

Chapter 22

TRANSPORT LITTORAL FORMATION DE FLECHES ET DE TOMBOLOS

M. G. SAUVAGE DE SAINT MARC - Directeur Adjoint du Laboratoire
Dauphinois d'Hydraulique à Grenoble

et

M. G. VINCENT - Ingénieur au Laboratoire Dauphinois
d'Hydraulique à Grenoble

INTRODUCTION

L'importance de cette question du transport littoral dans les problèmes *de la technique maritime*, nous a conduits, après d'ailleurs beaucoup d'autres auteurs, à étudier le mécanisme de ces phénomènes de transport et à présenter à ce 5^e congrès du "COSTAL ENGINEERING" les premiers résultats de notre étude encore en cours.

Certes c'est une banalité d'affirmer qu'en l'absence de courants marins il ne saurait exister de mouvement des matériaux le long d'un rivage. Mais en revanche jugera-t'on peut-être surprenant d'ajouter que ces courants marins ne sont généralement pas capables d'engendrer seuls le transport d'un sable d'une plage. La raison en est simple: avant d'être véhiculé d'un point à un autre de la côte, le matériau de cette plage doit être arraché du fond. Ce rôle d'agitateur et de mise en suspension est rempli le plus souvent par la houle, principalement dans la zone à forte turbulence créée par son déferlement. Cette zone limite une bande relativement étroite le long du rivage, siège des mouvements littoraux de beaucoup les plus importants.

En raison donc du rôle essentiel joué par le déferlement dans cette question, nous avons limité notre exposé à l'étude de l'action de la houle et des courants, qu'elle engendre, sur le transport des matériaux le long d'une côte.

Une telle étude comprend nécessairement, à son origine, une observation attentive. Or le coût élevé et les difficultés techniques des observations en nature ont conduit les chercheurs à essayer d'aborder l'étude par l'expérience sur modèle. C'est cette dernière méthode que nous avons suivie : elle ne reproduit pas évidemment les phénomènes de la nature dans toute leur complexité, elle accepte obligatoirement certaines schématisations ; mais elle n'en reste pas moins un moyen d'investigation particulièrement fructueux et souvent un outil de travail efficace pour résoudre des problèmes pratiques. Deux exemples

présentés en fin de communication apporteront la preuve de ce que nous avançons ici.

A - LE TRANSPORT LITTORAL SOUS L'ACTION DE LA HOULE -

I - GENERALITES -

Lorsqu'une houle arrive obliquement sur une plage, l'observateur, même non averti, voit nettement une lame déferlante labourer cette plage mettant en mouvement les grains de sable qui sont ensuite aisément entraînés par un courant quelconque.

Parmi le grand nombre de courants marins, deux d'entre eux engendrés par le déferlement oblique de la houle vont jouer un rôle tout particulier dans ces transports littoraux ; ce sont le "jet de rive" et le "longshore current". Le premier se décompose en deux mouvements successifs : un mouvement de flux oblique par rapport à la plage qui est à proprement parler le jet de rive, et un mouvement de reflux suivant les lignes de plus grande pente de la plage qui constitue le flot de retour. Il présente donc un caractère pulsatoire très marqué ; c'est lui qui impose un parcours en feston des matériaux, désigné couramment sous le nom de "*Beach drifting*" dénomination proposée par M. D. W. Johnson (a).

Le deuxième courant est désigné communément sous le vocable américain de "longshore current", il se produit en pleine eau, entre l'estran et la ligne de déferlement ; il est en moyenne dirigé parallèlement au rivage, car il n'est pas absolument régulier, mais ses pulsations restent assez faibles.

Entre ces deux natures de courants la délimitation n'est pas très nette et l'on peut même considérer le "*Beach drifting*" comme le bord extrême du "longshore current".

Précisons bien cependant que ces deux courants s'ils jouent un rôle très important dans les transports littoraux ne sont pas les seuls à intervenir. Citons par exemple le courant "d'expansion latérale" conséquence de la décroissance progressive de l'amplitude de la houle, le long d'un rivage, décroissance engendrée soit par réfraction sur le fond, soit par diffraction. Nous aurons d'ailleurs à reparler de ce dernier courant lors de l'étude des formations des flèches ou des tombolos.

