

## CHAPTER 13

# MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

P. Lhermitte  
 Ingenieur des Ponts et Chaussées  
 Ministère des Travaux Publics - Paris

### NOTATIONS ET SYMBOLES

- $a_f^{(1)}$  : excursion théorique d'une particule du fluide sain située près du fond.
- $a^{(1)}$  : paramètre caractéristique de la houle  $a = \frac{\pi}{k}$ .
- $b$  : paramètre caractéristique de la houle  $b = \frac{k}{T}$ .
- $D$  : diamètre des particules.
- $d$  : demi-distance entre axes des rides.
- $h$  : demi-amplitude de la houle.
- $L$  : demi-longueur d'onde de la houle.
- $p$  : pression.
- $p^*$  : partie variable de la pression.
- $T$  : demi-période la houle.
- $t$  : temps.
- $u$  : vitesse horizontale.
- $u_M$  : vitesse maximum dans le fluide.
- $u_f$  : vitesse théorique maximum près du fond.
- $u_{\delta M}$  : vitesse théorique maximum à la frontière de la couche limite.
- $u_{\delta}$  : vitesse à la frontière de la couche limite.
- $v$  : vitesse verticale.
- $w$  : vitesse de chute.
- $\delta$  : épaisseur de la couche limite.
- $\bar{\delta}$  : valeur réduite de  $\delta$ .  $\bar{\delta} = \sqrt{\frac{k}{T}} \delta$
- $\delta k$  : valeur théorique caractéristique de l'épaisseur de la couche limite.
- $$\delta k = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\nu T}$$
- $\varepsilon$  : dimension de la rugosité.
- $\nu$  : coefficient de viscosité cinématique.
- $\nu_r$  : viscosité relative.
- $\rho$  : densité des matériaux.
- $\rho_0$  : densité du fluide.
- $S$  : demi-amplitude de la ride.
- $\gamma$  : force de frottement.
- $X$  : paramètre sans dimension :
- $X_1 = \frac{b^{1/2} p^*}{\nu^{1/2} \rho g}$  (paramètre caractéristique de la stabilité de la couche limite et de la formation des rides).
- $X_2 = \frac{\sqrt{u_f}}{(\nu b)^{1/2}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{z p^*}{\rho g} \right)$  (paramètre caractéristique du mouvement en masse du sable).

(1) Il importe de bien noter que  $a_f$  a les dimensions d'une longueur, alors que  $a$  a les dimensions de l'inverse d'une longueur.

# COASTAL ENGINEERING

## INTRODUCTION

Nous exposerons dans cet article, les résultats d'expériences que nous avons obtenues, relativement aux mouvements des matériaux de fond sous l'action des houles progressives, et nous tenterons de fournir des schémas d'explication des différents phénomènes observés.

Certains aspects des mouvements de matériaux sous l'action des houles, ne peuvent s'expliquer que par l'extension de certains phénomènes hydrauliques liés à la propagation des houles progressives : répartition des courants d'entraînement, effet de viscosité des fluides, développement de la couche-limite près du fond, etc ....

Nous nous bornerons d'ailleurs dans cette étude, à la description des mouvements de matériaux, qui dépendent directement des caractéristiques hydrauliques du mouvement du fluide, et plus particulièrement des caractéristiques de la couche limite, mais nous ne nous attacherons pas à l'étude de l'influence des caractères géologiques ou sédimentologiques du matériau sur le comportement de ce dernier, l'étude détaillée de ces phénomènes sortant du cadre de cette étude.

Sans exposer de façon complète et rigoureuse les phénomènes hydrauliques, il nous a semblé utile, pour la compréhension du texte, d'indiquer sommairement certains aspects schématiques de ces phénomènes. Les lecteurs désirant approfondir ces questions pourront se reporter aux ouvrages cités en bibliographie - (6) (7) pour les courants d'entraînement, (3) et (4) pour les phénomènes de couche limite.

### a) Les courants d'entraînement.

Différents auteurs, et en particulier M. MICHE, dans un article paru aux Annales des Ponts et Chaussées en 1942, ont montré que les mouvements périodiques progressifs d'un fluide (houle) n'étaient définis par les conditions aux limites, qu'à un paramètre près : la distribution du rotationnel le long d'une verticale. Il en résulte donc qu'il existe une simple infinité de houles de caractéristiques données. Physiquement ces différentes houles se distinguent par la distribution des courants moyens d'entraînement dans l'épaisseur de la lame d'eau.

En pratique, les houles naturelles, comme les houles de laboratoire, présentent en l'absence de phénomène perturbateur (action du vent, courant marin, etc...) une distribution caractéristique de ces courants d'entraînement, signalé en particulier par Coligny et Longuet Heggins :

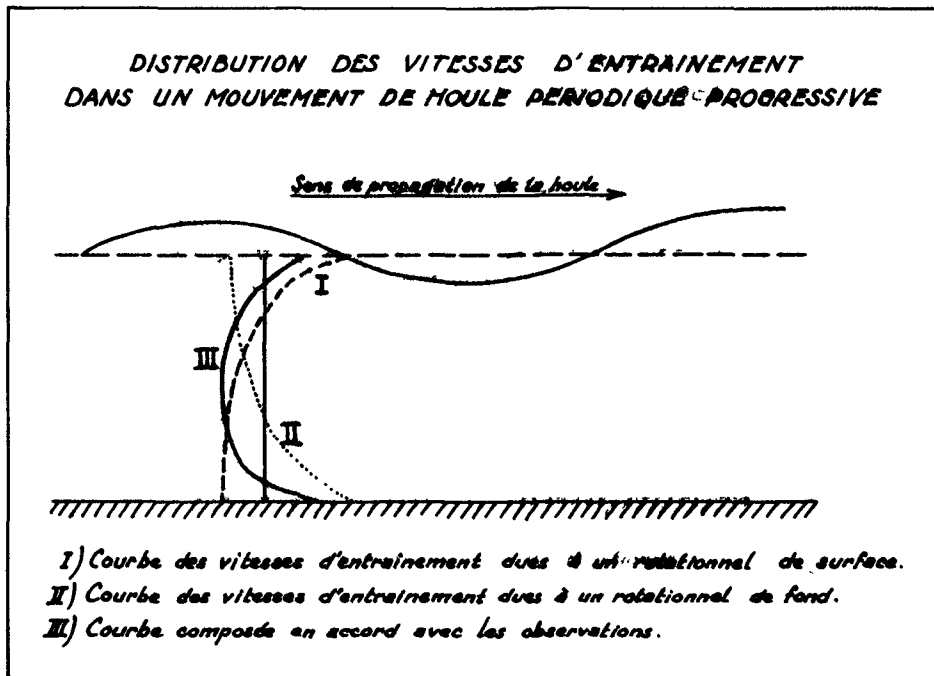
- en surface et près du fond le courant d'entraînement est dirigé dans le sens de propagation de la houle,

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

- au centre de la lame d'eau, le courant d'entraînement est dirigé dans le sens contraire de propagation de la houle.

Une houle théorique répondant à ces caractéristiques peut donc être déterminée par extension des résultats de M. MICHE, en introduisant une double distribution de rotationnel l'une traduisant l'influence des effets de surface, l'autre traduisant l'influence des effets de fond.

On obtient alors le résultat schématisé sur la figure ci-dessous :



## COASTAL ENGINEERING

### b) Influence de la viscosité - Couche-limite.

Du point de vue théorique, l'introduction de ces rotationnels traduit l'influence de la viscosité du fluide, influence particulièrement sensible près des interfaces supérieure et inférieure.

En fait, les manifestations de la viscosité près du fond - interface inférieure - sont particulièrement importantes, et donnent lieu à l'existence d'une "couche-limite", dont l'importance est fondamentale dans le mouvement du fluide. Nous avons étudié les différents aspects de la couche-limite : couche limite laminaire, couche limite turbulente, couche limite partiellement turbulente, ainsi que les conditions de stabilité et l'influence de la couche limite sur le mouvement du fluide supérieur (fluide sain).

Nous indiquerons rapidement certaines caractéristiques des couches limites des houles en fonds fixes, ces résultats permettent de mieux comprendre les interactions entre le fluide et les matériaux lors de l'étude des mouvements de matériaux de fond sous l'action de houles.

### c) Couche limite laminaire.

Tant que l'amplitude des houles ne dépasse pas une certaine valeur critique, on observe des couches limites près du fond parfaitement laminaires. Il est aisé de mettre en évidence, dans ce domaine, la couche limite laminaire, par la méthode colorimétrique, car celle-ci est très nettement différentiable du fluide situé hors de son domaine par sa coloration intense et surtout par la vitesse moyenne d'entraînement qu'elle présente très supérieure à la vitesse d'entraînement du fluide sain à la frontière de la couche limite.

En effet, la particularité essentielle des couches limites laminaires consiste dans l'existence d'une vitesse d'entraînement moyen dans le sens de propagation de la houle correspondant à un débit de fluide relativement important dans la zone située près du fond. Cette particularité qui permet de mettre nettement en évidence la couche limite, au cours des expériences, ne peut s'expliquer par les théories classiques de la houle. Elle est étroitement liée à la manifestation des forces de viscosité dans la couche limite.

Lorsque l'on observe attentivement la couche limite d'houle cylindrique de laboratoire, on observe en plus de ce débit moyen une " respiration " de la couche limite correspondant à une variation d'épaisseur au cours du temps. Enfin, d'une façon très générale, au cours du mouvement retour des particules du fluide, on observe également un décollement caractéristiques de la couche limite.

### d) Couche limite turbulente.

Lorsque l'amplitude de la houle est suffisamment élevée et lorsque la rugosité du fond est suffisamment forte, la couche

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

limite est instable et l'observation colorimétrique met en évidence une émission particulièrement active de turbulence près du fond. Il s'agit alors d'une couche limite turbulente dont les mouvements moyens d'entraînement sont beaucoup moins importants que ceux observés au cours de l'étude des couches limites laminaires et fortement aléatoires, pouvant d'ailleurs être dirigés, soit dans le sens de propagation de la houle, soit dans le sens contraire.

L'émission de turbulence provenant de l'instabilité du mouvement, par suite de l'action de la viscosité dans la zone où se développe la couche limite, se traduit par une contamination du fluide sain qui devient progressivement également turbulent sur une hauteur importante.

Nous avons étudié ces divers phénomènes et donné des valeurs pratiques de leur domaine d'existence.

### e) Couche limite partiellement turbulente.

Avant d'observer une couche limite totalement turbulente, on peut observer des couches limites présentant des phases sporadiques d'instabilité (émission de bouffées turbulentes) tandis que le mouvement dans son ensemble comporte les caractéristiques d'une couche limite laminaire (mouvement moyen dans le sens de la propagation de la houle, décollement, hauteur variable au cours d'une période de mouvement). Il semble que ce phénomène ne constitue pas uniquement un phénomène de transition entre la couche limite laminaire et la couche limite turbulente mais qu'il dépend, non seulement des conditions de stabilité près du fond, mais également de l'influence du mouvement général du fluide sur la stabilité de la couche limite.

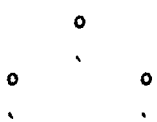
Nous abordons ici un caractère particulier des couches limites des mouvements à déplacement moyen négligeable pour lesquelles l'influence du mouvement du fluide sain semble aussi importante sur la couche limite que l'influence du fond. Dans le cas particulier des houles, de nombreux phénomènes exigent, pour pouvoir être compris, de ne pas perdre de vue que le mouvement orbital caractéristique de la houle qui correspond à un mouvement particulièrement stable par suite de la faible consommation d'énergie dans le fluide sain comporte une certaine "rigidité" qui impose son influence sur les mouvements de la couche limite d'une façon comparable à l'influence de la paroi.

### f) Influence de la couche limite sur le mouvement du fluide sain.

Si le fluide sain exerce une influence importante sur le développement de la couche limite, réciproquement le mouvement de celui-ci ne peut pas être étudié séparément de celui de la couche limite. Nous avons déjà dit que dans le cas d'une couche limite totalement turbulente, l'existence de celle-ci entraînait une émission continue de turbulence dans la zone du mouvement du fluide sain,

## COASTAL ENGINEERING

c'est-à-dire dans la zone du mouvement où la viscosité du fluide ne constitue pas un facteur d'émission de turbulence, mais constitue au contraire, un facteur d'évolution de la turbulence.



Jusqu'à présent nous avons admis - en particulier en ce qui concerne les phénomènes de couche limite - que les fonds étaient invariables (fonds fixes). Mais si les fonds sont constitué de matériaux mobiles les interactions entre le fluide et les matériaux de fond modifient sensiblement l'aspect de l'écoulement.

Réciproquement, l'action du fluide sur les matériaux constitutifs du fond, provoque dans certaines conditions, la mise en mouvement de ceux-ci. Les mouvements du fluide près du fond, et ceux des matériaux de fond, réagissent alors les uns sur les autres, et les phénomènes sédimentologiques et hydrauliques deviennent alors indissolublement liés.

Nous exposerons successivement les mouvements sous l'action de la houle des matériaux pulvérulents du type sable, c'est-à-dire formés d'un ensemble de grains ne présentant pas de cohésion entre eux, puis les mouvements de matériaux du type vase c'est-à-dire formant une phase fluide homogène possédant une certaine cohésion et distincte du fluide dans lequel se propage la houle.

### A - MOUVEMENTS DES MATERIAUX PULVERULENTS

#### I - ETUDES RECENTES CONCERNANT LES MOUVEMENTS DE MATERIAUX SOUS L'ACTION DE LA HOULE.-

De nombreux ouvrages ont été publiés, qui traitent du mouvement et du transport des matériaux - et en particulier des sables - sous l'action de la houle. La majorité de ces études concerne essentiellement le transport littoral ou les transports provoqués par des courants (rip-currents, courants de fond, courants de masse); d'autres donnent des renseignements fragmentaires sur le profil d'équilibre des plages de sable sous l'action moyenne de la houle. L'ensemble de ces études représente une documentation extrêmement intéressante; mais rares sont les auteurs qui se sont préoccupés du mouvement des matériaux provoqués, en eau profonde ou moyennement profonde, par l'action d'une houle cylindrique sur le fond; quant à la corrélation existant entre les mouvements de matériaux et les phénomènes de couche limite, elle n'est qu'effleurée lorsqu'il en est question.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Trois études méritent toutefois une mention spéciale par le sujet qu'elles traitent et les résultats récents qu'elles apportent.

a) Etude de M. LARRAS sur l'effet de la houle et du clapotis sur les fonds de sable, présentée aux IVes Journées de l'Hydraulique, 1956 (2).

L'étude de M. LARRAS a essentiellement porté sur les limites inférieures d'érosion alternative des fonds de sable sous l'action d'un clapotis. Le critère adopté par M. LARRAS pour définir le seuil d'érosion des sables correspond, non aux mouvements des grains en surface, mais essentiellement à l'apparition d'une érosion périodique sur le fond, du type ride, pouvant d'ailleurs ne s'effectuer qu'au bout d'un temps relativement long. Les études de M. LARRAS ont, d'autre part, permis de déterminer les profondeurs maxima d'érosion sous l'influence d'un clapotis. Quelques essais ont également été réalisés, en ce qui concerne l'action des houles pures sur les fonds de sable. Nous nous servons des résultats obtenus par cet auteur au cours de nos études.

b) Communication de MM. VINCENT et RUELLAN au Comité Technique de la S.H.F. en Juin 1957, intitulée Mouvement solides provoqués par la houle sur un fond horizontal (15).

Les essais effectués par MM. VINCENT et RUELLAN au Laboratoire hydraulique de la S.O.G.R.E.H.A. étaient, en certains points, comparables, dans leur but, à ceux que nous avons effectués au Laboratoire Central d'Hydraulique de France. Ils ont distingué trois formes de mouvements de sable : mouvement de grains en surface, formation des rides, mise en saltation. Ces auteurs se sont particulièrement attachés à déterminer, dans la mesure du possible, les débits qui pouvaient être provoqués par l'action de la houle sur des fonds de sable. Si, dans l'ensemble, leurs résultats d'expériences sont comparables aux nôtres, ces auteurs n'ont pas donné d'explication en ce qui concerne les processus fondamentaux de formation des rides; ils ont, d'autre part, attribué aux courants de masse, le transport des sables près du fond, alors que celui-ci doit être relié directement à la vitesse moyenne, qui se développe dans une couche limite laminaire, ou partiellement turbulente, phénomène qui constitue une loi générale indépendamment des conditions aux limites.

c) Etude de M. MADHAV MANOHAR(5) publiée dans le Beach Erosion Board, n° 75, 1955.

