

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT HYDRAULIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Contribution à La Réalisation d'Un
Modèle Sédimentologique Port
de Skikda*

Proposé par :

Laboratoire des Etudes Maritimes

Etudié par :

KELLAL Med
IGHILAHIZ Nourredine

Dirigé par :

KHELAF Med Cherif
BERKANI

PROMOTION 1992

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Contribution à La Réalisation d'Un
Modèle Sédimentologique
- Port de Skikda -*

Proposé par :

Laboratoire d'Etudes Maritimes

Etudié par :

KELLAL Med
IGHILAHIZ Nourredine

Dirigé par :

KHELLAF Med Cherif
BERKANI

PROMOTION 1992

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال الله تعالى :
« قُلْ هَلْ يَسْتَوِي الَّذِينَ
يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ . »

وقال رسول الله صلى الله عليه وسلم :
« وَمَنْ سَلَكَ طَرِيقًا يَلْتَمِسُ فِيهِ عِلْمًا
سَهَّلَ اللَّهُ لَهُ طَرِيقًا إِلَى الْجَنَّةِ . »
(رواه مسلم .)

- سبحانه لا علم لنا إلا ما
علمتنا . إنك أنت العليم الحكيم -

D E D I C A C E S

Je dedie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à mes parents qui recollent ici le fruit de leur peine .

- A mes soeurs
- A mes freres
- A mes amis

نور الدين
nouredine

Je dedie ce travail en signe de respect et de reconnaissance :

- A mes parents ;
- A mes frères et soeurs
- A mes enseignants

"who are responsable for much of my knowledge , but mone of my ignorance" et
-A

KELLAL Mohamed

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement et à exprimer notre profonde reconnaissance à :

- M^{er} BERKANI Mouloud (chef du departement d'hydraulique) notre promoteur d'avoir accepté nous prendre en charge durant l'elaboration de notre projet et pour ses encouragements ;
- Dr. KHELLAF Med Cherif (lem) de nous avoir encadré et nous aidé à mener à bien ce travail de recherche si intéressant, de nous avoir consacré son temps précieux et donné ses conseils et de nous avoir prêté sa documentation personnelle très riche Nous lui exprimons ici notre gratitude pour cette confiance ;
- Dr. DECHEMI (président de l'unité de recherche GESTOP , ENP) , notre enseignant , pour ses encouragements et ses orientation vers la recherche scientifique qu'il a créée dans nos esprits ;
- M^{er}. Fred BARKINSON (MONTREAL) , pour ses suggestions et ses conseils pratiques lors de l'exécutions des essais ;
- Toute l'équipe du LEM (laboratoire d'études maritimes) d'avoir mis à notre disposition tous les équipements du laboratoire ainsi que pour leur disponibilité .
Nos remerciements vont particulièrement à M . ABDELBAKI (DG du LEM) de nous avoir fait confiance et à Omar (technicien du laboratoire) d'être toujours disponible ;
- Toute personne ayant contribué de près ou de loins à l'elaboration de ce travail en particulier M^{lle}. F. IGHILIRIZ .

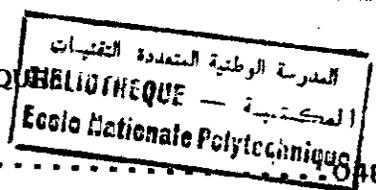
S O M M A I R E

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

	page
Résumé	001
Introduction	001
CHAPITRE I TERMINOLOGIE MARINE ..	
I-1 : Les mouvements de la mer	002
I-2 : La théorie de la houle	002
I-2-1 : Hypothèses de base	003
I-2-2 : Théorie de la houle du 1 ^{er} ordre	003
I-2-2-1 Houle sinusoidale	003
I-2-2-2 Mouvement des particules	004
I-2-2-3 : Les préssions	006
I-2-2-4 : L'énergie de la houle	006
I-3: déformations de la houle	007
I-3-1 : Refraction	007
I-3-2 : Reflexion	007
I-3-3 : Diffraction	007
I-3-4 : Deferlement	007
CHAPITRE II LES SEDIMENTS MARINS ..	
II-1 : La granulométrie	011
II-2 : Propriétés physiques des particules solides en eau calme	012
II-2-1 : Vitesse de chute des sédiments non cohésifs	012
II-2-2-: Vitesse de chute des sédiments cohésifs	014
II-3 : Tassement des matériaux	014
II-3-1 Sédiments grossiers	014
II-3-2 Sédiments fins	014
II-4 : Profil d'équilibre	016
CHAPITRE III DYNAMIQUE DES SEDIMENTS MARINS ..	
III-1 : Comportement des sédiments sous l'action des courants	020
III-1-1 : Force tractrice sur le fond	020
III-1 2 : Vitesse de frottement	020

III-1-3 : Début d'entraînement des matériaux.....023
 III-1-3-1 : Matériaux non cohésifs.....023
 III-1-3-1-1 : Force tractrice et vitesse de frottement.....023
 III-1-3-1-2 Paramètres adimensionnels.....023
 III-1-3-2 : Matériaux cohésifs.....024
 III-1-4 : Débits solides transportés par les courants.....026
 III-1-4-1 Débit solide des sédiments grossiers.....028
 III-2 : comportement des sédiments sous l'action de houles.....031
 III-2-1 : Introduction.....031
 III-2-2 : Vitesses alternatives sur les fonds.....031
 III-2-3 : Courants dus à la houle.....034
 III-2-3-1 : Courants de translation et de compensation.....034
 III-2-3-2 Dérèglement de la houle.....034
 III-2-3-3 : courant littoral.....034
 III-2-3-4 : Courant de retour.....036
 III-2-3-5 : Courants d'expansion latérale.....036
 III-2-4 : Mouvements sédimentaires perpendiculaires au littoral.....038
 III-2-4-1 : Mise en oscillation des sédiments sous l'action des mouvements orbitaires.....038
 III-2-5 : Mouvements des sédiments parallèlement au rivage.....041
 III-2-6 : Transport par jet de rive.....043
 III-2-7 : Transport au voisinage de déferlement.....043
 III-3 Comportement des sédiments sous l'action des courants et des houles.....044
 III-3-1 : Calcul du transport littoral.....044
 III-3-1-1 : Transport par charriage.....044
 III-3-1-2 : Transport en suspension.....046

المركز الوطني للأبحاث
 BIBLIOTHÈQUE - المراسم
 Ecole Nationale Polytechnique



IV-1 Introduction.....048

IV-2 : Similitude hydraulique.....048

 IV-2-1 : Similitude géométrique.....048

 IV-2-2 : Similitude cinématique.....048

 IV-2-3 : Similitude dynamique.....049

IV-3 : Principales lois de similitude.....051

 IV-3-1 : Similitude de Froude.....051

 IV-3 2 : Similitude de Reynolds.....052

IV-4 : Incompatibilité des deux similitudes
 de Froude et de Reynolds.....053

IV-5 : Similitude sédimentologique053

CHAPITRE V CONCEPTION ET REALISATION DU MODELE.

V-1 : Position du problème et but de l'application
 du modele.....062

V-2 : Données naturelles et emprise du modele.....062

 V-2-1 : Données naturelles.....062

 V-2-1-1 : Situation géographique.....062

 V-2-1-2 Bathymétrie.....064

 V-2-1-3 : Etude sédimentologique.....065

 V-2-1-4 : Houles.....070

 V-2-2: Emprise du modele.....070

V-3 : Conception du modele.....072

 V-3-1 : Principes du choix du matériau utilisé.....072

 V-3-2: Préparation du matériau du fond074

V-4 : Réalisation du modele.....077

 V-4-1 : Description du modele.....077

 V-4-2 : Exécution des essais.....077

 V-4-2-1 : Mode opératoire077

 V-4-2-2 : Etalonnage.....078

 V-4-2-2-1 : Etalonnage hydraulique.....078

 V-4-2-2-2 : Etalonnage sédimentologique.....078

 V-.4-.3 : Essais proprement dits : profils.....079

V-.5 : PRESENTATION DES RESULTATS080

V-6 : INTERPRETATION DES RESULTATS.....106

V-6-1 Types de profils obtenus sur modele... 106
V-6-1-1 Profils théoriques..... 106
V-6-1-2 Type de profils obtenus..... 109
V-6-2 Resultats..... 110
V-6-3 Transport de sédiments..... 110
VI-A CONCLUSION GENERALE..... 112
VI-B RECOMMANDATIONS..... 113
BIBLIOGRAPHIE.....

INTRODUCTION

La mer est un milieu dynamique qui , par ses différents mouvements , change les configurations des fonds marins et des cotes sans cesse . Ce changement est la résultante de différentes interactions entre la mer et les sédiments du fond , qui se manifestent par le processus : érosion - transport - dépôt .

Parmi les problèmes rencontrés en hydraulique maritime , l'ensablement et/ou l'envasement des passes d'entrée et des bassins portuaires par suite d'exploitation intensive et incontrôlée pour les besoins de navigation

Ce problème est complexe et très délicat pour qu'il soit décrit par des techniques mathématiques rigoureuses et le moyen le plus sûr reste le *modele réduit physique* .

L'étude sur modèle à fond mobile ou modèle sédimentologique permet la mise en évidence de tous les paramètres qui interviennent dans le phénomène à étudier ainsi que l'influence de leurs variations sur le comportement de ce dernier .

CHAPITRE I : TERMINOLOGIE MARINE :

I-1 : LES MOUVEMENTS DE LA MER.

La mer est un milieu liquide toujours agité dont le mouvement est la résultante d'ondulations de diverses périodes et des courants généraux plus au moins uniformes.

Les mouvements ondulatoires :

Par l'action du vent à la surface de l'eau, la surface de la mer se couvre de rides. Si le vent persiste, les vagues se forment et progressent dans la direction où souffle le vent. L'agitation tend à devenir un phénomène à deux dimensions, en donnant une houle cylindrique. Ces vagues de vent qui ont un caractère d'oscillations forcées par la présence permanente du vent provoquant un ébrûlement de la surface de l'eau, produisant des ondes libres se propageant au delà du lieu de formation des tempêtes. Ce sont des ondulations plus régulières qui constituent ce que l'on appelle la HOULE, dont la période varie de 3 à 25 secondes et la hauteur peut atteindre une trentaine de mètres.

Les seiches qui se produisent dans certains ports, avec une période variant de quelques dizaines de secondes à quelques minutes, et une amplitude de quelque décimètres.

La marée dont les périodes varient de 12h à environ 18 ans et dont l'amplitude peut atteindre sur certaines côtes une quinzaine de mètres. Ces mouvements qui se traduisent par une oscillation périodique du plan d'eau entraînent des courants

I-2 LA THEORIE DE LA HOULE :



L : longueur d'onde : distance horizontale entre deux crêtes ou creux successifs.

H = 2 a : dénivellation verticale entre la crête et le creux
a : demi hauteur : amplitude

c_p : célérité vitesse de propagation = $\frac{L}{T}$

Y
Ö : cambrure : rapport = $\frac{H}{L}$

T : période : intervalle de temps séparant le passage de deux crêtes successives en un point.

on notera : $\sigma = \frac{2\pi}{T}$

- 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.
- Cote de la surface libre / au niveau de repos .

$$\mathcal{Y}(x,t)$$

- vitesse des particules au point (x,z) à l'instant t
 $U(x,z,t)$ sur ox . $V(x,z,t)$ sur oz

I - 2-1 HYPOTHESES DE BASES

- Fluide homogène incompressible, donc la densité est constante.
- La seule force qui intervient est celle de la pesanteur: F .
- La tension superficielle est négligée.
- Le fluide est supposé parfait (pas de viscosité)
- Les forces de Coriolis sont négligées.

I - 2-2 THEORIE DE LA HOULE DE 1^{er} ORDRE
HOULE DE STOCKS

Equations à résoudre

Equation de Navier Stocks:

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

compte tenu des hypothèses sur le fluide, on obtient

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} P$$

Equation de continuité:

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

Conditions aux limites

- Fond imperméable : $\Rightarrow V = 0$ pour $z = -d$
- La pression sur la surface libre est nulle.
 $P = 0$ pour $z = \mathcal{Y}(x,t)$ cote de la S.L

$$v = \frac{d\mathcal{Y}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{Y}}{\partial x} V + \frac{\partial \mathcal{Y}}{\partial t}$$

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

On aura donc

$$\frac{1}{\rho} P + \frac{v^2}{2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} - gz$$

I - 2-2-1 : Houle sinusoïdale : $\mathcal{Y}(x,t) = a \sin(kx - \sigma t)$ $\left\{ \begin{array}{l} L = \frac{2\pi}{k} \\ T = \frac{2\pi}{\sigma} \end{array} \right.$

Pour aboutir à une telle solution on est amené à choisir à priori un potentiel ϕ de la forme :

$$\phi(x, z, t) = \phi_z \cos(kx - \sigma t)$$

la condition de poisson ($\Delta\phi = 0$) impose :

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \operatorname{th} kd = \frac{g T^2}{2\pi} \cdot \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} \text{, formule D'AIERY}$$

Le potentiel $\phi(y, z, t)$ vaut donc :

$$\phi(y, z, t) = \frac{g T}{4\pi} H \frac{\operatorname{ch}k(Z+d)}{\operatorname{ch}kd} \cos(kx - \sigma t)$$

H: Creux

d: Profondeur

L: Longueur d'onde, et T: Periode

$$\text{Celerité : } C_* = \frac{g T}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L}$$

ce qui montre que la celerité de propagation depend de la periode T et de la profondeur d.

- Pour une grande profondeur $\frac{d}{L} \approx 0.5$

$$\operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} \approx 1$$

$$L = g \frac{T^2}{2\pi} \quad C_* = g \frac{T}{2\pi}$$

- Pour des faibles profondeurs : si $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$

$$C_* = \frac{g T}{2\pi} \frac{2\pi d}{L} = \frac{g d}{C T}$$

$$C_* = \sqrt{g d}$$

donc la celerité ne depend alors que de la profondeur.

I -2-2-2 Mouvement des particules : Les trajectoires des particules sont des ellipses fermées parcourues en une periode le mouvement de la particule à deux composantes suivant l'axe horizontal de l'ellipse.

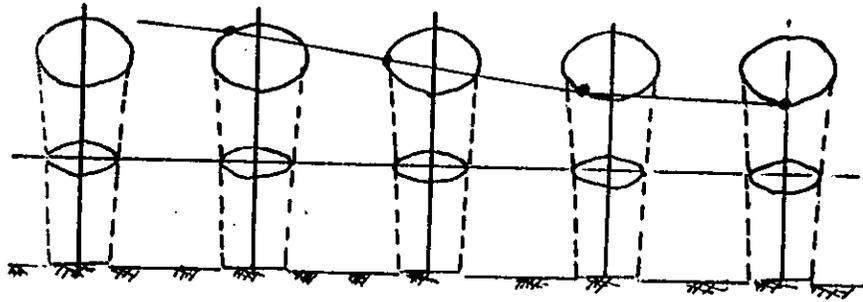


FIGURE: I 222A

- DU MOUVEMENT THÉORIQUE DES PARTICULES D'EAU
DANS LA HOULE

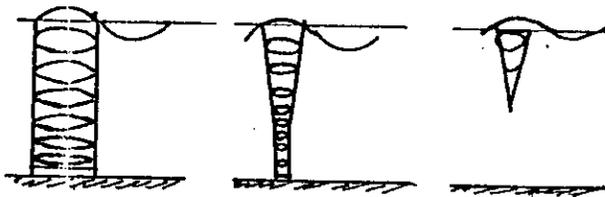


FIG: 222B

REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES
TRAJECTOIRES DES PARTICULES

$$\begin{aligned} \eta &= a \frac{c h k (z_0+d)}{\operatorname{sh} k d} \cos (kx_0 - \sigma t) \\ \text{axe vertical } \xi &= a \frac{s h k (z_0+d)}{\operatorname{sh} k d} \sin (kx_0 - \sigma t) \end{aligned}$$

(Voir fig 1.2.2.2 a)

En eau profonde on peut remarquer que les trajectoires des particules sont des cercles de rayon $r = a \frac{2\pi z_0}{L}$ et pour $z_0 < -\frac{L}{2}$ le mouvement est pratiquement nul et se limite à la surface, d'où le nom d'onde de surface pour la houle. (voir I.2.2.2 b).

I -2-2-3 : LES PRESSIONS : La pression en un point peut être calculée à partir de l'équation :

$$P = \rho g a \frac{c h k (z_0+d)}{c h k d} \sin (kx_0 - \sigma t) - \rho g z_0$$

I -2-2-4 : ENERGIE DE LA HOULE :

Energie contenue dans la longueur d'onde :

L'Energie totale de la masse d'eau comprise entre deux plans verticaux, distants d'une longueur d'onde L à un instant donné est égale à la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique.

* L'énergie potentielle: c'est celle des particules par rapport à leur position d'équilibre, elle est donnée par :

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2 L$$

* l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g a^2 L$$

* L'énergie totale :

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2} \rho g a^2 L$$

soit en fonction du creux H

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$$

Energie transmise à travers un plan vertical :

Le flux d'énergie transmis par la houle à travers un plan vertical par unité de largeur est :

$$F = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{L}{T} \left[1 + \frac{2Kd}{\text{sh}2kd} \right]$$

L'énergie transmise pendant une période :

$$E = F \times T = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \left[1 + \frac{2kd}{\text{sh}2kd} \right]$$

I -3 DEFORMATION DE LA HOULE :

I -3-1- Refraction : lorsque la houle cylindrique se propage par des profondeurs variables, sa longueur d'onde, son amplitude et sa direction subissent des modifications, alors que sa période reste constante, c'est le phénomène de refraction. Les vagues se déforment avec augmentation de la cambrure au fur et à mesure que la profondeur diminue.

I -3-2- Reflexion : lorsque la houle atteint une paroi verticale elle se réfléchit en formant un système d'onde stationnaire, appelé "CLAPOTIS" l'amplitude de ces ondes est sensiblement le double de celle de la houle incidente.

I -3-3- Diffraction : Le passage de la houle à travers une passe ou à proximité d'une digue unique entraîne la rotation des crêtes et une réduction de l'amplitude par diffraction. Les longueurs d'onde et la période ne sont pas modifiées par la diffraction.

I -3-4- Deferlement : Le deferlement est un cas limite de déformation pour lequel, la cambrure de la houle atteint une valeur critique au delà de laquelle, la houle n'est plus stable et peut être partiellement ou totalement détruite, en libérant une grande part de son énergie. Théoriquement, la houle deferle lorsque la profondeur h est égale à 1.28 fois l'amplitude, autrement dit la vitesse des particules d'eau sur la crête de l'onde dépasse la célérité, ou bien l'accélération des particules sur la crête est supérieure à l'accélération de la pesanteur.

Le phénomène de deferlement peut se produire en grande profondeur ou en profondeur faible, mais c'est le deferlement dans la zone de faible profondeur qui est le plus important à étudier car il est le plus dangereux du fait qu'il intéresse la zone de disposition des ouvrages maritimes.

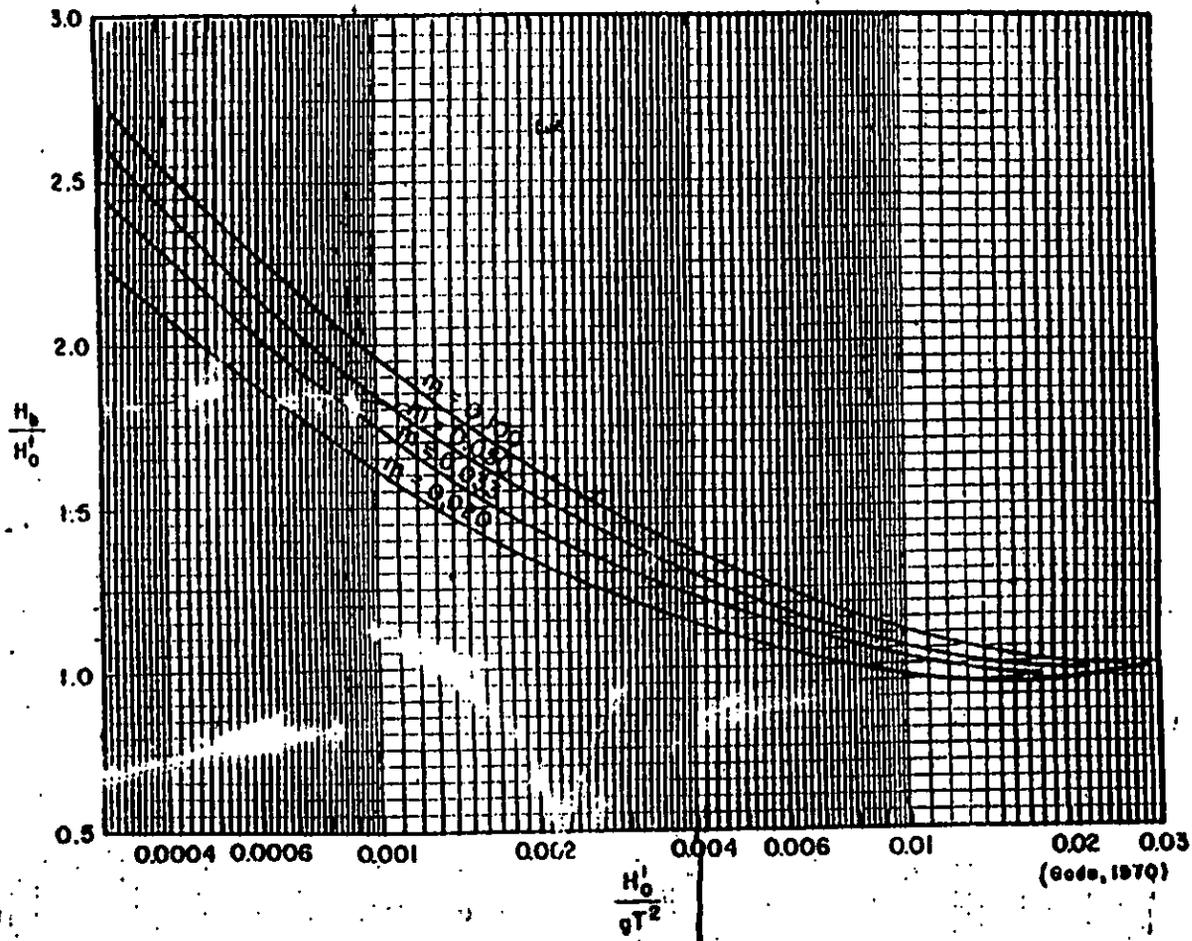


Figure 4 : Détermination de H_b/H_0' en fonction de H_0'/gT^2

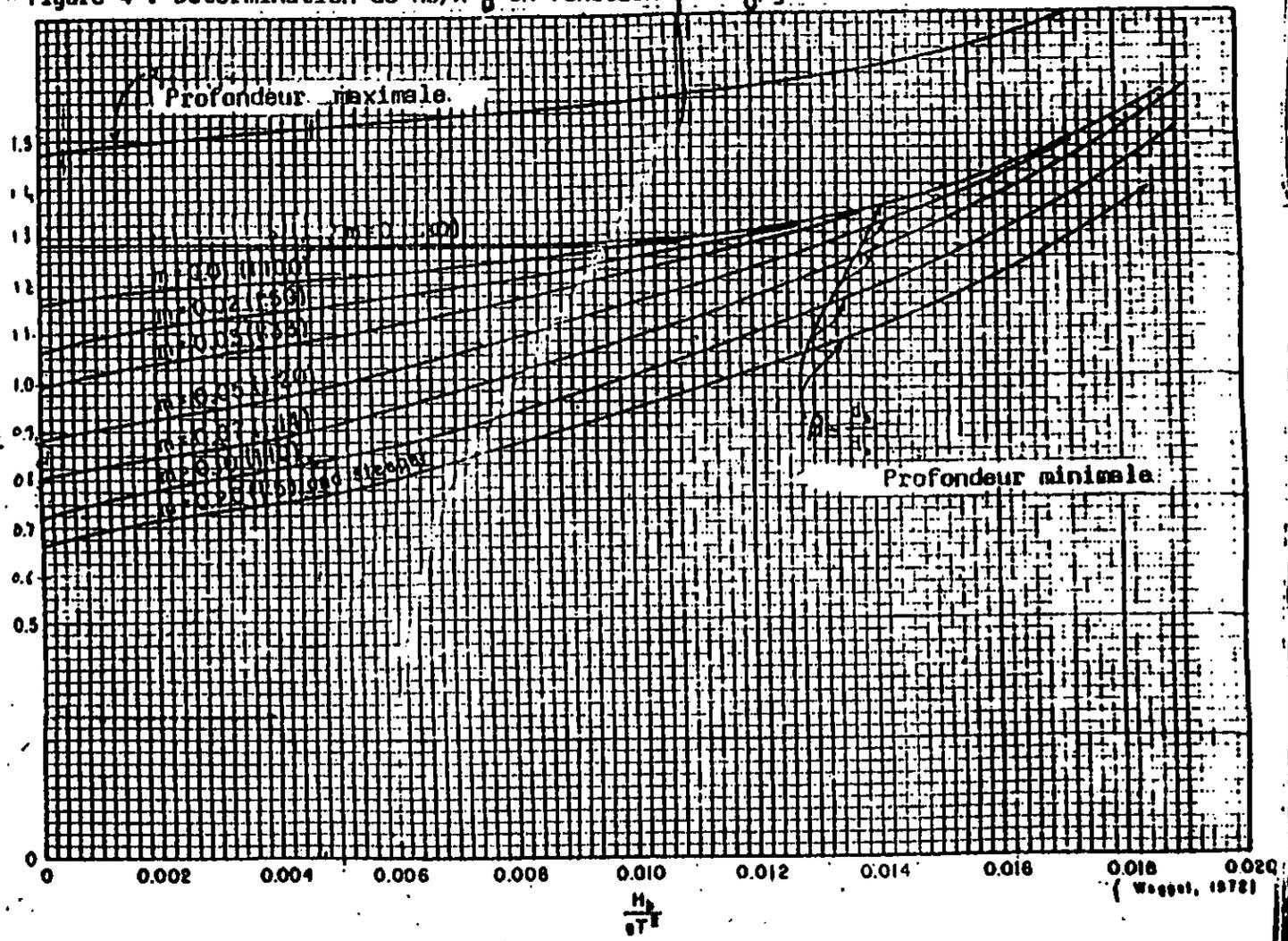


Figure 5 : Détermination de db/H_b en fonction de H_b/gT^2

on determine directement H_b

Puis à l'aide de la figure 4 donnant:

$$\frac{d_b}{9T^2} \text{ en fonction de } \frac{H_b}{9T^2}$$

on determine directement : $(d_b)_{\max}$ et $(d_b)_{\min}$

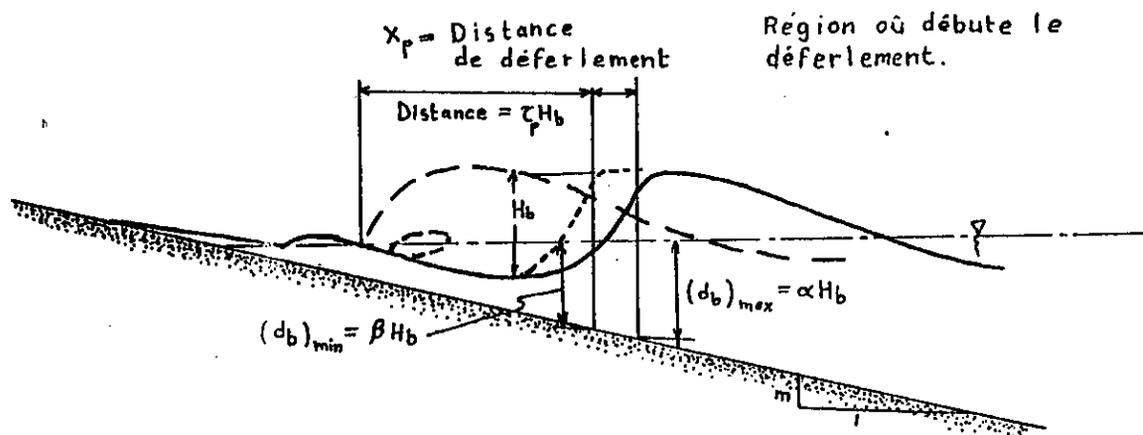


FIG. I.3.1 - Définition des termes afférents au déferlement

CHAPITRE II LES SEDIMENTS MARINS :

Les sédiments marins qui constituent les fonds sous les eaux de mer sont toujours dynamiques sous l'effet des mouvements de la mer, dus à l'action des courants, des vents ou des houles qui remuent et qui classent sans cesse les matériaux de fond.

Les particules solides peuvent donc être arrachées du fond, entraînées en charriage ou en suspension et déposées dans les zones d'eau calme.

Avant d'aborder la réalisation d'un ouvrage maritime, il est nécessaire de tenir compte des interactions possibles entre les fluides en mouvements et les matériaux solides et de prévoir les conséquences sur le littoral et les ouvrages artificiels.

L'érosion des matériaux, leur transport et leur dépôt dépendent de multiples paramètres.

Gradient des vitesses dans le fluide, tourbillons, géométrie des fonds, traces des rives, nature des matériaux, épaisseur sur substratum, porosité et cohésion des dépôts, caractéristique des fluides.... Ces paramètres subissent des fluctuations dans le temps et l'équilibre du littoral précaire entre les forces hydroliques très mouvantes et des matériaux solides très mobiles.

II -I : LA GRANULOMETRIE :

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

REPRESENTATION GRAPHIQUE :

a) Les courbes granulométriques semi-logarithmiques:

Ces courbes tracées à partir des pourcentages cumulés des tamisats depuis les particules fines vers les particules grossières permettant de déduire les teneurs en différentes classes granulométriques

- Sables fins : $40 \mu\text{m} < D < 200 \mu\text{m}$.
- Sables moyens : $200 \mu\text{m} < D < 600 \mu\text{m}$.
- Sables grossiers : $600 \mu\text{m} < D < 2000 \mu\text{m}$.
- gravier : $D > 2000 \mu\text{m}$.

On peut deduire aussi les parametre suivants :

Les centiles : 1%, 5%, 16%, 84%, 95%, 99%

Les quantiles : 25%, 50%, 75%

qui servent au calcul des differents indices.

TAILLE MOYENNE :

$$TM = \frac{D16+D50+T84}{3}$$

On designe par D_x le diametre pour lequel X% des grains ont un diametre inferieur à D_x

b) L'ASSYMETRIE : indice de SKREUNESS (SK)

Cet indice montre le defaut de symetrie de la courbe granulometrique par rapport à la médiane.

$$SK = \frac{Q_1 \times Q_3}{Q_2^2} = \frac{D_{25} \times D_{75}}{D_{50} \times D_{50}}$$

- SK > 1 : predominance des grains de diametre superieur à la médiane.
- SK < 1 : predominance des grains de diametre inferieur à la mediane.
- SK = 1 : symetrie par rapport à la mediane, la fonction fine est aussi representée que la fonction grossière.

c) Le coefficient de dispersion = $\frac{D_{75}}{D_{25}}$

Il mesure l'evasement de la courbe de fréquences granulometriques : il varie de 1.5 à 3 .

