAR & MILLER - laminaire

a : densité des matériaux sous l'eau

w : vitesse de chute

La figure B29 donne un aperçu des écarts que l'on peut obtenir entre les différentes formules basées sur la vitesse orbitale maximale sur le fond.

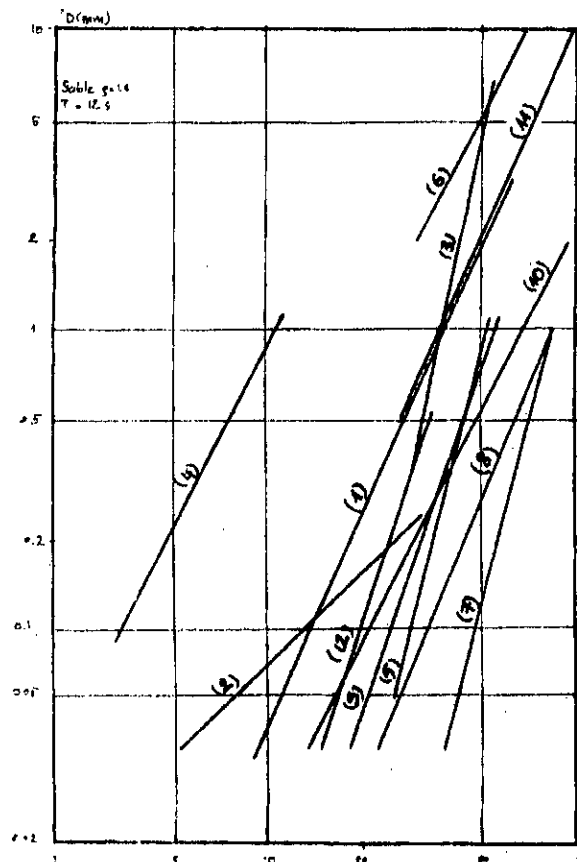


Figure B29 : Début d'entraînement des sédiments fins sous l'action de la houle (comparaison des différentes équations)

Par ailleurs une autre hypothèse permettant d'interpréter le début d'oscillation des particules sableuses sur les fonds, c'est celle de la contrainte de cisaillement, c'est-à-dire, qu'il faut que la force tractrice moyenne τ_0 développée par la houle soit supérieure à la force tractrice critique τ_c d'entraînement des matériaux sous l'action des courants.

$$\tau_c = 0.05 (\rho_s - \rho)dg \quad (\text{Cf B.1.15})$$

$$\tau_0 = U_*^2 \rho = 1000 \left(\frac{8vU_{Max}^2}{\pi T} \right)^{1/2} \quad (\text{Cf B.3.4})$$

On en déduit, dans le cas de sable, et d'une eau ayant $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$:

$$\frac{U_{Max}}{T^{1/2}} \geq 500d \quad (\text{B.3.8})$$

De la même façon, on peut utiliser, comme pour les courants, des paramètres addimensionnels :

$$d_* = \left(\frac{\rho g}{\nu^2} \right)^{1/3} d \quad (\text{Cf B.1.21})$$

$$\text{Re}_* = U_* \frac{d}{\nu} \quad (\text{Cf B.1.19})$$

et utiliser le même abaque que celui de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant uniforme (Cf tableau B2).

II. I. 2. SEDIMENTS FINS

Sur des fonds de vase, la houle développe des mouvements orbitaires d'autant plus importants que la rigidité de la vase est plus faible, et le dépôt moins visqueux.

Des études expérimentales du [L.C.H.F] ont permis de constater l'influence de la viscosité, près de l'interface, qui se traduit par une décroissance très rapide de l'amplitude du mouvement orbital, alors qu'au contraire, dans un fluide non visqueux l'amortissement est extrêmement progressif [14].

Dans les deux cas on retrouve un mouvement elliptique des particules qui se propage à une profondeur d'autant plus faible que la viscosité de la vase est grande et l'amplitude de la houle plus petite (*figure B30*).

On notera que :

- L'amplitude des mouvements orbitaires décroît brutalement à l'interface entre le fluide sain et la vase, puis progressivement dans la masse de la vase.
- La décroissance des mouvements orbitaires est d'autant plus rapide que la viscosité de la vase est élevée.
- Pour une même vase l'amplitude des mouvements à une profondeur donnée est d'autant plus importante que l'amplitude de la houle est grande.

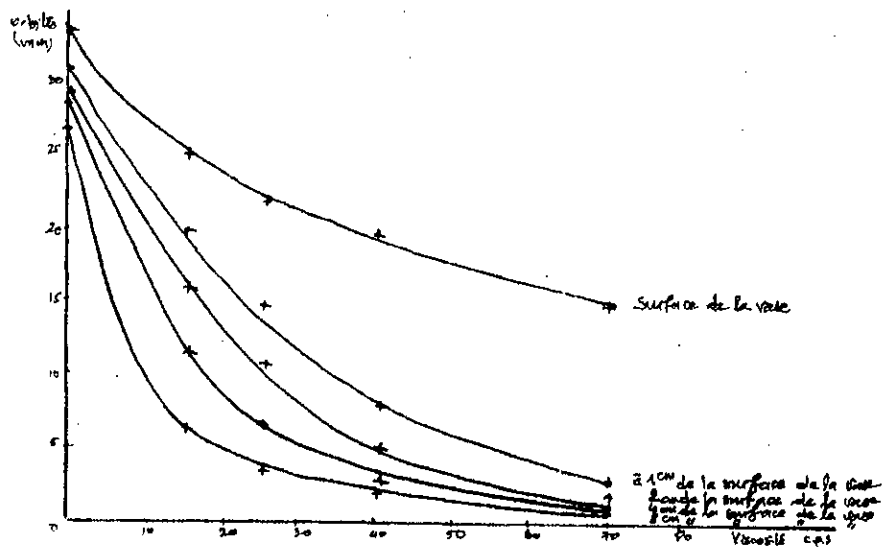
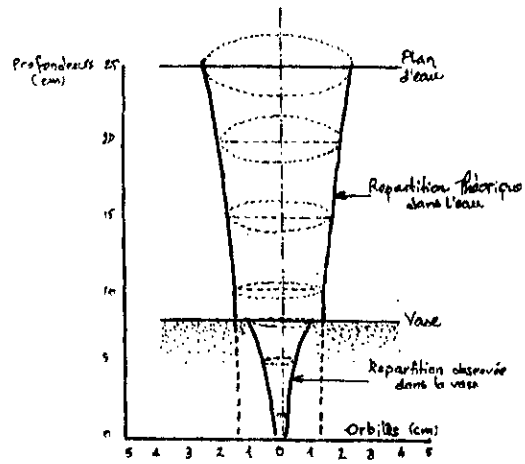


Figure B30 : Mouvement des vases sous la houle

II. 2. IMPORTANCE DES VOLUMES DE MATERIAUX BRASSES PAR LA HOULE A DIFFERENTES PROFONDEURS :

On peut présenter, par la théorie, l'importance des mouvements sédimentaires à différentes profondeurs en effectuant à partir de la vitesse de frottement U_* et des équations de transport sous l'action des courants (MEYER-PETER, EINSTEIN...) une estimation des quantités de matériaux brassés sur place par la houle.

La comparaison des volumes théoriques remaniés par la houle d'après les formules empiriques a permis de constater que (figure B31) :

- Les quantités de sable fin susceptibles d'être remaniés par l'action des houles diminuent très rapidement avec la profondeur.
- Plus on se rapproche du littoral plus les houles de faible amplitude interviennent dans le remaniement global des fonds.

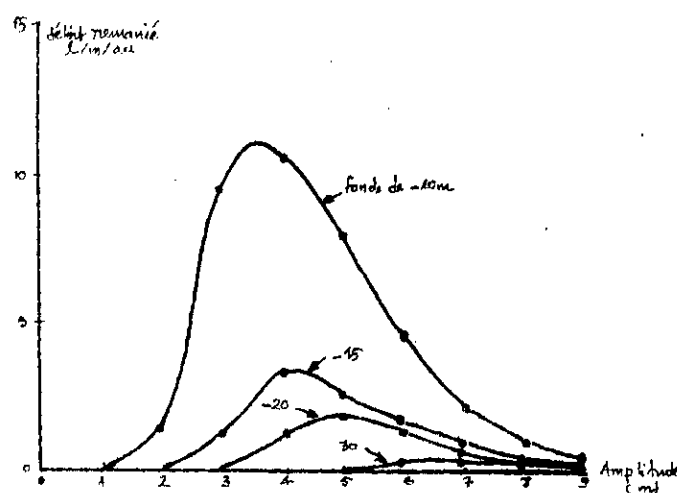


Figure B31 : Graphique du remaniement théorique à différentes profondeurs en fonction de l'amplitude de la houle

II. 3. ESTIMATION DES QUANTITES DE SABLE REMIS EN SUSPENSION

Le phénomène de remise en suspension des sédiments constituant le fond de la mer (pour certaines conditions de houle) est bien différent suivant que l'on se place dans la zone de déferlement ou au large de celle-ci. Dans les brisants, le champ des vitesses est tel qu'il se produit une turbulence généralisée sur toute la hauteur d'eau, ce qui conduit à des concentrations des matériaux en suspension souvent très élevées. Au contraire, au large du déferlement, la seule source de turbulence susceptible de mettre les matériaux en suspension est la couche limite, et on ne rencontre de fortes concentrations que près du fond.

On a pu constater le long du littoral une frange très colorée de près de 1 km de largeur susceptible de contenir des sables en suspension au cours des fortes tempêtes, cela nous conduit à une certaine prudence avant de négliger la remise en suspension des sables fins [14].

III. MOUVEMENTS DES MATERIAUX PERPENDICULAIREMENT AU LITTORAL

Mises en oscillations par les mouvements orbitaires de la houle, les particules solides pourront subir des déplacements dans le profil perpendiculairement au littoral, être remontées vers la côte dans les courants de translation ou arrachées au rivages par les lames déferlantes. Une partie des éléments s'accumulant dans la barre au voisinage du déferlement tandis que les éléments très fins pourront être dispersés vers le large dans les courants de compensation.

III. 1. SEDIMENTS GROSSIERS

A. Pentés des plages

D'une manière générale la pente d'une plage dépendra de la granulométrie des sédiments et des caractéristiques de la houle. A diamètre égal, la pente sera d'autant plus forte que la plage sera protégée des houles. A agitation égale, la pente croît avec le diamètre.

Le *tableau B4* montre l'importance de la granulométrie d'un sédiment sur la pente moyenne des plages :

Tableau B4 : Relation entre la pente d'une plage et le diamètre des grains

<i>d</i> (mm)	0.1	0.2	0.4	0.8	1.5	3	30	150
α (°)	1	3	5	7	9	11	17	24

Il faut également rappeler qu'il existe un triage granulométrique des sédiments dans le profil par suite des remontées de sables les plus grossiers vers le déferlement et du départ des éléments fins vers le large (*tableau B5*).

Tableau B5 : Triage granulométrique dans le profil

<i>profondeur</i> (m)	0	-5	-10	-15	-30
<i>d</i> (mm)	0.25 à 0.40	0.15 à 0.25	0.10 à 0.15	0.05 à 0.12	< 0.05

B. Épaisseur de la couche mobile

L'estimation des épaisseurs de sable déplacé par la houle est très importante à connaître et des mesures faites à l'aide de traceurs fluorescents ou radioactifs ont permis d'en fixer les ordres de grandeur [14].

- Sur une plage l'épaisseur E de la couche mobile serait proportionnelle au diamètre des grains d . ($E_{(cm)} = 37 d_{(cm)} - 0.58$)
- Entre les 'brisants' et la côte, elle est proportionnelle à l'amplitude de la houle déferlante. ($E = k H_d$) \hat{a} , k est d'autant plus grand que le diamètre des grains est grand ($k=0.03$ pour $d=0.25mm$).

- Sur un cordon de galets l'épaisseur de transport serait en moyenne de 60 cm ($h_{d \text{ Max}} = 3m$). Par contre sur un estran de sable fin l'épaisseur de la couche mobile n'atteindrait que 8cm.
- Pour des sables, l'épaisseur E est d'autant plus importante que la houle est forte et que le diamètre des matériaux est plus important.

C. Importance des mouvements dans le profil

Des expériences réalisées en nature à l'aide de traceurs radioactifs permettent d'apprécier l'importance des quantités transportées dans le profil, perpendiculairement à la côte, et qui semblent proportionnelles au bilan d'énergie de la houle ($H^2 T$).

Ces déplacements augmentent très rapidement lorsque l'on se rapproche de la côte, c'est-à-dire de la zone de déferlement, dans laquelle on peut pour certaines houles observer un déplacement en masse parallèlement au rivage, l'entraînement étant d'autant plus important que l'obliquité des houles est forte.

Des courants généraux, parallèles au littoral, peuvent provoquer une dérivée des sédiments mis en oscillation par les houles.

III. 2. SEDIMENTS FINS

A. Résultats de mesures au laboratoire

Sous l'action de la houle le développement d'un mouvement laminaire dans le fluide visqueux, que constitue la vase, se traduit par un mouvement de translation moyen des particules de vase dans le sens de la propagation de la houle (figure B32) présentant des analogies avec celui que l'on peut observer sur des fonds rigides.

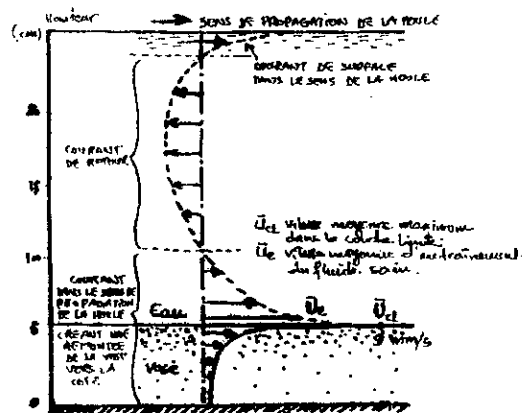


Figure B32 : Déplacement d'une vase fluide ou plastique sous l'action de la houle

On constate que [14] :

- La vitesse de déplacement décroît très rapidement en fonction de la profondeur.
- La vitesse de déplacement augmente avec l'amplitude de la houle.
- Le débit solide de vase entraîné vers la côte par le mouvement de translation des vases sous l'action de la houle est inversement proportionnel à la viscosité des vases.
- Dans les conditions expérimentales ($d=25\text{cm}$, $h=0\text{à}5\text{cm}$, $v_{\text{vase}}=30\text{à}70\text{cps}$)

$$U_v = 0.25 U_{CL} \quad (\text{B.3.9}) \quad \text{avec} \quad U_{CL} = k U_{Max}^{1.6} H^{-0.6} \quad (\text{Cf B.3.5})$$

U_v : vitesse de déplacement de la vase en surface

U_{CL} : vitesse théorique dans la couche limite sur un fond rigide

En pratique, le mouvement de la couche limite dans le sens de propagation de la houle provoque une remontée à la cote des matériaux jusqu'à une zone où la turbulence est suffisamment élevée pour qu'il y ait remise en suspension. Dans des cas limites la houle ne pourra plus déferler mais viendra mourir au rivage dans un fluide visqueux.

B. Observations en nature

Les mouvements des fonds vaseux ont été observés en nature par diverses missions du service Hydrographique du L.C.H.F (1875), qui faisaient mention du déplacement des bancs de vase le long des côtes, et apportaient des confirmations sur la remontée et la translation des vases par les houles.

Une fois dans la zone de déferlement, au long des plages, les vases remontées par les houles depuis la zone des petits fonds seront remises en suspension et pourront être réentraînées par les courants littoraux ou s'écouler vers le large sous forme de courants de turbidité.

IV. MOUVEMENTS DES MATERIAUX PARALLELEMENT AU RIVAGE

D'une façon générale une côte sera en érosion, en équilibre ou en sédimentation, selon que les quantités de matériaux traversant la section de la plage sont supérieures, égales ou inférieures à la quantité y pénétrant.

IV. 1. SEDIMENTS GROSSIERS

A. Description du phénomène

Pour les sables et notamment pour les sables fins rencontrés sur certaines côtes, il existe deux types de transport littoral différent.

Le premier sous l'action des houles fortes de tempêtes s'effectue principalement en suspension (75% de transport) et peut atteindre des centaines de milliers de m^3 sans que le phénomène soit visuellement contrôlable.

Le deuxième sous l'action des houles faibles de beau temps correspond à un transit mixte en *dents de scie* sur la plage et dans le rouleau de déferlement qui prend naissance en bas de plage, il est facilement décelable et contribue aux accumulations sédimentaires le long des ouvrages côtiers de faibles longueurs mais intéresse en général de faibles volumes de sédiments.

Au point de déferlement de la houle, la turbidité est maximale, elle diminue rapidement de part et d'autre de ce point. Autrement dit, le transport en suspension s'effectue principalement dans la zone amont de la barre de déferlement, alors qu'un peu plus à l'aval, dans la fosse de lévigation, située entre la barre et la côte, le courant de houle bien qu'encore très violent (puissance érosive élevée) est moins turbide, il est appelé *courant de lévigation* (afin de le caractériser du courant général de houle).

B. Transport par jet de rive

Le transport par jet de rive qui existe en haut de plage s'explique de la façon suivante : sous l'effet de la houle oblique, la lame ascendante sur l'estran, entraîne les matériaux suivant la direction de la houle, alors que la lame descendante le long de la plage, sous l'effet de la pesanteur, réentraîne les matériaux suivant la ligne de la plus grande pente. Les particules des sédiments vont être donc soumises à des mouvements alternatifs de montée et de descente (en dents de scie) avec une résultante dans le sens du transit parallèlement au rivage [3].

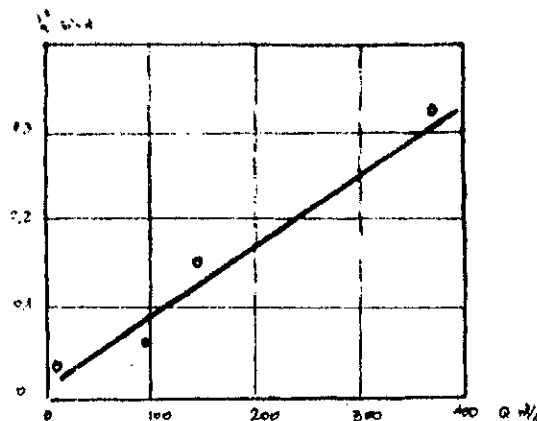


Figure B33 : Transit des galets en fonction de l'amplitude et de l'angle d'approche de la houle

Ce transport ne présente en général qu'une faible partie des transports longitudinaux dus à l'action de la houle. Pour des sables, il ne représenterait que le cinquième ou le dixième du transport total; par contre pour des galets, il peut représenter la quasi totalité du transport par suite de la position des galets sur l'estern.

D'une façon générale les mesures faites en nature par le [L.C.H.F] montrent que le débit journalier de galets croît linéairement comme le carré de l'amplitude de la houle et avec son obliquité (*figure B33*)

C. Transport au voisinage du déferlement

La zone de déferlement correspond à un véritable pôle d'attraction sédimentaire vers lequel les sédiments du large peuvent être remontés et ceux du littoral redescendus pour certaines caractéristiques des vagues.

