Les transports littoraux sur les plages de galets

Application au port des Galets à l'île de la Réunion

Littoral drift along shingle beaches
Application to Port des Galets (Reunion Island)

PAR

P. LHERMITTE

ET

J. GERMAIN

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES A L'ÎLE DE LA RÉUNION

INGÉNIEUR AU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE

Les transports littoraux sur les plages de galets ont rarement fait l'objet d'études publiées dans la littérature technique; en général, on se contente d'accepter les règles admises pour les transports littoraux sur les plages de sable. Un problème de ce genre s'est posé à nous pour le port de la pointe des Galets à la Réunion. Un modèle réduit de cette plage a été réalisé à Chatou.

Les problèmes soulevés par ce modèle réduit, en particulier pour des angles d'attaque de la houle, de l'ordre de 60°, nous ont amenés à reprendre les publications relatives aux transports littoraux des plages de sable. L'influence des courants de houle, des facteurs aléatoires (direction de la houle, topographie des fonds, etc.), des granulométries, les notions de puissance de transport d'une houle, de plage stabilisée demandent à être précisés et à faire l'objet d'études systématiques.

Nos constatations sur place et lors des études sur le modèle réduit, relatives à ces problèmes, et les études qui nous ont été suggérées font l'objet de ce mémoire.

There is a marked scarcity, in technical literature, of papers dealing with the study of littoral transport along shingle beaches and as a rule, the laws assumed for littoral drift on sand beaches are used. We have been confronted with this type of problem in connection with the harbour of Pointe des Galets, in Reunion Island. A scale model of this beach has been built at Chatou Hydraulic Laboratory (Electricité de France).

The problems created by this model, principally that of the wave incidence angles, which reached about 60°, led us to devote fresh attention to publications on littoral drift along sand beaches. The influence of wave currents, of the chance factors (wave direction, sea-bed topography, etc.) of the grain sizes, as well as ideas on the transporting power of the waves and on stabilized beaches, all require clear definition and warrant being studied systematically.

Our observations on site and during the scale model tests as well as the studies which have suggested themselves to us form the subject-matter of this paper.

Introduction

Les problèmes de transports littoraux, de modifications du relief des plages et de leur évolution dont traite la littérature tant du point de vue maritime que du point de vue des essais sur modèle réduit, visent, en général, des plages de sable ou de graviers. Les mouvements et évolutions des plages formées d'éléments très

fins ou au contraire d'éléments de fortes dimensions, sont beaucoup moins bien connus.

C'est ce dernier cas qui s'est présenté à nous à l'île de la Réunion, au port de la Pointe des Galets et qui a fait l'objet d'une étude sur modèle réduit, effectuée au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou.

I. — Le problème du port de la Pointe des Galets

Le port de la Pointe des Galets a été créé en 1885 sur la côte du delta d'alluvions de la rivière des Galets (fig. 1). Les deux côtés maritimes de ce delta sont le siège de transports littoraux importants.

Le plus important de ces transports littoraux est celui qui s'effectue du sud au nord, entre l'actuelle embouchure de la rivière des Galets et la pointe du phare. Or le chenal d'accès au port

et la jetée nord par suite du recul de la plage fut plusieurs fois menacée en son enracinement.

Le processus de transport des matériaux par la houle, tel qu'il sera exposé plus loin en détail, est soit un processus en dents de scie (remontée du matériau par la vague et descente suivant la ligne de plus grande pente sous l'effet de la gravité et de l'action d'entraînement du reflux de la vague) soit un processus dû à l'action du

FIG. 1

Cartes à différentes échelles donnant la situation de l'île de la Réunion et du port des Galets.

débouche en un point de la côte affecté par ce transport (fig. 2).

La vie du port au cours de son exploitation a été largement marquée par ce facteur influent. Le chenal, chambre d'emménagement toute trouvée pour les matériaux, s'obstruait périodiquement; la jetée sud particulièrement exposée ne put jamais résister aux actions des houles,

courant de houle développé le long de la plage par suite du déferlement des lames, ou du courant de fond (le grain est arraché par les actions oscillatoires de frottement sur le fond et est alors soumis à l'action des courants parallèles au rivage). En ce qui concerne le transport des galets plus particulièrement, il faut rapprocher le mécanisme de transport en dents de scie du

FIG. 2

Plan du port et état de la passe au 9 juillet 1952.

mécanisme décrit par MM. DANIEL, DURAND et CONDOLIOS pour le charriage en rivière par saltation.

Le fait que peu d'études aient été faites sur les plages de gros galets provient sans doute de ce que ces plages, par suite du poids des éléments, sont relativement stables alors que les plages de sable sont beaucoup plus sensibles à l'action des houles. Il faut, en effet, une force d'arrachement considérable pour arracher un galet de 50 cm de dimensions moyennes. Les houles de la Réunion, sans donner lieu à des tempêtes particulièrement spectaculaires, sont des houles de grande énergie; ce sont des houles de très grande longueur d'onde (périodes de 14 à 18 et même 20 secondes) qui rencontrent en arrivant sur l'île des fonds montant progressivement mais rapidement (10 à 15 %); les houles prennent une forte cambrure pour déferler brutalement. On conçoit que l'énergie d'arrachement soit alors particulièrement importante, ainsi d'ailleurs que le courant de houle dû au déferlement. La zone de turbulence interne dont l'existence a été établie par M. MICHE (*) doit jouer un rôle prépondérant dans de tels cas et il est probable que son action sur la mise en mouvement des matériaux est importante.