Cette étude est particulièrement intéressante car l'auteur se proposait d'étudier le mécanisme du mouvement des sédiments sur le fond, sous l'action des vagues, en les reliant directement aux phénomènes de couche limite. En fait, cette étude fut le prolongement de celle effectuée par M. HUON Li (1) sur la stabilité de la couche limite du mouvement des vagues, au Laboratoire de Berkeley

## COASTAL ENGINEERING

(U.S.A.). Ce dernier avait effectué une étude purement hydraulique, et M. MADHAV MANOHAR a utilisé la même méthode pour étudier le mouvement des sédiments de fonds (sable) sous l'action de la houle. Rappelons que cette étude, dans le but de couvrir un domaine comprenant, en particulier, les houles réelles, avait consisté à faire osciller le fond du canal d'essais, dont la masse d'eau restait immobile; le matériau mobile, déposé sur le fond, oscillait avec celui-ci.

L'auteur reconnaît lui-même que les résultats obtenus concernant les mouvements de matériau, sont sujets à de nombreuses réserves, par suite des effets de vagues stationnaires et courants secondaires, qui pouvaient être engendrés par la paroi. D'autre part, les réserves qui doivent être formulées, au sujet de l'étude hydraulique effectuée dans les mêmes conditions, sont à fortiori valables pour l'étude sédimentologique : la masse d'eau restant immobile, l'oscillation du fond est d'autant moins justifiable dans ce cas, qu'il s'ajoute une force d'inertie des grains non négligeable, et le mouvement ainsi représenté est périodique en fonction du temps, mais non point en fonction du parcours des molécules.

Malgré ces restrictions, les études de M. MADHAV MANOHAR sont particulièrement intéressantes, car elles font apparaître la possibilité de mouvements dont les processus sont tout à fait différents, suivant l'amplitude des mouvements envisagés sur le fond.

1. Mouvements isolés des grains;
2. Formation des rides;
3. Disparition des rides et mise en saltation des grains.

La partie de nos études, qui concernait les matériaux de faible densité, a mis en évidence les mêmes étapes, mais nous n'avons pu retrouver, avec les houles de laboratoires, la troisième étape "disparition des rides et mise en saltation", pour des matériaux de densité supérieure à 2.

Etant donné qu'il est certain qu'une telle mise en saltation s'effectue dans la nature pour les houles de tempêtes, il est particulièrement intéressant qu'au cours de ses essais M. MADHAV MANOHAR ait pu réaliser ce phénomène.

Ces résultats permettent en fait, d'extrapoler dans une large mesure les résultats de nos expériences.

D'autre part, M. MADHAV MANOHAR a constaté que l'apparition d'un mouvement totalement turbulent du fluide, au-dessus des matériaux, avait lieu lorsque les grains étaient mobiles, bien plus tard que lors des études de M. HUON Li, effectuées avec des rugosités fixes.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Ce résultat est à rapprocher des conclusions auxquelles nous avons abouti, au cours de cette étude, concernant la stabilité relativement grande de l'écoulement au-dessus des rides, et l'existence de couche limite à caractéristiques laminaires lors de la mise en suspension du matériau dans la masse.

### II - OBSERVATIONS EFFECTUEES SUR LES MOUVEMENTS DE MATERIAUX PULVERULENTS.

#### 1°) Condition de réalisation des essais.-

Les essais relatifs aux mouvements de matériaux ont été réalisés dans le grand canal vitré du Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

#### a) Caractéristiques des matériaux utilisés.

Les études ont porté sur sept matériaux différents, dont les caractéristiques physiques figurent dans le tableau ci-dessous

Une étude complète a été faite pour les quatre premiers matériaux, différent soit par la densité, soit par la granulométrie

MATERIAU UTILISE	DENSITE	DIAMETRE moyen	VITESSE chute moyenne
Bakélite .....	1,45	0,075 cm	3,6cm/s
Sable de Seine .....	1,45	0,028 cm	1,4cm/s
	2,60	0,075 cm	9 cm/s
	2,60	0,028 cm	3,9cm/s
Sable de Fontainebleau .....	2,60	0,018 cm	4,1cm/S
Soufre .....	1,88	0,075 cm	7,7cm/s
	"	0,028 cm	2,3cm/s

#### b) Caractéristiques des houles.

La houle reproduite dans le canal avait une longueur d'onde variant de 1 à 8m. Les expériences furent reprises pour trois hauteurs d'eau différentes: 30, 40 et 50 cm. La cambrure s'échelonnait de 0,25 à 6,6 %, la houle devenant ensuite rapidement irrégulière. Quelques essais supplémentaires ont été réalisés avec 20 cm d'eau, pour des houles de 2 L = 4 m puis 2 L = 6 mètres, et des cambrures variant de 1 à 3,5 %.

## COASTAL ENGINEERING

### c) Mode opératoire.

Le matériau était étendu sur une couche de [ ] de long, 10 cm. de large et 2 cm. de hauteur. Avant chaque essai, la surface de la couche limite était rendue parfaitement plane. Pour chaque essai, on laissait agir la houle pendant une demi-heure environ.

### 2°) Description des phénomènes observés.

Les différents mouvements de matériaux, qui se développent sous l'action d'un mouvement progressif périodique cylindrique du fluide situé au-dessus du matériau, peuvent revêtir trois formes différentes :

- déplacement en surface d'un nombre limité de grains;
- formation de rides régulières, avec ou sans déplacement, et évolution de ces rides;
- mise en saltation d'une quantité importante de matériaux, avec déplacement en masse de celui-ci.

#### a) Mouvement en surface.

Du point de vue expérimental, il faut distinguer le mouvement à la surface d'un fond rigide de quelques grains isolés de matériaux et le mouvement en surface d'un massif pulvérulent relativement homogène.

Les grains isolés de matériaux, à la surface d'un fond rigide (fond de ciment du canal expérimental), sont animés d'un mouvement de va-et-vient, par roulement ou saltation sur le fond, et ceci pour des amplitudes de houles relativement faibles. Leur mouvement est, toutefois, plus important que leur mouvement retour, de sorte qu'ils sont animés d'un mouvement moyen, dans le sens de propagation de la houle, comparable au mouvement moyen de la couche limite.

L'étude des conditions critiques de mise en mouvement des grains isolés, n'a pas semblé devoir conduire à des résultats pratiques intéressants, par suite des facteurs très diversifiés intervenant dans le processus (coefficient de forme, rugosité, stabilité du mouvement, dimensions des grains, etc..)

Le mouvement de grains à la surface d'un massif pulvérulent relativement homogène s'observe pour des houles de faible

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

amplitudes. Leur mouvement visualise, en quelque sorte, celui des particules du fluide près du fond: mouvement alternatif, avec résultante moyenne dans le sens de propagation de la houle. Ce mouvement en surface des grains cesse, en général, au bout d'un certain temps, soit par élimination de ces grains en dehors du massif pulvérulent, et l'on observe alors une progression de ces grains sur le fond rigide du canal, soit par suite de l'incorporation des grains dans le massif homogène, les grains s'enchevêtrant les uns dans les autres.

Pour certaines houles d'amplitude assez faible, on observe, en début d'expérience, un léger mouvement en surface, qui disparaît au bout d'un certain temps; les grains s'étant calés les uns contre les autres, il n'y a plus d'oscillations, même sur place.

Le mouvement en surface, pour le sable, c'est-à-dire pour un matériau pulvérulent de forte densité, n'est que rarement observé. En général, dès qu'il y a mouvement, des rides se forment.

Pour des caractéristiques de houles correspondant à la limite de la formation des rides, on peut toutefois observer des mouvements de grains s'apparentant à un mouvement en surface, mais intéressant une quantité plus importante de matériau. Ces mouvements, à l'opposé de ceux des grains isolés, semblent dépendre étroitement des perturbations apportées par le décollement de la couche limite permettant l'aspiration des grains à la couche de matériau.

### b) Formation des rides.

Suivant un processus que nous analyserons ci-dessous dès que le mouvement en surface devient relativement important, on observe, à la surface du massif pulvérulent, la naissance de rides régulières.

L'existence de rides stables constitue en général, la preuve d'un équilibre dynamique, accompagné de formation de tourbillons émis à des intervalles de temps égaux à la période de la houle, et entraînant la mise en suspension d'une partie du matériau.

On observe des projections de matériau, qui entraînent la formation régulière des rides et la génération de rides nouvelles. Corrélativement, se développe une turbulence partielle de la couche limite, qui propage la formation des rides par la houle.

Ces rides peuvent être animées de mouvements de translation moyens non négligeables, en général dirigés dans le sens de propagation de la houle.

## COASTAL ENGINEERING

Dans une zone de rupture de pente, on observe assez fréquemment le cheminement, dans le sens opposé à la propagation de la houle, des trains de rides. Il s'agit alors d'un processus relativement complexe lié à l'évolution de la couche limite, qui tend à rétablir la continuité du mouvement. En introduisant une source colorante au sein du massif pulvérulent, on observe, dans le cas du recul des rides, les phénomènes suivants :

- il se forme une trainée colorée se dirigeant dans le sens de propagation de la houle, sur une épaisseur de l'ordre de 2mm;
- au-dessus de cette zone marginale, située à la limite supérieure du massif pulvérulent, existe une zone, dont la résultante du mouvement moyen est dirigée en sens inverse, d'épaisseur moyenne de l'ordre de 5mm environ;
- une diffusion, plus prolongée du permanganate, met en évidence la composante du courant de masse du fluide dans le sens de propagation de la houle.

### c) Mouvement en masse.

Une houle de forte amplitude agit en profondeur sur la couche de matériau, et met ainsi la couche en suspension sur une épaisseur importante. Le grain individualisé est alors entraîné rapidement dans le sens de propagation de la houle. Le processus s'explique par l'action, en profondeur, dans le massif pulvérulent du gradient de pression dû à la houle. Il semble, en effet, que la mise en suspension soit le résultat des différences de pression existant entre les faces horizontales opposées de chaque grain.

Dans le cas de bakélite, dont le diamètre moyen des grains est de 0,28mm ceux-ci se regroupent toujours pendant la phase retour du mouvement de la houle, en donnant l'impression de rides, même lorsqu'il y a mouvement de toute la couche. Avec ce matériau, pour certaines caractéristiques de houles, au début de l'expérience la couche est mise en suspension sur toute son épaisseur, puis, lorsque son épaisseur est réduite par la houle à 0,5cm environ, il se forme, sur les 0,5 cm de matériau restant, des rides régulières progressant lentement vers la plage d'amortissement, suivant le processus décrit précédemment.

Tant que la couche est assez épaisse pour qu'il y ait projection, elle s'étend à l'arrière, bien que l'ensemble ait un mouvement de translation vers la plage. Dès qu'il n'y a plus projection, tout le matériau remonte vers la Plage.

En haut de la pente, on a quelquefois observé la formation de rides à l'arrière de la couche et un départ en masse à l'avant, mais ce cas est exceptionnel.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Ces observations ne sont pas contradictoires, mais mettent en évidence les différences fondamentales du processus qui régit les divers phénomènes. La formation des rides est un phénomène de stabilisation de l'écoulement, par formation périodique de tourbillons, tandis que la mise en saltation dépend essentiellement du gradient de pression existant dans la couche de matériau pulvérulent.

### III - FORMATION DES RIDES.

#### 1°) NAISSANCE ET PROCESSUS DE FORMATION DES RIDES (Schéma 1).

Pour que les caractéristiques de la houle envisagée soient compatibles avec l'existence de rides, il est nécessaire que le nombre de grains mis en mouvement à la surface du massif pulvérulent soit suffisamment important. Pendant la période au cours de laquelle naissent les rides, et qui correspond à un régime transitoire dans le cadre du développement de l'expérience, les grains sont arrachés au massif d'une façon analogue à celle produisant uniquement les mouvements en surface, c'est-à-dire suivant un processus aléatoire. Ces particules solides révèlent, néanmoins, très rapidement une tendance à se rassembler, pour former une barre perpendiculaire au sens de propagation des lames (configuration présentant la stabilité maximum de l'écoulement).

La distribution, dans le sens longitudinal du canal, de ces barres de très faibles dimensions, est elle-même absolument aléatoire au début du mouvement.

La présence d'une telle barre accentue le décollement de la couche limite au droit de cet obstacle, pendant la période de décélération du mouvement retour, et favorise l'arrachement et la sustentation par aspiration des grains de surface, situés à l'amont de la barre. (schéma 1a)

La mise en saltation de ces grains facilite l'entraînement de ceux-ci au cours du trajet aller des particules fluides. Les grains du matériau pulvérulent ainsi entraînés se déversent par-dessus la barre initiale. Cette configuration provoque, très rapidement, le décollement de la couche limite, pendant la période de décélération du mouvement aller, et favorise alors l'arrachement des grains situés à l'aval de la barre.

En définitive, l'obstacle que constitue la barre initiale (amorce de rides) tend à intensifier les mouvements de grains, en facilitant leur arrachement et leur mise en saltation de part et d'autre de celui-ci. Les dimensions de cette barre augmentent en même temps que raidit son profil, sous le vent de la houle. Le décollement simple de la couche limite, qui se produit

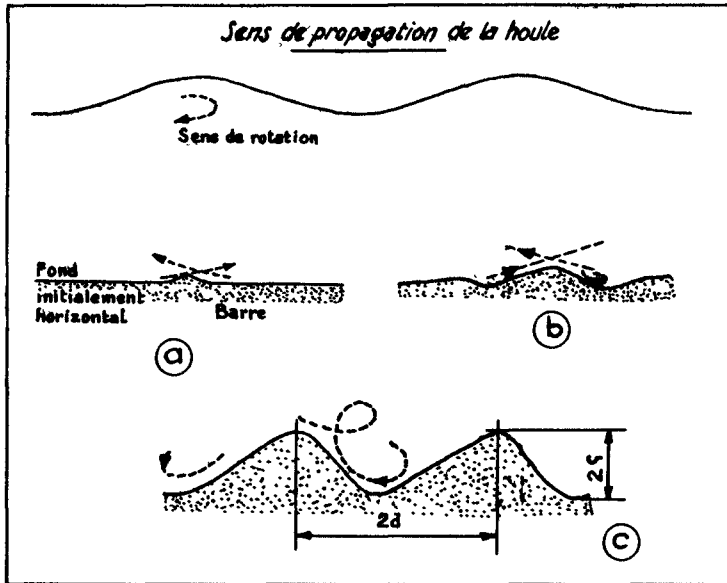


Schéma 1

à la fin du trajet aller, fait alors place à un tourbillon qui accentue, à son tour, le creusement au pied aval de la barre.

Jusqu'à l'apparition du tourbillon, phénomène qui doit se produire assez brutalement, lorsque les conditions de l'écoulement au voisinage de la barre le permettent, les particules issues des faces amont et aval de la barre, se déposent, en moyenne, dans des zones bien déterminées, à une distance qui dépend en premier lieu, des caractéristiques de la houle et des vitesses de chute des grains de matériau. Ces dépôts constituent de nouvelles amorces de rides, au voisinage desquelles se développent les mêmes phénomènes que ceux décrits plus haut.

Peu après l'apparition des tourbillons (un par rides) suivie d'une intensification des phénomènes de transfert de matériau, la couche présente un profil caractéristique en dents de scie, dont la face la plus raide correspond à la région sous le vent de la houle, la face la moins raide étant exposée au vent de la houle. (schéma 1<sub>b</sub>)

La répartition dans le sens longitudinal du canal de ces ondulations dissymétriques, n'est toutefois pas définitive; en même temps que le profil des rides se creusent, leur répartition varie jusqu'à être compatible avec l'établissement d'un équilibre dynamique.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Le processus, tel que nous l'avons décrit ci-dessus est particulièrement net avec les matériaux de faible densité, que nous avons utilisés. La formation de rides sur un lit de sable sous l'action de houles de laboratoire, est cependant plus long et moins caractéristique. Le processus est toutefois absolument comparable. Il se forme tout d'abord des zones privilégiées d'arrachement des matériaux de surface, formant des dépressions localisées. Celles-ci s'approfondissent progressivement et s'allongent jusqu'à ce que l'on observe nettement la formation du tourbillon caractéristique des rides. L'allongement du sillon générateur s'effectue en même temps que l'approfondissement de la partie centrale, ce qui explique la forme de croissant, à faible concavité tournée dans la direction de propagation de la houle, que l'on observe assez souvent.

