

Waterbouwkundig Laboratorium
Borgerhout

BIBLIOTHEEK

149895

MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS
PONTS ET CHAUSSEES
ADMINISTRATION DES VOIES HYDRAULIQUES

ETUDE SUR MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE
DE L'EVOLUTION DES FONDS AUX ABORDS DU
PORT DE ZEEBRUGGE

MODELE 387 S

ETUDE EN CANAL
CHOIX DE MATERIAUX MOBILES

JUILLET 1981

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
<i>Notation</i>	
INTRODUCTION	
CHAPITRE I : DISPOSITIF D'ESSAIS - CONDITIONS EXPERIMENTALES.....	1
1 - 1 - Echelle de similitude.....	1
1 - 2 - Appareillage de reproduction des phénomènes naturels.....	2
1 - 21 - Les courants.....	2
1 - 22 - La houle.....	2
1 - 3 - Appareillage de mesures.....	3
1 - 31 - Les courants.....	3
1 - 32 - La houle.....	4
1 - 33 - La turbidité.....	4
1 - 34 - Le matériau mobile.....	4
1 - 35 - Le débit solide.....	4
1 - 4 - Caractéristiques des matériaux expérimentés.....	4
1 - 41 - La nacre.....	5
1 - 42 - Polystyrène.....	6
1 - 43 - Styvarène.....	7
1 - 5 - Caractéristiques d'essais.....	7
1 - 51 - Niveau de l'eau.....	7
1 - 52 - Les courants.....	7
1 - 53 - Les houles.....	7

CHAPITRE II : RESULTATS EXPERIMENTAUX - INTERPRETATION.....	8
2 - 1 - <i>Action d'un courant seul.....</i>	9
2 - 11 - <i>La nacre.....</i>	9
2 - 12 - <i>Le polystyrène.....</i>	17
2 - 13 - <i>Le styvarène.....</i>	18
2 - 14 - <i>Mélanges.....</i>	19
2 - 2 - <i>Actions superposées de la houle et des courants.....</i>	22
2 - 3 - <i>Action de la houle sur un estran.....</i>	24
2 - 4 - <i>Action d'un courant alternatif.....</i>	25
2 - 5 - <i>Formation d'une fosse d'érosion.....</i>	26
2 - 51 - <i>Généralités.....</i>	26
2 - 52 - <i>Résultats expérimentaux.....</i>	28
CONCLUSIONS.....	31

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 Dispositif pour la reproduction simultanée de la houle et des courants
- Figure 2 Canal de sédimentologie. Dispositif expérimental
- Figure 3 Courbes granulométriques de la Nacre
- Figure 4 Courbe de SCHIELDS transformée
- Figure 5 Courbe de BOUSSINESQ
- Figure 6 Courbe de S.YALIN et de J.LARRAS
- Figure 7 Courbe de S.YALIN début d'entraînement faible
- Figure 8 Courbe de S.YALIN début d'entraînement fort
- Figure 9 Nuage de HANOVRE
- Figure 10 A Variation du débit solide en fonction de la vitesse moyenne
- Figure 10 B Variation de débit solide en fonction de la vitesse de frottement U_*
- Figure 11 Variation de v/λ en fonction de τ_*/τ_* (cr) et comparaison par rapport au nuage des points de S.YALIN
- Figure 12 Loi de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle
- Figure 13 Variation du rapport q_{sc} / Q_{sc} du débit solide sous l'action combinée de la houle et du courant
- Figure 14) Action du courant alternatif. Variation simultanée de la vitesse du
Figure 15) courant, de la hauteur d'eau et du débit au cours d'un cycle
- Figure 16) Variation de la profondeur des fosses en fonction du temps (échelle
Figure 17) arithmétique 16 et logarithmique 17).

NOTATIONS

C_0	Vitesse de phase de l'onde de la houle $C_0 = L/T$
D	Diamètre moyen des grains
Fr	Nombre de Froud $Fr = \frac{V_m}{\sqrt{gh}}$
H	Amplitude de la houle
h	Profondeur d'eau à l'équilibre
L	Longueur d'onde de la houle
Q_c	Débit solide par charriage, sous l'action du courant seul, mesure obtenue à partir du contenu du tamis
Q'_c	Cumul du débit solide dans le tamis et hors tamis toujours par charriage et sous l'action du courant seul
Q_r	Débit solide par charriage sous l'action du courant seul, calculé à partir des caractéristiques des ondulations du fond
Q_{sc}	Débit solide moyen c'est-à-dire $\frac{Q_c + Q'_c + Q_r}{3}$
Q_{ss}	Débit solide par suspension calculé à partir des mesures de turbidités
Q_{sc}^*	$\frac{Q_{sc}}{\gamma_s \cdot U_* \cdot D}$ où γ_s est le poids volumique du sédiment sec et D est le diamètre moyen des grains
q_c, q'_c, q_r et q_{sc}	désignent les mêmes types de grandeur que Q_s, Q'_s, Q_r et Q_{sc} mais sous l'action combinée du courant et de la houle
T	Période de la houle
t	Durée d'un essai
U_*	Vitesse de cisaillement
U_{*cr}	Vitesse de cisaillement critique
U_r	Vitesse d'avancement des rides (ou des dunes) sur le fond
U_0	Vitesse orbitale maximale au fond, due à la houle uniquement
V_m	Vitesse moyenne du courant
$V_m(cr)$	Vitesse moyenne du courant qui correspond au début d'entraînement des grains
V_c	Vitesse de chute dans l'eau calme
Y_{cr}	Variable définie par $Y_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)D}$
Y	Hauteur de la turbidité dans le canal au-dessus du lit de sédiments
λ	Longueur d'onde des ondulations du fond (rides, dunes,)

η	Amplitude des ondulations du fond (rides, dunes,)
τ	Contrainte de cisaillement au fond
τ_{cr}	Contrainte de cisaillement critique relative au début d'entraînement
τ_*	Variable adimensionnelle définie par $\tau_* = \frac{\tau}{g (\rho_s - \rho) D}$.
	où ρ : masse spécifique du fluide
	ρ_s : masse spécifique du grain solide
θ	Variable définie par $\theta = \frac{(\gamma_s - \gamma) D^3}{\rho v^2}$

INTRODUCTION

Afin de compléter l'étude théorique des possibilités de reprise et de transport de sédiment par les courants et par les houles une seconde étude a été réalisée dans le cadre des recherches entreprises pour la construction du futur avant port de Zeebrugge. Cette étude effectuée au L C H F a porté sur le choix des matériaux mobiles susceptibles d'être utilisés sur le modèle réduit sédimentologique réalisé au laboratoire de recherches hydrauliques de BORGERHOUT et pour lequel le L C H F assure sa collaboration technique.

Ainsi, différents matériaux artificiels, ont été testés dans un canal à deux dimensions dans le but de définir le plus adapté à la simulation en modèle réduit du comportement des sédiments sableux en nature.

Pour déterminer cette similitude du comportement, plusieurs types de mesures ont été effectués à savoir le début d'entraînement, le débit solide, la turbidité, la configuration des fonds obtenus (rides ou dunes) sous l'action d'un courant seul ou avec superposition de la houle.

Certains essais complémentaires ont également été réalisés pour mettre en évidence les possibilités de formation d'une fosse d'érosion dans une zone d'accélération du courant.

Le rapport sera divisé en deux chapitres :

- Au chapitre I seront présentés les dispositifs d'essai et les conditions expérimentales
- Au chapitre II seront décrits et interprétés les résultats expérimentaux.

Ce chapitre II comprendra :

- . L'action d'un courant seul
- . Les actions superposées de la houle et des courants
- . L'action de la houle sur un estran
- . L'action d'un courant alternatif
- . La formation d'une fosse d'érosion.

CHAPITRE I

- DISPOSITIFS D'ESSAIS CONDITIONS EXPERIMENTALES

L'étude a été réalisée dans un canal de petites dimensions permettant de reproduire simultanément des courants unidirectionnels et de la houle.

1 - 1 - ECHELLES DE SIMILITUDE

Cette étude étant destinée à faire le choix d'un matériau artificiel susceptible de représenter les sédiments naturels sur le modèle sédimentologique réalisé au laboratoire de Recherches hydrauliques à BORGERHOUT, les échelles adoptées sur ce canal expérimental étaient les mêmes que celles du modèle à trois dimensions à savoir :

- échelle en plan : $1/m = 1/400$
- échelle en hauteur : $1/n = 1/100$
- distorsion $\frac{m}{n} = 4$

Les échelles hydrauliques calculées par application de la loi de REECH FROUDE sont données dans le tableau ci-après :

Grandeurs	Symboles	Valeurs
Longueur, largeur	$1:m$	$1/400$
Hauteur	$1:n$	$1/100$
Section	$1:mn$	$1/40000$
Volume	$1:m^2n$	$1/16 \cdot 10^6$
Temps hydraulique	$n^{1/2}:m$	$1/40$
Débits	$1/m \cdot n^{3/2}$	$1/4 \cdot 10^5$
Houle Période	$1/n^{1/2}$	$1/10$
Houle Amplitude	$1/n$	$1/100$

1 - 2 - APPAREILLAGE DE REPRODUCTION DES PHENOMENES NATURELS

1 - 21 - Les courants

Les caractéristiques du canal constitué d'une double paroi vitrée (voir photo ci-jointe) sont les suivantes :

- longueur 12 m
- largeur 0,40 m
- hauteur 0,60 m.

L'alimentation est faite à l'amont par l'intermédiaire d'une cuve de mise en charge, reliée au canal par un tuyau flexible de gros diamètre, le débit du groupe moto-pompe desservant cette cuve étant réglable.

Le canal comporte en aval une vanne réglable manuellement permettant de faire varier la cote d'eau.

1 - 22 - La houle

Le canal est équipé à l'aval d'un générateur de houles spécialement conçu pour permettre la reproduction simultanée des courants et de la houle, tout en restant équipé de l'ensemble classique à savoir, volet batteur, groupe moteur et armoire de commande .

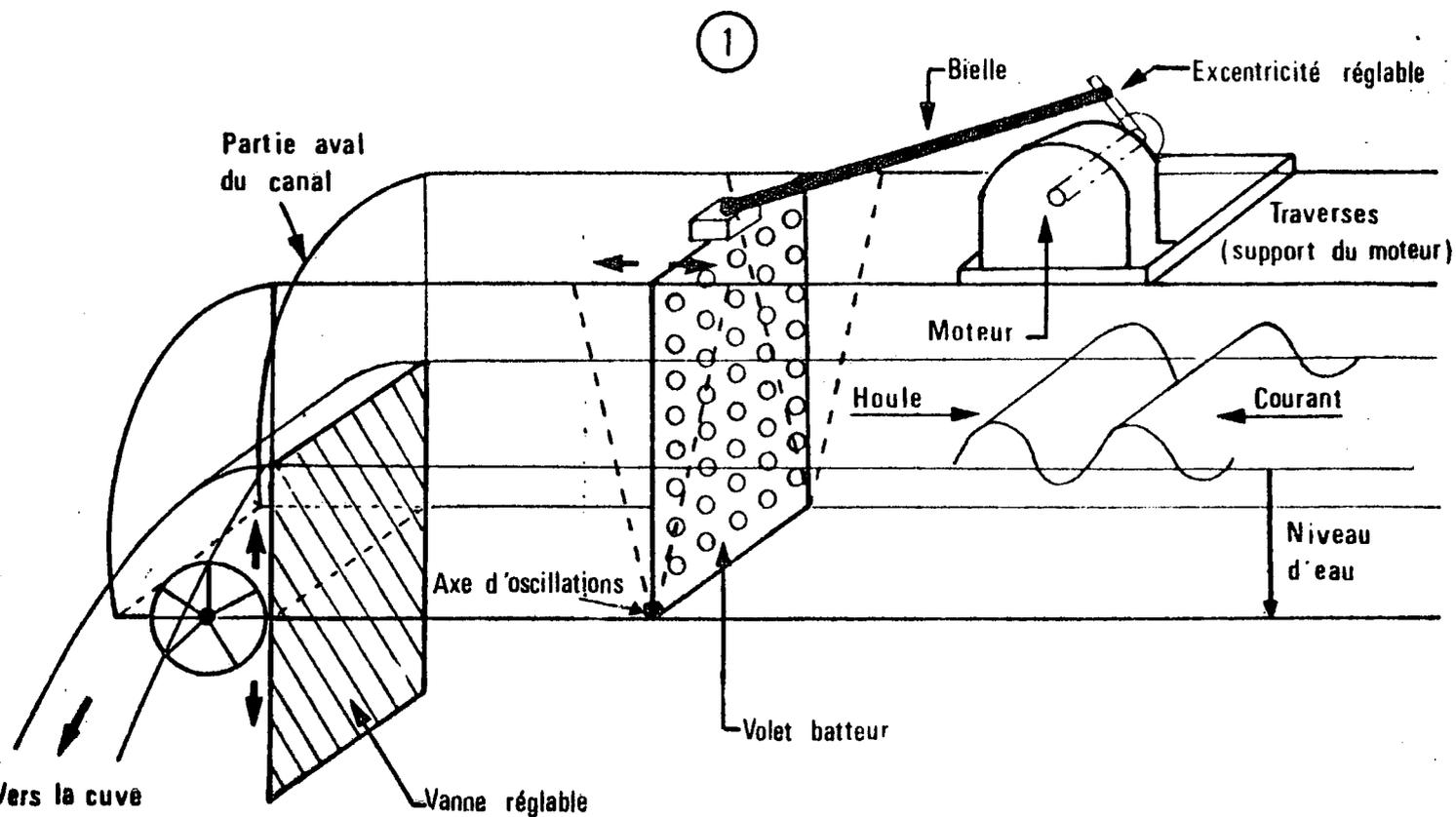
- Volet batteur

Il est constitué d'un élément métallique perforé sur l'ensemble de sa surface de manière à laisser évacuer le débit dirigé en sens inverse de la propagation de la houle s'effectuant d'aval en amont (voir schéma 1).

Ce volet batteur s'articule sur un axe autour duquel il oscille périodiquement. L'amplitude des oscillations est définie par l'excentricité "e" régissant l'amplitude de la houle reproduite "H".

- Groupe moteur et commandes

Le volet batteur est assujéti à un groupe moteur et armoire de commandes permettant la reproduction de houles en train d'ondes satisfaisant à une loi de distribution proche de celle définie par LOUGUET-HIGGINS.



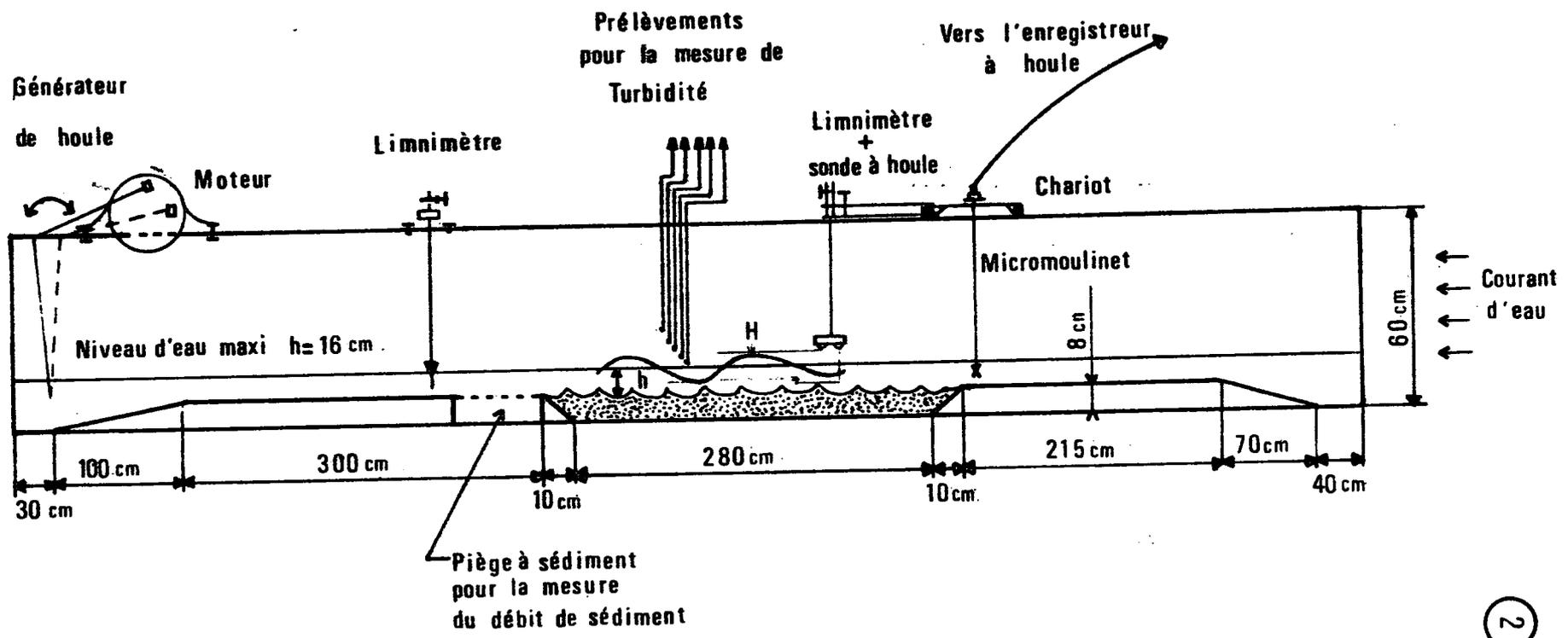
1 - 3 - APPAREILLAGE DE MESURES (fig. 2.)

1 - 31 - Les courants

Les mesures de vitesses sont faites à l'aide de micromoulinets immergés et dont la position peut varier verticalement ou horizontalement de manière à définir la répartition des vitesses dans une section.

Les micromoulinets sont constitués d'une petite hélice métallique dont la rotation entre deux électrodes détermine les variations d'impédance transformées en impulsions transmises à un enregistreur graphique ou numérique.

**CANAL DE SEDIMENTOLOGIE
DISPOSITIF EXPERIMENTAL**



Echelle: $\frac{1}{50}$ (Plan)
 Echelle: $\frac{1}{20}$ (Hauteur)

1 - 32 - La houle

Les mesures s'effectuent à l'aide d'un enregistreur d'ondes électronique qui mesure la variation de résistance d'une électrode immergée dans l'eau, solidaire d'un chariot mobile pouvant se déplacer le long du canal.

L'alimentation se fait par un générateur à basse fréquence et la variation de résistance due à la fluctuation du niveau d'immersion de l'électrode sous la houle est amplifiée et enregistrée à l'aide d'un rapid'graph à déroulement continu.

1 - 33 - La turbidité

Un système de prélèvement réglable à différentes profondeurs permet d'évaluer la turbidité au-dessus du lit des sédiments mobiles.

1 - 34 - Le Matériau mobile

Un lit de sédiment sur lequel s'effectueront les observations des divers mouvements engendrés par les courants et la houle, est disposé au centre du canal sur 3 m de longueur, 0,40 m de largeur, et 10 cm d'épaisseur. (voir fig. 2)

Les oscillations et mises en mouvement du grain ainsi que les fluctuations de ce lit de sédiment seront caractérisées par méthodes visuelles et photographiques à travers la paroi vitrée.

1 - 35 - Le débit solide

La mesure du débit solide sera réalisée en cubant le matériau déposé dans un piège à sable disposé en aval de la propagation du courant, immédiatement après le lit de sédiment.

1 - 4 - CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX EXPERIMENTES

Plusieurs types de matériau artificiel susceptible de représenter la fraction sableuse du sédiment naturel ont été expérimentés.

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

1 - 41 - La Nacre

La densité est environ 1,22

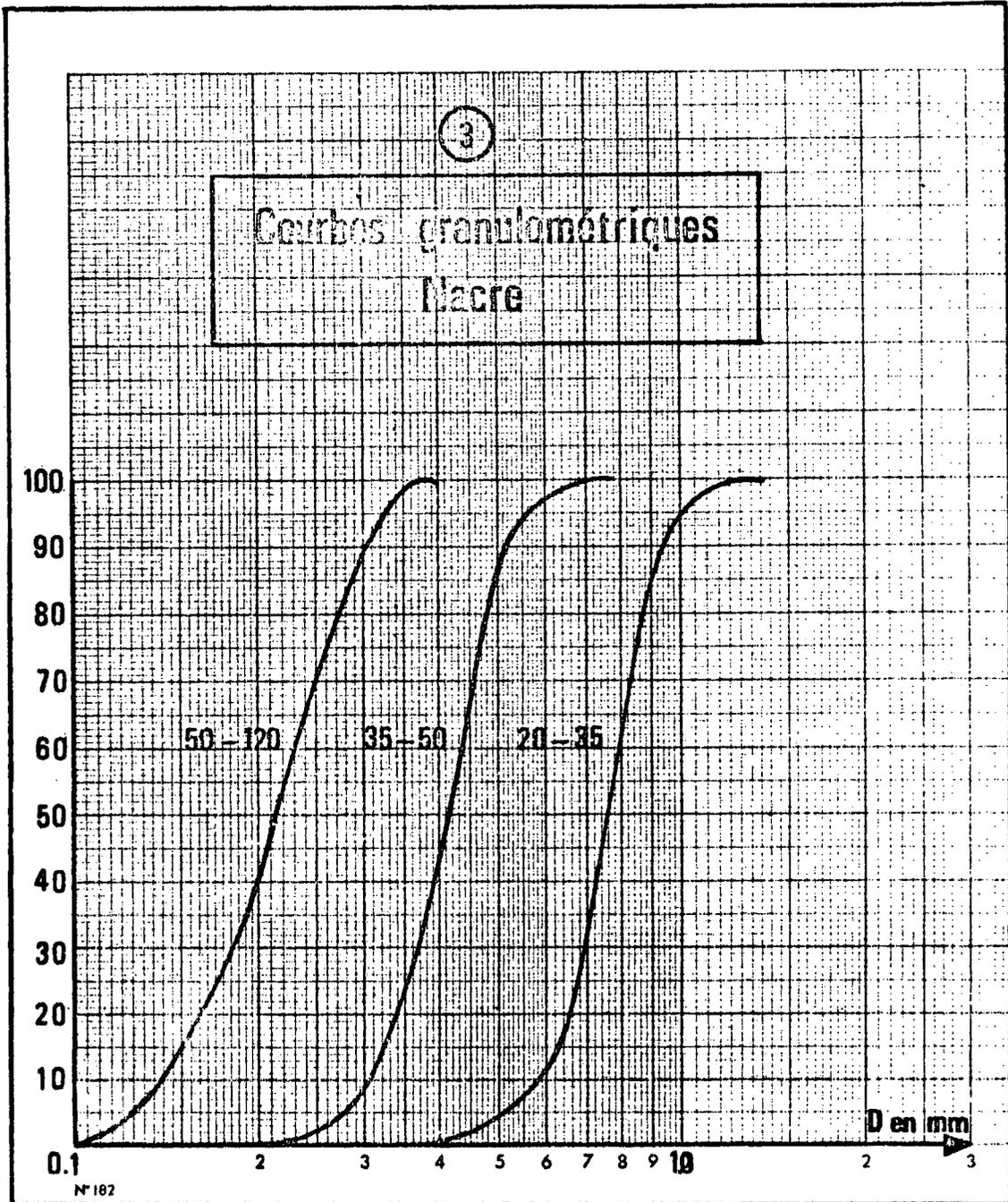
Les vitesses de chute, pour différents diamètres des grains sont données dans le tableau ci-dessous :

D en mm	0,10	0,20	0,30	0,50	1,00
V _c en mm/s	1,5	3	6	14	28

Trois granulométries, dont les indices correspondants à chaque catégorie figurent dans le tableau ci-dessous et les courbes de la fig. 3., ont été expérimentées.

Indices Catégories	D 90 mm	D 75 mm	D 50 mm	D 25 mm	D 10 mm
50 - 120	0,30	0,26	0,21	0,17	0,14
35 - 50	0,50	0,46	0,41	0,35	0,30
20 - 35	0,93	0,84	0,75	0,66	0,58

(voir fig. 3. ci-après).



1 - 42 - Polystyrène

La densité est environ 1,05

Les vitesses de chute de la granulométrie expérimentée à savoir la catégorie 50 - 120 donnée sur la fig. 3 ci-dessus, sont résumées dans le tableau ci-dessous.

D en mm	0,10	0,30	0,50	0,60
V_c en mm/s	1	3,3	5,5	7

1 - 43 - Styvarène

La densité de ce matériau léger est également voisine de 1,05 mais il se différencie du précédent, de par sa granulométrie relativement homogène avec un diamètre moyen de 2,5 mm caractéristique d'un matériau beaucoup plus grossier. A noter que le diamètre reste compris entre 1,8 et 4 mm environ. La forme des grains est proche de celle d'un cylindre.

Les vitesses de chute de ce matériau sont liées au diamètre du grain avec $3,8 \text{ cm/s} < V_c < 5 \text{ cm/s}$

1 - 5 - CARACTERISTIQUES D'ESSAIS *

1 - 51 - Niveau de l'eau

Les mesures ont été faites à niveau constant, la cote d'eau étant réglée de manière à faire agir les courants à des niveaux voisins de PMVEE et BMVEE par profondeur de 10 m environ en nature. Deux hauteurs d'eau ont donc été adoptées à savoir, 10 et 16 cm au-dessus du fond. (10 à 16 m en nature).

1 - 52 - Les courants

Les courants unidirectionnels engendrés dans le canal seront augmentés progressivement de telle sorte que la vitesse moyenne maximale reproduite n'exécède pas 2,5 à 3,0 m/s, valeur supérieure des courants susceptibles d'être observés en nature.

Cette vitesse moyenne sera définie en relevant le gradient des vitesses à l'aide d'un micromoulinet déplacé sur une radiale verticale au-dessus du matériau mobile.

Ainsi il sera possible de déterminer la vitesse critique d'entraînement des matériaux ainsi que le débit solide pour différentes vitesses du courant.

1 - 53 - Les houles

Les houles en train d'ondes reproduites auront une période de 7 sec, l'amplitude étant augmentée progressivement entre 0,50 m et environ 3,00 m/nature.

Rappelons que le sens de propagation de la houle est inverse de celui des courants.

* En cours d'essai toutes les valeurs caractérisant les résultats obtenus seront donnés en valeurs/maquette.

CHAPITRE II

- RESULTATS EXPERIMENTAUX

INTERPRETATION

Cette étude destinée à caractériser les mouvements des matériaux, d'une part sous la seule action d'un courant, d'autre part sous l'action combinée de la houle et d'un courant a permis de mettre en évidence et de définir :

- le début d'entraînement des grains avec :
 - . V_m (cr) vitesse moyenne critique
 - . U_{*cr} vitesse de cisaillement critique
- la nature, l'importance de la vitesse de déplacement des ondulations de fond (rides ou dunes) avec :
 - . λ la longueur d'onde
 - . η l'amplitude
 - . U_r la vitesse de déplacement
- le débit solide avec :
 - . Q_c , valeur expérimentale du débit piégé dans le tamis
 - . Q'_c , valeur expérimentale du cumul du débit dans le tamis et hors du tamis
 - . Q_r valeur calculée à partir des rides
 - . Q_{sc} valeur moyenne du débit
- la turbidité
 - . Y_t hauteur de la zone turbide

Différents matériaux ayant été expérimentés les résultats propres à chacun d'entre eux seront présentés et exploités de manière à faire un choix ultérieur de celui à retenir pour le modèle sédimentologique à trois dimensions.

2 - 1 - ACTION D'UN COURANT SEUL

2 - 11 - La Nacre

Trois granulométries définies au paragraphe 1 - 41 ont été expérimentées et nous exposerons séparément les résultats obtenus pour chaque catégorie.

A/ Nacre I (20-35) - $D_{50} = 750 \mu$

- Résultats expérimentaux

Ils sont groupés dans le tableau I ci-joint où figurent également l'évaluation des différents critères de mouvement de la nacre à savoir le début d'entraînement, les ondulations de fond et le débit solide.

- Début d'entraînement

La définition physique du début d'entraînement est subjective et peut dépendre de l'observateur. On trouve dans certains ouvrages que ce seuil de début de mouvement correspond au départ du premier grain, alors que dans d'autres, c'est le mouvement généralisé des grains qui correspond à ce seuil. Devant cette ambiguïté, on a décidé de faire à chaque fois deux mesures de début d'entraînement. La première mesure est relative un "départ faible" où l'on considère que le seuil est atteint dès qu'on observe le déplacement de quelques grains.

La deuxième mesure est relative à un "départ fort" où le début d'entraînement est considéré atteint lorsque presque tous les grains superficiels sont en mouvement.