II-2 : PROPRIETE PHYSIQUE DES PARTICULES SOLIDES EN EAU CALME :

II-2-1 : VITESSE DE CHUTE DE SEDIMENTS NON COHESIFS :

En eau calme une particule solide tombe sous l'effet de la force de gravité en etant retenue par lau tramée hydrodynamique.

Le poid apparent de la particule dans l'eau est :

$$P = \frac{\Pi}{6} (\rho_s - \rho) g D^3 \dots\dots\dots(II-1).$$

En designant par D le diametre equivalent de la particule ρ_s et ρ etant la masse volumique du solide et du liquide.

La trainée hydrodynamique est :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_x \frac{\pi D^2}{4} W^2 \dots \dots \dots (II-2).$$

Expression dans laquelle W est la vitesse de chute de la particule, et C_x le coefficient de trainée fonction du nombre de Reynolds de chute

$$R_e = W D / \nu$$

ν : designant le coefficient de viscosité cinématique fluide.

A l'equilibre on aura :

$$P = F \Rightarrow \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho) D^3 g = \frac{1}{2} \rho C_x \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) W^2$$

$$W^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g \frac{D}{C_x} \dots \dots \dots (II-3)$$

Designons par ρ' la masse specifique relative du sédiment (II-3) s'ecrit :

$$W^2 = \frac{4}{3} \rho' g \frac{D}{C_x}$$

EN ECOULEMENT LAMINAIRE : $R_e < 1$ $C_x = \frac{24}{R_{ev}}$

$$W = \frac{1}{18\nu} \rho' g D^2 \dots \dots \dots (II-4)$$

ou :

$$R_{ev} = \frac{\rho' g D^3}{18 \nu^2} = \frac{1}{18} D^3 *$$

EN ECOULEMENT TURBULENT : ($R_e > 1000$), C_x est constant et vaut 0.5

$$W = \left[\frac{8}{3} \rho' g \right]^{1/2} D^{1/2} \dots \dots (II-5)$$

$$R_e^2 = \frac{8}{3} D^3 *$$

EN ECOULEMENT SEMI-TURBULENT : ($1 < R_e < 1000$)

C_x varie comme $R_e^{-1/2}$ donc W varie comme D :

$$W = KD$$

II-2-2 VITESSE DE CHUTE DE SEDIMENTS COHESIFS :

Les vitesses de chute des particules très fines du type vase (0.1 à 30 μ m) sont très lentes (1mm en 10 à 10⁶s)

Ces particules ont la propriété de se prendre en agrégats de dimension très supérieure à celles des particules individuelles formant ainsi des flocons de 0.5 à 1.5 mm dont les vitesses de chute sont 10 à 100000 fois plus grandes que celles des particules élémentaires.

Ce phénomène, appelé floculation, est d'autant plus poussé que la concentration en particules solides, la salinité et la température sont élevés. (Fig II-2-2-a, II-2-2-b et II-2-2-c)

La vitesse de chute des flocculants augmente avec la concentration tant que celle-ci est inférieure environ 15 à 20gr par litre puis elle diminue (fig II-2-1). Les particules qui tombent dans le fluide se gênent et la vitesse libre devient la vitesse entravée.

Pour les particules supérieures à 100 microns, la vitesse de chute (entravée) diminue lorsque la concentration de la suspension augmente. (Fig II-2-2).

II-3 TASSEMENT DES MATERIAUX :

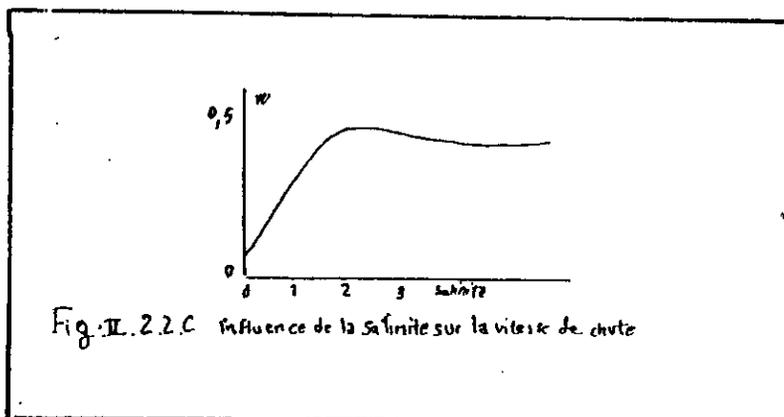
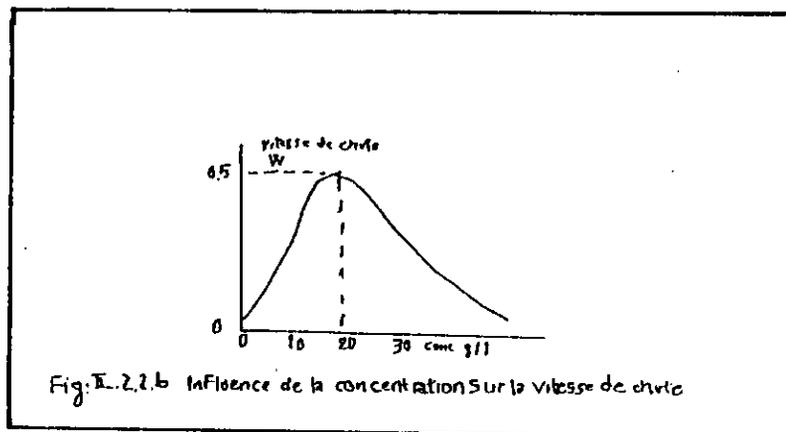
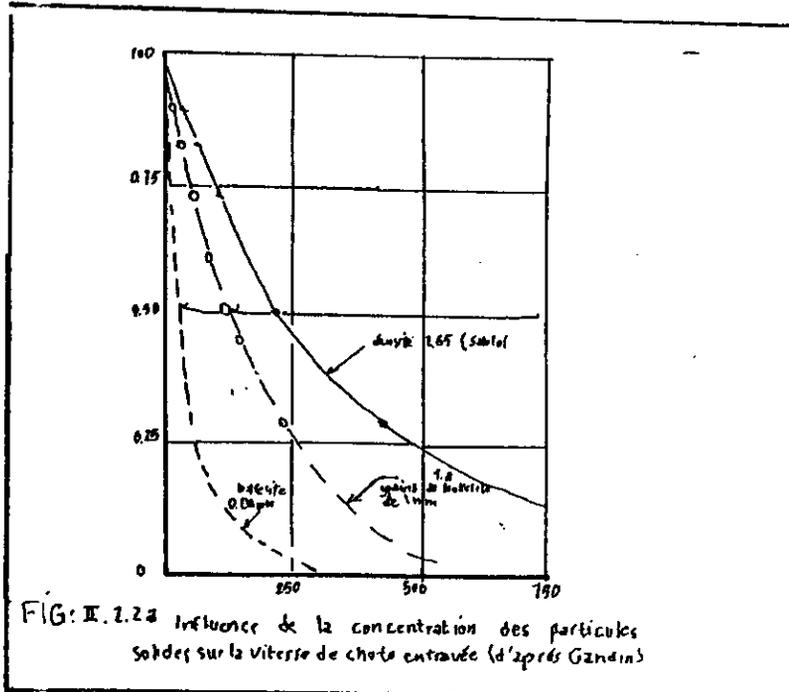
II-3-1 SEDIMENTS GROSSIERS (sable, gravier, cailloux)

Une fois déposés sur les fonds, les sédiments grossiers non cohésifs ne se tassent pratiquement pas, mais s'ils sont bien imbriqués entre eux, on peut admettre qu'ils restent stables, dans le temps.

II-3-2 SEDIMENTS FINS (limons, vase, argile)

Les flocons des éléments fins déposés, s'arrangent et se tassent en perdant leur eau interstitielle. Ce tassement s'effectue en plusieurs phases, d'abord :

une suspension flocculée très mobile, concentration inférieure à 100gr par litre, puis une phase d'élimination de l'eau interstitielle (< 200gr par litre) et en fin, arrangement des particules.



La concentration moyenne C du culot de tassement croit comme le logarithme du temps (Fig II-3-2 a) .

$$\overline{C} = a \log t + b \quad (\text{II-3-2-1})$$

a : facteur qui depend principalement de diametre des particules.

b : facteur lié au milieu aqueux.

A l'interieur du culot du tassement il existe un gradient tel que :

$$\overline{C} = C_0 + N \log de H \dots (\text{Fig II-3-2-2}). \text{ voir Fig II-3-2-b}$$

Expression dans laquelle, \overline{C}_0 designe la concentration en g/l.

H : profondeur en Cm ($H \geq 1$ Cm).

n : parametre dependant de la nature du complexe Sol-d'eau.

II.4 PROFIL D'EQUILIBRE

Les sédiments du fond sont toujours dynamiques et se déplacent sous l'action de la houle et du courant sans qu'il y ait un sens privilégié déplacement .

On peut, cependant définir à instant un profile d'équilibre limite qui subsisterait si la houle ou le courant conserverait plus longtemps les mêmes caractéristiques.

Les plages sont généralement formées d'une partie concave constamment immergée ayant une pente qui diminue vers les grandes profondeurs, et une partie alternativement couverte et découverte qui comporte des barres de lévigation séparées par des fosses (fig II.4).

Les pentes limites sont de l'ordre de 1 à 5% elles dépendent :

- Des caractéristiques de la houle ou du courant .
- Des caractéristiques du sable .
- Ces pentes sont d'autant plus douce que la houle est plus creuse et le sable plus fin.

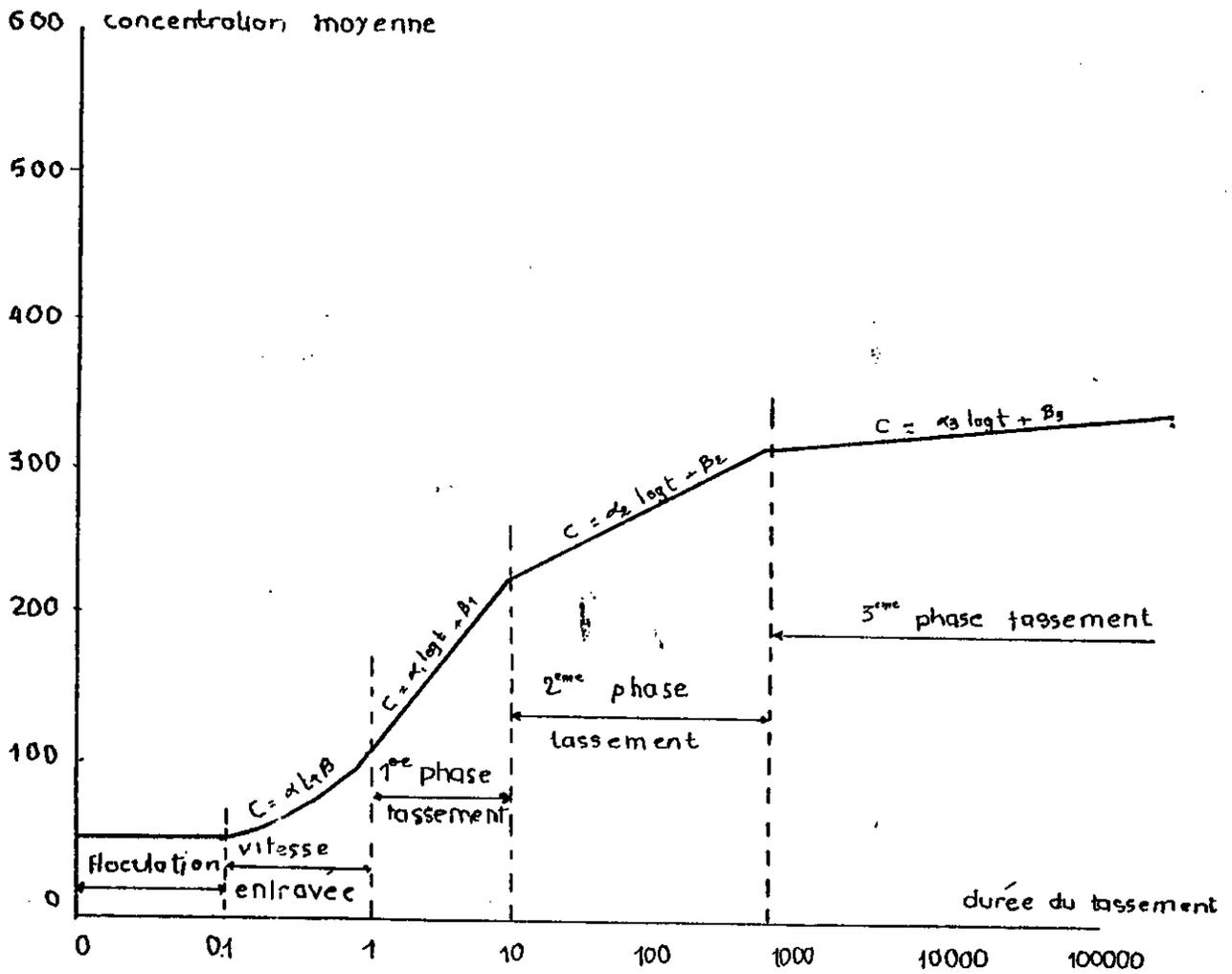


Figure II.3.2.a Variation de la concentration en fonction du temps

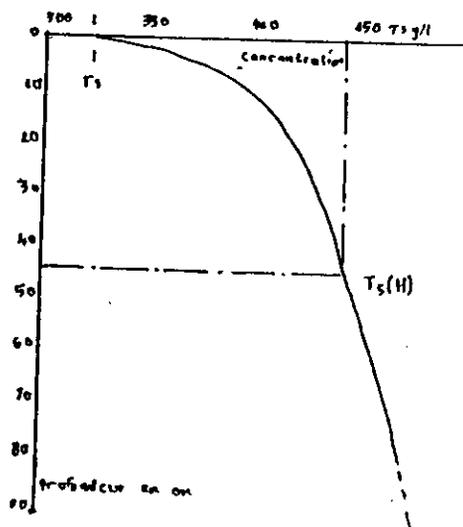


Figure II.3.2.b Variation de la concentration en fonction de la profondeur

Il est connu que les profils subissent des variations saisonnières .

La houle d'été a tendance à regarnir la plage contrairement à la houle d'hiver.

D'après M .LARRAS, le profil d'équilibre de la partie concave peut être approché par la parabole d'équation :

$$\frac{Y}{L_0} = K \left(\frac{x}{L_0} \right)^m \quad \begin{array}{l} y \text{ étant l'ordonnée et} \\ x \text{ l'abscisse .} \end{array}$$

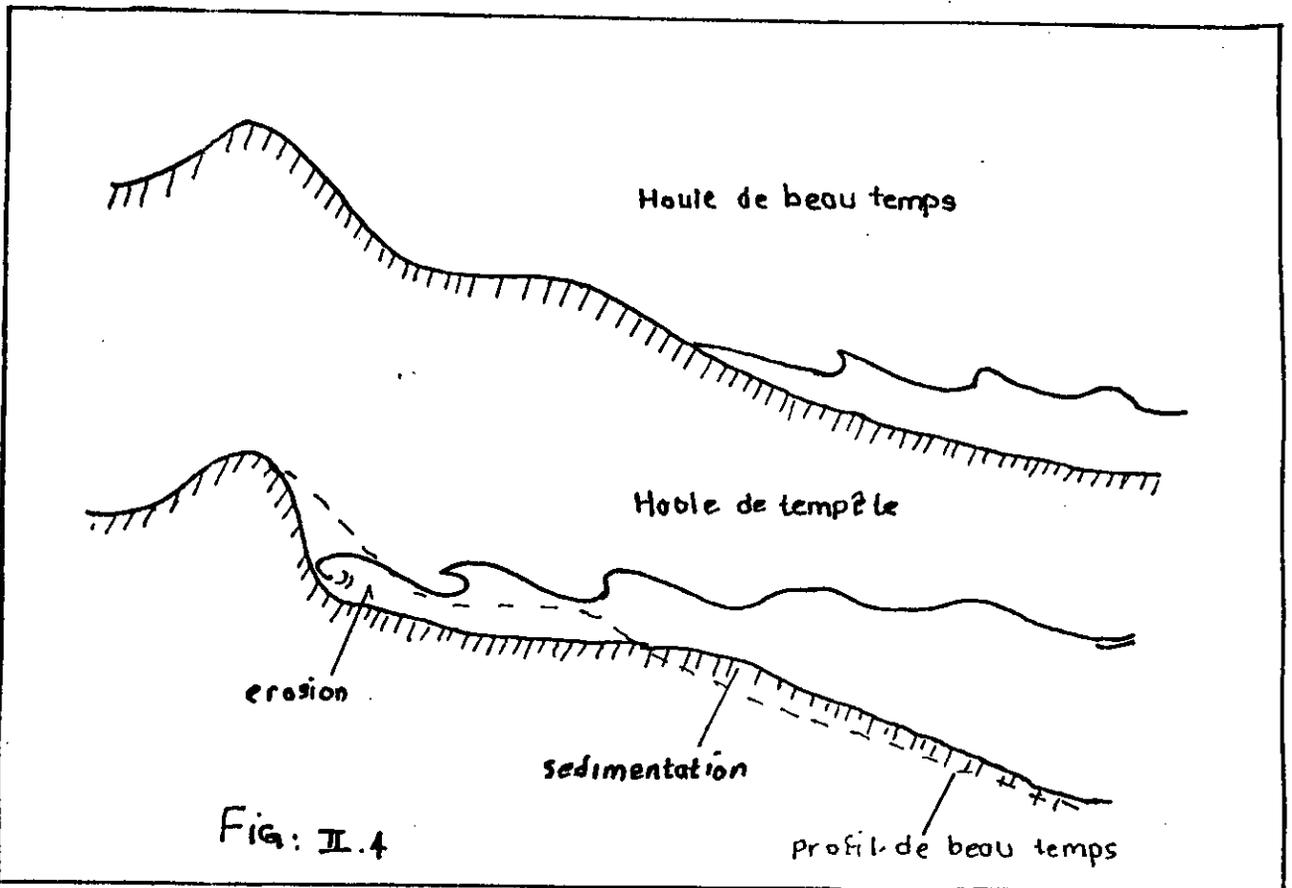
$$K = \bar{y}_0 + \frac{0.039 d}{(\delta - 1)^{1/3}}$$

$$m = 11.5 \bar{y}_0 + \frac{0.0275}{(\delta - 1)^{1/3}} - 0.05$$

d = diamètre du sable

δ = densité du sable

\bar{y}_0 = combrure au large



Forces de frottement sur le fond

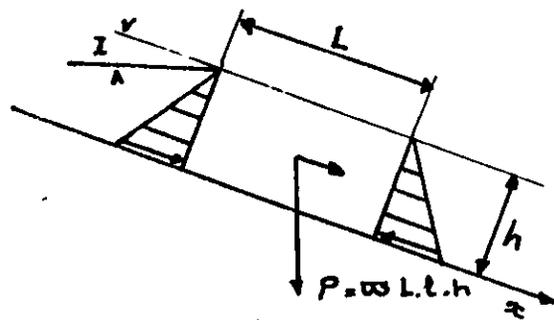


Fig - III 11

CHAPITRE III DYNAMIQUE DES SEDIMENTS :

III-1 COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DES COURANTS :

III-1-1 FORCE TRACTRICE SUR LE FOND :

Les grains déposés sur le fond marin, peuvent être déplacés sous l'action du courant au fur et à mesure que l'intensité de celui ci croit.

Le paramètre essentiel dans le mécanisme du début d'entraînement des sédiments est la contrainte tangentielle ou la force tractrice τ_0 s'exerçant sur le fond.

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot i \quad \dots \dots \dots (III-1-1)$$

Cette équation est donnée par l'établissement de l'équilibre d'une tranche de liquide (fig III-1-1)

- 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.

III-1-2 VITESSE FROTEMENT :

De même, on peut caractériser le début d'entraînement d'une particule, par la vitesse de frottement U_* définie par :

$$U_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad \dots \dots \dots (III-1-2-1)$$

La vitesse de frottement U_* peut être reliée au régime uniforme à la vitesse moyenne \bar{U} du courant par le coefficient du CHEZY.

$$\frac{\bar{U}}{U_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{K R_H^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad \dots \dots \dots (III-1-2-2)$$

avec $U = K R_H^{2/3} i^{1/2}$ K : coefficient de STRICKLER

U_* peut être déduite directement des mesures des vitesses au dessus du fond aux différentes profondeurs "y" du fond (théoriquement on admet une répartition logarithmique de vitesse) et pour $y \leq 0,16H$ (H profondeur totale).

$$\frac{U}{U_*} = 6.75 \text{ Log } \frac{Y}{0.108 \sqrt{U_*} + 0.033 K_s} \dots (III-1-2-3).$$

K_s : coeff de regosite de NIKURADSE.

si le coefficient K_s est négligable (cas du fond lisse) et l'eau est à une température de 15° c ($\nu = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$), on aura

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \text{ Log } 800 Y U_* \dots (III-1-2-4).$$

NB : On peut définir le début d'entraînement d'un sol par la vitesse moyenne de l'eau \bar{U} :

$$\bar{U} = Q/S \dots (III-1-2-5).$$

Q : débit liquide ,

S : section transversale de l'écoulement

Mais ce paramètre ne permet pas d'avoir une très grande précision pour définir la valeur critique \bar{U}_c étant donné que \bar{U}_c dépend de la hauteur d'eau H au dessus du matériau.

$$\bar{U}_c = f(H^{1/6}) \dots (III-1-2-6).$$

THEORIQUEMENT : La détermination de U_* est simple puisque il suffit de déterminer la pente hydraulique "i" et le tirant d'eau "H" puis en déduire U_* à partir des équations (III-1-1) (III-1-2-1)

ou on peut déterminer la vitesse moyenne \bar{U} et le coefficient C de CHEZY et calculer U_* à partir de l'équation (III-1-2-2)

PRATIQUEMENT : U_* est déterminée en fonction de la répartition des vitesses U aux différentes profondeurs Y du fond. La pente i étant difficile à déterminer avec précision.

COURBE DE SHIELDS :

SHIELDS en 1936 après avoir effectuée plusieurs expériences a montré que la loi de début d'entraînement pouvait s'écrire approximativement.

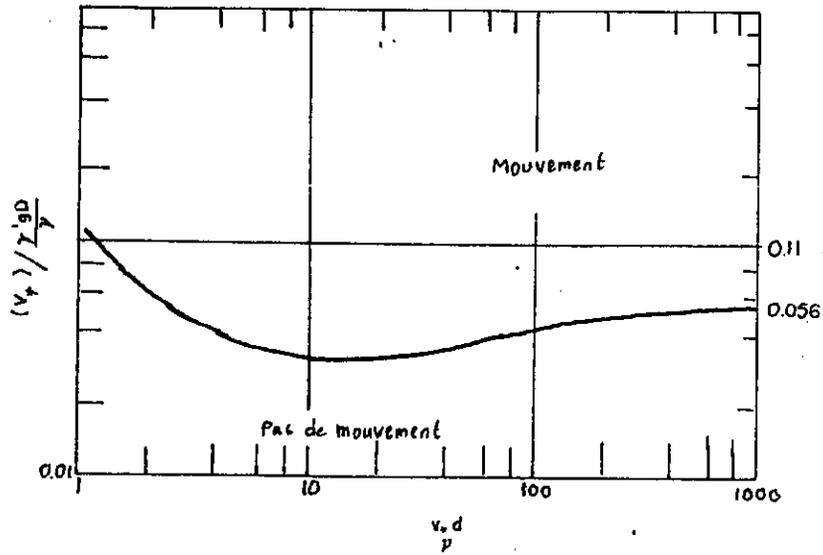


Fig. Diagramme de Shields

$$Y = f(x)$$

avec

$$Y = \frac{\rho U_*^2}{\gamma_s D} = \frac{\tau_0}{\gamma_s D} \quad \text{et} \quad X = \frac{\rho U_* D}{\mu} = R_{e*}$$

Il a présenté sous forme de courbe (fig)
 La courbe de SHIELDS est reconnue comme valable pour des granulométries uniformes ou presque.
 Car si la granulométrie est étendue le phénomène de début d'entraînement n'a plus de sens précis.

III-1-3 DEBUT D'ENTRAINEMENT DES MATERIAUX :

III-1-3-1 MATERIAUX NON COHESIFS :

III-1-3-1-1 FORCE TRACTRICE ET VITESSE DE FROTTEMENT :

Les études en laboratoire montrent que la force tractrice nécessaire pour la mise en mouvement d'une particule solide par un courant, est proportionnelle au diamètre d du grain (d moyen) et sa densité relative. (sous l'eau).

$$\tau_c = A (\gamma_s - \gamma_0) d \quad \dots\dots\dots(III-1-3-1-1)$$

- γ_s, γ_0 : poids volumique du matériau et du fluide
- A : paramètre compris entre 0,04 et 0,06
- τ_c : est liée aux caractéristiques des matériaux de fond.

Cette valeur critique dépend du critère choisi pour définir le début d'entraînement des particules.

A partir de la force tractrice τ_c , on peut en déduire la vitesse de frottement critique U_{*c} correspondante, nécessaire

pour remettre une particule en mouvement comme indique le chapitre précédent.

III-1-3-1-2 PARAMETRES ADIMENTIONNELS : loi du debut d'entraînement

On peut utiliser également des paramètres adimensionnels pour caractériser le début d'entraînement des particules sous l'action de la houle.

PARAMETRES DU GRAIN :

Ce paramètre caractérise le comportement des grains dans les fluides.

$$G = \frac{R_*^2}{\tau_0 / \rho' \rho' g d} = \frac{\rho' g d^3}{\gamma^2} \quad \text{avec } R_* = U_* d / \gamma$$

BONREFILLE a utilisé un autre paramètre sans dimension

$$d_* = G^{1/3} = (\rho' g / \gamma^2)^{1/3} d \quad \text{diametre étoile}$$

III-1-3-2 MATERIAUX COHESIFS

Pour les sédiments cohesifs, on doit tenir compte de l'état de tassement et du complexe sol eau.

Pour les très faibles concentrations : les vases fraîchement déposées se comportent comme un véritable fluide visqueux et l'on constate qu'à l'interface de l'eau et la vase un mouvement ondulatoire dû à la différence des vitesses entre les deux fluides, les ondes ainsi formées pourront déferler littéralement en remettant une grande partie des dépôts en suspension.

Pour les concentrations moyennes : les vases qui ont subi un début de consolidation se comportent, comme un corps plastique présentant au début de l'action du courant des figures de "dechirement" de la pellicule superficielle qui peut être arrachée du fond et délivre dans les eaux avec un gradient de concentration du fond vers la surface.

Pour les fortes concentrations : les vases après un stade de tassement prolongé, présentent une très grande résistance à l'érosion. Des caeaux de vases consolidés, ne peuvent s'arracher que pour de très grandes vitesses, ces morceaux de vase sont transportés sous forme de galets de faible densité, mais de forte cohésion.

III-1-3-2-1 L'ENTRAINEMENT DES VASES PAR LES COURANTS :

a_ DEPOTS ANCIENS : En présence approximatifs, la vitesse d'érosion U_* varie comme le carré de la concentration

$$\text{(fig III-1-3-2-1a)} \quad U_* \simeq K \bar{C}^2 \quad \dots \dots \dots \text{(III-1-3-2-1).}$$

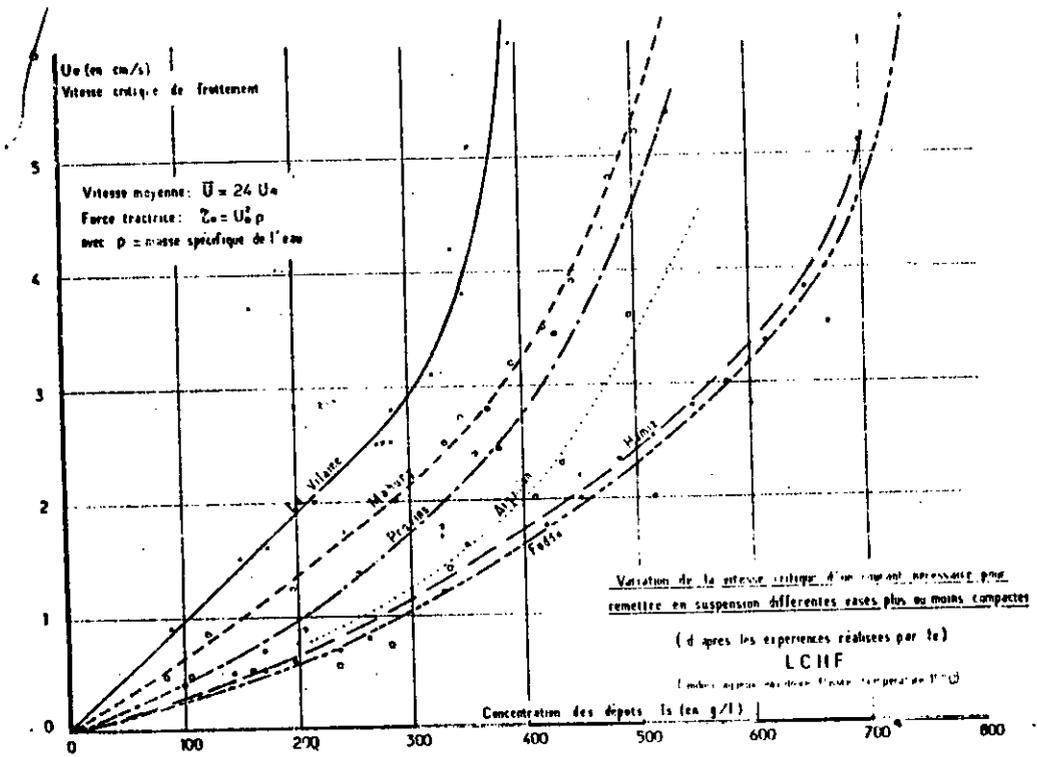


Fig. III.3.2.1. a - Influence de la concentration en particules solides et de la nature des sédiments

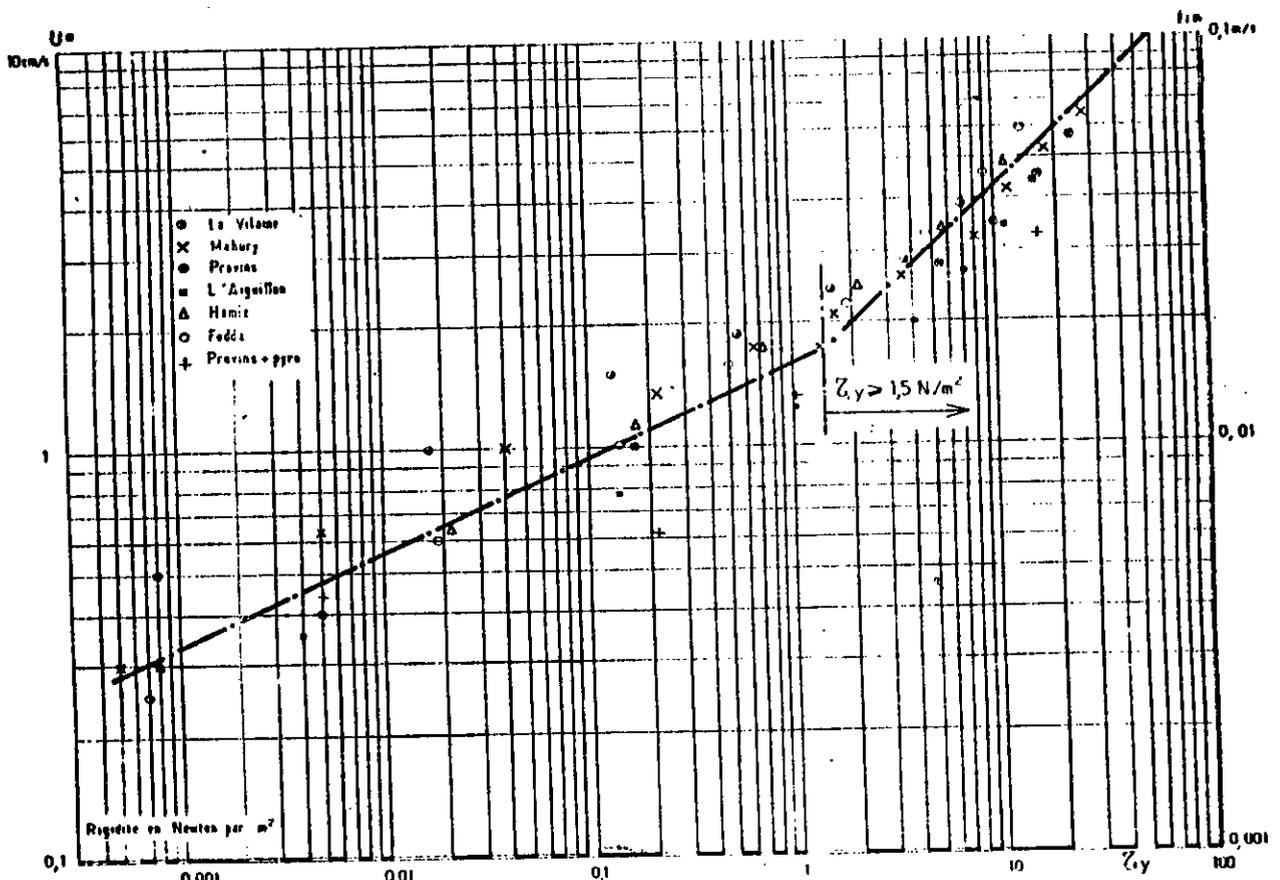


Fig. III. 3. 2.1. b - Relation entre la vitesse critique de frottement u_c et la rigidité initiale τ_y

b-DEPOTS RECENTS : La vitesse d'érosion des vases imparfaitement consolidées vari proportionnellement à la concentration

$$U_* = KC \dots\dots\dots(III-1-3-2-2).$$

Pour mieux prévoir au laboratoire le comportement des dépôts de vases sous l'action des forces hydrodynamiques, on préfère utiliser la rigidité initiale τ_y .

d'une façon schématique on a

$$\tau_y = n C^{4.25} \dots\dots\dots(III-1-3-2-3).$$

La vitesse critique U_{*c} est liée à la rigidité initiale.