Les plages de la Réunion sont composées des éléments provenant de l'érosion des terrains basaltiques de l'intérieur. Ces éléments amenés par les torrents jusqu'à la mer peuvent atteindre 60 à 80 cm dans leurs plus grandes dimensions pour les plus importants d'entre eux. On trouve

toutefois le long du littoral réunionnais toutes sortes de plages, soit des plages de galets purs, soit, rarement, des plages de sables purs à l'exception des plages de sables coraliens d'origine totalement différente), soit des plages de granulométrie variée (fig. 3).

FIG. 3 a, 3 b, 3 c

Vues de la plage entre la rivière des Galets et le port.

(*) *Trains d'ondes océaniques et de laboratoire*, par M. MICHE.

Lors du transport littoral, les courants de houle ont pour effet, lorsqu'ils sont prédominants, d'entraîner le sable fort loin et de laisser une plage de galets (cas des côtes situées au pied de falaises abruptes). Si l'action de transport en dents de scie est prédominante, l'ensemble du matériau est intéressé, mais il se produit un effet de triage qui porte le sable au sommet de

la Réunion, en présence d'un transport littoral, dont l'élément prédominant est composé par des galets de dimensions comprises entre 12 cm et 40 cm.

L'action d'entraînement, et de mise en mouvement des matériaux, due à la houle n'est réellement sensible pour un tel matériau qu'à des profondeurs faibles dont la limite semble se situer aux environs de 6 m. L'action des courants de houle, au droit des ouvrages, peut se traduire par des entraînements de matériaux à des profondeurs de l'ordre de 8 m (cas de la jetée sud). Par contre, lors d'un avancement de la plage, le mouvement de chute de matériaux se produit tant que le profil sous-marin ne présente pas une pente inférieure à l'angle naturel du matériau constitutif sous l'eau. Aux endroits de la côte où il ne peut pas y avoir avancement de la plage (dans l'axe du chenal d'entrée du port, notamment), nous avons relevé par des fonds de — 11,00 m des galets couverts de mousses importantes, preuve d'une stabilité de plusieurs années.

En fait, le transport par courant de houle, doit être relativement faible pour les gros éléments représentant 80 % du matériau. La majeure partie du transport s'effectue par le processus en dents de scie dans la bande comprise entre — 6 m et + 3 m, et suit exactement le profil des obstacles rencontrés. En particulier à l'intérieur de l'avant-port, le matériau suit exactement la jetée sud, en formant une langue aux formes arrondies (cycloïde), en concordance très acceptable avec les formes théoriques déduites par Peer BRUNN (Form of equilibrium of coasts with a littoral drift) d'une loi de transport à puissance décroissante le long d'une plage : $(dQ/ds) = C^{te}$.

Par contre, nous avons constaté au nord de la jetée nord des dépôts de sables et graviers récemment déposés lors des houles violentes du S.W. La présence de ces dépôts ne peut s'expliquer que par suite du transport dû au courant de houle de fond et intéressant surtout les éléments fins.

Ces constatations revêtent, à nos yeux, une certaine importance : il faut différencier le processus d'évolution des plages de sable et des plages de galets.

En ce qui concerne les plages de sable, la présence d'ouvrage fixe peut favoriser la formation de flèches, les courants de houles transportant le sable le long de ces flèches (*). Bien que nous l'ayons observé pendant certains essais sur le modèle réduit à l'entrée du port (ce qui nous a conduits à nous demander si la similitude

(*) Voir publication de M. Jean LAURENT, au congrès de Rome de 1953, sur la formation des flèches de sables.

FIG. 3 bis

Schéma donnant une image des houles frappant les côtes de la pointe des Galets. La longueur des flèches croît avec la puissance de la houle, et leur épaisseur avec leur fréquence annuelle.

la zone affectée par le transport (jusqu'à + 6 ou même + 7); les galets, qui sont alors élément essentiel du transport littoral, remontent rarement plus haut que la cote + 3. Le même processus de triage granulométrique est observé à l'intérieur du port, le sable pénétrant dans l'intérieur du port plus loin que les galets.

Ceci explique la formation de plages de sable sur sous-sol de galets, ou des plages réelles de sable, en des lieux d'aboutissement des courants de houles (au sud du cône de déjection de la rivière des Galets, par exemple).

En ce qui concerne la plage entre l'embouchure de la rivière et le port, la prédominance des galets est nette bien qu'en de nombreux points on puisse rencontrer des zones de sable ou graviers sur sous-sol de gros galets.

On se trouve, en fait, dans le cas du port de

adoptée ne nous plaçait pas dans le cas d'un processus de transport quelque peu différent du processus naturel), ce processus de formation de flèches n'existe pas à la Réunion lors des transport de gros matériaux qui suivent exactement la côte.