On a ainsi pour chaque matériau et pour chaque profondeur d'eau deux limites pour la vitesse de cisaillement critique. Pour la Nacre I on trouve :

. profondeur 10 cm	$0,63 \text{ cm/s} < U_*(cr) < 0,66 \text{ cm/s}$
. profondeur 16 cm	$0,59 \text{ cm/s} < U_*(cr) < 0,69 \text{ cm/s}$

Par ailleurs ces résultats expérimentaux ont été portés dans le plan de SHIELDS transformé : [1]

$$\left(\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\rho v^2}} D^3, \tau_*(cr) \right) \quad \text{voir fig. 4.}$$

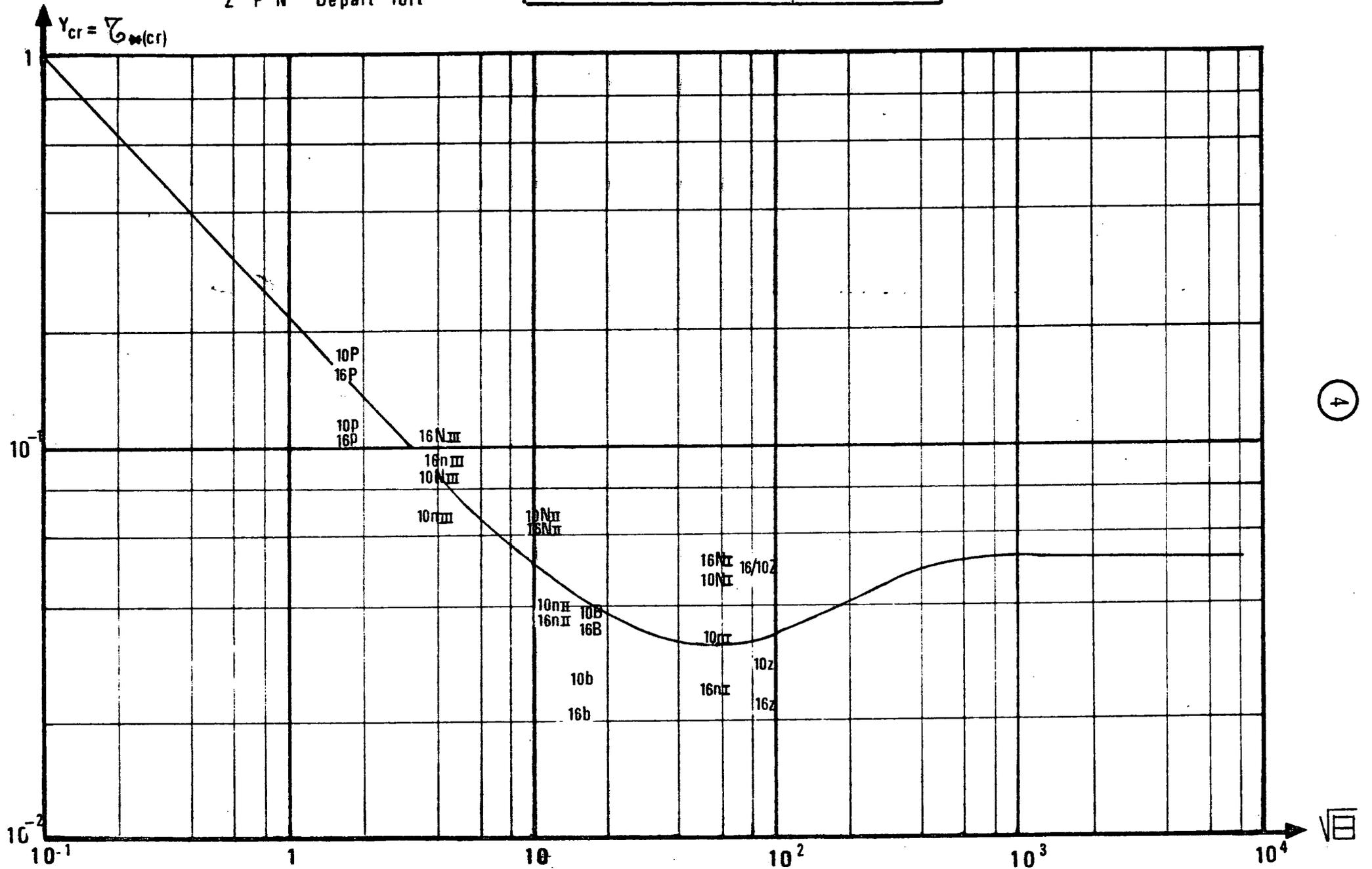
La prédiction de SHIELDS est :

$$U_*(cr) \neq 0,61 \text{ cm/s}$$

z p n Départ faible

Z P N Départ fort

Courbe de SCHIELDS transformée



Valeur équivalente à celle obtenue avec un départ faible.

- Ondulations du fond.

Les relevées des profils du fond sont faites pendant les 20 premières minutes de l'essai.

Les mesures de la longueur d'onde sont portées dans le plan $\left(\frac{\lambda}{h}, Fr\right)$ pour les comparer à la courbe de BOUSSINESQ (fig. 5.) et elles ont été reportées dans le plan $\left(\frac{\lambda}{D}, Fr\right)$ pour les comparer aux formules du S. YALIN et J. LARRAS (fig. 6). D'où l'on tire selon : BOUSSINESQ, LARRAS, et S. YALIN [2] les valeurs suivantes de λ en cm.

h. en cm	Fr	BOUSSINESQ	S. YALIN	J LARRAS	Valeur expérimentale de λ
10	0,22	10	65	84	24
16	0,20	14,4	65	84	19

$$\lambda = \pi\sqrt{2} \cdot h \cdot Fr$$

$$\lambda = a \cdot D$$

a entre 800 et 10³

d'après des mesures en nature pour du sable
D = 0,3 mm

valeurs moyennes sur plusieurs essais

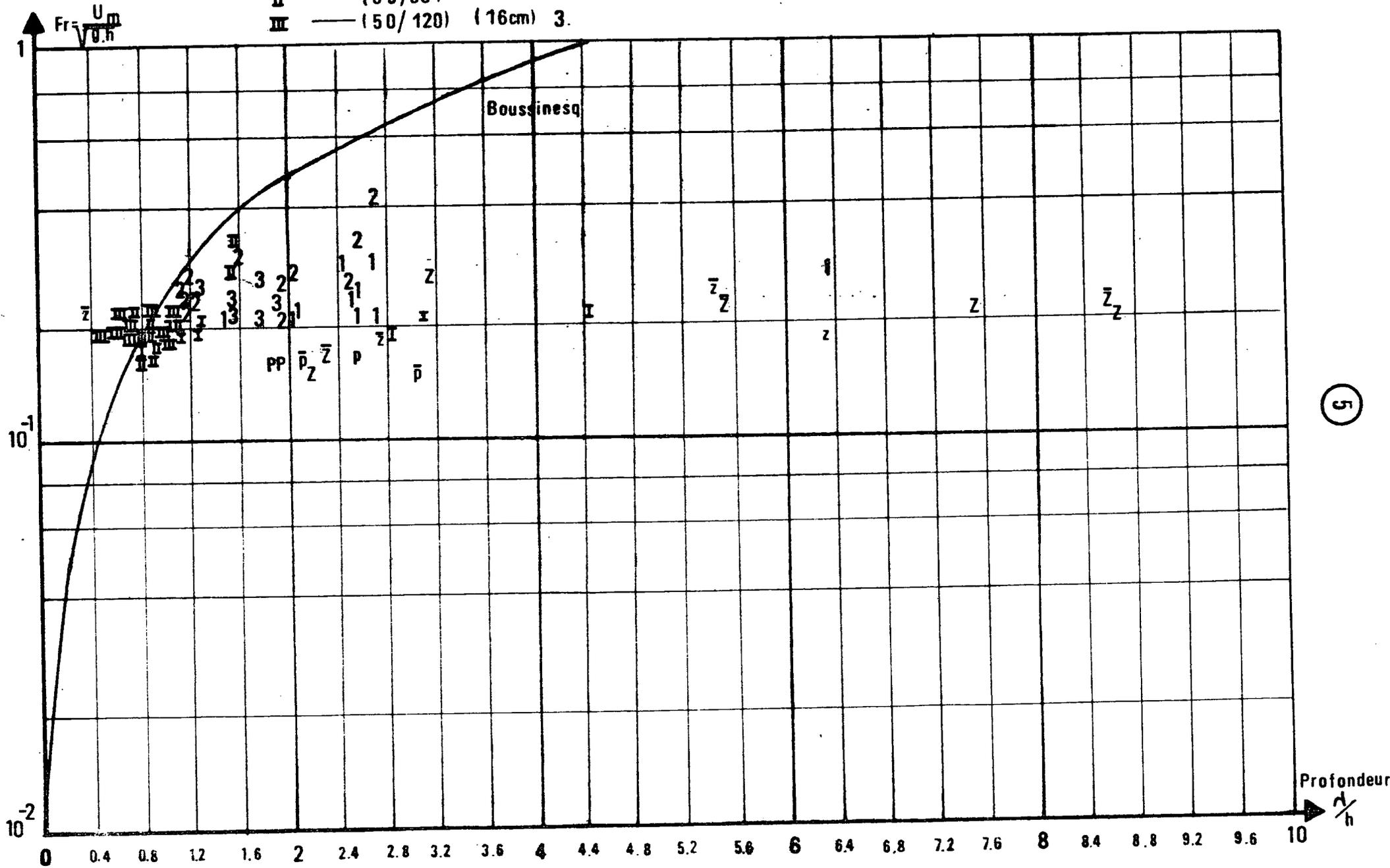
Ce tableau fait apparaître une assez bonne concordance avec BOUSSINESQ et YALIN, les valeurs expérimentales obtenues étant intermédiaires.

Les mesures de l'amplitude des ondulations sont portées dans le plan

$\left(\frac{\eta}{\lambda}, \frac{\tau_*}{\tau_* cr}\right)$ et elles sont comparées aux résultats expérimentaux de S.YALIN. [3] voir courbes (fig. 7 et 8).

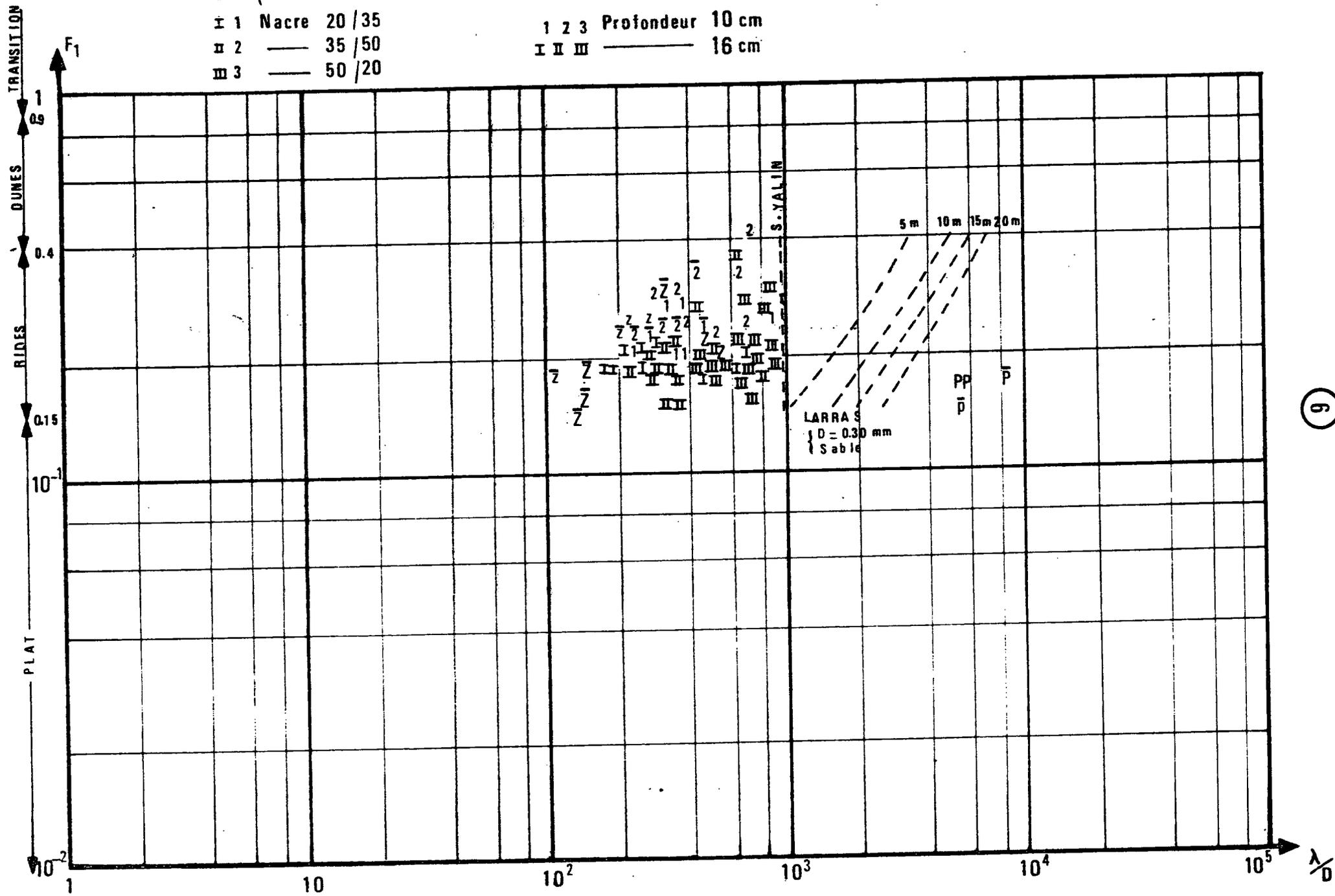
72 % des points s'alignent avec le nuage expérimental de S.YALIN dans le cas où on prend $\tau_*(cr)$ correspondant au départ faible (fig. 7). Par contre, pour $\tau_*(cr)$ relatif au départ fort aucun point n'est dans le nuage (fig. 8).

- I Nacre (20/35) (16 cm) 1
- II — (35/50) (16 cm) 2
- III — (50/120) (16 cm) 3.



— (Courant + Houle)
 Z P (Profondeur 10 cm)
 Z P (——— 16 cm)
 I 1 Nacre 20 / 35
 II 2 ——— 35 / 50
 III 3 ——— 50 / 20

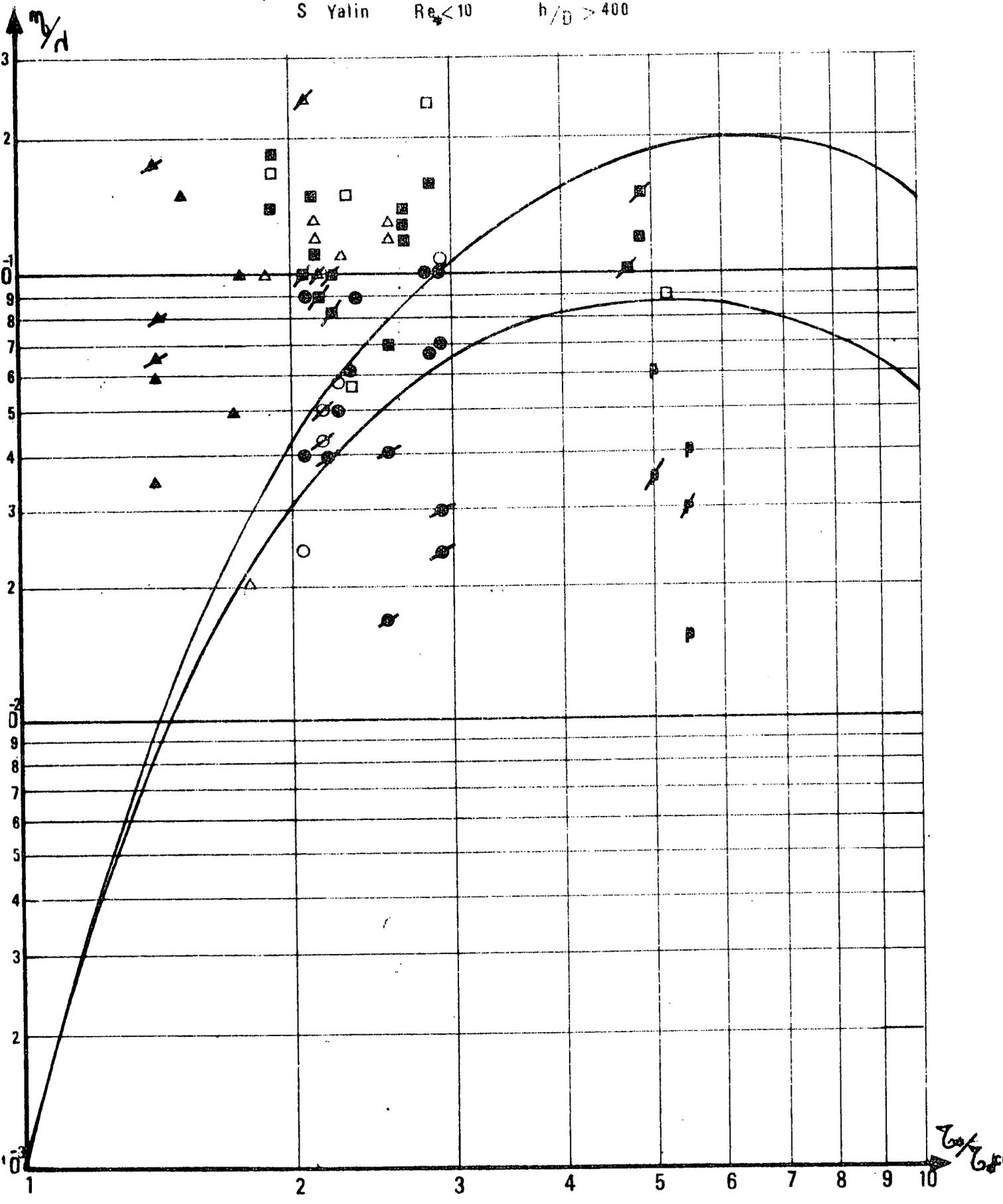
1 2 3 Profondeur 10 cm
 I II III ——— 16 cm



DEPART FAIBLE

Profondeur : 16cm 10cm

- Ⓟ Polystyrène 50/120
- Nacre 20/35
- ◻ Nacre 35/50
- ▲ Nacre 50/120
- / Houle + Courant
- S Yalin $Re < 10$ $h/d > 400$



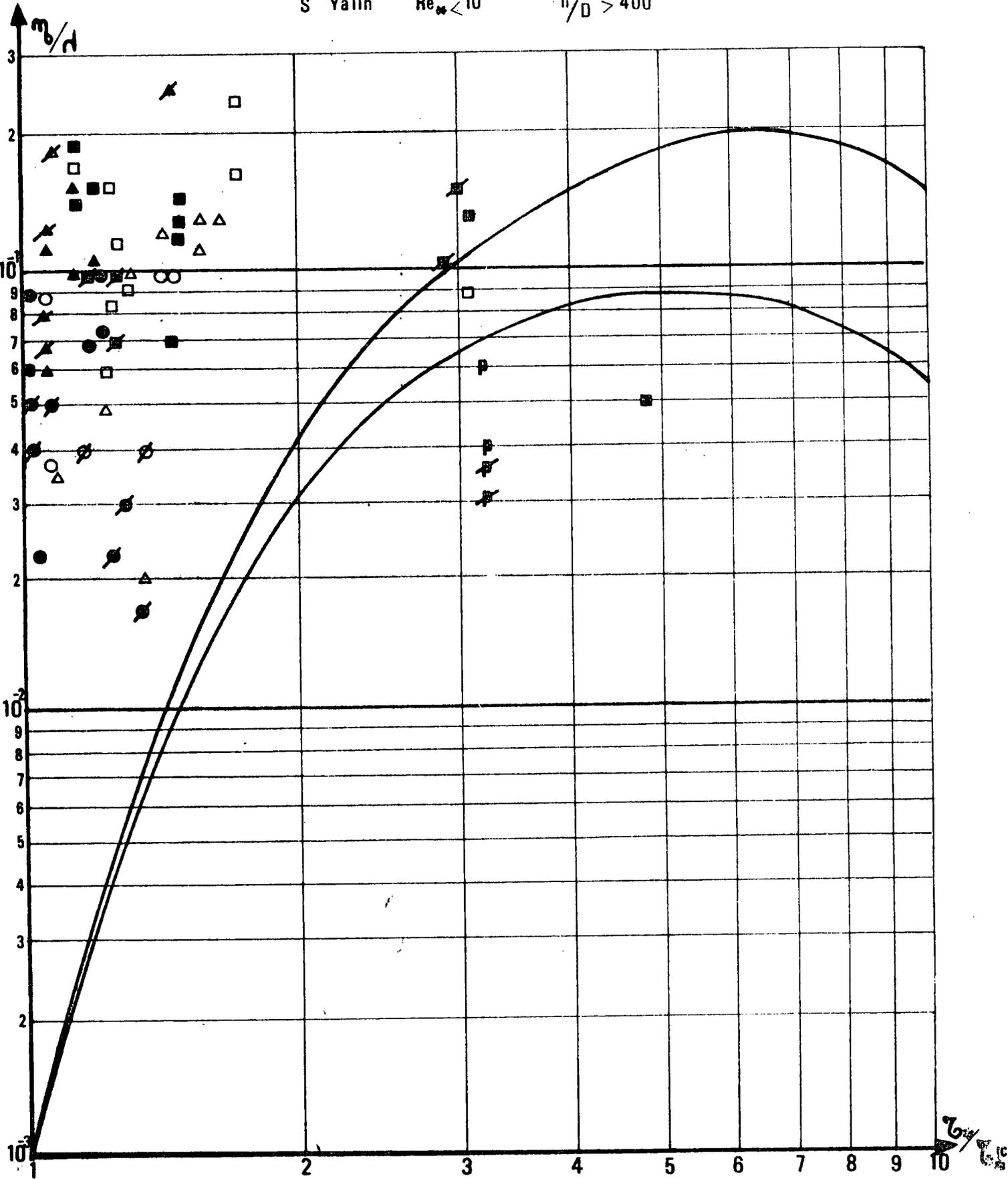
6/68

DEPART FORT

Profondeur : 16 cm 10 cm

- p Polystyrène 50/120
- ○ Nacre 20/35
- □ Nacre 35/50
- ▲ △ Nacre 50/120
- / Houle + Courant
- S Yalin $Re_* < 10$

$h/D > 400$



D'après S.YALIN le rapport $\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max}$ est :

$$\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max} = 1/16 \quad \text{si} \quad R_{e*} > 31,62 \quad \text{et si} \quad \frac{h}{D} > 100$$

$$\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max} = \frac{1}{5} \text{ à } \frac{1}{10} \quad \text{si} \quad R_{e*} < 10 \quad \text{et si} \quad \frac{h}{D} > 400$$

Pour des vitesses de courant de 18 à 20 cm/s et pour les deux cas de profondeur 10 cm et 16 cm on a :

$$R_{e*} < 10 \quad \text{et} \quad \frac{h}{D} > 400$$

D'après les mesures de η et λ on a trouvé :

$$\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max} = 1/8 \quad \text{pour} \quad h = 10 \text{ cm}$$

et

$$\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max} = \frac{1}{9} \text{ ou } \frac{1}{10} \quad \text{pour} \quad h = 16 \text{ cm.}$$

Ceci est bien en accord avec les prédictions de S. YALIN indépendamment du début d'entraînement, qu'il soit "faible" ou "fort".

- Débit solide

Très peu de sédiment s'est déposé au delà du tamis, par suite de la quasi inexistence de suspension. Les transports solides sont dans ce cas exclusivement dûs au charriage.

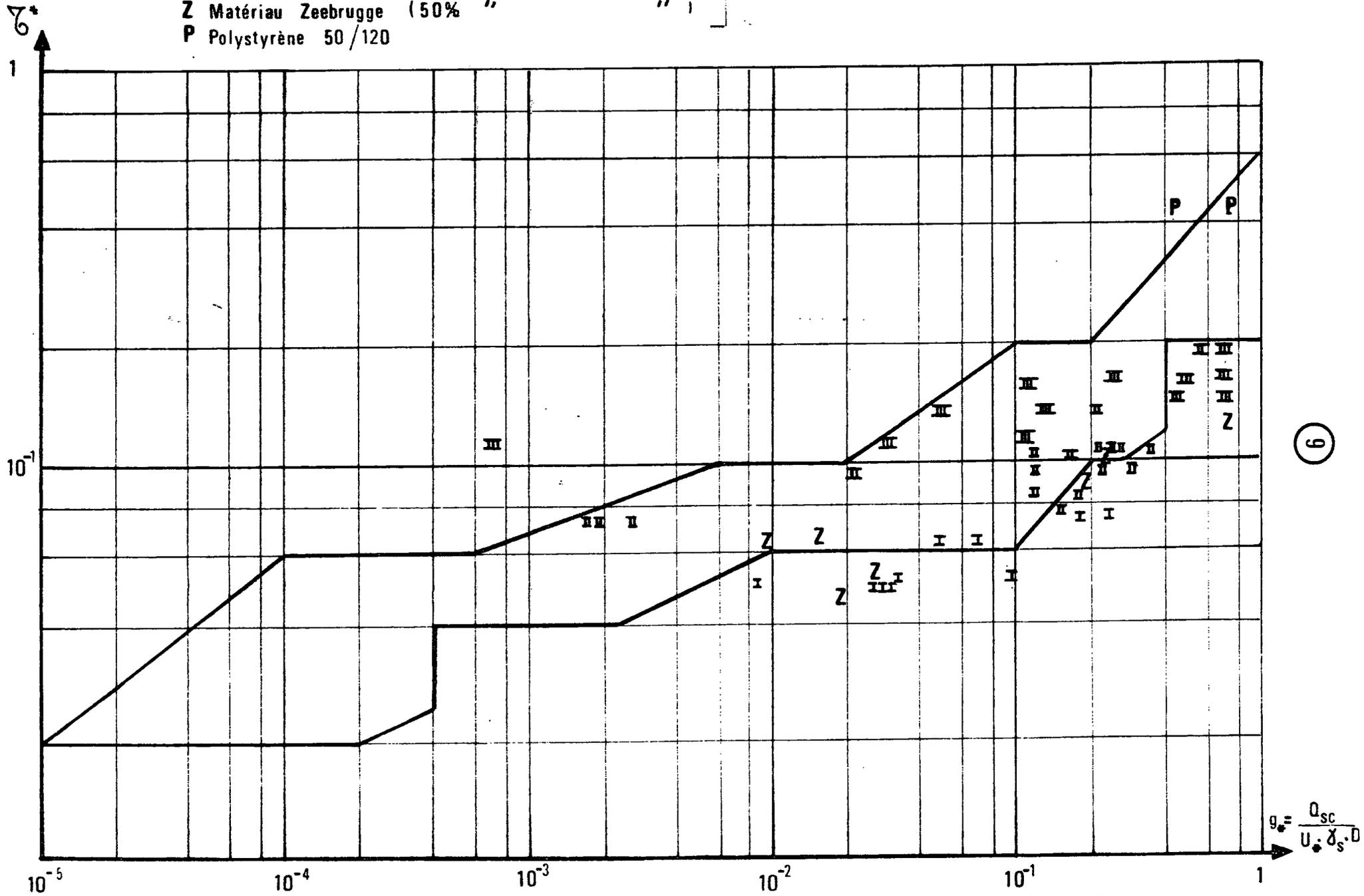
Les débits solides mesurés sont portés dans le plan (τ_*^*, Q_{sc}^*) et ils sont comparés aux résultats obtenus au laboratoire de HANOVRE [4] (voir fig. 9)

On voit que 30 % des points s'alignent bien avec le nuage et les 70 % restants tangentent le nuage. Ceci confirme, ainsi que les essais présentés ci-après, la loi expérimentale :

$$Q_{sc}^* = 1860 \tau_*^{4,8} \quad \text{ou} \quad \tau_* = 0,2 Q_{sc}^{0,2}$$

Qui est l'équation de la droite moyenne du nuage des points expérimentaux de HANOVRE. [4]

- | | | | |
|-----|--------------------|-------------------------------|--------------------|
| I | Nacre 50/120 | (54% dans le nuage Hanovre) | } (51% en moyenne) |
| II | Nacre 35/50 | (65% " ") | |
| III | Nacre 20/35 | (30% " ") | |
| Z | Matériau Zeebrugge | (50% " ") | |
| P | Polystyrène 50/120 | | |



B/ Nacre II (35/50) - D_{50} : 410 μ

- Généralités et résultats expérimentaux

Pour ce qui concerne le profil du fond et son évolution, ce matériau se comporte presque de la même manière que le précédent. Le diamètre des grains étant plus petit, ce matériau doit pouvoir se mettre en suspension plus facilement que le précédent. Ceci est parfaitement confirmé par l'expérience. Pour la profondeur 10 cm on a relevé quatre mesures de turbidité et pour la profondeur 16 cm on a fait trois mesures de turbidité.

Les mesures détaillées sont regroupées sur le tableau II₁

- Début d'entraînement.

Du fait que les grains sont plus petits, ils ont moins d'inertie, et ils sont entraînés plus facilement sur le fond. En effet, les vitesses critiques de début d'entraînement qu'on a obtenues avec ce matériau sont légèrement plus faibles que celles obtenues avec la nacre I.