τ_y (fig III-1-3-2-1b)

c - LES DEPOTS CONSOLIDES :

$$U_{*c} \simeq 0.016 \tau_y^{1/2} \dots\dots\dots(III-1-3-2-4).$$

si U_{*c} est exprimée en m/s , et τ_y N/m²

ou
$$U_{*c} = 0.5 \tau_y^{1/2}$$

si U_{*c} est exprimée en cm/s et τ_y en dynes/cm²

d- LES DEPOTS PLASTIQUES NON CONSOLIDES :

$$U_{*c} = \tau_y^{1/4}$$

U_{*c} exprime en cm/s et τ_y dynes/cm²

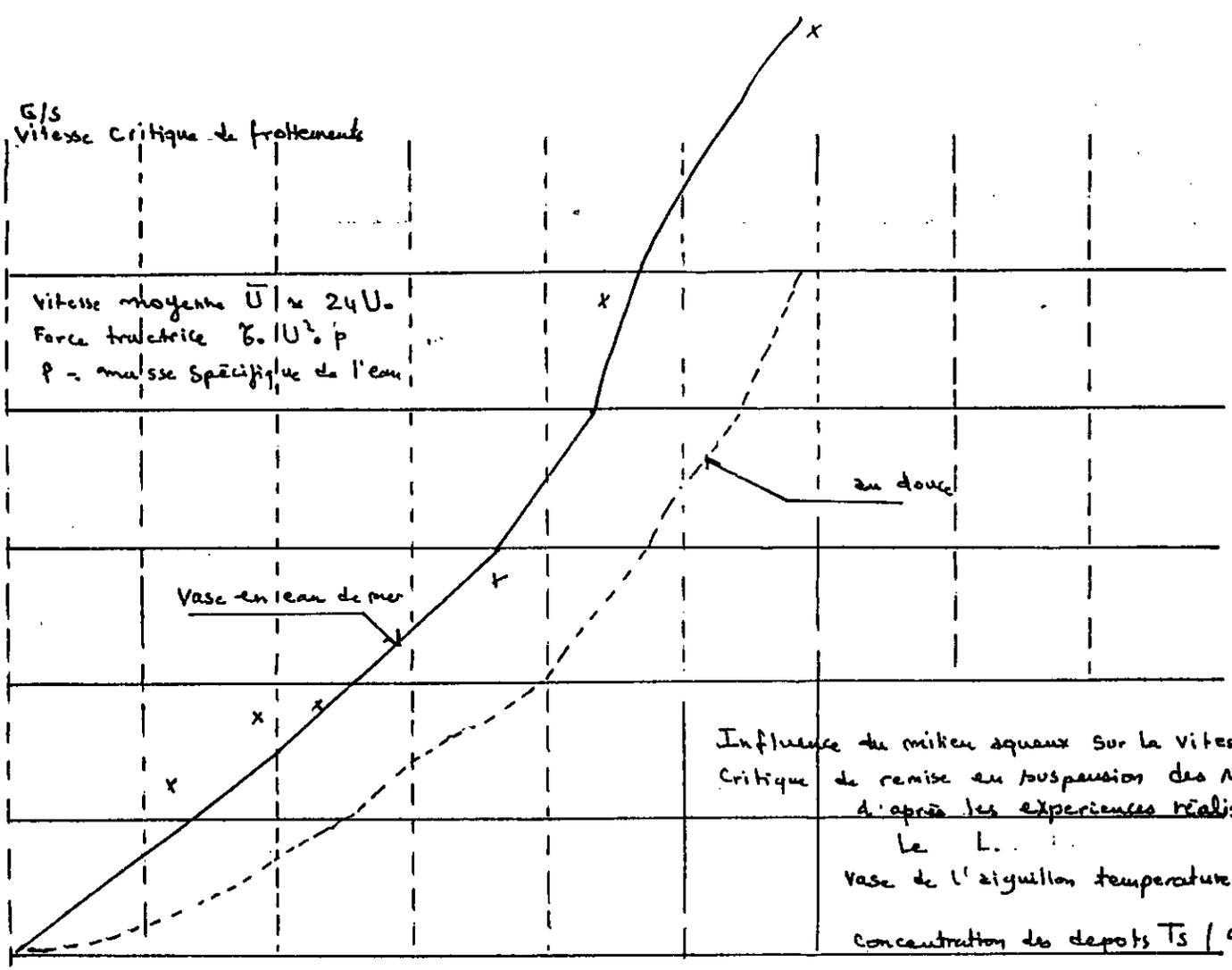
NB: Notons ici, l'influence du milieu aqueux sur la vitesse d'érosion des vases (comme l'indique la figure III-1-3-2-1c) ci dessous ainsi que l'influence des différents pourcentages de sables contenus dans une vase.

III-1-4 - DEBITS SOLIDES TRANSPORTES PAR LES COURANTS :

Arraches du fond sous l'action des courants, les particules solides seront transportées par charriage ou en suspension suivant les caractéristiques des sédiments et celles des courants.

G/S
Vitesse critique de frottement

Vitesse moyenne $\bar{U} \approx 24U_0$
Force tractive $6.10^3 \rho$
 ρ - masse spécifique de l'eau



— Influence du milieu aqueux sur l'erosion des vaseaux. —

Fig III 1.3.2c

Pour la détermination des quantités des sédiments transportés par suspension. La connaissance de la concentration en particules solides dans l'eau est suffisante. Par contre le transport solide par charriage est beaucoup plus difficile et les formules de charriage donnent souvent des ordres de grandeurs assez différents.

III-1-4-1 DEBIT SOLIDE DES SEDIMENTS GROSSIERS (CHARIAGE)

Plusieurs formules ont été proposées pour le transport des sédiments par le charriage.

FORMULES DE DUBOYS (1879): selon laquelle, on admet que le transport s'effectue dans une série de couches d'une épaisseur égale au diamètre d'une particule, et que la vitesse des couches décroît linéairement

$$g_s = \psi \tau_0 (\tau_0 - \tau_c)$$

g_s : étant le débit solide en poids/mètre de longueur.

τ_0 : force tractrice sur le fond

τ_c : force tractrice critique

ψ : coefficient déterminé expérimentalement

FORMULE DE MEYER-PETER (1934)

$$g_s^{2/3} = 250 q^{2/3} i - 42.5 D_{60}$$

g_s : débit solide par unité de largeur du fond.

q : débit volume par unité de largeur du lit.

i : pente de la ligne d'énergie.

FORMULE DE MAYER-PETER (1948)

La formule de Mayer-Peter sous sa forme simplifiée peut s'écrire :

$$g_s = A (\tau_0 - \tau_c)^{3/2}$$

$$A = 8 \left(\frac{g}{\gamma_{00}} \right)^{1/2} \frac{\gamma_{0s}}{\gamma_{0s} - \gamma_{00}}$$

γ_s : masse volumique sediment kg/m^3 , g : accélérateur pesanteur
 γ_0 : masse volumique de l'eau kg/m^3 , τ_0 : force tractrice
 τ_c : force tractrice critique, g_s : débit solide

FORMULE D'EINSTEIN :

En forme simplifiée

$$\phi = f(\psi)$$

$$\psi = \frac{\gamma_s - \gamma_0}{\gamma_0} \frac{D}{R_H i} = \frac{(\gamma_s - \gamma_0)}{\tau_0} D$$

$$\phi = \frac{g_s}{A \gamma_s} \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_s - \gamma_0} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{g D^3} \right)^{1/2} \text{ expérimentalement } A = 0.82$$

Les formules de transport par charriage précédentes peuvent être transformées et écrites en fonction des termes

$$Q_s / (\rho' g d^3)^{1/2} \quad f = \tau_0 (\gamma_s - \gamma_0) d$$

$$Q_s : \text{débit solide en volume} \quad Q_s = \frac{g_s}{\gamma_0}$$

ρ' : densité relative, d : diamètre des grains

- SCHIELDS** : $Q_s / (\rho' g d)^{1/2} = 10 C (f - 0.076) (f)^{3/2}$
MEYER-PETER : $Q_s / (\rho' g d)^{1/2} = 8 (f - 0.047)^{3/2}$
KALINSKE : " = $10 f^{3/2}$
BOMEFILLE : " = $5.5 f^{3/2}$
ENSTEIN : " = $32.6 f^3$

La mise de ces équations sous forme de graphes montre les écarts assez nets. Des quantités de transport calculées par les différentes formules (fig III-1-4-1a).

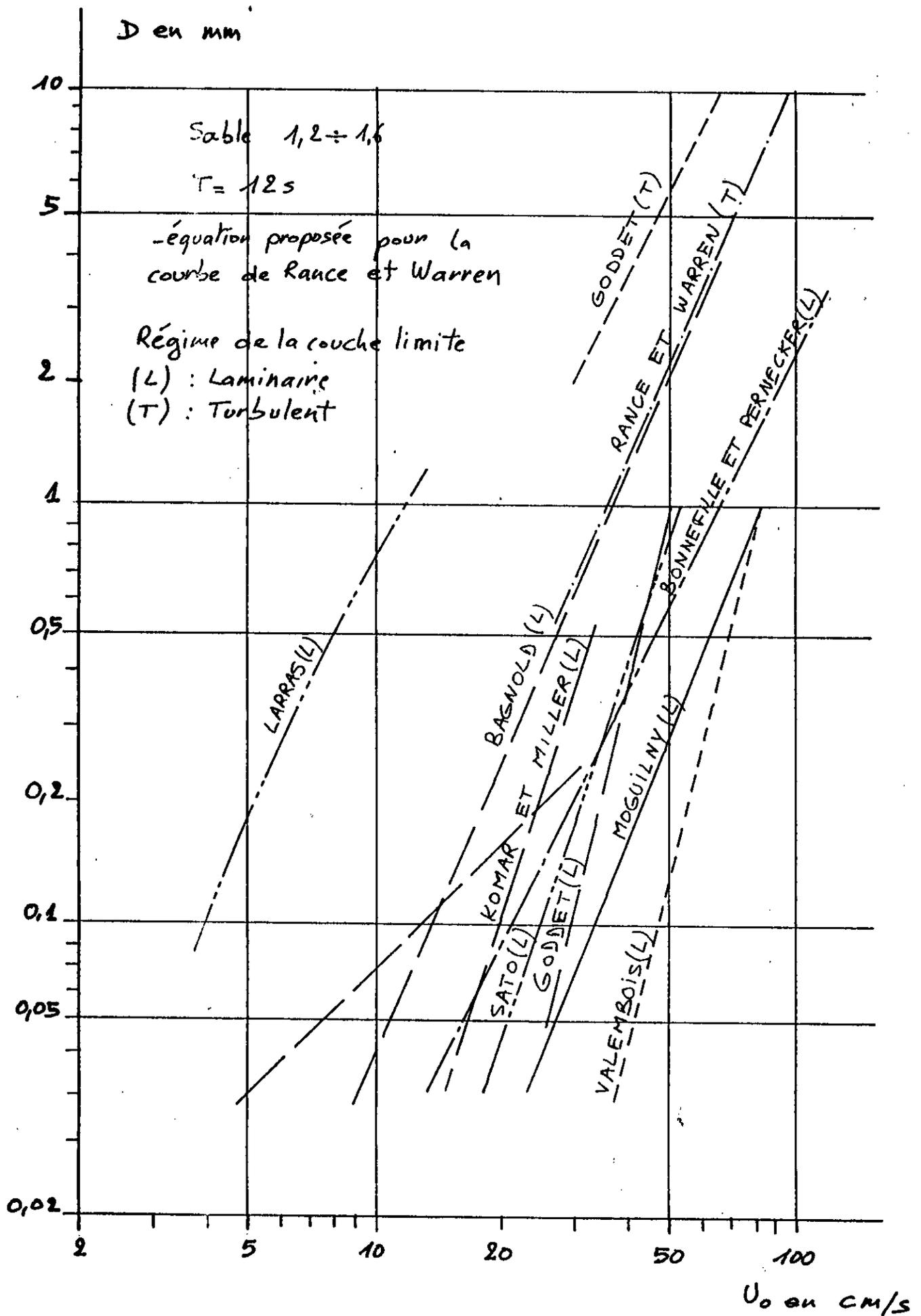


Fig. III. 1.4.1.a - Début d'entraînement des sédiments
Comparaison des différentes équations

III-2 COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DE LA HOULE :

III-2-1 INTRODUCTION

L'Action de la houle sur les sédiments déposés sur les fonds se présente d'une part par l'action des mouvements orbitaires au voisinage du fond, d'autre part, par l'action des courants induits (courants dans la couche limite et courants de compensation) suivant le rotationnel du mouvement (fig III-2-1-b)

En fin, le déplacement des lames obliques à la côte entraîne un déplacement d'eau parallèle à la côte dans le même sens que la propagation de la houle (fig III-2-1-6).

III-2-2 VITESSES ALTERNATIVES SUR LES FONDS

Les courants engendrés par la houle, au voisinage du fond entraînent l'oscillation des particules solides si les vitesses de ces courants dépassent la valeur de la vitesse critique d'entraînement.

La vitesse orbitale maximale U_{\max} sur le fond est :

$$U_{\max} = \frac{\pi h}{T \operatorname{sh} 2\pi H/L} \dots \dots \dots (\text{III-2-2}).$$

sachant que la vitesse orbitale instantanée est :

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

La vitesse de frottement peut s'exprimer comme :

$$U_* = (8 \nu \frac{U_{\max}^2}{\pi T})^{1/4} \dots \dots \dots (\text{III-2-2-a}).$$

ou

$$U_* = 0.07 \left(\frac{h^2}{T^3 \operatorname{sh} 2\pi H/L} \right)^{1/4} \dots \dots \dots (\text{III-2-2-b}).$$

avec

ν : viscosité de l'eau par m^2/s ;

T : période de la houle ;

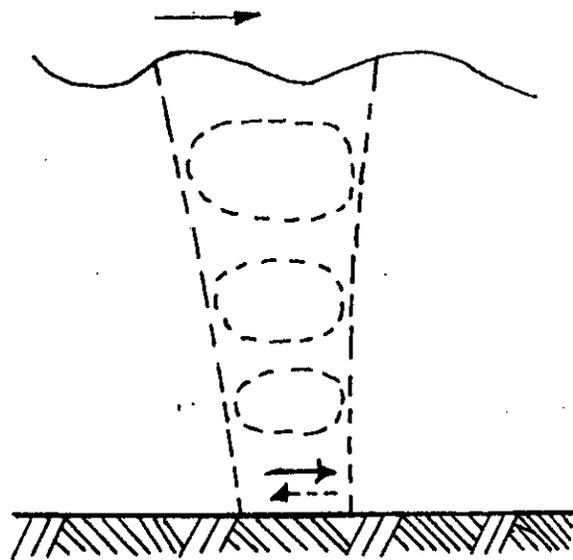
H : profondeur d'eau en m ;

h : amplitude en m ;

L : longueur d'ondes en m.

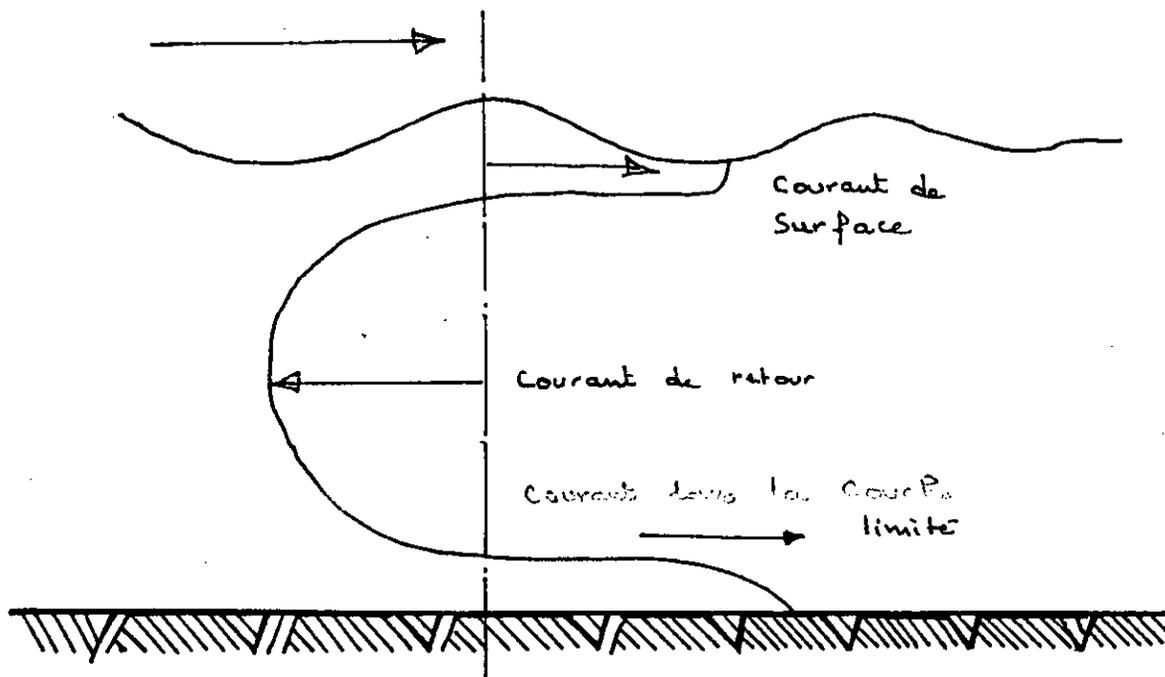
L'expression de force tractive peut être déduite en se servant de la définition même de U_* .

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



— Mouvements Orbitaires —

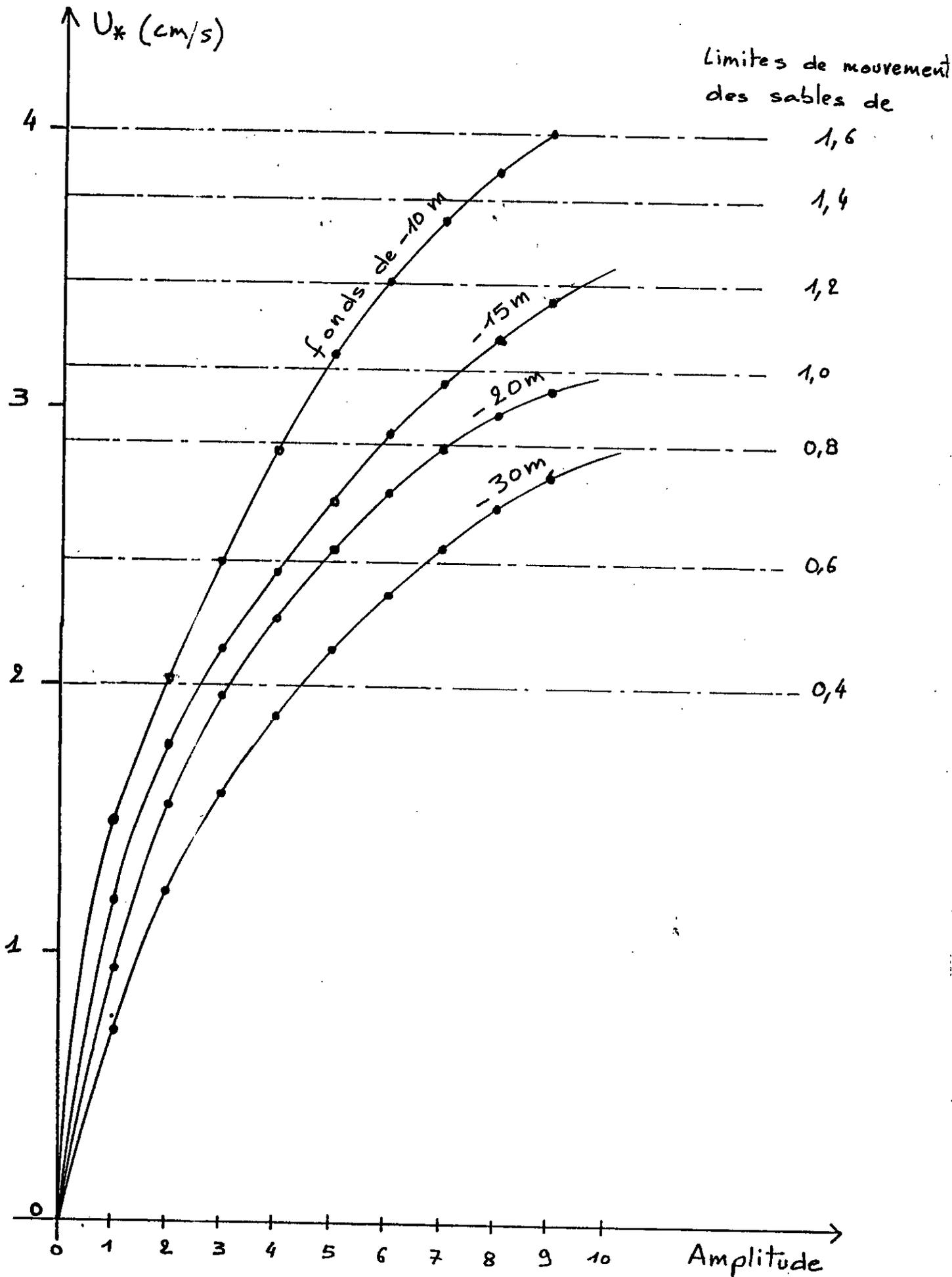
Fig III 2 1 a



— Courants d'entraînement dans la masse du fluide. —

Fig III 2 1 b

Variation de la vitesse de frottement en fonction de l'amplitude de la houle



III-2-3 COURANTS DUS A LA HOULE

III-2-3-1 COURANTS DE TRANSLATION ET DE COMPENSATION

Parmi les courants engendrés par la houle, il y a les courants qui prennent naissance dans la couche limite. Si la couche limite est laminaire, les matériaux arrachés du fond restent à son voisinage et pouvant être transportés vers la côte par les courants de translation avec une vitesse qui sera proportionnelle à la vitesse moyenne U_{cl} telle que :

$$U_{cl} = K \cdot U_{max} \cdot H \quad (III-2-3-1)$$

avec : $K = 1 \div 18$ en unités c.g.s

Si la couche limite est turbulente (c'est le cas des houles très cambrées et irrégulières), elle projette les matériaux dans la partie centrale de la lame d'eau où le courant de compensation les transporte vers le large. (fig III-2-1.b).

Les lames d'éferlement projettent des eaux vers la côte ces eaux seront contrebalancées par les courants de retour près du fond en ramenant ainsi les sédiments de la côte vers un endroit de rencontre entre ces sédiments et ceux transportés du large.

Le déferlement représente donc un véritable pôle d'attraction sédimentaire.

Le niveau moyen entre la zone de déferlement et la côte subit des fluctuations pouvant atteindre 1/10 à 1/15 de la différence entre les amplitudes des vagues. Ces fluctuations pouvant parfois entraîner des courants de retour d'importants et être à l'origine des seiches.

III-2-3-3 COURANT LITTORAL (ou courant de houle)

Les houles qui abordent la côte obliquement, donnent naissance à un courant qui se dirige parallèlement au rivage appelé "courant de houle" qui peut transporter des quantités importantes de sédiments. La vitesse de ce fleuve littoral (courant littoral), a un maximum vers la côte entre une demi longueur et une longueur d'onde du point de déferlement. Vers le large, les vitesses diminuent rapidement alors que vers la côte, cette diminution est lente. (fig 2.3.3a)

Répartition des vitesses du courant de la houle à différentes distances de la côte

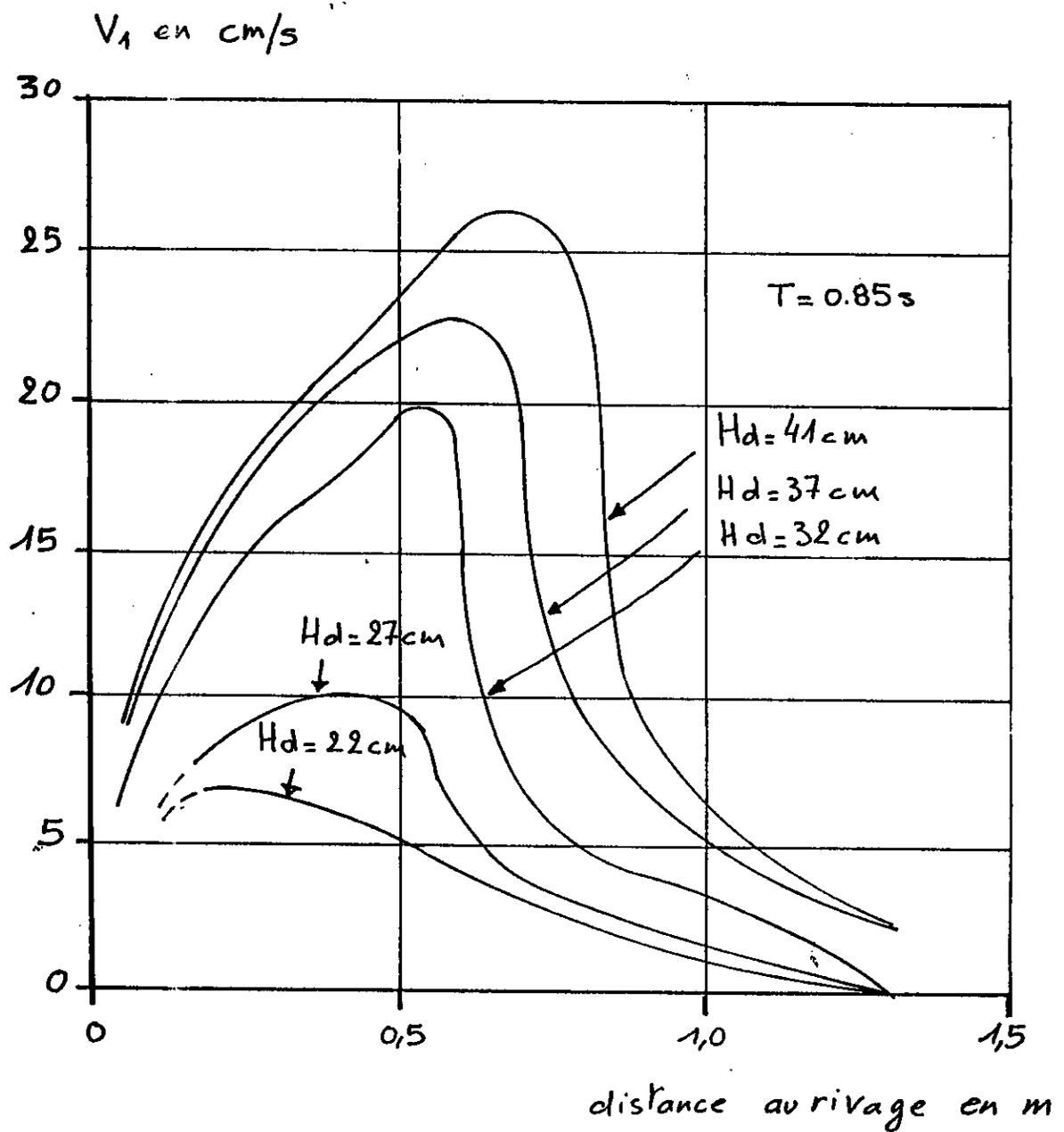


FIG. III 233a

Plusieurs formules ont été proposées pour calculer la vitesse du courant de houle

$$\text{C.E.R.C} : V = 20,7 i (gh)^{1/2} \sin 2\alpha \dots\dots\dots(\text{III-2-3-3-1})$$

$$\text{J.LARRAS} : V = 2,6 \left(\frac{g h^2 i}{T} \sin 2\alpha \right)^{1/3} \dots\dots\dots(\text{III-2-3-3-2})$$

avec

- h : amplitude de la houle déferlante ;
- i : pente moyenne de la plage ;
- α : obliquité des lames du large avec le rivage
- g : l'accélération de la pesanteur

III-2-3-4 COURANT DE RETOUR OU "D'INTERTOW" ET "RIP-CURRENTS" :

Entre la zone de déferlement et la côte, les fluctuations du niveau de l'eau provoquant des échanges importants des masses d'eau qui s'évacueront vers le large donnant ainsi naissance aux "courants de retour" proches du fond appelés "indertow" s'il n'y a pas de passage d'eau à travers les orthogonales.