Par suite de la concentration de l'énergie des houles et de la forte turbulence les sédiments sont remis en suspension et brassés par les vagues, la plus grande partie des transports s'effectuant dans le premier tiers de la distance comprise entre les brisants et la côte (*figure B34*).

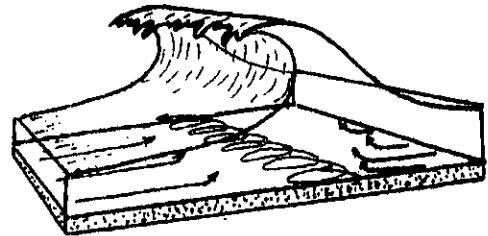


Figure B34 : Schéma du mouvement des grains dans les brisants

Le transport du sable et l'estimation du transit peut être effectué dans les deux cas; pour les houles obliques et pour les houles frontales [4].

Si l'obliquité de la houle avec le rivage est appréciable il se crée au voisinage du déferlement un courant de houle capable d'entraîner parallèlement au littoral une masse importante de sédiments en suspension et par charriage créant un débit solide qui constitue, dans le cas des sables, le mode de transport prédominant d' à la houle.

Il faut rappeler également que les particules de sable se déplacent parallèlement au littoral à une vitesse plus faible que celle du courant de houle qui atteint sa valeur maximale pour une obliquité de la houle de 45° à 60° [6].

Des mesures systématiques faites au sein du [L.C.H.F] en modèle réduit ont permis de quantifier l'importance de ces mouvements sédimentaires aux approches du déferlement, et de constater que [14] :

- La plus grande quantité en transit s'effectue, pour des sables fins, au voisinage du déferlement.
- En tempête près de 75% des sables fins transportés parallèlement au littoral sont déplacés en suspension dans le courant littoral non pas au point où sa vitesse est maximum, mais sur la face interne de la barre.

D. Estimation du transit littoral

Le transit littoral en un site donné peut être évalué suivant plusieurs méthodes :

- La première consiste à évaluer le transit littoral de l'évolution du fond au cours du temps, comme par exemple en suivant les volumes de matériau arrêtés par un ouvrage. Il faut s'assurer dans cette méthode que les ouvrages arrêtent effectivement la totalité du transit et non une partie seulement comme le ferait un épis. Cette méthode n'est pas applicable en site vierge.
- La deuxième méthode consiste à utiliser des valeurs bien connues en un site voisin, en introduisant éventuellement des corrections basées sur les conditions locales; on peut également, par analogie avec des littoraux ayant des caractéristiques océanographiques, topographiques et sédimentologiques voisines, essayer d'avoir des ordres de grandeur du transit littoral; malheureusement une situation aussi favorable ne se présente que rarement.
- L'utilisation des traceurs radioactifs ou des colorants, les mesures de turbidité des eaux et des vitesses des courants, sont des essais qui s'étalent sur toute l'année et demandent des investissements considérables.
- On peut enfin utiliser des formules ou des abaques permettant d'évaluer le transit littoral pour différentes actions de houles et en faire le bilan annuel.

Différentes études [L.C.H.F] ont montrées que le transit littoral des sables fins dépendaient du bilan d'énergie de la houle $H^2 T t$ et pouvait être rattaché à une expression de la forme suivante :

$$Q_s = \frac{kg}{\gamma} H^2 T t f(\alpha) \quad (\text{B.3.10})$$

formule de G.Sauvage de Saint-Marc et G.Vincent

Q_s : débit volumique du solide [$m^3 s$]

T : période moyenne de la houle [secondes]

α : obliquité des crêtes avec le rivage

t : temps d'action de la houle

k : coefficient du transport de sable

γ : cambrure de la houle

H : amplitude maximale de la houle [m]

Le terme kg/γ caractérise le coefficient de transport du sable. L'influence de la cambrure γ mise en dénominateur n'a pas fait l'objet d'études systématiques en nature, les résultats n'étant valables que pour les cambrures supérieures à 1% [14]. Par contre k a pu être estimé, son ordre de grandeur est le suivant :

$$k = 0.0003 \gamma^{1.75}$$

Mais le paramètre le plus important est la direction de la houle puisque des variations faibles de la direction de la houle du large suffisent pour inverser le sens du transport littoral [4].

L'expérience montre que la fonction $f(\alpha)$ passe par un maximum pour α de l'ordre de 50 à 65°; les différentes expressions utilisées sont :

$$\sin 7\alpha/4, \sin 2\alpha (\cos \alpha)^{0.5}, \dots \text{etc}$$

Dans tous les cas on doit se rappeler que ce transit s'effectue au voisinage du déferlement c'est-à-dire à des profondeurs variables, pouvant atteindre plusieurs mètres par des ouvrages courts tel que les épis.

Les études faites par le [C.E.R.C] donnent :

$$Q_{s(m^3/j)} = 10^4 H_d^{5/2} \sin 2\theta_d \quad (\text{B.3.11})$$

H_d : Hauteur de la houle au déferlement

θ_d : Obliquité de la houle avec le rivage au déferlement

Cette formule [3] conduit en général à des valeurs du transit littoral supérieure à celles données par le [L.C.H.F].

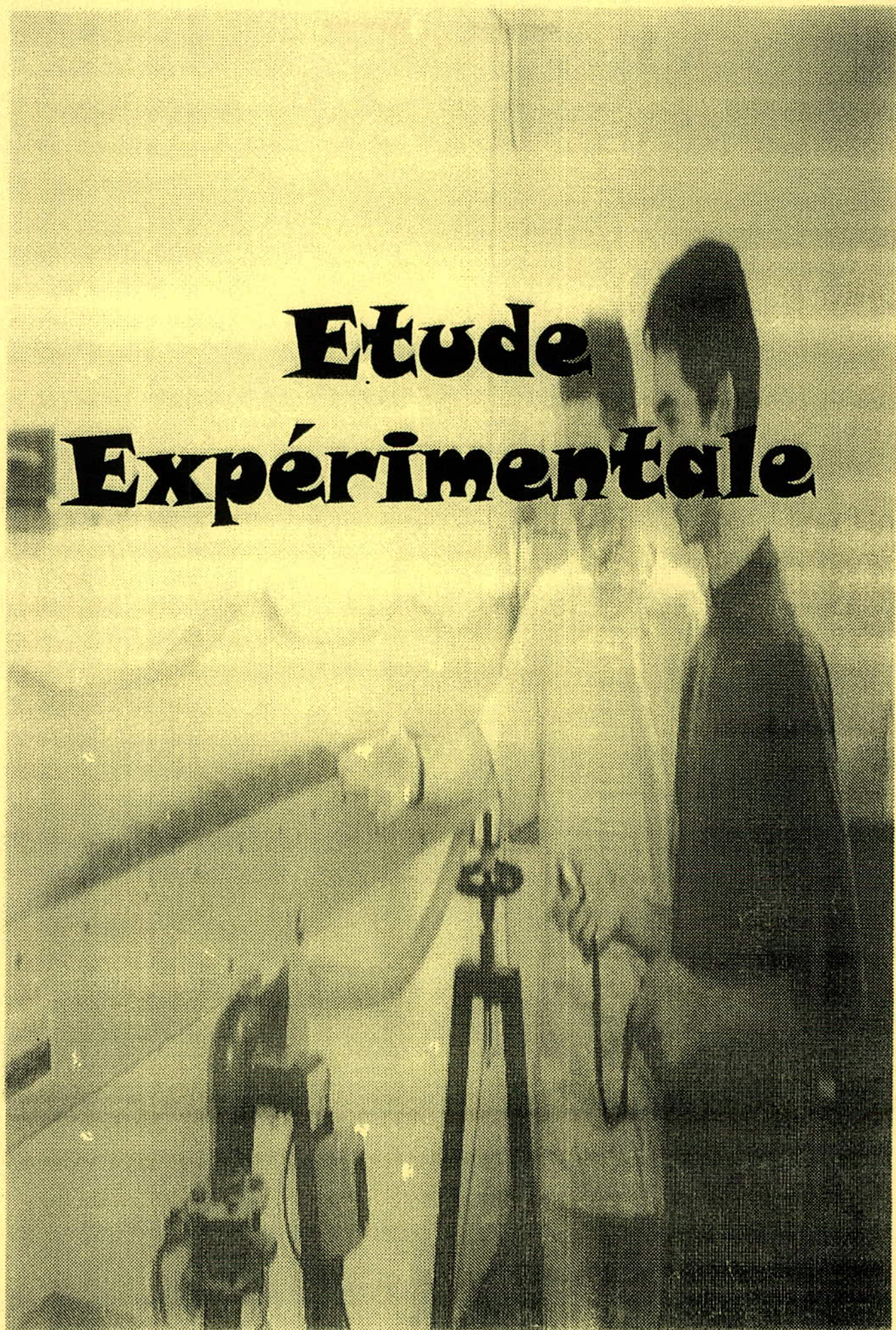
IV. 2. SEDIMENTS FINS

Il est très difficile d'évaluer l'importance du transit littoral d'éléments péltiques de type vases ou limons, sous la seule action des houles obliques. Dans de nombreux cas en effet, le déplacement des particules fines le long de la côte s'effectue sous la double action des courants de marée et des courants de houle sans que l'on puisse séparer leur influence propre.

On a vu dans le paragraphe relatif au mouvement des particules perpendiculairement au littoral que les houles pouvaient remanier les fonds de vase et remonter une partie à la cote. S'il y a déferlement de la houle les vases seront remises en suspension et entraînées dans le sens du courant qu'il s'agisse d'un courant issu de l'obliquité des houles ou d'un courant de marée. Les mesures faites en nature montrent que la turbidité des eaux va croître très rapidement avec les forces des houles et passer de quelques dixièmes de grammes à plusieurs grammes de sédiments secs par litre (la turbidité aurait augmenté comme le carré des amplitudes).

Si les vases sont très fluides la houle pourra très bien mourir à la côte sans déferler par suite de la destruction de son énergie dans un fluide à forte viscosité. Les déplacements parallèles au rivage s'effectueront alors en masse.

Étude Expérimentale



A fin de résoudre certains problèmes d'engineering, il est nécessaire d'introduire certaines hypothèses simplificatrices pour permettre à la théorie, de proposer une solution qui doit être corrigée, ou confirmée par l'expérience.

L'étude expérimentale pose un problème dans l'édification d'une synthèse des résultats obtenus, sur tout quand le nombre de grandeurs variables est élevé.

Pour cette raison, nous nous limitons dans cette présente étude à faire varier uniquement la pente du fond pour les paramètres géométriques, la hauteur de l'eau et la période de houle pour les paramètres dynamiques.

I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La plate forme expérimentale, représentée par la *photo 1* est constituée de :

- Un canal à houle conçu par Armfield Technical Education Company limited, d'une longueur de 2.20m, une largeur de 0.078m, et une hauteur utile de 0.2m, une vanne réglable permet d'avoir la pente désirée du fond (jusqu'à 3%). Les parois latérales sont en Plexiglas, dont la caractéristique primordiale est la transparence, et cela afin de pouvoir observer l'évolution des divers phénomènes pendant nos expériences.
- Le courant est généré à l'aide d'une pompe centrifuge, travaillant en circuit fermé.
- Le débit peut être réglé à l'aide d'un robinet vanne situé dans la partie aspiration.
- La houle est générée par un batteur situé au bout du canal (*photo 2*). Un système bielle manivelle transforme le mouvement circulaire de la roue en un mouvement oscillatoire du volet batteur de fréquence variable.
- Des filtres sont installés à l'autre bout du canal et ont pour rôle de régulariser la surface de l'eau et de l'écoulement dans la veine fluide d'un côté, et de limiter la réflexion de la houle incidente de l'autre.

II. TECHNIQUES DE MESURES

- Une règle fixe sur les parois permet la lecture de la hauteur d'eau le long du canal.
- Un limnimètre disposé au-dessus du canal permet la lecture de l'amplitude des houles.
- La période et la célérité des houles générées sont calculées à l'aide d'un chronomètre à affichage digital.
- Un débitmètre installé à l'amont du canal permet la mesure du débit liquide.
- Les sédiments charriés sont récupérés par un tamis très fin à l'aval du canal, séchés dans l'étuve et pesés ainsi à sec.

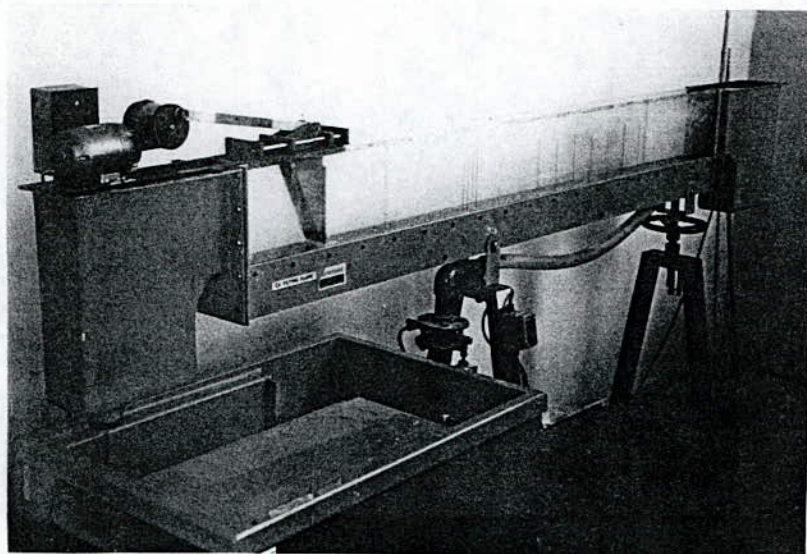


Photo 1 : Plate forme expérimentale

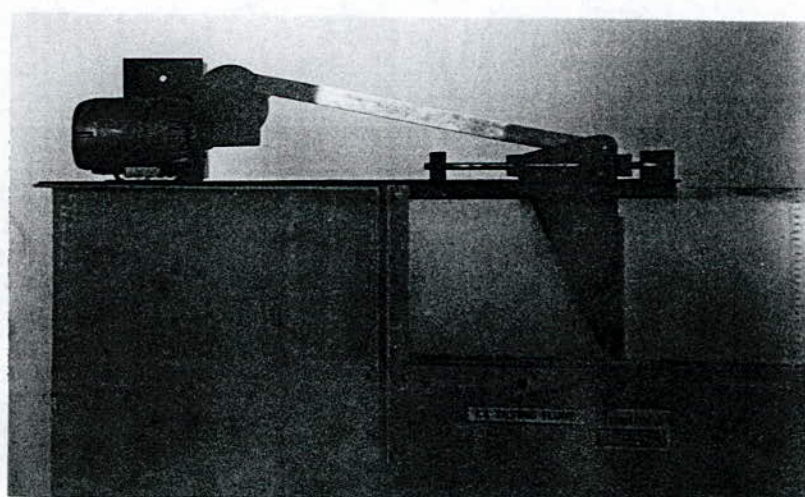
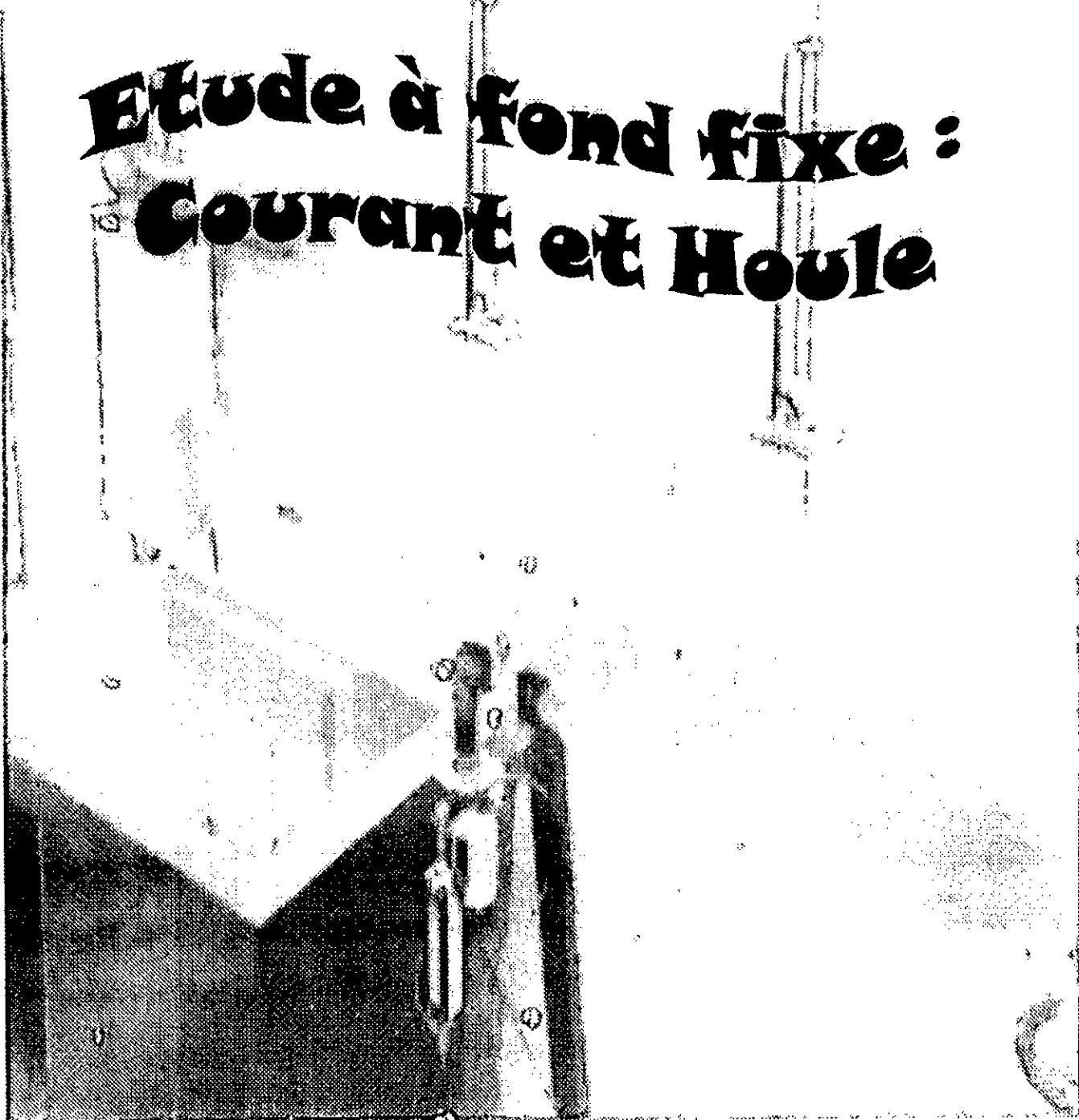


Photo 2 : Générateur de houles

Première Etude

Etude à fond fixe : Courant et Houle



I. POSITION DU PROBLEME

Dans cette étude, nous allons faire une analyse quantitative des paramètres hydrauliques de l'écoulement généré par l'interaction houle-courant en canal.