Pour ce matériau on trouve :

. profondeur 10 cm 0,59 cm/s < $U_* cr$ < 0,75 cm/s

. profondeur 16 cm 0,58 cm/s < $U_* cr$ < 0,73 cm/s

De même que précédemment les résultats sont portés sur le plan

$$\left(\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\rho v_*^2}} D^3, \tau_* (cr) \right) \quad \text{voir fig. 4.}$$

La prédiction de SHIELDS est : $U_* cr = 0,61$ cm/s qui correspond à 3 % près d'erreur aux valeurs obtenues avec un "départ faible".

- Ondulations du fond.

On constate également que la vitesse d'avancement des rides, pour une même vitesse du courant et une même profondeur d'eau, est plus grande avec la nacre II qu'avec la nacre I. Ce qui est prévisible puisque les grains isolés de la nacre II sont plus légers.

D'après S. YALIN, la longueur d'onde des rides ne dépend que du diamètre des grains, qui selon J. LARRAS ou BOUSSINESQ, dépend aussi du nombre de FROUDE et de la profondeur d'eau.

S.YALIN :

$$\lambda_{rides} = (\text{constante})_r \cdot D$$

$$\lambda_{dunes} = (\text{constante})_d \cdot D.$$

J. LARRAS :

$$\lambda_{rides} = 16 \cdot D \cdot \left(\frac{V_m}{V_c}\right)^{1,2} \text{ pour du sable de } 0,3 \text{ mm de } \phi$$

V. BOUSSINESQ :

$$\lambda_{rides,dunes} = \pi \sqrt{2} \cdot h \cdot Fr$$

$\lambda =$

h	Fr	V. BOUSS	S. YALIN	S. LARRAS	Résultat des essais	BOUSS + YALIN 2
10 cm	0,22	9 cm	35 cm	87 cm	17,7 cm	22,0
	0,25	11 cm		84 cm	17,0 cm	23,0
	0,34	14 cm		140 cm	25,4 cm	24,5
	0,41	17 cm		175 cm	26,1 cm	26,0
16 cm	0,21	14,4 cm	35 cm	105 cm	13,6 cm	24,5
	0,25	17,6 cm		140 cm	17,1 cm	26,3
	0,32	22,4 cm		154 cm	24,8 cm	26,7

en nature
pour du
sable de
0,3 mm.

Les résultats ci-dessus et ceux obtenus avec le matériau précédent nous permettent de faire trois remarques :

- 1° - La longueur d'onde des ondulations du fond semble varier dans le même sens que le nombre de FROUDE.
- 2° - Les résultats expérimentaux donnent des valeurs de λ intermédiaires entre les prédictions de V. BOUSSINESQ et celles de S. YALIN dont la moyenne arithmétique donne des valeurs voisines de celles obtenues à partir des essais.
- 3° - La longueur d'onde λ varie dans le même sens que le diamètre représentatif des grains.

Le maximum du rapport $\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)$ sachant que $(R_{e*} < 10$ et $\frac{h}{L} > 400)$ est de :

$$\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{max} = 1/6 \quad \text{pour } h = 10 \text{ cm.}$$

$$\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{max} = 1/7 \quad \text{pour } h = 16 \text{ cm.}$$

Ceci confirme encore les limites de S. YALIN. $\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{max} = 1/5$ à $1/10$.

De même que précédemment ; les résultats des mesures des amplitudes sont portés sur le plan $\left(\frac{\eta}{\lambda}, \frac{\tau_* / \tau_*(cr)}{\dots}\right)$ de S. YALIN. (fig. 7 et 8).

Pour τ_* (cr) relatif au "départ faible" on trouve 31 % des points dans la zone délimitée par les deux courbes. Par contre pour τ_* (cr) relatif à un départ fort des grains, on trouve seulement 10 % des points qui sont conformes aux résultats de S. YALIN. [3]

- Débit solide

Les dépôts hors tamis sont plus importants que dans le cas précédent. Ceci est dû essentiellement à la suspension. Le transport par charriage représente à peu près six fois la transport en suspension, et ceci pour les vitesses fortes supérieures à 25 cm/s. Pour des vitesses de l'ordre de 20 cm/s la suspension est relativement plus importante, elle représente le 1/3 du charriage (voir le détail des mesures sur le tableau II). Par comparaison aux essais de HANOVRE (fig 9) on trouve que pour ce matériau 65 % des points sont dans le même alignement que les essais de HANOVRE, [3] les 35 % restants encore très proches du nuage.

C/ Nacre III (50 - 120) - $D_{50} \approx 200 \mu$

- Début d'entraînement

Ce matériau caractérisé par un diamètre moyen de l'ordre de 200 μ est constitué de grains plus petits que ceux des deux matériaux précédents. Les mesures (voir tableau III) ont montré qu'il faut, dans ce cas, plus d'énergie pour atteindre le seuil du début d'entraînement, contrairement au raisonnement qu'on a utilisé pour expliquer que la nacre 35/50 s'entraînait plus facilement que la nacre 20/35. Cette contradiction apparente résulte d'un phénomène de cohésion. En effet, il existe une tension intergranulaire qui rend ce matériau plus ou moins cohésif, compte tenu de la dimension de ses grains. La nacre I (20/35) et la nacre II (35/50) sont constituées de grains ayant des diamètres tels que la cohésion est négligeable par rapport aux contraintes de cisaillement qu'il faut appliquer sur la couche superficielle de ces matériaux pour créer le début d'entraînement. Par contre avec la nacre III (50/120) on tombe dans un intervalle de dimensions plus petites des grains, où la cohésion n'est plus négligeable.

Dans ce cas, ce n'est plus seulement l'inertie propre du grain qui lutte contre le déplacement de celui-ci mais aussi les tensions qui le lient aux grains voisins.

On peut aussi remarquer que plus un matériau est cohésif et moins le gradient d'énergie entre un début d'entraînement faible (où uniquement quelques grains commencent à se déplacer) et un début d'entraînement fort (où tous les grains superficiels se mettent en mouvement) est important.

La comparaison des résultats ci-après donnant $\Delta U_* \text{ cr} = U_* \text{ départ rapide} - U_* \text{ départ faible}$ met ce phénomène en évidence :

h = 10 cm	}	Nacre I (20/35)	$\Delta U_* \text{ (crit)} = 0,23 \text{ cm/s}$
		Nacre II (35/50)	$\Delta U_* \text{ (crit)} = 0,16 \text{ cm/s}$
		Nacre III (50/120)	$\Delta U_* \text{ (crit)} = 0,08 \text{ cm/s}$
h = 16 cm	}	Nacre I	$\Delta U_* \text{ (crit)} = 0,30 \text{ cm/s}$
		Nacre II	$\Delta U_* \text{ (crit)} = 0,15 \text{ cm/s}$
		Nacre III	$\Delta U_* \text{ (crit)} = 0,10 \text{ cm/s}$

En résumé, les résultats suivants ont été obtenus pour caractériser la vitesse de début d'entraînement de ce matériau Nacre III.

- . profondeur 10 cm $0,55 < U_* \text{ (cr)} < 0,63 \text{ cm/s}$
- . profondeur 16 cm $0,64 \text{ cm/s} < U_* \text{ (cr)} < 0,74 \text{ cm/s}$

Ces résultats sont portés sur le plan de SHIELDS (voir fig. 4.)

La prédiction de SHIELDS est :

$$U_* \text{ (cr)} = 0,62 \text{ cm/s}$$

- Profil du fond

Les rides obtenues ont une longueur d'onde en moyenne plus petite que celle observée avec le matériau précédent ce qui confirme l'hypothèse de la proportionnalité de la longueur d'onde λ par rapport au diamètre du grain. (hypothèse de S.YALIN).

On peut dégager aussi dans ce cas de matériau que le rapport maximum $\left(\frac{n}{\lambda}\right)_{\max}$ a été de l'ordre de $\frac{1}{7}$ pour la profondeur 10 cm et $\frac{1}{6}$ pour la profondeur 16 cm résultats en accord avec les résultats expérimentaux de S.YALIN. [3] (voir courbes 7 et 8).

Le tableau ci-dessous nous donne quelques valeurs mesurés de λ et celles qui leur correspondent selon V.BOUSSINESQ, S.YALIN ou LARRAS. [2]

h	Fr	V.BOUSS	S.YALIN	S.LARRAS	Résultat des essais
10 cm	0,20	8 cm	20 cm	42 cm	13,4 cm
	0,22	9 cm		48 cm	17,2 cm
	0,25	11 cm		56 cm	18,2 cm
16 cm	0,19	12,6 cm	20 cm	48 cm	13,6 cm
	0,21	14,4 cm		56 cm	13,7 cm

sable de
0,3 mm.

Les trois remarques précédentes sont encore valables pour ce cas. On remarque en plus que pour la profondeur 16 cm les prédictions de BOUSSINESQUE sont beaucoup plus proches des résultats des essais que les prédictions de S.YALIN.

Sur la fig 7, un seul point $\left(\frac{n}{\lambda} \cdot T_{*} / T_{*cr} \right)$ est dans le nuage de S.YALIN.

Cependant 50 % de ces points sont proches de la courbe extérieure de S.YALIN, ceci pour le cas d'un "départ faible". Le départ fort nous donne des points plus éloignés.

- Débit solide

La suspension est nette sur la plupart des essais à partir des vitesses de courant de l'ordre de 17,5 cm/s. Cette suspension représente d'après les résultats obtenus à peu près la moitié de la quantité transportée par charriage. Et à partir de ces mêmes vitesses la quantité de sédiment récupérée au-delà du piège à sédiment est quelque fois très importante pouvant atteindre 100 et 150 % de ce qui reste piégé dans le tamis. Ceci s'explique par la légèreté des grains, qui une fois décrochés du fond peuvent facilement, traverser le piège à sédiment sans y pénétrer où alors, tomber dans le tamis et en ressortir sous l'effet de l'agitation et de la turbulence.

- . Ces phénomènes ont rendu la mesure du débit plus délicate. C'est en partie, la raison pour laquelle on considère le transport par charriage, comme la moyenne des trois quantités :

$$Q_c, Q'_c \text{ et } Q_r \quad (\text{voir notation})$$

qui figurent sur les tableaux I, II et III de mesure relatif à chaque matériau. Ceci minimise l'erreur et diminue les dispersions entre les valeurs obtenues.

Afin de mettre en évidence les variations du débit solide pour chaque matériau étudié et de montrer à partir de quel seuil de vitesse V_m il devient caractéristique d'un mouvement notable. Les courbes de variations de $Q_{sc} = f(V_m)$ ont été tracées sur la fig. 10.

Les détails des mesures effectuées sur la nacre III (50/120) sont donnés dans le tableau III précité.

A noter que 54 % des points de mesures, sont dans la bande des essais de HANOVRE (voir fig. 9). Le reste des points ne sont pas très dispersés par rapport à ce nuage, une bonne partie d'entre eux peut encore être comptée comme étant dans le nuage.

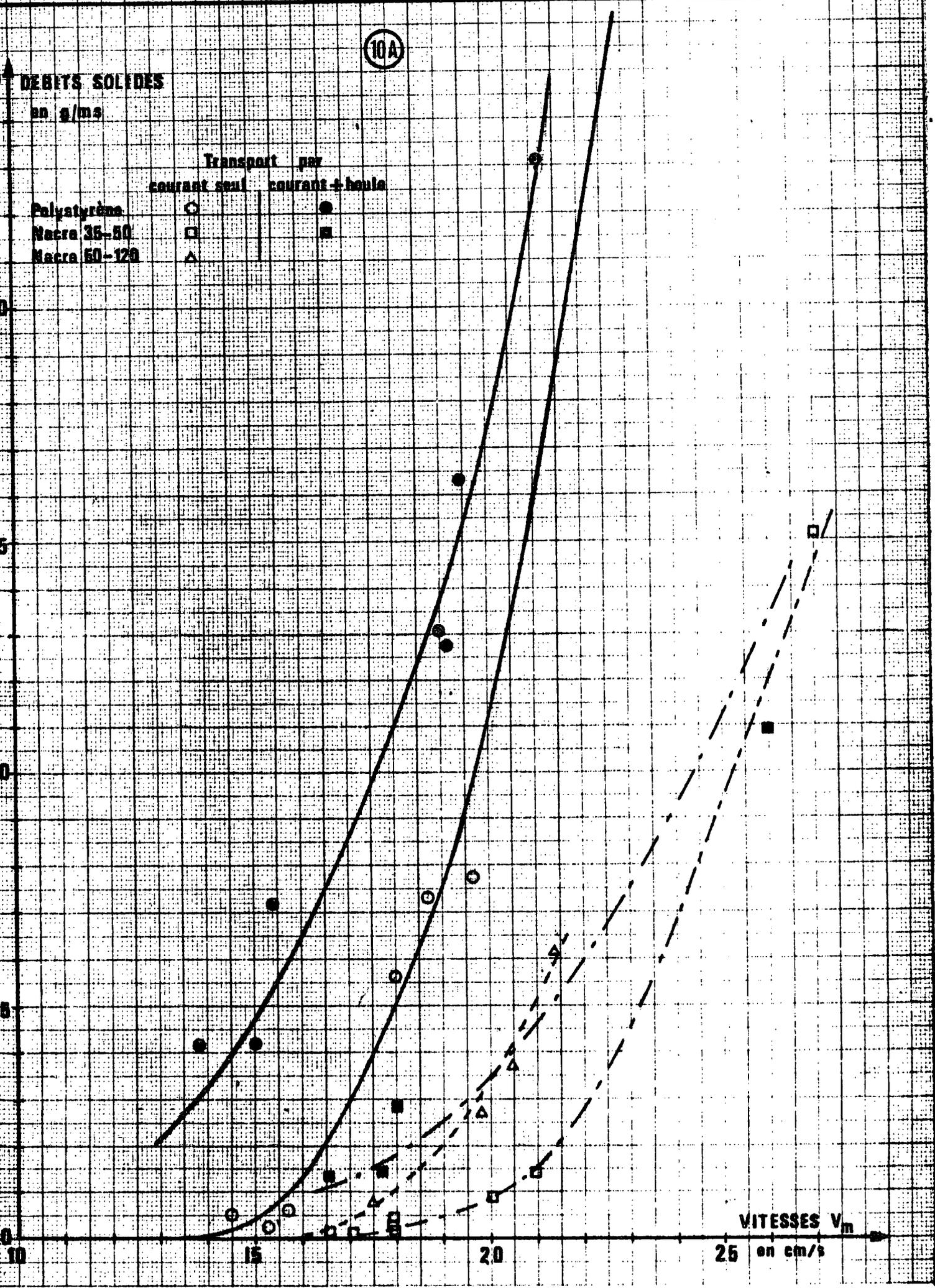
VARIATION DU DEBIT SOLIDE EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE

(10A)

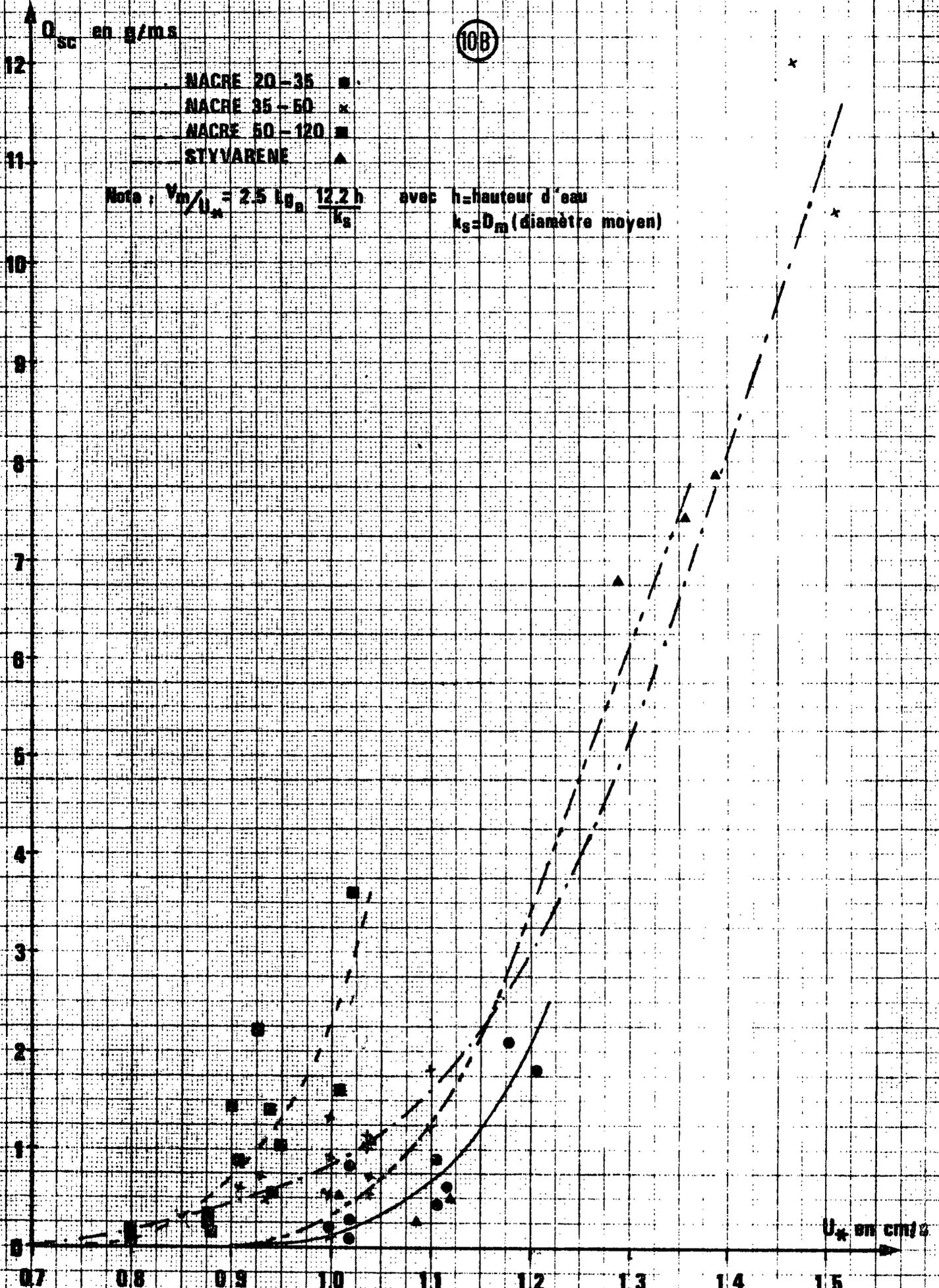
DEBITS SOLIDES
en g/ms

Transport par
courant seul courant + boue

Polystyrène ○ ●
Nacre 35-50 □ ■
Nacre 60-120 △



VARIATION DU DEBIT SOLIDE EN FONCTION DE LA VITESSE DE FROTTEMENT U_*



2 - 12 - Le Polystyrène

Le diamètre du grain représentatif est de l'ordre de 200 μ .

- Débit solide

Pour ce matériau une seule granulométrie a été testée vu les difficultés rencontrées dans sa manipulation, sa densité étant très proche de 1. Il se met très facilement en suspension, de sorte que les grains sont préférentiellement transportés au-delà du piège à sédiment, les résultats ci-dessous extraits du tableau IV, mettent ce phénomène en évidence :

$$\text{pour } v_m = 14,8 \text{ cm/s} \quad \text{on a : } \begin{cases} Q_c = 1,45 \text{ g/m.s.} \\ Q'_c = 3,75 \text{ g/m.s.} \end{cases}$$

avec Q_c : débit solide mesuré au niveau du Tamis

$Q'_c - Q_c$: débit solide mesuré hors tamis

c'est-à-dire qu'il se dépose 1,5 fois plus de sédiment au-delà du tamis que dans le tamis.

En moyenne la proportion de matériau récupérée au-delà du piège à sédiment est de l'ordre de 110 % par rapport à la quantité récupérée dans le piège, ces valeurs ne prenant pas en compte le transport en suspension entraînant le matériau au-delà des zones de récupération.

Ce matériau s'est assez mal comporté en ce qui concerne l'évolution du fond. On a observé une grande irrégularité dans la forme et dans la taille des rides. Les mesures étaient très incertaines et c'est, la raison pour laquelle, peu d'essais ont été effectués.

- Début d'entraînement

Le polystyrène s'aligne, aussi bien que la nacre, avec la courbe de SHIELDS.

$$\text{pour } h = 10 \text{ cm} \quad 0,35 \text{ cm/s} < U_*(cr) < 0,43 \text{ cm/s.}$$

$$\text{pour } h = 16 \text{ cm} \quad 0,33 \text{ cm/s} < U_*(cr) < 0,41 \text{ cm/s.}$$

La prédiction de SHIELDS est :

$$U_*(cr) = 0,38 \text{ cm/s.}$$

- Ondulations du fond

Les 3 mesures de $\frac{\eta}{\lambda}$ ont été portées en fonction de $\frac{\tau_*}{\tau_*(cr)}$.

On constate fig. 7 et 8 tant pour un départ fort que pour un départ faible, que tous les points sont dans la portion du plan délimitée par la plus petite courbe et l'axe $\tau'_*/\tau_*(cr)$ c'est-à-dire qu'ils sont en dehors du nuage de S. YALIN.[3]

2 - 13 - Le Styvarène

Ce matériau est constitué de grains de formes variables dont le diamètre moyen est de 2,5 mm. Sa densité est voisine de 1,05 - 1,06.

Les essais avec ce matériau ont montré qu'il se met très difficilement en suspension et qu'il est éventuellement transporté par charriage. Ainsi tous les grains qui arrivent au bord du tamis s'y accumulent sans possibilités de reprise. Ceci est dû essentiellement à la dimension grossière des grains. Ce matériau présente un comportement dynamique aussi convenable que la nacre I ou II en ce qui concerne surtout le début d'entraînement et le charriage.

- Début d'entraînement (voir tableau V)

pour $h = 10$ cm $0,70$ cm/s $< U_*(cr) < 0,91$ cm/s

pour $h = 16$ cm $0,62$ cm/s $< U_*(cr) < 0,91$ cm/s

L'écart entre le "départ faible" et le "départ fort" est net, ce qui est prévisible du fait de l'absence totale de cohésion entre les grains.

La prédiction de SHIELDS est : $U_*(cr) \neq 0,72$ cm/s.

et correspond donc au critère de "départ faible".

- Ondulations du fond

Sur le fond, il ne s'est formé que des dunes de longueur d'onde assez grandes, dépassant parfois la longueur totale du lit de sédiment. Les amplitudes de ces dunes sont variables avec la vitesse du courant et vont de 1,5 à 4,8 cm. La mesure de la vitesse d'avancement de ces dunes a été très difficile, vu le nombre limité de dunes formées. Les valeurs obtenues de U_r sont donc très incertaines.

Le rapport $\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max}$ est de $\frac{1}{25}$ à $\frac{1}{50}$ ce qui est très faible par rapport aux résultats obtenus avec la nacre. Mais dans ce cas de matériau $Re_* \neq 30$ donc > 10 . et $\frac{h}{D} < 400$ ce qui correspond d'après les essais de S.YALIN [3]

à $\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)_{\max}$ de l'ordre de $\frac{1}{16}$.

Il faut aussi noter, une certaine incertitude non négligeable, dans la mesure de l'amplitude η . Cette erreur est essentiellement due à la taille de la dune. Les longueurs d'onde ont été de l'ordre de 60 cm pour $h = 10$ cm et de l'ordre de 135 cm pour $h = 16$ cm.

Par rapport à la courbe de S.YALIN (expérimentale), les résultats obtenus sont en parfait accord. (voir fig. 11.)

- Débit solide

Le transport solide s'effectue uniquement par charriage. Ce charriage est mesuré à la fin de chaque essai, en pesant le sédiment récupéré dans le tamis. Les pertes sont très faibles, quelques grains seulement arrivent à franchir le tamis.

Par rapport aux essais de HANOVRE, 50 % des points sont dans le nuage et les autres sont peu éloignés. (voir fig. 9).

Tous les détails des mesures sont présentés dans le tableau V.

En résumé, on peut retenir les résultats qualitatifs suivants, relatifs au comportement dynamique de ce matériau, sous l'action d'un courant uniforme :

- . Peu de mise en suspension
- . Déplacement par roulement sur le fond
- . Pas de rides mais ondulations du fond sous forme de dunes.

2 - 14 - Mélanges

A/ Mélange : Nacre II et Sciure de bois (50 %. 50 %)

Ce mélange est constitué d'un matériau de densité très voisine de celle de l'eau donc très léger dans l'écoulement, et de la nacre 35/50 dont les grains sont assez petits ($D_{50} = 400 \mu$) sensiblement équivalents au diamètre moyen de la sciure. Ce mélange se déplace avec une proportion dominante de sciure en suspension.

Cet excès de suspension qui persiste après passage dans la cuve de décantation finale est réinjecté à l'amont par suite du fonctionnement au circuit fermé et rend les mesures de turbidités délicates.

- Début d'entraînement

Rappelons que d'une manière générale la notion de seuil de mouvement est assez mal définie pour un matériau de densité homogène. Cette définition est encore plus incertaine lorsqu'il s'agit d'un mélange de deux matériaux différents.

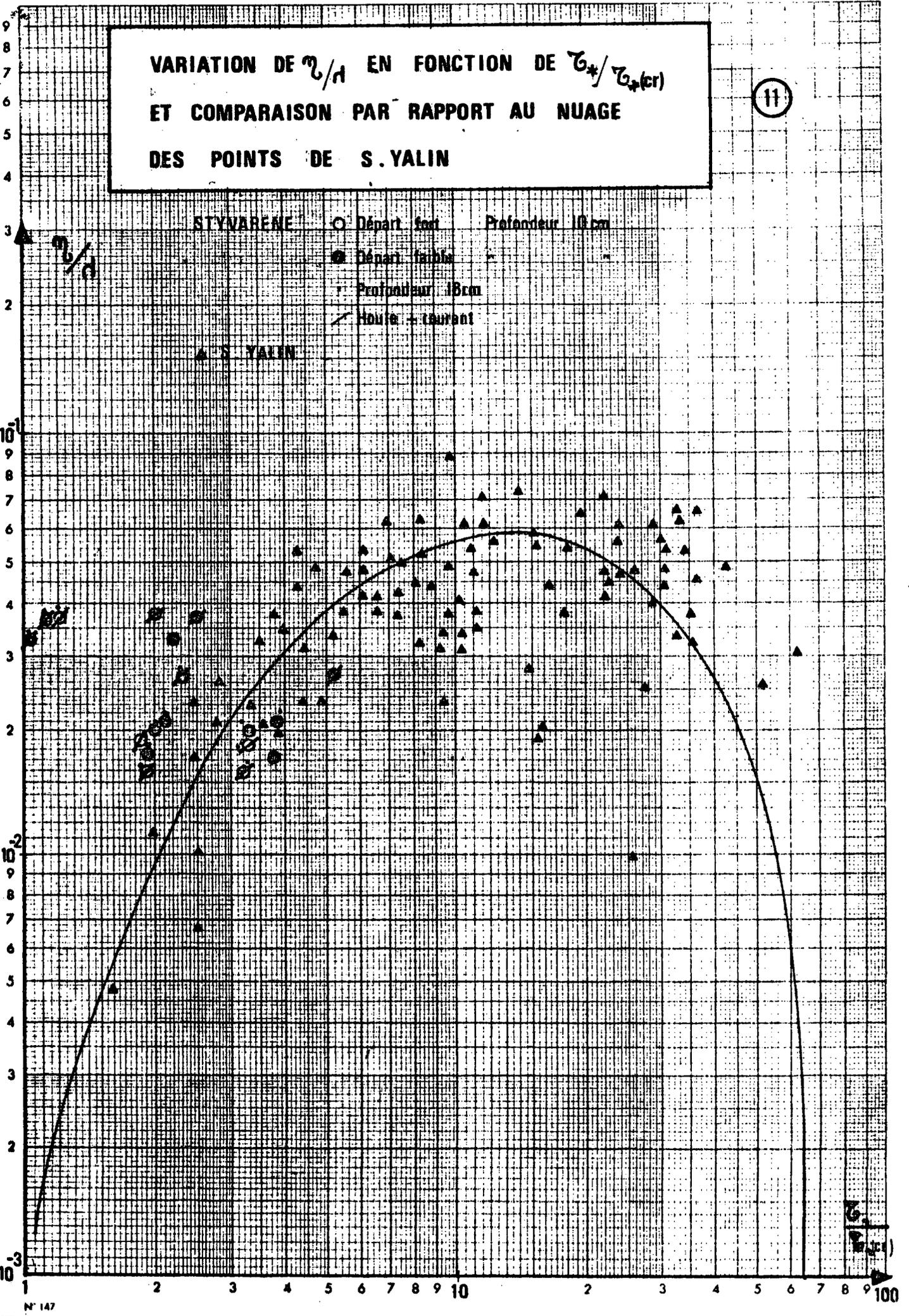
Les mesures du début d'entraînement, ont porté dans le cas de ce mélange sur le premier matériau mis en mouvement à savoir la sciure de bois nettement plus légère que la nacre. On trouve :

VARIATION DE η/d EN FONCTION DE $\tau_*/\tau_{*(cr)}$
 ET COMPARAISON PAR RAPPORT AU NUAGE
 DES POINTS DE S. YALIN

(11)

STYVARENE ○ Départ fort Profondeur 10 cm
 ● Départ faible Profondeur 18 cm
 / Heure + courant

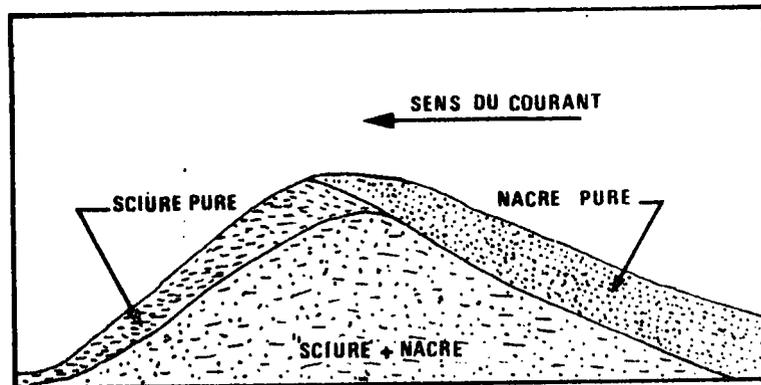
▲ S. YALIN



- . h = 10 cm 0,5 cm/s < U_{*cr} < 0,67 cm/s.
- . h = 16 cm 0,49 cm/s < U_{*cr} < 0,67 cm/s.