### 2°) EQUILIBRE APPARENT DES RIDES.

Ainsi que nous l'avons vu, à une période relativement brève, au cours de laquelle la surface de la couche de matériel initialement horizontale, se plisse pour présenter un profil en dents de scie, succède une période de pseudo-équilibre dynamique. Le fond continue à être le siège de transferts importants de grains, cependant que le contour extérieur des rides semble présenter une stabilité définitive.

Lorsque cet état est atteint, l'ensemble des mouvements des particules du fluide et des particules solides se développe de la façon suivante :

$\alpha$ . Pendant le trajet aller du fluide sain, les forces de frottement développées dans la couche limite provoquent la remontée d'une certaine quantité de matériel le long de la face la moins raide de la ride qui vient se déverser par-dessus la crête de la ride sur la face/de celle-ci;

aval  
 $\beta$ . Pendant la décélération du mouvement aller des particules du fluide sain au-dessus de la partie aval de la ride, il se forme un tourbillon qui constitue l'une des caractéristiques de l'évolution des phénomènes marginaux près du fond (il importe, pour bien situer le problème, de considérer que le deuxième phénomène se produit avec un certain retard dans le temps, par rapport au premier phénomène, par suite du déplacement dans l'espace. En effet, lorsque l'on parle de trajet aller ou retour, celui-ci dépend de la variable  $(bt - ax)$ . Les variations de pression consécutives à la formation du tourbillon, assure l'arrachement des particules du fond, et leur mise en suspension. De plus, le tourbillon représente une partie du matériel déplacé en ;

$\gamma$ . Ce tourbillon évolue et s'élève au-dessus du niveau de la ride entraînant une partie importante des grains de matériel mis en suspension;

$\delta$ . Pendant le trajet retour des particules du fluide sain, le tourbillon est entraîné, ainsi que les particules en suspension, vers l'arrière de la ride.

L'ensemble du mouvement s'effectue, en définitive, au cours d'une période égale à celle de la houle ( $2 T$ ).

Le mouvement près du fond est alors devenu périodique dans le temps, et stationnaire dans l'espace (phénomène analogue aux ondes stationnaires du clapotis)<sup>(1)</sup>

### 3°) EVOLUTION DES RIDES.

Alors que le passage de chaque lame continue à soumettre les particules solides à un régime oscillatoire dissymétrique une observation attentive du comportement des rides révèle que celles-ci sont l'objet d'une lente évolution.

On assiste d'abord à une régression et (ou) à une progression de certaines d'entre elles, jusqu'à obtention d'un état d'équilibre conforme aux rides régulières de la nature. L'équilibre est atteint lorsque le tourbillon se reproduit avec des caractéristiques fixes, ce qui détermine l'amplitude des rides ( $2 S$ ) et lorsque la quantité de matériau qui est apportée à l'aval de la ride est égale à la quantité de matériau emportée par suite de la mise en saltation sous l'action du tourbillon: ce qui détermine la distance entre rides ( $2d$ ). (schéma 1<sub>c</sub>)

La formation d'un tourbillon de sens opposé au tourbillon précédemment décrit, c'est-à-dire un tourbillon se formant lors de la décélération du mouvement retour des particules s'observe lorsque l'amplitude des rides devient relativement importante par rapport à la distance entre les rides. Son intensité est, en général, inférieure à celle du tourbillon lié au mouvement de retour, mais il joue toutefois un rôle de stabilisateur vis à vis de la ride. En particulier, les mouvements deviennent plus symétriques, et la résultante du mouvement de la couche limite dans le sens de propagation de la houle devient négligeable.

En fait, la formation des rides correspond à une modification importante de la couche limite; d'une part les orbites des particules liées au fluide ne correspondent plus au mouvement de particules représenté valablement par les équations du fluide sain

---

(1) Cette remarque ne constitue pas qu'une image; elle explique, en fait, pourquoi la formation des rides, en présence d'un clapotis total ou partiel, est influencé par les distances entre ventres et noeuds .

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

qu'à une distance au-dessus de la ride au moins égale à trois ou quatre fois l'amplitude des rides, et d'autre part, le mouvement dans la zone marginale reste périodique en fonction du temps, mais n'est plus une fonction périodique de  $(bt - ax)$ . En effet, il se forme, pour une suite de valeurs du temps discontinues, et à intervalles égaux (périodicité dans le temps) des tourbillons en certains lieux caractéristiques. Le schéma explicatif des phénomènes de couche limite devient, de ce fait, beaucoup plus complexe, et le schéma proposé dans le chapitre II n'est plus valable.

A la stabilité de forme des rides peut se superposer un mouvement d'entraînement moyen des particules solides, par suite de la prédominance soit du glissement des grains le long de la surface des rides dans le sens aller, soit du transport dans le sens retour par saltation des grains. Le sens du débit solide moyen peut donc être variable suivant les conditions hydrauliques.

Indiquons que nous avons observé la progression des derniers éléments constitutifs d'un train de rides, dans le sens opposé au sens de propagation de la houle, dans des zones correspondant à des discontinuités du fond (rupture de la pente). L'évolution de l'ensemble tend à rétablir la continuité de la pente du fond, et, par conséquent, de l'écoulement.

Si l'on augmente l'amplitude de la houle, on observe corrélativement une augmentation de l'amplitude des tourbillons, puis l'instabilité des rides alors formées; celles-ci disparaissent et l'on observe une mise en saltation générale du matériau.

### 4°) STABILITE DE L'ECOULEMENT PRES DU FOND LIEE A L'EXISTENCE DES RIDES.

L'analyse des modes de formation des rides jusqu'à l'obtention de l'équilibre dynamique du fond, prouve que le phénomène de génération des rides constitue une réaction d'auto-défense du matériau, vis-à-vis de l'action de transport de la houle sur le fond, ou, ce qui revient au même, tend vers un équilibre correspondant à la consommation minimum d'énergie. En effet, les rides se forment lorsque le mouvement commence à être suffisamment important pour que la vitesse moyenne de la couche limite ne soit pas négligeable, ce qui correspondrait, une fois les matériaux mis en saltation lors du décollement de la couche limite, à un transport important au sein de cette couche limite. Mais la modification apportée à la couche limite, par la génération des tourbillons, enlève à celle-ci sa caractéristique de transfert uni-directionnel et rétablit l'équilibre entre les rides, soit que celles-ci deviennent stables par génération de deux tourbillons, soit qu'elles ne progressent plus que très lentement.

## COASTAL ENGINEERING

### 5°) LIMITE DE STABILITE DES RIDES.

Une augmentation progressive de l'amplitude de la houle s'accompagne corrélativement d'une augmentation de la dimension des tourbillons et provoque, par la suite, l'instabilité des rides alors formées. Celles-ci disparaissent peu à peu, jusqu'à faire place à une mise en saltation générale du matériau.

La mise en saltation du matériau, sur une épaisseur relativement importante, entraîne, près du fond, un écoulement dont la forme générale se rapproche de l'écoulement d'une couche limite partiellement turbulente. En particulier, cette zone marginale possède une vitesse moyenne importante dans le sens de propagation de la houle. Il semble, même que les vitesses moyennes, qui ont été relevées dans ce cas, soient d'autant plus élevées que l'épaisseur de la zone intéressée est plus épaisse. Les mesures étaient toutefois rendues difficiles par la rapidité du déplacement obtenu dans ce cas-là.

Il importe de noter que, très souvent, les caractéristiques considérées correspondent à une couche limite entièrement turbulente pour un fond infiniment rigide, alors que la présence de matériau conserve les caractéristiques laminaires de la couche limite, et semble introduire une modification des propriétés du milieu, comparable, du point de vue hydraulique, à une augmentation très appréciable de la viscosité du fluide.

En fait, si nous augmentons encore l'amplitude du mouvement, nous obtenons un mouvement réellement turbulent, qui provoque la mise en saltation locale très intense, mais pour laquelle la résultante du transport moyen dans le sens de la houle est beaucoup plus faible.

### 6°) RELATION ENTRE LES CARACTERISTIQUES DES RIDES ET LES CARACTERISTIQUES DE LA HOULE.-

Revenons en arrière, et considérons une houle dont les caractéristiques sont compatibles avec l'existence d'un train de rides stables.

Le processus de formation des rides, ci-dessus décrit, exige que la distance entre rides soit inférieure à l'excursion totale des molécules au-dessus des rides lorsque ces rides correspondent à un équilibre, que ce soit un équilibre dynamique ou statique (avec ou sans déplacement des rides, dans le sens de propagation de la houle).

Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, la distance entre rides est essentiellement déterminée par la capacité de transport par le fluide des matériaux, préalablement mis en saltation, par le tourbillon qui se développe devant la face aval de la ride,

MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

matériaux qui se déposent sur la crête de l'autre ride au cours du trajet de retour des molécules.

Etant donné qu'une partie du trajet de retour est nécessaire pour l'évolution du tourbillon, on peut écrire, en appelant  $r$  la distance nécessaire à l'évolution du tourbillon:

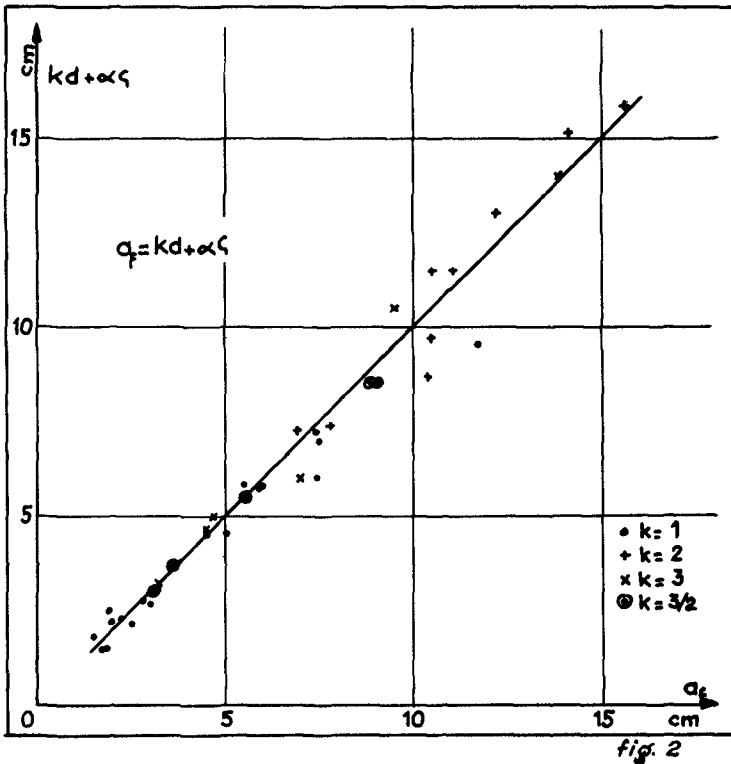
$$k d + r = a_f$$

$k$  étant une fraction simple définissant le nombre de rides existant pour une longueur d'excursion.

En admettant que la longueur  $r$  nécessaire soit proportionnelle à l'amplitude  $\zeta$  de la ride, on peut écrire l'équation ci-dessus sous la forme :

$$1) \quad a_f = k d + \alpha \zeta \quad (1)$$

$\alpha$  ne dépendant que des caractéristiques du matériau.



(1) Dans cette formule, le terme essentiel est  $k d$ , car  $d$  est en général 3 à 10 fois plus grand que  $\zeta$ ;  $\alpha \zeta$  doit être considéré comme un terme correctif. 229

## COASTAL ENGINEERING

Nous avons tracé la courbe (2), qui justifie relativement bien ces considérations théoriques, en posant  $\alpha = 1$  pour des grains de diamètre moyen égal à 0,28mm, et  $\alpha = 2$  pour des grains de diamètre moyen égal à 0,75 mm.

Tous les essais représentés sur cette courbe ont été effectués en utilisant un matériau de faible densité: 1,45, la densité relative étant égale à 0,45. L'utilisation d'un matériau de faible densité a pour avantage de mieux mettre en évidence le processus hydraulique seul, les forces d'inertie pouvant alors être négligées, et la vitesse de chute des grains étant du même ordre de grandeur que la vitesse verticale des molécules du fluide

Pour ce matériau, nos expériences correspondaient à des valeurs de  $k = 1, 2, 3$  et  $3/2$ , c'est-à-dire à la formation de une, deux, ou trois rides par longueur d'excursion, ou, dans certains cas, de trois rides pour deux longueurs d'excursions. Il résulte de ces considérations que les conditions de l'écoulement au-dessus des rides, conditions liées directement à la stabilité du tourbillon, constituent le facteur essentiel déterminant la longueur des rides. Les caractéristiques du matériau ont une influence plus directe sur les conditions limites de formation des rides et sur la durée nécessaire pour atteindre un système stable de rides ainsi que sur la profondeur des rides.

Rappelons d'ailleurs à ce propos, que M. LARRAS(15) avait trouvé, au cours de ses essais, le résultat inattendu suivant la limite d'érosion, de part et d'autre d'un obstacle, au bout d'un temps pratiquement infini, ne dépend, toutes choses égales par ailleurs, que de la densité des matériaux remués, à l'exclusion pratiquement de leur diamètre moyen et de leur courbe granulométrique

Il y a là un résultat très intéressant et qui peut s'expliquer en considérant la formation des tourbillons, comme le phénomène essentiel de l'érosion. La profondeur limite d'érosion est celle à laquelle pour les caractéristiques données du mouvement la turbulence engendrée par les tourbillons ainsi créés est suffisante pour soulever un matériau, de densité donnée. On conçoit que dans une certaine mesure la granulométrie du matériau n'influence pas la profondeur limite d'érosion (qui est toujours la même) mais influence directement le temps nécessaire pour obtenir cette profondeur limite.

### IV - CRITERE DE FORMATION DES RIDES.

Ainsi que le fait remarquer M. l'Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées LARRAS, les mouvements de grains en surface ne correspondent pas à un phénomène caractéristique du mouvement, mais dépendent essentiellement de la compacité des grains à la

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

surface du fond. Il ne semble donc pas possible de donner une loi correspondant au début de l'entraînement en surface, sous l'action de la houle. Il faut toutefois noter que c'est là un processus qui peut effectivement exister et donner lieu à certains transports isolés, parfois non négligeables, en particulier lorsque les éléments déplacés sont de grandes dimensions (supérieurs à 5 cm).

Dans ses études, M. LARRAS a choisi comme critère, définissant le début de l'action érosive des houles et du clapotis, l'amorce de légères ondulations, du type rides, phénomène caractéristique des effets d'érosion des houles.

M. LARRAS a trouvé des résultats extrêmement précis, particulièrement intéressants, en ce qui concerne les mouvements stationnaires du type clapotis pur, et il semble que, dans ce cas, le début de formation des rides soit un phénomène fort bien défini, correspondant à des valeurs caractéristiques précises.

Les essais que nous avons effectués sur la houle ont donné des résultats relativement moins stables que les essais de M. LARRAS. En fait, d'après le processus ci-dessus expliqué de formation des rides, il semble que la ride puisse se produire en un endroit lorsque la mise en mouvement des grains en surface permet la formation d'une barre d'épaisseur suffisante pour provoquer, soit un décollement relativement important de la couche limite laminaire, assurant ainsi la mise en suspension d'une quantité de matériaux non négligeable au vent de la barre, soit la formation d'un micro-tourbillon amorçant l'érosion sous le vent de la barre.

On constate que ces phénomènes, de même que les phénomènes liés à l'émission de turbulence partielle, dépendent beaucoup de paramètres aléatoires divers : rugosité du fond, pente du fond, turbulence moyenne de la houle, stabilité initiale du mouvement .... Nous avons donc cherché essentiellement à déterminer un ordre de grandeur des paramètres caractéristiques de la formation de rides sous l'action de la houle. Dans l'exploitation de nos résultats, nous avons ajouté ceux provenant des essais effectués par M. LARRAS, qui possédaient, entre autre, l'intérêt de concerner des caractéristiques de sédiments et de houles sensiblement différentes des nôtres.