Par contre, les plages à faciès de galets sont le siège de transports littoraux contournant exactement les ouvrages et sont beaucoup moins sensibles à l'action des courants de houle tendant à allonger les trajets unitaires moyens de chaque grain.

II. — Le modèle réduit

La construction et l'exploitation d'un modèle réduit exigeaient, d'abord, que soient définis, de façon très précise, les phénomènes que l'on se proposait de représenter.

PHÉNOMÈNES AUXQUELS SONT SOUMISES LES COTES DE LA RÉUNION

VENTS. — On observe les vents alizés et les vents dus aux cyclones. Les premiers soufflent à peu près toute l'année de direction générale S.E. dans les parages de l'île. Le port des Galets se trouve être abrité contre leurs effets et, en outre, ces vents sont de force trop faible pour avoir une quelconque influence sur le transport des galets. Par contre, les vents dus aux cyclones, d'une extrême violence, peuvent intéresser davantage le phénomène qui nous occupe. Leur direction peut être quelconque N.E. à S.W. ainsi que la direction des houles qu'elles engendrent. Ces dernières ont une force suffisante pour transporter des galets, leur action est surtout sensible sur la côte nord qui n'est pas intéressée par le modèle, tandis que sur la côte W., d'une part, leur violence est réduite par la diminution du fetch qu'entraîne la présence de Madagascar et d'autre part, leur effet sur les matériaux mobiles se traduit, en général, par un cheminement du nord vers le sud. Il nous a donc paru légitime de négliger, sur le modèle, les actions des houles de direction comprises entre le nord et l'ouest, qui ne contribuent, en aucune façon, à l'engravement de la passe d'entrée.

COURANTS. — Il existe devant la passe d'entrée du port des Galets un courant côtier, lié sans doute au courant général de direction S.-E.-N.-O., qui règne dans les parages de l'île. La direction de ce courant est N.-S. ou S.-N., sans relation bien définie avec la direction de la houle, sa vitesse varie de 0 à 1,5 ou 2 nœuds, quantité trop faible pour agir efficacement sur les transports de galets.

MARÉES. — Les marées sont trop faibles, 1 m constitue une amplitude exceptionnelle.

HOULES DE SUD-OUEST OU RAZ DE MARÉE. — On a coutume d'appeler « raz de marée » de fortes houles, de direction générale W.S.W., dues au passage des dépressions australes. Ces houles, de période et d'amplitude variables (périodes de 9 s à 20 s, amplitudes de 1 m à 7 m), sont à l'origine des transports de galets sur la plage du sud du port. Leur violence et l'angle sous lequel elles attaquent le rivage concourent à leur donner une grande capacité de transport.

DIMENSIONNEMENT DU MODÈLE

Les phénomènes naturels étant tels que nous les avons décrits ci-dessus, il convenait de reproduire sur le modèle :

- la houle de raz de marée,
- une partie de la baie de Saint-Paul au voisinage du port,
- les fonds sous-marins,
- le terrain bordant la mer au-dessus de la cote 0,

et de choisir un matériau convenable pour reproduire les transports solides le long de la plage.

A) CONDITIONS AUX LIMITES.

a) *La houle.* — Nous avons vu que les houles que nous avions à reproduire ont, au large de l'île de la Réunion, des directions allant de S.W. à W. et des périodes comprises entre 9 s et 20 s. La forme des crêtes de houle dans la baie de Saint-Paul, au voisinage du port, nous sera donnée par des plans de vagues exécutés suivant la méthode en se fixant *a priori* la direction en profondeur infinie et la période. De tels plans ont été effectués pour les houles de direction S.W., W.S.W. et W. et de périodes 9, 11, 13, 15, 17 et 19 s; ils ont montré que la présence d'un plateau sous-marin, au voisinage du cap la Houssaye, a pour effet de grouper presque toutes

les crêtes de houles autour d'une direction générale W.S.W.

Cependant, il n'était pas possible de pousser ces plans de vagues aussi près que cela aurait été utile de la côte. Il faut, en effet, toujours s'arrêter à une distance suffisante pour que les crêtes de houle aient encore une faible courbure de manière que la ligne de crête puisse être représentée sur le modèle, avec une bonne approximation, par la ligne brisée constituée par les volets batteurs dont la longueur est de 3 m; et on doit, d'autre part, laisser sur le modèle, entre le volet et la plage, une distance suffisante pour que se crée une houle pure à partir des mouvements du batteur. Avec les générateurs de houle dont dispose le laboratoire, une distance d'une longueur d'onde est suffisante.

Enfin, il fallait tenir compte également des réflexions partielles qui se produisent sur les fonds, du fait de leur pente élevée (qui, par endroits, atteint 30 %).

b) *Limites en plan.* — Pour obtenir une représentation correcte du cheminement des matériaux le long de la plage et de l'évolution de cette dernière, il fallait représenter la région

située au sud du port jusqu'à l'embouchure de la rivière des Galets.

Vers le nord, on pouvait se contenter de ne représenter qu'une faible longueur, 500 m de plage paraissaient suffisants pour reproduire correctement les conditions aval importantes ici, du fait des fortes pentes bordant le banc de la Follette entre les cotes — 100 et — 10.