- Caractéristiques du fond

La sciure de bois est érodée dans la partie amont d'une ride et est déposée à l'aval de cette même ride, de telle manière que les ondulations sont conformes au schéma ci-dessous :



Si on résume les mesures de la longueur d'onde et de l'amplitude de ces ondulations on a en moyenne :

$$\text{si Fr } \# 0,20 \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda \quad \# \quad 20 \text{ cm} \\ \eta \quad \# \quad 1 \text{ cm} \end{array} \right. \quad \text{si Fr } \# 0,30 \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda \quad \# \quad 30 \text{ cm} \\ \eta \quad \# \quad 2 \text{ cm} \end{array} \right.$$

Les détails sont donnés dans le tableau VI.

- Débit solide

La proportion de chacun des deux matériaux dans le mélange récupéré dans le tamis, est très variable, suivant la vitesse du courant et suivant la durée de l'essai. Ceci rend difficile la mesure des débits respectifs et surtout l'interprétation des résultats de ces débits.

Le transport total en suspension représente 60 à 70 % du transport par charriage, 70 à 75 % du volume total étant de la sciure de bois, bien que 15 essais différents aient été effectués, il n'a pas été possible de tirer les conclusions très valables sur les résultats obtenus au cours de ces expériences.

Le principal inconvénient de ce mélange, est lié à l'inconstance des propriétés physiques de la sciure de bois.

Elle gonfle sous l'eau, son diamètre est donc variable et la détermination exacte de sa densité est difficile. En outre elle se transporte essentiellement en suspension.

B/ Mélange Nacre II et Styvarène

Deux types de mélanges constitués de deux pourcentages différents de chacun des constituants ont été expérimentés :

a/ Styvarène 70 %, Nacre II 30 %

b/ Styvarène 50 %, Nacre II 50 %

- Généralités

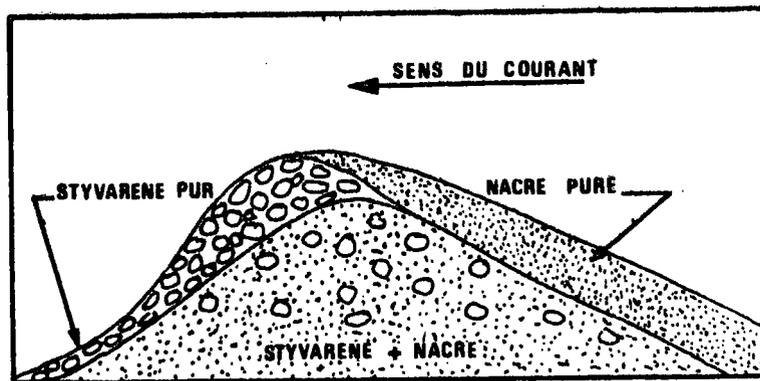
Avec ces mélanges seule la nacre se met en suspension alors que le Styvarène se déplace par charriage.

Le type de mélange, avec les proportions expérimentées influe peu sur la turbidité caractérisant la suspension. Par contre, le comportement du fond et les débits solides sont liés aux pourcentages introduits.

- Caractéristiques du fond

Avec le mélange 70 %, 30 % on voit apparaître une ségrégation des deux constituants, des dunes de Styvarène se formant dans la partie aval et une série de petites rides de nacre dans la partie amont du lit.

Par contre avec la proportion 50 % 50 %, les ondulations du lit sont des rides régulières de la forme :



La longueur d'onde moyenne est de 30 cm ($F_r \neq 0,20$) et l'amplitude moyenne est de 0,8 cm.

2 - 2 - ACTIONS SUPERPOSEES DE LA HOULE ET DES COURANTS

D'une manière générale, compte tenu des conditions expérimentales adoptées, à savoir propagation de la houle dans le sens opposé à celui du courant perturbant les écoulements, les résultats de ces essais ont subi une assez grande dispersion. En outre la complexité du problème "action combinée de la houle et des courants" sur le plan théorique (voir rapport : étude théorique des possibilités de reprise des sédiments par les courants et les houles) a rendu délicate la vérification ou l'interprétation des résultats expérimentaux.

- Début d'entraînement

Pour ce qui concerne le début d'entraînement sous la seule action de la houle, les résultats sont satisfaisants. Ayant défini le début d'entraînement dans le cas comme étant le mouvement généralisé des grains, sans transport, c'est-à-dire symétrie du mouvement ; on a porté ces résultats

dans le plan $\left(\frac{U_*^h D}{\nu} , \left(\frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{1/3} D \right)$ où $\rho' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$

} et U_*^h : vitesse de cisaillement au fond, due à l'action de la houle.

On constate alors (voir fig. 12) que la nacre I, II et le styvarène s'alignent bien et mieux que la nacre III ou encore plus le polystyrène. Quelque soit la profondeur d'eau à l'équilibre (10 cm ou 16 cm). La loi par rapport à laquelle on a comparé nos résultats est une loi expérimentale résultant d'un très grand nombre d'essais avec des matériaux divers.

Dans le cas des mélanges le problème est très complexe, et il est évident qu'on conçoit très mal dans ce cas la définition d'un début d'entraînement, en particulier lorsque les deux constituants sont non seulement de granulométrie différente (très éloignée) mais aussi de densité différente (Nacre 35/50 + Styvarène).

- Caractéristiques des ondulations du fond

Compte tenu du nombre nécessairement limité d'essais réalisés, il est très difficile d'étudier le comportement du fond quantitativement en fonction des données de la houle et du courant.

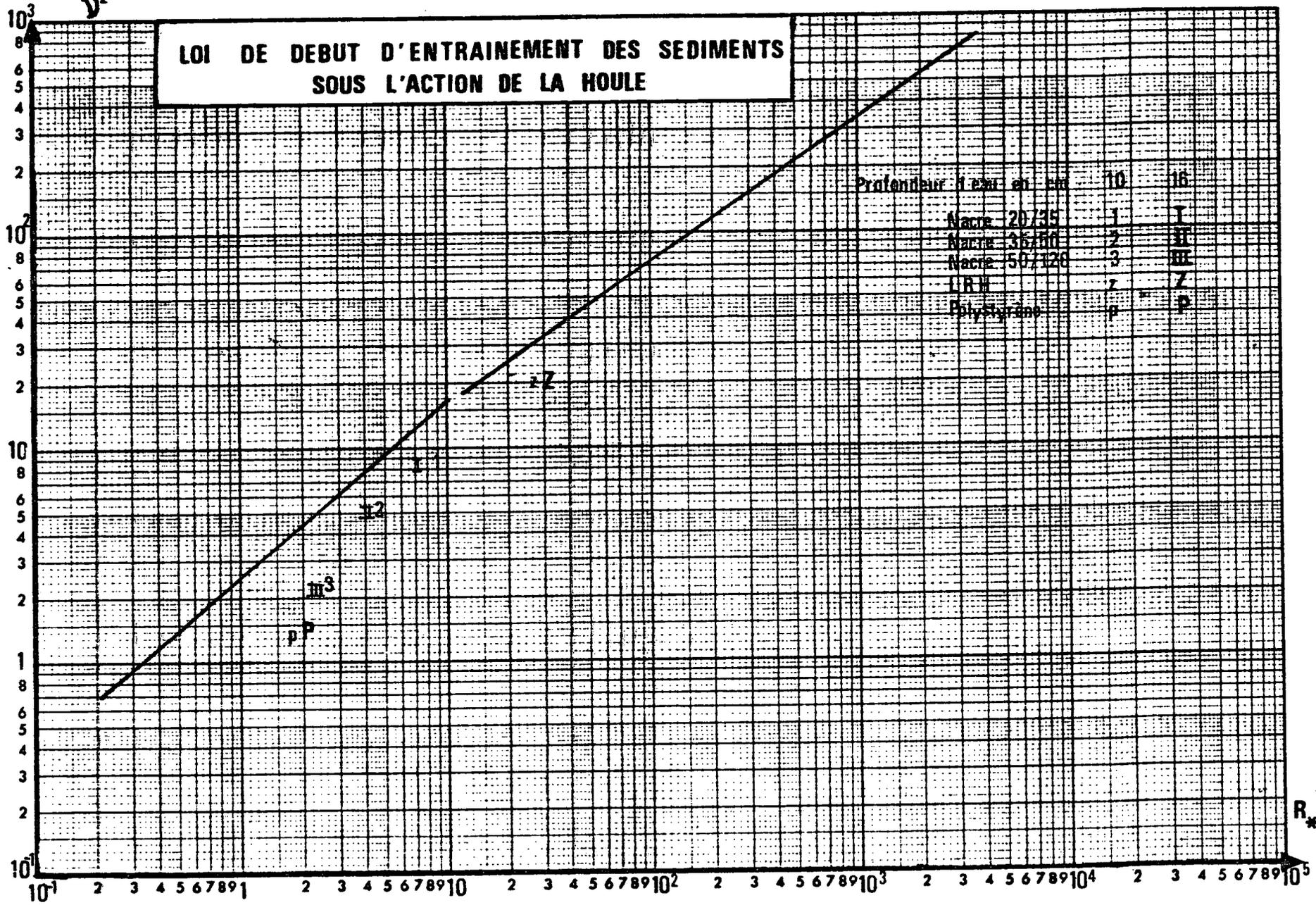
R. A. BAGNOLD [5] et TH. SCOTT [6] pensent que la longueur d'onde λ des rides ne dépend que de l'excursion maximale e du liquide dans ses oscillations sur le fond.

Si U_0 est la vitesse orbitale maximale sur le fond, due à une houle de période T , l'excursion maximale est :

$$e = \frac{U_0 T}{2}$$

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

**LOI DE DEBUT D'ENTRAINEMENT DES SEDIMENTS
SOUS L'ACTION DE LA HOULE**



Profondeur d'eau en cm	10	16
Nacre	20/35	I
Nacre	35/50	II
Nacre	50/128	III
LRW	7	V
Polystyrène	8	P

$$R_* = \frac{U_* h}{\gamma}$$

LARRAS, [7] en voulant préciser cette idée, a proposé la relation approximative : λ de l'ordre de 0,8 e où l'on voit que la longueur d'ondes ne dépend a priori ni de la densité ni du diamètre des grains. Mais c'est à P. LHEMITTE [8] qu'on doit une solution plus précise du problème. Il a montré par des essais de laboratoire, que l'on a :

$$e = A \lambda + \alpha \frac{\eta}{2}$$

en désignant par A la fraction qui définit le nombre moyen des rides dans la longueur d'excursion e du liquide sur le fond, par η la hauteur des rides et par α un coefficient qui caractérise à la fois la nature des granulats et leur diamètre moyen ($\alpha = 1$ pour $d = 0,28$ mm et $\alpha = 2$ pour $d = 0,75$ mm, dans le cas des granulats de 0,45 de densité relative dans le liquide)

Cette formule équivaut à :

$$\lambda = \frac{1}{2A} \left(U_0 T - \alpha \eta \right)$$

Le couple (λ, η) solution de cette équation n'est pas unique, c'est-à-dire qu'il peut exister plusieurs dimensions de rides pour une même houle sur une même nature de fond.

Toutes ces tentatives, auxquelles s'ajoutent celles de MANOHAR sont encore au stade de l'ébauche et ne concernent que le cas d'une houle seule en l'absence de tout courant. On voit alors la difficulté de prévoir la forme et les dimensions des rides prenant naissance sous l'action combinée d'un courant et d'une houle.

Le tableau ci-après récapitule les résultats de nos mesures des caractéristiques du fond rapportés dans le plan $\left(\eta/\lambda, \frac{\tau_*}{\tau_*(cr)} \right)$ dans les deux cas d'un courant seul et d'un courant et d'une houle combinés. Les pourcentages sont les taux de comparaison par rapport aux essais de S.YALIN [3] réalisés avec un courant uniquement $\tau_*(cr)$ ici correspond au "départ faible".

Matériaux	Courant seul	Houle + Courant
Nacre I	73 %	50 %
Nacre II	33 %	42 %
Nacre III	10 %	0 %
Polystyrène	0 %	0 %
Styvarène	~ 80 %	~ 40 %

Le rapport $\frac{n}{\lambda}$ semble être plus grand dans le cas d'un courant et d'une houle combinée que ce que prévoit S. YALIN dans le cas d'un courant seul. (voir les courbes 7, 8 et 11).

- Débit solide

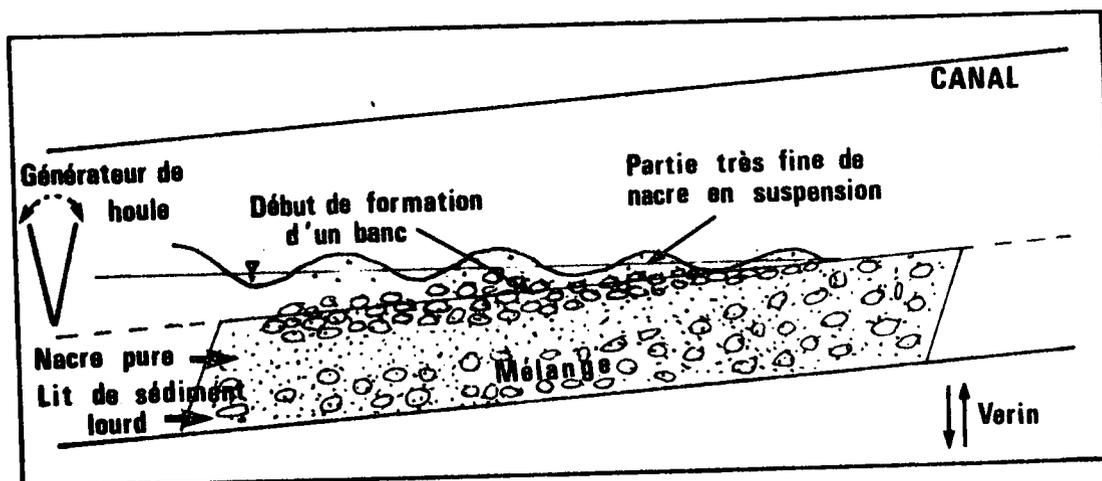
Le rapport q_{sc}/Q_{sc} du débit solide sous l'action combinée de la houle et du courant sur le débit solide dû uniquement au courant est variable de 1 à 7. La dispersion est très grande, et on ne peut déduire de ces essais limités un enseignement précis. (voir les tableaux des mesures VIII à XIV et la courbe $\left(\frac{q_{sc}}{Q_{sc}}, H\right)$ donnée sur la fig. 13) si ce n'est que l'action cumulée de la houle augmente le débit solide engendré par l'unique action des courants.

2 - 3 - ACTION DE LA HOULE SUR UN ESTRAN

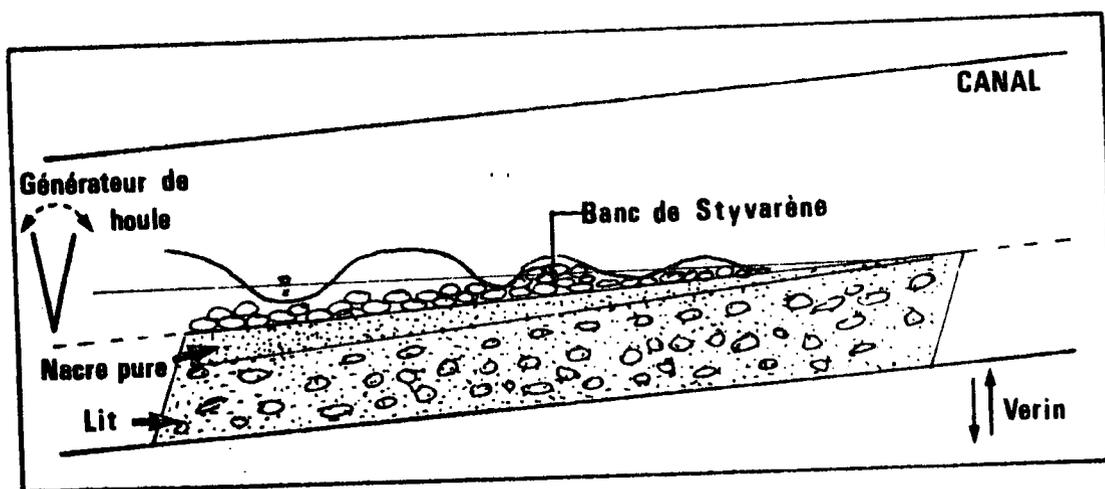
Cette expérience avait pour but d'examiner qualitativement le comportement du mélange nacre + styvarène (50 %, 50 %) constituant l'estran et les petits fonds sous l'action d'une houle agissant seule à l'échelle des périodes ($1/n \cdot 1/2 = 1/10$) et à l'échelle des hauteurs ($1/n = 1/100$) appliqués sur le modèle sédimentologique.

Afin de reconstituer la pente du littoral le canal expérimental était incliné à l'aide de verniers prévus à cet effet.

Sur les dix essais réalisés avec différentes amplitudes de houle et différentes inclinaisons, la surface du lit s'est toujours bien comportée, les grains de styvarène ne se mettant jamais en émulsion ni dans la zone de detachement ni dans la zone profonde.



Par contre il se produit une ségrégation très nette entre la nacre et le styvarène, les grains de styvarène étant progressivement extrait du mélange et venant se grouper sous forme de barre au-dessus d'une sous couche de matériau trié par la houle et transformé en nacre pure. L'épaisseur de cette sous couche remaniée est liée à la limite d'action de la houle et donc fonction de ses caractéristiques.



2 - 4 - ACTION D'UN COURANT ALTERNATIF

Le canal expérimental utilisé précédemment n'étant pas équipé pour reproduire des courants alternatifs, cet essai complémentaire réalisé dans un petit canal non équipé de parois vitrés et de faible largeur mais permettant la reproduction de courant alternatif a permis de réaliser une rapide étude qualitative

Cette étude a également été effectuée avec un mélange nacre + styvarène (50 %, 50 %). Cet essai qualitatif avait pour but d'examiner le comportement global du mélange quant aux formations de rides et de vérifier son état évolutif dans le temps.

Les conditions expérimentales étaient liées aux possibilités mécaniques du canal utilisé. Pour des profondeurs d'eau moyennes de 11 cm, un marnage de 5 à 6 cm et une période de 14 minutes on a obtenu des ondulations de fond très semblables à celles relevées en courant unidirectionnel.

L'observation du lit au cours d'une douzaine de marée et au même instant a permis de conclure que globalement l'ensemble des fonds restait stable.

Le profil du fond sous l'effet du courant alternatif, est en concordance avec le profil déjà observé avec un courant uniforme.

Les fig 14 et 15 donnent les variations simultanées de la vitesse du courant de la hauteur de l'eau et du débit au cours d'un cycle pour chacune des deux profondeurs d'eau 11,25 cm et 12,5 cm mesurées au temps $\frac{T}{2}$. C'est-à-dire quand le courant est nul.

La série de 11 photos (Annexe) représente la configuration du lit à des intervalles de temps égaux à une période à partir de la troisième photos. De 3 T à 11 T la répartition des deux matériaux qui constituent le mélange n'a presque pas changé.

On constate que les rides, à des intervalles de temps égaux ne se déplacent pratiquement pas.

2 - 5 - FORMATION D'UNE FOSSE D'EROSION

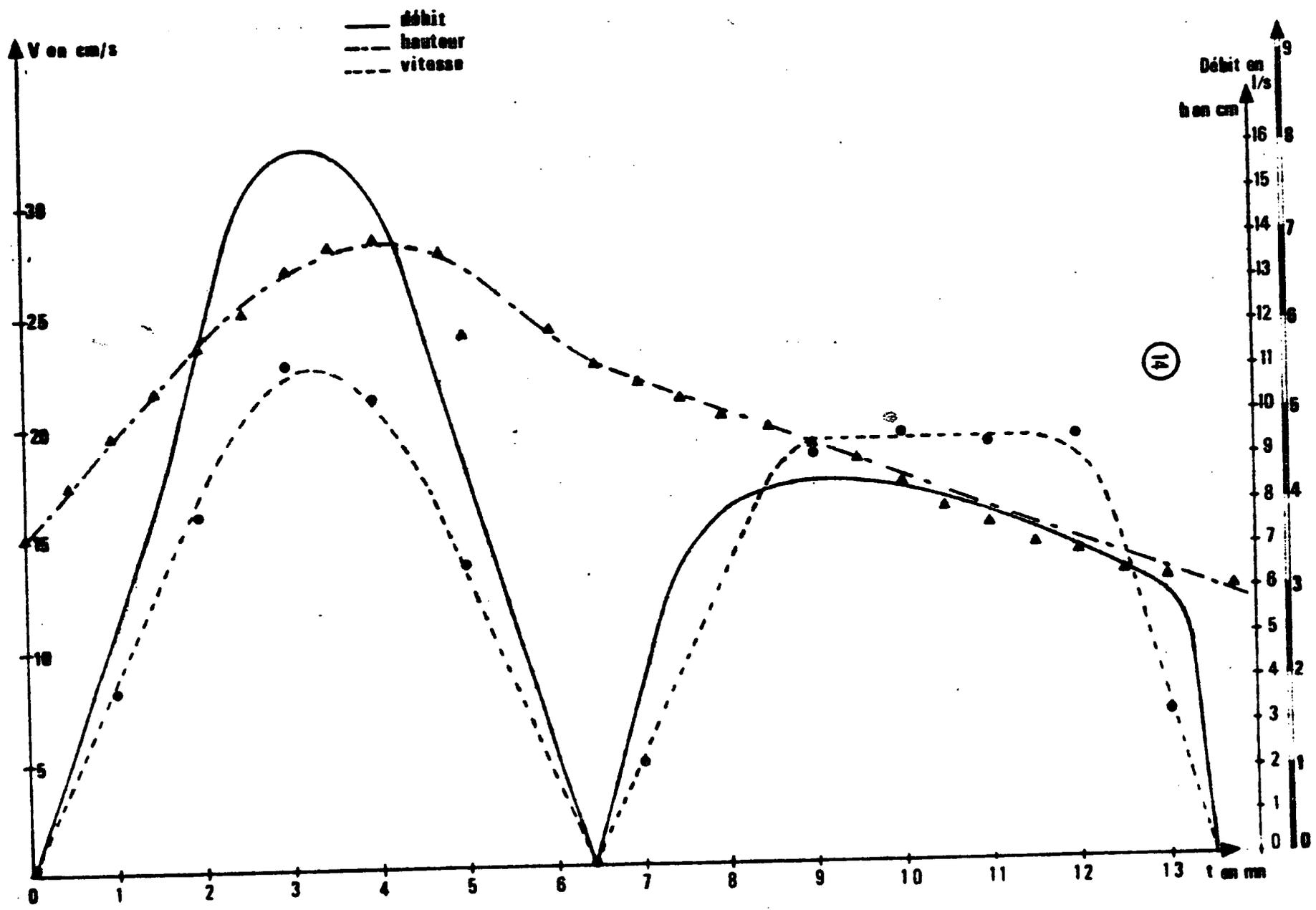
2 - 51 - Généralités

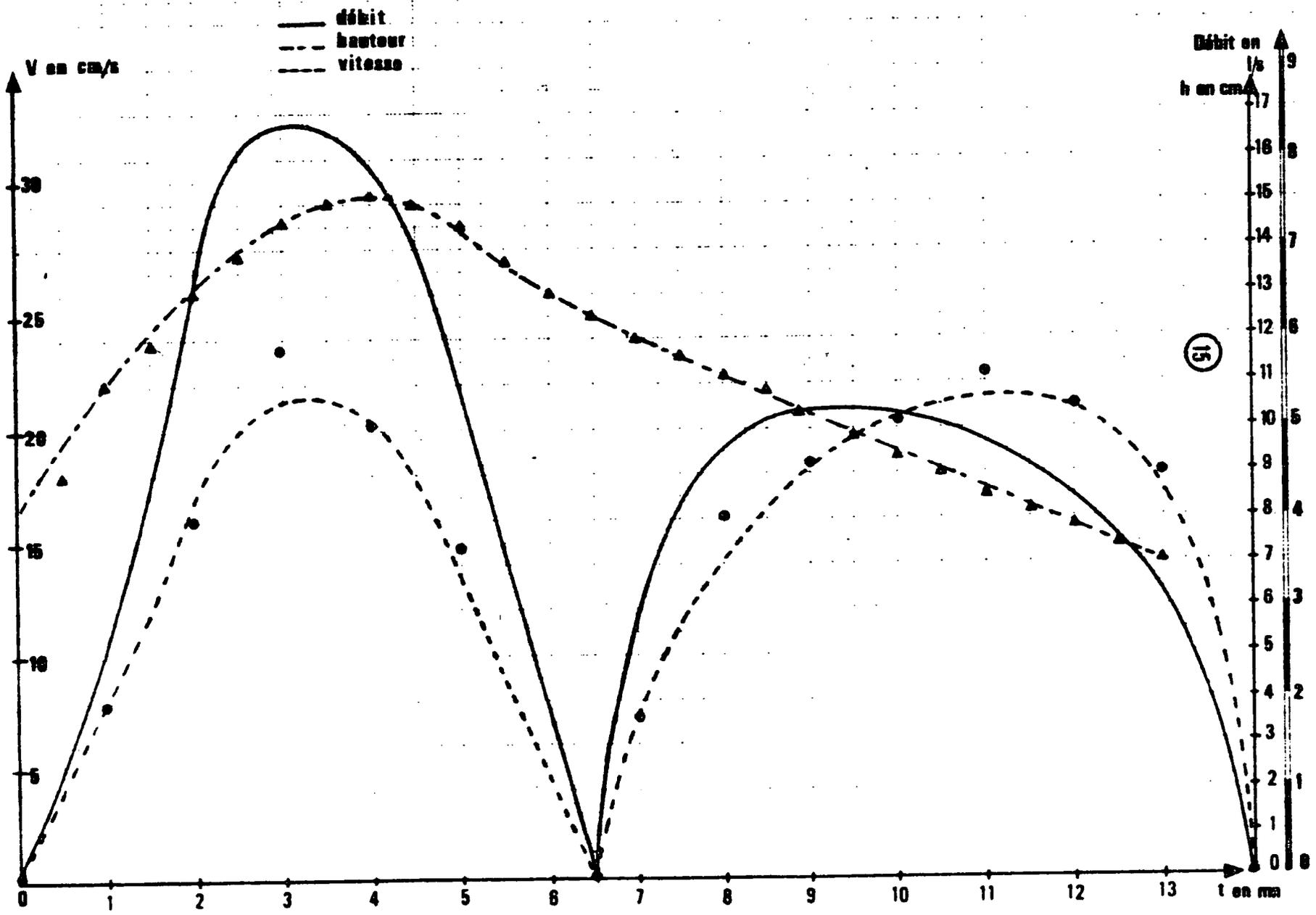
Les érosions au pied des ouvrages en mer ou dans des sections rétrécies ; restent un problème très difficile à résoudre.

La déformation à un instant t_0 du lit au voisinage d'un point quelconque où se produit l'érosion, dépend entre autres, des conditions d'écoulement et des lois de turbulences locales autour de ce point et à cet instant t_0 .