Les masses d'eau projetées par le déferlement vers la côte ne seront pas restituées complètement par les courants de retour (intertow) et il y aura, donc accumulation d'eau le long de la rive avec des retours compensateurs vers le large.

On appelle ces retours des "rip-currents", qui prennent naissance à des endroits où l'amplitude de la houle est la plus faible. III-2-3-4a

Notons que les vitesses dans les "rip-current" sont très importantes parfois. De plus les creusements des petites ondulations et dépressions perpendiculaires à la côte sont attribués à la côte sont attribués à ces "rip-currents".

III-2-3-5 COURANTS D'EXPANSION LATÉRALE :

La houle peut avoir des concentrations en certains points du fait de modification de la topographie et l'amplitude sera différente d'une zone à l'autre. Cette différence provoque un déplacement des masses d'eau de la zone de forte amplitude vers la zone où l'amplitude de la houle est la plus faible.

Schéma général des courants près de la côte

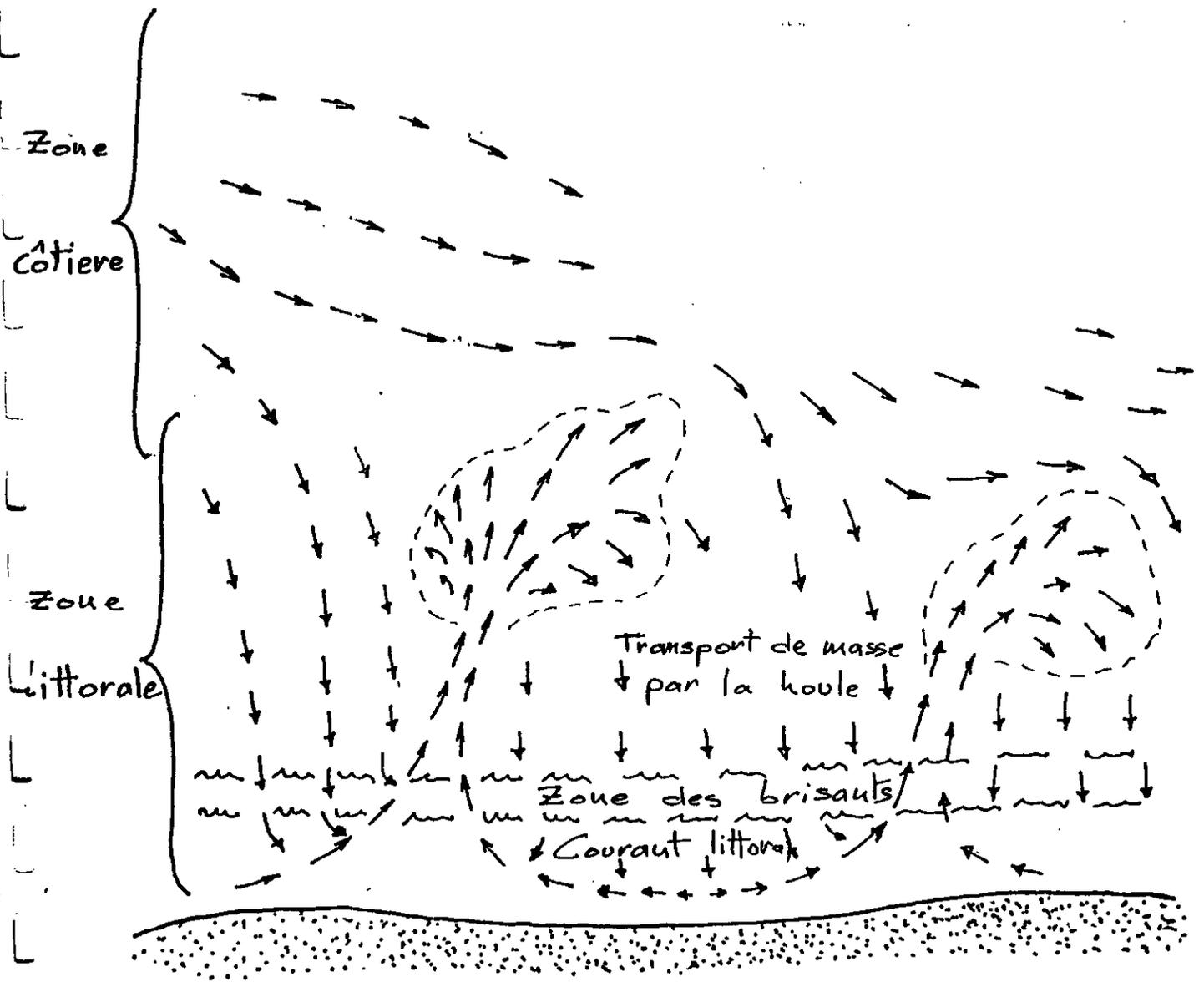


Fig. III. 2.3.4. a

Les vitesses dans ces courants sont à l'origine de certains colmatages des passes d'entrer portuaires.

III-2-4 MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES PERPENDICULAIRES

III-2-4-1 MISE EN OSCILLATION DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DES MOUVEMENTS ORBITAIRES

A- MATERIAUX NON COHESIFS

Pour les matériaux non cohesifs, la mise en mouvement aura lieu dès que les vitesses développées par la houle sur le fond deviennent supérieures à la vitesse critique d'entraînement.

Les mouvements orbitaires se propagent à l'intérieur de la masse sédimentaire provoquant ainsi des suspensions favorables à la mise en mouvement des sédiments.

L'épaisseur E de la couche des matériaux intéressés par les remaniements de la houle a été estimée à :

sur la plage : $E = 37 d - 0,58$ E en cm d en cm .
 entre les brisants et la côte $E = 0,03 hd$
 hd : étant l'amplitude de la houle déferlante en cm et E en cm également.

Plusieurs formules ont été proposées pour caractériser le début d'entraînement par la vitesse maximale U_{max} de la houle

sur le fond liée aux caractéristiques de la houle (période T) et des matériaux (diamètre, densité apparente relative, vitesse de chute W) et de l'eau. (viscosité ν , densité ρ) pour des régimes différents.

$$\text{BAGNOLE : } U_{oc} = 32,4 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{2/3} d^{0,493} T^{1/3} \quad \text{régime laminaire}$$

$$\text{BONNEFILLE-PERNECKER : } U_{oc} = 0,063 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{5/6} \nu^{-1/6} T^{1/2} d^{1/2}$$

régime laminaire

$$\text{MONAHAR : } U_{oc} = 7,45 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{0,4} \nu^{0,2} d^{0,2} \quad \text{régime turbulent}$$

$$\text{GODDET : } U_{oc} = 1,73 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{1/2} g^{1/2} d^{1/2} \quad \text{régime turbulent}$$

$$\text{RANCE ET WARREN : } U_{oc} = 1,05 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{4/7} T^{1/7} d^{3/7} \quad \text{régime turbulent}$$

les formules citées ci-dessus donnent des fois des résultats des écarts très nets.

On peut également caractériser le début d'oscillation des sédiments sur le fond sous l'action de la houle par la force tractrice.

Les matériaux seront entraînés si la force tractrice τ_0 développée par la houle devient supérieure à la force tractrice critique τ_c

$$\tau_c = 50(\rho_s - \rho) d g$$

et

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

avec :

- d : diamètre des grains en m ;
- g : accélération de la pesanteur ;
- ρ_s : masse volumique du matériau ;
- ρ : masse volumique de l'eau ;
- T : période de la houle ;
- τ et τ_c en N/m^2

On peut tirer la condition de début d'entraînement pour :

$$\gamma = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$U_{max}/T^{1/2} \geq 500d$$

PARAMETRES ADIMENSIONNELS :

$$d_* = \left(\frac{\rho_s g}{\gamma^2} \right)^{1/3} d \quad \text{diamètre sédimentologique}$$

$$R_{e*} = U_* \cdot d / \nu \quad \text{nombre de Reynolds étoilé}$$

La relation $d_* = F(R_{e*})$ donnée sous forme d'abaque représente la loi de début d'entraînement. (fig V.7.1.1.1)

$$0.3 < R_{e*} < 12 \quad : \quad d_* = 2.5 R_{e*}^{4/5}$$

$$R_{e*} > 12 \quad : \quad d_* = 3.8 R_{e*}^{5/8}$$

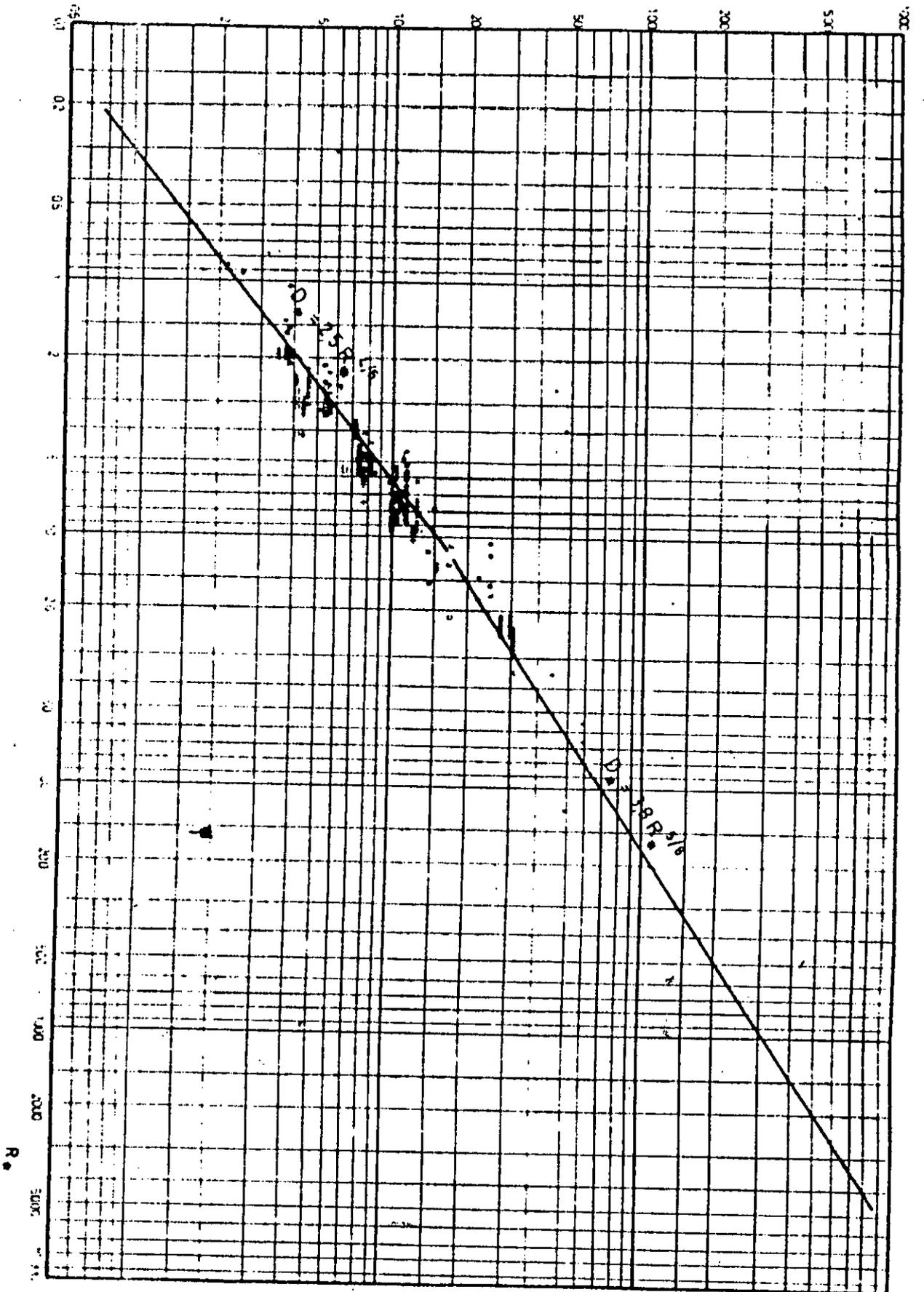


Fig. V.7.1.11 - Loi de début d'entraînement des sédiments

B-MATERIAUX COHESIFS :

Dans la masse de vase au fond et sous l'action de la houle, se développent des mouvements de translation des particules solides. La répartition des vitesses le long d'une verticale (fig III-2-4-1a) montre l'existence d'un gradient de dans la masse des vases en fonction de la profondeur.

La vitesse de déplacement des vases décroît très rapidement avec la profondeur.

La vitesse est d'autant plus grande que la viscosité de la vase est plus faible et la houle forte.

Le débit solide entraîné par les mouvements de translation des vases est inversement proportionnel à la viscosité des vases.

La vitesse de déplacement en surface peut s'exprimer en fonction de la vitesse théorique dans la couche limitée comme.

$$U_v = 0,25 U_{cl} \dots\dots\dots (V-7-2-2-1)$$

avec

$$U_{cl} = 0,18 U_o^{1,6} H^{-0,6} \text{ en unités cgs.}$$

Il faut noter que la remise en suspension s'effectue dans la zone de turbulence près de la zone de déferlement où les sédiments peuvent être entraînés par les courants littoraux. Au large de cette zone, les matériaux sont transportés dans la couche limite laminaire près du fond.

III-2-5 MOUVEMENTS DES SEDIMENTS PARALLELEMENTS AU RIVAGE :

Les houles obliques provoquent un transport de matériaux parallèlement au rivage dans le sens de propagation de houle : "c'est le transport littoral".

le transport littoral est divisé en deux types suivant que l'on a une houle forte ou faible.

Le premier type, s'effectue principalement en suspension sous l'action des houles fortes et intéresse des volumes de matériaux importants.

Le deuxième correspond au transit mixte en "dent de scie"

Deplacement d'une vase fluide ou plastique sous l'action de la houle.

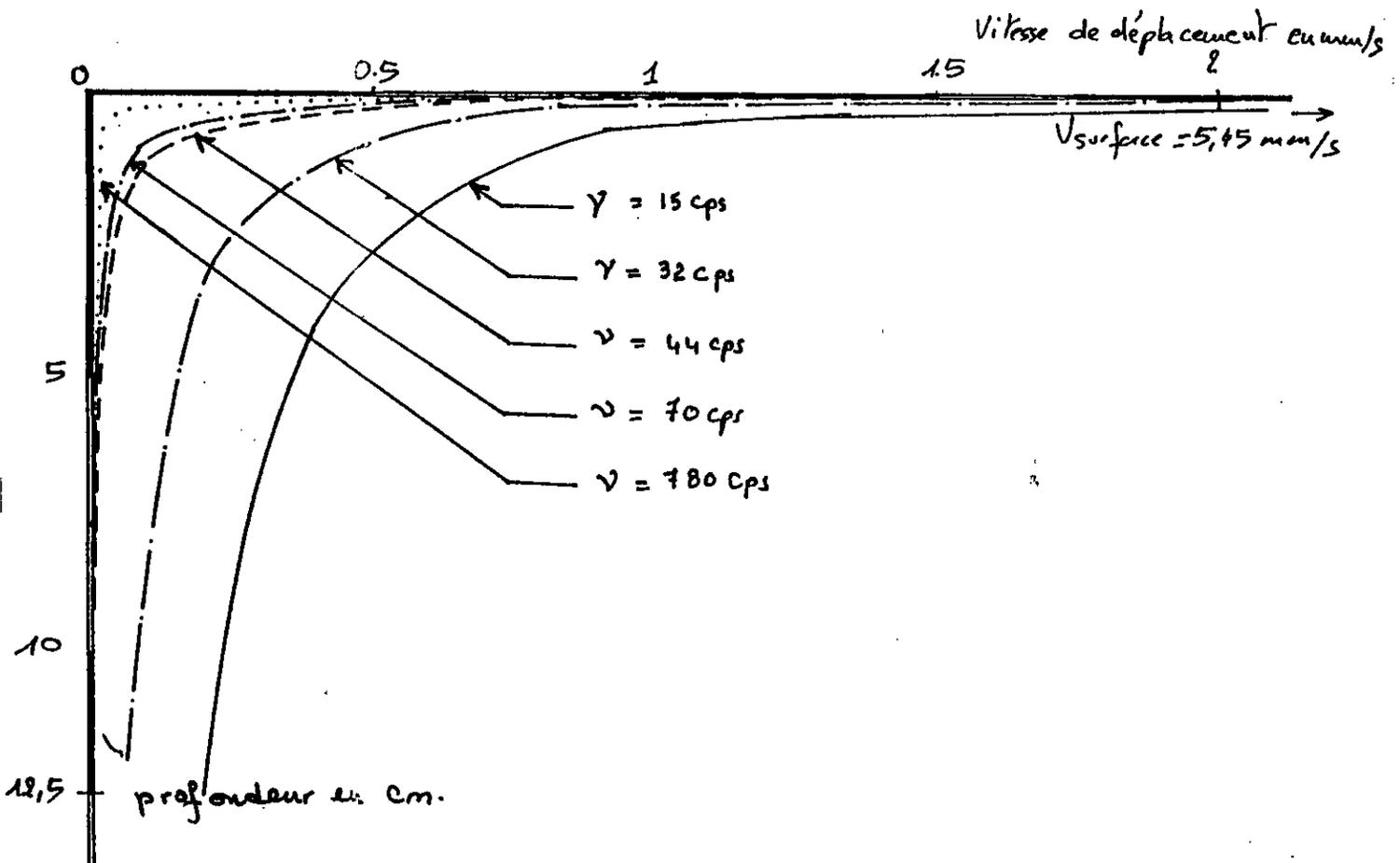
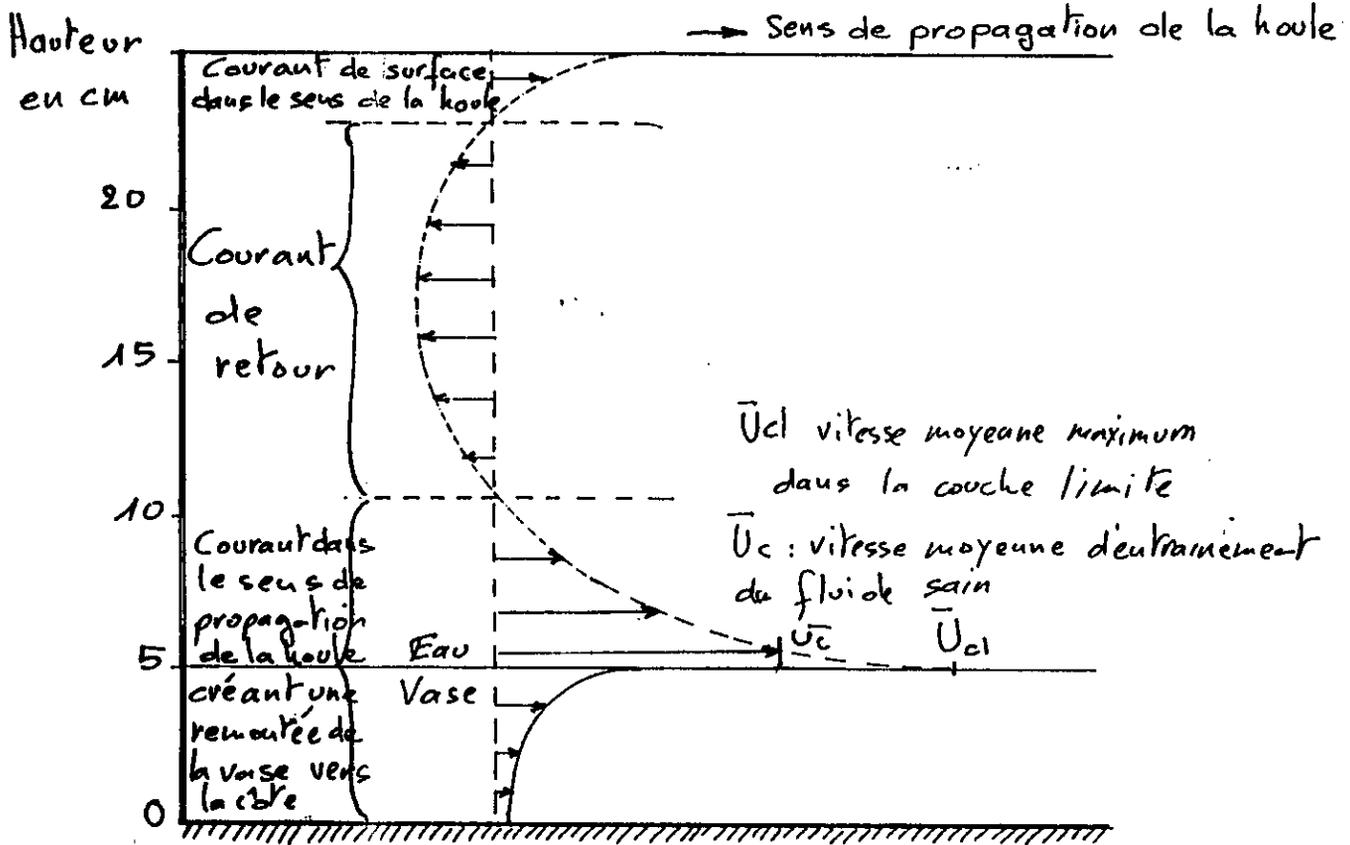


Fig. III-2-4-1a

Le deuxième correspond au transit mixte en "dent de scie" sur la plage et dans le rouleau de déferlement en bas de la côte et le volume intéressé dans ce cas est faible.

La plus grande partie du transport en suspension s'effectue dans la zone des barres de fonds de -6 à -7 m.

III-2-6 TRANSPORT PAR JET DE RIVE :

Les lames des houles obliques déferlantes, arrachent du fond les matériaux et les projettent vers la rive dans le sens de propagation de la houle. La descente de l'eau vers le bas de la côte suivant la ligne de la plus grande pente.

Il en résulte un déplacement des matériaux "dent de scie" qui ont une composante de déplacement parallèle à la côte dans le même sens de propagation de la houle. (Fig III 2.1.C)

Le transport par jet de rive, ne représente qu'une faible partie du transport total dû à la houle.

III-2-7 - TRANSPORT AU VOISINAGE DU DEFERLEMENT :

Dans la zone du déferlement où l'énergie des houles est concentrée et turbidité forte, les sédiments sont remis en suspension et brassés par les vagues. Leur transport s'effectue principalement dans le premier tiers de la distance entre les brisants et la côte. (Fig III 2 7 a).

De plus, le déferlement des lames obliques entraîne un déplacement d'eau parallèle à la côte dans le même sens que la propagation de la houle. Ces courants (long shunt current), entraînent des matériaux qui se déplacent suivant des trajectoires hélicoïdale d'axe parallèle ou litorale.

Ce transport s'effectue en quantité très importante en suspension et en charriage.

On note que la vitesse de ces courants est maximale pour une obliquité de la houle de 45° et 60°. Et la grande partie des transports littoraux s'effectue au voisinage du déferlement.

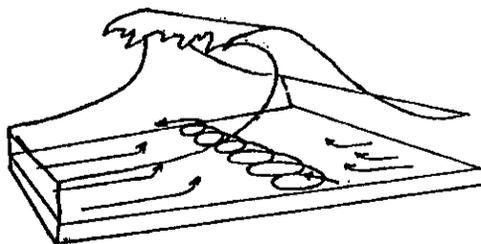


Fig III. 2.7. a Schéma du mouvement des grains dans les brisants

III-3 COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION COMBINÉE DES COURANTS ET DES HOULES :

Jusqu'ici, on a étudié l'action des houles et des courants separament.

Dans ce qui suit, nous étudierons en bref le comportement des sediments sous l'action combinée de la houle et du courant, en donnant quelques formules proposées pour le calcul du transport solide. La methode de calcul est compliquée par rapport à celle qu'on a utilisée jusqu'ici. Et les formules du transport solide s'expriment differament suivant ce que l'on utilise, la première ou la deuxième méthode.

Nous nous limiterons à un exemple sur l'utilisation de la deuxième méthode (action combinée) en donnant la procédure de calcul.

III-3-1 CALCUL DU TRANSPORT LITORALE :

III-3-1-1 Transport par charriage:

Pour le calcul du transport par charriage, la formule proposée par Frij link peut s'ecrire :

$$Q_{sc} = 5d (\mu \tau / \rho)^{1/2} \exp(-0.27 \rho' d \frac{\rho g}{\mu \tau}) \dots (III-3-1-11)$$

expression dans laquelle q_{sc} = transport solide en $m^3/m/s$

d = diametre des grains en m; ρ' = densité relative apparente;
 ρ = densité du fluide en kg/m^3 ; g = acceleration de la pesanteur en m^2 par seconde; μ = coefficient des rides indiquant qu'une partie de la contrainte totale de cisaillement du fond est disponible pour transporter les sediments;
 τ = contrainte du frottement du fond en N/m^2 .

CRITIQUE ET AMELIORATION DE LA FORMULE DE FRIJLINK

La formule de Frijlink ne fait pas intervenir la contrainte critique au fond de plus, le terme $q_{sc} / \left[D \left(\mu \frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} \right]$ oscille entre 1 et 10^{-4} . De ce fait la formule donne de mauvais resultats.

Les résultats des différents essais (tests) effectués sur l'action du courant seul d'une part et d'autre parts sur l'action combinée du courant et de la houle, montrent que les grandes valeurs du terme $\rho' d \rho g / \mu \tau$ sont dues à la houle, mais elles ne provoquent une variation appréciable du transport solide.

Ceci s'explique par le fait que le matériau du fond est soulevé par la houle et enlevé par le courant.

Dans la formule de Frijlink :

$$\frac{q_{sc}}{d \left(\mu \frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2}} = b \exp \left(a \frac{\rho' d \rho g}{\mu \tau} \right) \quad \dots \text{(III-3-1-12)}$$

$d \left(\mu \frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2}$ est le facteur qui régie le transport du matériau

arraché du fond dans la direction du courant.

τ est remplacé par τ_c du courant en introduisant la vitesse du courant

$$V = C \sqrt{h i} \text{ on trouve } d \left(\mu \frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} = d v (\mu g)^{1/2} / c,$$

c = Coefficient de Chezy.

Le terme $q_{sc} / \left[d \left(\mu \frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} \right]$ est appelé "paramètre de

transport" dans lequel la contrainte de frottement doit être celle dans la direction du courant.

La valeur $\exp \left(a \frac{\rho' d \rho g}{\mu \tau} \right)$ est le paramètre déterminant la quantité de matériau arrachés, cependant ce terme est appelé "paramètre d'arrachement" et la contrainte de frottement, dans ce cas doit être la contrainte résultante.

Bijker, en examinant la formule proposée par Frijlink "que la contrainte résultante de l'action, combinée de la houle et du courant est" :

$$\tau_r = \left[1 + \frac{(\xi U_{max}/V)^2}{2} \right] \tau_c \quad \text{III-3-1-13}$$

τ_r = contrainte de frottement résultante;

τ_c = contrainte de frottement dû au courant seul;

U_{max} = vitesse orbitale maximale.

ξ = un coefficient à déterminer expérimentalement ou théoriquement. ξ est lié au coefficient de Chezy C par la relation :

$$\xi = 0.45 \frac{k c}{g^{1/2}} = 0.0575, \text{ avec } k = \text{constante de Von karman} = 0.4$$

V = vitesse moyenne du courant.

Le terme $5d \left(\frac{\mu \tau}{\rho} \right)^{1/2}$ représente le transport solide par le courant, si on remplace τ par $\tau_c = \rho g v^2 / c^2$

Le vecteur vitesse change de valeur et de direction, mais la vitesse moyenne résultante peut rester égale à la vitesse originale du courant, bien que les fluctuations de ce vecteur remuent fortement les matériaux de fond et de transport, s'intensifie de plus en plus. Ce fait est exprimé dans le terme en exp de l'équation (VI 111) en remplaçant τ par τ_r .

Enfin la formule du transport par charriage sous l'action combinée des houles et des courants peut être mise sous la forme :

$$q_{sc} = 5d \frac{V}{C} (\mu g)^{1/2} \exp \left[0.27 \frac{\rho' d c^2}{\mu V^2} \left[1 + \frac{(\xi U_{max}/V)^2}{2} \right]^{-1} \right] \quad \text{III-3-1-14}$$

Si on oublie le coefficient de rides μ dans le facteur de transport on aura :

$$q_{sc} = 5 d \frac{V}{C} g^{1/2} \exp \left\{ - 0.27 \frac{\rho' d c^2}{\mu V^2} \left[1 + \frac{\xi U_{max}/V}{2} \right]^{-1} \right\}$$

III-3-1-2 TRANSPORT EN SUSPENSION

Si on appelle $\bar{C}(y)$ la concentration moyenne à une hauteur y du fond, on aura :

- Le transport vers le haut de matières en suspension est :

$$- D_c \frac{d \bar{C}(y)}{d y}$$

où D_c représente le coefficient de diffusion.

- Le transport vers le bas est :

$$\bar{C}(y) W$$

où W est la vitesse de chute en eau calme, puisqu'il y a régime permanent en suspension, ces deux quantités doivent être égales donc :

$$\bar{C}(y) W + D_c \frac{d \bar{C}(y)}{d y} = 0$$

Supposons que le coefficient de diffusion des particules solides est égale au coefficient de diffusion de quantités de mouvement, on obtient :

$$D_c = K U_* y \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

où K = constante de Von Karman (0.4)

h = la profondeur totale de l'eau.

En integrant l'equation differentielle, on obtient la formule dite de Rouse :

$$\frac{\overline{C}(y)}{C_a} = \left[\left(\frac{h-y}{y} \right) \left(\frac{a}{h-a} \right) \right]^Z$$

avec :

$$Z = W / KU_*$$

C = la concentration mesurée à une distance a au dessus du fond.

a est estimé à 0.40m à partir des mesures faites en modèle réduit.

On deduit immédiatement le débit de materiau en suspension

$$q_{ss} = \int_y^h \overline{C}(y) U(y) dy$$

U(y) étant la vitesse moyenne à la distance y du fond.

Il est également possible d'estimer le transport en suspension par la formule proposée par Einstein en faisant recours au transport par charriage.

$$q_{ss} = q_{sc} \left(I_1 \ln 33h/r + I_2 \right)$$

avec h = profondeur de l'eau;

r = rugosité du fond;

I₁ et I₂ = des integrales.

$$I_1 = 0.216 \frac{(a/h)^{z-1}}{(1-a/h)^z} \int_{a/h}^1 \left(\frac{1-y/h}{y/h} \right)^z d(y/h)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{(a/h)^{z-1}}{(1-a/h)^z} \int_{a/h}^1 \left(\frac{1-y/h}{y/h} \right)^z \ln y/h d(y/h)$$

Bien que Einstein a donné un graphe pour les integrales I₁ et I₂, le calcul est assez laborieux et il est preferable d'utiliser un outil informatique.

CHAPITRE IV MODELISATION HYDRAULIQUE ET SEDIMENTOLOGIQUE

IV-1 INTRODUCTION :

Pour l'étude des phénomènes liés d'une part aux actions des mouvements de la mer sur les ouvrages maritime et d'autre aux interaction entre ces mouvements et les matériaux tapissant le fond, deux groupes de modèles sont utilisés :

- Modèles purement hydrauliques ou modèles à fond fixe :

Ces modèles servent à étudier des phénomènes hydrauliques relatifs aux écoulements des liquides à l'exclusion de tout transport solide.