### RECHERCHE DE PARAMETRES CARACTERISTIQUES.

Les paramètres proposés par M. MADHAV MANOHAR ne nous ont pas permis de classer correctement nos résultats d'expérience. Nous avons donc recherché à mettre en évidence d'autres groupements de paramètres pour caractériser le début de formation des rides.

## COASTAL ENGINEERING

La formule proposée par M. LARRAS(1), qui s'écrit :

$$u_f - w = k \cdot \frac{(\rho - \rho_0)^{1/2}}{T^{1/2}}$$

semble particulièrement bien vérifiée dans le cas des clapotis (mouvements stationnaires) mais ne semble pas applicable à la formation de rides sous la houle progressive. Le domaine d'application de cette formule semble devoir être limité aux phénomènes d'érosion sous l'action de mouvements stationnaires périodiques cylindriques.

Dans l'étude des différents groupements de paramètres que nous avons effectués, nous avons cherché à déterminer les points différenciant le domaine de formation des rides et celui des mouvements en surface, en fonction d'un paramètre de la forme :

$$D^m \left[ \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right]^n$$

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour la valeur  $m = n$  et c'est, en particulier, ce choix qui nous a permis d'obtenir le meilleur regroupement de nos points avec ceux de M. LARRAS, dans un domaine légèrement plus étendu.

Physiquement, l'expression  $k D \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0}$  traduit le

rapport des forces de gravité appliquées aux grains, à la force de tension exercée par le fluide sur celui-ci. En effet, la force de gravité peut s'écrire  $k' D^3 \left[ \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right]$ , et la force de tension peut s'écrire  $k' D^2 \vec{Y}$ , en appelant  $\vec{Y}$  le vecteur représentatif des forces de frottement, par unité de surface, exercée par le fluide sur le grain. Il semblerait donc que le début de formation des rides dépende essentiellement du rapport existant entre la force de tension exercée sur le grain par le fluide - ou la force d'aspiration exercée à la surface d'un grain lors de la dépression due au décollement de la couche limite laminaire - et les forces de gravité.

Nous avons porté sur le graphique 3, les différents points expérimentaux obtenus dans différentes conditions, en fonction des paramètres sans dimensions  $\frac{D(\rho - \rho_0) b^{1/2}}{\rho_0 v^{1/2}}$  et  $X_1^0$ . Les différentes droites caractéristiques du phénomène correspondent à une équation de la forme :

$$(3) \quad \frac{D(\rho - \rho_0) b^{1/2}}{\rho_0 v^{1/2}} = k X_1^2$$

(1) Pour déterminer les valeurs critiques d'apparition des rides.

ce qui correspondrait en appelant  $\vec{Y}$  une valeur caractéristique de efforts de tension ou des pressions locales, à une relation de la forme :

$$\frac{\alpha}{g} \vec{Y} = k \frac{v^{1/2}}{b^{1/2}} X_1^2$$

L'expression (3) peut d'ailleurs s'écrire, en explicita la valeur de  $X_1$ :

$$(4) \quad D \frac{(p-p_0)}{p_0} = \frac{\alpha}{g} \vec{Y} = k \frac{v^{1/2}}{b^{1/2}} \left( \frac{2p^*}{\rho g} \right)^2$$

formule dans laquelle  $p^*$  représente la partie variable de la pression exercée par la houle sur le fond.

L'ensemble des courbes caractéristiques du tableau 3, peut s'écrire :

$$D \frac{(p-p_0)}{p_0} \frac{b^{1/2}}{v^{1/2}} = k X_1^2$$

la valeur de  $k$  étant de  $4.10^{-4}$  pour le fond horizontal.

La pente de 1 %, ainsi que nous l'avons vu, correspond un régime généralement plus stable que le fond horizontal; nous avons obtenu des résultats correspondant à une valeur de  $k$  légèrement inférieure :  $k = 1.10^{-4}$ .

Sur les pentes de 2 % et 5 %, la valeur de  $k$  semble être légèrement supérieure au résultat obtenu avec la pente de 1 % ( $k = 2.10^{-4}$ ). Signalons toutefois qu'il semble y avoir une plus grande dispersion, pour la pente de 5 %, des résultats provenant de l'augmentation de la probabilité d'émission de turbulence partielle qui dépend largement de la pente du fond, ainsi que nous l'avons vu précédemment.

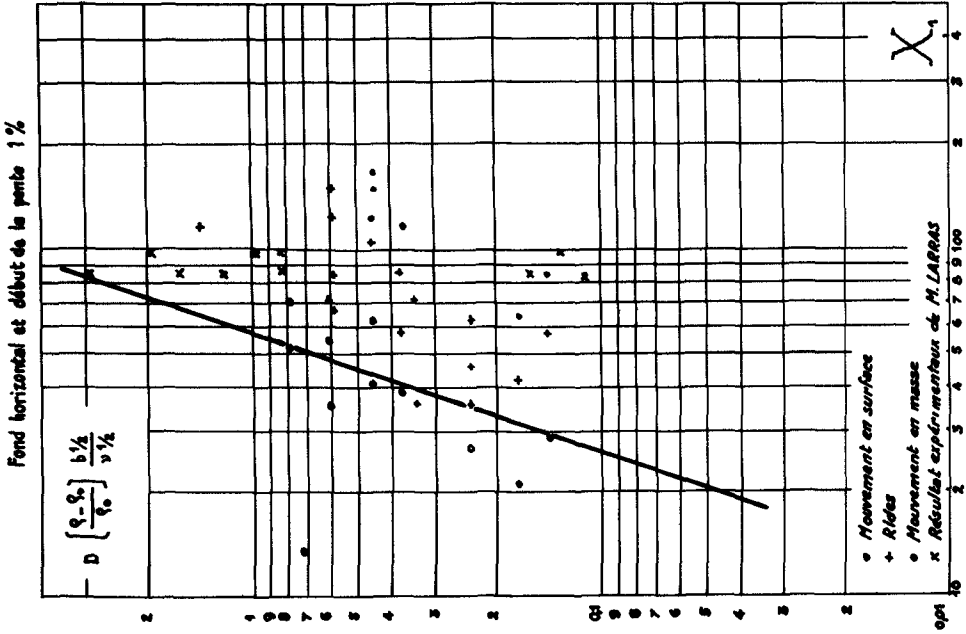
Dans l'ensemble, les pentes suffisamment faibles constituent donc un facteur de stabilité, vis-à-vis de la formation des rides.

#### V - CRITERE DE DISPARITION DES RIDES ET D'APPARITI

##### du MOUVEMENT en MASSE.

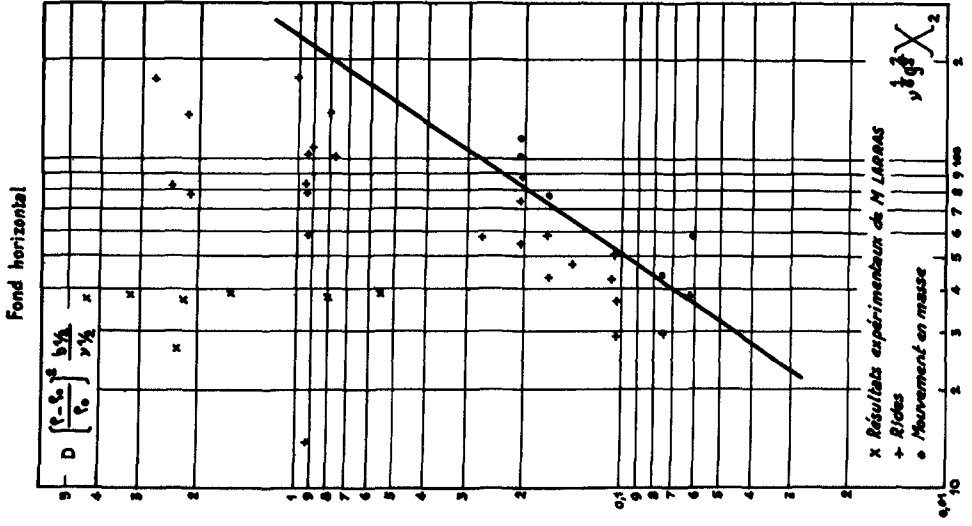
Dans nos conditions d'expérience, nous avons observé, avec les éléments de densité inférieure à 2, la disparition des rides e une mise en saltation des éléments à partir de certaines valeurs de l'amplitude de la houle.

ETUDE DE LA FORMATION DES RIDES



Graphique 3

ETUDE DU MOUVEMENT EN MASSE



Graphique 4

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

La zone marginale présentait les caractéristiques d'une couche limite partiellement turbulente et, en particulier, possédant une vitesse d'entraînement moyen, dirigée dans le sens de propagation de la houle, non négligeable.

L'épaisseur de la zone marginale était beaucoup plus importante que celle observée dans le cas d'un écoulement sur fond fixe, et pouvait atteindre plusieurs centimètres. Précisons qu'en général, les caractéristiques de houles nécessaires pour obtenir le mouvement en masse correspondaient souvent à des valeurs du paramètre  $X_1$  déterminant une turbulence totale de la couche limite du mouvement sur fond stable.

Il semble donc que la mise en saltation d'une épaisseur importante de matériaux tende à développer une couche limite relativement plus stable à caractéristiques partiellement turbulentes mais d'épaisseur beaucoup plus importante: autrement dit, la présence de particules solides mais mobiles aurait une influence comparable à celle d'une augmentation de viscosité.

Les expériences effectuées par d'autres auteurs qui ont mis en évidence l'existence de ces mouvements en saltation sur une grande épaisseur, en particulier dans le cas des clapotis, et les résultats obtenus par M. MADHAV MANOHAR concernant la disparition des rides de sable pour des oscillations du fond correspondant à des mouvements relatifs du fluide par rapport aux matériaux, comparables à ceux engendrés par les houles de la nature, permettent d'étendre ce résultat au cas des sables pour des houles d'énergie supérieure à celle des houles de laboratoire.

Rappelons que de tels mouvements sont d'ailleurs parfaitement visibles sur les plages près des zones de déferlement et, de plus, ils permettent seuls d'expliquer les destructions des digues à parois verticales, et, en particulier, la destruction de la digue de Mustapha, à Alger, par la mise en suspension des matériaux sur une hauteur importante.

Nous avons porté sur le graphique 4, les valeurs correspondant aux expériences au cours desquelles nous avons observé la disparition des rides et la mise en saltation du sédiment avec départ en masse. Il ne semble pas que les paramètres sans dimension que nous avons adoptés pour déterminer les valeurs caractéristiques de la formation des rides, puissent être aussi adoptés pour caractériser ce nouveau phénomène; en effet, les points représentatifs des résultats d'expérience relatifs à ce phénomène ne sont pas distincts des points représentant la formation de rides stables, si l'on conserve ces mêmes paramètres. Ceci n'est pas surprenant car le phénomène est totalement différent; la mise en saltation exige des caractéristiques de houles correspondant à un gradient de pression suffisant pour que la différence entre la pression en surface et la

pression à l'intérieur de la masse pulvérulente exerce sur les particules une force ascensionnelle suffisante.

Nous avons tout d'abord recherché, pour tenir compte des caractéristiques du grain, un paramètre de la forme

$D^n \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^n$  permettant de caractériser le phénomène; les meilleurs résultats ont été obtenus pour des valeurs de  $m$  et  $n$  définies par la relation  $2m = n$ , c'est-à-dire :  $D \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2$

L'importance du facteur  $\left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2$ , dans le groupement met en évidence l'influence prépondérante de la densité relative dans le phénomène de mise en saltation d'une masse importante de matériau. Ceci est à rapprocher du résultat trouvé par M. LARRA et que nous avons déjà cité, d'après lequel les profondeurs d'érosion limite sous l'influence de mouvements stationnaires ne dépendraient que de la densité et non pas des caractéristiques granulométriques du matériau.

Nous avons re-présenté, sur le graphique 4, les résultats d'expériences obtenus en fonction des paramètres sans dimensions :

$$D \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 \frac{b^{1/2}}{\nu^{1/2}} \text{ et } X_2$$

Les conditions d'observation de mouvements de masse, consécutifs à une mise en saltation générale du matériau, peuvent être définie comme correspondant à un domaine délimité par la droite caractéristique dont l'équation serait :

$$(5) \quad D \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 \frac{b^{1/2}}{\nu^{1/2}} = k X_2$$

Il est intéressant de remarquer que l'équation caractéristique de ce phénomène, proposée par M. MADHAV MANOHAR, est :

$$(6) \quad D^{0,2} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{0,4} \frac{g^{0,4} \nu^{0,2}}{u_f} = k$$

et que, dans cette équation, le groupement  $D^{0,2} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{0,4}$  est le même que dans notre équation. Par contre, les groupements des paramètres représentatifs de l'écoulement sont différents dans les deux formules.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

On peut en conclure que les forces d'inertie, qui étaient prépondérantes dans les expériences de MADHAV MANOHAR, jouent un rôle essentiel dans le phénomène de mise en saltation générale du matériau. Par contre, les forces développées par l'oscillation du fond ne sont pas comparables à celles provoquées par l'existence d'un mouvement périodique réellement progressif.

L'équation (5) s'écrit, en explicitant  $X_2$ :

$$D \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 \frac{b^{1/2}}{\nu^{1/2}} = k \frac{u_f^{1/2}}{(b\nu)^{1/4}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2p^*}{\rho g} \right)$$

D'autre part, il est intéressant de faire apparaître au lieu du diamètre des matériaux, les vitesses de chute  $w$  de ceux-ci, qui s'écrivent, pour les matériaux que nous avons utilisés :

$$w = k D^2 \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \frac{g}{\nu}$$

L'équation s'écrit donc :

$$w^{1/2} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{3/2} \frac{b^{1/2}}{g^{1/2}} = k' \frac{u_f^{1/2}}{(\nu b)^{1/4}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2p^*}{\rho g} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2p^*}{\rho g} \right) = k'' \left( \frac{w}{u_f} \right)^{1/2} \left( \frac{\rho - \rho_0}{T^{1/2}} \right)^{3/2} \frac{\nu^{1/4}}{g^{1/2} \rho^{3/2}}$$

Cette relation détermine la valeur critique du gradient de pression près du fond assurant la mise en saltation des grains, en fonction de deux paramètres sans dimensions :

- le rapport de la vitesse de chute des grains à la vitesse maximum près du fond;
- le rapport de la densité relative, à la racine carrée de la période du mouvement.

Il semble logique d'admettre que la valeur du gradient de pression constitue le facteur essentiel de la mise en saltation des matériaux sableux. En effet, par suite de la perméabilité des sables, les différences de pressions existant en surface se transmettent dans le massif pulvérulent, suivant une loi d'extinction exponentielle, et avec un certain déphasage dans le temps. L'instant où la pression est minimum en surface correspond, en conséquence, à une sous-pression importante susceptible d'expulser les grains avec une force vive non négligeable.

## COASTAL ENGINEERING

### Influence de la pente.-

La pente du fond a pour effet de retarder sensiblement la mise en saltation de la masse du matériau. L'origine de ce phénomène peut être recherchée dans l'augmentation de l'influence des forces de gravité, par suite de l'existence d'une composante dirigée vers le bas.

Toutefois, ce-ci n'est sensible qu'à une certaine distance de l'extrémité amont de la pente, le début de la pente donnant lieu, pour les pentes de 2 % et 5 %, aux mêmes résultats que le fond horizontal.

Dans la formule  $D \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 \frac{b^{1/2}}{\nu^{1/2}} = k X_2$ , les valeurs

de  $k$  provenant de nos expériences sont :

- 100 pour le fond horizontal et de début de la pente,
- 70 pour la pente de 2 %,
- 50 pour la pente de 5 %.

### VI - APERCU SUR LES LOIS GENERALES DU TRANSPORT

#### SOLIDE SOUS L'ACTION DE LA HOULE.

Les résultats des études que nous avons exposées ci-dessus, permettent de définir les valeurs critiques des différents mouvements des matériaux pulvérulents tapissant le fond de la mer, sous l'action de la houle, dans les domaines de l'eau profonde ou assez profonde. Ces résultats ne permettent pas toutefois de formuler des lois de débits qui sont, en fait, extrêmement variables en fonction d'autres paramètres que les seules conditions de propagation de la houle au voisinage du fond.