La dernière limite en plan nous était imposée par la nécessité de représenter une largeur suffisante de plage pour pouvoir suivre son évolution en cas de recul après dragages. Pratiquement, le modèle fut limité à l'ouest de la ligne 0 à une distance minima de 170 m de celle-ci.

Le port était ainsi représenté en entier sur ce modèle.

B) CHOIX DU MATÉRIAU MOBILE ET CONDITIONS D'ESSAI.

Les nombreux prélèvements de matériau effectués dans la nature faisaient apparaître une dispersion telle qu'il était impossible de définir une granulométrie moyenne.

Nous avons donc cherché, au cours d'essais

FIG. 4

Plan du modèle.

préliminaires de transport sur une plage rectiligne, un matériau de granulométrie homogène et de même densité que le matériau naturel.

Nous n'entrerons pas ici dans la description de ces essais, qui serait inutile et dont seul le

De plus, ces essais ont montré qu'il suffisait d'utiliser une seule période de houle (14 s) et une seule direction (ouest-sud-ouest).

Le modèle fut donc construit conformément à ces données (fig. 4).

FIG. 4 a
Vues du modèle.

FIG. 4 b

résultat importe : ces essais ont montré qu'un sable de la Loire de densité 2,6 et de diamètres compris entre 0,8 mm et 1,3 mm pourrait donner une reproduction fidèle de l'engravement du port des Galets et de l'évolution du relief de la plage.

Il fut équipé de quatre batteurs de houle du type de ceux habituellement utilisés au laboratoire, de pointes limnimétriques à œil cathodique et d'une passerelle roulante permettant la mesure de l'amplitude de la houle au large.

III. — Résultats obtenus durant les dernières années d'exploitation de la Pointe des Galets et au cours des études sur modèle réduit

L'exploitation du modèle réduit et la réalisation sur place de certains travaux ont été menées conjointement pendant plus de trois ans. Les résultats auxquels nous avons abouti dans le domaine qui nous occupe ici méritent d'être évoqués, mais il est difficile de séparer ceux qui sont dus au modèle réduit de ceux qui sont dus à l'expérience en nature car les deux séries de faits ont eu des profondes répercussions l'une sur l'autre au cours de ces trois années.

Dragages de la passe d'entrée

En 1952, le transport littoral aboutissait dans le chenal d'entrée du port, dans lequel de fréquents dragages étaient indispensables. Ces dragages avaient pour inconvénients, outre leur prix de revient élevé, de s'effectuer dans une zone

FIG. 5

Position de la passe de dragage.

battue par la mer, accessible peu de jours par an à la drague, de ne pas permettre de maintenir une passe de plus de 7 m de profondeur, de laisser le port sous la crainte d'une obstruction

totale en cas de fortes tempêtes se suivant à intervalles rapprochés (occasionnant de nombreux apports, pouvant atteindre 50.000 m³, et empêchant la drague de travailler).

La solution de ces difficultés a été trouvée en exécutant les dragages à l'extrémité de leur cheminement normal avant que leur zone de dépôts n'atteigne le chenal (fig. 5). L'exécution d'une chambre d'apports au nord de la jetée sud a permis :

- de procéder aux dragages avec une possibilité d'emménagement de l'ordre de 50.000 m³, évitant ainsi toute obstruction de la passe;
- d'effectuer les dragages dans une zone plus abritée que le chenal d'entrée, permettant ainsi de travailler plus souvent;
- en draguant cette chambre d'apports à la cote — 12,00 m, de créer un courant de fonds qui non seulement évite les dépôts dans le chenal, mais approfondit le chenal et l'élargit lors des violentes tempêtes.

L'action et l'emplacement de cette zone de dragages dite « chambre d'apports » ont été déterminés sur modèle; mais les résultats du modèle étaient moins probants que ne le furent les résultats dans le réel. Le matériau dans le modèle avait, pour une houle donnée (à cause de l'effet d'échelle), une distance de transport supérieure à celle du matériau naturel. Les galets, peu sensibles au courant de déferlement, contournaient exactement la jetée sud, et se déposaient le long d'un périmètre en forme de cycloïde, cheminant exactement suivant les contours de celle-ci. Dans le modèle, le matériau était amené relativement plus loin d'où un effet moins net de l'action de la chambre d'apports.

Possibilité d'exécuter les dragages au sud de la jetée sud

Conformément à la théorie de M. PELNARD-CONSIDÈRE, l'étude sur modèle a montré que l'on pouvait supprimer le transport littoral au droit de la jetée sud, en draguant les matériaux à l'amont de cet endroit par rapport au transport. L'expérience a prouvé qu'il suffisait de draguer au-dessus de la cote 0 pour supprimer complètement le transport en dents de scie et le trans-

port occasionné par le courant de houle dû au déferlement.

L'effet d'échelle peut peut-être changer certains résultats numériques, mais ne doit pas infirmer ce principe. Cette méthode, si elle est appliquée par la suite, permettra d'assurer une

Un prolongement de 20 m de cette ancienne jetée a été terminé en 1954, atteignant alors les fonds de 2,50 m. A la suite de la période de tempête fin 1954-début 1955, ce prolongement de jetée a joué efficacement son rôle d'arrêt du transport solide, emmagasinant environ 40.000

Essai sur modèle. Relief de la plage à la fin d'un essai de dragage.

capacité d'emmagasinement très supérieure au volume transportable dans une saison de tempêtes, d'effectuer les dragages avec des engins terrestres, et de diminuer les frais d'entretien de la jetée sud en supprimant le bombardement par les galets (fig. 6).