- Modèles sédimentologiques ou modèles à fond mobile :

Au contraire ces modèles sont utilisés dans les études, des modifications de fonds dûs au transport de sédiments.

En hydrologie maritime et pour de nombreux cas les phénomènes à étudier présentent des dimensions transversales très grandes par rapport à celles des profondeurs, et la représentation géométrique fidèle des formes du prototype sur le modèle conduit souvent à avoir dans ce dernier des phénomènes parasites non existant ou négligés en nature tel que : La cohésion, la tension superficielle...de plus une grande précision des appareils de mesure sera exigée.

Ainsi on est conduit à réaliser des modèles distordus. Un modèle est dit distordu si l'échelle des profondeurs (λ_h) et celle des longueurs (λ_e) ne sont pas égales et le rapport $\lambda_h/\lambda_e = \Delta$ est appelé "distorsion".

IV-2 SIMILITUDE HYDRAULIQUE

- Types de similitude :

IV-2-1 Similitude géométrique :

Le modèle est dit géométriquement semblable au prototype, si les dimensions linéaires homologues du modèle (l_m) et du prototype (l_p) sont dans un rapport (λ) constant.

$$\lambda = \frac{l_m}{l_p} \quad \dots\dots\dots\text{IV-2-1}$$

IV-2-2 Similitude cinématique :

Les mouvements dans le modèle et dans le prototype sont cinématiquement semblables, si les vitesses et les accélérations sont dans un rapport constant en tous les points homologues.

Soient :

t_p : temps de parcours d'une distance l_p dans le prototype

t_m : temps de parcours d'une distance l_m dans le modèle

λ : l'échelle des longueurs $\lambda = l_p / l_m$

λ_t : l'échelle des temps $\lambda_t = t_p / t_m$

λ_v : l'échelle des vitesses $\lambda_v = V_p / V_m$

$\lambda_{\frac{y}{O}}$: l'échelle des accélérations $\lambda_{\frac{y}{O}} = \frac{y_p}{y_m} / \frac{O_p}{O_m}$

L'échelle des vitesses λ_v est lié à λ et λ_t . En effet les relations $V_p = l_p / t_p$ et $V_m = l_m / t_m$ conduisent à :

$$\lambda_v = \lambda \lambda_t^{-1} \dots \dots \dots \text{IV-2-2}$$

De même pour les accélérations :

$$\frac{y_p}{O_p} = \frac{1}{t_p^2} \quad ; \quad \frac{y_m}{O_m} = \frac{1}{t_m^2}$$

et : $\lambda_{\frac{y}{O}} = \lambda \lambda_t^{-2} \dots \dots \dots \text{IV-2-3}$

On voit donc que le choix de λ_t impose celui de λ_v et de $\lambda_{\frac{y}{O}}$ et de $\lambda_v = \lambda / \lambda_t^2$

IV-2-3 Similitude dynamique :

Pour que les deux systèmes (modèle et prototype) en mouvement sous l'action de deux système de forces, soient dynamiquement semblable, il est nécessaire que toutes les forces agissant en des points homologues soient dans le même rapport.

Les principales forces intervenant en hydrolique sont :

- Les forces d'inertie;
- Les forces de turbulence;
- Les forces de pesanteur;
- Les forces de viscosité;
- Les forces de capillarité.

* Les forces de capillarité : n'intervient pas dans le cadre de notre étude, seules sont considérées :
les forces d'inertie (f_i) :

La force d'inertie agissant sur une particule de masse m animée d'une vitesse v et d'une accélération \ddot{O} , a pour expression :

$$f_i = m \ddot{O}$$

Pour le prototype : $f_{ip} = m_p \ddot{O}_p$

Pour le modèle : $f_{im} = m_m \ddot{O}_m$

d'où $\lambda_{fi} = \lambda_m \lambda_{v_0}$ avec $\lambda_{fi} = f_{im}/f_{ip}$; $\lambda_m = m_m/m_p$ et $\lambda_{v_0} = \ddot{O}_m/\ddot{O}_p$

et comme $\lambda_m = \lambda_{\rho} \lambda^3$ par définition et $\lambda_{v_0} = \lambda \lambda_t^{-2}$ On peut écrire :

$$\lambda_{fi} = \lambda_{\rho} \lambda^4 \lambda_t^{-2} \dots \dots \dots \text{IV-2-4}$$

*** Les forces de turbulence (f_t)**

Ce sont les forces tangentielles appliquées à la masse m placée au sein d'un écoulement turbulent.

$$f_t = \rho s \overline{\mu' V'}$$

avec : ρ = masse volumique du liquide;

s = surface à laquelle la force f_t est appliquée;

$\overline{\mu' V'}$ = moyenne du produit des fluctuations de la vitesse instantanée.

Pour le prototype : $f_{tp} = \rho_p s_p \overline{\mu'_p V'_p} = \rho_p l_p^4 t_p^{-2}$

Pour le modèle : $f_{tm} = \rho_m s_m \overline{\mu'_m V'_m} = \rho_m l_m^4 t_m^{-2}$

d'où :

$$\lambda_{ft} = \lambda_{\rho} \lambda^4 \lambda_t^{-2} \dots \dots \dots \text{IV-2-5}$$

On constate que $\lambda_{ft} = \lambda_{fi}$

*** Les forces de pesanteur (f_p)**

On sait que $f_p = m g$ et le rapport des forces de pesanteur est :

$\lambda_{fp} = \lambda_m \lambda_g$. En remplaçant λ_m par $\lambda_{\rho} \lambda^3$ on trouve :

$$\lambda_{fp} = \lambda_{\rho} \lambda^3 \lambda_g \dots \dots \dots \text{IV-2-6}$$

• Les forces de viscosité (f_v)

Ces forces sont tangentielles et s'exercent sur chaque surface s de la masse m en contact avec une couche voisine de vitesse différente.

$$f_v = \mu s \frac{d v}{d n}$$

μ = coefficient de viscosité dynamique
 $d v/d n$ = gradient de vitesse le long de la normale n à la surface s .

Le rapport des forces de viscosité sera donc:

$$\lambda_{fv} = \frac{\lambda}{\mu} \lambda^2 \lambda_v \lambda^{-1}$$

où :

$$\lambda_{fv} = \frac{\lambda}{\mu} \lambda^2 \lambda_l^{-1} \dots \dots \dots \text{IV-2-7}$$

IV-3 PRINCIPALES LOIS DE SIMILITUDE :

IV-3-1 Les forces de viscosité sont négligeable par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur.

- Similitude de Froude -

La similitude de deux systèmes sera réalisée si les échelles λ_{fi} , λ_{ft} et λ_{fp} sont les mêmes:

$$\lambda_{fi} = \lambda_{ft} = \lambda_{fp}$$

Compte tenu de ce que $\lambda_{ft} = \lambda_{ft}$, la condition se résume à :

$$\lambda_{fi} = \lambda_{fp} \quad \text{c'est à dire} \quad \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda^3 \lambda_g$$

d'où :

$$\lambda \lambda_t^{-2} = \lambda_g \quad \text{c'est la condition de Froude}$$

Il est pratiquement impossible de faire varier g , donc $\lambda_g = 1$ ce qui conduit à :

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad \dots \dots \dots \text{IV-3-1}$$

Cette relation est connue sous le nom de "Lois de similitude de Froude" qu'on peut exprimer autrement .

$$\frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{l_m}{l_p}} = \sqrt{\frac{l_m g}{l_p g}} \quad \text{ou} \quad \frac{V_m}{\sqrt{g l_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g l_p}} = F$$

En combinant les différentes similitudes, on peut établir les rapports de toutes les grandeurs physiques.

grandeurs	echelle
vitesse	$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$
temps	$\lambda_t = \sqrt{\lambda}$
débits	$\lambda_q = \lambda^{5/2}$
accelerations	$\lambda_{\frac{v}{t}} = \lambda^{-2} \lambda = 1$
forces	$\lambda_f = \lambda_p \lambda^3$
pression	$\lambda_p = \lambda_p \lambda$
penetration	$\lambda_l = 1$

Tableau IV-3-a
echelle de différentes grandeurs.

La similitude de Froude s'applique en toute rigueur aux écoulements des fluides parfaits ($\nu = 0$) et aux fluides réels elle s'applique avec une bonne approximation en régime turbulent rugueux.

IV.3.2 Similitude de Reynolds

En tenant compte de (IV-2-4) et (IV-2-7)

$$\lambda_p \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda_\mu \lambda^2 \lambda_t^{-1}$$

ou :

$$\frac{\lambda_\mu}{\lambda_s} = \lambda^2 \lambda_t^{-1} = \lambda \lambda_v$$

$\lambda_\mu / \lambda_p = \lambda = \frac{\lambda_v}{\lambda \lambda_v}$ = échelle des coefficients de viscosité cinématique.

En définitive : $\frac{\lambda_\mu}{\lambda_p} = 1$ c'est la condition de Reynolds, qu'on peut exprimer sous une autre forme:

$$\frac{L_m}{L_p} \frac{V_m}{V_p} \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = 1$$

$$\frac{L_m}{\gamma_m} = \frac{L_p}{\gamma_p} = R_e = \text{cte}$$

La similitude de Reynolds s'applique en toute rigueur aux écoulements pour lesquels les forces de pesanteur sont nulles.

IV-4 INCOMPATIBILITE DE DEUX SIMILITUDES DE FROUDE ET DE REYNOLDS

Si on veut réaliser un modèle sans négliger les forces de viscosité ni les forces de pesanteur, on doit satisfaire simultanément la condition de Froude et celle de Reynolds.

Ces deux conditions imposent respectivement :

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$$

$$\lambda_v = \lambda_{\gamma} \cdot \lambda^{-1}$$

Ce qui donne $\lambda^{3/2} = \lambda_{\gamma}$

Or dans la pratique, il est très difficile de faire varier γ , et le plus souvent, on utilise le même liquide (eau) dans le modèle et en nature C.A.D, $\lambda_{\gamma} = 1$ ce qui entraîne $\lambda = 1$ d'où l'incompatibilité.

En pratique, cette incompatibilité peut être surmontée en s'assurant que le régime d'écoulement est turbulent, rugueux à la fin sur le modèle et sur le prototype sans qu'il soit nécessaire d'avoir l'égalité des deux nombres de Reynolds.

IV.4 * SIMILITUDE SEDIMENTOLOGIQUE

Pour la similitude sédimentologique, en plus des lois de similitude hydraulique, on doit respecter les lois concernant la similitude de l'évolution et de la déformation des fonds. Lorsqu'on réalise un modèle sédimentologique, il faut que :

- le début d'entraînement des sédiments survienne en des points homologues pour des conditions hydrauliques homologues, cela revient à satisfaire la condition :

$$\lambda_{\tau_0} = \lambda_{\tau_c} \text{ en tout point du modèle.}$$

(τ_0 étant la force tractrice sur le fond et τ_c sa valeur critique)

- l'échelle des débits solides soit connue.

Dans tout phénomène sédimentologique on a l'intervention simultanée du fluide, des granulates et de l'écoulement.

Le fluide est entièrement défini par sa masse volumique ρ et sa viscosité μ , les granulats sont définis par leur masse volumique ρ_s et leur diamètre d et l'écoulement est défini par le tirant d'eau h , la pente du fond I et l'accélération g .

Par conséquent, toute grandeur A quantifiant le phénomène de sédimentologie doit être fonction d'au plus sept paramètres :

$$\rho, \mu, \rho_s, d, h, I, g$$

En introduisant les paramètres $\mu_* = \sqrt{ghI}$ et $\gamma_s = g(\rho_s - \rho)$, le système devient :

$$\rho, \mu, d, h, \mu_*, \gamma_s$$

D'après l'analyse dimensionnelle, à partir de sept grandeurs on obtient quatre nombres adimensionnels X, Y, Z, W et toute grandeur (A) du phénomène arrangée dans une forme adimensionnelle peut être écrite comme une fonction des quatre paramètres, par exemple :

$$\Pi_A = f(X, Y, Z, W)$$

où X, Y, Z et W sont tels qu'ils sont définis dans le tableau (IV-4-a) et Π_A est un autre paramètre adimensionnel mettant en jeu une variable dépendante, par exemple : le débit du transport solide des sédiments.

Symbole	X	Y	Z	W
Formule	$\frac{U_* d}{\nu}$	$\frac{\rho U_*^2}{\gamma_s d}$	$\frac{h}{d}$	$\frac{\rho_s}{\rho}$
Appellation	Reynolds étoilé	Paramètre de Shields	Profondeur par diamètre	Densité relative
Signification Physique	Effets de viscosité	Effets de pesanteur et de densité	Echelle de turbulence	Effet d'accélération
Relation avec le mode de transport des sédiments	Début du mouvement du fond		Suspension	Saltation

Tableau IV-4-a définition des paramètres X, Y, Z et W

Suivant que l'on a une turbulence complète ou incomplète au tour des grains, la condition de début d'entraînement $\lambda_{TO} = \lambda_{Tc}$ s'expriment :

- si la turbulence est complète c'est à dire que les effets de viscosité sont négligeables, X n'intervient donc pas et on aura seulement à satisfaire $Y_{\text{modèle}} = Y_{\text{prototype}} \Rightarrow \lambda = 1$

ou
$$\lambda_p^2 \lambda_{U^*} = \lambda_{O_s} \lambda_d \dots\dots\dots IV-4-1$$

Comme $U_* = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/2}$ on aura $\lambda_{U^*} = \lambda_g^{1/2} \lambda_h^{-1/2} \lambda_l$

Remplaçons dans (IV-4-1) on trouve ($\lambda_p = \lambda_g = 1$) :

$$\lambda_h^2 \lambda_l^{-1} = \lambda_{O_s} \lambda_d \dots\dots\dots IV-4-2$$

Pour un modèle non distordu

$$\lambda_h = \lambda_l = \lambda_{O_s} \lambda_d$$

- Si la turbulence est incomplète

Dans ce cas on aura simultanément :

$$\lambda_x = \frac{X_{\text{modèle}}}{X_{\text{prototype}}} = 1, \lambda_y = \frac{Y_{\text{modèle}}}{Y_{\text{prototype}}} = 1$$

Aucune force (force de viscosité et force de pesanteur) ne l'emporte sur l'autre.

La condition $\lambda_x = 1$ donne $\lambda_{U^*} \lambda_d = \lambda_\gamma$ et comme

$$\lambda_{U^*} = \lambda_g^{1/2} \lambda_h^{-1/2} \lambda_l$$

$$\lambda_g^{1/2} \lambda_h^{-1/2} \lambda_l \lambda_d = \lambda_\gamma \dots\dots\dots IV-4-3$$

La condition $\lambda_\gamma = 1$ donne :

$$\lambda_p \lambda_g \lambda_h^2 \lambda_l^{-1} = \lambda_{O_s} \lambda_d \dots\dots\dots IV-4-4$$

En combinant les deux conditions, on trouve :

$$\lambda_{O_s} \lambda_d^3 = \lambda_p \lambda_\gamma^2 \dots\dots\dots IV-4-5$$

Si on utilise sur le modèle le même fluide que sur le prototype, la relation () s'écrira :

$$\lambda_d^3 \lambda_{O_s} = 1 \dots\dots\dots IV-4-6$$

Pour un modèle distordu : $\Delta = \frac{\lambda}{\lambda_1} h$ dif de 1 et pour un même fluide,

la relation (IV-4) se résume à :

$$\Delta = \frac{1}{\lambda_d \lambda_l^{1/2}} \dots \dots \dots \text{IV-4-7}$$

Pour des raisons de facilité d'approvisionnement et de prix, la gamme de ρ_s n'est pas infinie et on est amené souvent à distordre le matériau du fond et son poids spécifique.

Voici quelque catégories de matériaux utilisés:

Styvarène	$\rho_s = 1.04$	$\lambda_{\frac{v}{Os}} = \frac{\rho_s - \rho}{2.65 - \rho_s} \# \frac{1}{40}$
Pléxiglas	$\rho_s = 1.18$	$\lambda_{\frac{v}{Os}} \# \frac{1}{9}$
Bakelite	$\rho_s = 1.40$	$\lambda_{\frac{v}{Os}} \# \frac{1}{4}$
Sable	$\rho_s = 2.65$	$\lambda_{\frac{v}{Os}} \# 1$

En turbulence complète avec le modèle non distordu

$$\lambda_h = \lambda_l = \lambda_{\frac{v}{Os}} \cdot \lambda_d, \text{ l'utilisation du même matériau de}$$

fond ($\lambda_{\frac{v}{Os}} = 1$), conduit à :

$$\lambda_d = \lambda_l$$

Mais cela conduit à des diamètres très petits, ce qui engendre des phénomènes sur le modèle inexistant dans le prototype et la condition :

$$\left[\frac{g (\rho_s - \rho)}{\nu^2} \right]^{1/3} d > 15 \Rightarrow d > 0.6 \text{ mm}$$

nécessaire pour éviter la formation des rides, ne sera pas satisfaite.

Donc, cette réduction de d ne doit pas conduire à des diamètres inférieurs à 0,6 mm, si non, il ne reste qu'à choisir un matériau plus léger ($\lambda_{Os} < 1$)

Une fois choisis λ_{Os} et λ_d , les autres échelles sont

théoriquement résolus.

Echelle des débits solides :

D'après l'analyse dimensionnelle, tout écoulement bidimensionnel peut être entièrement défini par les quatre paramètres X, Y, Z et W vus précédemment.

Ainsi, la formule de MEYER-PETER et MULLER :

$$g_s = A (\tau_0 - \tau_c)^{3/2} \quad \text{avec } A = 8 \left(\frac{g}{\gamma} \right)^{1/2} \frac{\gamma_{Os}}{\gamma_{Os} - \gamma}$$

g_s = débit solide en poids par unité de largeur

peut s'écrire :

$$g_s = 8 \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \sqrt{1/\gamma} (\tau_0 - 0.047 \gamma_s d)^{3/2}$$

soit encore $\frac{g_s}{\gamma U_*^3} = \frac{8}{1 - \gamma/\gamma_s} (1 - 0.047/\gamma)^{3/2} \dots \dots \dots \text{IV-4-8}$

$$Y = \gamma \frac{U_*^2}{\gamma_{Os} d}, \quad W = \frac{\gamma_s}{\gamma}$$

$$\frac{g_s}{\gamma U_*^3} = f(W, Y) \dots \dots \dots \text{IV-4-9}$$

l'échelle des débits

$$\frac{g_s}{\rho u_*^3} = \frac{\theta W}{W-1} F(Y)$$

Etant donné que $Y_m = Y_p$

$$\frac{\lambda_{gs}}{\lambda_p^3 \lambda_{u*}^3} = \frac{\lambda_{gs}}{\lambda_{\gamma_s}} ; \lambda_p = 1$$

Donc

$$\lambda_{gs} = \frac{\lambda_p^3 \lambda_h^3}{\lambda_{\gamma_s} \lambda_l^3} \dots$$

Débit volumique :

On a $Q = \frac{g_s}{\rho_s}$

$$\lambda_Q = \frac{\lambda_h^3}{\lambda \lambda_l^3} \dots$$

Echelle des temps sédimentologiques

$$Q = \frac{V_s}{t} \text{ et } V_s = C \cdot V_{tot} \quad C \text{ étant la compacité}$$

$$Q = \frac{C \cdot V_{tot}}{t} \text{ ou } t = \frac{C \cdot V_{tot}}{Q_s} \quad \lambda_t = \lambda_c^{-2} \lambda_h^{7/2} \lambda_p \lambda_l$$

Echelle de la vitesse orbitale:

La vitesse orbitale U d'une houle sinusoidale en première approximation peut s'écrire :

$$U = \frac{\sigma H c h k y}{2 s h k h} \cos(\sigma t - kx)$$

d'où :

$$\lambda_U = \lambda_\sigma \cdot \lambda_H \cdot \lambda_{chky} / \lambda_{shkh}$$

Avec :

- $\sigma = 2\pi / T$;
- T = la période de la houle ;
- H = l'amplitude de la houle ;
- K = $2\pi / L$;
- L = la longueur d'onde ;
- h = la profondeur d'eau ;
- y = une profondeur donnée ;

λ_U aura une valeur constante sur tout le modèle , si les valeurs de λ_{chky} et λ_{shkh} sont constantes et ceci n'est possible

que lorsque les valeurs ky et kh sont égales pour le modèle et le prototype et par conséquent :

$$\lambda_H = \lambda_h \dots\dots\dots (IV.4.11)$$

L'Echelle des hauteurs des vagues = l'echelle des profondeur d'eau.

$$\lambda_U = \lambda_\sigma \cdot \lambda_H$$

Avec : $\sigma = 2\pi / T$ ou $\lambda_\sigma = 1 / \lambda_T$

$$\lambda_U = \lambda_H / \lambda_T \dots\dots\dots (IV.4.12)$$

L'échelle des périodes peut être déterminé à partir de la relation :

$$L = C_* \cdot T, \quad C_* \text{ étant la célérité de l'onde}$$

$$\lambda_L = \lambda_{C_*} \cdot \lambda_T$$

En théorie de 1^{er} ordre, la célérité C_* aura pour expression :

$$C_* = \left(\frac{g}{k} \operatorname{th} kh \right)^{1/2} \quad \text{et par conséquent}$$

$$\lambda_{C_*} = \left[\lambda_g \cdot \lambda_L \cdot \lambda_{\operatorname{th} kh} \right]^{1/2} \quad \text{et comme } \lambda_{\operatorname{th} kh} \text{ doit}$$

être égal à 1 pour avoir λ_{C_*} constant.

$$\lambda_{C_*} = \lambda_L^{1/2} \quad \dots \dots \dots (\text{IV.4.13})$$

compte tenu de ce que $\lambda_L = \lambda_{C_*} \cdot \lambda_T$, on trouve que :

$$\lambda_T = \lambda_L^{1/2} \quad \dots \dots \dots (\text{IV.4.14})$$

et
$$\lambda_U = \lambda_H \cdot \lambda_L^{-1/2} \quad \dots \dots \dots (\text{IV.4.15})$$

Dans le cas de l'action combinée de lahoule et du courant de vitesse V donnée avec

$$V = C (R.I)^{1/2}$$

C = coefficient de Chezy;

I = pente du fond.

La contrainte du fond τ s'exprime comme suit :

$$\tau = \rho g h I = \rho U_*^2, \quad h \text{ étant la profondeur d'eau.}$$

pour une largeur infinie, le rayon hydraulique R peut être assimilé à h, on obtient tout calcul fait :

$$U_* = V \cdot g^{1/2} / C$$

et $\lambda_T = \lambda_{\mathcal{F}} \cdot \lambda_{U_*}^2$ ce qui donne

$$\lambda_T = (\lambda_v \lambda_g^{1/2} / \lambda_c)^2 \cdot \lambda_{\mathcal{F}}, \text{ si } \lambda_{\mathcal{F}} = \lambda_g = 1, \text{ il vient}$$

$$\lambda_T = (\lambda_v / \lambda_c)^2 \dots \dots \dots (IV.4.16)$$

Et à partir de l'expression $\tau = \mathcal{F} g h$, on peut avoir :

$$\lambda_T = \lambda_{\mathcal{F}} \lambda_g \lambda_h \lambda_h / \lambda_l, I = h \lambda$$

d'ou pour $\lambda_{\mathcal{F}} = \lambda_g = 1$, on aura :

$$\lambda_{\mathcal{F}} = \lambda_h^2 \cdot \lambda_l^{-1}$$

et $\lambda_{U_*} = \lambda_h \cdot \lambda_l^{-1/2}$

En tenant compte de la relation (IV.4.15...),

$$\lambda_{U_*} = \lambda_U \dots \dots \dots (IV.4.17)$$

a partir de $(U_* = V g^{1/2} / C)$, $\frac{\lambda_v}{\lambda_c} = \lambda_h \lambda_l^{-1/2}$, si on veut avoir

$\lambda_v = \lambda_u$, il faut que $\lambda_c = 1$ c'est à dire le même coefficient

de CHESY sur le modèle est sur le prototype.

CHAPITRE V : CONCEPTION ET REALISATION DU MODELE

V-1. POSITION DU PROBLEME ET BUT DE L'APPLICATION DU MODELE

Le probleme qui se pose au niveau du port de Skikda est l'ensablement de la passe d'entrée ,cet ensablement (à l'Est) est provoqué par les sables déposés près de la cote sous l'action de la houle et qui sont transportés ensuite vers la passe d'entrée par les courants . Les figures (V.1 1) et (V 1 2) montrent les différentes houles agissant sur notre site d'étude ainsi que les courants qui y existent.

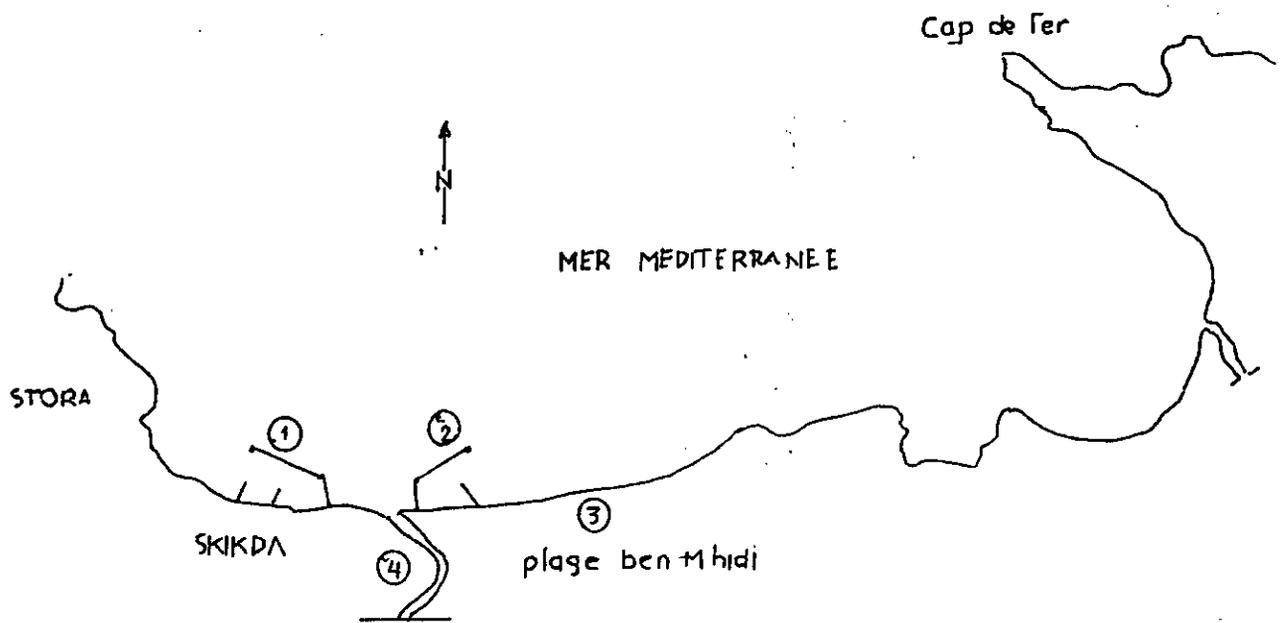
L'application de notre étude au port de SKIKDA ,aura pour but l'étude sur modèle (bidimensionnel) de l'évolution du fond sous-marin à l'Est du port et près de la passe d'entrée sous l'action de deux (02) types de houles régulières et irrégulières d'amplitudes variables . .

V- 2. DONNEES NATURELLES ET EMPRISE DU MODELE

V- 2. 1. DONNEES NATURELLES

V-2. 1. 1. Situation géographique

SKIKDA se situe a environ 500 km vers l'Est de la capitale ALGER .devant la ville ,face a la mer ,sont implantés deux (02) ports de part et d'aurte de l'embouchure de l'oued SAF-SAF (fig.V.2 1 1 1)



- ① Ancien port
- ② Nouveau port pétrolier
- ③ zone industrielle
- ④ Oued saf. Saf

V-2.1.2. Bathymétrie

En se basant sur les levés bathymétriques réalisés par le LEM (laboratoire d'études maritimes) en Mai 85 et Mai 86 nous avons pu tracer les profils du site d'étude et déterminer leur pente moyenne ,celle-ci était de 1/60 . Quelques profils choisis près de la passe d'entrée sont donnés ci-dessous (fig V 2 1 2).

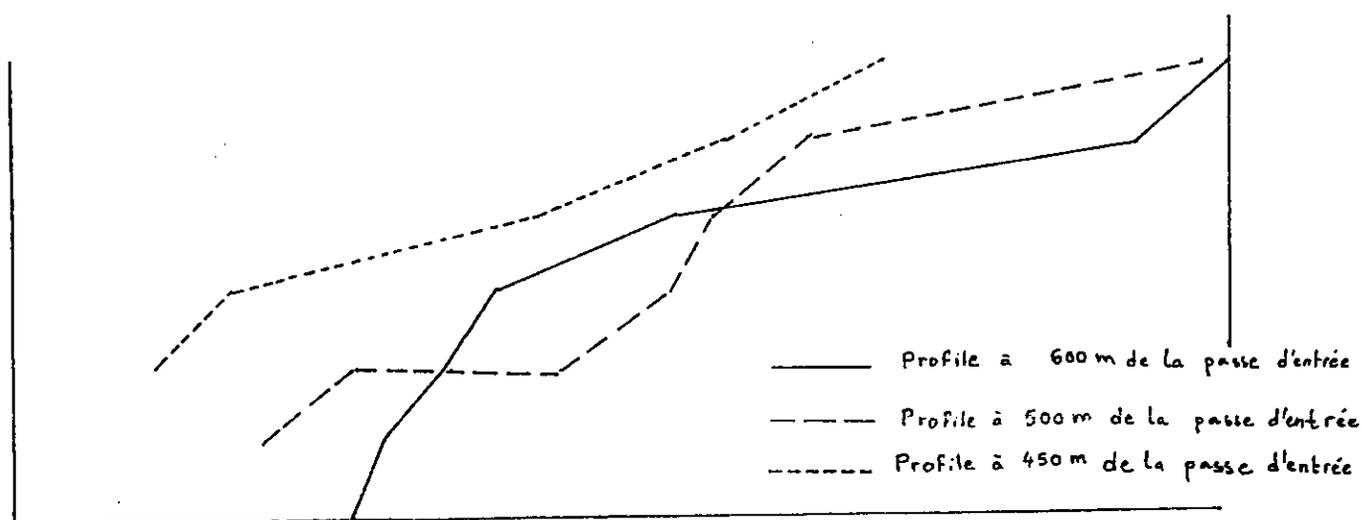


Fig. V. 2. 1.2 _ Quelques profils près de la passe d'entrée.

L.2.3 Etude sedimentologique :

Repartition des faciés granulometrique :

Un diagramme representatif nous a permis de tracer une carte de repartition des faciés granulometrique, cette courbe montre :

a) Les sables moyens à grossiers :

Ils se retrouvent en petite plage du deuxième épi et au large de celui-ci (à 500m de la cote).

A l'interieur de port ils se retrouvent au fond de grands bassins.

b) Le sable moyen :

Ce faciés s'étend de la jetée secondaire au grand rejet de la zone industrielle. Il s'interrompt au niveau de ce dernier et reprend 150m plus loin.

Il se retrouve plaqué contre la côte et sa limite vers le large est à (-3m) au niveau du premier épi et à (-6m) au niveau du deuxième.