Les coordonnées de notre système sont représentées par la figure E1 :

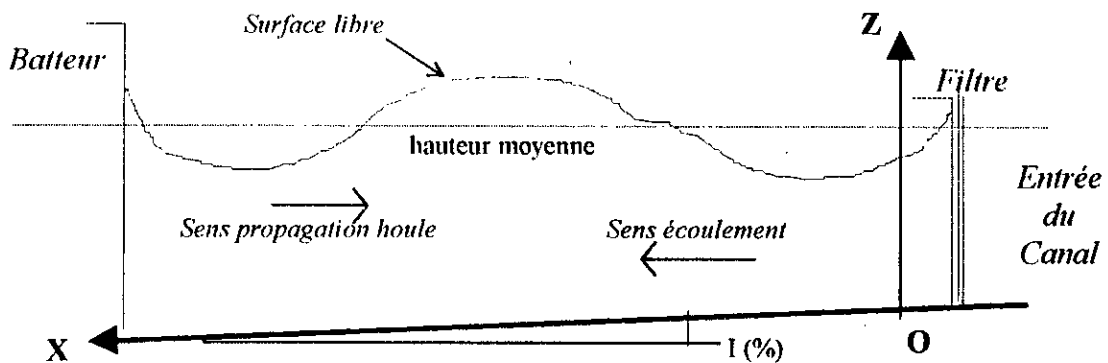


Figure E1
coordonnées du système

Nous sommes bien dans un écoulement périodique où la houle se propage dans le sens contraire du courant. Ceci paraît dès lors comme un cas assez complexe, car les gradients de la composante verticale des vitesses générées simultanément par le courant (figure E2) et la houle (figure E3) sont assez différents.

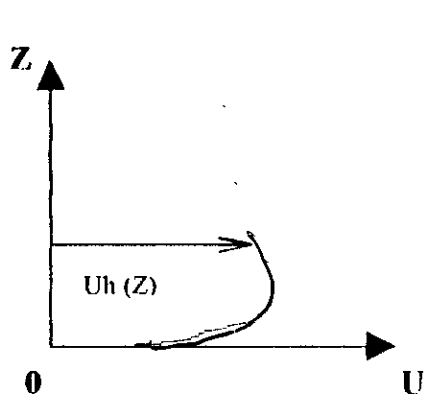


Figure E3
Distribution de vitesse du courant

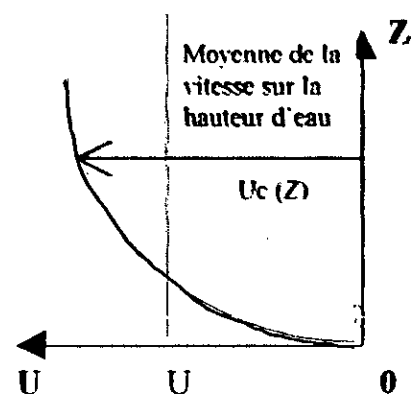


Figure E2
Distribution de vitesse générée par la houle

Si beaucoup de résultats existent déjà dans le cas d'une houle seule ou d'un courant seul, il n'en est pas de même dans le cas où on combine les deux types d'écoulements.

Et si les études expérimentales sont très rares, celles qui existent ne concernent que le cas de houle se propageant dans le même sens du courant.

La présente étude, à fond fixe, nous permettra de mieux cerner le problème et de recueillir d'autres informations sur ce type d'écoulement.

Les résultats expérimentaux obtenus seront comparés avec les équations d'un écoulement permanent et avec celles d'un écoulement oscillatoire, afin de déterminer la variation des paramètres hydrauliques de ces derniers et être utilisés par la suite dans l'étude à fond mobile.

II. CONDITIONS EXPERIMENTALES

Nous avons effectué quatre expériences sur notre canal, dans les conditions suivantes : on stabilise le générateur de houle à la fréquence désirée et nous varions la hauteur d'eau comme indiqué dans le *tableau E1*.

Tableau E1 : Expériences sur fond fixe : courant et houle

<i>Expérience</i>	<i>période houle</i> T (s)	<i>hauteur d'eau</i> h (cm)	<i>mesures effectuées</i>
FCH1	1	3-20	L,c,h
FCH2	0.75	3-20	L,c,h
FCH3	0.55	5-14	L,c,h
FCH4	1	3-10	L,c,h,U

et nous calculons les paramètres; longueur d'onde et célérité pour chaque hauteur .

Remarque :

Les mesures sont effectuées sur une eau à température ambiante ($t = 22^\circ\text{C}$) dont la viscosité cinématique est de : $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

III. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

III. 1. VITESSE DE PROPAGATION, AMPLITUDE, ET LONGUEUR D'ONDE

Les expériences (FCH1,2,3) nous ont permis la mesure des vitesses de propagation des houles incidentes.

Les résultats sont représentés dans la *figure E4* montrant la variation de la célérité en fonction de la hauteur d'eau pour les trois fréquences utilisées.

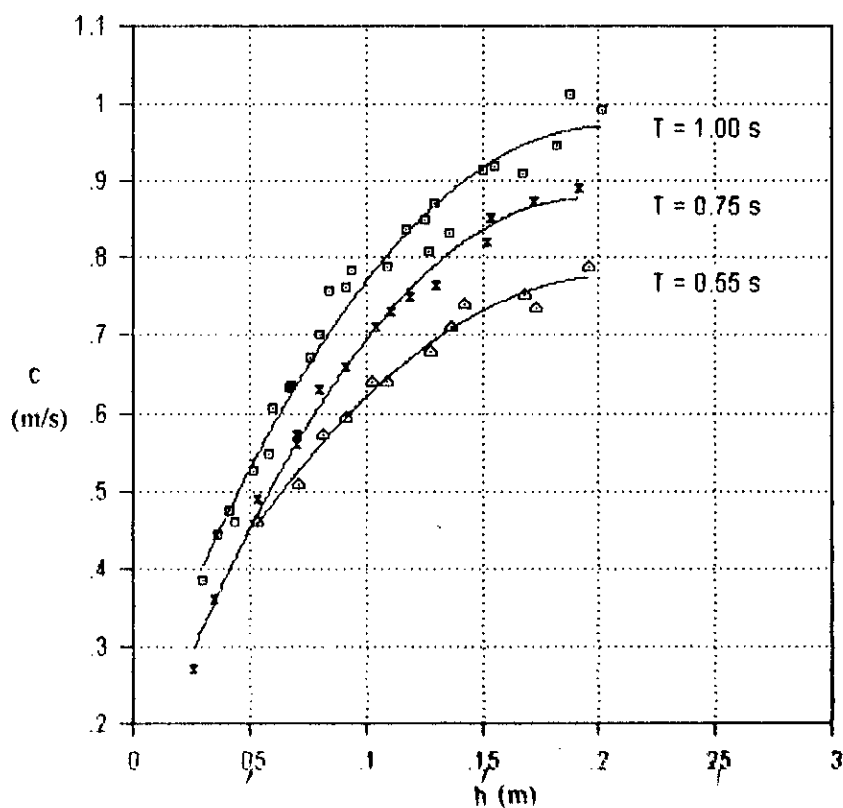


Figure E4
Célérité des houles générées
(mesures pour les différentes périodes)

- La célérité de la houle c croît proportionnellement avec la hauteur d'eau h et la période T .
- Pour une période donnée, la célérité de la houle varie selon h , ce qui est en contradiction avec le cas de la profondeur infinie pour lequel la célérité ne dépend que de la période $c = gT/2\pi$ (Cf B.1.3).
- Pour une hauteur donnée, la célérité varie avec la période, ce qui est en contradiction avec le cas de profondeur finie pour lequel la célérité ne dépend que de la hauteur d'eau $c = \sqrt{gh}$ (Cf B.1.4).

Les mesures reportées sur un repère adimensionnel (L/h , H/h) permettent de déterminer le type et le domaine d'utilisation de ces houles (figure E5).

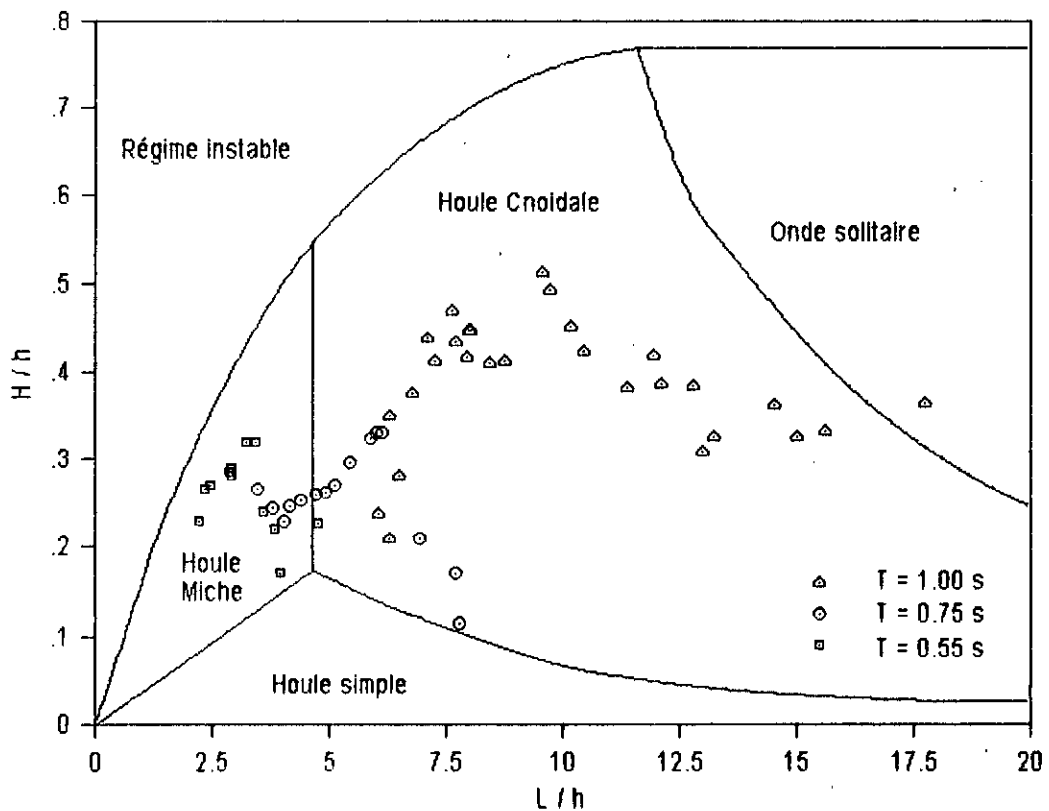


Figure E5
 Domaine d'utilisation des différents types de houles
 (Types de houles expérimentales)

Le rapport (L / h) de toutes nos mesures varie entre 2 et 25; domaine des profondeurs transitoires [4], ce qui confirme les constatations précédentes.

Les expériences (FCH1,2,3) appartiennent aux domaines suivants (tableau E2) :

Tableau E2 : Types des houles expérimentales

<i>Expériences</i>	<i>Type</i>
FCH 1	<i>CNOIDALE</i>
FCH 2	<i>CNOIDALE - MICHE</i>
FCH 3	<i>MICHE</i>

Pour l'expérience FCH1, la mesure correspondant à $h = 0.03$ m appartient au type de houle solitaire.

Donc pour $T=1s$ et $h= 3.5$ à $20cm$, les houles générées sont du type cnoïdales.

Ces mêmes mesures serviront à la comparaison avec les résultats théoriques (figure E6), notamment ceux de Kertweg-De-Vries [Annexe 1] qui propose l'équation:

$$c = \sqrt{gh}(1+H/2h) \quad (E.1.1)$$

pour les ondes cnoïdales se propageant sans déformation dans un milieu bidimensionnel à profondeur constante [4].

La figure E6 reporte dans le repère (h,c) , les courbes théoriques correspondants aux célérités des profondeurs finies ($c = \sqrt{gh}$) et infinies ($c = gT/2\pi$), ainsi que les valeurs empiriques de l'expérience FCH1 mesurées, et calculées (E.1.1).

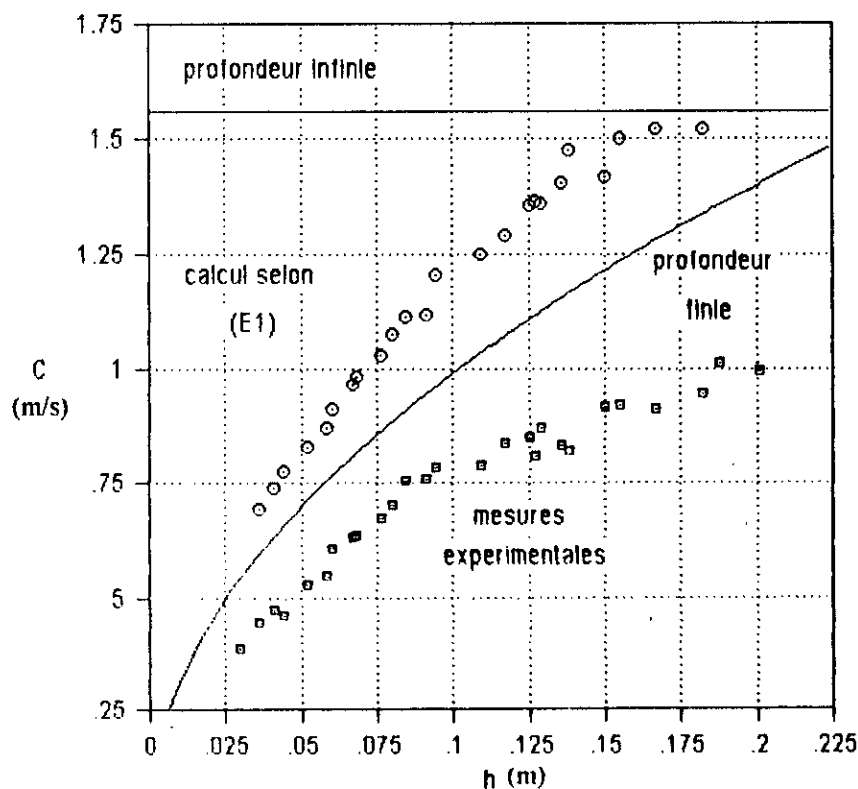


Figure E6
Vérification des vitesses

- Les célérités mesurées sont inférieures aux célérités théoriques, cela est dû au courant contraire qui a tendance à ralentir l'onde incidente.
- Les célérités calculées par (E.1.1) appartiennent bien au domaine des profondeurs transitoires.

III. 2. CONTRAINTE DE FROTTEMENT AU VOISINAGE DU FOND

L'interaction houle-courant ne se ressent pas qu'à la surface, mais s'étend jusqu'au fond.

Pour cela nous sommes amené à comparer les contraintes de frottement au voisinage du fond de la houle et du courant.

Dans la *figure E7* nous avons reporté les contraintes de frottement dues au courant pour les pentes : 0.5 - 1 - 1.5 % et celles dues à la houle (T = 1s).

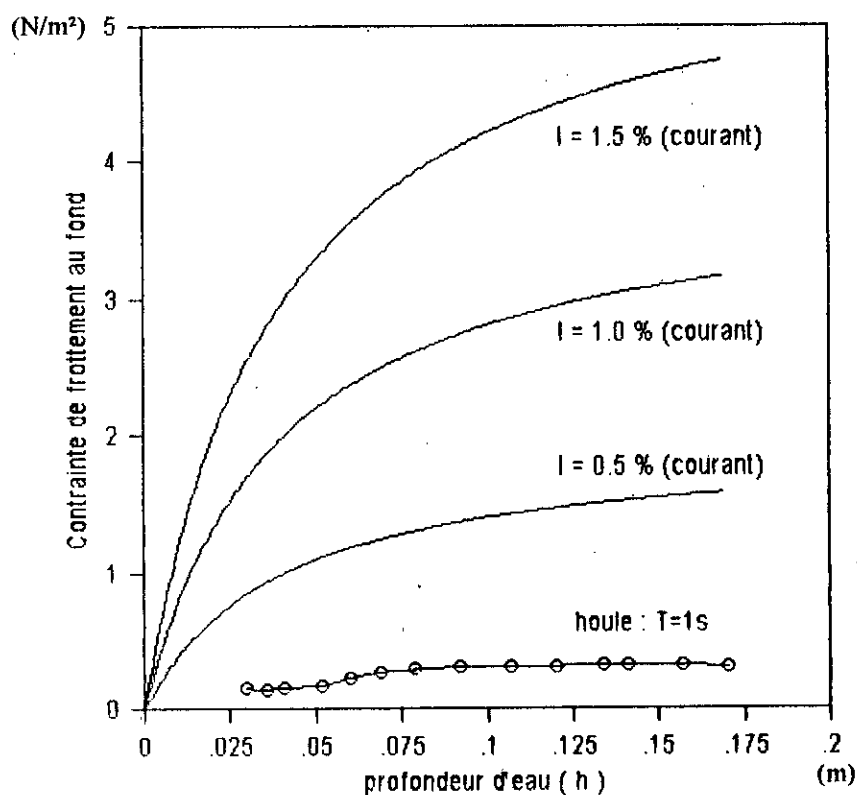


Figure E7

Variation de la contrainte sur le fond en fonction de la profondeur

- Il est intéressant de constater que les contraintes de frottement dues au courant seul sont nettement supérieures à celles dues à la houle seule, et ceci quelle que soit la pente utilisée, elles sont en moyenne 6 fois supérieures pour I=1% et 18 fois pour I=1.5%.

Sur le plan numérique, la recherche d'une solution au problème de contrainte générée par l'interaction houle-courant pose beaucoup de difficultés. Elles sont causées par la différence entre, le gradient de vitesse des particules fluides liées au courant, et celles liées à la houle.

Beaucoup d'auteurs proposent une loi de frottement basée sur la superposition linéaire résumée par la relation :

$$\tau_{ch} = \tau_c + \tau_h \quad (\text{courant favorable}) \quad (\text{E.1.2})$$

$$\tau_{ch} = \tau_c - \tau_h \quad (\text{courant défavorable}) \quad (\text{E.1.3})$$

JONSON.I (1978), utilise une méthode basée sur l'introduction d'un coefficient de frottement dans l'équation (E.1.2).

Mais en réalité l'addition linéaire surestime assez la contrainte. Cela a été prouvé par les mesures expérimentales de KEMP et SIMONS (1982) [20]

Dans le cas d'un écoulement à houle dominante, la superposition d'une houle et d'un courant sur fond hydrauliquement lisse ne modifie pas la contrainte de frottement.

Les limites entre un écoulement à houle dominante, un écoulement transitoire, et un écoulement à courant dominant, ont été élaborées à partir de plusieurs travaux, dont un résumé est proposé ci-dessus (tableau E3) :

Tableau E3 : Critère de régime d'un écoulement combiné : houle-courant Sleath[19]:

<i>Auteurs</i>	<i>Houle dominante</i>	<i>Transition</i>	<i>Courant dominant</i>
Bijker (1966)	$U_{ch} / u_* > 20$	$20 > U_{ch} / u_* > 6$	$U_{ch} / u_* < 6$
Natarajan (1969)	$U_c / U_{ch} < 0.27$		
Swart (1976)	$U_{ch} / u_* > 10$	$10 > U_{ch} / u_* > 3$	$U_{ch} / u_* < 3$
Bliven & al., (1977)	$U_c / U_{ch} < 1.16$		
Amons & Collins (1978)	$U_{ch} / u_* > 10$	$10 > U_{ch} / u_* > 1$	$U_{ch} / u_* < 1$

KEMP et SIMONS (1982), trouvent également que pour de faibles périodes ($T = 1s$), les contraintes de frottement calculées à partir de la superposition théorique de la houle au courant, sont différentes de 10% à celles obtenues directement à partir des mesures dans l'interaction houle-courant.