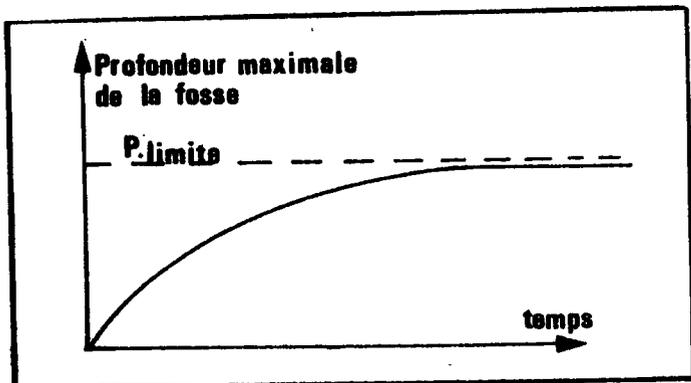
Ces deux derniers paramètres eux-mêmes sont fonction de la déformation qui se produit à t_0 et à celles déjà produites aux instants précédents. C'est cette forme implicite du problème qui rend, très complexe la détermination théorique donnant la forme et la profondeur maximale des fosses d'érosion creusées par un écoulement uniforme autour d'un obstacle.

D'après LARRAS, [9] la profondeur maximale des fosses d'érosion peut varier en outre de trois façons différentes avec le temps, pour un écoulement de vitesse ou de débit donné. Elle peut :



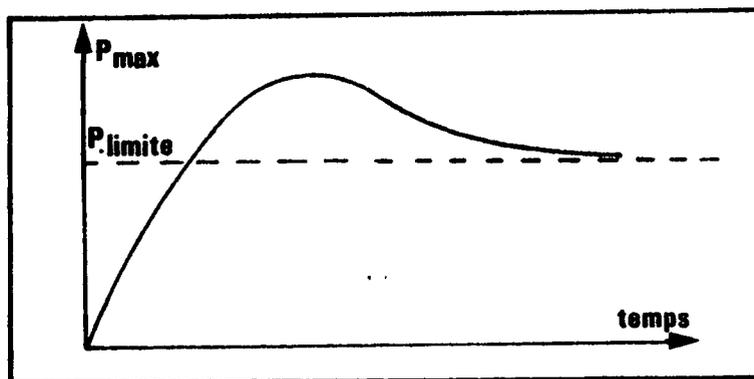


- Soit tendre vers une limite asymptotique en augmentant indéfiniment avec le temps.

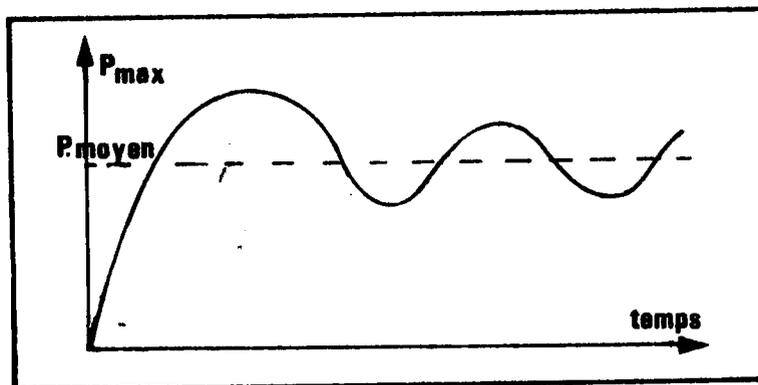


P_{max} : profondeur maximale de la fosse à un instant t
*
 P_{limite} : la profondeur limite de la fosse d'érosion.

- Soit tendre vers une limite asymptotique en la dépassant à un certain moment et en diminuant par la suite indéfiniment avec le temps.



- Soit osciller indéfiniment de part et d'autre d'une valeur moyenne à l'issue d'une première période de croissance continue.



La plupart des chercheurs estiment que la profondeur maximale des fosses d'érosion varie comme une fonction linéaire du logarithme du temps t . En fait cette loi ne peut être qu'approchée et il est bien évident que la profondeur d'érosion d'une fosse ne peut croître indéfiniment mais doit tendre vers une valeur asymptotique. LARRAS estime préférable d'utiliser une loi de décroissance exponentielle de la forme.

$$\frac{\rho l}{\rho_{\max}} = 1 - e^{-t/r} \quad \text{avec } t \text{ le temps d'érosion}$$

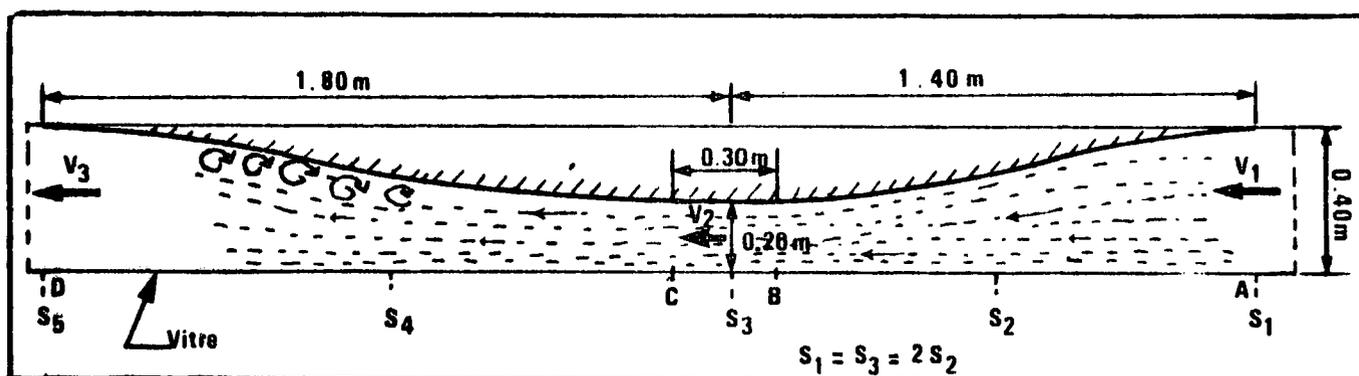
Le paramètre r n'est malheureusement pas défini mais on peut dire que la durée nécessaire pour obtenir la profondeur d'équilibre de la fosse et d'autant plus faible que la mobilité des matériaux est plus grande.

2 - 52 - Résultats expérimentaux

- Conditions expérimentales

Afin d'avoir une estimation des profondeurs d'érosion en fonction d'une augmentation locale de la vitesse du courant, le canal précédemment utilisé pour les mesures d'entraînement des matériaux mobiles a été sensiblement modifié en aménageant localement un étranglement des sections.

Cet étranglement est réalisé d'après le schéma ci-dessous, la largeur du canal étant progressivement réduite de 0,40 m à 0,20 m sur une longueur de 1,40 m et réalargie ensuite sur la même distance.



Les mesures systématiques réalisées à l'aide de micromoulinets ont montré que dans la partie rétrécie du canal (section S3) les vitesses étaient à 5 % près, le double de celles mesurées dans la section amont S1. Par contre dans la partie aval S5 la vitesse V_3 du courant peut présenter des fluctuations par suite de l'apparition de tourbillons dans la zone d'élargissement. Cette vitesse V_3 est en général légèrement supérieure du côté de la vitre que vers le fond du canal.

Le matériau mobile expérimenté était soit un mélange nacre II + styvarène (50 %, 50 %) soit de la nacre II pure (nacre de 35/50). Il était disposé dans le canal sur une longueur de 2,8 m axée dans la zone de contraction des sections.

Plusieurs essais ont été réalisés pour des profondeurs de 10 cm et 16 cm avec des vitesses moyennes V_m mesurées dans la section réduite S_2 , progressivement croissantes à partir de 18 cm/s environ.

Pour chaque essai ont été relevés le plus soigneusement possible les profils du fond dans la zone rétrécie (profondeur de la fosse, longueur de la fosse, nombre de fosses en fonction du temps) et si nécessaire les caractéristiques des rides en aval ou en amont.

Les débits solides étaient mesurés suivant le même procédé expérimental que précédemment.

- Résultats d'essais

L'érosion des fonds, et la création de fosses, se produisent toujours dans la partie aval de la section S_2 et entre les sections S_2 et S_3 .

Le début d'érosion est suivi d'apparition de rides plus ou moins prononcées.

Les fosses se forment progressivement lorsque l'on augmente la vitesse du courant avec dans certains cas l'apparition de plusieurs fosses (2 à 3) qui finissent par s'unir en une seule au bout d'un temps d'essai compris entre 1 et 2 heures.

Afin d'éliminer des risques d'erreurs, les essais ont été repris plusieurs fois et l'on trouve dans les tableaux A et B ci-contre, les résultats de ces différents essais correspondant soit à de la nacre pure soit à un mélange de nacre et de styvarène.

Dans ces tableaux on trouve :

- . le numéro de l'essai : 1 à 9
- . les vitesses du courant mesurées dans les sections S_1 , S_2 et S_3 à différentes profondeurs "y" 2, 4, 6 et 8 cm par exemple ainsi que la vitesse moyenne.
- . les profondeurs des fosses en fonction du temps t , les mesures étant faites dans les différentes fosses lorsqu'elles sont nettement séparées.
- . dans les remarques, on trouve des indications sur l'importance des rides et en particulier sur les longueurs d'ondes λ et sur les hauteurs η .

On trouve également sur les figures 16 et 17 les courbes donnant la variation de la profondeur des fosses en fonction du temps pendant lequel un courant de vitesse donnée agit sur les fonds.

LCH F

Essais	Profondeur h en cm	VITESSE V ₁ cms				VITESSE V ₂ cms				VITESSE V ₃ cms				Profondeur des fosses 1,2,3 en fonction du temps						Remarques concernant l'essai, les fosses, les zones Z ₁ , Z ₂ , Z ₃									
		V _{cm}	2	4	6	8	V _{cm}	2	4	6	8	V _{cm}	2	4	6	8	P en cm	t en mn											
1	10	V _y	8,3		8,6	8,3	V _y	15,5		16,3	16,3					t	15	35	45	75	90	120	Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse ou dune Z ₃ : ridée { λ ≠ 16 cm n ≠ 1,5 cm						
		\bar{V}_1	8,4				\bar{V}_2	16								P ₁	/	2,5	4	4,5	4,5	4,5							
2	10	V _y	11,8	12,8	12,8		V _y	24,2	24,5	24,5	24,5	V _y	13,3	13,5	13,8	12,8	t	7	13	16	27	60	75	90	120	Z ₁ : rien Z ₂ : 2 fosses puis 1 seule ridée: { λ ≠ 8-13 n ≠ 0,5-1,5 cm			
		\bar{V}_1	12,4				\bar{V}_2	24,4				\bar{V}_3	13,3						P ₁	3,5	4,5	5	7,5	7	7,5	7,5	7,5		
																	P ₂	3	4,5	6,5									
3	10	V _y	8,4	8,8	8,6	8,3	V _y	17,3	17,6	17,6	17,3	V _y	9,5	10,8	11,2	10,8	t	15	30	45	60	90	120	135	Z ₁ : rien Z ₂ : ridées (λ ≠ 7-13 n ≠ 0,5 cm puis dune ou fosse de 1,5 de profondeur Z ₃ : rien				
		\bar{V}_1	8,5				\bar{V}_2	17,4				\bar{V}_3	10,5						P ₁	/	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5			
4	10	V _y	10,2	10,6	10,6	10,2	V _y	19,6	20,2	20,2	20,2	V _y	10,7	12,2	12,8	12,2	t	15	30	60	95	145			Z ₁ : rien Z ₂ : 2 fosses Z ₃ : ridée { λ ≠ 13-15 cm n ≠ 0,5-1 cm				
		\bar{V}_1	10,4				\bar{V}_2	20				\bar{V}_3	11,9						P ₁	/	1	2,5	4,5	4,6					
																	P ₂				5	5							
5	10						V _y	21,7	21,9	21,9	21,5						t	5	10	16	20	30	60		Z ₁ : rien Z ₂ : 2 fosses Z ₃ : rides { λ ≠ 13 cm n ≠ 1-2 cm				
		\bar{V}_1	12,1				\bar{V}_2	21,7				\bar{V}_3	16,3						P ₁	3,5	6	6,5	7	7,5	8				
																	P ₂	1,5	7	8	8	8							
6	10						V _y	22,4	22,6	22,7	22,4						t	5	9	12	18	30	45	60	120	Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse puis 2 fosses Z ₃ : ridée { λ ≠ 8 cm n ≠ 1 cm			
		\bar{V}_1	12,6				\bar{V}_2	22,5				\bar{V}_3	17,8						P ₁	3	3,5	3,5	4	4	4	4,5	5,5		
																	P ₂			3,5	4	4,5	5	5,5	5,5				
		V _{cm}	3	5	7	8	V _{cm}	3	5	7	8	V _{cm}	3	5	7	8													
7	10	V _y	11,8	12,5	12,5		V _y	24,1	24,4	24,7							t	4	6	9	15	30	39	45	60	90	120	Z ₁ : rien Z ₂ : 2 fosses puis 1 fosse Z ₃ : ridée puis dunes	
		\bar{V}_1	12,2				\bar{V}_2	24,4				\bar{V}_3	15,5						P ₁	2	2,5	3	5	6,5	7	7,5	7,5	8	8
																	P ₂	3	3,5	5,5	5								
8	10	V _y	10,8	11,3	11,2	11,3	V _y	19,8	20	20	19,9						t	10	15	30	45	60	90	120		Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse Z ₃ : ridée			
		\bar{V}_1	11,1				\bar{V}_2	19,9										P ₁	1,5	2,5	3,5	4	4	4,5	4,5				
9	10	V _y	9,9	10,2	10,1	9,9	V _y	19,7	19,8	20	19,9						t	15	45	60	120	180			Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse puis 3 fosses puis 2 fosses Z ₃ : rides: λ ≠ 20 cm n ≠ 1 cm				
		\bar{V}_1	10				\bar{V}_2	19,8				\bar{V}_3	13						P ₁	1	2,5	3	5-5,5	5,5					
																	P ₂	2	5	6	5,5	5							
																	P ₃	15,5	6										

⊗ essais non retenus.

Z₁ = Zone S1 - S2

Z₂ = Zone S3 - S4

Z₃ = Zone S4 - S5

↘ fusion de la dernière fosse avec la précédente

LCH F

TABLEAU B

Essais	Profondeur h en cm	VITESSE V ₁ cms				VITESSE V ₂ cms				VITESSE V ₃ cms	Profondeur des fosses 1,2,3 en fonction du temps			Remarques concernant l'essai, les fosses, les zones Z ₁ , Z ₂ , Z ₃														
		V _{cm}	2	4	6	8	V _{cm}	2	4		6	8	t en cm		t en mm	P												
1	16	V _y cms	7,9		8,2	7,9	V _y cms	15		15,8	15,9	Grande fluctuation			t	10	15	30	Z ₁ : rien Z ₂ : { rides λ ≠ 8 cm Z ₃ : { n ≠ 0,5 cm avec un très faible transport.									
		\bar{V}_1	8				\bar{V}_2	15,5				\bar{V}_3	≠ 12			P	/	/		/								
2	10	V _y	10,9	11,2	11,5	11,6	V _y	23,5	23,5	23,6	24,6	Grande fluctuation			t	15	30	40	45	60	70	80	90	100	Z ₁ : rien Z ₂ : 2 fosses puis (30 mm) 1 seule. Z ₃ : rides λ ≠ 10 cm n ≠ 0,5 cm			
		\bar{V}_1	11,3				\bar{V}_2	23,8				\bar{V}_3	≠ 16,5			P	3,5	7,5	8	8-8,5	8-8,5	8-8,5	8,5	8,5		8,5		
3	10	V _y	9,3	9,3	9,7	9,7	V _y	19,1	19,3	19,7	19,9	Grande fluctuation			t	15	18	25	30	36	42	50	60	75	90	120	240	Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse Z ₃ : rides { λ ≠ 12 cm n ≠ 0,5-1 cm
		\bar{V}_1	9,5				\bar{V}_2	19,5				\bar{V}_3	13			P	0,5	0,5	1	1	1	1-1,5	1,5	2,15	2	2		
4	10	V _y	12,2	12,3	12,5	12,6	V _y	24,5	24,8	25	25,2				t	5	10	15	20	26	30	60				Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse Z ₃ : rides { λ = 14 cm n = 1,5 cm		
		\bar{V}_1	12,4				\bar{V}_2	24,9							P	2,5	7,5-8	8-8,5	8,5	8,5	8,5-9	8,5-9						
5*	16	V _y	12,2	12,2	12,4	12,5	V _y	22,7	22,9	23,2	23,3				Formation d'un trou très rapide → destabilisation du lit.													
		\bar{V}_1	12,3				\bar{V}_2	23				\bar{V}_3	15,3															
6	16	V _y	11,2	11,3	11,6	11,7	V _y	22,1	22,3	22,7	22,9				t	15	30	45	60	75	90	120	150				Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse Z ₃ : rides { λ ≠ 14 cm n ≠ 1 cm	
		\bar{V}_1	11,5				\bar{V}_2	22,5				\bar{V}_3	16,8			P	5	6,5	7	7,5	8	8,5	9,5	9,5-10				
7	16	V _y	10	10,3	10,3	10,6	V _y	20,8	20,8	21,1	21,3				t	6	20	30	60	75	90	120				Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse Z ₃ : rides { λ ≠ 14 cm n ≠ 1 cm		
		\bar{V}_1	10,3				\bar{V}_2	21				\bar{V}_3	12,3			P	0,5	2,5	3,5	5	5-5,5	5-5,5	5-5,5					
8	16	V _y	9	9,3	9,5	9,4	V _y	18,4	18,7	19	19,1				t	30	60	120	180	240				Z ₁ : rien Z ₂ : 1 fosse Z ₃ : rides				
		\bar{V}_1	9,3				\bar{V}_2	18,8				\bar{V}_3	11,4			P	0,4	0,4-0,5	0,5	0,5	0,5							
9	16	V _y	12	12,3	12,4	12,5	V _y	22,5	23,6	23,7	23,8				t	5	6	10	13	16	20	30	60				Z ₁ : rien Z ₂ : 2 fosses à 7 m : 1 fosse. Z ₃ : rides	
		\bar{V}_1	12,3				\bar{V}_2	23,7							P	2,5	3,2	4,5	5,5	6	7	7-7,5	7,5					

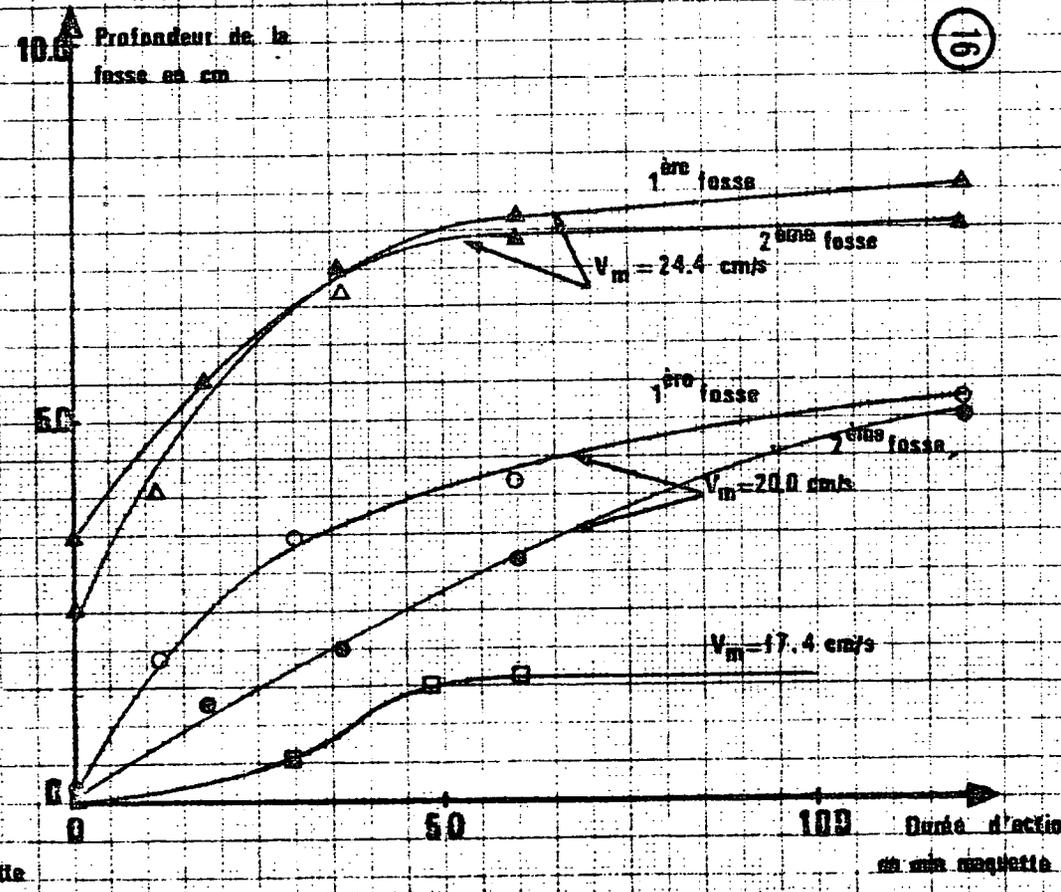
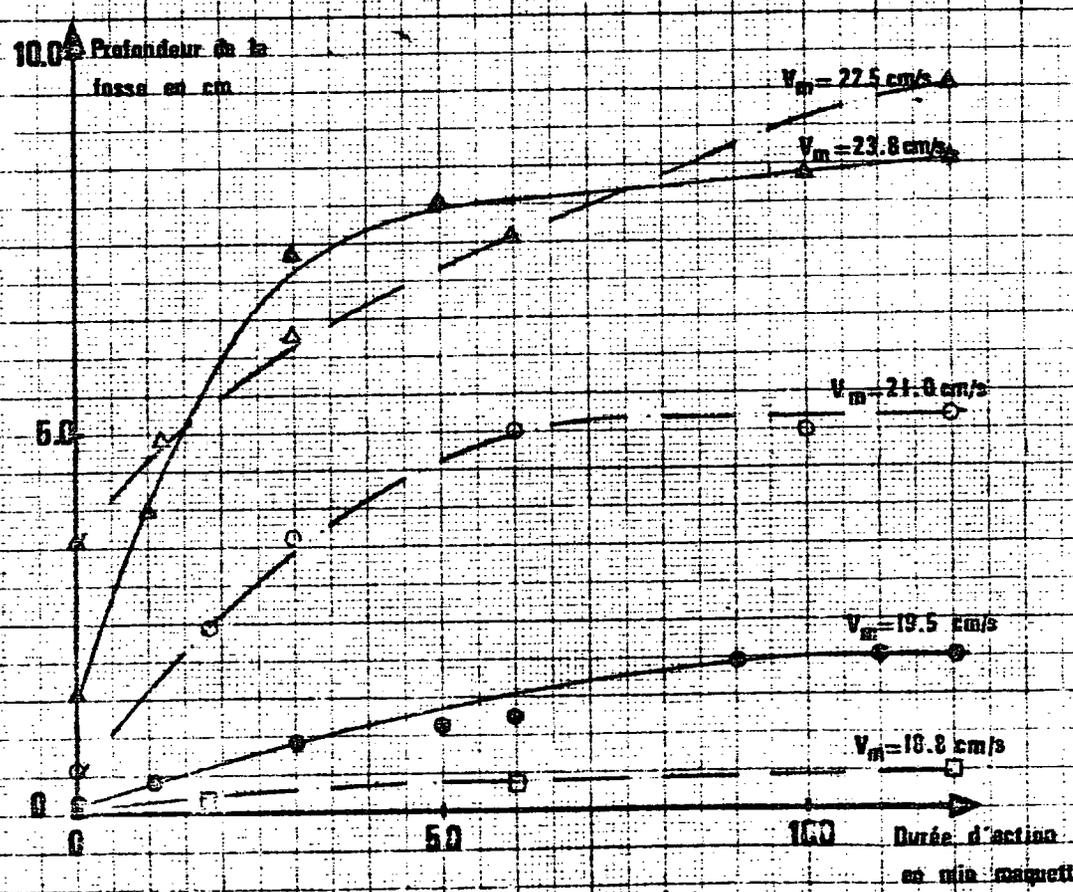
* Abandonné

Variation de la profondeur maximale de la fosse d'érosion

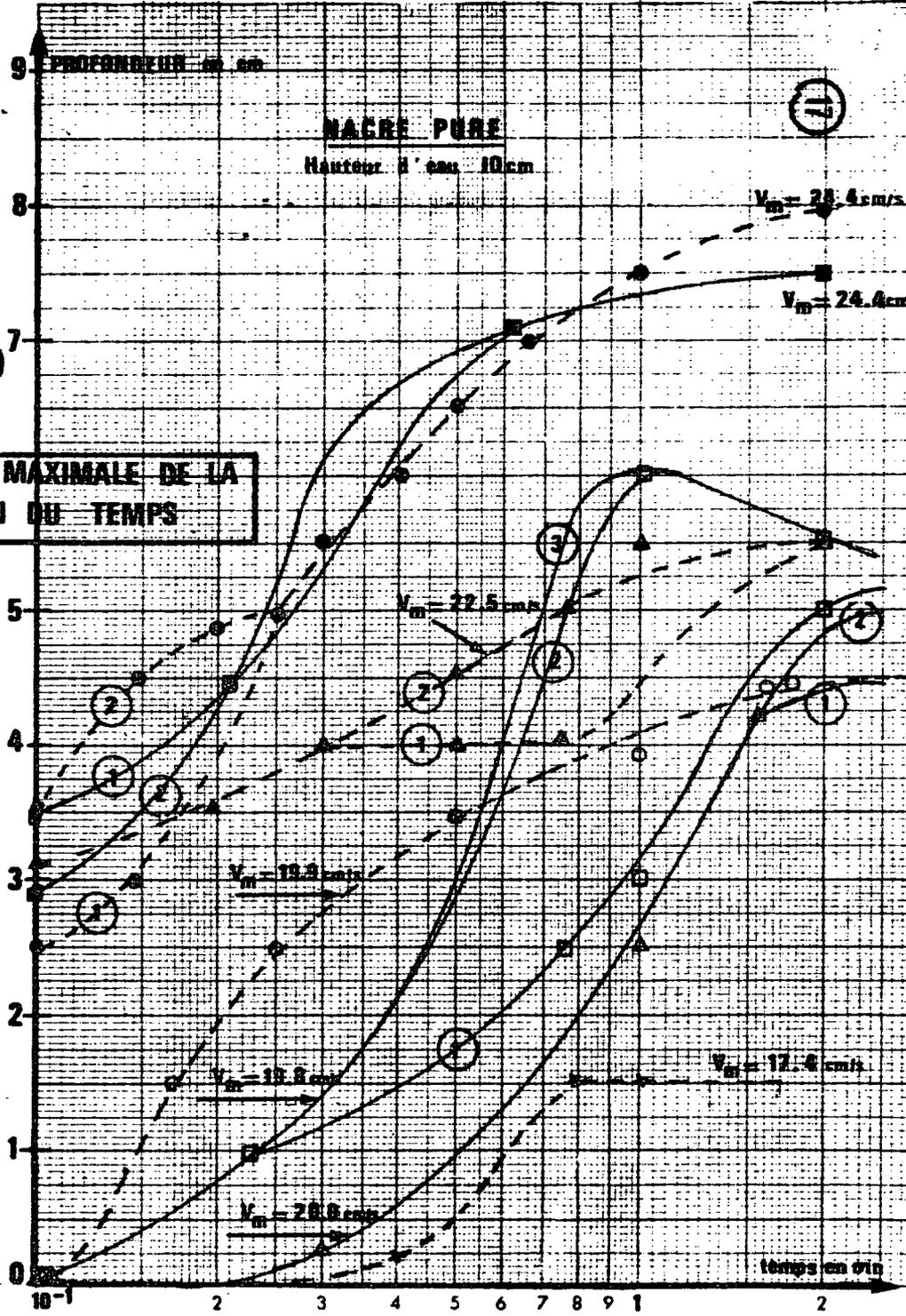
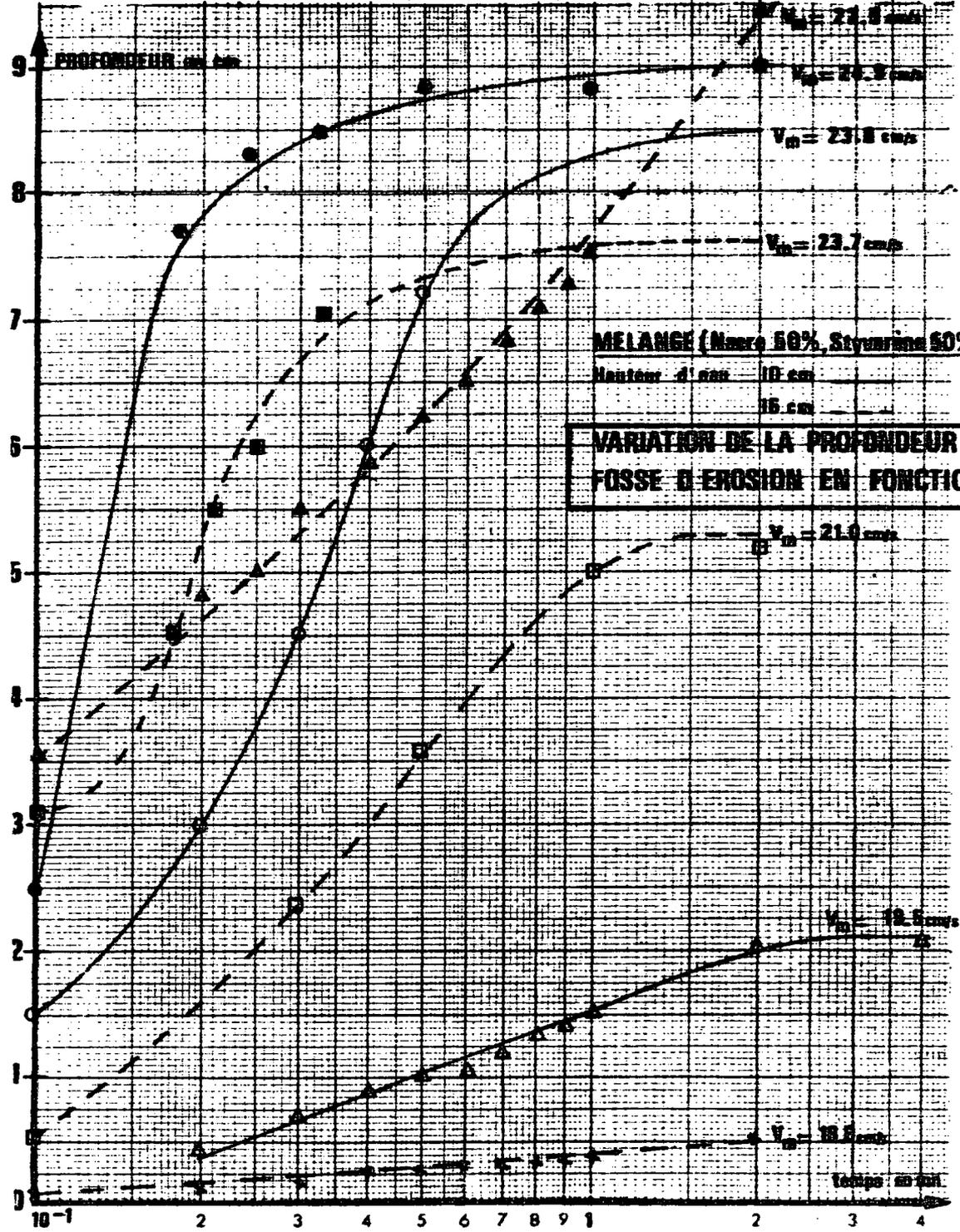
MELANGE NACRE II + STYVARENE (50%, 50%)

NACRE II

— Hauteur d'eau 10 cm
 - - - - - 16 cm



16



La figure 16 représentée suivant des échelles arithmétiques montre bien la progression de la profondeur dans les fosses en fonction du temps et l'importance de cette profondeur en fonction de la vitesse du courant.