Notons que ce faciés n'existe pas à l'interieur du port.

c) Le sable moyen à fin :

Il occupe une importante superficie à l'exterieur du port allant de (-3m) à (-10m) et se retrouvent plaqués à la côte au niveau du grand rejet.

Ce faciés occupe toute la partie occidentale de la passe d'entrée au port, et pénètre à l'interieur de celui-ci.

d) Le sable fin :

Ce faciés apparait au delà de 10m de profondeur et occupe une importante superficie, il occupe aussi une bande assez large au centre du port.

e) Le sable vaseux :

On le retrouve au niveau du chenal d'accès au port à (-16m), et au fond de la partie est du port contre la jetée secondaire.

Analyse modèle :

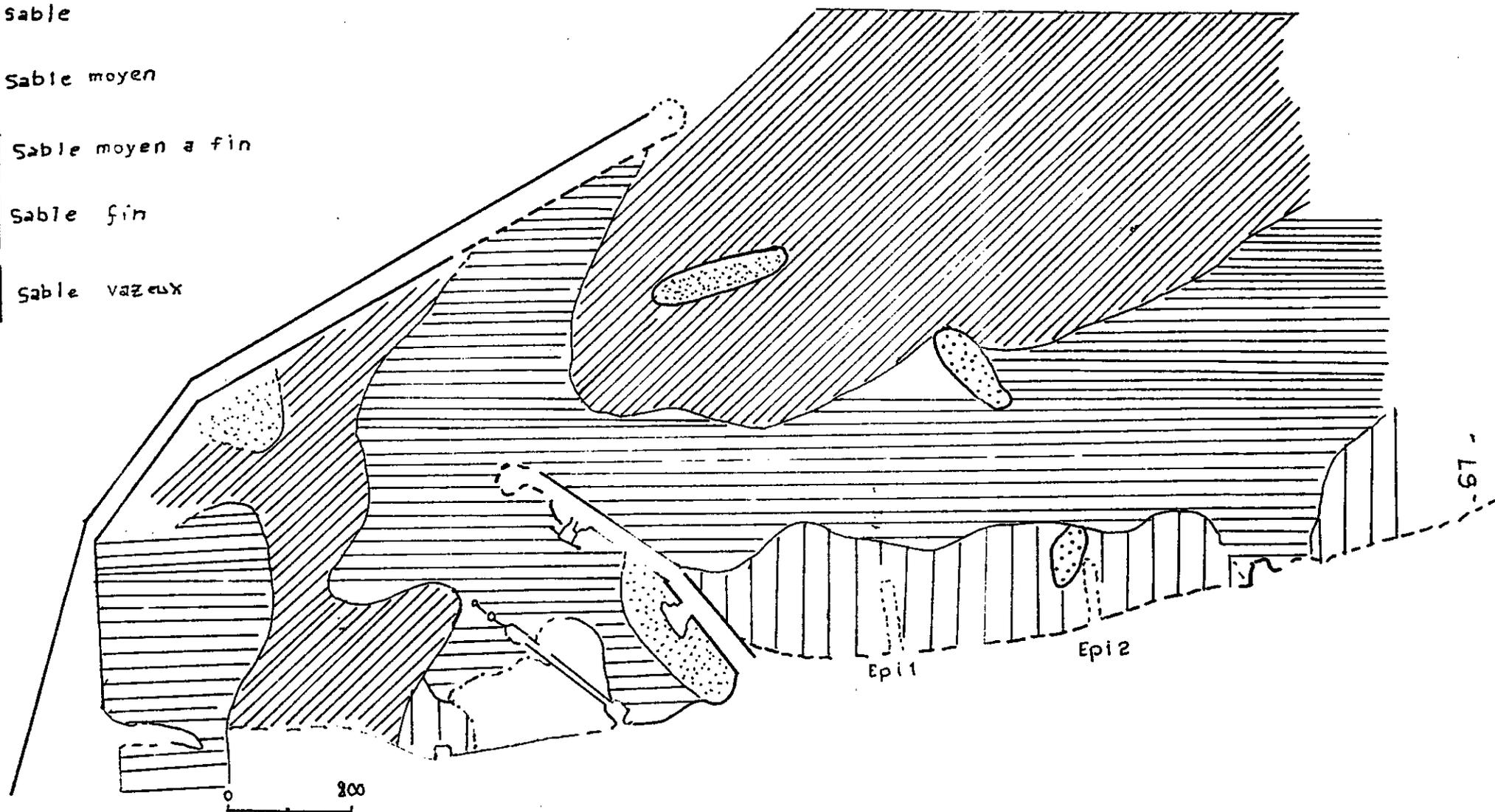
Elle consiste à inventorier les differents stocks sedimentaires moyens et quantifier, la teneur de chaque stocks élémentaires contenue dans le sédiment.

Le mode : correspond à la dimension la plus représentée des grains d'un sédiment.

L'analyse modèle fait apparaître cinq stocks bien différenciés du point de vue dimensionnel appelé mode.

- Le mode I : compris entre 40 μ - 90 microns
- Le mode II : " " 100 μ - 170 "
- Le mode III : " " 180 μ - 350 "
- Le mode IV : " " 500 μ et 1000 microns
- Le mode V : sup à 1000 microns.

-  sable
-  Sable moyen
-  Sable moyen a fin
-  Sable fin
-  Sable vaseux



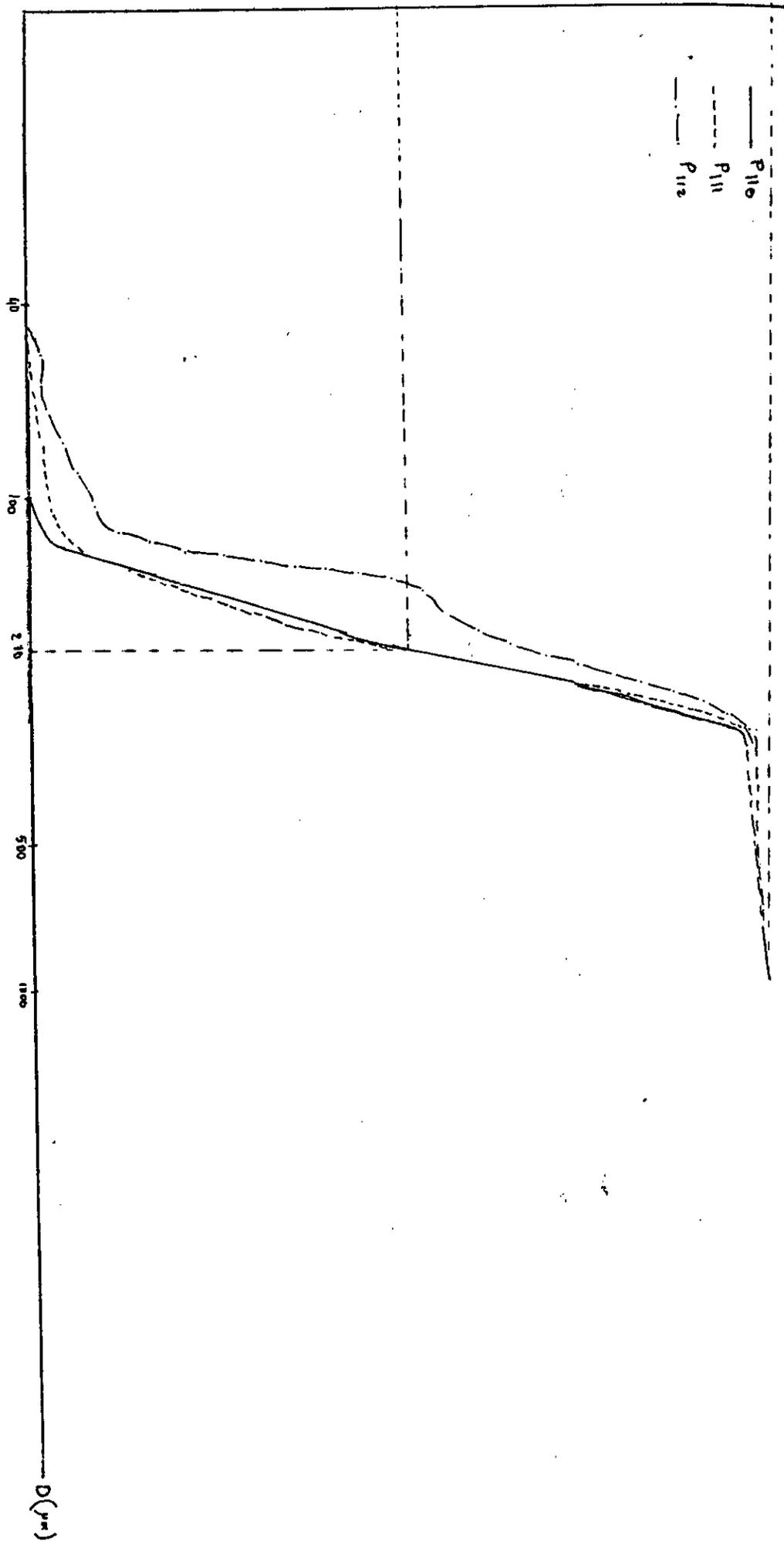
CARTE DE REPARTITION DES FACIES GRANULOMETRIQUES

CONCLUSION

En se basant sur les résultats de l'échantillonnage effectué par : le C.D.T.N (Centre de développement des techniques nucléaires) à la suite des prélèvements sur différentes mailles à l'extérieur du port durant les deux missions sur site 07/1990 et 10/1990, On peut tirer les résultats suivants:

- à l'intérieur du port, la répartition granulométrique est homogène caractérisée par une courbe redressée concentrée.
- l'existence d'une limite dynamique à (-10m) à une distance moyenne 600m de la côte marquée par le passage des sables moyens aux fins.
- dans cette partie on retrouve que le mode III ($180\mu < D < 350\mu$). occupe la frange côtière avec des pourcentages élevés atteignant des fois 100% (à l'Est du deuxième épi) et occupe une assez grande superficie le long de la jetée secondaire avec des pourcentages allant de 90% à 95% .
- On peut dire que c'est ce mode qui transite le long de la côte par la combinaison et l'association des courants de retour et de courants d'expansion au vecteur de dérive litorale Est, Ouest puis longe la jetée secondaire en s'accumulant contre elle et va occuper le chenal d'accès au port.

COURBES CUMULATIVES



V.2.1.4. Houles

D'après les données disponibles sur le site ,les houles importantes susceptibles d'atteindre le site proviennent de trois secteurs : NNW , N et NE .

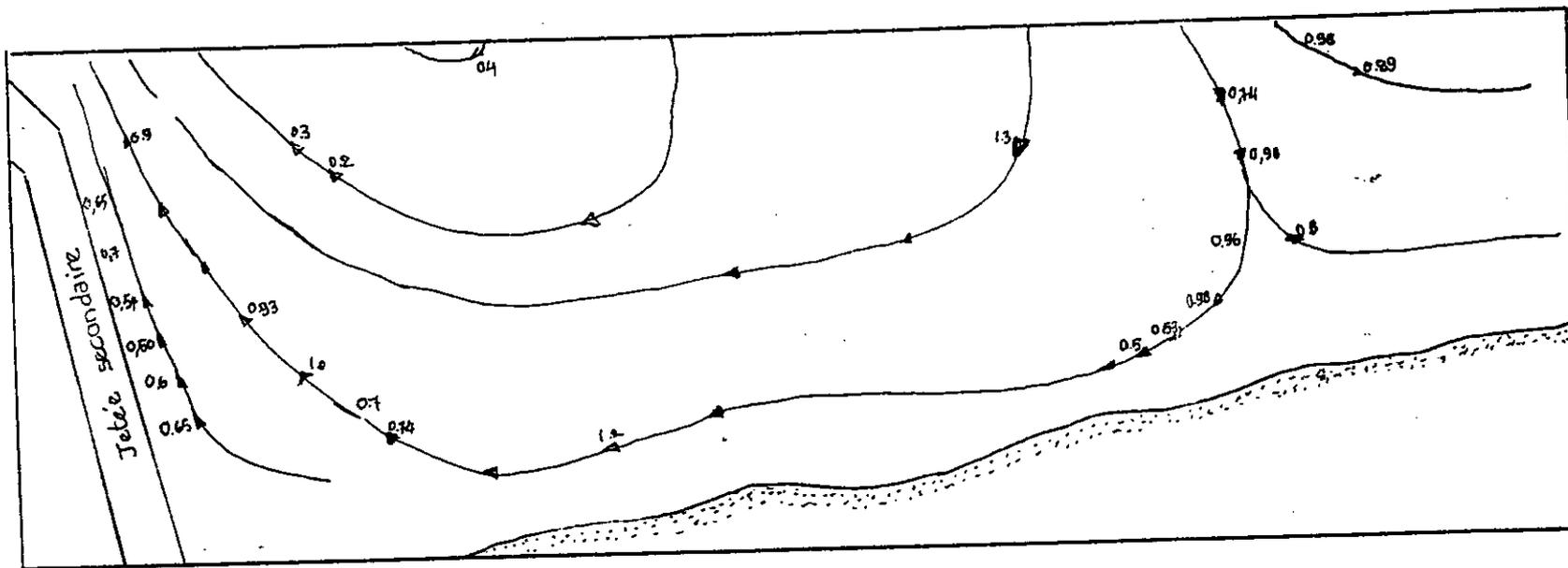
Les houles les plus fréquentes sont celles des secteurs NNW et N .Le tableau suivant (V 2 1 4) résume les caractéristiques de ces houles

	H (m)	T (s)	L (m)	(%)
NNW	4.47	12	225	39
N	4.62	12	225	
NE	1.09	12	225	15

Tableau V.2.1.4 . provenance des houles

V-2.2. EMPRISE DU MODELE

La limite dynamique qui existe a 600 m de la cote a une profondeur de -10 m est une donnée fondamentale pour fixer la limite du modèle au large



(fig: V.1.2) TRAJECTOIRES ET VITESSES DES COURANTS DANS LE SECTEUR ETUDIE

: Direction : NNW
 Houle Période 12 sec
 Amplitude au large 4.47m
 Vitesse du courant en m/s

V- 3. CONCEPTION DU MODELE

V-3.1. Principes du choix du matériau utilisé

Les lois de similitudes dans le cas d'une turbulence incomplète nous, ont imposé pour simuler le fond mobile, de choisir un matériau de densité inférieure à celle du sable

($\rho_s < 2.65$). Le tableau (V 3 1 a) montre quelques matériaux largement utilisés ainsi que les échelles corrélatives qu'ils permettent d'obtenir.

MATERIAUX	ρ_s	d_{50}	λ_{ρ_s}	λ_b	λ_z	λ
Sciure de bois	1.1	0.635	$\frac{1}{16.5}$	2.54.	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{20}$
Bakélite	1.40	0.40	$\frac{1}{4.12}$	1.6	$\frac{1}{23}$	$\frac{1}{7.88}$
Styvarene	1.06	0.75	$\frac{1}{27.5}$	3	$\frac{1}{81}$	$\frac{1}{27}$
Grains de pléxilas	1.18	0.5	$\frac{1}{9}$	2	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{12}$

Tableau V 3 1 a quelques matériaux proposés

Pour l'exécution de nos essais, nous avons opté pour la sciure de bois de densité $\rho_s = 1.1$ et de diamètre moyen $d_{50} = 0.65$ mm (fig V 3 1 1) et le modèle sera distordu : $\Delta = 3$.

Les échelles du matériau ont été choisies de façon à ce que :

- le début d'entraînement des sédiments par la houle se produise en des points homologues en modèle et en nature ;

- le nombre de Reynolds R et le paramètre de SHIELDS soient les mêmes en modèle et en nature
- l'échelle des longueurs d'onde de la houle soit égale à celle des profondeurs .

Les différentes échelles du modèle sont récapitulées dans le tableau (V 3 2 a) ci dessous :

Dimensions en plan	λ_L	1 / 60	
Profondeurs	λ_h	1 / 20	
Houles	Hauteur	$\lambda_H = \lambda_h$	1 / 20
	Périodes	$\lambda_T = \lambda^{1/2}$	1 / $\sqrt{20}$
	Longueurs d'onde	$\lambda_L = \lambda_h$	1 / 20
	Vitesses de frottement	$\lambda_{U_*} = \lambda_h^{1/8}$	1 / (20) ^{1/8}
Temps hydraulique	$\lambda_t = \lambda_h^{-1/2} \cdot \lambda_L$	1 / $\sqrt{3}$	
Pentes	$\lambda_i = \lambda_h \cdot \lambda_L^{-1}$	60/20	
Débits solides	$\lambda_{q_s} = \lambda_h^3 \cdot \lambda_L^{-1} \cdot \lambda_L^{-3/2}$	0.95	
Temps sédimentologique	$\lambda_{t_s} = \lambda_h^{-2} \cdot \lambda_L^{-3/2} \cdot \lambda_L$	1/5000	

Tableau (V 3 2 a) les échelles du modèle

V.3.2 PREPARATION DU MATERIAU DU FOND

Vu sa disponibilité, on a opté pour l'utilisation de la sciure de bois. Après un triage granulométrique on a éliminé les éléments grossiers et les éléments fins pour éviter de faire apparaître des forces de cohésion inexistantes en nature. On a fait une analyse granulométrique qui a donné les résultats présentés dans le tableau ci-dessous

n°tamis	1	2	3	4	5	6	7	8
D tamis	0.125	0.250	0.315	0.4	0.5	1	1.5	2
% refus	1.9	1.9	3.5	19.4	12.5	58.5	7.0	0
% refus cummules	1.9	3.7	7.2	21.7	84.2	92.7	99.7	99.7

la nalyse a été faite avec une masse de 100 g de sciure

A'partire de ce tableau on tracé la courbe granulométrique (fig-V.3.2)

sur cette courbe on lit $D_{50}=0.65\text{mm}$

determination de la densite :

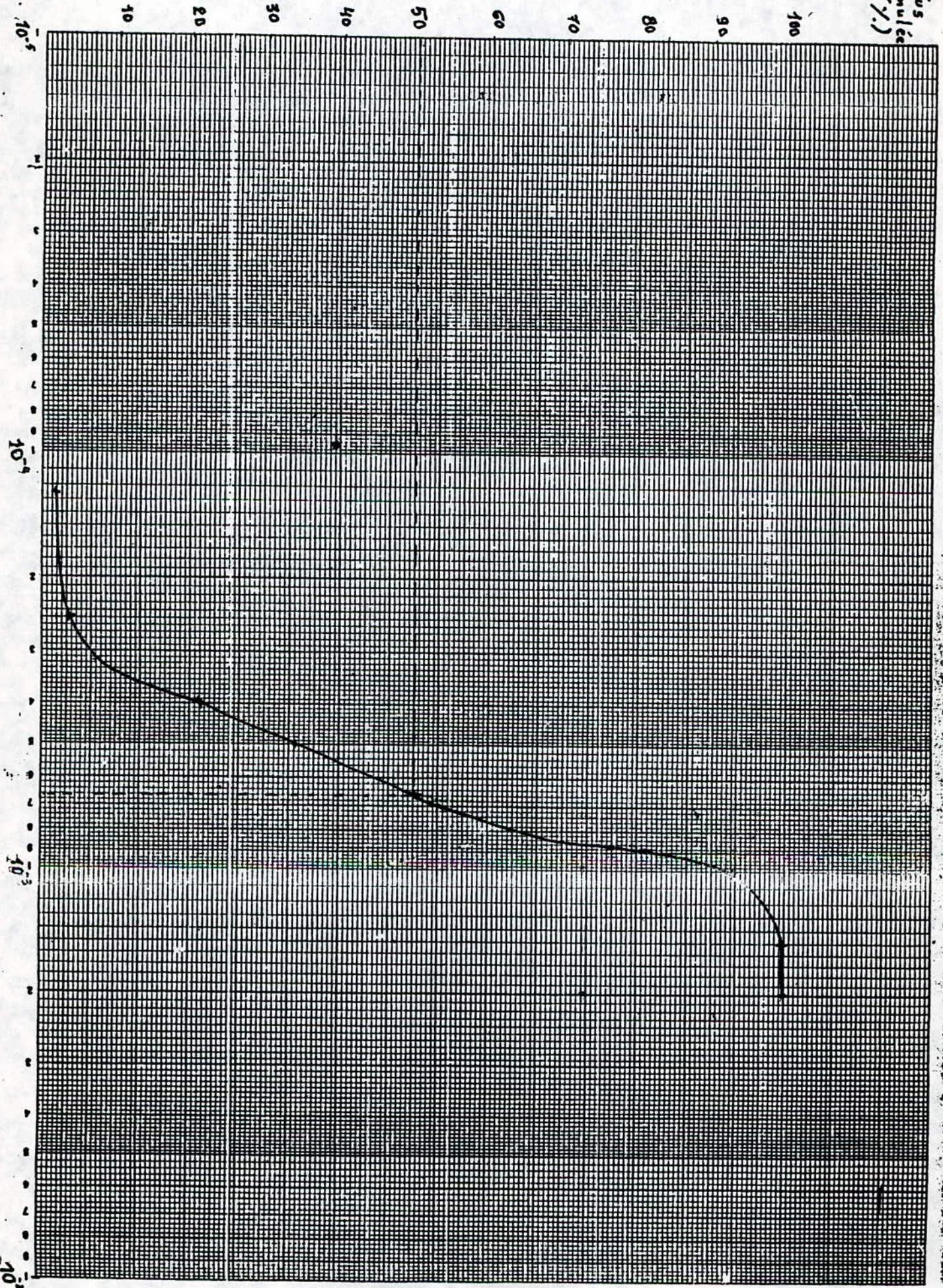
Pour déterminer la densité de la sciure de bois utilisée, on a procédé par deux méthodes différentes

- Par la méthode classique de la détermination de la masse et du volume.

- Par la détermination de la vitesse de chute .

ces deux méthodes ont donné la même valeur $\rho = 1.1$

Refus
Cumulée
(%)



V-4. REALISATION DU MODELE

V-4.1. Description du modele

Pour l'exécution de nos essais , nous disposons :

- d'un canal à houle horizontal ayant 40 m de long , 1 m de haut et 0.60 m de large ;
- d'un générateur de houle installé à l'extrémité aval du canal et qui comprend essentiellement un volet batteur oscillant produisant un front de houle de longueur déterminée ;
- d'une chambre de commande qui transmet au générateur de houle les informations concernant les caractéristiques de la houle sous forme de signal ;
- des limnimètres pour les mesures des profondeurs ;
- d'une installation d'eau pour l'alimentation du canal en eau et pour sa vidange .

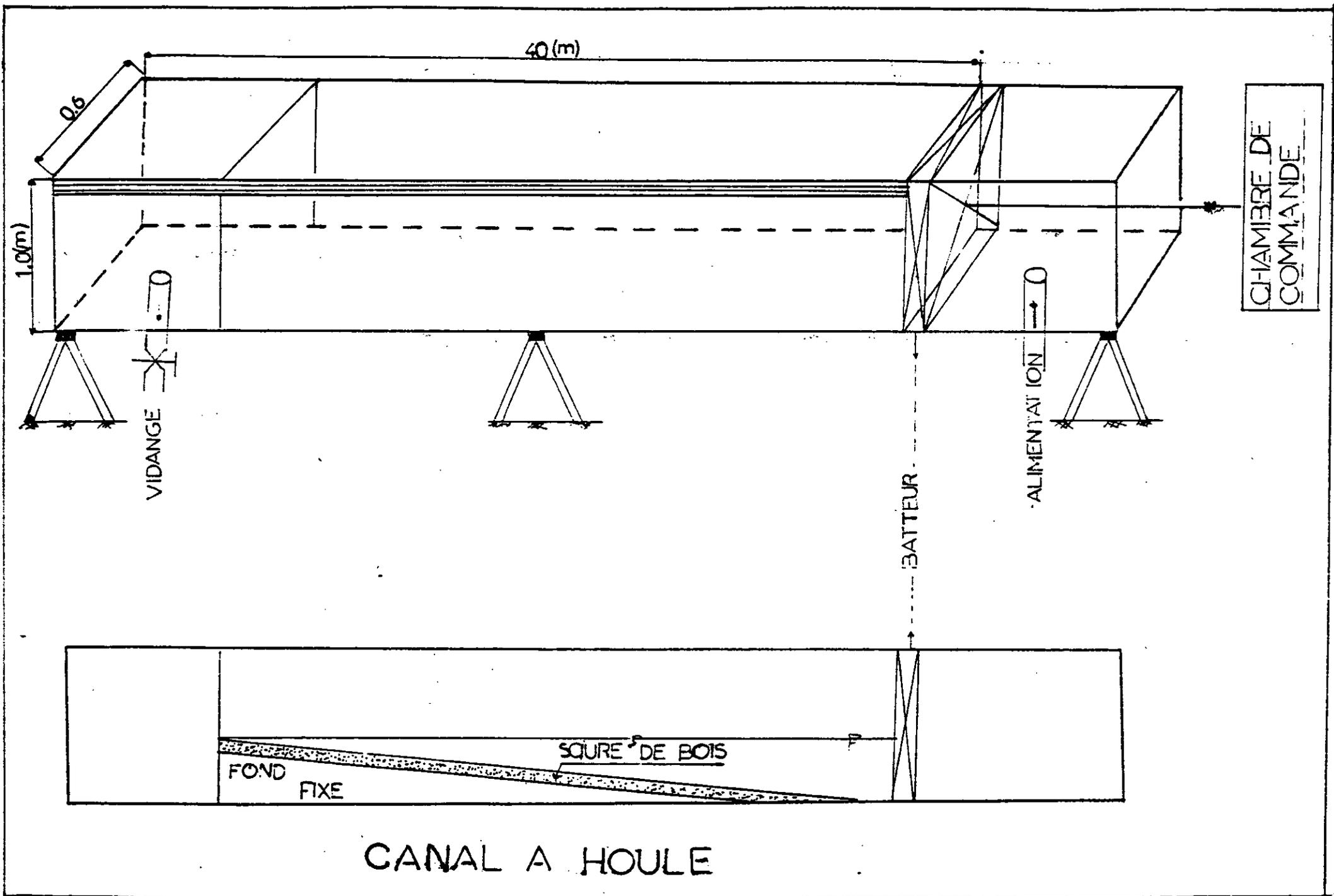
Les équipements du modele sont schématisés par dans les figures (V 4 1 1 et 2) .

V-4.2. Exécution des essais

V-4.2.1. Mode opératoire

La procédure d'exécution des essais est la suivante :

- mettre en place le matériau de fond (sciure mouillée) avec une pente initiale (5 %) ;
- alimenter lentement le canal en eau jusqu'à atteindre le le niveau 0 fixé (0 NGA) ;



- générer une houle d'amplitude H , de période T et de longueur d'onde L connues;
- une fois l'équilibre du profile s'établit (la plage retrouve pente d'équilibre) , arrêter le fonctionnement du générateur de houle et marquer le temps d'action de la houle
- vider lentement l'eau du modele ;
- matérialiser le profile obtenu par des traits de peinture.

V-4.2.2. Etalonnage

V- 2.2.1. Etalonnage hydraulique (à fond fixe)

L'étalonnage hydraulique consiste essentiellement à vérifier que l'agitation due à la houle dans la région étudiée est semblable à celle de la nature , en particulier pour la position du point de déferlement.

Dans notre cas, nous avons réalisé un fond avec du gravier de taille suffisamment grande pour ne pas être entraîné. La houle adoptée avait les caractéristiques suivantes :

- l'amplitude $H_s = 5$ m ;
- la période $T = 10$ s et
- La longueur d'onde $L = 156.2$ m .

Le temps d'action $t_a = 10$ min.

On a remarqué pour cette houle que le déferlement se produit dans des régions semblables à celles en nature .

V-4.2.2.2 Etalonnage sédimentologique (à fond mobile)

Pour ce deuxième étalonnage , on a utilisé de la sciure de bois comme matériau de fond .La houle choisie avait:

- une amplitude $H = 0.54$ m ;
- une période $T = 8$ s ;
- une longueur d'onde $L = 100$ m et
- un temps d'action $t_a = 10$ mn .

Pour cette houle ,l'entraînement des sédiments s'est produit d'une manière semblable à ce qui en nature .

V-4.3 Essais proprement dits : profiles

Nous avons effectué cinq (5) essais sur le canal à houle . Les houles utilisées étaient de deux types :régulieres et irrégulieres ,de caractéristiques (H,T,L) variables d'un essai à l'autre .

Les cinq (5) essais sont récapitulés dans le tableau (V.4.3.1.) ci - dessous :

Essai No	Type de houle	H_s (cm)	T (s)	L_0 (m)	t_a (mn)	penne initiale (%)
1	irrég .	4.3	1.80	5.06	10	1/20
2	irrég .	6.0	2.00	6.25	20	1/20
3	irrég .	9.85	2.00	6.33	23	1/20
4	rég .	5.6	2.00	6.33	10	1/20
5	rég .	11.3	2.00	6.33	10	1/20

V-5 PRESENTATION DES RESULTATS

Les différentes mesures effectuées pour chaque essai sont représentées dans des tableaux et les résultats sont donnés sous forme de graphes pour le modèle et pour le prototype .