Les mesures de l'expérience FCH4 nous ont permis d'avoir :

$$13 < U_{ch} / u_* < 16 \quad (\text{E.1.4})$$

$$1.01 < U_c / U_{ch} < 1.02 \quad (\text{E.1.6})$$

et d'en déduire que notre écoulement est à *houle dominante*.

Les remarques citées précédemment nous permettent d'utiliser le critère de superposition linéaire pour des conditions expérimentales similaires (écoulement à houle dominante, et $T=1s$) (E.1.3).

III. 3. DOMAINE DE VALIDITE

Les données de l'expérience FCH4 peuvent servir à la prédiction des changements de caractéristiques d'une houle, quand on y ajoute un courant uniforme.

La *figure E8* représente les résultats obtenus, montrant ainsi une variation de la longueur d'onde en fonction du rapport U_c / c .

Cette figure a l'avantage de définir un domaine de validité où la houle subit l'influence du courant. Ce domaine de validité est défini par l'inéquation :

$$(U_c / c) \geq 0.129 \quad (\text{E.1.7})$$

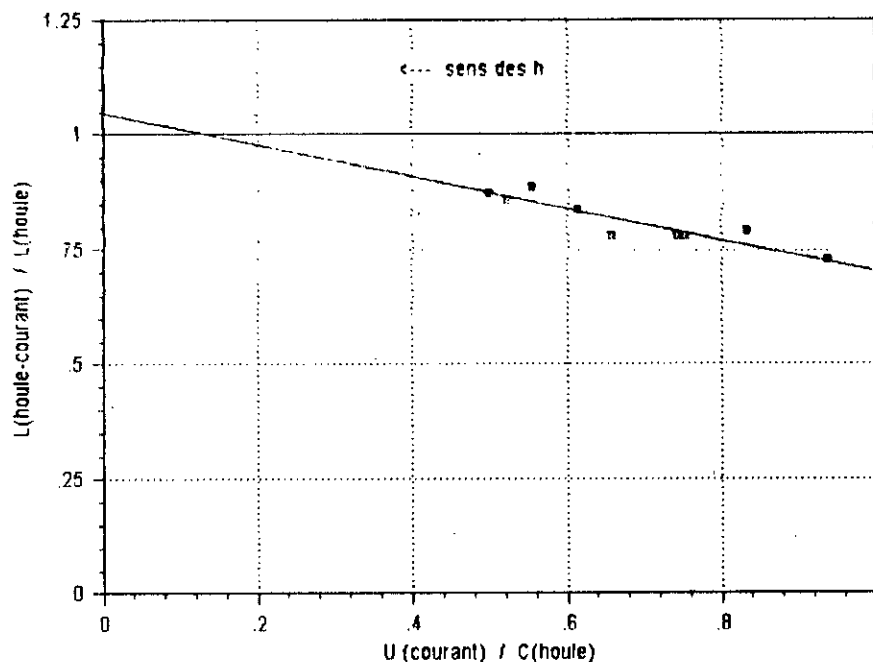


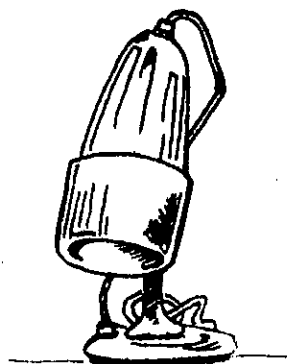
figure E8

Changement de la longueur d'onde de la houle en fonction du courant

IV. CONCLUSIONS DE L'ETUDE

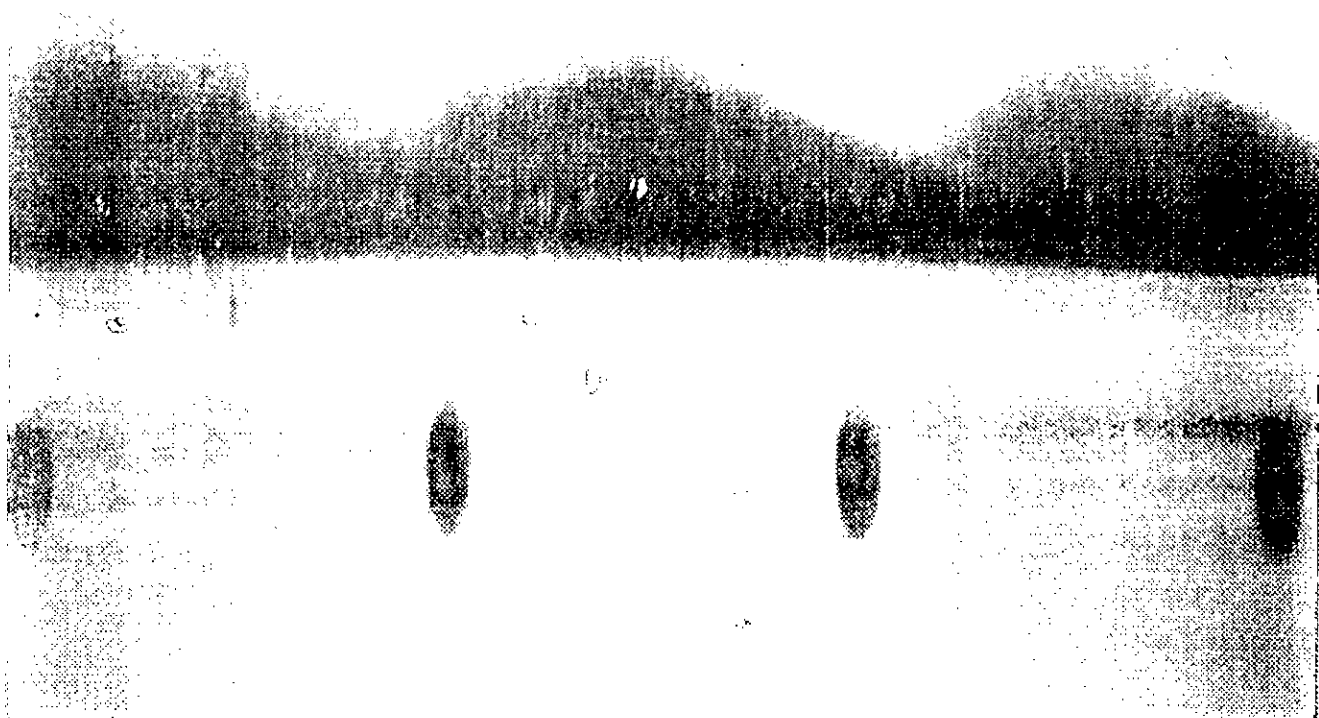
Les principales conclusions tirées de ces analyses sont résumées par les points suivants :

- *Les ondes périodiques simples passent progressivement du stade de la houle de MICHE à celui de la houle cnoïdale puis à celui de l'onde solitaire, suivant que la période augmente.*
- *Le courant défavorable a un effet réducteur sur la vitesse de propagation de la houle.*
- *La célérité de la houle à profondeur moyenne est d'autant plus importante que la période, et la hauteur d'eau sont plus importantes.*
- *La contrainte de frottement sur le fond due à la houle est beaucoup plus petite que celle due au courant et la contrainte de l'interaction suit une loi linéaire pour de faibles périodes ($T=1s$).*



Deuxième Etude

Etude à fond mobile : Courant



I. POSITION DU PROBLEME

Cette étude a pour objet de préciser sur un modèle, les relations fondamentales qui régissent le phénomène du charriage.

Nous envisageons un écoulement permanent incompressible et à surface libre sur fond mobile à diamètre uniforme.

La taille des sédiments est très variable. Pour faire une bonne comparaison entre les différents types de sédiments, il est nécessaire de les classer suivant leurs diamètres. Le *tableau E4* représente un classement proposé par le A.G.U (Union Américaine des Géophysiciens). La taille des sédiments est caractérisée par le terme diamètre de particule.

Par contre, il existe trois définitions de cette grandeur :

- Le diamètre d'une sphère ayant le même volume que la particule
- Le diamètre d'une sphère lisse ayant la même densité et la même vitesse de chute que la particule
- Le diamètre médian

On suppose que les frottements sur les parois latérales sont négligeables, la rugosité du fond étant prépondérante.

Le système de coordonnées du repère considéré est schématisé par la *figure E9*

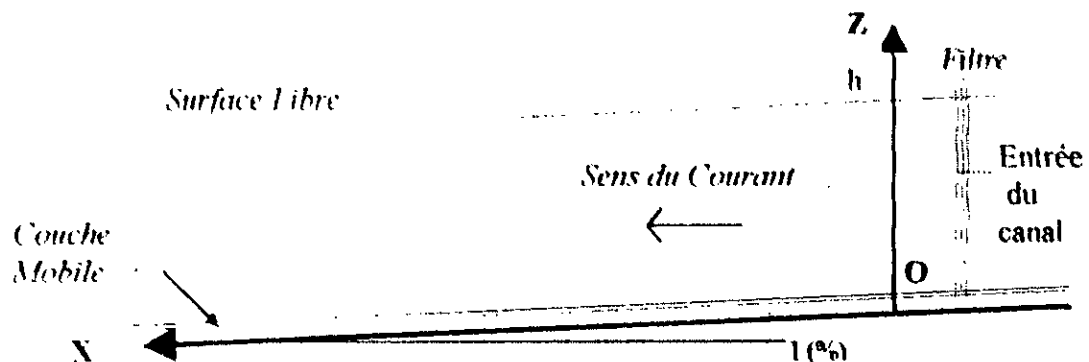


Figure E9
Système de coordonnées

Nos résultats expérimentaux seront successivement comparés avec les lois empiriques de Meyer-Peter, Kalinske, Einstein, Schields, Bonnefille.

Tableau E4
Classification des particules de sédiments Sleath [19]

Nom de la classe		Diamètre de la particule	
		Millimètres	Microns
Rocher	Très large	4096 - 2048	
	Large	2048 - 1024	
	Moyen	1024 - 512	
	Petit	512 - 256	
Cailloux	Large	256 - 128	
	Petit	128 - 64	
Gravier	Très rude	64 - 32	
	Rude	32 - 16	
	Moyen	16 - 8	
	Fin	8 - 4	
	Très fin	4 - 2	
Sable	Très rude	2 - 1	2000 - 1000
	Rude	1 - 0.5	1000 - 500
	Moyen	0.5 - 0.25	500 - 250
	Fin	0.25 - 0.125	250 - 125
	Très fin	0.125 - 0.062	125 - 62
Vase	Rude	0.062 - 0.031	62 - 31
	Moyen	0.031 - 0.016	31 - 16
	Fin	0.016 - 0.008	16 - 08
	Très fin	0.008 - 0.004	8 - 4
Argile	Rude	0.004 - 0.002	4 - 2
	Moyen	0.0020 - 0.0010	2 - 1
	Fin	0.0010 - 0.0005	1 - 0.5
	Très fin	0.00050 - 0.00024	0.5 - 0.24

II. CONDITIONS EXPERIMENTALES

Nous avons réalisé quatre campagnes de mesure, caractérisée chacune par une pente différente. Pour chaque cas nous avons obtenu plusieurs mesures des débits charriés, le *tableau E5* résume les différentes mesures effectuées :

Tableau E5 : Expériences sur fond mobile : courant

<i>Expériences</i>	<i>Pente (%)</i>	<i>mesures</i>
MC1	0.5	h, q_s, Q
MC2	1	h, q_s, Q
MC3	1.5	h, q_s, Q
MC4	2	h, q_s, Q

et nous calculons les paramètres : débit liquide, débit solide pour chaque hauteur d'eau.

Le sédiment utilisé dans nos expériences est un sable moyen (*tableau E4*), de densité 2.61 [*Annexe-2*], et de diamètre $d_{50} = 383\mu\text{m}$ [*Annexe-3*].

III. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

III. 1. ETUDE QUALITATIVE

Les photos 3.4,5 illustrent l'évolution du lit pendant les expériences précédentes. Au début du charriage le lit est plat. Au cours du temps les bancs se forment successivement d'aval en amont, et créent des dunes le long du canal.

Les études expérimentales de JALLARD et P.CHEE [1] ont conduits aux constatations suivantes :

- La rugosité du lit est la somme de deux rugosités, celle *de peau* qui dépend de la taille des grains, et celle *de forme* qui dépend des ondulations de fond (*rides et dunes*), celle-ci est plus grande que la première.
- Le coefficient de Strickler k_s diminue lors de l'apparition des formes au fond (pendant le charriage), et augmente lors de leur disparition (fin de charriage).
- L'intensité du transport solide est fonction de la puissance dissipée par l'écoulement pour mettre en mouvement les grains de sédiments.

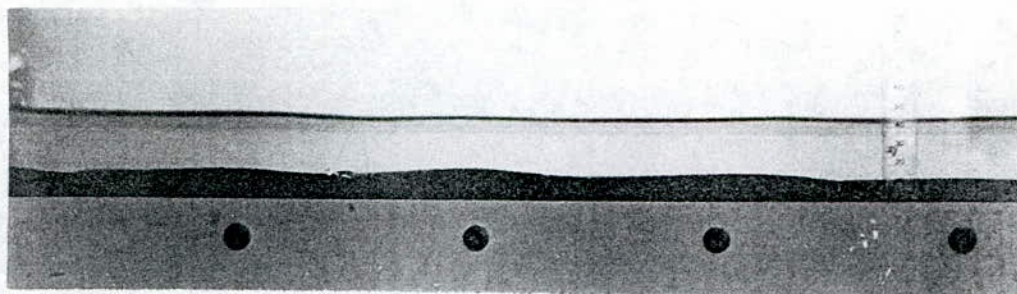


Photo 3 : Début de charriage (état du lit)

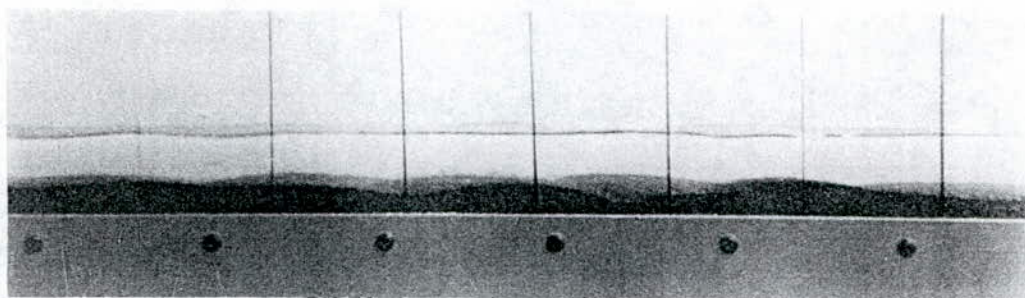


Photo 4 : Fin de charriage (état du lit)



Photo 5 : Rides de fond

Ce qui nous conduit à expliquer l'évolution de notre expérience par le *tableau E6*

Tableau E6 : Evolution du lit durant les expériences

<i>Evolution de l'expérience</i>	<i>Etat du lit</i>	<i>Rugosité totale</i>	<i>Evolution de la rugosité</i>	<i>Intensité du charriage</i>
<i>début de l'expérience</i>	<i>lit plat</i>	<i>rugosité de peau</i>	—	—
<i>pendant l'expérience</i>	<i>apparition des formes</i>	<i>rugosité de peau et de forme</i>	<i>augmente</i>	<i>diminue</i>
<i>fin de l'expérience</i>	<i>disparition des formes</i>	—	<i>diminue</i>	<i>augmente</i>

III. 2. ETUDE QUANTITATIVE

La *figure E10* représente les mesures du débit charrié des expériences (MC1,2,3,4) dans un repère adimensionnel $[Q_s / (\text{sgd}^3)^{0.5}, f]$ (Cf. B.1.30, 31).

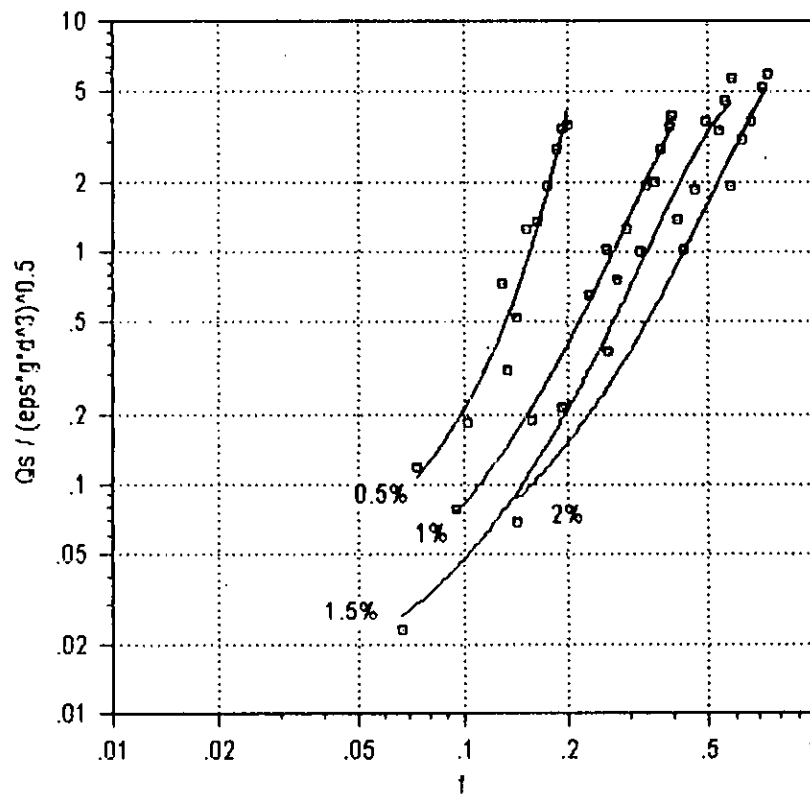


Figure E10
présentation des mesures expérimentales

L'ensemble des expériences reportées sur la figure précédente, forment des courbes d'ajustement parallèles, dont les coefficients de corrélations varient entre 0.94 et 0.99. Chaque expérience sera reportée sur le plan adimensionnel et comparée avec les équations de charriage suivantes (Cf. B.1.32, 33, 34, 35, 36):

- courbe (1) *Kalinske* : $Q_s / (\epsilon g d^3)^{1/2} = 10 f^{5/2}$
 courbe (2) *Meyer-Peter* : $Q_s / (\epsilon g d^3)^{1/2} = 8 (f - 0.047)^{3/2}$
 courbe (3) *Einstein* : $Q_s / (\epsilon g d^3)^{1/2} = 32.6 f^3$
 courbe (4) *Bonnefille* : $Q_s / (\epsilon g d^3)^{1/2} = 5.5 f^{3/2} (4.62 f^{1/2} - 1)^{1.25}$
 courbe (5) *Schildts* : $Q_s / (\epsilon g d^3)^{1/2} = 10 C_* (f - 0.076)$

Les figures E11, 12, 13, 14 sont respectivement celles de MC1, 2, 3, 4.