Arrêt du cheminement littoral par prolongement de la jetée sud

Un autre mode d'emmagasinement des matériaux consiste à arrêter tout cheminement littoral en prolongeant la jetée sud (travaillant alors en épi), les dépôts de matériaux s'effectuant au sud de celle-ci. Il suffit que la jetée atteigne les profondeurs de l'ordre de — 8,00 m, pour arrêter totalement le transport en dents de scie ou le transport résultant de l'action des courants de fonds.

En 1953, il ne restait de l'ancienne jetée sud que l'enracinement, la plage s'étant alignée sur ces vestiges de jetée, la cote 0 se situant au pied même de la jetée.

mètres cubes de matériaux, les apports à l'intérieur de l'avant-port étant limités à moins de 10.000 m³. Par contre, la profondeur à l'extrémité du prolongement n'est plus, à l'heure actuelle, que de 1 m.

L'étude quantitative de l'emmagasinement possible par prolongement de 70,90 et 110 m de jetée a été effectuée sur modèle réduit. Mais les chiffres obtenus sont assez peu précis, les phénomènes étant très sensibles aux facteurs aléatoires propres au modèle.

Le modèle réduit de la Pointe des Galets et l'expérience de ces dernières années ont apporté également d'autres résultats en ce qui concerne en particulier les mouvements de ressac dans le port, et la tenue des jetées construites sur le terrain affouillable; mais ces résultats sortent du cadre de cet exposé.

Par contre, et ce résultat nous semble essentiel, le modèle réduit nous a prouvé que la connaissance des lois régissant les transports littoraux de matériaux et en particulier des lois de similitude est encore assez imprécise.

IV. — Définition d'un programme d'études générales

Les études sur modèle réduit, et les constatations relatives aux plages de la Réunion, ont montré l'intérêt qu'il peut y avoir à étendre à un domaine de granulométrie plus large l'étude systématique des côtes. Elles ont montré combien, pour les matériaux lourds, l'emplacement judicieux des fosses de dragages pouvait permettre de réduire les frais de ces dragages, et d'éviter l'engrèvement de points névralgiques tels que les passes d'entrée. Elle nous ont également montré qu'un processus de construction d'ouvrages admettant les affouillements pouvait être viable et permettre la construction d'ouvrages économiques et stables. Conformément aux conceptions actuelles, le modèle réduit a condamné l'idée de construction d'une jetée à paroi verticale par des fonds insuffisants et sur du matériau affouillable.

Mais les difficultés de l'étude nous ont amenés à souhaiter que des études systématiques à l'échelle du laboratoire viennent aider l'ingénieur lors de l'étude du phénomène naturel en lui offrant des bases de départ précises, et en lui permettant d'approcher de façon plus satisfaisante ces problèmes à l'aide du modèle réduit.

Parmi ces études systématiques, nous en citons quelques-unes de façon plus précise.

Il est important de connaître la variation des quantités transportées pendant l'unité de temps ou puissance de transport de la houle en fonction de l'angle α_0 entre la plage et la direction de la houle au large. Cette quantité dépend de la granulométrie des matériaux, du poids et de la forme des grains, de leur densité, de l'énergie de la houle, etc... Toutes choses égales par ailleurs, différentes formes de courbes $Q(\alpha_0)$ (variation de Q en fonction de α_0) ont été proposées.

En 1937, MUNCH-PETERSEN proposait une courbe de la forme ci-jointe (fig. 7), alors que d'autres auteurs (M. l'Ingénieur en chef PELNARD entre autres) proposaient une courbe se rapprochant de la courbe $Q = k \sin 2\alpha_0$. Cette dernière courbe ne peut être valable que si l'on considère l'angle de la vague au déferlement avec la côte α_1 et non l'angle de la vague au large α_0 . Pour une côte à ligne de niveau parallèle on peut admettre la relation de SUNN :

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_0} = \frac{C_1}{C_0} = \frac{L}{L_0}$$

ou en fonction de h_0 hauteur au déferlement :

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_0} = th \left(\frac{2\pi h_0}{L} \right)$$

Cette correction étant prise en compte, il importe de remarquer que la courbe de MUNCH-PETERSEN donne une influence prépondérante au transport par courant de houle. Cette courbe est donc particulièrement valable pour les sables. Au contraire, une courbe de la forme $k \sin 2\alpha_0$, néglige totalement l'effet du courant de houle.

FIG. 71

Expérience fondamentale permettant de déterminer la loi de variation du débit q de matériaux transportés par la houle, en fonction de l'angle d'incidence α (courbe de M. PELNARD-CONSIDÈRE).

FIG. 72

Relations entre $\sin \alpha_0$ et $\sin d_b$ pour différentes célérités (courbes de Per Bruun).

FIG. 73

Relations entre le débit solide de transport littoral et α_0 .