Mais il est possible, à partir de ces résultats, d'énoncer quelques considérations générales sur les débits solides.

#### a) Mouvements isolés de grains.

Les mouvements isolés de grains se produisent, ainsi que nous l'avons vu, pour des caractéristiques variables de la houle, qui dépendent dans une large mesure du coefficient de forme, de la position du grain sur le lit du fond, et des dimensions du grain par rapport à la rugosité moyenne du fond.

Les transports résultant des actions sur des grains isolés correspondent à des débits solides relativement faibles et ne présentent pas, en général, d'intérêt primordial. Toutefois, les

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

études effectuées permettent de chiffrer les profondeurs maxima à partir desquelles une houle donnée est susceptible de produire des érosions, pour un matériau donné.

En ce qui concerne les éléments relativement grossiers qui sont moins sujets que les sables aux mises en saltation et aux transports par les différents courants maritimes, ce procédé de détermination de la limite d'alimentation peut aussi donner des renseignements intéressants.

On pourra admettre en règle pratique, que les mouvements de grains isolés correspondent à des effets appréciables, dans certains cas particuliers, et doivent être pris en considération dans l'étude de l'équilibre des côtes, pour les gros galets, à partir de la limite correspondant à la formation des rides. En effet ces gros éléments ont beaucoup moins tendance que les sables à se former en rides, par suite de leurs dimensions mêmes; dans ce cas, la remontée des éléments isolés peut constituer un processus continu, non négligeable.

### b) Transport des sables.

En ce qui concerne les sables, dès que le mouvement en surface tend à être relativement intense, la forme d'équilibre prise par le matériau du fond correspond à la formation de trains de rides relativement stables. Il n'y aura un transport non négligeable du sable que lorsque, sous l'action de la houle, le train de rides se déplacera suivant les processus analysés précédemment.

En fait, les transports appréciables de sable n'auront lieu que lorsque l'on aura atteint des amplitudes des houles correspondant à la mise en suspension d'une masse importante du matériau.

Il serait particulièrement intéressant de déterminer l'importance de ces transports et les débits auxquels on peut ainsi arriver, mais ces déterminations se heurtent à de nombreuses difficultés. En particulier, le débit résultant au droit d'une section, est lié, d'une part, au transport dans la couche limite, transport qui s'effectue toujours dans le sens de propagation de la houle et, d'autre part, aux transports des éléments mis en suspension sous l'action des courants de masse, dont le sens dépend du sens de ces courants de masse, ainsi que l'ont fait remarquer MM. VINCENT et RUELLAN (15).

En particulier, dans le cas des houles à fort courant d'entraînement en surface (zone du vent, approche de la zone de déferlement) l'influence du courant de retour se traduit par une action dans les zones voisines de la couche limite, dirigée dans le sens contraire à la propagation de la houle. Il peut donc y avoir là une cause de débit important dans le sens opposé à la propagatic

## COASTAL ENGINEERING

de la houle, auquel peuvent d'ailleurs s'ajouter, dans certaines zones, les transports dûs aux rip-currents.

En définitive, le débit à travers une section correspondrait à l'intégrale prise sur la hauteur de mise en saltation des grains, du produit de la turbidité locale par la valeur moyenne des courants de masse.

Une expérience intéressante permet d'avoir une idée des variations d'une telle intégrale pour le cas des houles de laboratoire. Si l'on étudie le déplacement de sphères sur un canal horizontal, sous l'action d'une houle d'amplitude donnée, on s'aperçoit que le sens du déplacement pour une même caractéristique de houle dépend essentiellement du diamètre de la sphère. Tant que l'épaisseur de la sphère croît, la vitesse de déplacement de la sphère décroît jusqu'à une valeur critique du diamètre correspondant à une vitesse nulle. Lorsque l'on étudie les mouvements de sphères de diamètres plus élevés, on s'aperçoit que les mouvements de celles-ci s'effectuent dans le sens contraire de la propagation de la houle.

Toutefois, il semble qu'en nature, avant que le transport dû au courant de masse annule totalement le transport provoqué par la progression de la couche limite laminaire partiellement turbulente sur le fond, l'on atteigne des valeurs pour lesquelles la couche limite au contact du fond est entièrement turbulente.

L'on a vu que, dans ce cas, il n'existait pas de loi générale concernant la vitesse moyenne de la couche limite et que celle-ci, ainsi que la valeur des courants de masse, dépendaient, de une large mesure, des conditions aux limites de la zone envisagée.

On peut alors observer, dans ce cas, des débits variables suivant les conditions aux limites.

Rappelons d'autre part, que tous ces résultats ne sont valables que dans le domaine de l'eau profonde ou assez profond et cessent, en particulier, d'être valables près de la zone de déferlement. Le processus de transport devient alors totalement différent. L'écoulement dans cette zone est entièrement turbulent, et le débit résultant dépend essentiellement de la quantité des matériaux rejetés à la plage lors du déferlement de la lame (éléments qui proviennent de l'aspiration, par la houle, des matériaux mis en saltation à l'amont du déferlement) et de la quantité de matériaux entraînés lors du black-wash ou par les rip-currents dans le courant de masse à l'extérieur de la zone de déferlement.

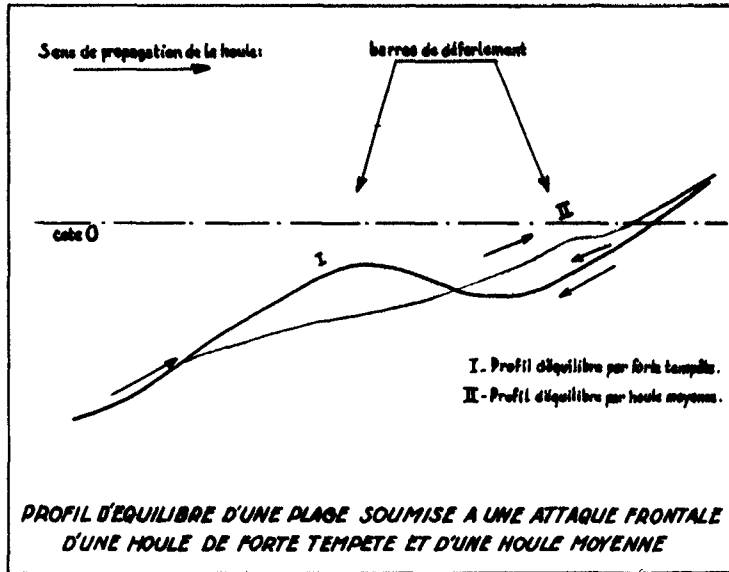
Ce processus, bien que totalement différent, permet toutefois la continuité du transit littoral, sous l'action de la houle jusqu'à l'estran.

Sous l'action de ce transit littoral, les plages tendent, en fait, vers un état d'équilibre correspondant, ainsi que nous l'avons vu précédemment, à un profil à pente croissante à cour-

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

bure dirigée vers le haut, et qui constitue un profil de défense vis-à-vis de l'action de transfert des houles.

Ces considérations permettent, toutefois, d'expliquer en l'absence d'autres phénomènes, le résultat général, bien connu des hydrographes, suivant lequel les houles de tempête dégarnissent l'estran, alors que les houles d'amplitude moyenne le nourrissent.



*Croquis 5*

Sur le croquis 5 nous avons porté les profils d'équilibre par houles de forte tempête et houles de tempête moyenne. Une forte tempête détermine un profil d'équilibre dans lequel l'alimentation de la barre située avant le déferlement est assurée par les matériaux provenant de fonds relativement importants et, simultanément, par le sable ramené lors du black-wash depuis le haut estran vers le bourrelet de déferlement.

Cette forme de rivage devient instable dès qu'une houle d'amplitude inférieure, mais suffisante pour mettre en mouvement les matériaux jusqu'à une profondeur supérieure à celle du bourrelet de déferlement, transforme le profil I de la plage suivant le profil II. L'état d'équilibre correspond alors à une remontée du matériau provenant essentiellement du bourrelet de déferlement précédemment formé, vers la région de l'estran.

## COASTAL ENGINEERING

### c) Applications pratiques. (10. 12. 8.)

Les quantités de matériaux participant à la remontée sous l'action des houles correspondent à des débits relativement faibles par rapport aux quantités transportées par les courants littoraux (8), les rip-currents, dans le transfert dit en "dents de scie" sous l'action du black-wash et du déferlement, de l'undertow, et de la dispersion générale des sédiments vers le large (10). Toutefois, il serait impossible d'expliquer le maintien de la majeure partie des plages, s'il n'existait pas une action continue ramenant une partie importante du matériau, qui risque d'être entraînée par les courants de masse, les rip-currents et les courants de fond, à partir des plages. Les études auxquelles nous avons procédé ont montré le rôle important des phénomènes de la couche limite dans ces remontées de matériaux et les processus suivant lesquels s'effectuent ces mouvements.

Il est, toutefois, des cas pratiques où le phénomène de remontée des matériaux s'effectue de façon relativement pure pour être évident par lui-même.

Citons, en particulier, quelques observations que nous avons effectuées sur les côtes méditerranéennes (mer sans marée dans laquelle ces mouvements sont en conséquence beaucoup plus visibles).

#### α. Remontée de galets sous l'action de la houle.

La plage de Carno (Hérault) avait complètement disparu par suite de la construction d'un mur vertical en bordure de plage destiné à soutenir le boulevard de bord de mer de cette station balnéaire. Toutefois, après la disparition de sables, il s'est formé une plage relativement importante de galets sous l'action des houles de forte tempête qui sévissent dans ces parages.

D'après les recherches qui ont été effectuées, ces galets ne pouvaient provenir que des fonds rocheux existant par profondeur de 7 à 8 m. au large de la côte.

Seule, la remontée des matériaux sous l'action de la houle permet d'expliquer cette arrivée de matériaux.

#### β. Exemple de remontée de sable à la plage.

Le Service des Ponts et Chaussées de l'Hérault a construit une série d'épis perpendiculaires à la mer sur la côte méditerranéenne à l'Est du port de Sète, pour protéger la route côtière attaquée par la mer au lieu-dit "la Peyrade". Par suite de la présence de ces épis, la plage s'est considérablement engraisée en sable fin et s'est avancée de plusieurs dizaines de mètres.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

La plage, dans cette région, présente une courbure relativement constante et relativement faible, traduisant une plage en équilibre, sous l'action de la houle dominante, avec faible transport Est-Ouest. L'équilibre de cette plage, dans une zone de mer sans marée, ne peut s'expliquer qu'en faisant intervenir un apport frontal non négligeable, équilibré par l'action du faible transport littoral et le transport, vers le large, provoqué par les rip-current. La construction de la route littorale a eu pour effet d'augmenter l'action du rip-current et du black-wash, ainsi que l'importance du transport littoral.

La réalisation d'épis, compartimentant la plage en divers tronçons bien définis, a diminué d'une façon importante le transport littoral et l'importance des rip-currents, ne laissant subsister que l'action de remontée du matériau depuis les fonds jusqu'à la plage. La ligne du rivage a alors avancé jusqu'à ce que l'action des rip-currents et des transports littoraux rétablissent l'équilibre du bilan de sable. Une des caractéristiques des engraisements de plage obtenus, en facilitant la remontée du matériau, et en supprimant les actions de dispersion, réside dans la parfaite symétrie de la ligne de plage de part et d'autre de l'épi.

Y. Exemple d'applications emprunté aux "études littorales" de A. RIVIERE (12).

Les "études littorales" de A. Rivière constituent la mise au point la plus récente publiée sur les mouvements de matériaux pulvérulents (sable) aux abords d'un littoral. De nombreux phénomènes observés par les sédimentologues et exposés dans cette "étude" s'expliquent du point de vue hydraulique à la lumière des résultats que nous avons ci-dessus exposés. Nous en examinerons deux particulièrement importants.

La notion de dispersion des matériaux vers le large est essentiellement liée, semble-t-il, à l'existence d'une forte turbulence sur le fond provoquant l'entraînement vers le large sous l'action des divers courants. Parmi ces courants, les courants de masse près du fond dirigés dans le sens opposé à la propagation de la houle sont particulièrement importants lorsque la couche limite est turbulente car, ainsi que nous l'avons vu, il n'y a pas de composante de translation dans le sens de propagation de la houle. L'existence de ce courant de masse en profondeur particulièrement important, dans ce cas, a rendu nécessaire pour le sédimentologue, une notation particulière : c'est ce phénomène qui est désigné sous le vocable de : "undertow".

D'autre part, A. Rivière observe que "l'érosion provoquée par les vagues poussées par le vent cesse brusquement lorsqu'en fin de tempête celui-ci vient à diminuer de violence alors que la mer demeure encore très forte: il est même fréquent de voir des masses importantes de sédiment être ramenées à ce moment au rivage".

## COASTAL ENGINEERING

Ce phénomène s'explique si l'on admet que la houle de vent étant entièrement turbulente crée, au contact du fond, une couche limite turbulente sans mouvement moyen dirigé vers la côte, et donc l'action est essentiellement un entraînement de matériaux vers le large. Au contraire, dès que le vent cesse, la mer demeure très forte mais on se trouve alors en présence d'une houle partiellement établie dont l'action sur le fond correspond à une mise en salutation du sable avec caractéristique de couche limite laminaire ou partiellement turbulente et transport important dans le sens de propagation de la houle, donc remontée des matériaux vers l'estran.

### B - MOUVEMENTS DES VASES SOUS LA HOULE EN L'ABSENCE DE REMISE EN SUSPENSION

#### VII. DESCRIPTION DES ESSAIS.

##### 1° Description sommaire des phénomènes observés.

En prolongement des études que nous avons effectuées, relativement aux propriétés de la couche limite des houles de laboratoire, sur un fond parfaitement rigide, nous avons étudié l'influence des houles sur des matériaux formant un fond déformable, et sur des sédiments à propriétés thixotropiques importantes, tels que les vases.

Cette étude portait essentiellement sur l'observation des phénomènes assimilables, par leurs propriétés, aux phénomènes de couche limite; l'action des houles qui déferlent ou celle des houles qui assurent la remise en suspension du matériau n'a donc pas été envisagée, le processus d'action étant fondamentalement différent. En effet, si l'action d'une houle assurant la remise en suspension d'un matériau vaseux est, en partie, comparable à celle du transport en masse, observé pour les sédiments sableux, ce phénomène est masqué par un phénomène essentiel du transport constitué par l'existence des courants de densité, phénomènes caractéristiques des transports de sédiments du type vase.

En nous limitant à l'action de la houle, avant que son amplitude soit suffisante pour assurer la remise en suspension du matériau, nous avons pu mettre en évidence un phénomène qui, à notre connaissance, n'a jamais été signalé et qui consiste en une translation lente, dans le sens de propagation de la houle, du fond de vase, et qui a pour résultat de provoquer une modification du profil des fonds de vase avec remontée du matériau vers l'estran, sans remise en suspension du matériau.