PROFILE 1 (SUR LE MODELE)

MOULES IRREGULIERS $K_0=0.86$, $T=8s$

DISTANCE (CM)	PROFONDEUR (CM)
-90	4.7
-49	2.85
-14.5	2.925
0.00	1.6
11.6	4.200000E-001
14	3.000000E-001
17	1.500000E-001
22	-3.000000E-001
25	-3.500000E-001
34.	.5 -2.250000E-001
39	-4.500000E-001
42	-8.000000E-001
52	-1.3
72	-2.1
-96	-2.8
101	-2.75
102	-2.7
105.5	-2.775
109	-2.95
113	-2.75
120	-3.1
124.5	-3.225
128.5	-3.525
134	-3.9
139	-4.45
141.5	-4.47
149	-5.25

SUITE DU PROFIL 1

155.5	-5.97
162	-6.6
165.5	-6.87
168	-7.1
175	-7.75
211	-9.75
226	-10.8
251	-11.95
261	-12.25
286	-13.8
300	-14.2
305	-14.35
320	-15.1
331	-15.95
339	-16.65
345	-17.25
350	-17.5
355	-17.75
362	-18.1

SUIVE DU PROJET 1

370	-18.5
380	-19
400	-20
402.5	-21.02
406.5	-21.32
417	-21.75
426	-22.2
439	-22.85
446	-23.7
455	-24.15
470	-25.1
500	-26
550	-28
600	-31.5
700	-35
750	-38
800	-41
850	-43.5
900	-44

PROFILE 2 (MODELE)	
HOULE IRREGULIERE Hs= 1.20 ,T=9s	
distance (cm)	PROFONDEUR (CM)
-30	2.3 0.00
-22	2.7
-10	1.2
0.00	1.5
10	1.1
20	1.5
40	1
50	6.000000E-001
60	0.000000E+000
68	6.000000E-001
80	8.000000E-001
90	3.2
100	2.7
110	3.5
115	4.45
125	7.25
129	6.36
133	3.65
135	2.45
150	-1.2
160	-1.8
170	-2.7
180	-4
189	-5.15
218	-8.5
226	-9.4
235	-10.95

SUITE DU PROFIL 2 (MODELE)	
258	-14.3
265	-14.95
280	-15.5
288	-16.7
310	-18.4
313.5	-18.35
316	-18.8
328	-19.63
340	-20.5
358	-20.28
362	-20.2
376	-21.3
390	-21.5
400	-21.9
403.5	-22.58
410	-22.9
423	-23.65
437	-24.35
450	-25.3 0.00
462	-25.7
480	-26
485	-26.35
490	-25.9
492	-25.1
500	-24.7
550	-26
600	-28.3
650	-31.8
700	-33.8
750	-36.6
800	-39
850	-42.3
900	-44.6

DISTANCES (m)	PROFONDEURS (metre)
-54	9.400000E-001
-29.4	5.700000E-001
-8.7	5.800000E-001
0.0	3.200000E-001
6.96	8.400000E-002
8.4	6.000000E-002
13.2	-6.000000E-002
15	-7.100000E-002
20.7	-4.000000E-002
23.4	-9.000000E-002
25.2	-1.600000E-001
31.2	-2.600000E-001
43.2	-4.200000E-001
57.6	-5.600000E-001
60.6	-5.500000E-001
61.2	-5.400000E-001
63.3	-5.500000E-001
65.4	-5.900000E-001
67.8	-5.500000E-001
72	-6.200000E-001
74.7	-6.400000E-001
77.1	-7.000000E-001
80.4	-7.800000E-001
83.4	-8.900000E-001
84.9	-8.900000E-001
89.3	-1.05
93.3	-1.19
97.2	-1.32
99.3	-1.37
100.8	-1.42
105	-1.55
126.6	-1.95
135.6	-2.16
150.6	-2.34
156.6.6	-2.45

SUITE	
-------	--

171.6	-2.76
180	-2.84
183	-2.87
192	-3.02
198.6	-3.19
203.4	-3.33
207	-3.45
210	-3.5
213	-3.55
217.2	-3.62
222	-3.7
228	-3.8
240	-4
241	-4.2
243.9	-4.26
250.2	-4.35
255.6	-4.44
263.4	-4.57
267.6	-4.74
273	-4.83
282	-5.02
300	-5.2
330	-5.6
360	-6.3
390	-6.6
420	-7
450	-7.6
480	-8.2
510	-8.7
540	-8.8

PROFILE 2

DISTANCE (metre)	PROFONDEUR (metre)
-18	4.600000E-001
-13.2	5.400000E-001
-6	2.400000E-001
0.00	3.000000E-001
6	2.200000E-001
12	3.000000E-001
24	2.000000E-001
30	1.200000E-001
36	0.00
40.8	1.200000E-001
48	1.600000E-001
54	6.400000E-001
60	5.400000E-001
66	7.000000E-001
69	8.900000E-001
75	1.45
77.4	1.272
79.881	7.300000E-001
81	4.900000E-001
90	-2.400000E-001
96	-3.600000E-001
102	-5.400000E-001
108	-8.000000E-001
113.4	-1.03
130	-1.7
135.6	-1.88
141	-2.19
154	-2.86
159	-2.99
168	-3.1
172.8	-3.34
181	-3.51
186	-3.68

SUITE DU PROFILE 2

188.1	-3.67
189.6	-3.76
196.8	-3.92
204	-4.1
214.8	-4.05
217.2	-4.04
225.6	-4.06
234	-4.3
240	-4.38
242	-4.51
246	-4.58
253.8	-4.73
262.2	-4.87
270	-5.06
277.2	-5.14
288	-5.2
291	-5.27
294	-5.18
295.2	-5.02
300	-4.94
330	-5.2
360	-5.66
390	-6.36
420	-6.76
450	-7.32
480	-7.8
510	-8.46
540	-8.92

PROFILE 3

DISTANCE (metre)	PROFONEURE (metre)
-13.20	3.200000E-001
-7.5	4.000000E-001
-1.2	3.200000E-001
0.00	3.600000E-001
3.6	4.200000E-001
6.3	3.700000E-001
10.5	5.000000E-001
18	5.000000E-001
24.9	5.800000E-001
33	7.900000E-001
36	1.08
38.1	1.24
40.2	1.37
42.6	1.25
45.3	1
47.4	7.100000E-001
54	1.1
56.52	1.09
60	1.4
61.8	1.73
62.7	2.13
66.6	1.95
69	1.99
72	2.02
73.5	2.27
78	1.98
83.4	1.07
84.6	3.900000E-001
86.1	2.000000E-001
90	1.000000E-001
92.4	-4.000000E-002
94.5	-7.000000E-002
97.5	-1.400000E-001
101.22	-1.400000E-001
104.22	-2.100000E-001

SUITE DU PROFILE 3

110.58	-4.000000E-00
129	-8.100000E-00
143.4	-1.35
146.4	-1.4
160.2	-2.17
162.9	-2.33
167.7	-2.59
174.7	-2.91
178.2	-3.07
183.9	-3.16
185.1	-3.24
187.5	-3.22
189.9	-3.46
193.5	-3.52
199.2	-3.72
202.2	-3.81
204.6	-3.97
206.7	-4.06
209.4	-4.09
216	-4.36
218.7	-4.44
221.4	-4.59
223.5	-4.68
228.9	-4.65
234.9	-4.91
238.2	-5.07
242.7	-5.14
247.5	-5.18
255.6	-5.02
261.3	-5.11
267	-5.05
272.7	-5.25
275.4	-5.25
280	-5.31
282.6	-5.41
285	-5.49

SUITE DU PROFILE 3

285	
288	-5.56
291	-5.61
299.	.4 -5.73
300	-5.2
330	-5.7
360	-6.2
390	-6.5
420	-6.9
450	-7.7
480	-8.2
510	-8.6
540	-8.96

PROFILE 4

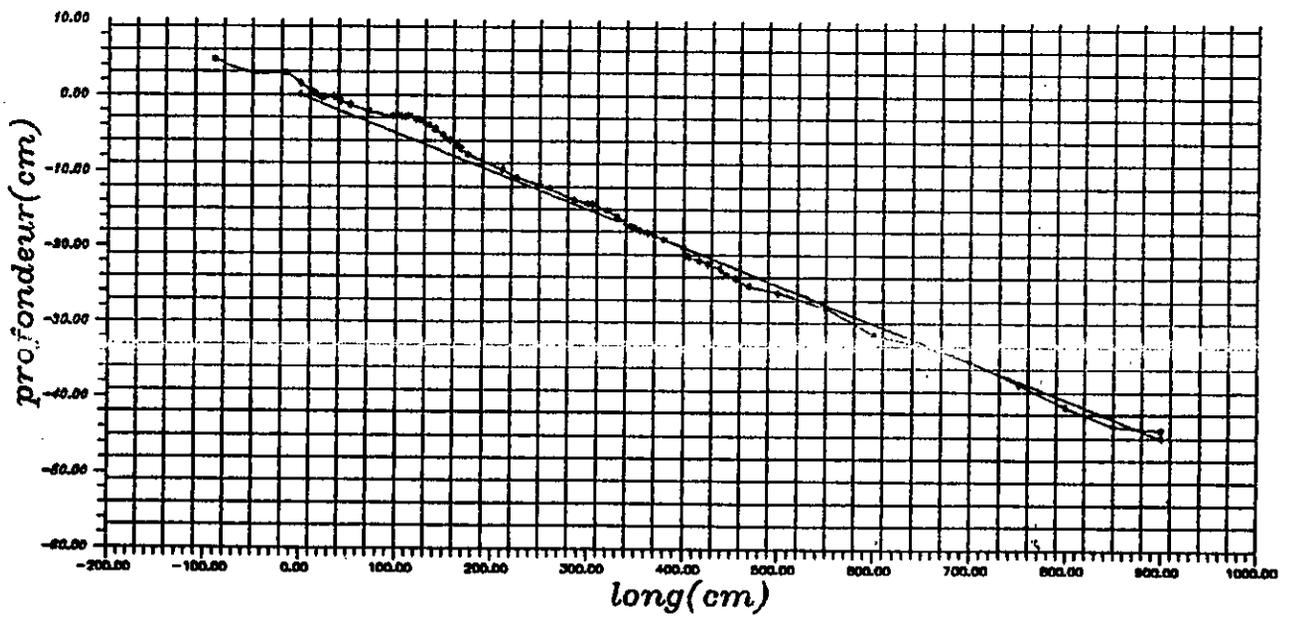
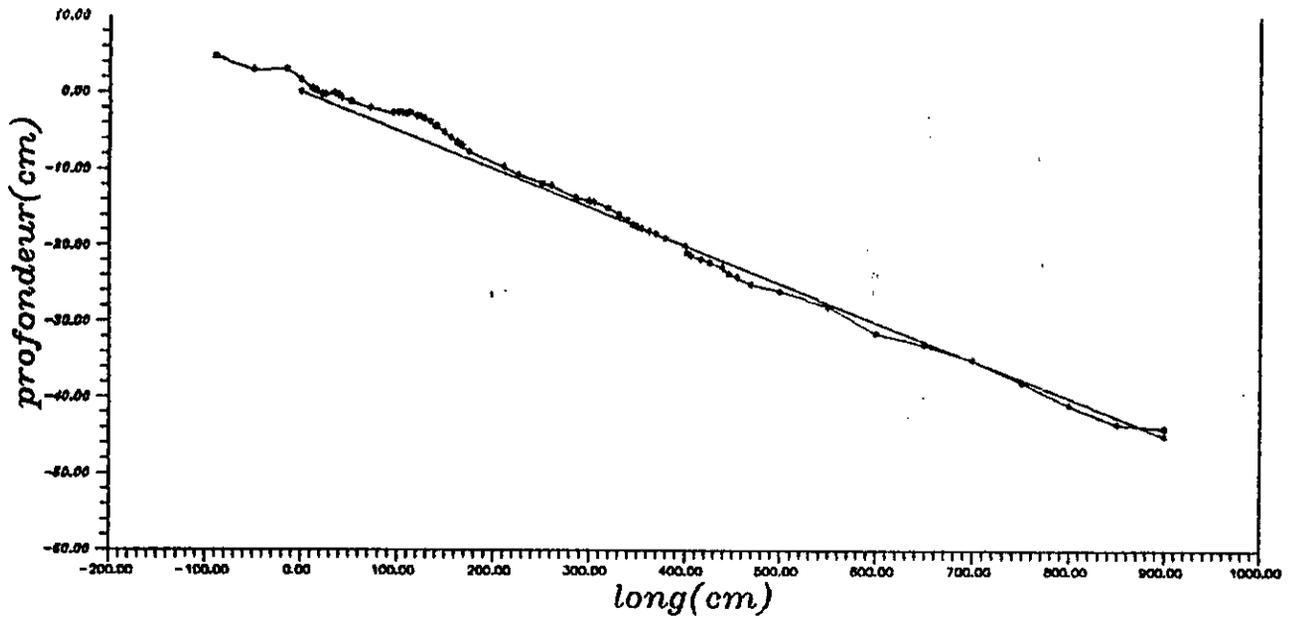
HOULE REGULIERE Hs=1.12m ,T=9s

DISTANCE (metre)	PROFONDEUR (metre)
0.000	0.000000E+000
3	1.500000E-001
30	2.000000E-001
48	3.000000E-001
60	3.000000E-001
87	4.500000E-001
89.4	5.100000E-001
100.8	-4.800000E-001
110.4	-9.400000E-001
127.2	-1.56
139.8	-1.97
158.1	-2.63
161.7	-2.93
164.7	-3.02
177	3.35
181.8	-3.63
197.8	-3.47
199.2	-3.5
201	-3.47
201.6	-3.36
210	-3.5
211.8	-3.47
224.4	-3.14
228	-3.8
230.4	-3.9
234	-4.13
235.8	-4.31
238.8	-4.22
245.4	-4.79
249.6	-4.84
252	-4.92
255.6	-4.94

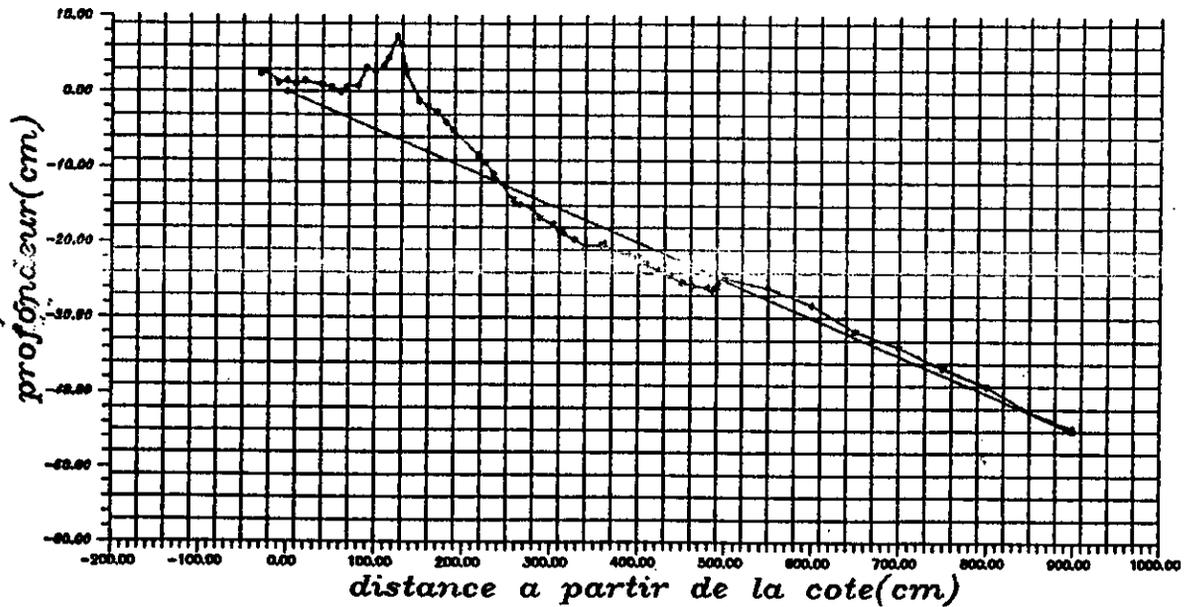
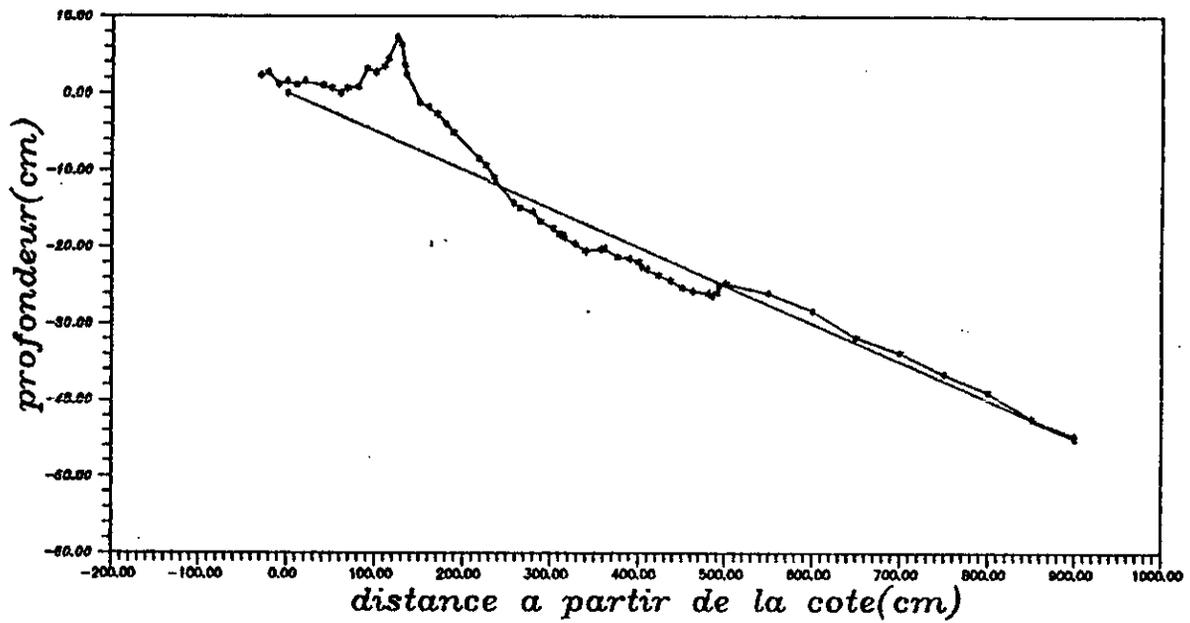
SUITE DU PROFILE 4

258	-4.88
262.2	-4.47
267	-4.75
270	-4.76
272.1	-4.71
281.4	-4.91
292.2	-5.13
298.8	-5.38
300	-5.56
330	-5.92
360	-6.34
390	-6.72
420	-7.16
450	-8
480	-8.2
510	-8.3
540	-8.38

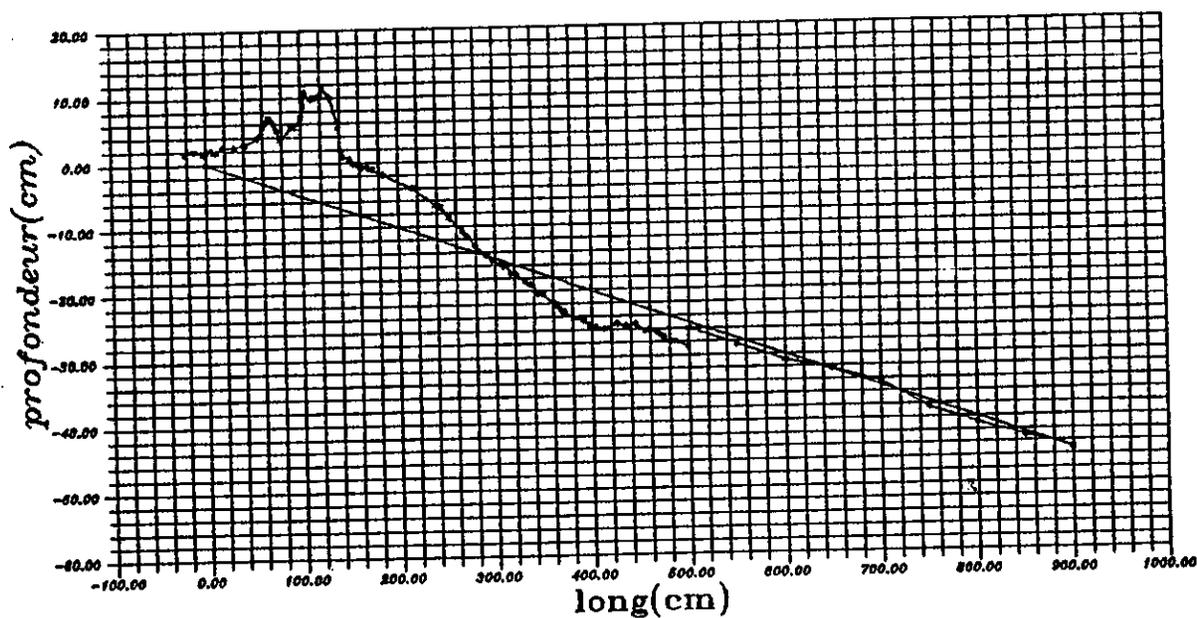
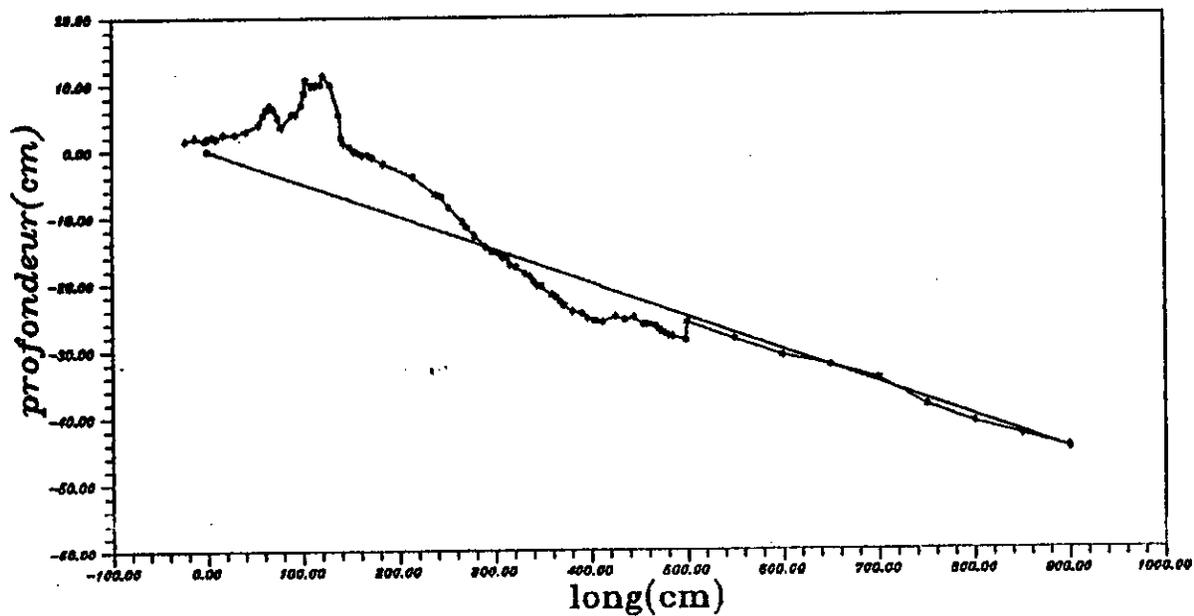
PROFILE 5	
HOULE REGULIERE: Hs=2.26 ,T=9s	
3	1.500000E-001
30	2.000000E-001
48	3.000000E-001
60	3.000000E-001
84	6.400000E-001
90	1.2
92.1	8.700000E-001
104.4	1.02
113.4	9.300000E-001
126.9	-3.500000E-001
150	-1.2
180	-2.2
207	-3.45
240	-5.68
247.2	-5.9
247.8	-5.37
251.1	-5.14
258.6	-5.11
269.4	-4.85
279	-5.21
280.5	-4.89
282	-4.88
289.2	-5.14
299.4	-5.67
300	-5.56
330	-5.92
360	-6.34
390	-6.72
420	-7.16
450	-8
480	-8.2
510	-8.3
540	-8.38
570	-8.6



Houle irreguliere: $H_s=0.86m$; $T=8s$
 * profile 1 *

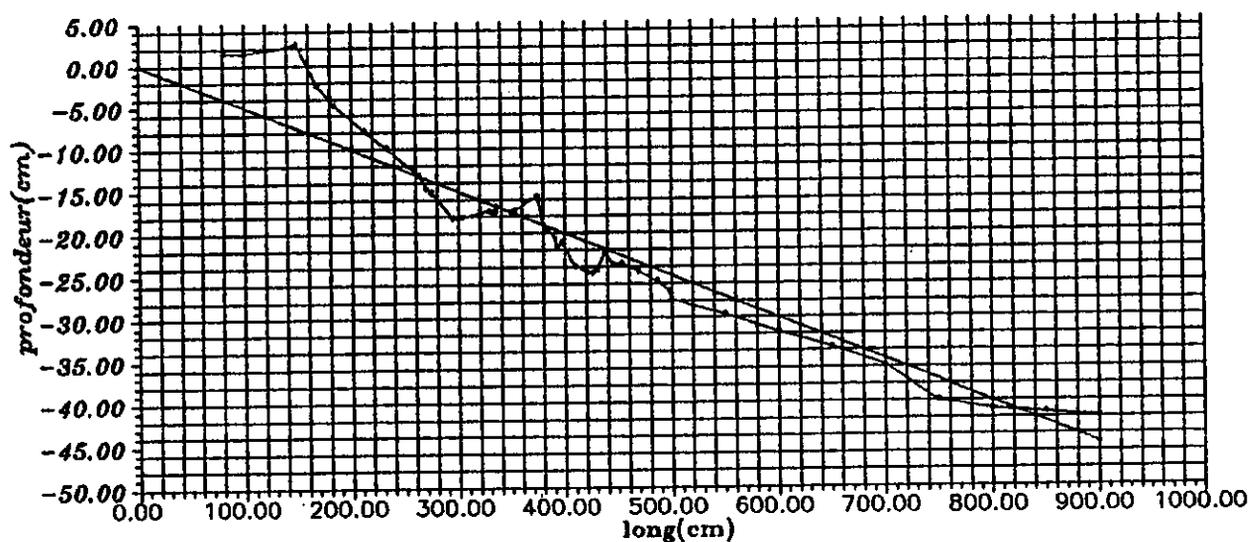
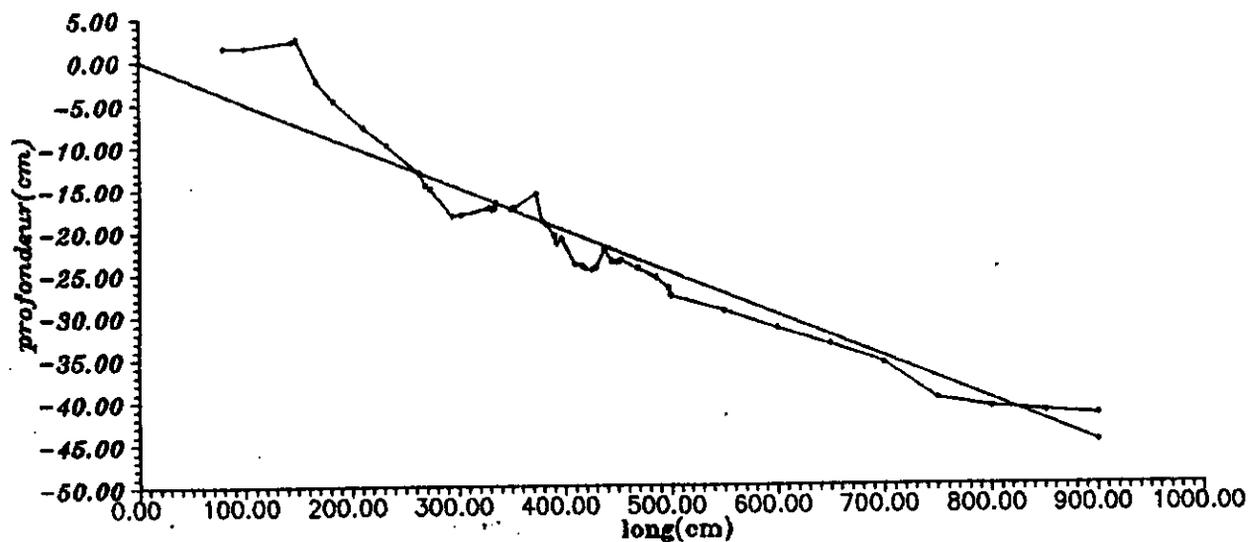


Houle irreguliere: $H_s=1.20m$; $T=9s$
 * profile 2 *



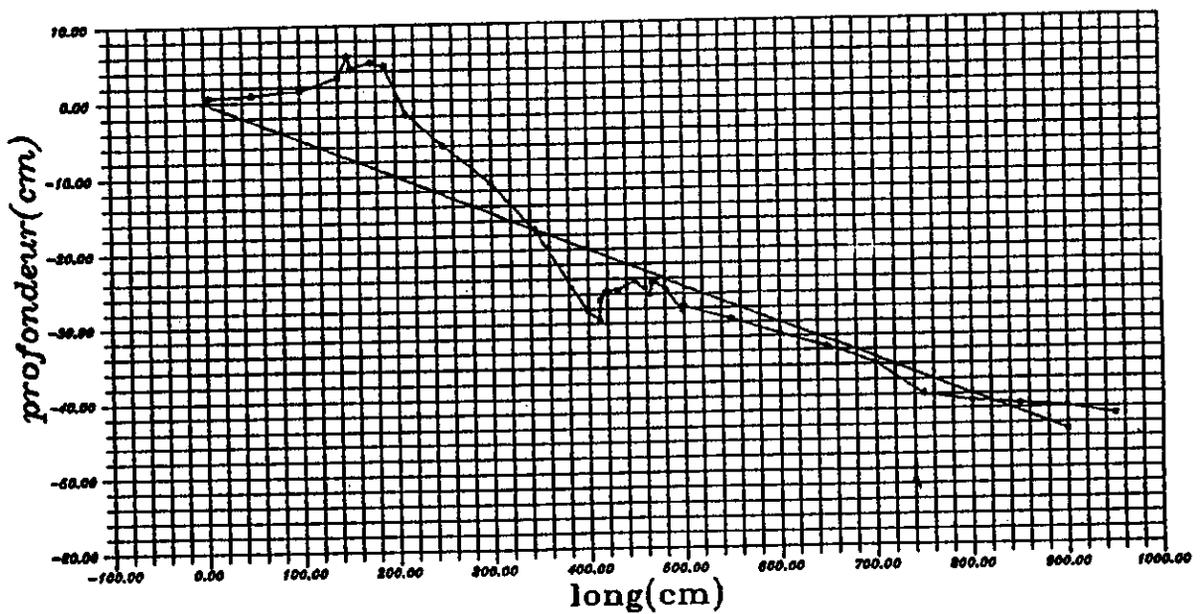
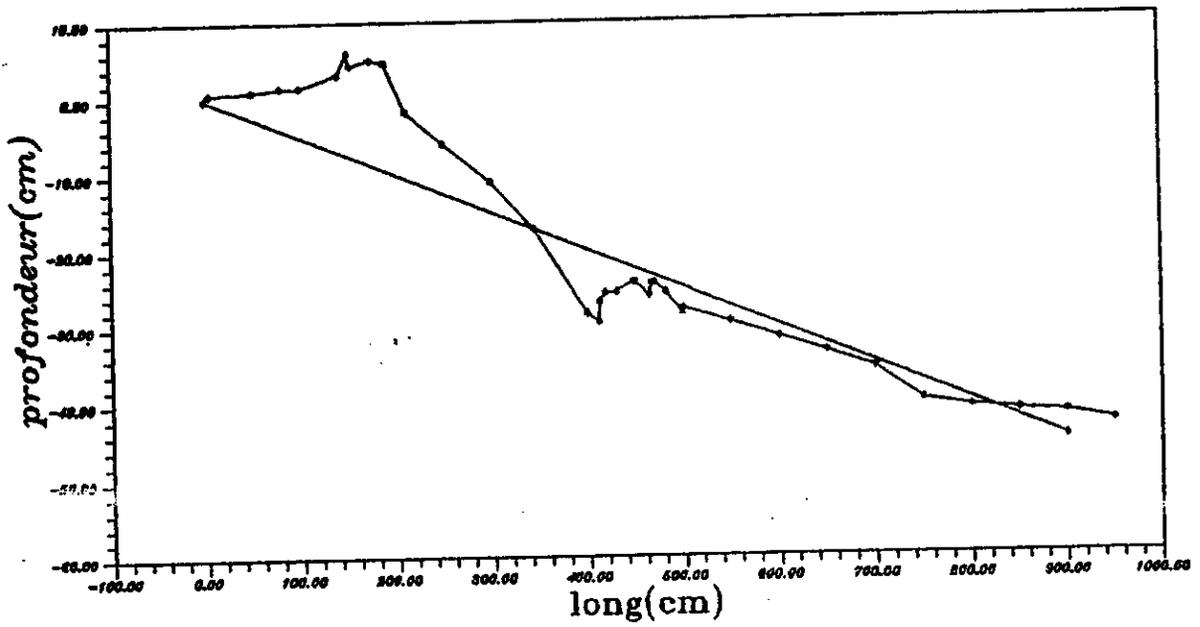
Houle irreguliere: $H_s = 1.97m$; $T = 9s$