Signalons donc la mise en équation proposée par Per BRUUN pour la valeur :

$$(Q/Q') = a \sin \alpha_0 \cdot b \sin 2 \alpha_0 (*)$$

qui peut permettre, en fixant la valeur des paramètres a et b , de situer entre les valeurs extrêmes 45° et 90° , la valeur de α_0 correspondant au transport maximum Q' . Il serait particulièrement intéressant d'étudier la variation des paramètres a et b en fonction des différents facteurs qui influent sur le transport.

A la lumière de ces études, pourrait être précisée l'influence qu'ont, sur la puissance de transport, les facteurs aléatoires, c'est-à-dire dans la nature l'orientation variable de la houle, et l'étendue de la granulométrie, et sur le modèle toutes les erreurs inhérentes au modèle. On pourrait également préciser quelles sont les tolérances que l'on peut se donner pour les études en modèle réduit.

La détermination des seuils et valeurs critiques des débuts d'entraînement, de la grosseur limite des matériaux entraînés par une houle donnée, les puissances de transport maximum, tant dans la nature que sur le réel, sont extrêmement importantes. En particulier les lois de similitude, du transport maximum, ne sont sans doute pas celles des valeurs critiques et il peut y avoir là sujet à déboires lors de l'exploitation d'un modèle réduit.

L'étude systématique des forces d'arrachement dues à la houle, étude qui devrait d'ailleurs être liée à celle de l'étude de l'amortissement de la houle sur le fond, devrait permettre de préciser ces questions et en particulier les lois de similitude.

Pour obtenir une similitude convenable entre le réel et le modèle dans des problèmes de transport solide, il importe que le rapport des forces agissant sur les matériaux soit le même en nature et sur le modèle.

Les forces essentielles à prendre en compte, lors de l'étude du mouvement d'un matériau, sont :

- La pesanteur : proportionnelle à $g(\varphi_0 - 1)D^3$, qui agit et se trouve modifiée dans deux cas : dans la tendance à la décantation (influence de la viscosité sur la vitesse de chute et peut-être influences physico-chimiques : variation de température ou de salinité, pour les matériaux en suspension) et dans la résistance à l'arrachement (que l'on peut introduire par un coefficient de granulométrie et d'enchevêtrement);
- La force d'arrachement agissant sur le matériau peut s'écrire :

$$F_a = k T D^2$$

(*) Q' étant le transport maximum possible.

T étant l'action de la houle sur le fond par unité de surface.

D'après M. MICHE (*Propriétés des trains d'ondes océaniques*), l'amortissement d'une houle sur le fond, phénomène lié à sa réciproque, la force d'arrachement de la houle sur les matériaux constitutifs du fond (*) est donné par une loi de la forme $k u^n$, n étant un exposant compris entre 1 et 2, dont la valeur la plus acceptable semble être 1,75 (formule de BLASIUS). Mais après analyse du phénomène oscillatoire, M. MICHE admet une similitude de la forme $k u^{n+1}$ pour l'action moyenne.

- La force d'entraînement du matériau dans les courants, en particulier dans le courant de houle dû au déferlement (liée d'ailleurs aux réactions de sillage des grains) :

$$F_c = k V^m D^2$$

La complexité du système de force rend donc particulièrement délicate l'étude du problème du transport solide par l'action des houles, problème déjà fort compliqué pour le charriage en rivière. Certains auteurs ont essayé d'introduire la proportionnalité au facteur $V^3/(\varphi - \varphi_0)$, proportionnalité à $T^{3/2}/(\varphi - \varphi_0)$ obtenue par MEYER PETER pour le charriage en rivière. Ces recherches ont le mérite d'introduire l'influence des courants de houle et des forces d'arrachement, mais ceci d'une façon globale à partir de l'expérimentation en courant uniforme, alors que dans le cas qui nous intéresse la force d'arrachement est essentiellement oscillatoire, et les courants de transport quasi indépendants des phénomènes produisant l'arrachement. Suivant les domaines de granulométrie et de densité où l'on peut se trouver, il sera donc nécessaire de choisir les actions prépondérantes et de vérifier qu'à l'échelle du modèle, ces mêmes actions restent prépondérantes. (Le critère de la forme des plages pourrait être utilisé.)

De toute façon, le matériau choisi obéira à une loi de débit qui lui sera propre et que, dans le cadre des connaissances actuelles, seule l'expérimentation permettra de fixer.

Les variations de ces forces dans la zone du déferlement présentent un intérêt de premier ordre. Pour approfondir notre connaissance générale de l'action de la houle, il reste encore à effectuer des mesures de courants de houle dus au déferlement tant dans la nature que sur modèle, l'étude des lois de similitude de ce phénomène et la recherche des valeurs critiques.

Si l'étude de l'action des épis ou des ouvrages sur les plages soumis au transport littoral est

(*) Tout au moins pour les valeurs critiques.

déjà fort engagée par les travaux anciens, il serait utile de la compléter par la détermination des capacités d'emménagement de ces ouvrages, de la facilité d'érosion à l'aval des ouvrages, de la rapidité du rétablissement du transport primitif au droit de l'ouvrage, autrement dit transformer notre connaissance qualitative du problème en une connaissance quantitative.