Pour de la nacre, on obtient après 1 heure et demi environ sous l'action d'un courant de vitesse V_m de l'ordre de 24 cm/s, une fosse atteignant une profondeur de 8 cm environ, alors qu'avec ce même matériau, elle n'atteindrait, sous l'action d'un courant de 18 cm/s, que 2 cm après la même durée. Avec le mélange Styvarène et Nacre à 50 % 50 %, la profondeur atteint 11 cm après la même durée d'action et pour une vitesse voisine de celle nécessaire pour atteindre 8 cm avec de la nacre.

La figure 17 donne les mêmes courbes, pour la totalité des essais, mais en représentant la variation de la profondeur en fonction du temps dans deux plans, avec des échelles du temps arithmétique dans l'un et logarithmique dans l'autre. On retrouve une tendance mais avec une valeur asymptotique obtenue lorsque l'on atteint la profondeur critique d'érosion de la fosse.

CONCLUSIONS

Les expériences en canal, qui sont présentées dans ce rapport, ont eu pour but de compléter l'étude théorique des possibilités de reprise des sédiments pour les courants et les houles -dont les résultats ont été donnés dans le rapport du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L C H F) de juin 1981- et de définir les critères de base devant servir au choix du matériau mobile susceptible d'être utilisé sur le modèle réduit sédimentologique de Port de ZEEBRUGGE réalisé au Laboratoire de Recherches Hydrauliques de BORGERHOUT (L.R.H.).

Les recherches ont porté sur le transport solide, en charriage et en suspension, sous l'action d'un courant seul et sous l'action d'un courant et d'une houle de différents matériaux artificiels susceptibles de schématiser en modèle réduit les sédiments naturels.

De même, il a été possible d'étudier les évolutions des fosses susceptibles de se produire pour différents régimes d'écoulements, avec transport saturé et transport sous-alimenté, et d'en déduire les conditions d'érosion de fosses en fonction du temps.

Les matériaux testés au cours de ces essais ont été choisis afin que leur densité soit comprise entre 1,05 et 1,25 c'est-à-dire dans une gamme susceptible de répondre aux différents critères de similitudes exigés par les échelles du modèle de ZEEBRUGGE.

Cinq types de matériau ont été étudiés :

- . la nacre de densité 1,22 avec trois granulométries différentes correspondant aux tamis 20-35 ($D_m = 0,75 \text{ mm}$), 35-50 ($D_m = 0,40 \text{ mm}$), 50-120 ($D_m = 0,2 \text{ mm}$)
- . le polystyrène de densité 1,05 correspondant aux tamis 50-120 ($D_m = 0,2 \text{ mm}$)
- . la nacre mélangée à la sciure de bois de pin
- . le styvarène traité au L.R.H., d'une densité de 1,05 à 1,06 et formé de grains de 2,5 mm de diamètre moyen
- . le styvarène traité au L.R.H. ($D_m = 2,5 \text{ mm}$) mélangé dans différentes proportions avec de la nacre de 35-50 ($D_m = 0,40 \text{ mm}$)

Pour rester dans des conditions voisines de celles que l'on peut rencontrer sur le modèle sédimentologique de ZEEBRUGGE (modèle à 1/400 en plan et 1/100 en hauteur) les études ont été réalisées avec des hauteurs d'eau au-dessus des matériaux correspondants à 10 et 16 cm et avec des vitesses variant entre 10 et 30 cm/s (1 à 3m/s en nature) couvrant ainsi une gamme expérimentable assez complète.

Les résultats obtenus montrent que sous l'action des courants uniformes on obtient, à l'échelle, avec les matériaux artificiels utilisés les mêmes formes de courbes du débit solide en fonction de la vitesse qu'aura les sables naturels (lois d'EINSTEIN). Le styvarène traité se déplace légèrement plus facilement que la nacre mais, dans tous les cas, il faut des vitesses moyennes du courant supérieures à 14 cm/s pour que le transport apparaisse. Entre 15 et 20 cm/s le débit solide par charriage augmente très rapidement pour le polystyrène et tend vers un transport en suspension lorsque la nacre a, aux échelles de similitude près, un transport plus proche de celui du sable naturel. On peut estimer que pour la nacre de diamètre moyen 0,40 mm (tamis 35-50) le débit solide atteint 1g/ms pour une vitesse moyenne de 20 cm/s et 10 g/ms pour une vitesse de 25 cm/s avec apparition près du fond d'une légère remise en suspension.

La forme des fonds est également assez différentes suivant le matériau artificiel utilisé et l'on obtient avec le polystyrène traité de grandes irrégularités dans la forme et la taille des rides avec apparition très rapidement de dunes importantes ce qui peut s'expliquer du fait que le D^* du grain de polystyrène atteint la valeur 20. Pour la nacre, le D^* est voisin de 8 et si l'on obtient dans tous les cas des rides dès que la vitesse moyenne du courant dépasse 17 cm/s on constate que leur amplitudes n'atteint pas plus de 2 à 3 cm et leur longueurs d'onde 20 cm pour des vitesses de l'ordre de 20 cm/s.

En utilisant des mélanges de nacre et de styvarène on tend à réduire sensiblement les effets de rides et de dunes mais des ségrégations peuvent se produire entre les matériaux.

L'action de la houle favorise la reprise des matériaux et tend à réduire la formation des rides des courants au bénéfice des microrides beaucoup plus courtes qui apparaissent en particulier sur la nacre. Avec le styvarène traité de $D = 2,5$ mm l'action de la houle semble avoir des effets trop importants par suite de la grande porosité de ce matériau. Cet effet de la houle est particulièrement accentuée lorsque l'épaisseur de la lame d'eau diminue c'est-à-dire lorsqu'on se rapproche de l'estran.

Dans tous les cas on constate que l'influence relative de la houle sur le transport solide diminue lorsque la vitesse du courant augmente. On retrouve là, les tendances qui avaient été mises en évidence à partir de considérations théoriques.

De même, il semble que l'effet des courants alternatifs, dus à la marée, permettent de réduire les phénomènes de rides et de dunes qui ont pu être constatés sous l'action de courants uniformes. Les résultats dans ce domaine sont cependant trop succincts pour que l'on puisse en dégager des lois précises sur le déplacement des matériaux artificiels sous l'action de tels courants.

La variation des profondeurs dans les fosses, par suite d'une augmentation locale des vitesses, est un paramètre également intéressant pour le choix du matériau susceptible d'être utilisé sur le modèle réduit du Port de ZÉRRUGGE.

Les profondeurs dans les fosses sont d'autant plus importantes que les vitesses sont élevées, elles atteignent environ 8 cm pour des vitesses moyennes de 24 à 25 cm/s avec de la nacre de 35-50 et peuvent dépasser 12 cm pour les mêmes vitesses avec un mélange en proportion égale de nacre et de styvarène.

La variation des profondeurs suit une loi logarithmique en fonction du temps l'asymptote étant pratiquement obtenue après une durée d'action d'une heure et demi.

Les résultats de ces différentes études en canal sur les matériaux artificiels devraient, en association avec des considérations sur la similitude des modèles réduits à fonds mobiles, apporter des éléments pour mieux orienter les études du modèle sédimentologique du Port de ZEEBRUGGE le choix du matériau mobile s'orientant vers de la nacre de densité 1,22 mélangée ou non à du styvarène avec une légère distorsion des courants permettant d'ajuster le matériau maquette au sédiment naturel.

L'Ingénieur chargé de l'Etude

L'Ingénieur Principal

M. BEN ABDALLAH,

S. MANOUJIAN



L'Ingénieur en Chef du
Département de Sédimentologie

C. MIGNIOT

Maisons-Alfort Juillet 1981

REFERENCES

- 1 SHIELDS, A : *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung* Mitteilungen Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, 1936.
- 2 *Etude théorique des Possibilités de reprise des sédiments par les courants et par les houles.* M. BEN ABDALLAH, S. MANOUJIAN, C.MIGNIOT Rapport L.C.H.F Juin 1981.
- 3 *Mechanics of sediment transport* S. YALIN 1972.
- 4 *Mitteilungen des Franzius -Instituts für Grund- und Wasserbau des Technischen Hochschule Hannover* Heft 29 HANNOVER 1967.
- 5 *Proceedings of the Royal Society (London), serie A vol 187, 1946, 15 p.*
- 6 *Beach Erosion Board, Technical Memorandum n° 48, 1954, 37 p.*
- 7 LARRAS : *Société Hydrotechnique de France quatrième journée de l'hydraulique, Paris, Juin 1956 (La Houille Blanche, numéro spécial, 11 p).*
- 8 *Thèse de doctorat de l'université de Paris, 1958, (publié par le Comité Central d'océanographie et d'étude des côtes, n° 138, 1958), 171 p.*
- 9 *Hydraulique et Granulats* J. LARRAS 1972.
- 10 *Action de la houle sur les sédiments* J.LECLERC, B. BELLESSORT, C.MIGNIOT - L.C.H.F - CNEOX
- 11 *Action des courants de la houle et du vent sur les sédiments - C.MIGNIOT - S.C.H.F Houille Blanche N°1 1977*

Annexe

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

ACTION D'UN COURANT SEUL

- Photo n° 1 (14 13 53) Profondeur 16 cm (nacre 35/50) $V_m = 17,9$ cm/s
- Photo n° 2 (14 13 54) Profondeur 16 cm (nacre 35/50) $V_m = 17,9$ cm/s
- Photo n° 3 (14 13 64) Profondeur 16 cm (nacre 35/50) $V_m = 26,5$ cm/s $t = 20$ mn
- Photo n° 4 (14 13 75) Profondeur 16 cm (nacre 35/50) $V_m = 31,5$ cm/s $t = 15$ mn
- Photo n° 5 (14 18 18) Profondeur 16 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(30 %, 70 %) $V_m = 20$ cm/s (aval)
- Photo n° 6 (14 18 19) Profondeur 16 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(30 %, 70 %) $V_m = 20$ cm/s (amont)
- Photo n° 7 (14 13 09) Profondeur 10 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(50 %, 50 %) $V_m = 22$ cm/s
- Photo n° 8 (14 13 10) Profondeur 10 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(50 %, 50 %) $V_m = 18,5$ cm/s

ACTION SUPERPOSEES DE LA HOULE ET DES COURANTS

- Photo n° 9 (14 13 47) Profondeur 10 cm Nacre 35/50 $V_m = 19,5$ cm/s $H = 2,5$ cm
 $T = 0,7$ s
- Photo n° 10 (14 13 62) Profondeur 10 cm Nacre 35/50 $V_m = 26,3$ cm/s $H = 1,6$ cm
 $T = 0,7$ s
- Photo n° 11 (14 18 27) Profondeur 16 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(30 %, 70 %) $V_m = 18$ cm/s $H = 3$ cm $T = 0,7$ s (aval)
- Photo n° 12 (14 18 28) Profondeur 16 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(30 %, 70 %) $V_m = 18$ cm/s $H = 3$ cm $T = 0,7$ s (amont)
- Photo n° 13 (14 13 14) Profondeur 16 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(50 %, 50 %) $V_m = 21$ cm/s $H = 2$ cm $T = 0,7$ s
- Photo n° 14 (14 13 12) Profondeur 16 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50
(50 %, 50 %) $V_m = 21$ cm/s $H = 2$ cm $T = 0,7$ s

ACTION DE LA HOULE SUR UN ESTRAN

Photos n° 15 (14 18 30) (14 18 31) Pente 3 % $H = 2,5 \text{ cm}$ $T = 0,7 \text{ s}$ $t = 15 \text{ mn}$

Photo n° 16 (14 18 35) Pente 1,5 % $H = 1 \text{ cm}$ $T = 0,7 \text{ s}$ $t = 10 \text{ mn}$

Photo n° 17 (14 18 43) Pente 1,5 % $H = 1 \text{ cm}$ $T = 0,7 \text{ s}$ $t = 20 \text{ mn}$

Photos n° 18 (14 18 39) (14 18 40) Pente 2,5 % $H = 1,8 \text{ cm}$ $T = 0,7 \text{ s}$ $t = 45 \text{ mn}$

ACTION D'UN COURANT ALTERNATIF

Photo n° 19 (14 21 78 - 14 21 79) (14 21 81 - 14 21 89) Configuration du lit au cours de 12 marées à $t = 0, \frac{3}{2} T, 3T, 4T, 5T, 6T, 7T, 8T, 9T, 10T, 11T$

FORMATION D'UNE FOSSE D'EROSION

Photo n° 20 (14 24 39) Profondeur 10 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50 (50 %, 50 %) $V_m = 24,9 \text{ cm/s}$ $t = 15 \text{ mn}$

Photo n° 21 (14 24 40) Profondeur 10 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50 (50 %, 50 %) $V_m = 24,9 \text{ cm/s}$ $t = 25 \text{ mn}$

Photo n° 22 (14 24 58) Profondeur 10 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50 (50 %, 50 %) $V_m = 19,5 \text{ cm/s}$ $t = 15 \text{ mn}$

Photo n° 23 (14 24 59) Profondeur 10 cm Mélange Styvarène + Nacre 35/50 (50 %, 50 %) $V_m = 19,5 \text{ cm/s}$ $t = 45 \text{ mn}$

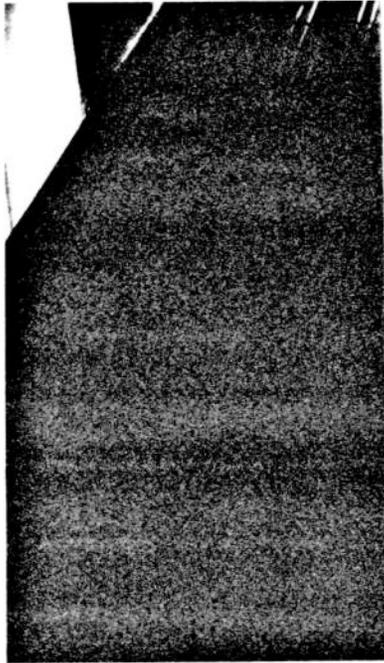
Photo n° 24 (14 55 30) Profondeur 10 cm Nacre pure 35/50 $V_m = 20 \text{ cm/s}$ $t = 145 \text{ mn}$ (vue de côté)

Photo n° 25 (14 55 33) Profondeur 10 cm Nacre pure 35/50 $V_m = 20 \text{ cm/s}$ (vue de face)

Photos n° 26 (14 55 32) (14 55 31) Profondeur 10 cm Nacre pure 35/50 $V_m = 20 \text{ cm/s}$ $t = 145 \text{ mn}$

Profondeur d'eau : 16 cm

photo n° 1



$V_m = 17,9$ cm/s
photo n° 2

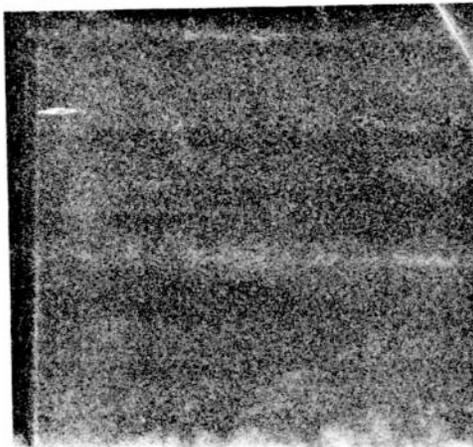
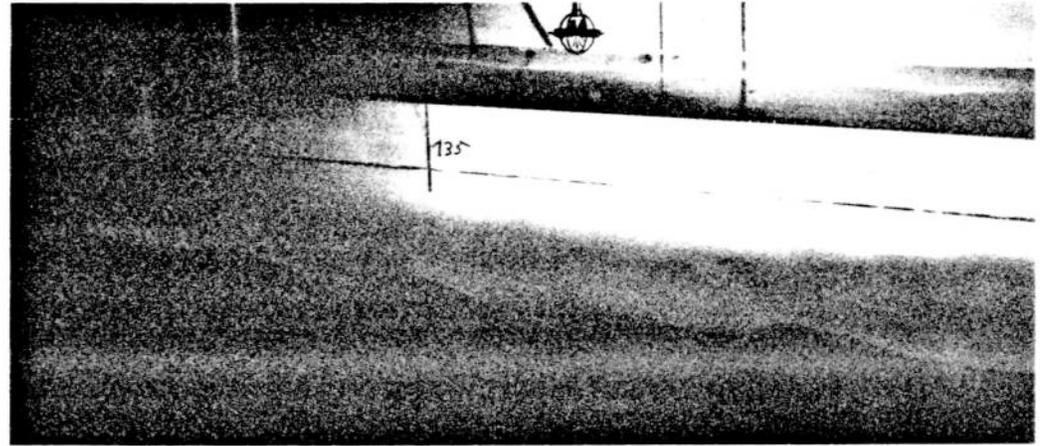


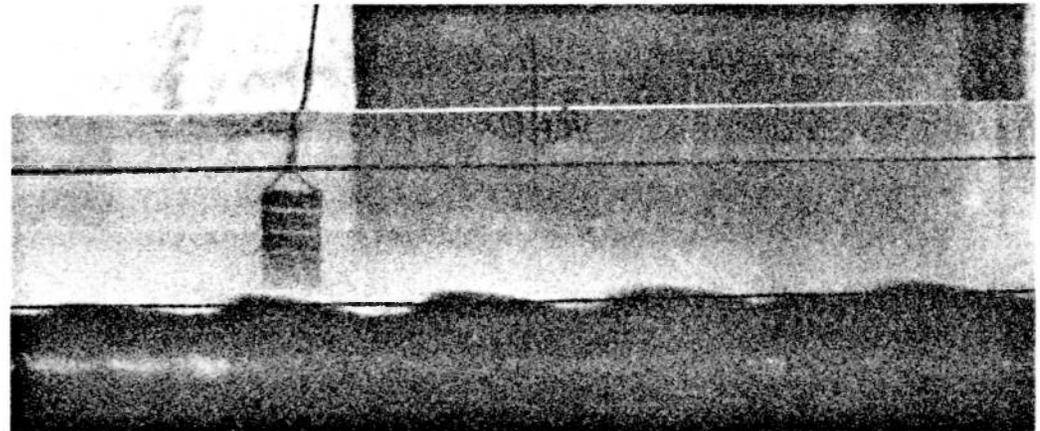
photo n° 3



$V_m = 26,5$ cm/s
temps : 20 mn
photo n° 4

Caractéristiques des rides

$\lambda = 25$ cm
 $n = 2,8$ cm
 $U_r = 0,9$ mm/s



$V_m = 31,5$ cm/s
temps : 15 mn

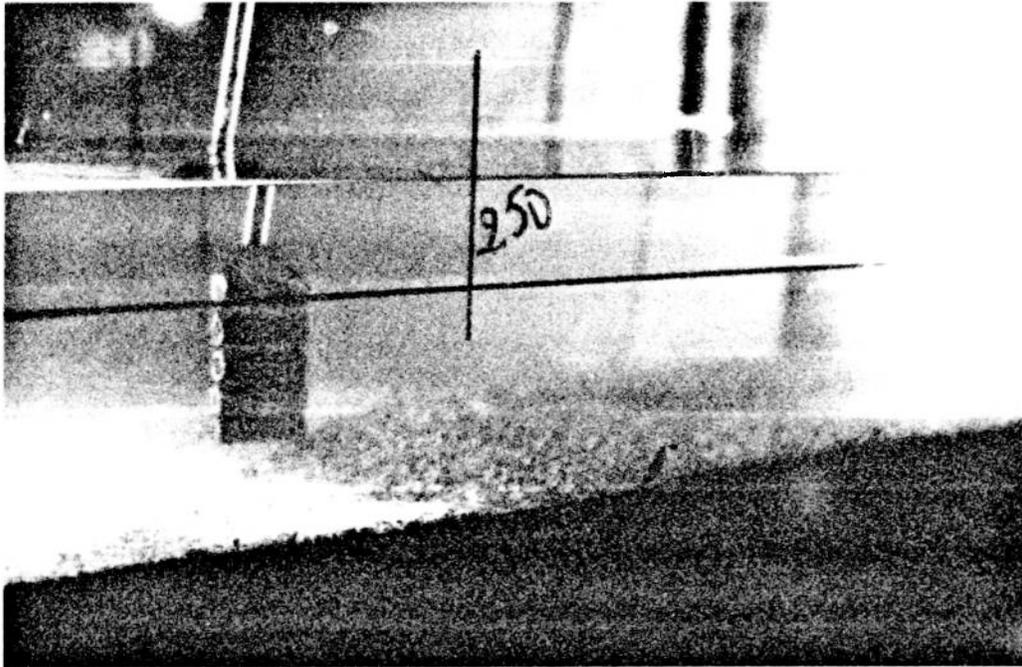
Caractéristiques des rides

$\lambda = 25$ cm
 $n = 2,8$ cm
 $U_r = 0,9$ mm/s

COURANT SEUIL

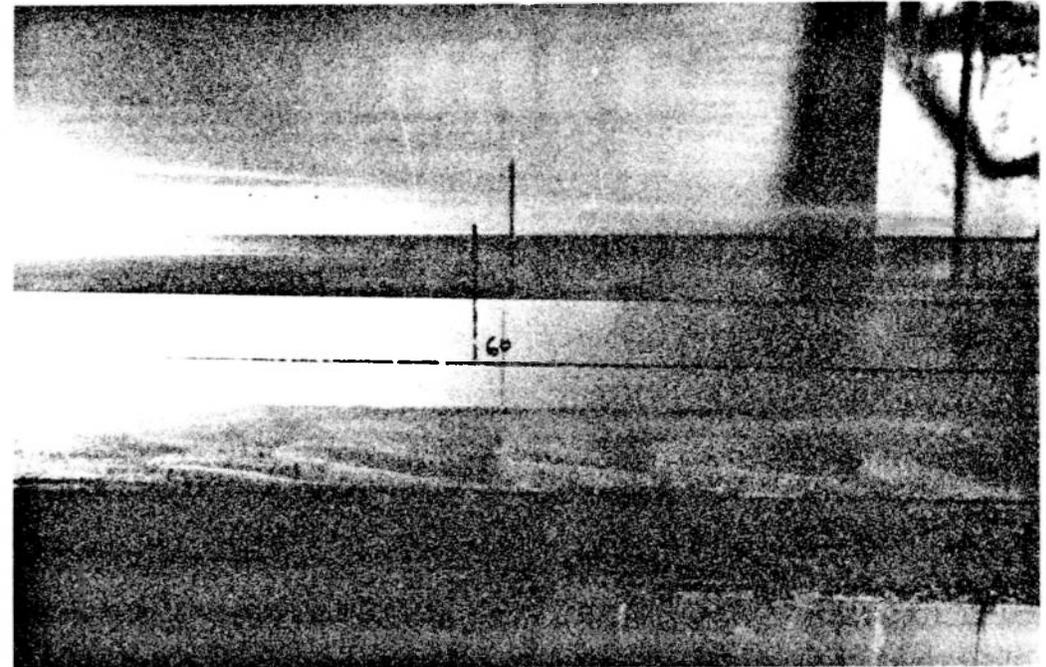
Profondeur d'eau : 16 cm
Vitesse du courant : 20 cm/s

photo n° 5



Partie aval du canal

photo n° 6



Partie amont du canal

Débit solide : uniquement styvarène.
On voit la formation de dunes de styvarène en aval
et une partie du lit (droite) qui est bien ridée.

COURANT SEUL

photo n° 7

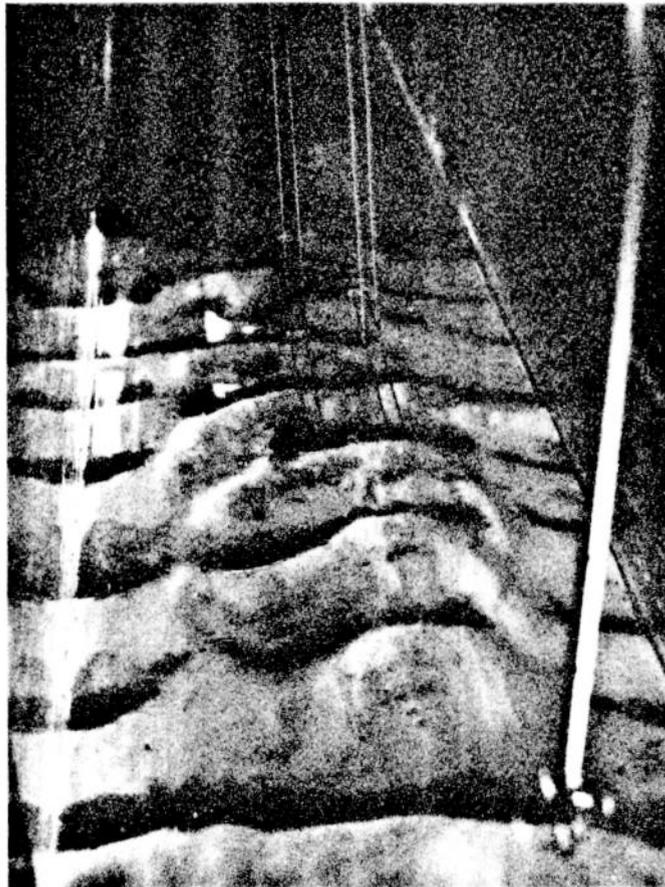
Profondeur d'eau 10 cm



Vitesse du
Courant : 22 cm/s

Le lit est bien ridé sur toute sa longueur.

photo n° 8

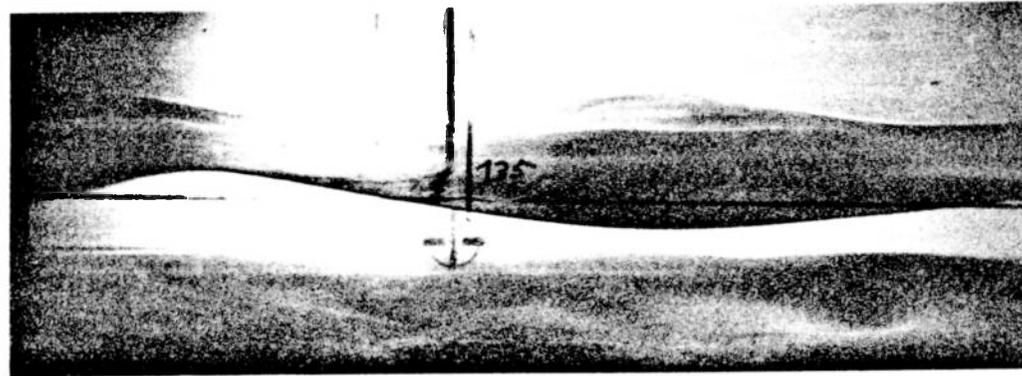


Vitesse du courant :
18,5 cm/s

Les rides sont bien tracées sur toute
la largeur du canal.

photo n° 9

Profondeur d'eau : 10 cm



La mauvaise propagation de la houle se traduit par une irrégularité des ondulations du fond.