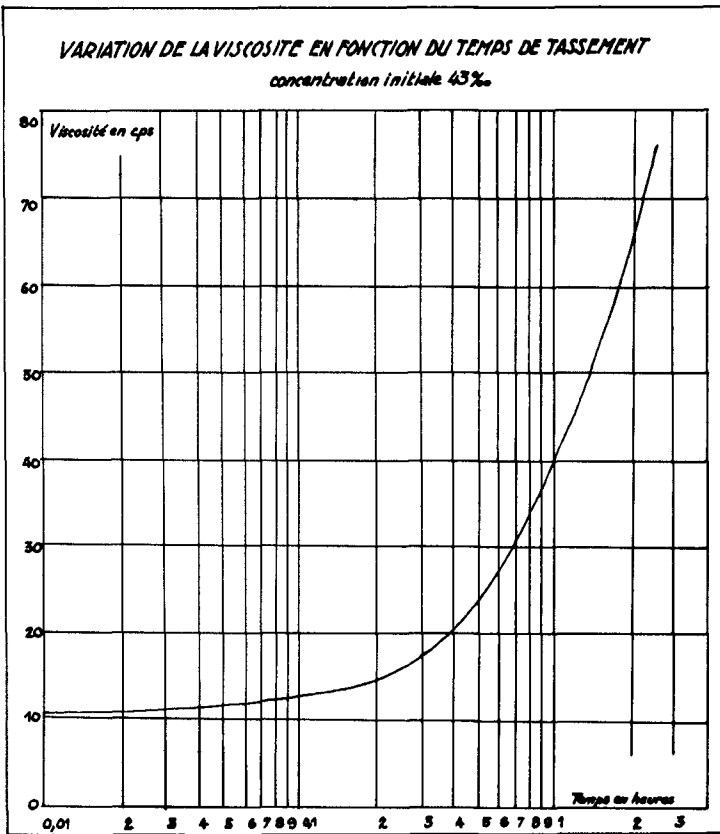
## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

### 2° Condition de réalisation des essais - Généralités.

Le déplacement des vases sous la houle a été étudié en canal vitré au Laboratoire central d'Hydraulique de France:

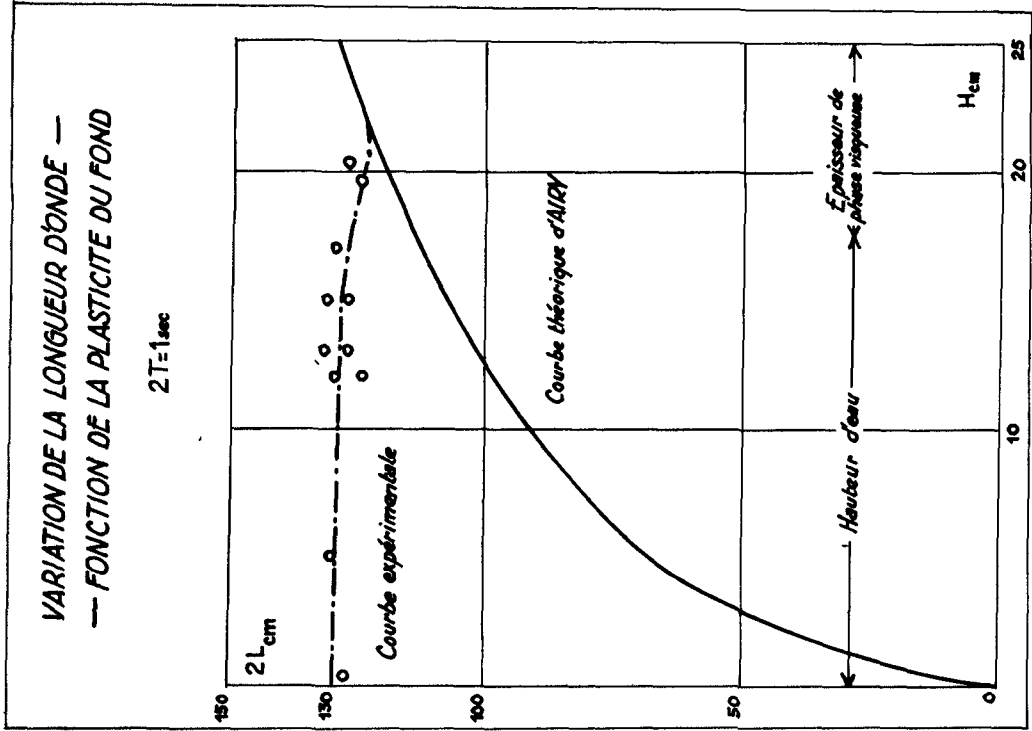
La vase expérimentée était une vase marine de la région de la baie de l'Aiguillon, dont les caractéristiques avaient été préalablement étudiées (nature, composition granulométrique, vitesse de chute et de tassement, pour différentes concentrations, etc..) (1).

L'eau utilisée dans le canal avait été préalablement traitée à l'aide d'une solution de chlorure de magnésium et de sodium, ce qui, lui conférait les mêmes actions flocculantes que les eaux marines (concentration en chlorure de magnésium à 0,126 N, correspondant à la somme des concentrations en ions divalents de l'eau de mer).

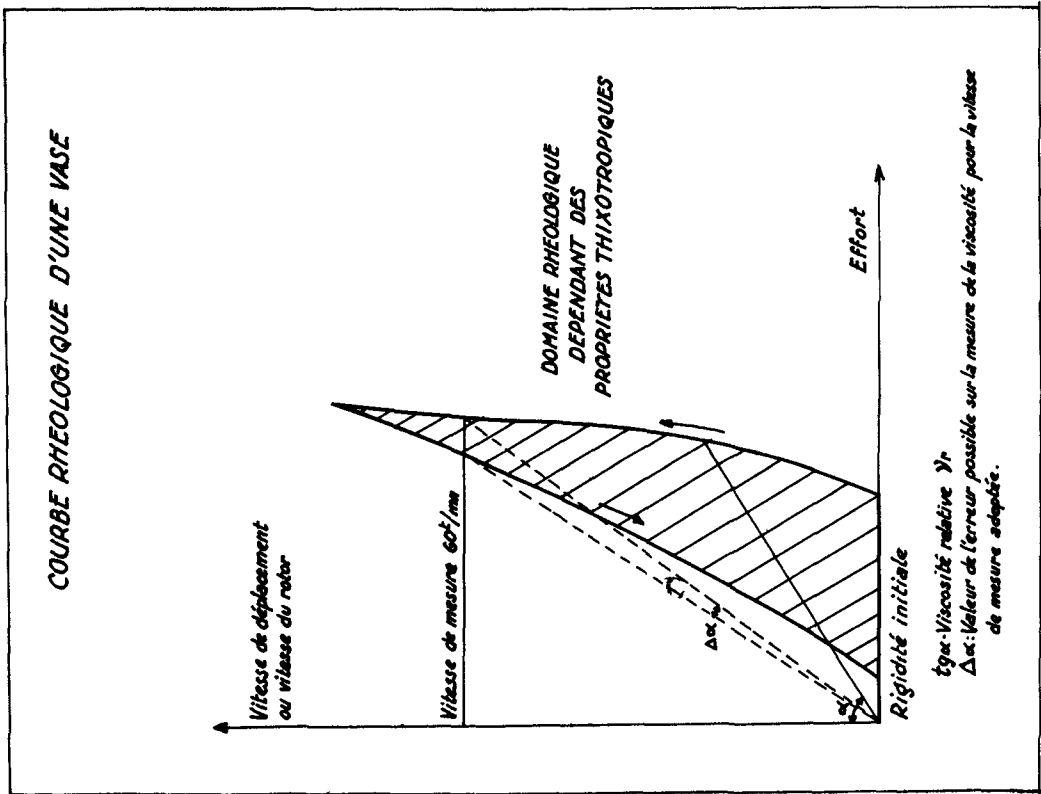


Graphique 6

(1) En ce qui concerne les méthodes d'analyse des matériaux argileux voir les ouvrages de M. le Professeur RIVIERE (9, 11).



Graphique 8



## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Avant chaque expérience, la vase introduite dans l'eau du canal était soumise à un brassage mécanique intense afin d'obtenir un mélange initial homogène de concentration déterminée.

Les temps de dépôt et de tassement des vases ont été mesurés à partir du moment où l'on arrêtait ce brassage - temps  $t_0$  - et les mesures effectuées pour différents temps de tassement  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ... $t_n$  (graphique 6).

Au cours de ces essais, la viscosité de la vase était soigneusement enregistrée (1) à l'aide d'un viscosimètre Brookfield, dont le principe consiste à mesurer le couple résistant exercé sur un rotor tournant à une vitesse déterminée.

L'amplitude des trajectoires des particules, ainsi que leur déplacement, étaient mesurés en repérant des particules de matériaux à différentes profondeurs. Dans certains cas, des éléments très fins, colorés, d'une densité apparente voisine de celle de la vase (afcolène), étaient préalablement introduits dans la masse afin de faciliter le repérage des mouvements de vase.

Des prélèvements d'eau à différentes profondeurs permettaient de suivre avec précision la variation possible de la turbidité au-dessus du plan de séparation de l'eau et de la vase, au cas où une remise en suspension du matériau serait apparue.

Parallèlement à ces mesures, la variation du profil le long du canal était relevée, dans le but de suivre la variation de la profondeur due au tassement de la vase et de contrôler le déplacement sous la houle, de la masse de vase, et la modification de pente des dépôts en résultant.

---

la

(1) La mesure de viscosité de la vase demande quelques précisions. En effet, la vase naturelle, qui constituait le matériau expérimental, possède des propriétés rhéologiques et thixotropiques très particulières, qui peuvent enlever toute signification aux mesures si celles-ci ne sont pas effectuées dans certaines conditions.

Il importe tout d'abord, de préciser que toutes les mesures sont des mesures de viscosité relative, rapport de l'effort effectué par la vitesse de rotation. Etant donné que la vase possède une rigidité initiale non négligeable, cette valeur ne présente une signification que pour des vitesses élevées de rotation du rotor.

D'autre part, la vase douée de propriétés thixotropiques, ne donne de résultats cohérents que dans des conditions bien définies. Les mesures effectuées, l'ont été à une vitesse de 60t/mn, pour laquelle les variations dues aux propriétés thixotropiques sont négligeables. De plus, elles concernent la phase vaseuse ayant atteint sous l'action de la houle un état rhéologique stable (voir graphique 7).

## COASTAL ENGINEERING

### VIII - RESULTATS DES ESSAIS.

#### 1°) Propagation de la houle sur les fonds de vase.

La propagation d'un mouvement cylindrique monochromatique, sur un fond de vase, engendre un certain nombre de phénomènes qui la différencient notablement de la propagation d'une houle classique, que ce soit sur fond infiniment rigide, ou sur fond mobile constitué de sable ou de galets.

En laboratoire, les phénomènes illustrant les particularités de ces mouvements, sur fond de vase, peuvent être observés par des expériences de deux types :

- action d'une houle sur fond vaseux ayant subi un tassement plus ou moins prolongé,
- propagation d'une houle dans un domaine fluide de viscosité initialement homogène, subissant l'effet de tassement.

Cette description schématise les conditions naturelles moyennes, mais permet de suivre l'évolution des phénomènes en cause en fonction des caractéristiques du milieu dans lequel se propage le mouvement. Les conditions imposées par ces schémas représentent cependant - assez grossièrement, il est vrai - des milieux naturels qui correspondent respectivement aux deux états suivants :

- une période qui fait suite à un calme plat de longue durée et permet une consolidation des fonds vaseux;
- une période qui fait suite à une tempête exceptionnelle et provoque la mise en suspension du matériau vaseux dans toute la masse du fluide.

Le milieu naturel le plus fréquemment observé constitue donc un cas intermédiaire.

Notons, de plus, que la phase visqueuse, déposée dans canal d'essais, est limitée à une profondeur relativement faible, une chape rigide, au niveau de laquelle, dans la majorité des cas expérimentaux, le mouvement ondulatoire n'est pas négligeable; la vase des fonds naturels atteint, par contre, des profondeurs extrêmement importantes.

1. Dans le cas d'un fond vaseux, ayant subi l'effet d'un tassement prolongé, l'existence d'une rigidité initiale (yield value) a pour conséquence le fait qu'un mouvement progressif de très faible amplitude s'identifie avec la propagation d'une houle sur fond rigide. longueur d'onde est alors donnée par la loi d'Airy, et les particularités de fluide, au voisinage du fond, décrivent des ellipses infiniment aplaties; il se développe, entre autres, dans le fluide, une couche limite, dans des conditions qui ont été étudiées dans les chapitres précédents.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Dès que l'amplitude de la houle devient suffisante, on assiste à l'amorce d'un mouvement des particules de vase, à la surface du fond, qui présente un mouvement ondulatoire de plus en plus caractérisé et, corrélativement, une modification des trajectoires des particules d'eau situées près du fond : les ellipses infiniment aplaties de la théorie classique font place à des ellipses dont la dimension du petit axe n'est plus négligeable.

Ce mouvement apparaît lorsque l'action des forces de pression, développées sur le fond de vase, est suffisante pour briser la rigidité initiale de la vase.(1) Dès que ce mouvement s'amorce, la rupture de la rigidité initiale se transmet en profondeur. Simultanément, les propriétés rhéologiques du milieu évoluent par suite des propriétés thixotropiques caractéristiques des vases. L'épaisseur de vase intéressée par le mouvement croît jusqu'à un état limite fonction des caractéristiques cinématiques du mouvement orbital à l'interface (variables pendant la période d'établissement du régime) et de celles de la vase elle-même (variables elles aussi); ces deux groupes de caractéristiques réagissent l'un sur l'autre, pour aboutir à l'état d'équilibre dynamique final.

On peut supposer, en première approximation, que les équations qui régissent le mouvement de l'eau claire - et, en particulier, celui de la surface libre - ont une forme identique à celles de la houle classique; mais il importe de noter que les conditions aux limites ne correspondent plus à un fond horizontal, mais à une ondulation périodique de l'interface, supposée bien définie. Cette ondulation peut être assimilée, en première approximation, au mouvement de la surface :  $y_0 = H$ , définie par les molécules d'eau situées à la cote  $y_0$  au repos, relative à une houle se propageant par une profondeur  $H'$  supérieure à celle de l'eau claire  $H$ (2).

En conséquence, si cette hypothèse est exacte, la longueur d'onde d'une houle, pour une épaisseur d'eau claire donnée, variera suivant les caractéristiques du mouvement ondulatoire de l'interface, donc suivant la viscosité du milieu chargé de particules vaseuses.

- 
- (1) Les caractéristiques de la houle susceptible de rompre la rigidité initiale sont, a priori, fixées par les caractéristiques cinématiques du mouvement au contact du fond, et dépendent des propriétés de la vase et, en particulier, de son degré de tassement.
  - (2) L'expérience montre que l'interface est effectivement, dans la majorité des cas, animée d'un mouvement ondulatoire assimilable à celui d'une surface  $y_0 = C \sin kt$ ; pour certaines houles particulièrement violentes, l'interface peut présenter néanmoins, une dissymétrie extrêmement prononcée, et des creux très élevés. Dans ce dernier cas, le mouvement de l'eau claire peut aussi être représenté par des équations d'une forme identique à celles de la houle classique, sauf, toutefois, au voisinage de l'interface.

## COASTAL ENGINEERING

On vérifie que, pour une période donnée du mouvement progressif, la longueur d'onde est comprise entre les longueurs d'onde des houles se propageant dans un milieu sans viscosité, par des profondeurs respectivement égales à l'épaisseur de la lame d'eau claire, et à l'épaisseur totale du milieu intéressé par le mouvement.

Il n'est pas dans notre intention de procéder à une description complète des expériences ayant porté sur les caractéristiques des mouvements progressifs sur fond de vase, ni d'en énumérer tous les résultats, car tel n'est pas le but de la présente étude. Nous nous contenterons de décrire, ci-après, une expérience typique, qui rassemble pratiquement tous les résultats susceptibles d'expliquer, par la suite, le comportement des fonds vaseux, à partir des phénomènes purement hydrauliques inhérents à la nature des mouvements progressifs.

2. L'expérience que nous allons décrire, a consisté à reproduire un mouvement progressif (houle établie de laboratoire) dans un milieu chargé de particules vaseuses, subissant les effets de tassement. La surface libre a été fixée à 25 cm. au-dessus d'une chape horizontale parfaitement rigide. L'eau était chargée d'une certaine quantité de vase, conférant au milieu fluide, après brassage, une viscosité homogène de l'ordre de 10 cps; ce milieu était excité par le "groupe générateur de houle" produisant des ondes progressives de 4,1 cm. de creux, avec une période à 1 seconde (voir graphique 8).  
égale

Au début de l'expérience, les longueurs d'ondes mesurées étaient sensiblement égales à celles que nous aurions obtenues pour 25 cm. d'eau claire; c'est-à-dire que, pour une viscosité de l'ordre de 10 cps, la longueur d'onde du mouvement est sensiblement la même que pour de l'eau pure. A la précision des mesures près et dans ce cas limite - correspondant à une faible viscosité -, le mouvement en surface, c'est-à-dire en réalité, sur une épaisseur très faible, serait correctement rendu en écrivant les équations classiques de la houle pour une profondeur  $H' = 25$  cm. Les équations ne pourraient rendre compte des mouvements au sein du fluide, car l'influence des termes de viscosité introduit un déphasage dans la propagation du mouvement en profondeur (1).