L'étude précise des valeurs critiques à partir desquelles se produisent les transports et leurs lois de similitude semble être d'une importance

capitale. C'est un des mérites du mémoire de GILBERT d'avoir introduit ces valeurs critiques dans les études du charriage fluvial. La détermination de la puissance de transport de la houle reproduite en laboratoire est un des paramètres sur lesquels on peut jouer pour obtenir la similitude des valeurs critiques.

Nous souhaitons que les études en cours dans les divers laboratoires et même des séries d'études systématiques apportent à l'ingénieur une connaissance plus précise de ces problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- BAGNOLD. — Beach formation by waves; some model-experiments in a Wave Tank.
Journal of the Institution of Civil Engineers, n° 1, 1940-41, novembre 1940.
- BASCOM. — The relationship between sand size and beach-face profile.
T.A.G.U., décembre 1951.
- BEACH EROSION BOARD. — Shore protection planning and design.
Technical Report, n° 4, juin 1954.
- EINSTEIN. — Transport des sables déplacés par les vagues.
T.A.G.U., octobre 1948.
- IRIBAREN. — Etude des transports de sable causés par la houle.
Annales des Ponts et Chaussées, janvier-février 1949.
- KRUMBEIN et OHSIEK. — Transport pulsatoire du sable par les phénomènes côtiers.
T.A.G.U., avril 1950.
- MASON. — Erosion et protection des côtes.
The Dock and Harbour Authority, novembre 1949.
- MEYER-PETER. — Formulas for bed-load transport.
2° Congrès de l'A.I.R.H., Stockholm, 1948.
- Quelques problèmes concernant le charriage des matières solides dans les rivières alpines.
Journées de l'hydraulique, Chatou, juin 1949.
- MINIKIN. — Enquête sur la stabilité des rivages.
Dock and Harbour Authority, janvier 1949.
- Principes fondamentaux de l'érosion des côtes.
Coastal Engineering, septembre 1954.
- MUNCH-PETERSEN. — A littoral drift formula.
Bulletin of the B.E.B., octobre 1950.
- PER BRUUN. — Ondes de sable migratrices. Dunes de sable, *Coastal Engineering*, Grenoble, septembre 1954.
- Coast stability.
Proceedings of the 3rd Conference on Coastal Engineering, 1953.
- RIVIÈRE. — Sur la sédimentation vaseuse au large des côtes.
C.R.A.S., t. 232, n° 16, 16 avril 1951.
- Sur l'inversion temporaire de l'évolution des côtes basses en cours de sédimentation.
C.R.A.S., 31 janvier 1949.
- Sur la formation des rides sous-marines littorales.
C.R.A.S., 1949, t. 229.
- Certains aspects de la morphologie littorale des plages et leur interprétation.
- SAUVAGE DE SAINT-MARC et VINCENT. — Transport littoral. Formation des flèches et tombolos.
Coastal Engineering, Grenoble, 1954.
- SVENDSEN. — La formule de Munch-Petersen sur le charriage littoral.
Bulletin of the B.E.B., vol. 4, octobre 1950, pp. 1-31.
- WYRTKI. — Le bilan du transport de matériaux le long de la côte dans la zone de déferlement.
Deutsche Hydrographische Zeitschrift, vol. 6, n° 2, 1953, pp. 65-76.

DISCUSSION

Président : M. LAVAL.

M. RIVIÈRE se déclare très intéressé par cette communication et remarque que, les galets basaltiques se démolissant très rapidement, tout procédé pour les écarter ne peut que freiner leur arrivée au port.

M. PELNARD-CONSIDÈRE rappelle qu'en 1875, lors de la construction du port, on n'a réussi à arrêter les galets que temporairement, car ils ont débordé le musoir de la jetée Sud au bout de 3 ans. Or, la solution envisagée par M. LHERMITTE est analogue à celle adoptée, en 1875 (avec cependant une jetée Sud plus longue de 50 %) ce qui n'a pas donné satisfaction.

M. RIVIÈRE n'est pas tout à fait de l'avis des auteurs, au point de vue de l'importance relative des courants de densité : sur les plages de la Méditerranée par mer calme, comportant des galets sur une assez grande

dénivellation, seuls les sédiments sableux sont transportés par le déferlement, en bandes assez étroites (dents de scie).

M. LHERMITTE souligne l'importance de la formation des flèches avec un angle de 25° qu'il a observée sur sur modèles réduits, mais jamais sur les côtes raides de la Réunion, et qui l'a amené à penser que, sur le modèle, on avait affaire à un transport par courant littoral.

M. PELNARD estime, contrairement à l'opinion émise par M. LHERMITTE, que les flèches se forment quand il y a des galets aussi bien et même mieux qu'avec du sable.

M. SCHLIF signale l'existence de flèches de gravier en Angleterre.

M. RIVIÈRE croit qu'il est difficile de séparer les phénomènes dans la nature : dans le transport en dents de scie, ce n'est pas toute la masse qui est remuée par les vagues déferlantes, mais celle-ci se déplace avec le courant de houle qui, par forte mer, va très loin au large; mais il y a, en dehors du transport en dents de scie, des transports massifs plus bas, qui sont plus considérables. Le courant de vagues agit sur les galets, mais seulement après qu'ils ont été mis en mouvement par le déferlement.