Vitesse du courant

$$V_m = 19,5 \text{ cm/s}$$

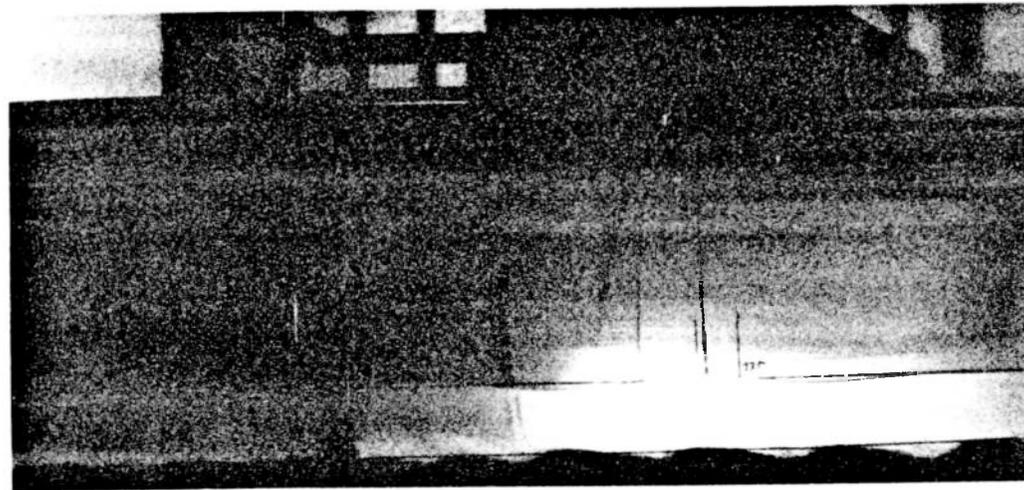
Exentricité

$$e = 1500$$

Amplitude et période de la houle

$$H = 2,5 \text{ cm} \quad T = 0,7 \text{ s}$$

photo n° 10



La houle se propage convenablement. Rides régulières sur le fond du lit.

Vitesse du courant

$$V_m = 26,3 \text{ cm/s}$$

Exentricité

$$e = 1500$$

Amplitude et période de la houle

$$H = 1,6 \text{ cm} \quad T = 0,7 \text{ s}$$

STYVARENE + NACRE 35/50 MELANGE (70 %, 30 %)

V

COURANT + HOULE

Profondeur d'eau : 16 cm

photo n° 11

Aval

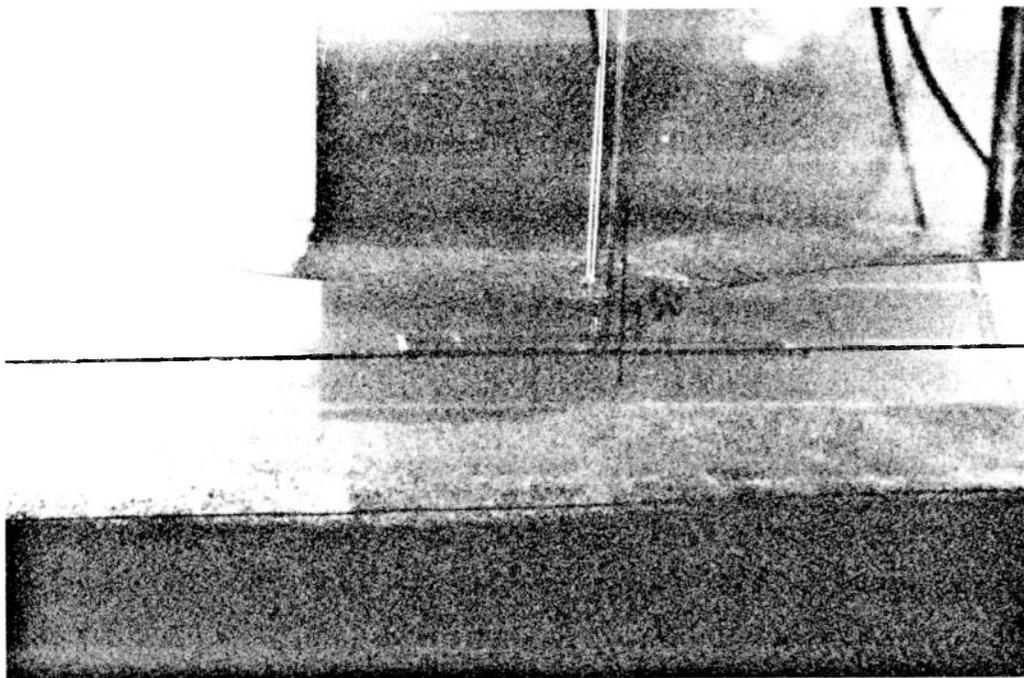


photo n° 12

Amont



Vitesse du courant 18 cm/s Caractéristiques de la houle : $H = 3 \text{ cm}$ $T = 0,7 \text{ s}$.

Prépondérance du Styvarène notamment en surface.
Cumul du Styvarène à la partie gauche du canal avec quelques grains seulement à la partie droite du canal. Ce qui signifie que le débit solide est principalement sinon totalement du Styvarène.

COURANT + HOULE

Profondeur d'eau : 16 cm

Vitesse du Courant : 11 cm/s

Caracteristiques de la Houle } T = 0,7 s
 } H = 2 cm

photo n° 13



Régularité des rides
sur tout le lit.

photo n° 14



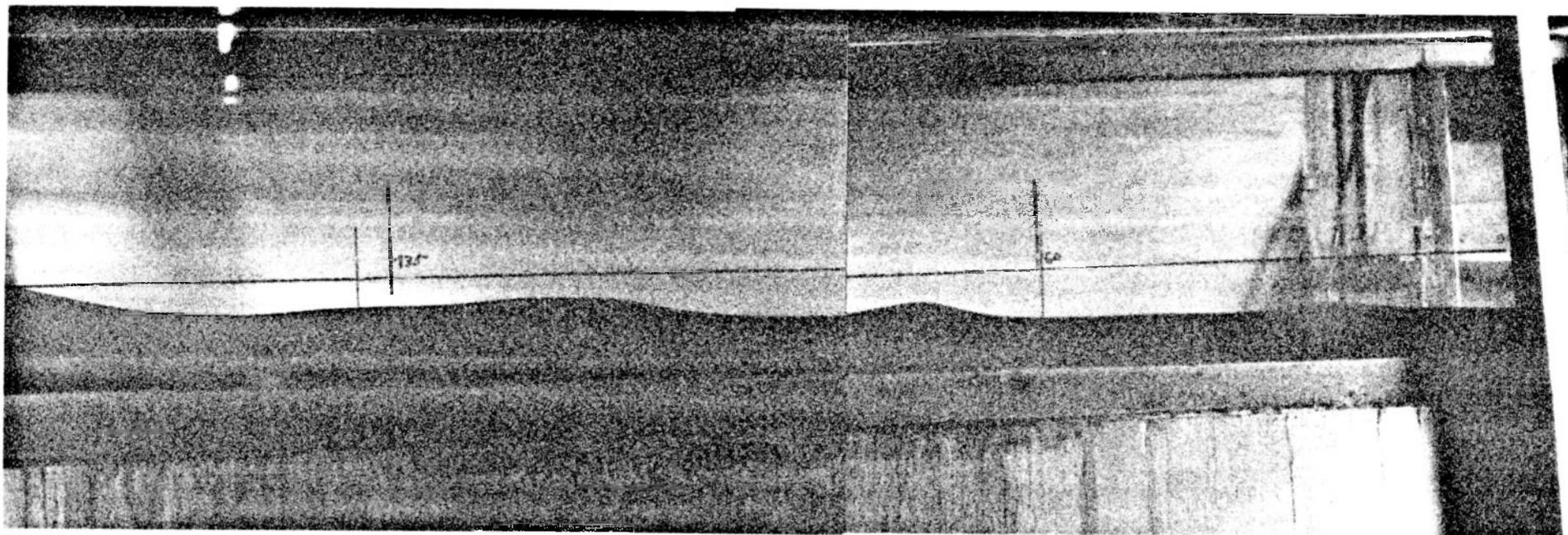
Quelques dissymétries
dans la partie amont.

Pente de l'Estran : 3 %

Caractéristiques de la houle : $\left\{ \begin{array}{l} \text{amplitude incidente : 2,5 cm} \\ \text{période : 0,7 s.} \end{array} \right.$

photo n° 15

t = 15 mn



→ Sens de propagation
de la houle.

Le styvarène ne se met pas en émulsion. Seuls quelques grains très fins de Nacre (poussière de Nacre) sont en suspension surtout du côté du rivage. Par contre une ségrégation très nette se produit entre les deux matériaux, avec la formation d'un lit de sédiment lourd (Nacre 35/50) et une couche supérieure de Styvarène pur.

Caractéristiques de la houle : } Amplitude incidente : 1 cm
 } Période : 0,7 s.

Pente de l'estran 1,5 ‰

photo n° 16

t = 10 mn

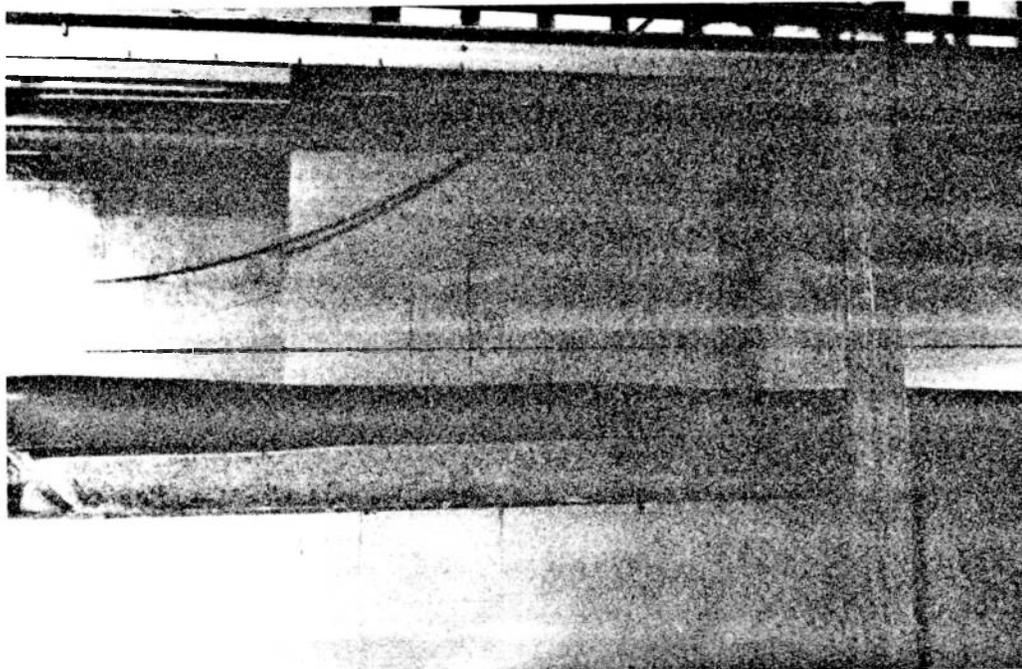
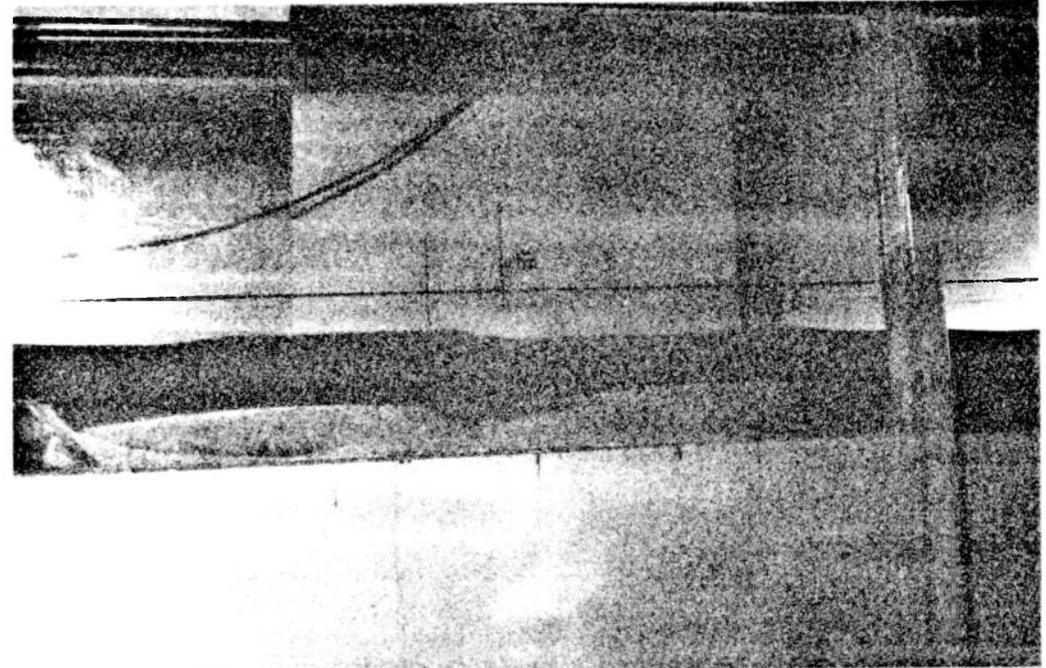


photo n° 17

t = 20 mn



→ Sens de propagation de la houle

→ Sens de propagation de la houle

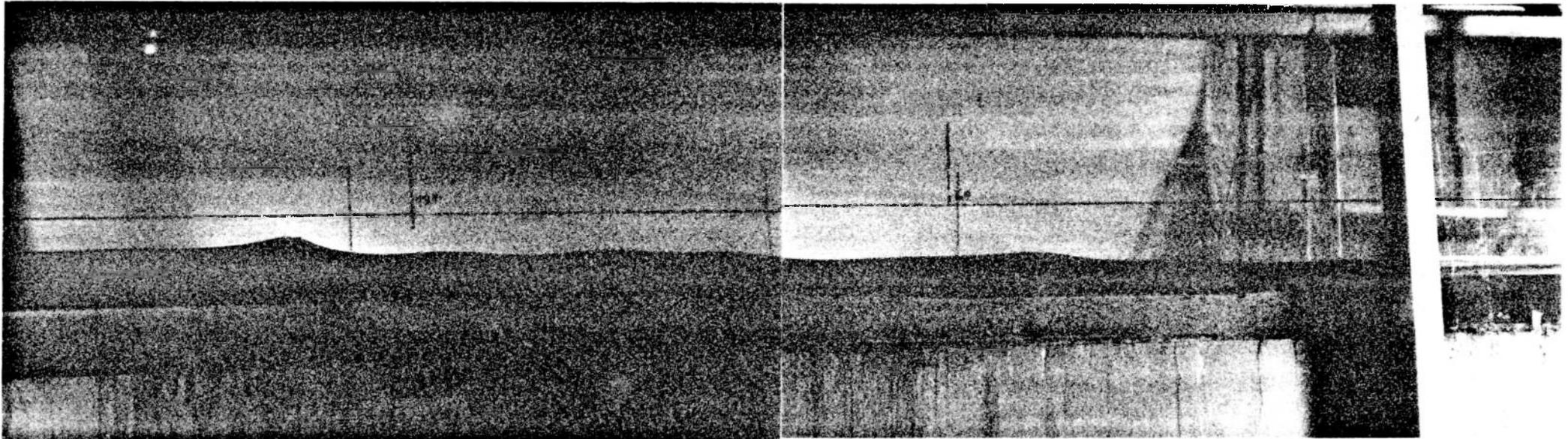
Sur ces photos on voit le déplacement du Styvarène dans le sens inverse de la propagation de la houle. Sur la photo de droite la surface de séparation entre le Styvarène pur et le lit de Nacre est légèrement ondulée. La longueur d'onde de ces ondulations est presque constante mais l'amplitude ou la hauteur est plus grande vers le large.

Pente de l'estran : 2,5 %

Caractéristiques de la houle : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Amplitude incidente : 1,8 cm} \\ \text{Période : 0,7 s.} \end{array} \right.$

photo n° 18

t = 45 mn



→ Sens de propagation de la houle

Il s'est formé trois dunes de Styvarène, on en voit deux ; une entre les sections (0) et (60) du canal, de caractéristiques ($\lambda = 60$ cm et $\eta = 1,5$ cm) et l'autre au niveau de la section (135) de caractéristiques ($\lambda = 70$ cm et $\eta = 2,5$ cm). Ces dunes pourraient caractériser les ventres d'un système d'onde stationnaire qui s'établit sur le lit de sédiment.



Départ 0 T



$\frac{3}{2}$ T



3 T



4 T



5 T



6 T



7 T



8 T



9 T



10 T



11 T

MATERIAU : STYVARENE + NACRE 35/50 MELANGE A (50 %, 50 %)

Essai 4 : } profondeur d'eau 10 cm
 } vitesse du courant 24,9 cm/s.

photo n° 20 t = 15 mn

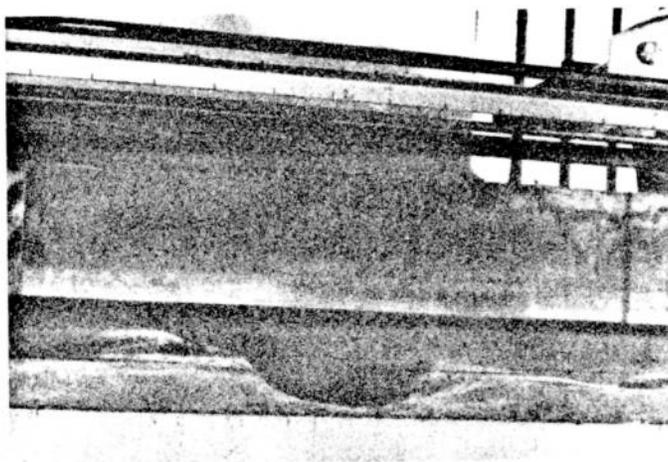
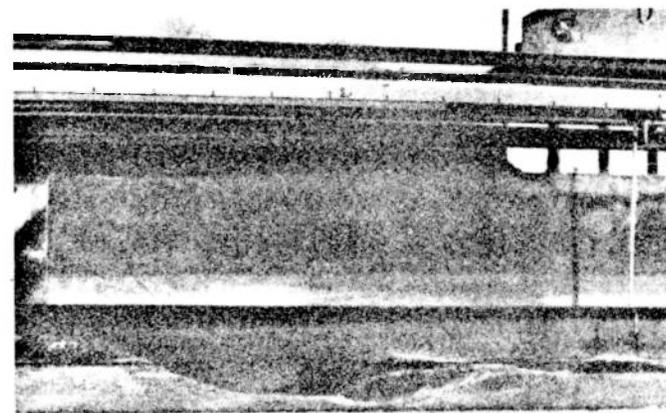


photo n° 21 t = 25 mn



Zone réélargie Zone réduite

Caractéristique d'une fosse. ← Sens du courant.

. profondeur	8,0 cm
. dépôt en aval de la fosse	4,5 cm
. longueur	30,0 cm

Zone réélargie Zone réduite

← Sens du courant.

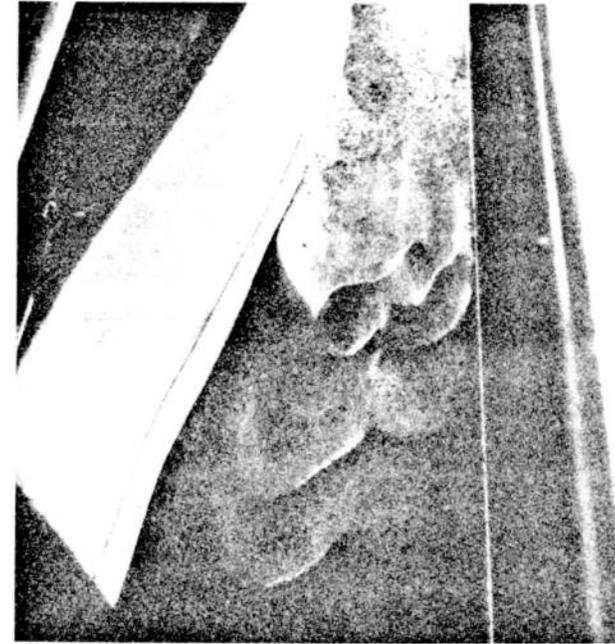
. profondeur	8,5 cm
. dépôt en aval de la fosse	5,0 cm
. longueur	36,0 cm

MATERIAU : STYVARENE + NACRE 35/50 MELANGE A (50 %, 50 %)

Essai 3 { profondeur d'eau 10 cm
vitesse du courant : 1^o,5 cm/s.

photo n° 22 t = 15 mn

photo n° 23 t = 4 H

Zone
réduiteZone
réélargieSens
du
courant
+Zone
réduiteAprès
rétrécissement
rides

Erosion peu importante. Les rides qui paraissent en aval de la partie rétrécie ont les caractéristiques suivantes :

 $\lambda \neq 10 \text{ cm}$ $\eta \neq 0,5 \text{ cm}$

La fosse est très douce et couvre toute la Zone réduite. Elle est profonde de 2 cm et longue de 20 à 30 cm.

Formation de rides en aval de la fosse, de caractéristiques :

 $\lambda \neq 12 \text{ cm}$ $\eta \neq 0,5 \text{ cm}$

photo n° 24



Vitesse du courant 20 cm/s.

Profondeur d'eau 10 cm.

$t = 145$ mn

Caractéristiques de la fosse :

profondeur : 4,5 cm.

longueur : 35 cm.

vue de dessus

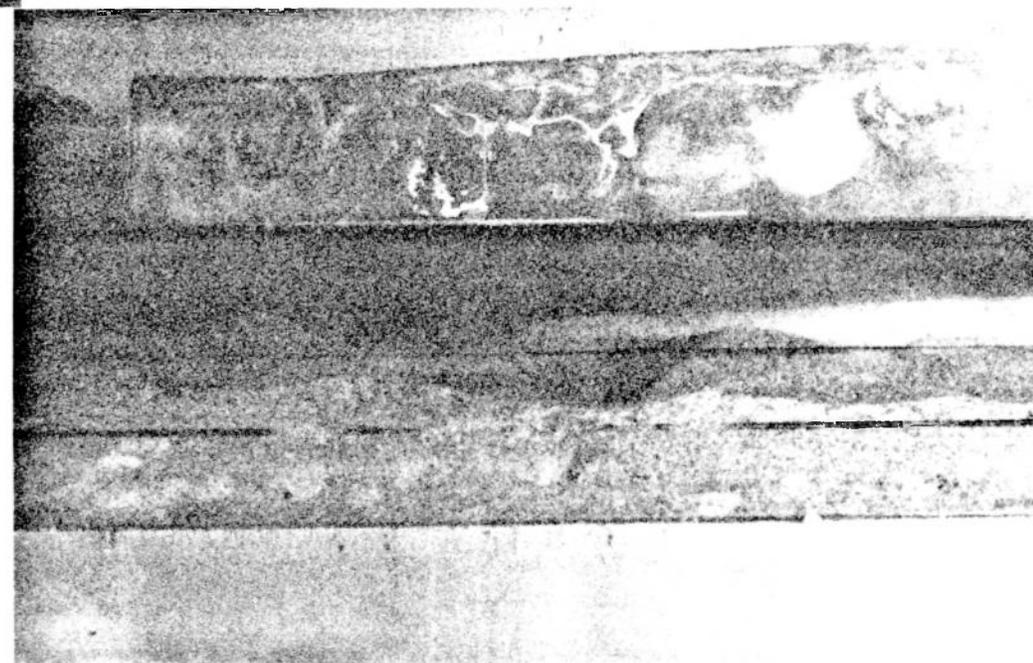
photo n° 25

Zone réélargie

Zone rétrécie

vue de côté.

Dans cet essai, il s'est formé d'abord une seule fosse et à 60 mn une deuxième fosse qu'on voit sur la photo ci-contre (vue de dessus).



MATERIAU NACRE PURE 35/50

Profondeur d'eau : 10 cm

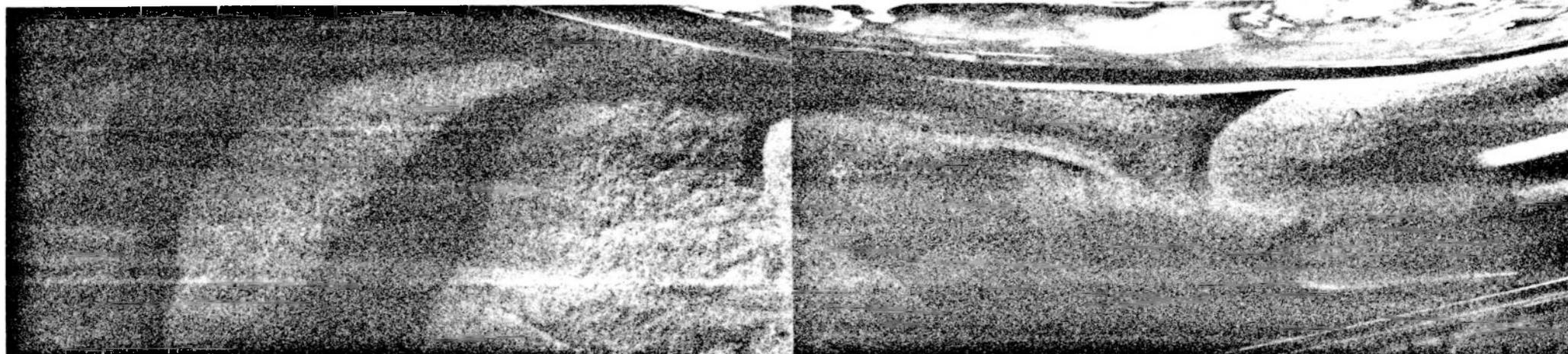
 $t = 145 \text{ mn}$

photo n° 26

Rides

Deuxième fosse

Première fosse



Zone réélargie

Zone rétrécie

Sur cette photo qui correspond au même essai 4 que précédemment, on voit bien les deux fosses et les rides dans la zone réélargie. Ces rides ont pour longueur d'onde $\lambda \approx 15 \text{ cm}$ et pour amplitude $a \approx 1 \text{ cm}$.