PROFILE 3



houle reguliere : Hs=1.12m ; T=9s

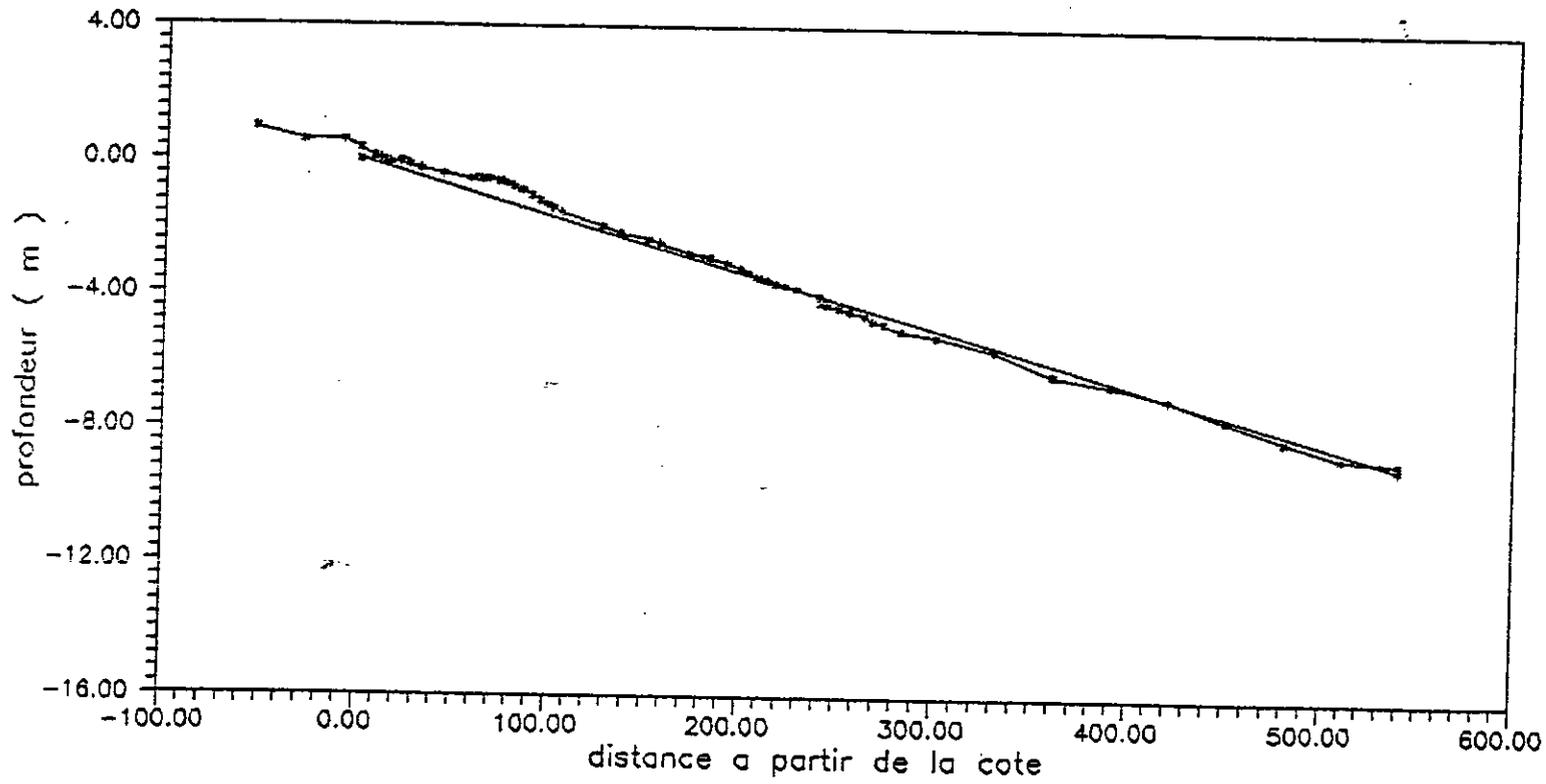
PROFILE 4



Houle reguliere: $H_s=2.26m$; $T=9s$

PROFILE 5

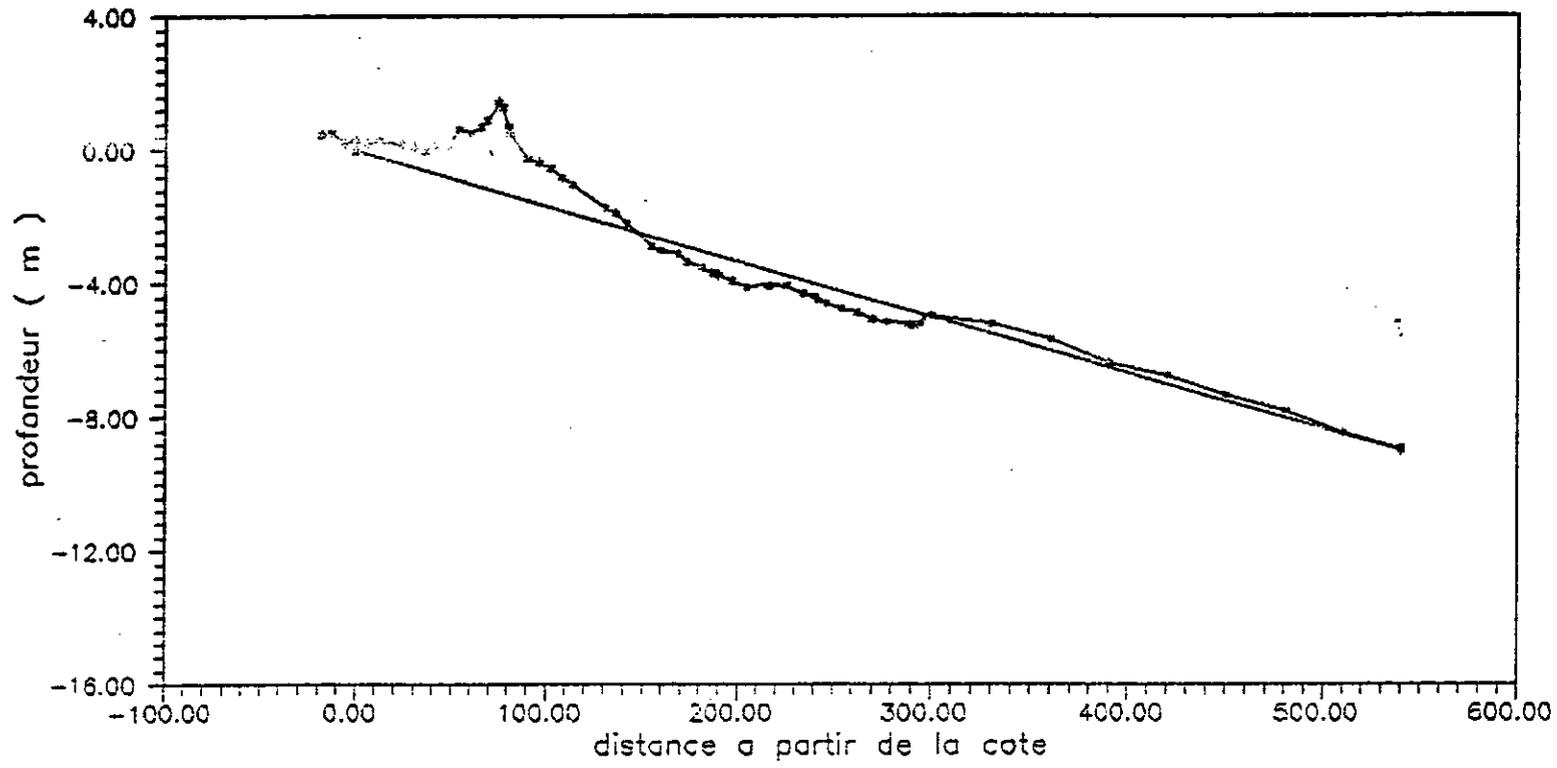
-101-



HOULE IRREGULIERE

$H_s = 0.86$, $T = 8$ s

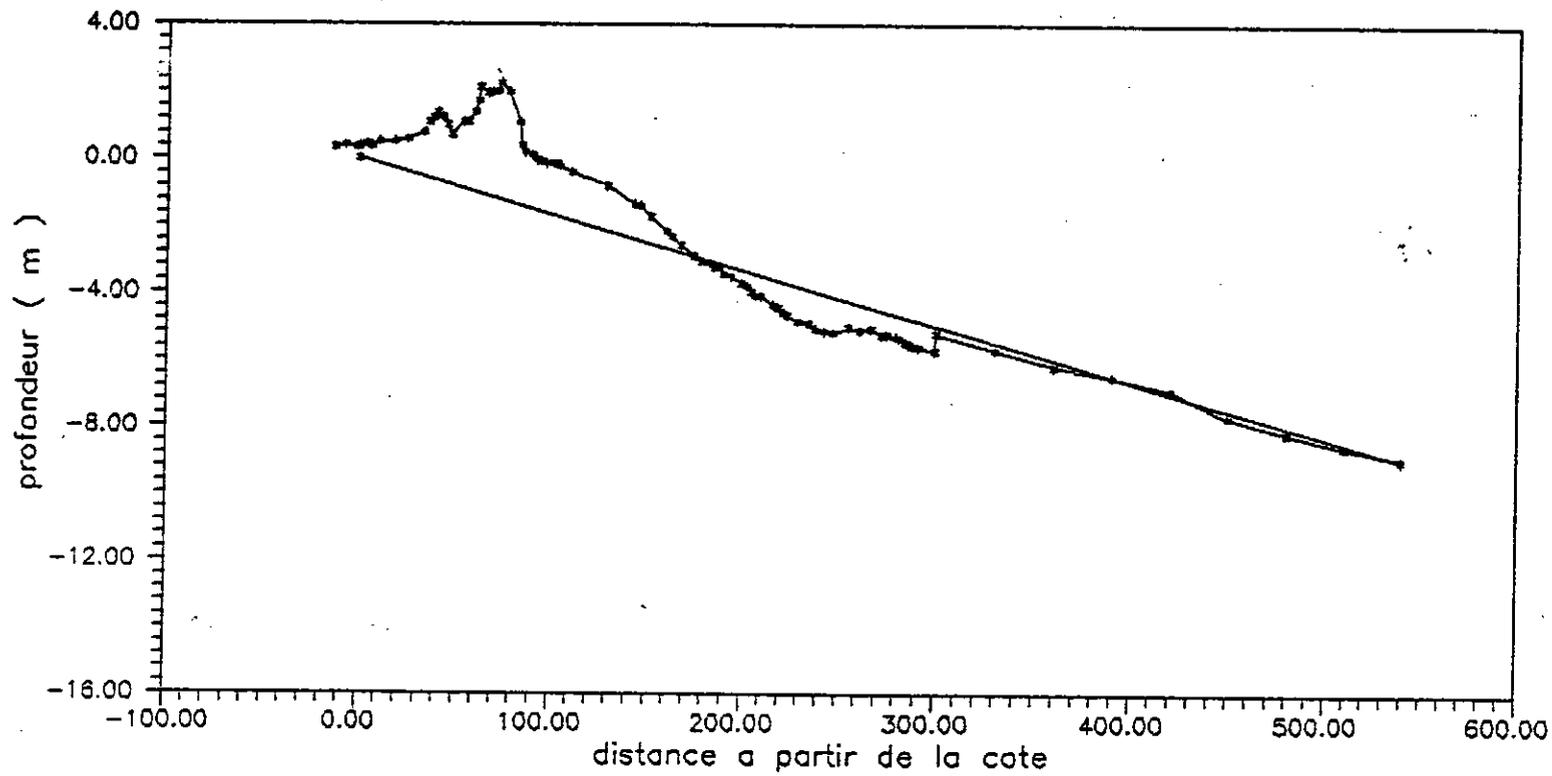
profile1



HOULE IRREGULIERE

Hs= 1.20 , T= 9.5

profile 2

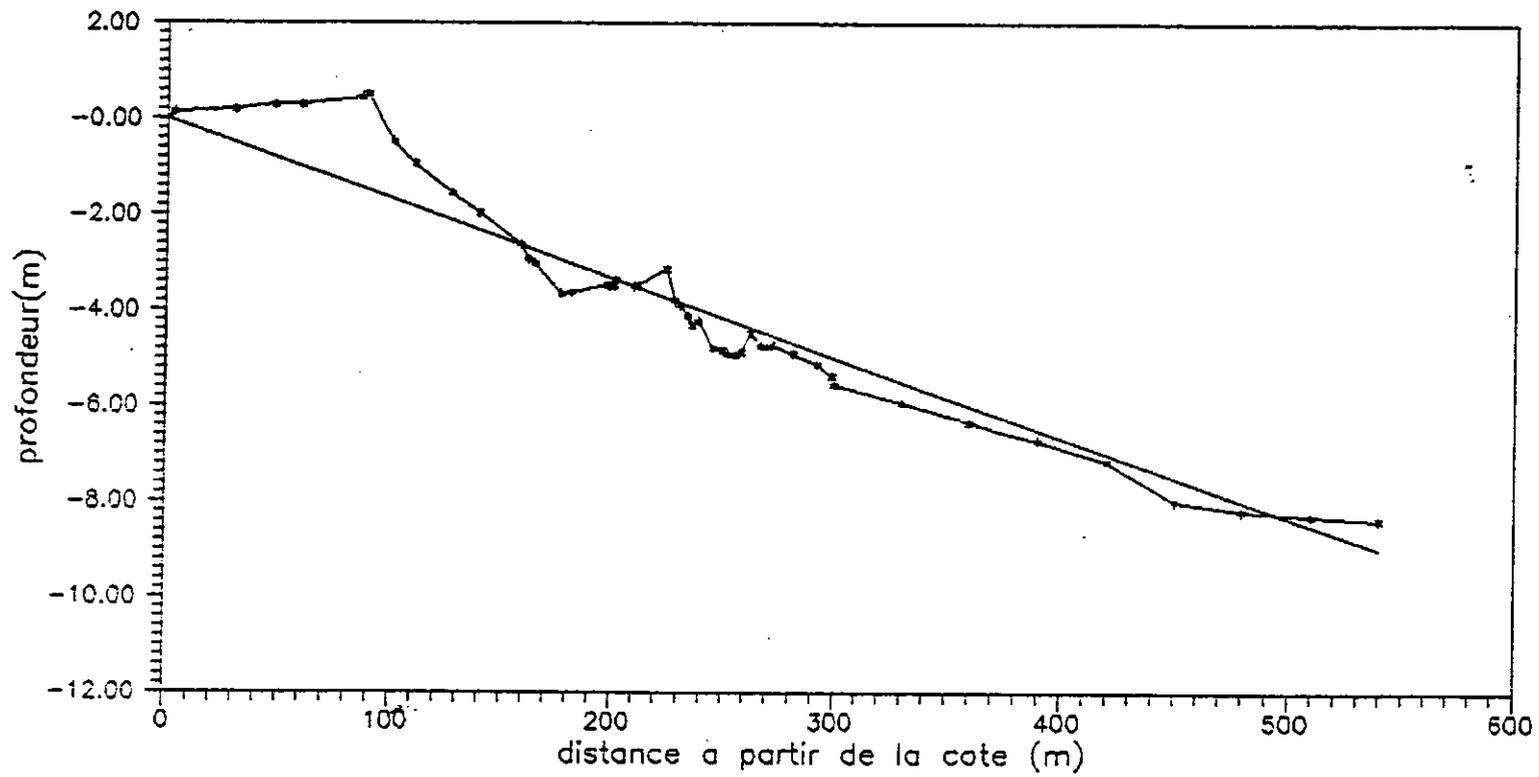


HOULE IRREGULIERE

$H_s=1.97$, $T=9.6$

profile 3

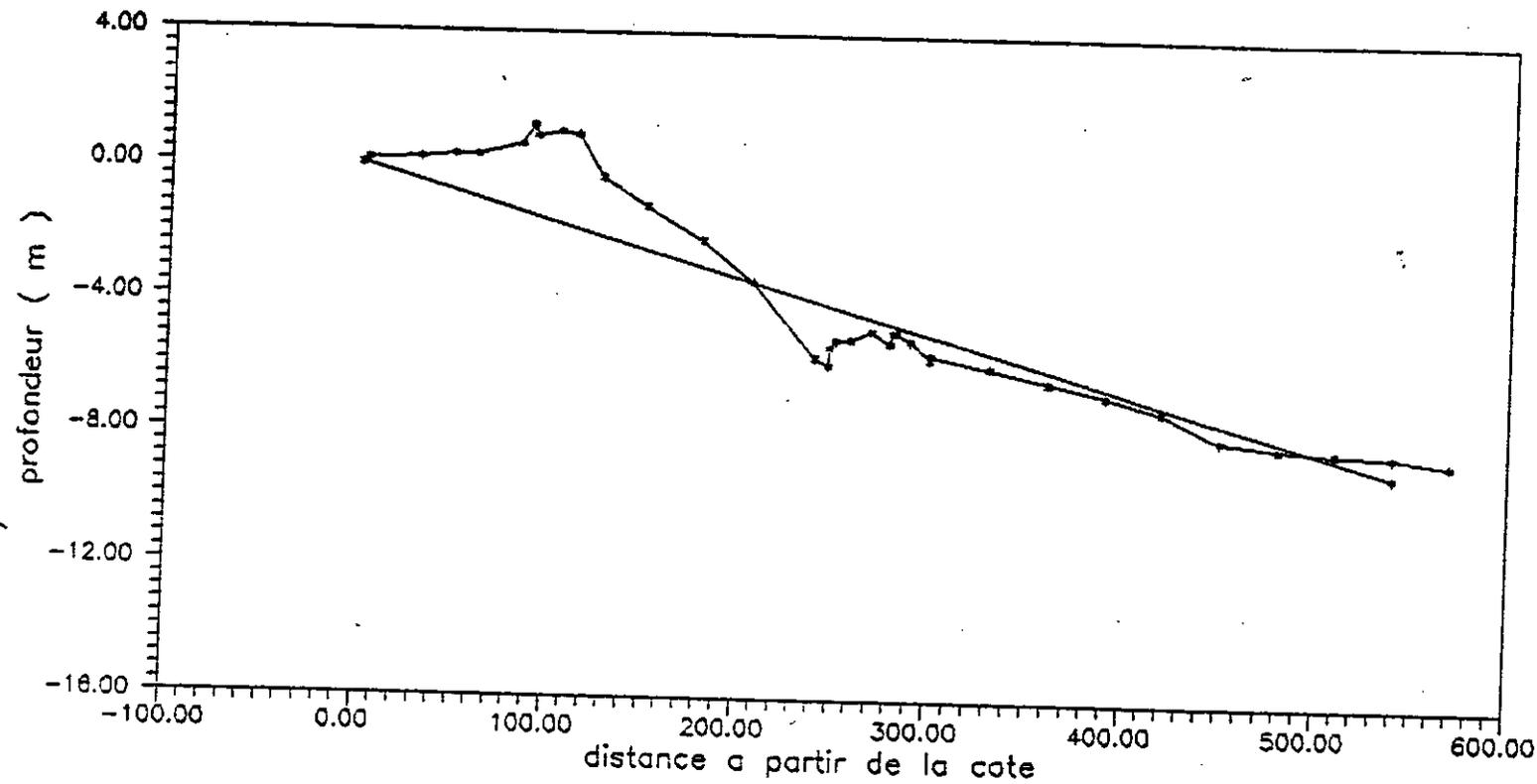
-104-



houle reguliere : $H_s = 1.12$ m ; $T = 9$ s

PROFILE 4

-105-



HOULE REGULIERE

$H_s = 2.26$, $T = 9$ s
PROFILE 5

V-6 INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

V-6-1 Types de profils obtenus sur modele

V-6-1-1 Profils théoriques

Les profils sont théoriquement classés en trois types en fonction des caractéristiques de la houle au large (H_0, L_0), de la taille (d) des sédiments et de la pente initiale ($\text{tg } \beta$).

$$\text{- Type I : } \frac{H_0}{L_0} > 4 (\text{tg } \beta)^{-0.27} \cdot \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67}$$

Pour ce type, la ligne de rivage recule, et les sédiments se déposent au large : érosion de la plage

$$\text{- Type II : } 4 (\text{tg } \beta)^{-0.27} \cdot \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67} < \frac{H_0}{L_0} < 8 (\text{tg } \beta)^{-0.27} \cdot \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67}$$

Dans ce cas , la ligne de rivage avance et les sédiments s'accumulent au large et vers la cote de part et d'autre de la zone de déferlement .

- Type III : $\frac{H_b}{L_o} < 4 (\text{tg } \beta)^{-0.27} \cdot \left(\frac{d}{L_o}\right)^{0.67}$

La ligne de rivage avance également pour ce type de profil.

Ilya érosion dans la zone de déferlement et dépôt vers la cote

La figure (V 6 1 1) résume les trois types ci-haut.

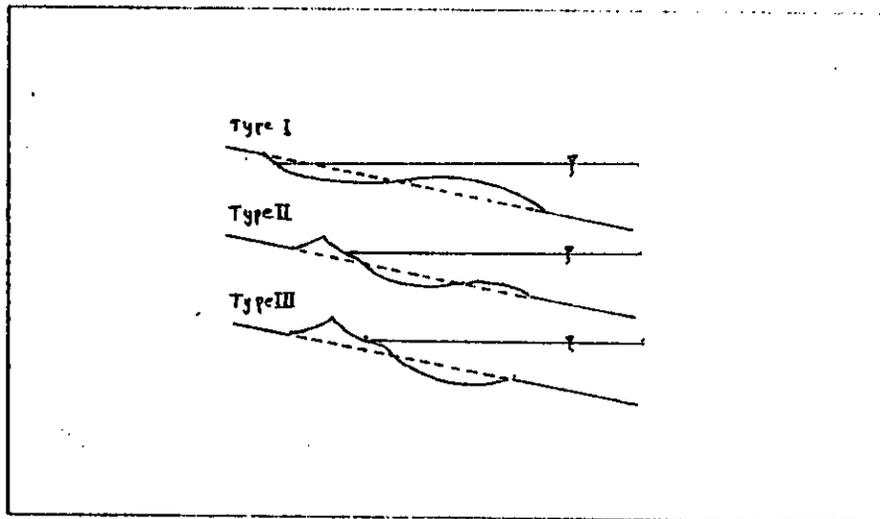


Fig v 6 1 1
Classification des profils

v 6 1 2 Type de profils obtenus

Le tableau ci-après donne les types théoriques des cinq profils réalisés .

N ^o	$\frac{H_0}{L_0}$	$4 (\text{tg } \beta)^{-0.27} \cdot (d / L_0)^{0.67}$	Type
1	0.008	0.557	III
2	0.009	0.476	III
3	0.015	0.476	III
4	0.009	0.476	III
5	0.018	0.476	III

Les profils obtenus expérimentalement sur le modèle sont tous du type III .

V-6 1 **Résultat** : La ligne de rivage se déplace vers le large par suite de l'érosion du fond dans la zone de déferlement . Quelque soit la houle , la plage finit par retrouver son profil d'équilibre qui a pratiquement la même pente moyenne .

V- 6- 2- Transport de sédiments

En examinant les cinq (05) profils obtenus , on peut voir clairement que les volumes des sédiments déposés sur la

cote sont plus grands que ceux arrachés de la zone de déferlement.

Ceci s'explique par le fait que les sédiments déposés sont à l'état lâche par suite de leur remaniement et leur transport (compacité c très faible) alors qu'ils étaient avant l'action de la houle au large plus ou moins tassés (compacité supérieure) . Ces volumes sont très importants sur le modele et le phénomène s'effectue rapidement .Ceci explique pourquoi l'échelle des temps sédimentologiques très ptite ()

V.I.A CONCLUSION GÉNÉRALE

-Le modèle réduit peut être d'une part un bon moyen de guide pour l'ingénieur chargé de diriger des projets, le modèle réduit peut donner des indications sur l'effet des différents paramètres sur le phénomène étudié et permet d'obtenir des résultats assez valables pour en tirer des conclusions, d'une autre part, il peut être un outil assez dangereux entre les mains si on n'apporte pas la précaution de représenter fidèlement le phénomène étudié. Ce pendant, il faut rester prudent vis-à-vis de l'utilisation directe des résultats obtenus.

-Le choix du matériau utilisé pour simuler le fond marin est une phase assez délicate dans la conception du modèle vu la nécessité de respecter la dimension voulue et surtout la densité voulue. Ce qui est limité par la difficulté d'approvisionnement sur le marché d'un tel matériau.

-Après avoir effectué nos essais, on peut dire que l'utilisation de la sciure de bois conduit à de bons résultats et permet une similitude assez bonne pour l'étude sédimentologique. Le seul problème est le fait que la sciure n'a pas de forme sphérique ce qui laisse soupçonner l'intervention de forces de frottements plus importantes que celles existantes dans le cas du sable.

-L'étude sur le canal à houle (bidimensionnelle) du problème de transport solide n'est qu'une première approche du problème avant le passage sur le bassin.

-Le milieu marin est un milieu vivant cherchant toujours à atteindre un état d'équilibre et s'adapte aux changements des conditions.

V.I.B RECOMMANDATIONS

La connaissance des mécanismes de transport, de sédimentation et des paramètres qui régissent les processus de dynamique sédimentaire s'avèrent nécessaires avant toute étude. Avant de passer à l'étude sur un modèle réduit d'un problème donné, on doit avoir une connaissance complète du site et une vue assez large et précise pour pouvoir représenter fidèlement le site.

Dans notre cas jusqu'à présent on a fait l'hypothèse que l'ensablement du port est dû uniquement au désengraissement de la plage ben m'hidi à l'EST et que les apports de Oued SAF SAF situé à l'Ouest sont négligeables. Ces résultats qui sont tirés après un suivi de courte période rendent toute conclusion non fiable.

Les graphes qui donnent les trajectoires et les vitesses des courants créés par des houles de différentes directions font apparaître des vitesses extraordinaires atteignant 1.96 m/s de telles vitesses pouvant transporter des grains grossiers ou conduire à l'érosion de la plage d'une manière considérable ce qui conduirait à première vue à un transport solide important à la passe d'entrée en une période assez courte, ce qui nous laisse méfiant vis à vis de l'utilisation directe des résultats qui sont présentés dans le rapport du centre de développement des techniques nucléaires.

Ce qui est recommandé avant d'exclure un éventuel transport dû au rejet de Oued SAF SAF par des courants littoraux

* prendre des échantillons de sable en différents points au niveau de la passe d'entrée et faire l'analyse granulométrique, géologique, chimique pour connaître leurs origines

* *deposer des échantillons de sable colorés ou de sable noir pour pouvoir le repère (sous forme de cube) à l'Est du port en des points defferents puis revenir après quelque jours prendre une serie de prélèvement pour l'évolution du fond et la direction du transport

..*.refaire la meme chose à l'Ouest du port

**** essaie d'étuliser une matiere plastique de forme sphérique pour voir son comportement das le modele .

*****rassembler toutes ces données et passer à l'étude sur bassin.

B I B L I O G R A P H I E

- 1 _ B I J K E R , E . W
LONGSHORE TRANSPORT COMPUTATIONS .
Journal of the Waterways , Harbors and Coastal Engi-
neering Division . Volume 4 , Novembre 19
- 2 _ B I J K E R , E . W. SOME CONSIDERATIONS ABOUT
SCALES FOR COASTAL MODELS WITH MOVABLE BED
Université de Liege , Institut du Genie-civil . 1967 .
- 3 _ B O U V A R D , M .
BARRAGES MOBILES ET OUVRAGES DE DERIVATION A PARTIR
DES RIVIERES TRANSPORTANT DES MATERIAUX SOLIDES .
Ed.Eyrolles , 1984 .
- 4 _ B O N N E F I L L E , R .
COURS D'HYDRAULIQUE MARITIME .
Ed,MASSON , 1980
- 5_ B O N N E F I L L E , R et R U E D A , F.
LA GRANDE MOTTE , VINGT ANS APRES .
La HOUILLE BLANCHE /N°5-1988 .
- 6_ C A R L I E R , M .
HYDRAULIQUE GENERALE ET APPLIQUEE
Ed,Eyrolles 1980 .
- 7_ C H A P O N , J .
TRAVAUX MARITIMES , Tome 1
Ed,Eyrolles , Paris 1984
- 8_ C H A R L E S . B.CHEMUTT
LABORATORY EFFECTS IN COASTAL MOVABLE-BED MODELS
- 9_ C E N T R E D E D E V E L O P P E M E N T D E S T E C H -
N I Q U E S N U C L E A I R E S (C D T N) .
ETUDE DE L'ENSABLEMENT DU NIVEAU FORT DE SKERDA
PAR L'UTILISATION DES TRACEURS RADIOACTIFS .
RAPPORT PRELIMINAIRE
Méthodes et résultats sédimentologiques .
ALGER, Mars 1991 .

- 10_ G I N O C C H I O , R .
L'ENERGIE HYDRAULIQUE .
Ed, , 1978 .
- 11_ H O - S H O N G E T C H R I S T E N S E N , W . A .
MOVABLE-BED MODEL INVESTIGATION OF TAICHUNG HARBOR.
- 12_ L A R R A S , J . .
HYDRAULIQUE ET GRANULATS . Ed, Eyrolles , 197
- 13_ L A R R A S , J .
COURS D'HYDRAULIQUE MARITIME ET DE TRAVAUX MARITIMES .
Ed, Eyrolles , 1961 .
- 14_ L A R R A S , J .
PHYSIQUE DE LA HOULE ET DES LAMES .
Ed, Eyrolles , 1979 .
- 15_ L E B R E T O N , J . C .
DYNAMIQUE FLUVIALE .
Ed, Eyrolles , 1980 .
- 16_ M I G N O T , C. et L O R I N , J .
ETUDE DE LA REMISE EN SUSPENSION DES SABLES SOUS
L'ACTION DE LA HOULE .
LA HOUILLE BLANCHE /N°3-1986 .
- 17_ M I G N O T , C .
ETUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES DE DIFFERENTS SEDI-
MENTS TRES FINS ET DE LEUR COMPORTEMENT SOUS LES
ACTIONS HYDRODYNAMIQUES .
LA HOUILLE BLANCHE /N°7_1968 .
- 18_ M I G N O T , C .
ACTION DES COURANTS , DE LA HOULE ET DU VENT SUR LES
LES SEDIMENTS .
LA HOUILLE BLANCHE /N°1_1977 .
- 19_ M A R E N D E T .
LA PROTECTION DES COTES : LES MOYENS DISPONIBLES ET
LES ETUDES NECESSAIRES
SEMINAIRE DE FORMATION CONTINUE .
ALGER, AVRIL 1985 .
- 20_ O R G E R O N , C .
ETUDE SUR MODELE REDUIT DE LA SEDIMENTATION DANS
L'ESTUAIRE DE LA VILAINE APRES CONSTRUCTION DU
BARRAGE D'ARZAL .
LA HOUILLE BLANCHE /N°7_1968 .