M. LHERMITTE remarque que le transport en dents de scie est très limité car on trouve des galets couverts de mousse à une certaine profondeur dans l'axe du canal.

M. RIVIÈRE rappelle que ces galets peuvent n'avoir pas été remués depuis trois ou quatre mois, par beau temps; c'est une conséquence d'un phénomène de dispersion analogue à celui dont M. RIVIÈRE a parlé tout à l'heure pour les sables.

M. LHERMITTE pense que, pour les sables, la dispersion semble assez bien s'expliquer si on admet l'intervention de la turbulence dont l'effet peut être sensible, jusqu'à des profondeurs de 30 m. Pour les galets, ce n'est pas tout à fait la même chose, mais il faut déterminer lequel des deux phénomènes — courant littoral ou courant en dents de scie — est le plus important.

En réponse à une question posée par un membre de l'assistance, M. LHERMITTE rappelle que MUNK-PETERSEN a donné en 1937 une expression du débit Q à travers une perpendiculaire à la plage en fonction de $\sin \alpha$, α étant l'angle de la ligne des rouleaux de déferlement avec la côte; suivant cette expression, le débit Q est maximum lorsque la ligne des rouleaux est perpendiculaire à la côte, alors que d'autres auteurs expriment le débit en fonction de 2α , ce qui place le maximum dans le cas où cette ligne est inclinée à 45° sur la côte. En prenant la formule :

$$Q = a \sin \alpha + b \sin 2\alpha$$

a/b caractérise l'action de la mer et il semble que le débit peut être déterminé suivant l'action du courant de houle et que la courbe $Q(\alpha)$ pourrait être considérée avec intérêt en la rapportant à son maximum $Q \sin 2\alpha$.

Interrogé sur les raisons qui ont poussé les Ingénieurs du Laboratoire à choisir, pour le modèle du port des Galets, la similitude de Froude, M. LHERMITTE répond qu'il fait, pour sa part, certaines réserves à ce sujet.

M. PELNARD objecte que M. NIZERY estimait, toutefois, que, quand l'application de la similitude de Froude à des matériaux de dimensions très importantes « in situ » aboutit à des granulométries de l'ordre du millimètre sur le modèle, il faut respecter cette dimension, comme il l'avait fait pour l'étude du débit solide dans les fleuves.

M. DEVIMEUX rappelle que la similitude de Froude est inapplicable à une échelle de l'ordre de $1/200$, car les

courants de houles sont affectés par un effet d'échelle sensible. Par ailleurs, les forces de viscosité exercées par le fluide sur le matériau solide sont proportionnellement d'autant plus importantes que l'échelle est plus petite.

En définitive, M. DEVIMEUX pense qu'il y a lieu de compenser l'influence de l'échelle par une augmentation du diamètre du matériau à poids spécifique égal, compte non tenu de l'augmentation de diamètre résultant, par ailleurs, d'une réduction éventuelle du poids spécifique quand on passe du réel au modèle.

M. PELNARD remarque que le point de vue de M. DEVIMEUX diffère sensiblement de celui de M. LHERMITTE.

M. LHERMITTE estime que la similitude de Froude est basée sur la proportionnalité entre les forces : donc les essais sur modèles ne sont valables que si cette proportionnalité est respectée.

M. le Président pense que le problème est complexe et que la controverse qui en fait l'objet ne pourra être aplanie que par les résultats de nombreuses expériences qui permettront, à l'occasion de nouvelles formes dont l'histoire est connue, de préciser la formule de similitude et de codifier les essais sur modèles.

M. PELNARD estime qu'avec toute solution où l'on se contenterait de draguer entre les jetées, et après franchissement du musoir par les galets, soit au bout de quelques années, un arrêt de dragage dû à une cause quelconque entraînerait une fermeture du chenal d'accès en quelques mois.

On éviterait cet inconvénient grave en enlevant les matériaux sur la plage avant que ceux-ci n'abordent le port.

M. LHERMITTE rappelle que, selon M. RIVIÈRE les transports solides au-dessous de zéro sont toutefois, très importants.

M. RIVIÈRE indique qu'il a vu une plage se dérober parce qu'on avait pris du sable à la pelle preneuse au-dessous du niveau zéro en dehors de cette plage.

M. LHERMITTE pense que ce résultat est dû aux transports en dents de scie et que l'on pourrait l'éviter si l'on pouvait faire remonter les galets mis en mouvement par ce transport.

M. PELNARD expose comme suit son point de vue sur cette question :

Le profil de la plage depuis le point le plus haut atteint par les vagues de tempête jusqu'à quelques mètres au-dessous du zéro est pratiquement indéformable et ne peut que se déplacer horizontalement d'un seul bloc (du moins pour une houle donnée, car il y a des variations saisonnières du profil dues aux variations des caractéristiques de la houle). Un recul imposé à la partie haute du profil, au-dessus du zéro, entraîne un recul presque immédiat de la partie basse. Ce recul se répercute ensuite, quoique plus lentement, sur quelques mètres encore de profondeur, jusqu'à la limite d'agitation des matériaux.