Au fur et à mesure que le tassement s'accroît, et qu'corrélativement, la viscosité de la couche de vase croît, la longueur d'onde moyenne devient inférieure à celle de la longueur d'onde que permet de prévoir la courbe théorique d'Airy, appliquée pour la profondeur de 25 cm, mais supérieure à celle que permet de prévoir la courbe d'Airy pour la profondeur  $H$  existante d'eau claire.

---

(1) Le déphasage apparaît d'une façon évidente pour la considération des équations de NAVIER-STOKES. Son existence est cependant assez difficile à déceler avec les houles de laboratoire.

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

La courbe expérimentale (1) et la courbe d'Airy, susmentionnées, se confondent à partir d'un point qui correspond pratiquement, d'après nos expériences, à une hauteur qui ne laisse subsister qu'une épaisseur de vase égale à 2,5 cm, dont la valeur de la viscosité est relativement très élevée (2), (plusieurs milliers de cps au moins). On peut donc admettre qu'à partir de cette valeur, pour des houles de gradient de pression comparable à celui des houles de laboratoires, les fonds vaseux se comportent sensiblement comme un fond infiniment rigide en ce qui concerne la propagation du mouvement.

En ce qui concerne la propagation des houles en eau claire (de viscosité négligeable) relativement peu profonde, au-dessus d'une phase visqueuse, séparée de la phase fluide, de viscosité négligeable, par une interface bien définie, les observations effectuées au cours de cette expérience permettent de distinguer du point de vue purement hydraulique différents processus d'interaction entre les deux milieux.

Lorsque la viscosité du milieu chargé de particules de vase est inférieure à 10 cps environ, le mouvement est convenablement représenté par les équations classiques de la houle. La couche limite, qui se développe au contact d'un fond éventuel, est cependant plus épaisse (proportionnellement à  $\sqrt{\nu}$ ), et les phénomènes propres à la couche limite engendrent des pertes d'énergie par frottement sensiblement plus importantes que dans l'eau uniformément claire.

Lorsque la viscosité de la phase visqueuse augmente, tout en restant relativement faible, c'est-à-dire pratiquement inférieure à 100 cps environ, le mouvement se propage au-dessous de l'interface, et reste très analogue à celui de l'eau claire. Le milieu visqueux est, néanmoins, animé d'un mouvement qui ne peut être correctement représenté par les équations de NAVIER-STOKES simplifiées, dans lesquelles on néglige les effets de viscosité.

- 
- (1) On peut vérifier par des conditions d'ordre théorique que la courbe expérimentale passe par un minimum.
  - (2) Il semble qu'une détermination précise de la limite inférieure de la viscosité de la vase, au-dessus de laquelle le comportement du fond permet de l'assimiler à un fond rigide, doit révéler une variation de cette limite en fonction des caractéristiques de la houle. Il est, en particulier, évident que cette limite est très faible, pour une houle courte qui se situe dans le domaine de l'eau très profonde.

L'influence de la viscosité se traduit, en particulier, par un certain déphasage, qui varie avec la valeur de la viscosité et avec la profondeur au-dessous de l'interface.

Lorsque la viscosité de la phase visqueuse atteint et dépasse 100 cps, le mouvement dans la phase visqueuse devient relativement réduit, et l'on observe, dans le fluide situé au-dessus de l'interface, la naissance d'une couche limite. Autrement dit, alors que les pertes d'énergie par frottement se concentrent dans le milieu visqueux, lorsque celui-ci est doué d'une viscosité relativement faible, celles-ci se répartissent à la frontière de l'interface dès que la viscosité augmente. Le domaine marginal du fluide visqueux, intéressé par ces phénomènes décroît lorsque la viscosité augmente, tandis que le domaine marginal du fluide à viscosité négligeable croît. On observe donc, à nouveau, l'existence d'une couche limite dans le domaine de l'eau claire, dont l'importance augmente avec la viscosité de la phase visqueuse jusqu'à redevenir comparable à celle développée par un fond infiniment rigide, c'est-à-dire pratiquement à partir d'une valeur de la viscosité relative de l'ordre de 10.000 cps, pour des houles de gradient de pression au-dessus du fond, comparable à celui des houles de laboratoire expérimentées.

Nous pensons qu'il est inutile de s'étendre d'avantage sur les conditions de propagation des mouvements progressifs périodiques, dans les milieux comportant une partie d'eau claire et une partie, plus visqueuse, d'eau chargée de particules de vase. Rappelons, en effet, que les indications sommaires qui précèdent, n'avaient pour but que d'introduire l'étude des conséquences de la propagation du mouvement de la houle dans des milieux partiellement vaseux - lorsque la viscosité d'un tel milieu est comprise entre 10 et 100 cps; les phénomènes qui se développent, dans ces conditions constituent un processus naturel très particulier des déplacements de vase sous l'action des houles. Nous ne traitons, de plus, cette question qu'en tant qu'application de l'étude des phénomènes propres aux couches limites des houles.

## 2°) Mouvements oscillatoires des particules de vase sous l'action d'une houle, à différentes profondeurs.

Ainsi que nous l'avons exposé ci-dessus, la présence d'un mouvement progressif, périodique, dans la lame d'eau située au-dessus d'une vase de viscosité comprise entre 10 et 100cps développe dans celle-ci un mouvement périodique cylindrique qui ne répond plus aux équations classiques du fluide parfait, car il est indispensable de faire intervenir les termes de viscosité dans les équations de NAVIER-STOKES. Toutefois, les orbites décrites par les particules que l'on peut mettre en évidence par l'introduction de grains d'un matériau pulvérulent de même densité que la vase (afcolè sont sensiblement constituées par des ellipses dont les dimensions

## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

du grand axe et du petit axe diminuent en fonction de la profondeur de la particule considérée dans la couche de vase (voir schéma 9).

Le graphique 10 donne les résultats des mesures des grands axes des orbites en fonction de la profondeur pour une houle particulière:  $H = 25$  cm,  $2L = 1m,30$ ,  $2T = 1$  s, pour différentes valeurs de l'amplitude en surface  $2h$ , et pour différentes valeurs de la viscosité.

L'influence du terme de viscosité se traduit, près de l'interface, par une décroissance très rapide de l'amplitude du mouvement, alors qu'au contraire, dans un fluide non visqueux, l'amortissement du grand axe est extrêmement progressif (voir graphique 11). La profondeur, jusqu'à laquelle le phénomène est sensible, dépend de façon très directe de la viscosité de la vase, et de l'amplitude de la houle. Il s'agit là, nous le rappelons, d'un mouvement propre au fluide visqueux, qui ne peut généralement être considéré comme un mouvement de zone marginale.

Pratiquement, on peut admettre que l'amplitude des mouvements à faible distance de l'interface, n'est, dans la vase, qu'environ les  $7/10$  de l'amplitude des mouvements observés dans le fluide non visqueux au-dessus de l'interface, dès que la viscosité atteint des valeurs d'environ 40 cps.

Nous rappelons qu'il n'est pas possible de dégager des lois de ces mouvements sans faire intervenir les propriétés rhéologiques du milieu. En effet, la thixotropie de la vase, est telle que sa viscosité varie considérablement, lorsque l'on s'éloigne de l'interface, par suite de la mise en mouvement plus ou moins importante de la vase.

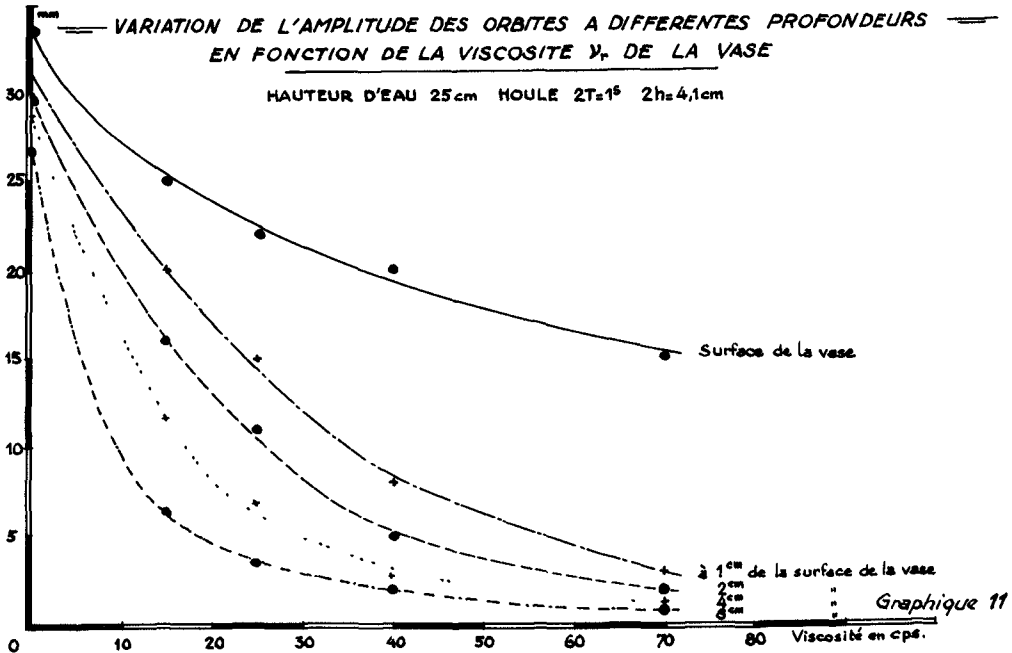
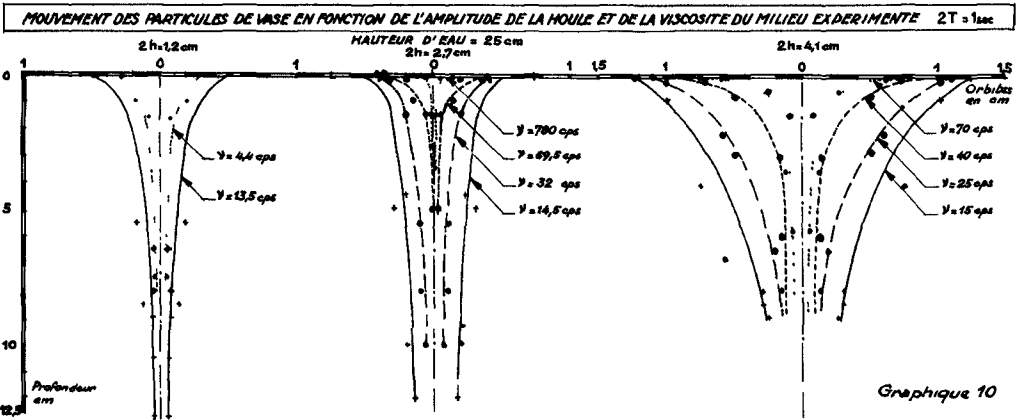
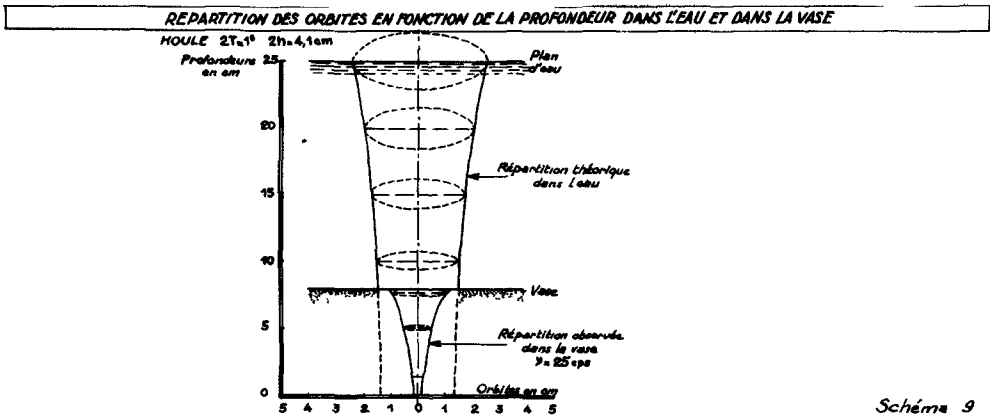
Le résultat essentiel de nos expériences concerne en fait le mouvement de translation moyen des particules de vase qui résulte des phénomènes de frottement près de l'interface, et que nous exposerons maintenant.

### 3°) Mouvements de translation des particules de vase dans le sens de propagation de la houle.

Le développement d'un mouvement laminaire, dans le fluide visqueux, sous l'action d'une houle cylindrique du fluide sain, situé au-dessus du milieu visqueux, se traduit par un mouvement de translation moyen des particules de vase dans le sens de propagation de la houle, d'une façon comparable aux phénomènes que nous avons étudiés et analysés, en ce qui concerne la couche limite des houles sur fond rigide.

Cette action se met particulièrement bien en évidence par son effet global, qui a pour résultat de faire évoluer un fond horizontal de vase dans un canal, vers un profil d'équilibre régulièrement croissant, de l'amont jusqu'à l'aval, avec accumulation

# COASTAL ENGINEERING



## MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

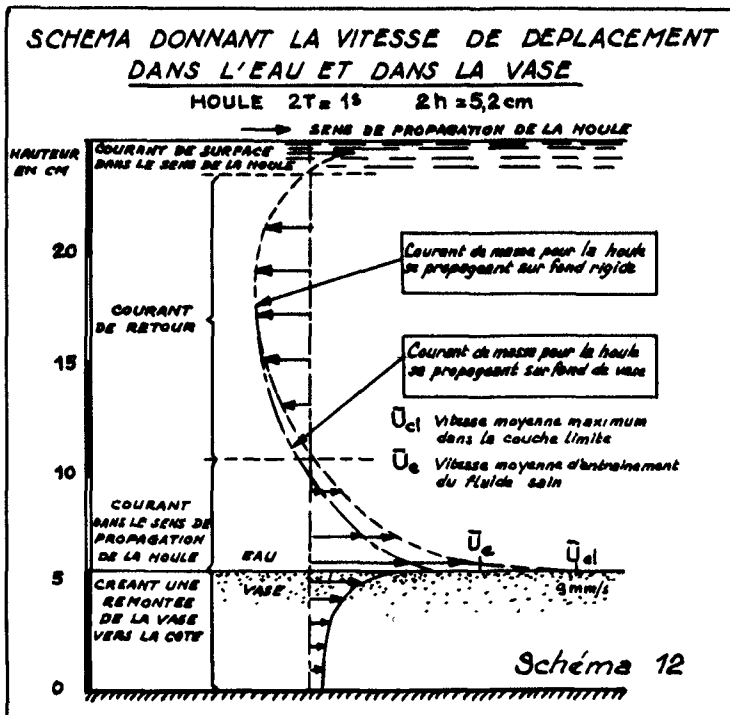
dans la partie aval du canal, devant la limite aval de celui-ci, de matériaux provenant de la partie amont sans aucune remise en suspension de ce matériau.

Les études que nous avons effectuées avec des grains de même densité que la vase incorporés à celle-ci nous ont permis d'examiner les conditions qui influent sur les phénomènes de translation des particules de vase sous l'action de la houle.