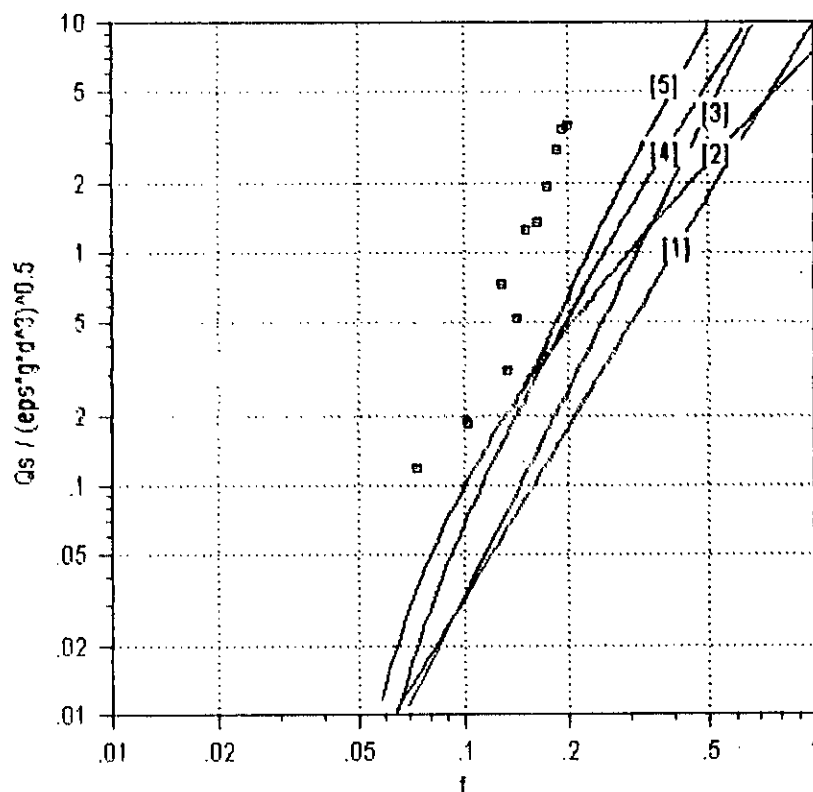
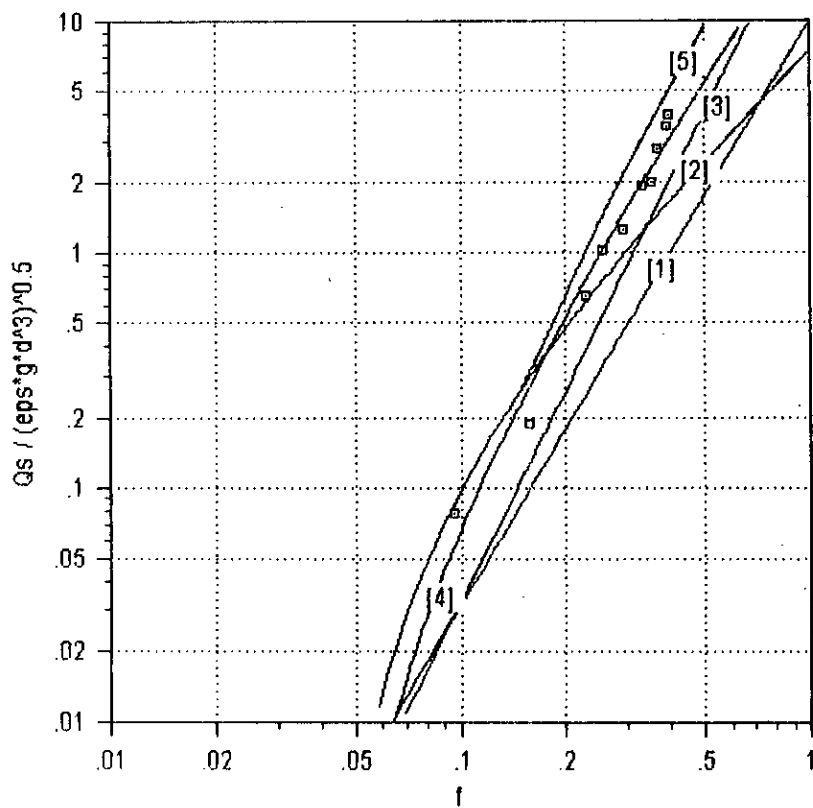
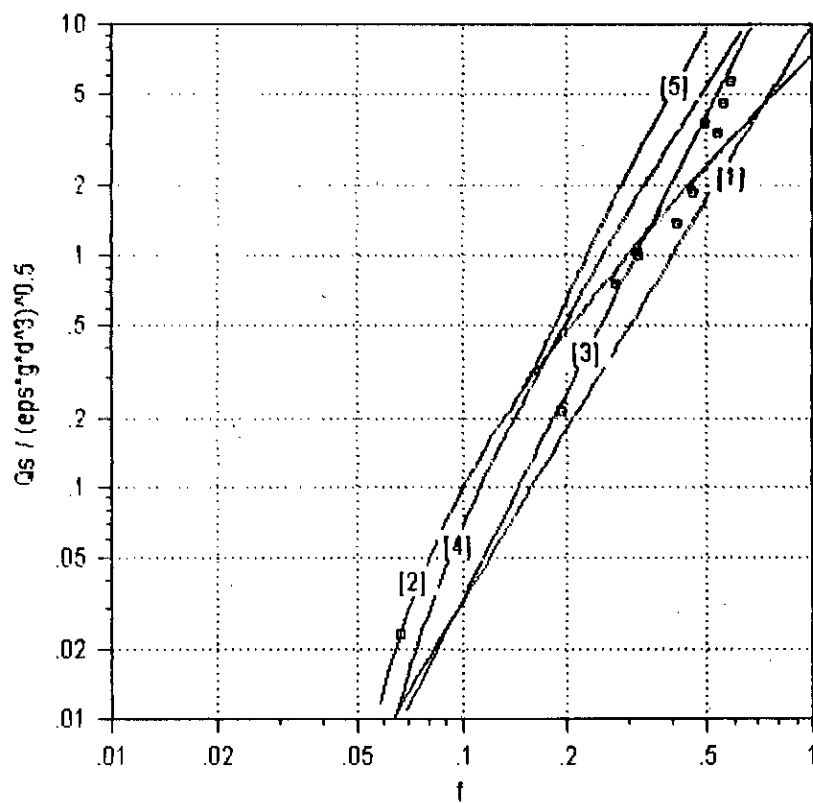


Figure E11 : Expérience MC1



FigureE12 : Expérience MC2



FigureE13 : Expérience MC3

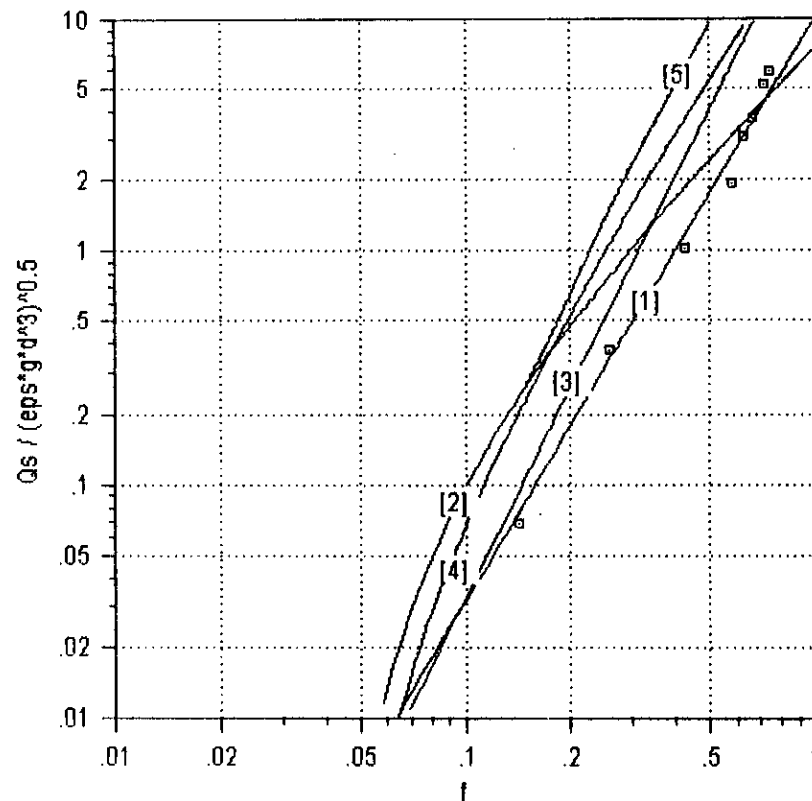


Figure E14 : Expérience MCH4

La différence entre les lois empiriques du charriage est assez nette, la détermination du volume charrié grâce à celles-ci reste très difficile, chacune d'entre elles répond à des conditions bien spécifiques, et à ses propres domaines de validités :

- On peut remarquer que les mesures de MCH2 et MCH4 correspondent respectivement aux lois de *Bonnefille* et *Kalinske*.
- L'expérience MCH3 donne des résultats entre ceux de *Meyer-Peter* et ceux d'*Einstein*.
- Les mesures de la pente 0.5% ne correspondent à aucune des équations proposées, cela revient sans doute au domaine utilisé par ces auteurs ($I \geq 1\%$).

IV. CONCLUSIONS DE L'ETUDE

- *Plus l'écoulement perd de l'énergie aux ondulations, plus il perd sa capacité à déplacer les sédiments.*

L'écoulement provoque un tassement naturel meilleur à celui crée artificiellement au début.

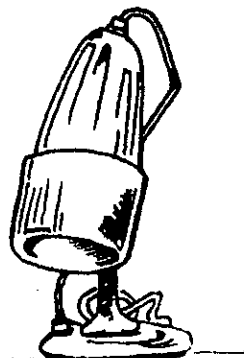
Pour le sable moyen, la déformation du lit se fait par dunes régulières à l'aval, celles ci disparaissent quand l'érosion accroît la hauteur d'eau.

Le long du lit, les dunes sont plus petites et deviennent même des rides pour des hauteurs d'eau importantes.

- *Le calcul du débit solide charrié par les méthodes utilisées dépend essentiellement de la tension de frottement à la paroi, celui ci s'accorde mal avec les faits; les pentes sont très variables et différent de l'un à l'autre.*

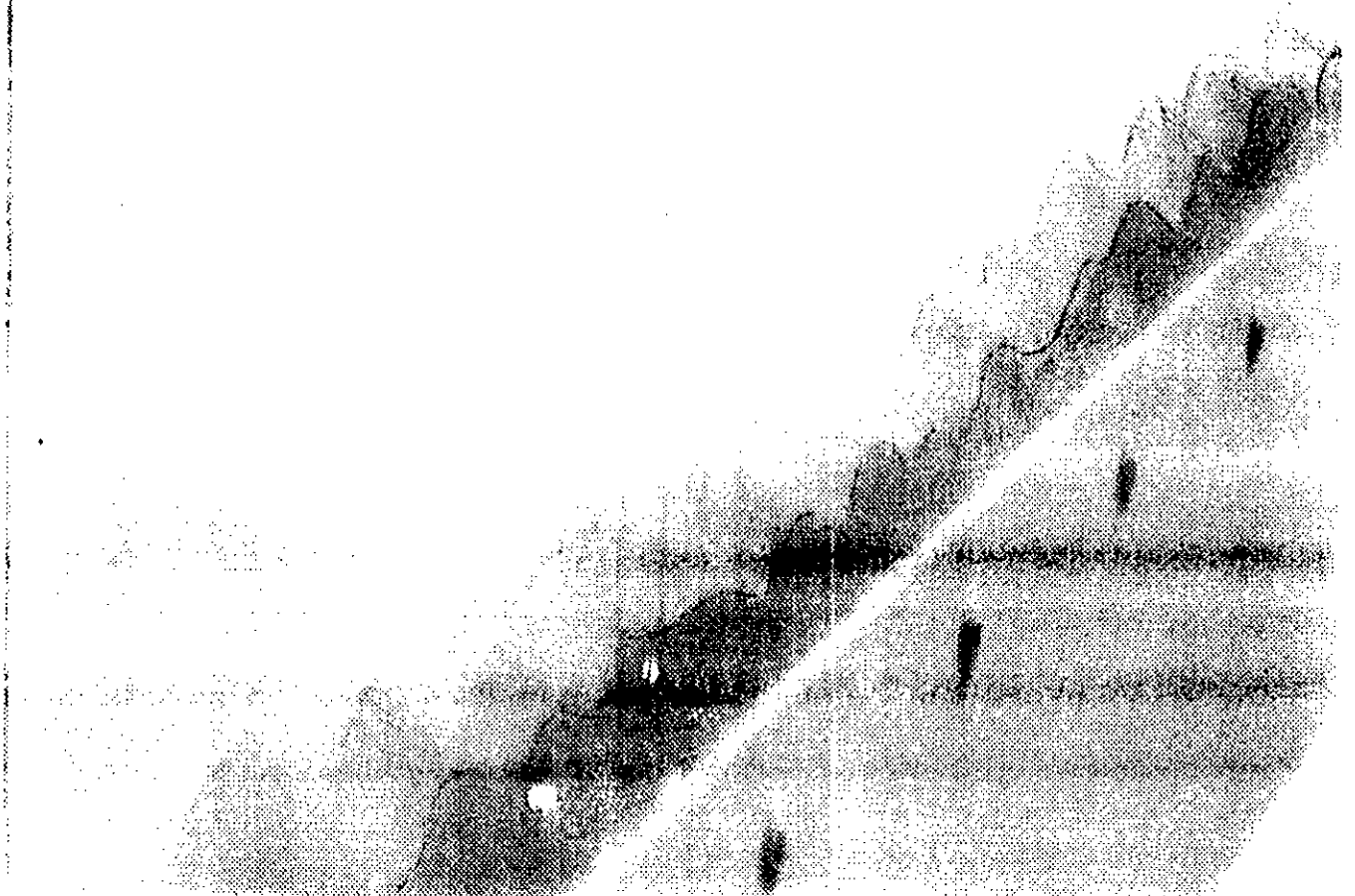
D'autres méthodes utilisent la vitesse moyenne, et sont d'une application facile. Les corrections à leurs apporter sont bien définies, mais leurs domaines de validités restent restreints.

Les méthodes reposant sur le calcul de la vitesse étoilé a les mêmes avantages et inconvénients que le précédent, mais ce paramètre est beaucoup plus difficile à évaluer.



Troisième Etude

Etude à fond mobile Courant et Houle



I. POSITION DU PROBLEME

Nous avons étudié dans la partie précédente le transport solide par le courant qui s'avère un problème hydraulique classique, celui du transport solide par les houles est par contre moins étudié, on le retrouve dans des travaux concernant l'hydraulique des zones côtières, où est étudiée la question du transport solide par les courants de houle le long du littoral.

L'un des premiers à étudier ce cas est V.I. VINOGRADOVA (1968) [21], qui a fait une publication où est donné un aperçu sur les différentes approches de résolution de ce problème. Après cette œuvre, sont apparues beaucoup d'autres se basant sur les deux approches suivantes :

- Formules analogues avec le transport solide par les courants d'eau.
- Approche de VINOGRADOVA énergétique (1968), où le transport solide se détermine par le transfert de masse par les houles.

Ces deux approches n'aboutissent pas vraiment à une méthode de calcul admissible pour le transport par le courant et la houle, nous avons été amené à consulter des publications basées sur les études expérimentales de VINOGRADOVA [21], MASS.E.I [13] et QUICK.M.C [16].

II. CONDITIONS EXPERIMENTALES

Au début de chaque expérience et pour un débit constant d'eau, nous avons mesuré le transport solide et la hauteur d'eau. Ensuite pour le même débit sur la surface du courant nous avons appliqué des houles de période constante $T=1s.$ et les mesures du débit charrié et de la vitesse du courant se sont répétées.

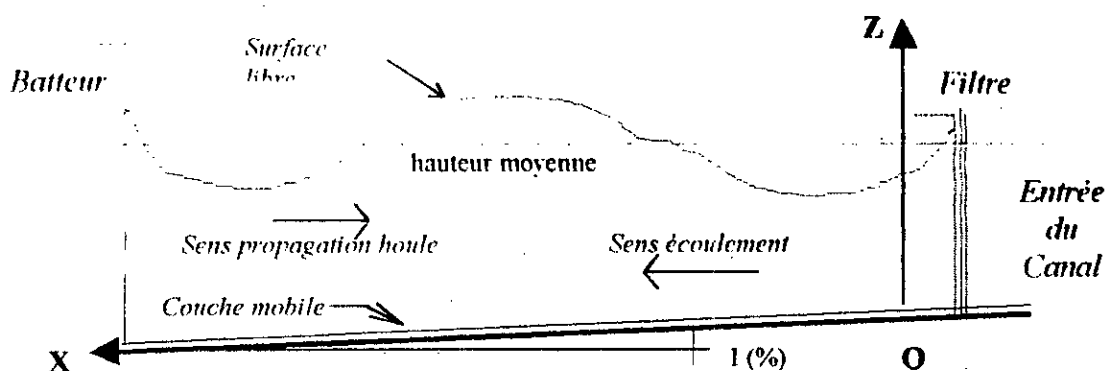


Figure E15
Coordonnées du système

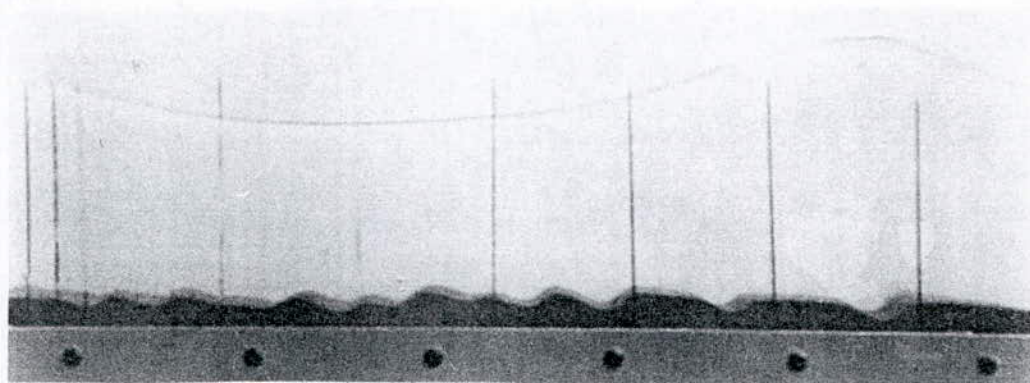


Photo 6 : Evolution du lit

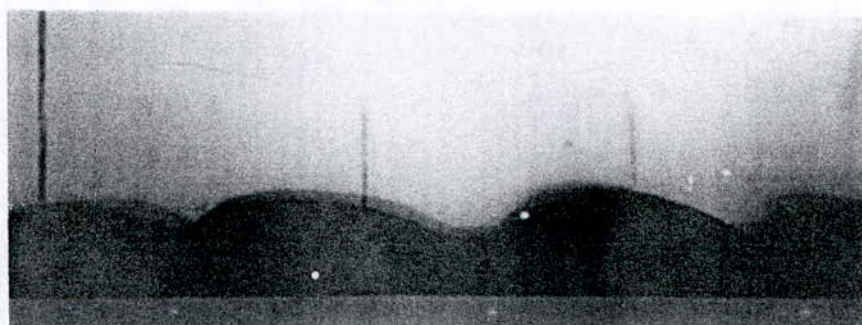


Photo 7 : Rides de fond

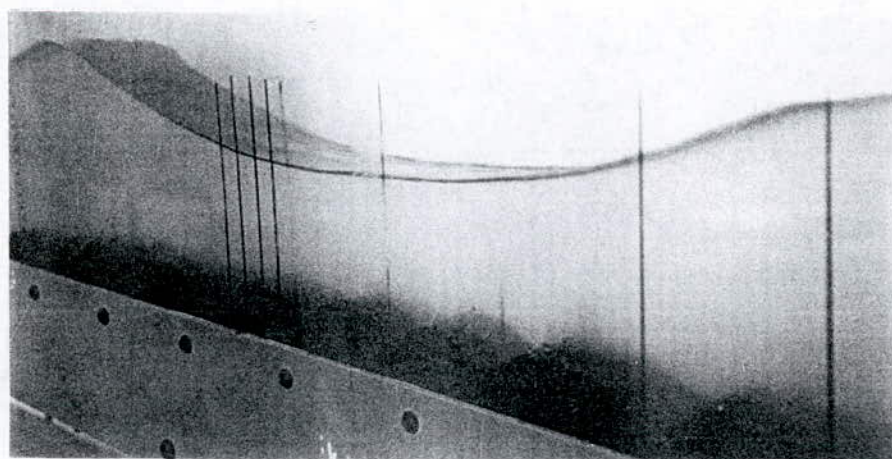


Photo 8 : Phénomène de saltation

Les expériences sont résumées dans le *tableau E7*

Tableau E7: Expériences sur fond mobile : courant et houle

Expérience	Pente	Période houle	mesures
MC5	1%	-	$h - Q - q_s$
MCH1	1%	1s	$h - Q - q_s - c - L - H$

Le sédiment utilisé est le même que celui des expériences MC (sable moyen; $d_{50}=383\mu\text{m}$, $d=2.61$).

III. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Nous rapporterons les résultats des expériences MC5 et celle de MCH1 sur un même graphe (*figure E16*), et nous les comparerons ensuite avec les équations du charriage de l'étude précédente (*figures E17, E17a*).

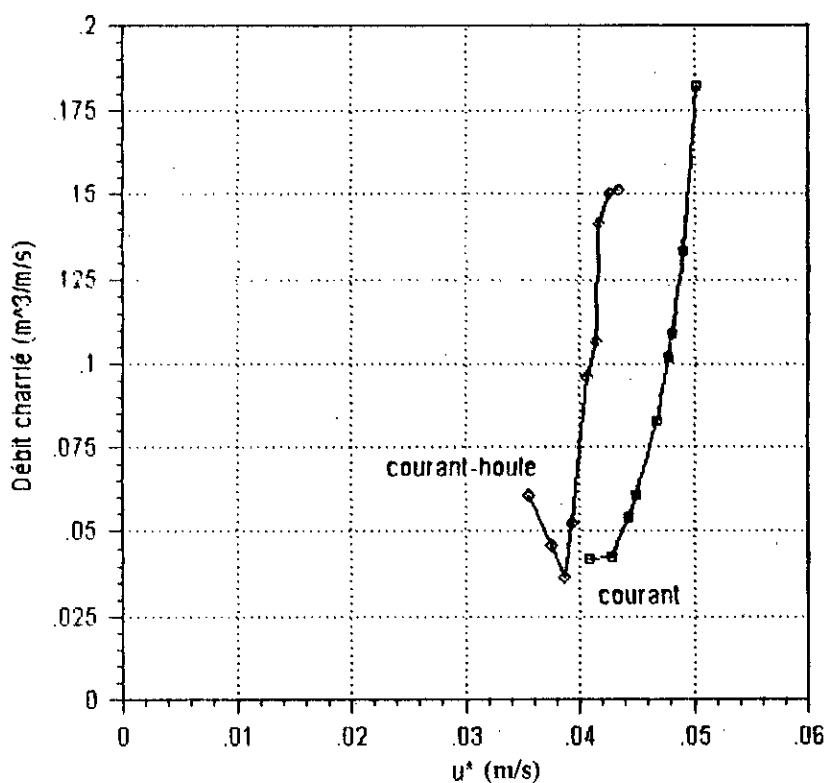


Figure E16
 $q_s(u_*)$ 'expériences MC5, MCH1'

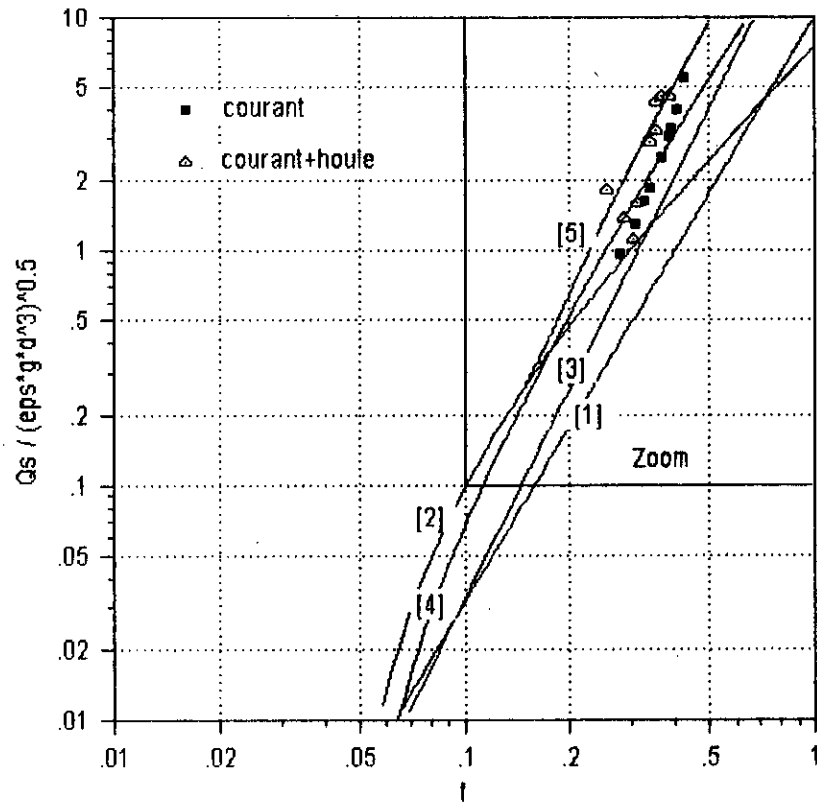


Figure E17 : Comparaison des équations du charriage avec MC5 et MCH1

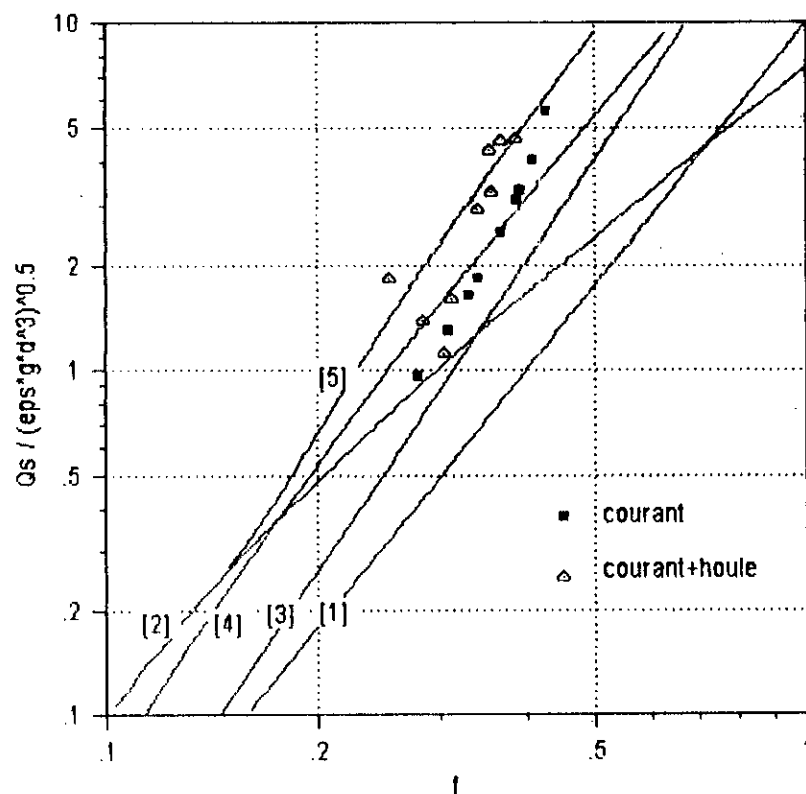


Figure E17a : Zoom

- Pour les mêmes valeurs de u_* le débit charrié sous l'action combinée du courant et de la houle est plus grand que celui du courant seul.
- La vitesse de frottement au voisinage du fond u_* diminue avec l'introduction de la houle sur un courant en sens inverse.
- Nous pouvons aussi conclure que les lois concernant le charriage avec courant seul ne s'adaptent pas au cas courant-houle. Pour les mêmes conditions de courant, l'introduction de la houle à la surface du courant conduit à la variation assez nette du débit solide, et la détermination d'un coefficient de proportionnalité entre les deux semble assez difficile.
- La seule comparaison de l'expérience MCH1 avec MC5 est insuffisante pour déterminer l'impact de la houle sur le courant vis-à-vis du charriage.

En utilisant la deuxième approximation des ondes, et les résultats de QUICK.M.C [16], MASS.E.I [13] a établi l'équation (E.3.1), avec les suppositions suivantes :

- L'application des houles sur le courant ne change pas la vitesse moyenne en profondeur du courant
- Le relèvement du plan d'eau pour les houles sur le courant est négligeable

$$\frac{q_s'}{gU^3} = \kappa \left[\frac{9}{16} \pi^4 \left(\frac{H}{UT} \pm \frac{H}{L} \right)^2 \left(\frac{H}{L} \right) sh^{-6} \frac{2\pi h}{L} + \frac{3}{2} \frac{U_s}{U} \pi^2 \left(\frac{H}{UT} \pm \frac{H}{L} \right)^2 sh^{-2} \frac{2\pi h}{L} \left(1 + \frac{9}{16} \pi^2 \left(\frac{H}{L} \right)^2 sh^{-6} \frac{2\pi h}{L} \right) + \left(\frac{U_s}{U} \right)^3 \right] \quad (\text{E.3.1})$$

- Le signe '+' désigne le cas du courant favorable, et '-' celui du courant défavorable.
- U désigne la vitesse du courant unidirectionnel.
- q_s est le débit solide charrié par le courant
- q_s' est le débit solide causé par le courant et houles
- κ est un coefficient de proportionnalité, qui ne dépend pas de l'observation selon houle dans le sens du courant ou contraire (avec ou sans déferlement), seulement courant, ou seulement houle, mais dépend principalement du sédiment utilisé [16].
- U_s est la superposition des vitesses du courant principal U et des courants de houle dans la couche de fond u_* .

$$\frac{U_s}{U} = 2.5 \pi^2 \left(\frac{H}{UT} \pm \frac{H}{L} \right) \frac{H}{L} sh^{-2} \frac{2\pi h}{L} + 1 \quad (\text{E.3.2})$$

Si nous prenons le cas du courant seul, nous aurons l'équation adimensionnelle :

$$q_s = \frac{\kappa U^3}{g} \quad (\text{E.3.3})$$

L'expérience MC5 nous permet de tracer la *figure E18* et d'en conclure la valeur de κ à partir de (E.3.3).

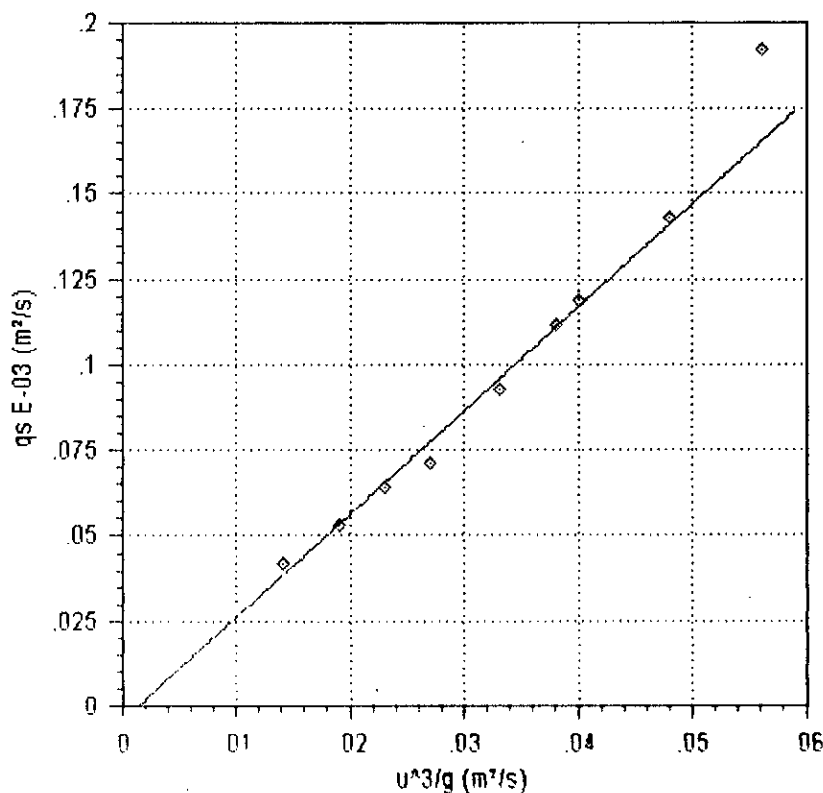


Figure E18 : Détermination de κ

La relation entre la vitesse au cube et le débit solide est linéaire avec un coefficient de proportionnalité $\kappa=3.05$. Pour un même sédiment, ce coefficient permet le calcul du charriage, par la simple connaissance de la vitesse d'écoulement.

de (E.3.1) et (E.3.3), on aboutit à l'équation suivante [13] :

$$\frac{q_s'}{q_s} = \frac{9}{16} \pi^2 \left(\frac{H}{UT} \pm \frac{H}{L} \right)^3 \left(\frac{H}{L} \right) sh^2 \frac{2\pi h}{L} + \frac{3U_s}{2U} \pi^2 \left(\frac{H}{UT} \pm \frac{H}{L} \right)^2 sh^2 \frac{2\pi h}{L} \left(1 + \frac{9}{16} \pi^2 \left(\frac{H}{L} \right)^2 sh^6 \frac{2\pi h}{L} \right) + \left(\frac{U_s}{U} \right)^3 \quad (\text{E.3.4})$$

Cette équation montre que le rapport entre le débit pour les houles sur le courant, et le débit pour le courant seul est fonction de :

- La profondeur relative h/L
- Cambrure des lames H/L
- Le rapport entre la vitesse rapportée à la houle et la vitesse du courant H/UT

Si le débit solide par le courant est connu, l'estimation de l'influence des houles sur la variation du débit solide peut se faire à l'aide de (E.3.4)

L'interprétation de (E.3.4) est donnée par la *figure E19* :

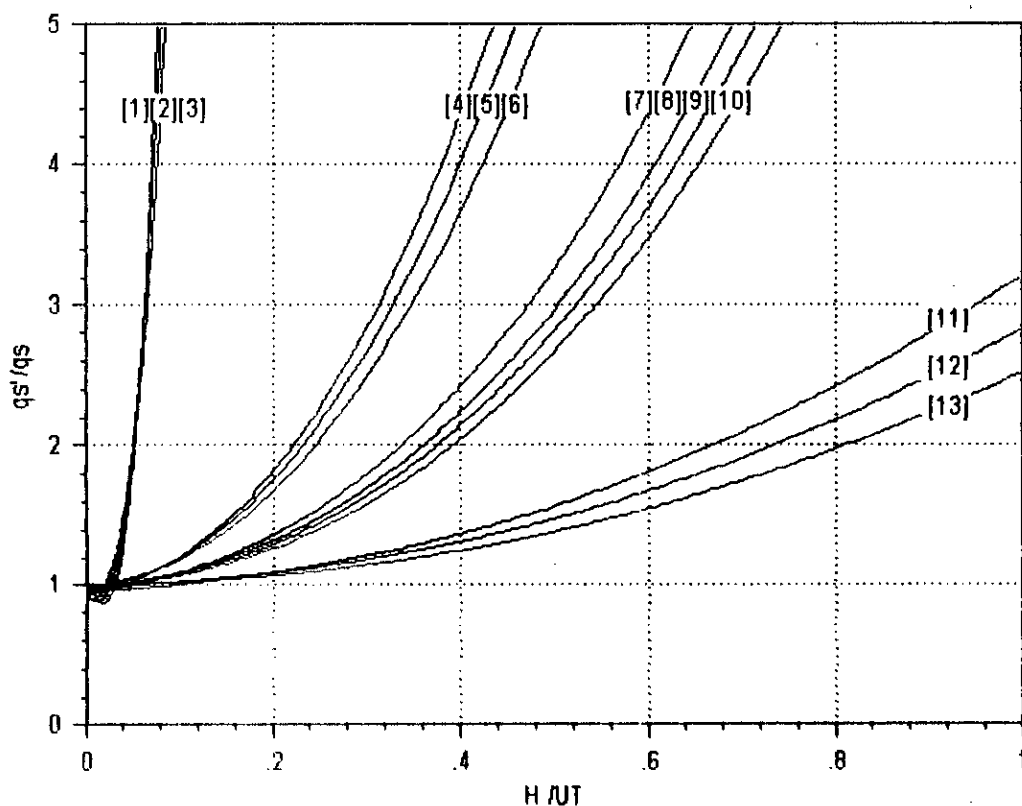


Figure E19 : Abaque (E.3.4)

Légende

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
h/L		0.05			0.15				0.25			0.3	
H/L	0.02	0.025	0.03	0.02	0.03	0.04	0.01	0.05	0.1	0.15	0.02	0.04	0.06

Pour le cas de houles se propageant dans le sens contraire du courant, nous pouvons en tirer les conclusions suivantes :

- Pour les petits rapports H/UT (lames debout relativement petites), il y a possibilité de diminution de débit solide.
- Pour les rapports H/UT assez grands, nous avons un accroissement du débit solide (malgré que la houle soit opposée au courant), cet accroissement est d'autant plus grand que la profondeur h/L est plus petite.

La vérification expérimentale est donnée sous forme de tableau (*tableau E8*), et d'un graphe (*figure E20*) :

Tableau E8 : Présentation des résultats

h/L	H/L	H/UT	qs 10 ⁻³ m ² /s	qs' 10 ⁻³ m ² /s		qs'/qs	
				Exp.	(3.1.4)	Exp.	(3.1.4)
0.057	0.021	0.021	0.032	0.061	0.032	1.90	1.01
0.064	0.021	0.021	0.043	0.046	0.043	1.07	1.01
0.066	0.022	0.022	0.054	0.037	0.055	0.68	1.02
0.069	0.025	0.025	0.061	0.053	0.061	0.86	0.99
0.075	0.025	0.025	0.083	0.096	0.083	1.16	1.00
0.077	0.024	0.025	0.102	0.107	0.102	1.05	1.00
0.078	0.030	0.031	0.109	0.141	0.111	1.30	1.02
0.083	0.032	0.033	0.133	0.150	0.140	1.13	1.05
0.088	0.034	0.035	0.182	0.152	0.181	1.23	0.99

Dans le *tableau E8* sont reportées les données expérimentales de MC5 et MCH1, ainsi que les calculs selon (E.3.4).