LISTE DES TABLEAUX

- *Courant seul, début d'entraînement, mesure de débit, évolution du fond, mesure de turbidité pour différentes profondeurs d'eau 10 et 16 cm.*

Tableau I : Nacre 20/35

Tableau II : Nacre 35/50

Tableau III : Nacre 50/120

Tableau IV : Polystyrène 50/120

Tableau V : Styvarène

Tableau VI : Nacre 50/120 + Sciure de bois

Tableau VII : Nacre 35/50 + Styvarène

- *Courant et houle, profondeur d'eau 10 et 16 cm.*

Tableau VIII : Nacre 20/35

Tableau IX : Nacre 35/50

Tableau X : Nacre 50/120

Tableau XI : Polystyrène 50/120

Tableau XII : Styvarène

Tableau XIII : Nacre + Sciure de bois

Tableau XIV : Nacre + Styvarène

TABLEAU I

COURANT

MATERIAU NACRE 20/35

DEBUT D'ENTRAINEMENT

Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm							Profondeur d'eau 16 cm									
	8	6	4	2	V_m cm/s	U_{**} cm/s	ζ_{**} 10 ⁻²	14	12	10	8	6	4	2	V_m cm/s	U_{**} cm/s	ζ_{**} 10 ⁻²
depart lent	13.0	12.4	11.5	10.9	11.8	0.63	2.52	12.4	12.4	12.4	12.1	11.7	10.6	10.3	11.8	0.59	2.21
Vitesse																	
depart rapide	17.4	16.6	16.1	14.8	16.1	0.86	4.71	18.6	18.6	18.6	18.3	17.6	16.3	15.5	17.8	0.89	5.04

MESURE DE DEBIT ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm						Profondeur d'eau 16 cm					
		17.1	17.1	17.1	20.2	20.6	18.0	18.0	18.0	20.0	20.0	20.3	
V_m	cm/s	17.1	17.1	17.1	20.2	20.6	18.0	18.0	18.0	20.0	20.0	20.3	
U_{**}	cm/s	0.92	0.92	0.92	1.08	1.11	0.90	0.90	0.90	1.01	1.01	1.02	
Fr		0.21	0.21	0.21	0.25	0.25	0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21	
t	mn	30	60	90	60	30	30	60	90	60	90	30	
U_r	cm/s	0.006	0.006	0.009	0.014	0.013	0.004	0.005	0.004	0.009	0.014	0.05	
Y_t	cm				3	3				2	4		
Δ	cm	21.6	27.7	25.9	27.6	24.1	18.0	13.2	20.3	21.8	23.7	17.4	
η_b	cm	0.5	1.2	2.5	3.3	2.6	1.2	1.2	1.2	1.5	2.4	1.3	
Q_c	g/ms	0.05	0.14	0.19	1.76	1.63	0.15	0.16	0.17	0.19	0.31	0.30	
Q'_c	g/ms	0.05	0.14	0.19	1.91	1.83	0.15	0.16	0.17	0.19	0.31	0.30	
Q_r	g/ms	0.1	0.4	1.4	2.8	2.0	0.15	0.15	0.15	0.4	1.0	0.6	
Q_{sc}	g/ms	0.07	0.27	0.8	2.1	1.8	0.15	0.2	0.2	0.4	0.9	0.6	
Q_{ss}	g/ms												
Q_{sc}^*	10 ⁻²	0.008	0.032	0.09	0.21	0.18	2.49	2.49	2.49	4.44	10.0	6.6	
ζ_{**}	10 ⁻²	5.39	5.39	5.39	7.43	7.07	5.15	5.15	5.15	6.49	6.49	6.62	

TABLEAU II
COURANT
MATERIAU NACRE 35/50
DEBUT D'ENTRAINEMENT

Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm							Profondeur d'eau 16 cm									
	8	6	4	2	V _m cm/s	U* cm/s	ζ*	14	12	10	8	6	4	2	V _m cm/s	U* cm/s	ζ*
Départ faible Vitesse	12.7	12.1	11.3	10.8	11.9	0.59	4.04 10 ⁻²	12.9	12.9	12.9	12.8	12.6	11.4	11.0	12.5	0.58	3.91 10 ⁻²
Départ fort	16	15.5	14.4	14	15.1	0.75	6.54 10 ⁻²	16.1	16.1	16.0	15.8	15.3	14.4	13.7	15.5	0.73	6.19 10 ⁻²

MESURE DE DEBIT SOLIDE ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm										Profondeur d'eau 16 cm									
		16.6*	18	18	18	18	20.1	21*	27.5*	33.8*	17.3	17.3	17.3	17.3*	18	20	20	20	20.1	24.1*	30.1*
V _m	cm/s	16.6*	18	18	18	18	20.1	21*	27.5*	33.8*	17.3	17.3	17.3	17.3*	18	20	20	20	20.1	24.1*	30.1*
U*	cm/s	0.83	0.90	0.90	0.90	0.90	1.00	1.00	1.37	1.68	0.81	0.81	0.81	0.81	0.84	0.94	0.94	0.94	0.94	1.13	1.41
Fr		0.20	0.22	0.22	0.22	0.22	0.25	0.25	0.34	0.41	0.17	0.17	0.17	0.17	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21	0.25	0.32
l	mn	90	30	45	60	90	30	60	15	15	30	45	60	90	90	45	60	90	30	20	15
U _r	cm/s	0.006		0.009	0.01	0.01	0.01	0.015	0.089	0.14				0.009	0.008	0.01	0.023	0.021	0.03	0.04	0.09
Y _t	cm	10	4	10	10	10	10	10	10	10				10	10	8	12	12	3	16	16
h	cm	19.5	11.5	14.1	20	25.5	12.2	21	25.4	26.1				13	12.5	14	13.5	13.2	14	17.1	24.8
η	cm	3.4	0.7	2.2	3	3	3	3.5	2.3	1.5				1.9	1.9	2	1.8	1.7	1	2.04	2.8
Q _c	g/ms	0.2	0.09	0.22	0.36	0.9	0.83	1.13	8.73	8.22	0.0067	0.0063	0.01	0.35	0.25	0.12	0.28	0.61	0.19	2.86	5.75
Q' _c	g/ms	0.22	0.09	0.22	0.56	1.37	0.96	1.36	15.03	14.18	0.0067	0.0063	0.01	0.48	0.31	0.26	0.39	0.84	0.33	5.15	10.48
Q _r	g/ms	1.1		1.1	1.8	1.8	1.8	3	12.4	12.8				1	0.9	1.2	2.4	2.0	1.8	4.9	15.3
Q _{sc}	g/ms	0.76	0.09	0.51	0.9	1.35	1.23	1.83	12	11.7				0.61	0.48	0.52	1	1	1.15	4.3	10.5
Q _{ss}	g/ms	0.106							1.80	1.44				0.2						1.4	1.9
Q _{sc*}	10 ⁻²	0.18	0.02	0.11	0.2	0.3	0.25	0.37	1.79	1.42	0.0016	0.0016	0.0025	0.15	0.11	0.11	0.21	0.75	0.16	0.77	1.52
ζ*	10 ⁻²	8.01	9.41	9.41	9.41	9.41	11.62	11.62	21	32.6	7.62	7.62	7.62	7.62	8.20	10.27	10.27	10.27	10.27	18.8	23.0

MESURE DE TURBIDITE indiquée par *

V _m en cm/s.	Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm					Profondeur d'eau 16 cm					V _m en cm/s.
		1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	
21		7	5.6	3.1	1.8	0.53	2.45	2.65	0.96	0.54	0.28	17.3
16.6	Concentration en 10 ² g/l	1,023	1,023	0,594	0,367	0,189	12	7,29	4,72	3,48	2,02	24.1
27.5		11.53	10.69	5.96	3.61	0.94	11.7	8.32	6.07	4.38	2.64	30.1
33.8		10.08	6.74	3.35	1.04	0.19						

TABLEAU III

COURANT
MATERIAU NACRE 50/120
DEBUT D'ENTRAINEMENT

Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm							Profondeur d'eau 16 cm									
	8	6	4	2	V_m cm/s	U_* cm/s	ζ_* 10^{-2}	14	12	10	8	6	4	2	V_m cm/s	U_* cm/s	ζ_* 10^{-2}
départ lent	13.0	12.6	11.7	11.0	12.2	0.55	7.03	15.4	15.5	15.4	15.3	14.5	13.3	12.9	14.9	0.64	9.52
Vitesse départ rapide	15.3	14.5	12.9	12.1	13.8	0.63	9.23	17.9	17.9	17.9	17.8	17.0	16.0	15.3	17.2	0.74	12.73

MESURE DE DEBIT SOLIDE ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm								Profondeur d'eau 16 cm					
		16.4	16.4	16.4	17.5	17.7	18.1*	19.9	20.2*	18	18	18	19.5	19.5	19.6
V_m	cm/s	16.4	16.4	16.4	17.5	17.7	18.1*	19.9	20.2*	18	18	18	19.5	19.5	19.6
U_*	cm/s	0.75	0.75	0.75	0.80	0.81	0.83	0.91	0.92	0.78	0.78	0.78	0.84	0.84	0.85
Fr		0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.24	0.25	0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21
t	mn	30	60	90	60	30	90	30	60	30	60	90	30	90	60
U_r	cm/s		0.004	0.006	0.009	0.017	0.028	0.018	0.021	0.007	0.004	0.006	0.011	0.016	0.012
Y_t	cm		1	2	10	8	10	10	10	2.5	6	16	11	16	16
h	cm	18.1	11.1	11.3	15.5	15	19.4	12.6	18.2		12.2	12.3	10.1	17.4	13.7
η	cm	0.4	0.6	1.2	2	1.8	2.1	1.5	2.5	0.5	1.4	1.7	1	2.7	2.1
Q_c	g/ms	0.0013	0.0027	0.0045	1.04	0.26	1.10	0.98	1.99	0.07	0.14	0.19	0.40	0.52	0.45
Q'_c	g/ms	0.0013	0.0027	0.10	2.11	0.43	2.83	2.38	5.86	0.07	0.22	0.39	0.52	1.25	1.21
Q_r	g/ms		0.14	0.44	1.1	1.8	3.5	1.6	3.2	0.2	0.3	0.6	0.6	2.6	1.5
Q_{sc}	g/ms	0.0013	0.05	0.19	1.4	0.83	2.4	1.6	3.6	0.11	0.23	0.39	0.5	1.4	1.0
Q_{ss}	g/ms				0.7		1		1.7					0.4	0.6
Q_{sc}^*	10^{-2}	0.0007	0.027	0.10	0.69	0.42	1.1	0.72	1.6	0.05	0.12	0.20	0.24	0.68	0.48
ζ_*	10^{-2}	13.08	13.08	13.08	14.88	15.25	16.02	19.25	19.68	14.44	14.44	14.44	16.40	16.40	16.80

MESURE DE TURBIDITE indiquée par *

V_m en cm/s	Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm					Profondeur d'eau 16 cm					V_m en cm/s
		1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	
17.5		7.98	5.03	3.27	2.48	1.90	5.51	3.93	2.93	2.24	1.82	19.6
18.1	Concentration en 10^2 g/l	9.25	7.03	5.06	4.00	2.78	1.68	3.45	2.61	1.71	1.42	19.5
20.2		15.64	9.35	6.57	5.87	5.11						

TABLEAU IV

COURANT

MATERIAU POLYSTYRENE 50/120

DEBUT D'ENTRAINEMENT

Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm							Profondeur d'eau 16 cm									
	8	6	4	2	V_m cm/s	U_* cm/s	ζ^* 10^{-2}	14	12	10	8	6	4	2	V_m cm/s	U_* cm/s	ζ^* 10^{-2}
départ faible	8.2	7.8	7.5	6.8	7.8	0.35	8.92	8.3	8.3	8.3	8.0	7.8	7.3	6.7	7.8	0.33	7.93
Vitesse																	
départ rapide	10.0	9.8	9.3	8.5	9.4	0.43	13.47	10.2	10.2	10.2	9.8	9.5	9.1	8.2	9.5	0.41	12.24

MESURE DE DEBIT SOLIDE ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	10cm		16cm	
		*	*	*	*
V_m	cm/s	14.8	14.8	14.9	19.7
U_*	cm/s	0.67	0.64	0.64	0.85
Fr		0.17	0.16	0.16	0.21
t	mn	20	50	30	30
U_r	cm/s	0.05	0.012	0.026	
Y_t	cm	10	16	16	16
d	cm	26.15	31.3	30	
η_b	cm	1.7	1.3	0.5	
Q_c	g/ms	1.45	0.59	0.54	1.88
Q'_c	g/ms	3.75	1.40	0.86	3.45
Q_r	g/ms	5.1	0.95	0.79	
Q_{sc}	g/ms	3.4	0.98	0.73	2.66
Q_{ss}	g/ms	0.57	0.36		
Q_{sc}^*		2.41	0.62	0.35	1.28
ζ^*	10^{-2}	32.7	29.84	29.84	52.63

MESURE DE TURBIDITE indiquée par *

V_m en cm/s	Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm					Profondeur d'eau 16 cm					V_m en cm/s
		1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	
14.8	Concentration en 10^2 g/l	6.47	3.66	3.81	2.96	2.33	3.89	2.64	2.16	1.76	1.77	14.8

TABLEAU V

COURANT

STYVARENE

DEBUT D'ENTRAINEMENT

Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm							Profondeur d'eau 16 cm									
	8	6	4	2	V_m cm/s	U cm/s	ζ^*	14	12	10	8	6	4	2	V_m cm/s	U^*	ζ^*
départ faible	11.8	11.4	10.9	9.4	10.9	0.70	$3.1 \cdot 10^{-2}$	10.9	10.9	10.9	10.5	10.1	9.6	8.6	10.2	0.62	2.4
départ fort	15.2	14.6	13.8	11.9	13.9	0.91	$5.2 \cdot 10^{-2}$	16.0	16.0	16.0	15.4	14.7	14.0	12.5	15.0	0.91	5.2

MESURE DE DEBIT SOLIDE ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	10 cm			16 cm				
V_m	cm/s	15.2	15.7	19.7	14.9	15.5	19.5	20.2	24.9
U^*	cm/s	0.99	1.02	1.29	0.91	0.94	1.19	1.23	1.51
Fr		0.18	0.18	0.23	0.15	0.16	0.20	0.21	0.25
t	mn	40	20	25	50	30	30	45	10
U_r	cm/s			0.012			0.011	0.008	0.034
Y_t	cm								
λ	cm			63.5					
η	cm			1.4			2.5	2.7	4.8
Q_c	g/ms	0.27	0.48	7.86	0.5	1.04	6.78	7.46	33.0
Q'_c	g/ms	0.27	0.48	7.89	0.5	1.04	6.83	7.49	33.1
Q_{sc}	g/ms	0.27	0.48	7.87	0.5	1.04	6.8	7.47	3.3
Q_{sc}^*	10^{-2}	0.95	1.6	21	1.9	3.8	19.9	21	76
ζ^*	10^{-2}	6.2	6.6	10.5	5.2	5.6	8.9	9.5	14.4

REMARQUE : Q_{sr} n'a pas été pris en compte car les vitesses d'avancement des dunes U_d ne correspondent pas à la vitesse d'avancement des grains près du piège. Par conséquent $\frac{U_r \cdot \lambda}{2}$ ne représente pas le débit solide obtenu au cours de l'essai.

TABLEAU VI

COURANT

NACRE 50/120 + SCIURE DE BOIS

DEBUT D'ENTRAINEMENT

Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm							Profondeur d'eau 16 cm									
	8	6	4	2	V _m cm/s	U _* cm/s	γ _* 10 ² *	14	12	10	8	6	4	2	V _m cm/s	U _* cm/s	γ _* 10 ² *
depart faible	11.6	11.3	10.9	9.8	11.0	0.5	5.81	11.9	11.9	11.9	11.6	11.4	10.5	10.2	11.4	0.49	5.58
Vitesse depart fort	15.7	15.3	14.2	13.4	14.0	0.67	10.43	16.1	16.1	16.1	16.0	15.4	14.4	13.5	15.6	0.67	10.43

MESURE DE DEBIT SOLIDE ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm					Profondeur d'eau 16 cm						
V _m	cm/s	18.0	18.0	19.8	20.5*	24.7	18.1	18.1	18.1*	19.9	20.3*	22.6	25.5
U _*	cm/s	0.82	0.82	0.90	0.94	1.13	0.78	0.78	0.78	0.86	0.88	1.24	1.11
Fr		0.22	0.22	0.24	0.25	0.30	0.19	0.19	0.19	0.20	0.22	0.31	0.27
t	mn	30	60	30	60	30	30	60	90	30	60	30	30
U _r	cm/s	0.013	0.011	0.03	0.016	0.032	0.005	0.005	0.006	0.02	0.012	0.029	0.018
γ _t	cm	1	1	10	10	10		2	10	10	16	16	16
h	cm	25.8	23.1	20.8	34.4	28.1	20.1	21.0	16.9	17.2	26.5	29	21.2
η	cm	0.3	1	1.7	3.4	2.16	0.5	1	1.5	1.1	2.05	2.03	1.6
Q _c	g/ms	0.20	0.28	0.99	1.68	3.35	0.07	0.07	0.19	0.37	0.58	3.85	1.64
Q' _c	g/ms	0.24	0.33	1.49	2.70	5.55	0.07	0.07	0.24	0.57	1.10	5.61	2.72
Q _r	g/ms												
Q _{sc}	g/ms	0.22	0.30	1.24	2.19	4.45	0.07	0.07	0.21	0.47	0.84	4.73	2.18
Q _{ss}	g/ms				0.16				0.16		0.5		

MESURE DE TURBIDITE indiquée par *

V _m en cm/s	Cote à partir du fond (cm)	Profondeur d'eau 10 cm					Profondeur d'eau 16 cm					V _m en cm/s
		1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	
20.5	Concentration en 10 ² g/l	3.9	3.2	2.8	2.4	2.3	2.8	1.0	0.42	0.12	0.05	18.1
							4.0	2.8	2.0	1.7	1.5	20.3

TABLEAU VII

COURANT

MATERIAU : NACRE 35/50, STYVARENE

DEBUT D'ENTRAINEMENT

Profondeur d'eau :
16 cm.

		ZEEBRUGGE 50%					NACRE 50%				
Cote à partir du fond (cm)	départ faible Vitesse départ fort	14	12	10	8	6	4	2	V_m cm/s	U_{*} cm/s	Σ 10^2 *
		12.1	12.1	12.1	11.8	11.4	10.7	9.2	11.4	0.69	2.99
18.1	18.1	18.1	17.7	17.1	15.8	14.2	17.0	0.80	7.41		

MESURE DE DEBIT SOLIDE ET DE L'EVOLUTION DU FOND

Grandeurs	Unités	Z = 70 % N = 30 %			Z = 50 % N = 50 %		
			*			*	*
V_m	cm/s	18.2	19.9	23.9	17.1	19.9	24.0
U_{*}	cm/s	1.10	1.21	1.45	0.95	1.10	1.33
Fr		0.19	0.20	0.25	0.18	0.21	0.26
t	mn	30	20	15	30	30	20
U_r	cm/s	0.010	0.04	0.03	0.013	0.014	0.017
Y_t	cm	2	10		2	8	16
Δ	cm	12.0	17.0	14.4	33.2	27.5	13.5
η	cm	1.1	1.6	1.7	0.3	0.8	1.1
Q_c	g/ms	3.79	5.34	9.72	2.15	2.02	7.16
Q'_c	g/ms	3.79	5.47	9.80	2.15	2.02	7.74
Q_r	g/ms	3.79	5.41	9.76	2.15	2.02	7.49
Q_{ss}	g/ms		0.52		0.07	0.45	1
Q_{sc} *	10^{-2}						

MESURE DE TURBIDITE indiquée par *

V_m en cm/s	Cote à partir du fond (cm)	Z = 70% N = 30%					Z = 50% N = 50%					V_m en cm/s
		1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	
19.9		12.53	0.29	0.17	0.1	0.07	7.75	1.1	1.2	0.9	0.6	19.9
	Concentration en 10^2 g/l						13.65	3.27	2.06	1.24	0.68	24.0

TABLEAU VIII

COURANT ET HOULE

NACRE 20/35

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm				Profondeur d'eau 16 cm					
		Houle seule				Houle seule					
		Début d'entraînement				Début d'entraînement					
V_m	cm/s		17.7	17.9	19.5	19.8		17.7	17.7	20.0	20.3
U_*	cm/s		0.95	0.96	1.05	1.06		0.89	0.89	1.01	1.02
Fr			0.22	0.22	0.24	0.24		0.19	0.19	0.21	0.21
t	mn		30	60	60	30		30	60	60	30
U_r	cm/s		0.022	0.022	0.032	0.044		0.02	0.02	0.026	0.022
Y_t	cm		0.5	0.5	1	1			0.5	0.5	0.5
H	cm	1 1	1.7	1.65	2.27	2.27	1	2.75	2.72	3.9	3.8
T	s	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
C	cm/s	60	76	74	74	74	90	83	86	95	80
U_0	cm/s	4.2	6	5.9	8	8	2.4	5.5	5.4	7.7	7.6
L	cm	70	60	60	60	60	84	68	68	68	68
λ	cm		24.7	25.2	33	31.9		46		41	49.6
η	cm		1.1	1.26	1.1	1.37		1.8		1.7	1.5
Q_c	g/ms		1.44	1.25	3.39	2.50		1.26	1.18	3.61	3.11
Q'_c	g/ms		1.52	1.32	3.69	2.76		1.26	1.24	3.82	3.45
q_r	g/ms		1.4	1.6	2.1	3.6		2.1	1.7	2.6	2.0
q_{sc}	g/ms		1.4	1.4	3	2.9		1.5	1.4	3.3	2.8
q_{sc}/Q_{sc}				5	1.4	1.6		7	7	3	4

TABLEAU IX

COURANT ET HOULE

NACRE 35/50

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm				Profondeur d'eau 16 cm									
						Houle seule									
						Début d'entraînement									
				lent		rapide									
V_m	cm/s	17.6	17.9	18.1	26.1			17.9	18.0	18.0	19.1	19.4	19.5	27.4	
U_{*c}	cm/s	0.88	0.89	0.90	1.3			0.84	0.86	0.87	0.90	0.91	0.91	1.29	
Fr		0.21	0.22	0.22	0.31			0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	
t	mn	30	60	90	15			30	90	60	30	60	90	15	
U_r	cm/s	0.02	0.026	0.026	0.06			0.017	0.021	0.020				0.05	
Y_t	cm	3	3	3	10			1.5	3	2	1	1	2	16	
H	cm	1	1.2	2	1.5	1.2	2.2	1.9	2.1	1.9	3.5	3.7	4	2.2	
T	s	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
C	cm/s	60	70	85	78	62	83				90	86	80	62	
μ_0	cm/s	2.4	3	7	5	2.4	4.2	3.8	4.1	3.8	7	7.2	8	4.2	
L	cm	60	60	60	60	68	68	68	68	68	68	68	68	68	
λ	cm	11.7	12.2	12	16.1			11.1	11.8	11.5				18.5	
η_b	cm	1.02	1.25	1.28	1.7			1.2	0.92	1.1				2.8	
Q_c	g/ms	0.72	0.72	0.93	6.2			0.32	0.56	0.60	1.95	1.75	2.25	9.73	
Q'_c	g/ms	0.80	0.81	1.14	10.92			0.32	0.63	0.73	2.81	2.35	2.88	16.94	
Q_r	g/ms	1.2	1.8	2	6.2			1.2	1.2	1.2				8.5	
q_{sc}	g/ms	0.9	1.11	1.35	7.7			0.61	0.79	0.84	2.38	2	2.5	11.7	
q_{sc}/Q_{sc}		1.8	1.2	1 à 1.5				1 à 1.3	1 à 1.7	1 à 1.7	2 à 4.5	1.7 à 3.8	2 à 5	1.1	

TABLEAU X

COURANT ET HOULE

NACRE 50/120

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm				Profondeur d'eau 16 cm							
		Houle seule Début d'entraînement				Houle seule Début d'entraînement							
V_m	cm/s		17.5	17.5	19.9	21.1		18.1	18.2	18.5	19.3	19.9	20
U_*	cm/s		0.80	0.80	0.91	0.96		0.78	0.79	0.80	0.84	0.86	0.87
Fr			0.21	0.21	0.24	0.26		0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21
t	mn		30	60	30	60		60	90	30	60	30	90
U_r	cm/s		0.018					0.014	0.018	0.014			
Y_t	cm		6	6	10	10		8	8	7	7	3	7
H	cm	1.15	1.87	2.1	1.9	1.9	1.45	2.1	2.2	2.1	4.8	3.6	5.1
T	s	1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C	cm/s	78	83	85	74	71	76	95	95	100	95	95	100
μ_0	cm/s	4.2	6.2	7.4	6.4	6.4	4	4.1	4.2	4.1	9.5	7.1	11
L	cm	92	60	60	60	60	82	68	68	68	68	68	68
λ	cm		4.6					14	13	14.8			
η_0	cm		0.8					1.4	1.3	1			
Q_c	g/ms		0.33	0.52	1.14	0.96		0.67	0.70	0.76	1.13	0.76	1.11
Q'_c	g/ms		0.99	1.25	2.53	2.06		1.10	1.23	1.21	2.27	1.78	2.68
Q_r	g/ms		0.7					1.1	1.3	0.8			
q_{sc}	g/ms		0.67	0.88	1.83	1.51		0.9	1	0.9	1.7	1.2	1.8
q_{sc}/Q_{sc}			<1	1	1.14	<1		2	2	2	1.5	1.5	1.3

TABLEAU XI

COURANT ET HOULE

POLYSTYRENE 50/120

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm		Profondeur d'eau 16 cm	
		Houle seule Début d'entraînement		Houle seule Début d'entraînement	
V_m	cm/s		14.8		14.9 15.1
U_*	cm/s		0.67		0.64 0.65
Fr			0.17		0.21 0.21
t	mn		20		30 10
U_r	cm/s		0.023		
Y_t	cm		10		14 16
H	cm	0.55	0.70	1	1.27 2.9
T	s	0.8	0.70	0.8	0.7 0.7
C	cm/s	80	71	90	83 86
μ_0	cm/s	2	2.4	2.5	2.4 5.6
L	cm	70	60	82	68 68
λ	cm		31.8		36.1
η_b	cm		1.2		1.06
Q_c	g/ms		0.79		1.22 1.98
Q'_c	g/ms		3.05		2.90 4.02
Q_r	g/ms		1.6		
q_{sc}	g/ms		1.8		2 3
q_{sc}/Q_{sc}			<1		2 à 4.5 4

TABLEAU XII

COURANT ET HOULE

STYVARENE

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm			Profondeur d'eau 16 cm					
		Houle seule Début d'entraînement				Houle seule Début d'entraînement				
V_m	cm/s		15.3	19.2	19.4		15.0	16.3	20.5	23.0
U_e	cm/s		1.00	1.25	1.27		0.91	0.99	1.25	1.40
Fr			0.18	0.23	0.23		0.16	0.17	0.22	0.24
t	mn		15	15	10		20	20	15	15
U_r	cm/s		0.007	0.012	0.2		0.004	0.006	0.024	0.048
Y_t	cm									
H	cm	0.92	1.02	1.1	1.3	1.4	1.6	2.1	2.9	2.3
T	s	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
C	cm/s	90	71	90	90	90	80	95	100	110
μ_0	cm/s	3	3.8	4	4.4	3.5	3.2	4.2	5.8	4.8
L	cm	60	60	60	60	84	68	68	68	68
λ	cm		28.6	55.9	86		35.6	37.2		88.3
η_b	cm		1.1	1.1	1.4		1.2	1.4	2.5	2.4
Q_c	g/ms		7.18	12.76	16.28		4.06	4.11	12.6	23.7
Q'_c	g/ms		7.22	12.78	16.31		4.11	4.14	13.0	23.9
q_r	g/ms				17					
q_{sc}	g/ms		7.20	12.77	16.29		4.09	4.12	12.8	23.8
q_{sc}/Q_{sc}			15	1.7	2		4	4	17	

TABLEAU XIII

COURANT ET HOULE

NACRE ET SCIURE DE BOIS

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 10 cm				Profondeur d'eau 16 cm				
		Houle seule Début d'entraînement				Houle seule Début d'entraînement				
V_m	cm/s		18.3	18.5	19.4	20.3		18.2	18.4	20.6
U_*	cm/s		0.84	0.84	0.89	0.93		0.79	0.80	0.89
Fr			0.22	0.22	0.24	0.25		0.20	0.20	0.22
t	mm		50	30	30	60		60	30	30
U_r	cm/s		0.016	0.015				0.022	0.005	
Y_t	cm		4	4	7	7		6	5	10
H	cm	0.5	1.30	1.35	2	1.87	1.1	2.45	2.55	3.45
T	s	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C	cm/s	66	80	80	68	74	64	100	100	90
μ_0	cm/s	2	4.5	4.6	7	6.2	2.2	5	5.2	7
L	cm	60	60	60	60	60	68	68	68	68
λ	cm		14.8	32.8						
η	cm		0.78	0.67				18.8	43.2	
Q_c	g/ms		1.42	1.81	2.07	1.94		0.90	0.95	2.71
Q'_c	g/ms		1.78	2.11	2.71	2.91		1.08	1.99	3.89
q_r	g/ms									
q_{sc}	g/ms		1.6	1.96	2.39	2.42				3.3
q_{sc}/Q_{sc}			5	6.5	1.9	1.1		6	10	4

TABLEAU XIV

COURANT ET HOULE

Styvarène et Nacre II

Grandeurs	Unités	Profondeur d'eau 16 cm							
		Houle seule Début d'entraînement	70% LRH 30% NACRE II				50% LRH 50% NACRE II		
V_m	cm/s		16.5	20.3	24.8	28.6	18.1	20.3	24.9
U_*	cm/s		0.91	1.13	1.38	1.59	1.10	1.23	1.51
Fr			0.17	0.22	0.27	0.31	0.19	0.21	0.25
t	mn		30	30	20	15	30	15	15
U_r	cm/s		0.018	0.045	0.041	0.052	0.166	0.23	0.476
Y_t	cm		16	16	16	16	16	16	16
H	cm	1.4	2.0	4.0	2.97	1.75	2.32	3.02	2.1
T	s	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C	cm/s	100	80	90	80	55	90	100	71
μ_0	cm/s	3.8	4	8	6	3.8	5	6	4.2
L	cm	84	68	68	68	68	68	68	68
λ	cm		13.18	11.0	13.4	15.2	12.2	15.1	14.5
η_b	cm		0.73	0.5	1.4	1.75	0.5	0.9	1.7
q_c	g/ms		2.82	4.71	9.91	11.86	6.90	12.57	18.49
q'_c	g/ms		2.87	5.08	11.18	15.91	6.95	12.57	18.49
q_r	g/ms								
q_{sc}	g/ms		2.85	4.89	10.5	13.88	6.92	12.55	18.24
q_{sc}/Q_{sc}			1.3	2.4	1.4				