Nous étudierons successivement :

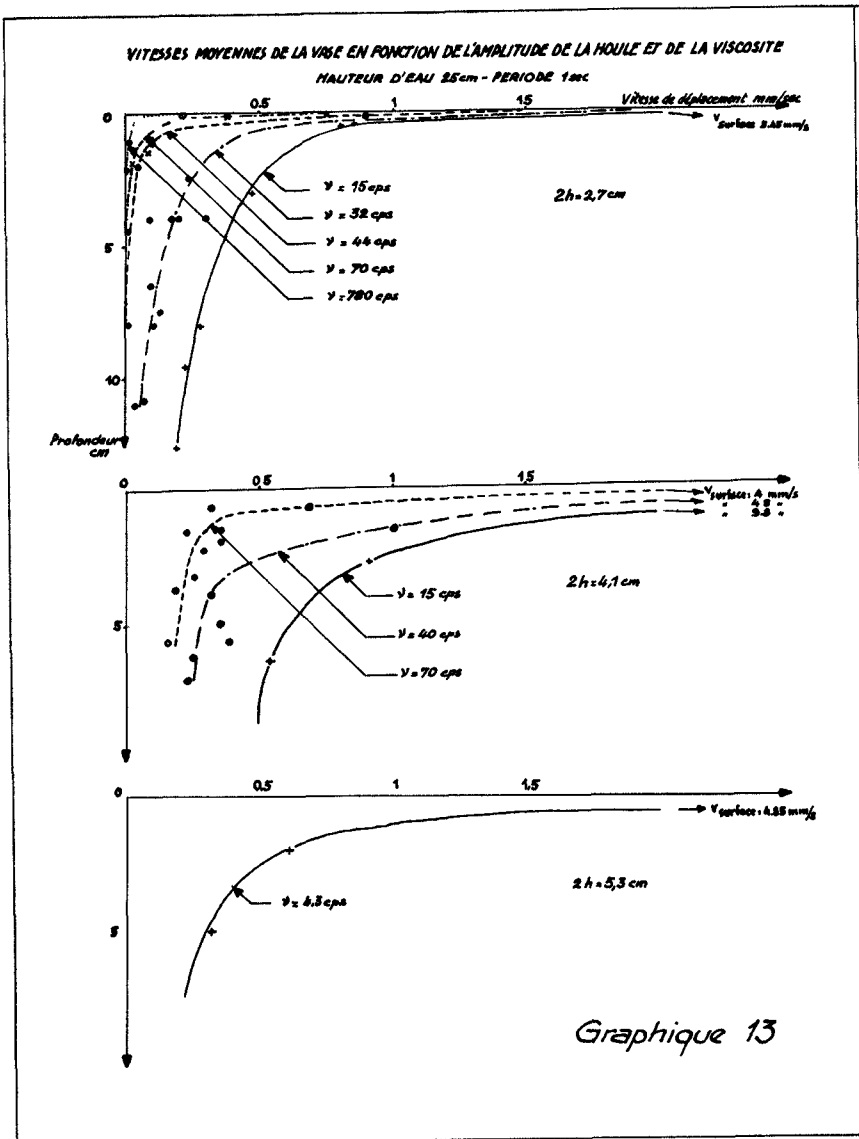
- la répartition des vitesses de translation moyenne;
- l'influence de la viscosité sur les vitesses de translation;
- l'influence des caractéristiques de la houle;
- le débit solide des vases qui peut résulter de l'action de la houle dans une section type.

Le croquis 12 schématise la répartition des différents courants moyens existants, dans le fluide sain, pour lequel la viscosité est négligeable, et dans la vase sous-jacente pour laquelle les forces de viscosité jouent un rôle essentiel.



## COASTAL ENGINEERING

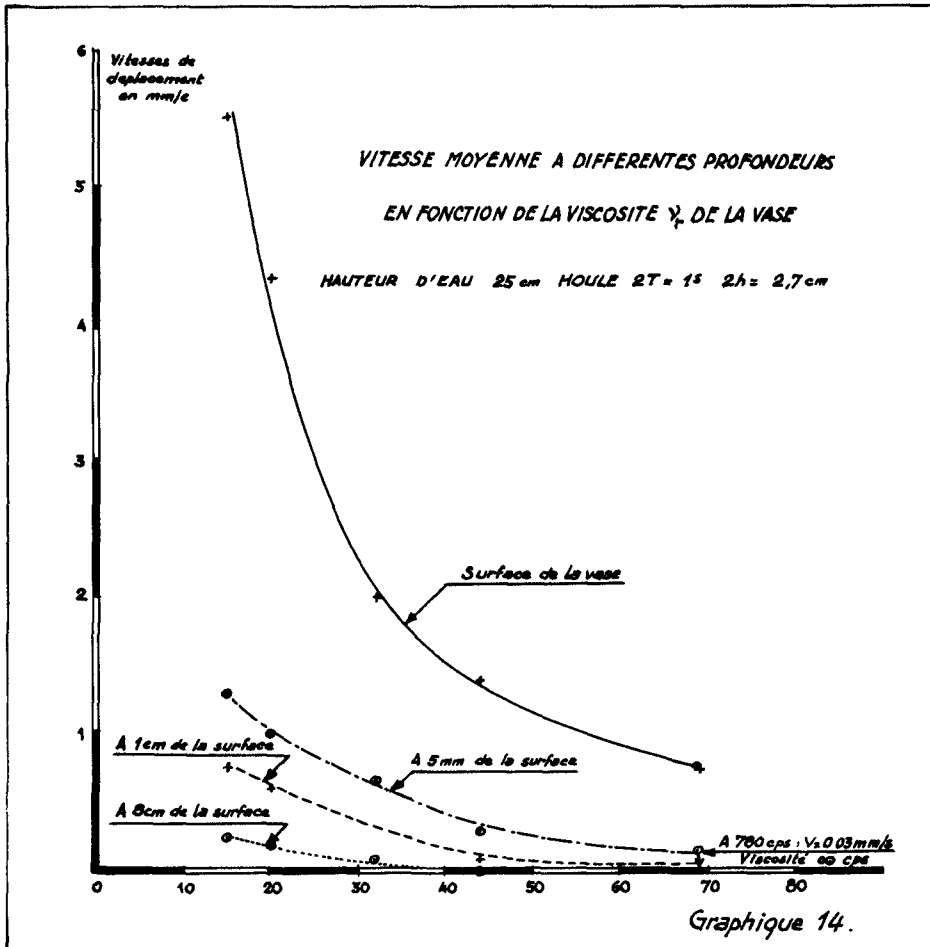
Le graphique 13 donne la répartition de la vitesse de déplacement de la vase, en dessous de l'interface de séparation des deux milieux pris comme zéro de référence. L'on constate, d'une part, une décroissance rapide des vitesses résultantes moyennes, en fonction de la viscosité, et, d'autre part, une atténuation brutale du mouvement près de la surface, dès que la valeur de la viscosité est importante. C'est, en effet, la zone où le gradient des vitesses est très élevé, qui constitue pratiquement une zone marginale dans laquelle se développent les forces de frottement. La variation du gradient des vitesses moyennes est peu sensible pour les viscosités de l'ordre de 10 à 30 cps, pour lesquelles on peut admettre que les phénomènes de frottement à l'interface sont négligeables. Le mouvement s'observe plus en profondeur et ne peut plus être assimilé aux mouvements de couche limite.



# MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Nous avons porté sur le graphique 14, la variation de la vitesse de déplacement à différentes profondeurs, en fonction de la viscosité de la vase pour une même houle. Ces courbes mettent en évidence l'influence essentielle de la viscosité sur les vitesses moyennes de déplacement, et l'interprétation de ces courbes permet de déduire une notion de débit solide possible en fonction de la viscosité.

l'influence  
Du point de vue théorique, il apparaît que de la viscosité, dans la propagation de mouvements progressifs cylindriques périodiques, se traduit par un mouvement moyen d'entraînement des particules dans le sens de propagation de la houle. La compensation de ce mouvement, qui permet de conserver une surface libre stable s'effectue dans la zone de viscosité minimum (la nappe d'eau claire dans le cas de nos expériences).



## COASTAL ENGINEERING

Dans le cas de propagation de ces mouvements dans un fluide peu visqueux (eau claire) sur un fond rigide, seules les zones de frottements marginaux (couche limite de fond et de surface) sont animées de ce mouvement de déplacement moyen dans le sens de propagation du mouvement.

Si le mouvement progresse dans une nappe d'eau, située au-dessus d'un milieu de viscosité supérieure, celui-ci s'anime dans un mouvement périodique, qui s'accompagne d'un déplacement dans le sens de propagation du mouvement.(1)

Ceci est valable, aussi bien dans le cas où le mouvement dans le milieu visqueux s'apparente à un mouvement de zone marginale à fort gradient de vitesse, où à un mouvement de masse sans zone privilégiée de dissipation d'énergie par frottement.

En pratique, ce résultat a pour conséquence d'entraîner une remontée vers la côte des matériaux du milieu visqueux jusqu'aux zones de turbulence élevée, qui assurent la remise en suspension du matériau (zone de déferlement essentiellement) Remarquons d'ailleurs que la propagation du mouvement sur fond déformable augmente la stabilité de l'interface et retarde l'apparition de turbulence de fond.

### IX - APPLICATIONS PRATIQUES

Le phénomène de remontée de la vase sous l'action de la houle, que nous avons décrit ci-dessus, constitue une cause non négligeable d'alimentation des atterrissements de vase sur certains points des côtes; en particulier, les remontées de vases marines participent certainement, dans une mesure importante, à la formation des polders d'origine marine tels ceux de la Sèvre Niortaise, en France, ou ceux de la mer de Waden en Hollande.

Ce processus permet d'ailleurs de compléter l'explication de certains phénomènes, qui ont été souvent observés dans

---

(1) Une image physique du processus peut être donnée, si l'on considère que, bien que les particules du fluide parfait restent stables en valeur moyenne, l'énergie et, par conséquent, la pression sur le fond, progresse, au cours de l'évolution du mouvement progressif. L'action sur l'interface de ce mouvement est donc assimilable du point de vue pression, au passage d'un train de rouleaux successifs se déplaçant sans frottement. On pressent que le passage de ces rouleaux au-dessus d'un milieu visqueux entraînera le déplacement de celui-ci dans le sens général du mouvement.

# MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

les zones de poldérisation.(1)

Il suffit, en effet, que le gradient de pression soit de l'ordre de grandeur de la rigidité initiale (yeld value) des vases, pour que l'on observe une lente remontée du matériau. Or, la partie variable de la pression s'écrit :

$$\frac{p^*}{\rho g} = h \frac{c h a (H-y)}{c h a H} \cos (b t - a x)$$

d'où : 
$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{\max. \text{ pour } y=H} = \frac{h a}{c h a H}$$

Les houles les plus faibles, que nous avons expérimentées, et qui correspondaient déjà à des débits non négligeables de vase, possédaient les caractéristiques suivantes :

$$H = 25 \text{ cm. } \quad 2 L = 1 \text{ m. } 60$$

$$2 T = 1 \text{ s. } \quad 2 h = 2,7 \text{ cm.}$$

une houle océanique, correspondant à une période de  $2 T = 12 \text{ s}$  et une amplitude de  $2 h = 4 \text{ m}$ , c'est-à-dire, une houle de tempête moyen et non exceptionnelle, aura une influence comparable jusqu'à une profondeur  $H'$  telle que  $\frac{\partial p}{\partial x}$  soit d'un ordre de grandeur comparable

à la valeur de l'essai cité ci-dessus :

$$\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{h a}{c h a H} = \frac{1,35 \pi}{80 c h \frac{\pi 25}{80}} = 2,8 \times 10^{-2} = \frac{h' a'}{c h' a' H'} = \frac{2 h' \pi}{2 L' c h' a' H'} = \frac{400 \pi}{2,2 \times 10^4 c h' a' H'}$$

$$c h' a' H' = \frac{4 \pi}{2,8 \times 2,2} = 2,04 ; \quad H' = 0,18 \times 220 \text{ m} \neq 40 \text{ m.}$$

Une houle de même période ( $2 T = 12 \text{ s}$ ) et de 6 m d'amplitude aurait une action comparable pour :

$$c h' a' H' = 3,06 \quad \text{d'où} \quad H' = 0,27 \times 220 \text{ m} \neq 60 \text{ m.}$$

On voit donc que les houles océaniques sont susceptibles de provoquer une remontée de la vase des fonds depuis des profondeurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, et sans

(1) Cf. étude de M. VAN STRAATEN (13.14) et conférence prononcée par celui-ci, sur les faciès de la mer de Waden (Hollande) à la Sorbonne, le 11 Avril 1957.

## COASTAL ENGINEERING

doute même des profondeurs de l'ordre de 100 m, pour les grandes tempêtes océaniques.

Sous ces actions, il se produit une migration de la vase depuis les grands fonds vers la côte. En général, le matériau n'atteint pas la côte, car, dès que les fonds deviennent insuffisants, et, en particulier aux abords de la zone de déferlement, celui-ci est remis en suspension et entraîné vers le large, par suite de l'action des courants de masse (ripcurrents, ou courants de compensation), ou de l'action des courants de densité.

Le matériau remonte toutefois à la côte sous l'influence des courants de marée, ou de densité, si celle-ci est protégée de l'action brutale des lames -baie abritée, bassin des ports, etc...). Les bandes côtières abritées de la houle par une succession d'îles (îles Friesland en Hollande, île de Ré devant le Marais Poitevin, Noirmoutier, etc ..) constituent des plages particulièrement propices à l'atterrissement des matériaux vaseux, et permettent, en particulier, lorsque la houle est suffisamment atténuée par la diffraction, au processus de remontée de la vase, sous l'action de la houle, de se poursuivre jusqu'à l'estran. Ce phénomène permet d'expliquer certains envasements, et en particulier l'apport des vases dans les polders marins de la baie de l'Aiguillon.

### CONCLUSIONS

L'étude que nous avons entreprise, ne s'était donné que comme un but secondaire, la recherche des lois déterminant les mouvements des matériaux de fond sous l'action de la houle. Mais nous avons constaté au long du déroulement des études, que l'explication des mouvements du fluide près du fond, comportait un domaine d'application extrêmement fécond : celui du mouvement des matériaux de fond.

Nous pensons que la poursuite de telles études devrait permettre de mieux connaître ces phénomènes importants qui intéressent vivement l'ingénieur maritime, tant pour la protection des côtes, que pour le maintien des profondeurs.

Une conclusion que nous croyons devoir tirer de ces études, concerne l'apport que les recherches en laboratoire permettent d'obtenir dans l'étude de problèmes complexes et pour lesquels l'expérimentation en nature, est coûteuse et délicate. En particulier nous pensons que dans l'état actuel des connaissances des phénomènes maritimes, l'étude systématique des phénomènes à échelle réduite doit précéder toute campagne de mesures en nature, afin de mieux connaître le phénomène lui-même, les difficultés inhérentes à son observation à sa mesure, et de pouvoir dresser un tableau d'expérimentation en nature, rationnel et efficace.

# MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS L'ACTION DE LA HOULE

## - BIBLIOGRAPHIE -

- (1) HUON LI - Stability of oscillatory laminar flow along a wall  
Beach Erosion Board, Technical memorandum n° 47,  
1954.
- (2) LARRAS - Effet de la houle et du clapotis sur les fonds de  
sable, IVèmes Journées de l'Hydraulique, Paris, 1956
- (3) LHERMITTE P. - Etude de la couche limite dans le cas des  
mouvements progressifs périodiques, Comptes rendus  
de l'Académie des Sciences, 1957, p.2352 t. CCXLIV.
- (4) LHERMITTE P. - Contribution à l'étude de la couche limite  
des houles progressives. Application aux mouvements  
de matériaux sous l'action de la houle . Paris 1958.
- (5) MADHAV MANOHAR - Mécanique des sédiments de fond provoqués  
par l'action de la houle, Beach Erosion Board,  
Technical memorandum, n° 75, 1955.
- (6) MICHE R. - Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur  
croissante ou décroissante, Annales des Ponts et  
Chaussées, 1942.
- (7) MICHE R. - Amortissement des houles dans le domaine de l'eau  
peu profonde, Houille Blanche, 1956, n° 5.
- (8) PELNARD - Essai de théorie de l'évolution des formes de riva-  
ge en plages de sables et de galets, IV<sup>es</sup> Journées  
de l'Hydraulique, Paris, 1956.
- (9) RIVIERE A. et MUNIER P. - Contribution à l'étude des argiles  
utilisées en céramique, Institut de Céramique  
française, 1948.
- (10) RIVIERE A - Etudes littorales, Bulletin d'Information du  
C.O.E.C., Paris, Octobre 1957.
- (11) RIVIERE A - Cours de sédimentologie professé en Sorbonne  
(1956-1957), non encore publié.
- (12) A. de ROUVILLE - Le régime des côtes. Eléments hydrographi-  
ques des accès des ports, Imprimerie  
Nationale, 1942.
- (13) VAN STRAATEN - Quelques particularités du relief sous-marin  
de la mer de Waden (Hollande), Sédimentation  
et quaternaire, France 1949.
- (14) VAN STRAATEN - Environments of formation and facies of the  
Waden sea sediments, Tijdschrift vanhet Kon.  
Ned. Aardrijkskundig Genootschap, mai 1950.
- (15) VINCENT et RUELLAN - Communication au Comité Technique  
de la S.H.F. en Juin 1957 : "Mouvements solides  
provoqués par la houle sur un fond horizontal"