En tenant compte de la possibilité de dispersion des résultats expérimentaux, les données du *tableau E8* confirment dans l'ensemble les méthodes de calcul utilisées. Néanmoins, pour certaines valeurs de h , la divergence des résultats est assez importante. Nous citerons ci-dessous certaines causes de divergence :

- La déformation du lit possède des grandeurs considérables par rapport aux caractéristiques des houles et de l'écoulement (*photos 6, 7, 8*).
- La réflexion des houles sur les parois n'a été que minimisée, les filtres ne permettent pas de résoudre entièrement ce problème.
- Les houles se propageant dans notre canal ne sont pas toujours décrites par la théorie de STOCKES en deuxième approximation, l'utilisation d'ordres supérieurs, ou des théories des ondes cnoïdales s'avère nécessaire.
- Nos mesures n'ont pas été faites par rapport au niveau de fond rigide, mais par rapport au niveau de fond mobile qui change le long des expériences.

Sous forme de courbes (figure E20), sont représentées les rapports des débits solides pour les différentes caractéristiques des houles et du courant, donnant ainsi une illustration de la relation (E.3.4) pour notre gamme de valeurs.

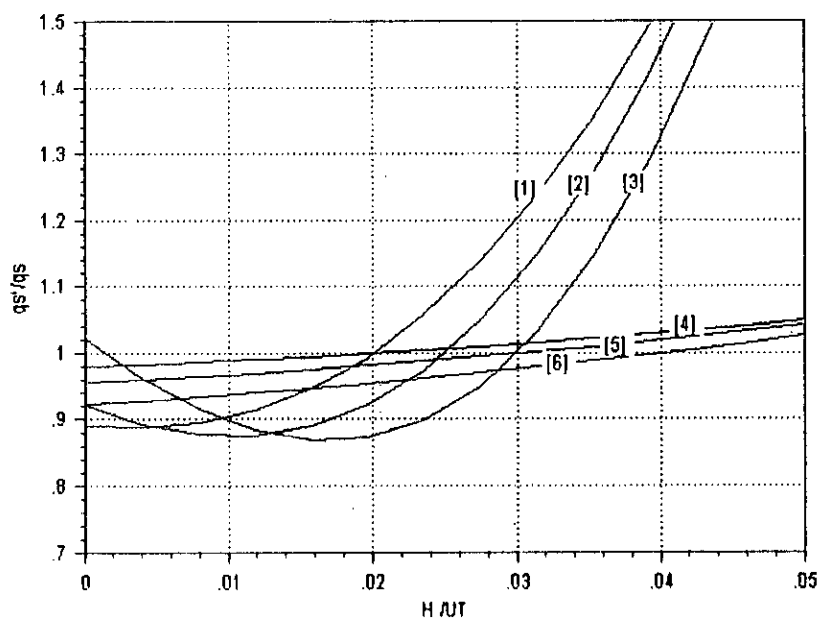


Figure E20 : Abaque MC5-MCH1-E.3.4

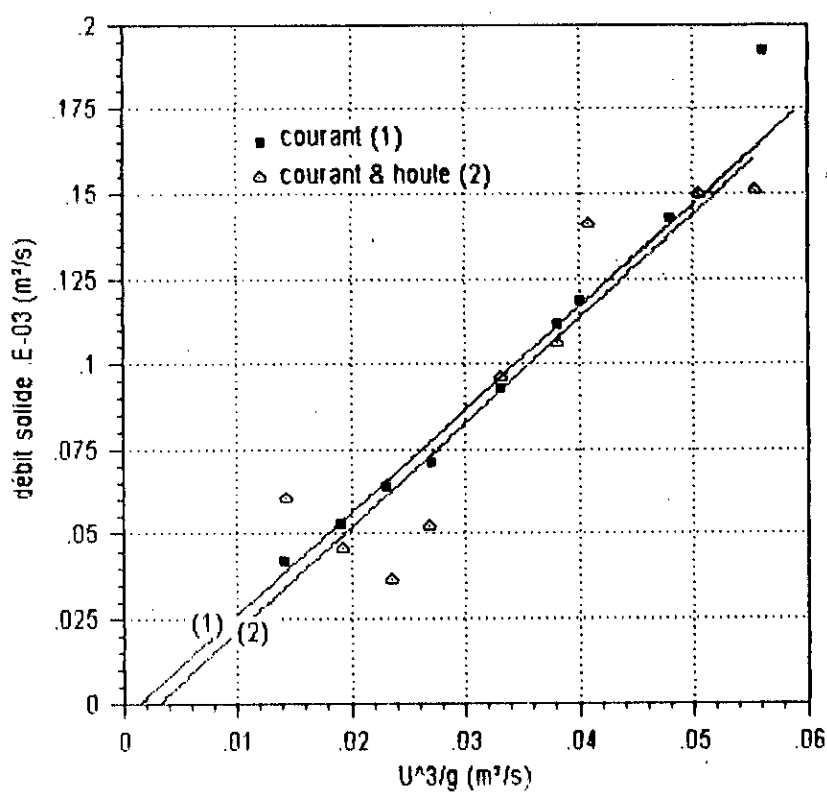


Figure E21 : Détermination de κ

Les résultats des expériences MCH1 et MC5 reportés sur la *figure E21* confirment les suppositions précédentes (travaux de M.C.QUICK [16]); κ reste constant malgré l'introduction de la houle.

$\kappa = 3.05$ pour le cas de la houle (coefficient de corrélation = 0.992)

$\kappa = 3.07$ pour le cas de la houle et du courant (coefficient de corrélation = 0.905)

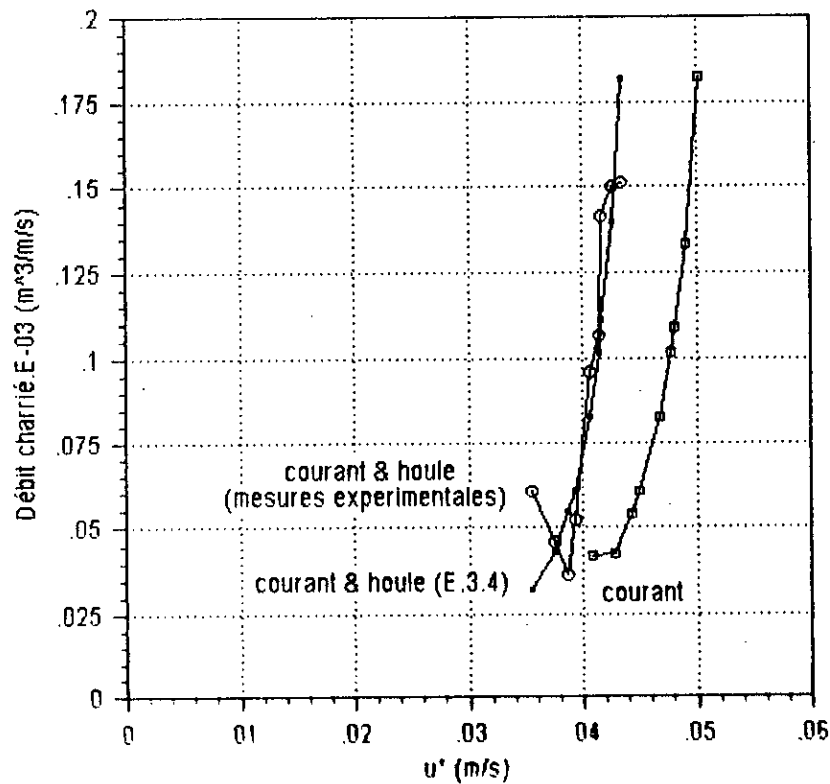


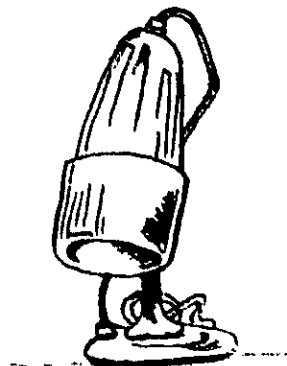
Figure E22 : $q_s(u^*)$: MCS, MCH1, (E.3.4)

Enfin, nous rapporterons les résultats de (E.3.4) et les mesures expérimentales de MC5 et MCH1 sur la *figure E22* afin de comparer les débits solides estimés, et calculés.

Les deux courbes pour le cas houle-courant coïncident pour la plupart des mesures, et les constatations faites auparavant sont ainsi confirmées.

IV. CONCLUSIONS DE L'ETUDE

- *Les lois classiques du charriage concernant le courant seul ne peuvent être utilisées lors de l'introduction de la houle, les expériences montrent que le charriage peut doubler ou même tripler pour les mêmes vitesses de frottement au voisinage du fond.*
- *Pour un même sédiment, le débit charrié est proportionnel à la vitesse au cube, avec un coefficient de proportionnalité qui reste inchangé même lors de l'introduction de la houle.*
- *Les calculs effectués montrent que le charriage du à la combinaison de la houle et d'un courant contraire accroît pour de grandes valeurs de la vitesse relative, cet accroissement est d'autant plus important que la cambrure des lames et la profondeur relative sont plus faibles, néanmoins; celui ci peut diminuer sensiblement pour des valeurs plus petites.*



Conclusion générale et perspectives

Cette étude expérimentale effectuée sur fond hydrauliquement lisse, puis sur fond mobile, nous a permis d'avoir un peu plus de renseignements sur l'interaction houle-courant responsable des phénomènes du transport sédimentaire au voisinage des fonds marins et fluviaux.

Si beaucoup de résultats existent déjà dans le cas d'une houle seule ou d'un courant seul, il n'en est pas de même dans le cas où on combine les deux types d'écoulements.

L'érosion dépendrait dans ces conditions du phénomène oscillatoire apporté par la houle, et de la dissymétrie que cause le courant dans l'écoulement. Le débit charrié résultant est plus grand comparé à celui du courant.

L'arrachage des sédiments causé par les paramètres de frottement au fond, suivi par un entraînement des particules solides, aboutit à la formation de rides sur le fond, celles-ci seraient plus importantes avec l'addition de la houle au courant.

Les résultats de nos expériences donnent certes des informations sur le transport solide généré par le courant et la houle, mais d'autres études à granulométrie étendue et avec des périodes de houles différentes permettraient de bien comprendre les effets de frottement au fond, et le phénomène d'arrachage ou entraînement des sédiments que cela peut causer.



Annexes

Les différents modèles mathématiques de la houle

I. LA HOULE ROTTATIONNELLE DE GESTNER

A. Hypothèses de base

Modèle établi en 1804 par GESTNER, qui s'avère une solution rigoureuse dans le cas d'un fluide à profondeur infinie.

Chaque particule du fluide est supposée tourner autour d'un point de coordonnées (x_0, z_0) , en décrivant une circonférence de rayon R décroissant selon la profondeur (figure A1).

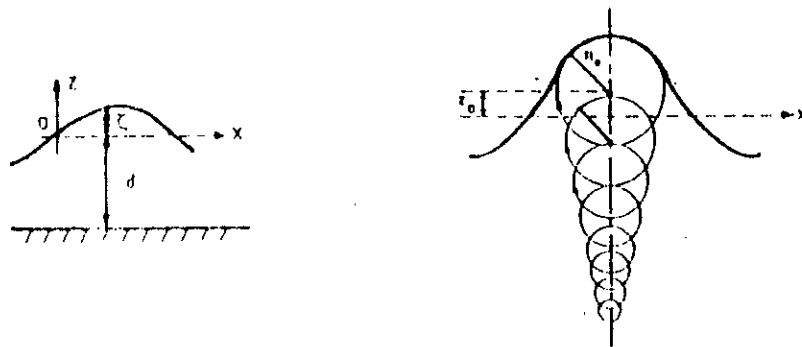


Figure A1: Houle de GESTNER

Les coordonnées de chaque point :

$$\begin{cases} x = x_0 - R_0 e^{kz} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right) \\ z = z_0 - R_0 e^{kz} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z_0}{L} \right) \end{cases}$$

La pression :

$$P = \rho g \left(\frac{\pi R_0^2}{L} e^{4\pi \frac{z_0}{L}} - z_0 \right)$$

et la surface libre :

$$z_0 = \frac{\pi R_0^2}{L} e^{4\pi \frac{z_0}{L}}$$

B. Description des trajectoires

Hauteur de la houle :

$$H = 2R_0 e^{2\pi \frac{z_0}{L}}$$

Centre de circonférence décrite par les particules de la surface libre :

$$z_0 = \frac{\pi H^2}{4L}$$

Côte de la surface libre :

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

Toutes les surfaces d'égale pression sont caractérisées par la cote z_0 , et le rayon R_0 . Elles se déplacent d'un mouvement de translation sans se déformer, ce qui donne à la houle de GESTNER le nom de houle Trochoïdale.

⇒ C'est le mouvement décrit par un point A d'un disque de rayon $\frac{L}{2\pi}$ qui roule sans glisser (figure A2), tel que :

$$OA = R_0 e^{2\pi \frac{z_0}{L}}$$

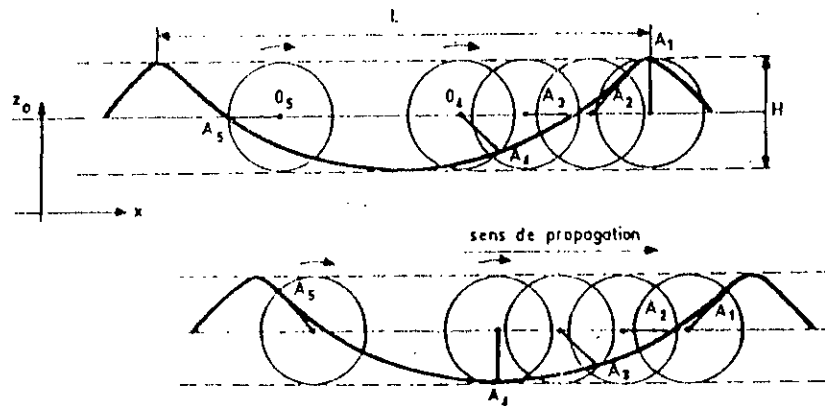


Figure A2 : trajectoire des particules liquides

C. Le rotationnel

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \frac{2\pi^3 H^2}{H^2 \left(1 - \frac{\pi^2 H^2}{L^2} \right)} \neq 0 \quad \text{Donc la houle de GESTNER est rotationnelle}$$

D. Energie

Elle est calculée par longueur d'onde, et unité de largeur

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \left(1 - \frac{\pi^2 H^2}{2L^2} \right)$$

II. LA HOULE IRROTATIONNELLE DE STOKES

A. Description du mouvement

La surface libre a la forme d'une sinusoïde d'amplitude totale H , qui se propage dans le sens croissant des x , avec la célérité :

$$\xi = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh 2\pi \frac{h}{L}$$

Les composantes de la vitesse sont :

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\operatorname{ch} 2\pi \frac{z+h}{L}}{\operatorname{sh} 2\pi \frac{h}{L}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad w = -\frac{\pi H}{T} \frac{\operatorname{sh} 2\pi \frac{z+h}{L}}{\operatorname{sh} 2\pi \frac{h}{L}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

Les trajectoires des particules, obtenues par intégration de ces dernières sont des ellipses centrées au point x_0 . Les trajectoires sont donc des orbites fermées, au fond l'ellipse est aplatie; le mouvement est oscillatoire rectiligne (Figure A3).

vitesse maximale (au point B) :
$$U_{\max} = \frac{\pi H}{T \operatorname{sh} 2\pi \frac{h}{L}}$$

Les dimensions des orbites sont alors :

$$\text{Horz} = H \frac{\operatorname{ch} 2\pi \frac{z+h}{L}}{\operatorname{sh} 2\pi \frac{h}{L}} \quad \text{Vert} = H \frac{\operatorname{sh} 2\pi \frac{z+h}{L}}{\operatorname{sh} 2\pi \frac{h}{L}}$$

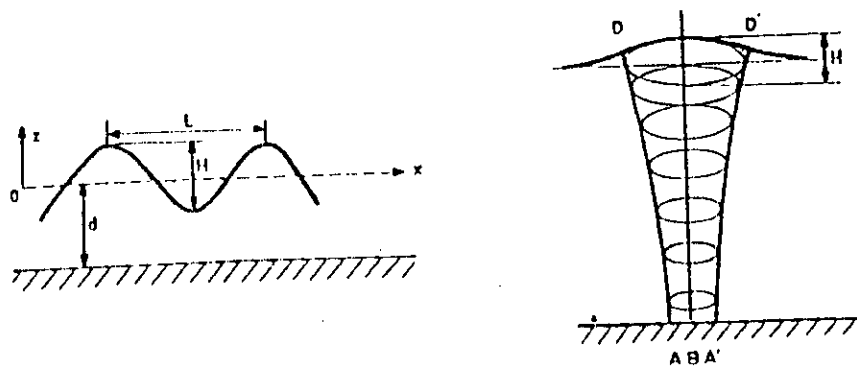


Figure A3

C. Pression

$$P = -\rho g z + \frac{\rho g H}{2} \frac{\operatorname{ch} 2\pi \frac{z+h}{L}}{\operatorname{ch} 2\pi \frac{h}{L}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

D. Cas particulier : profondeur infinie

$$\text{On a } \begin{cases} L = \frac{gT^2}{2\pi} \\ C = \frac{gT}{2\pi} \end{cases} \quad \text{ce qui donne } \begin{cases} u = \frac{\pi H}{T} e^{2\pi \frac{z}{L}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \\ w = -\frac{\pi H}{T} e^{2\pi \frac{z}{L}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \end{cases}$$

Remarques :

- Les orbites des particules sont circulaires, leur rayon décroissant exponentiellement avec la profondeur.
- Cette analyse avec la houle de GESTNER n'est que formelle car si celle-ci est une solution rigoureuse, la houle de STOKES n'est qu'une solution approchée nécessitant que la cambrure soit faible.
- Si la profondeur est faible; $th 2\pi \frac{h}{L} \approx 2\pi \frac{h}{L} \Rightarrow L^2 = gT^2 h \Rightarrow c = \sqrt{gh}$
- Il s'agit d'une translation du 1^e ordre d'approximation, les orbites sont alors pratiquement toutes identiques et très aplaties.

III. LA HOULE AU DEUXIEME ORDRE D'APPROXIMATION**A. Généralités**

La houle irrotationnelle de STOCKES n'est qu'une solution en 1^e approximation. L'étude des ordres supérieurs se traduit par l'introduction d'harmoniques au 2^e ordre.

Par exemple dans le cas de la solution de MICHE (1944)

$$\xi = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right) + \frac{3\pi H^2}{8L} \frac{\operatorname{coth} 2\pi \frac{h}{L}}{\operatorname{sh}^2 2\pi \frac{h}{L}} \cos 4\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right) + \frac{\pi H^2}{4L} \operatorname{coth} 2\pi \frac{h}{L}$$

comporte un terme de période T, un autre de période T/2, et un terme constant. Cette solution comporte une composante du courant horizontal arbitraire $v(z_0)$ (figure A4).

Le rotationnel :
$$2rot = H^2 \left(\frac{dv}{dz_0} - \frac{2\pi^3}{TL^2} \frac{sh4\pi \frac{z_0+h}{L}}{sh^2 2\pi \frac{h}{L}} \right)$$

STOKES et MICHE conduisent toujours à :
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} th2\pi \frac{h}{L}$$

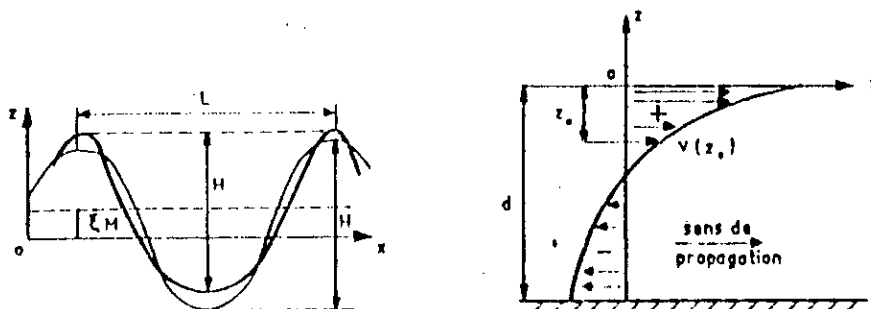


Figure A4 : Houle au 2^e ordre d'approximation

B. Houle irrotationnelle

La fonction $v(z_0)H^2$ représente un courant superposé aux courants alternatifs périodiques, la houle est accompagnée d'un courant horizontal d'entraînement dirigé dans le sens de propagation dans les parties superficielles et en sens inverse dans les parties profondes.

- L'intensité du courant est faible pour les faibles cambrures.
- En surface les trajectoires de type elliptique ne sont plus fermées (figure A5) (elles se déplacent à vitesse vH^2 dans la direction des x).

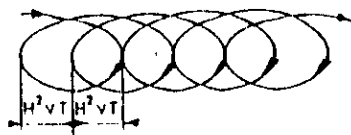


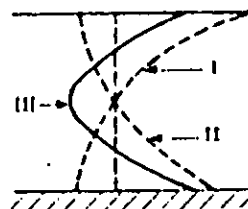
Figure A5

Les trajectoires sont un simple mouvement de va-et-vient dont la résultante générale est en sens inverse de la propagation de la houle.

C. Houle rotationnelle

Dans le cas d'un fluide réel le rotationnel est arbitraire

- Une première hypothèse consiste à supposer qu'il décroît au fur et à mesure qu'on s'approche du fond où il s'annule, c.à.d qu'il est dû aux efforts tangentiels du vent sur la surface libre et transmis en profondeur par viscosité.
- La deuxième consiste à introduire un rotationnel dû à l'effet du frottement sur le fond et transmis par viscosité en s'amortissant dans la masse du fluide.



I - courant dû au rotationnel de surface
II - courant dû au rotationnel de fond
III - courant composé

Figure A6

L'allure du courant résulte de la composition des courants correspondants au rotationnel de surface et de fond (figure A6). Cette distribution est très proche des distributions observées dans les canaux de laboratoire.

IV. LA HOULE ELLIPTIQUE

Dans le cas d'une onde progressive se propageant en eau peu profonde; on peut supposer que les axes (ox, oz) sont animés d'un mouvement de vitesse égale à la célérité c parallèlement à (ox) .

Ainsi la houle irrotationnelle est représentée par un écoulement permanent à potentiel

$$\phi + i\psi = e^{i\frac{h}{\alpha} F(x)}$$

La forme de la surface libre est : $y = y_0 + H \operatorname{cn}^2 2K(x/L - t/T)$

cn : fonction elliptique de module k ($0 \leq k \leq 1$).

K : intégrale elliptique complète de module k .

$y_0 = h - a$: hauteur du creux

On rappelle que $\operatorname{cn} u = \cos \psi(u)$ $u = \int_0^x \frac{dx}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 x}}$

cas particuliers :

$k = 0$: On retrouve la houle sinusoïdale

$k = 1$: On retrouve l'onde solitaire

Analyse granulométrique

I. PRINCIPE

Le tamisage est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus largement utilisées actuellement. Il permet la séparation des particules en tenant compte de leur grosseur.

Il consiste à déposer une quantité d'un échantillon représentatif de la masse globale sur une série de tamis comportant des ouvertures de taille connues. Les particules dont les dimensions sont inférieures aux dimensions des ouvertures traversent le tamis lorsqu'il est mis en vibration, alors que les particules les plus grosses sont retenues. Cette opération pouvant être longue, on la considère en général comme terminée lorsque la masse d'échantillon qui passe en 5 minutes est inférieure ou égale à 0.2% de la masse initiale.

II. TAMISAGE A LA MAIN

Bien que le tamisage à la main soit fastidieux, il est nécessaire de l'employer pour obtenir des résultats fiables dans le cas du tamisage à sec. On prélève un échantillon représentatif, dont la totalité est utilisée pour l'analyse.

III. TAMISAGE A LA MACHINE

Le tamisage à la machine est effectué en empilant les tamis dans l'ordre croissant des tailles d'ouverture, et en déposant la poudre sur le tamis du haut. La colonne se compose en général de cinq ou six tamis dont les ouvertures forment une progression de raison $\sqrt{2}$. La colonne est mise en vibration pendant un temps déterminé, et le refus de chaque tamis est pesé. Ces résultats s'expriment en général sous la forme de pourcentage cumulé [18].

Recommandations

- Pour les contrôles systématiques, les normes fixent les durées de tamisage. On recommande généralement d'annuler l'essai si les pertes en cours de tamisage dépassent 0.5% de la charge totale.
- Il convient d'éliminer les très fines particules par un tamisage manuel au moyen du tamis le plus fin; en effet, ces particules traversent toute la pile de tamis, prolongeant ainsi la durée du tamisage; de plus, elles s'infiltrent entre les différents tamis, augmentant ainsi les pertes de poudre.

IV. METHODE D'ECHANTILLONNAGE

La norme X11-507 NF indique que la méthode d'échantillonnage utilisée doit être telle que l'échantillon prélevé soit représentatif du produit considéré. La méthode à adopter dépend de la nature de la matière et de la présentation du matériau.

V. RESULTATS DU TAMISAGE

Ces valeurs représentent la moyenne de quatre essais de tamisage sur un échantillon de 500g.

Tableau A1 : Résultats du tamisage

Tamis (μm)	630	500	450	400	355	315	250	224	180	<i>fond</i>	
Refus (g)	0.911	8.892	55.85	202.1	107.062	70.147	26.322	14.483	3.836	10.395	499.998

Tableau A2 : Présentation des résultats

classe (μm)	Diamètre moyen (μm)	masse (g)	% massique	% massique cumulé croissant	% massique cumulé décroissant
]630,500]	564	8.890	1.82	1.82	100
]500,450]	475	55.850	11.43	13.25	98.18
]450,400]	425	202.10	41.36	54.61	86.75
]400,355]	377.5	107.06	21.91	76.52	45.39
]355,315]	335	70.150	14.35	90.87	23.48
]315,250]	282.5	26.320	5.39	96.26	9.13
]250,224]	237	14.480	2.96	99.22	3.74
]224,180]	202	3.840	0.78	100	0.78

Les résultats sont représentés dans la *figure A7*, qui donne un $d_{50} = 383\mu\text{m}$

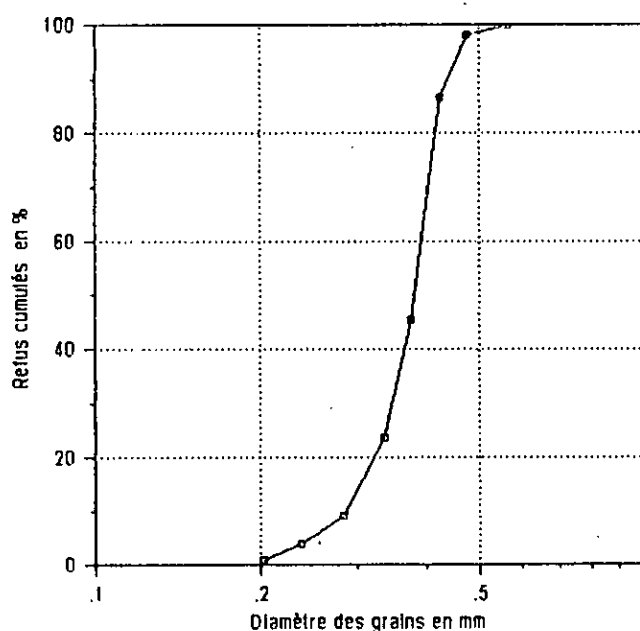


Figure A7 : Courbe granulométrique

Détermination de la masse volumique du sable

Pour calculer la masse volumique du solide nous avons procédé comme suit :

Nous introduisons dans une éprouvette graduée une masse connue de sable, et un volume connu d'eau.

$$\text{masse volumique} = \frac{\text{masse du sable}}{\text{volume réel du sable}}$$

$$V_{\text{réel sable}} = V_{\text{apparent sable}} - V_{\text{eau pores}}$$

Le volume d'eau dans les pores est obtenu par soustraction du volume d'eau total du volume d'eau au dessus du sable.

$$V_{\text{réel sable}} = V_{\text{apparent sable}} - (V_{\text{total eau}} - V_1)$$

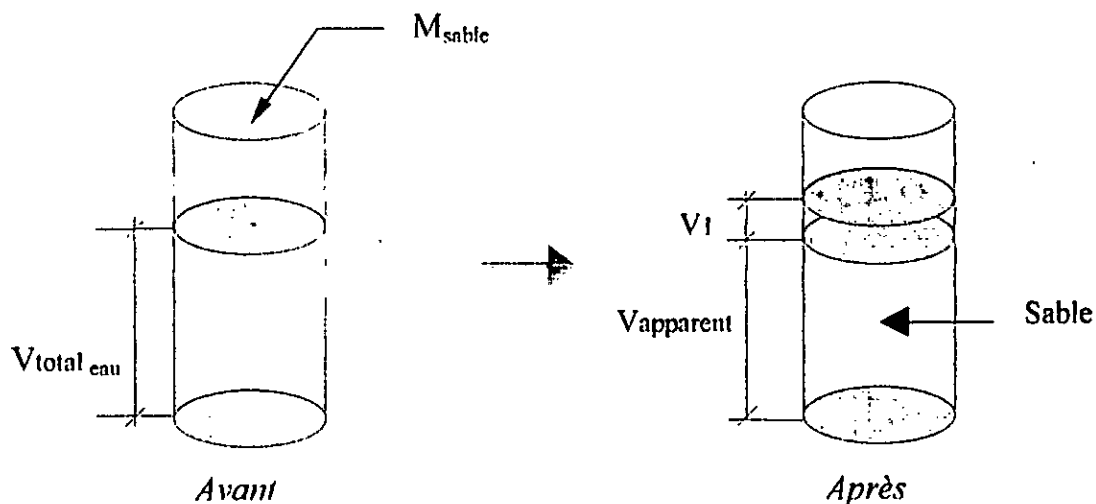


Figure A8 : procédé expérimental

Application numérique

Avant expérience

$$\begin{aligned} M_{\text{sable}} &= 88.0 \text{ g} \\ V_{\text{total eau}} &= 44.0 \text{ ml} \end{aligned}$$

Après expérience

$$\begin{aligned} V_{\text{apparent sable}} &= 60.2 \text{ ml} \\ V_1 &= 17.5 \text{ ml} \end{aligned}$$

D'où : $V_{\text{réel sable}} = 60.2 + 17.5 - 44.0 = 33.7$

Donc : $\rho = M/V = 88/33.7 = 2.61$

$\rho = 2.61 \text{ g/ml}$

Glossaire

BASSIN A HOULE	Modèle physique à trois dimensions permettant entre autre l'étude des ouvrages soumis à l'action de houles obliques.
BATHYMETRIE	Mesures des profondeurs marines.
BRISANTS	Il correspond aux déferlements successifs qui entraînent la destruction des vagues sur les plages. On leur donne aussi, dans ce cas, le nom de <i>lignes de rouleaux</i> .
CANAL A HOULE	Modèle physique à deux dimensions permettant l'étude des ouvrages soumis à l'attaque frontale de la houle.
CHARRIAGE	Progression de tout ou partie des granulats dans un fluide en mouvement, dans le sens du courant en glissant, en roulant, ou bien en sautant légèrement sur le fond.
CLAPOTIS	Nom donné au mouvement de la mer résultant de la réflexion totale de la houle sur un mur vertical.
CONCENTRATION	Terme qui désigne la proportion d'une substance présente dans un mélange homogène de corps solides, liquides ou gazeux.
COURANT LITTORAL	Nom donné au courant qui n'ait sous l'action des houles obliques. Il se dirige parallèlement à la côte, formant un fleuve littoral susceptible de transporter des masses considérables de sédiments.
DECANTATION	Séparation par gravité des matières en suspension contenus dans un effluent
DIFFRACTION	On dit qu'il y a diffraction de la houle lorsque plusieurs orthogonales aux crêtes passent par un même point tel que l'extrémité d'un cap, d'une pointe, d'une jetée ..etc. Il y a en quelques sorte rotation de la houle autour de ce point avec surcroît ou réduction de sa hauteur.
EROSION	Usure de la surface de la terre, notamment par l'action de l'eau.
ESTRAN	Partie de la plage comprise entre les niveaux des plus hautes mers et des plus basses mers.
ISOBATHE	Courbe reliant les points d'égale profondeur
LITTORAL	Frontière de largeur relativement indéterminée entre la terre et la mer.
PLAN DE VAGUES	Figure obtenue en reportant à un instant donné la position des crêtes de la houle sue une carte des fonds.

REFLEXION	Changement de direction de la houle qui rencontre un parement d'ouvrage. On distingue la réflexion totale qui se produit sur une paroi verticale et la réflexion partielle qui se traduit sur une paroi inclinée.
REFRACTION	Modification des caractéristiques de la houle (hauteur, longueur d'onde et direction) lorsque celle ci se propage sur des fonds dont le relèvement n'est pas uniforme.
SALTATION	Phase transitoire entre le charriage et la suspension, par suite d'envols et de retombées successives à des distances relativement appréciables.
SUSPENSION	Progression des granulats dans le sens du courant au sein même du liquide sans jamais retomber, sauf très épisodiquement, sur le fond.
TRAIT DE COTE	S'applique surtout aux côtes sableuses pour désigner le talus qui marque la limite côte terre du haut de plage.
TURBIDITE	Diminution de transparence d'une eau due à la présence de matières en suspension

Références bibliographiques

[1]	ALLARD.J	<i>Modélisation du charriage en écoulement fluvial</i> Houille Blanche N°3/4 1989
[2]	BENGERIFA.S & OUCHEIKH.M	<i>Contribution à la réalisation d'un modèle réduit à fond mobile (Baie de Zéralda)</i> ENP-Hydraulique. PFE 1995. 170 p.
[3]	BENGOUGAM.A	<i>Aménagement du littoral de Mohammedia (Maroc) : Etude sédimentologique et protection du littoral</i> Université du Havre-Genie côtier. DESS 1993. 76 p.
[4]	BONNEFILLE.R	<i>Cours d'hydraulique maritime</i> Edt. Masson 1992. 208 p.
[5]	Dossier technique Dépt. de la Martinique	<i>La houle comment s'en protéger ?</i> Direction départementale de l'équipement-Martinique. 1981. 158 p.
[6]	KELLAL.M & IGHILAHIZ.N	<i>Contribution à la réalisation d'un modèle sédimentologique (port de Skikda)</i> ENP-Hydraulique. PFE 1992. 113 p.
[7]	KEMP & SIMONS	<i>The interaction between waves and a turbulent current</i> J.fluid mechanics Vol.116 1982. pp.227-250
[8]	LACOMBE.H	<i>Les mouvements de la mer : vagues et houles</i> Edt 1971. pp.51-66
[9]	LARRAS.J	<i>Hydraulique et granulats</i> Edt. Eyrolles 1979. 254 p.
[10]	LARRAS.J	<i>Mouvement des granulats</i> Edt. Eyrolles 1979
[11]	LARRAS.J	<i>Physique de la houle et des lames</i> Edt. Eyrolles 1979. 282 p.
[12]	MANKOURI & HADDOUCHE	<i>Transformation de l'énergie de la houle en énergie potentielle accumulable</i> ENP-Hydraulique. PFE 1985

[13]	MASS.E.I	<i>Transport solide par les houles et le courant dans les grands canaux</i> Rapport d'études 1986. pp. 16-23
[14]	MIGNOT.C	<i>Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments</i> Houille Blanche N°1 1977. pp. 9-44
[15]	MIGNOT.C	<i>Manuel sur l'Hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral</i> SOGREGAH - LCHF 1987.
[16]	QUICK.M.C	<i>Sediment transport by waves and currents</i> J.of civil eng. vol-10 N°1 1983. pp. 142-149
[17]	RAHMANI	<i>Analyse du régime de la houle sur le littoral Algérien : Etude expérimentale des digues à talus</i> ENP-Hydraulique Magister-1989
[18]	TECHNIQUES DE L'INGENIEUR	<i>Techniques de l'ingénieur : Granulométrie P1040</i>
[19]	SLEATH.J.F.A	<i>Sea bed mechanics</i> Edt. Wiley-Interscience 1984
[20]	THEUKAM TOKO.D	<i>Etude de la couche limite générée par l'action de la houle et/ou du courant sur fond hydrauliquement lisse : Application au transport sédimentaire</i> Université du Havre-Mecanique 1997. 206 p.
[21]	VINGRADOVA.VI	<i>Quelques remarques sur la capacité de transport de courant plan ondulatoire, dans un lit horizontal ou légèrement incliné avec ou sans écoulement</i> Edt. 1968. pp. 55-67



*Best deeds
are best completed*

Résumé

Si le problème de transport solide par le courant s'avère être un problème hydraulique classique, celui causé par les houles et le courant est par contre moins étudié.

Dans ce sens, nous avons effectué une étude expérimentale sur fond mobile, afin de faire quelques prédictions sur ce phénomène au voisinage d'un fond marin ou estuaire.

Nos résultats nous permettent finalement de justifier les implications que peut avoir la houle sur le courant dans le domaine du transport sédimentaire.

Summary

If the problem of solid transport by current reveals to be a classical hydraulic problem, that caused both by current and waves is on the other hand less studied.

In this way, we have made an experimental study on movable ground, in order to do some predictions about this phenomenon near a sea-bed or estuary.

Finally, our results give us possibility to justify the implications that waves have on the current into the deposit transport field.

ملخص

إذا كانت مسألة النقل الصلب بالتيار اتضح أنها مسألة هيدروليكية كلاسيكية، فإن الذي يحدث بالأمواج و التيار معا هو بالمقابل مسألة معقدة.

في هذا الاتجاه، قمنا بإجراء دراسة تجريبية على قاع متحرك، لأجل القيام ببعض التوقعات على هذه الظاهرة بالقرب من قاع بحري أو مصب نهري.

نتائجنا تسمح لنا في النهاية بتبرير التضمنات التي يمكن للموجة أن تحدثها على التيار في ميدان النقل الرسوبي.