Pour l'instant nous nous bornons à étudier un cas certes idéal, mais il nous paraît indispensable de commencer ainsi pour mieux analyser l'influence de différents facteurs sur le transport littoral. Nous précisons donc que nous avons fait nos premières expériences dans un bassin à fond plat sauf évidemment dans la partie constituant la plage ;

nous supposons l'absence de marée ; une houle régulière arrive obliquement sur un rivage rectiligne et engendre ainsi un mouvement des matériaux de ce rivage.

Disons tout de suite que les observations faites sur notre bassin d'études de plage conduisent à des résultats conformes à ceux trouvés par T. SAVILLE (b) J.W. JOHNSON (c) KRUMBEIM (d) et d'autres auteurs américains, à savoir : pour des houles faiblement cambrées, le transport littoral se fait plus particulièrement par charriage dans la partie supérieure de la plage (par les houles dites de beau-temps) alors que le transport littoral par suspension est plus abondant au sein même du déferlement, à fortiori si celui-ci est plus "concentré", déferlement du type "plunging breaker", par exemple, propre aux houles relativement cambrées. En fait l'allure du déferlement, c'est-à-dire pour une plage donnée, la cambrure de la houle semble jouer un rôle déterminant sur le mode et l'intensité du transport solide littoral.

II - INTENSITE DU TRANSPORT LITTORAL SOUS L'ACTION DES COURANTS DUS AU DEFERLEMENT DE LA HOULE -

Les différents chercheurs, qui ont abordé ce problème, reconnaissent tous l'influence de certains facteurs principaux : les caractéristiques de la houle incidente (amplitude, longueur d'onde), l'inclinaison des crêtes déferlantes par rapport à la direction générale du rivage, les caractéristiques des matériaux (granulométrie, densité..) et également l'allure locale du littoral. Mais les résultats restent encore incomplets, aussi avons nous essayé d'apporter un début de complément à leurs différentes investigations.

Nous nous sommes donc proposés d'étudier, pour un matériau donné, l'influence sur l'intensité du débit solide littoral des facteurs suivants : longueur d'onde de la houle, amplitude, inclinaison des crêtes déferlantes sur le rivage, puis d'aborder l'étude de l'influence des caractéristiques du matériau.

Pour ces essais nous opérions de deux manières distinctes selon l'importance de l'inclinaison des crêtes de vagues sur le rivage (fig. 1):

1) pour les faibles inclinaisons nous déterminions quel était le débit solide à introduire à la limite amont d'un rivage rectiligne d'inclinaison donnée pour conserver un régime d'équilibre le long de celui-ci. En régime établi le débit solide introduit était alors considéré comme égal au débit littoral. L'opération était reprise pour différentes inclinaisons, celle-ci étant au cours d'un essai le seul paramètre.

2) pour les fortes inclinaisons, le débit solide était fixé a priori égal à une valeur raisonnable et maintenu constant, un certain

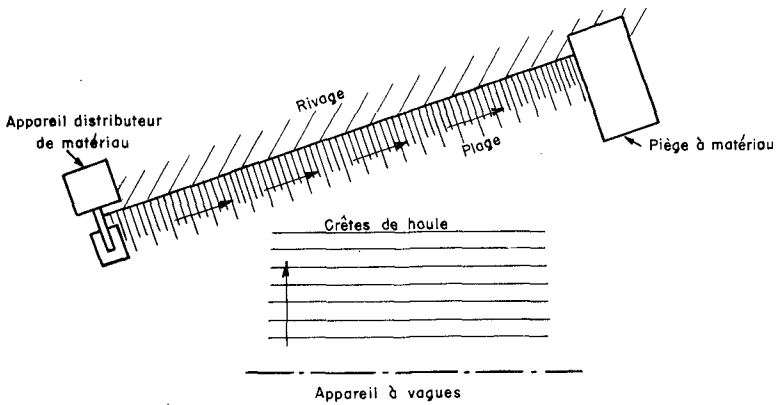


Fig. 1. Mesure de l'intensité du transport littoral : dispositif expérimental.

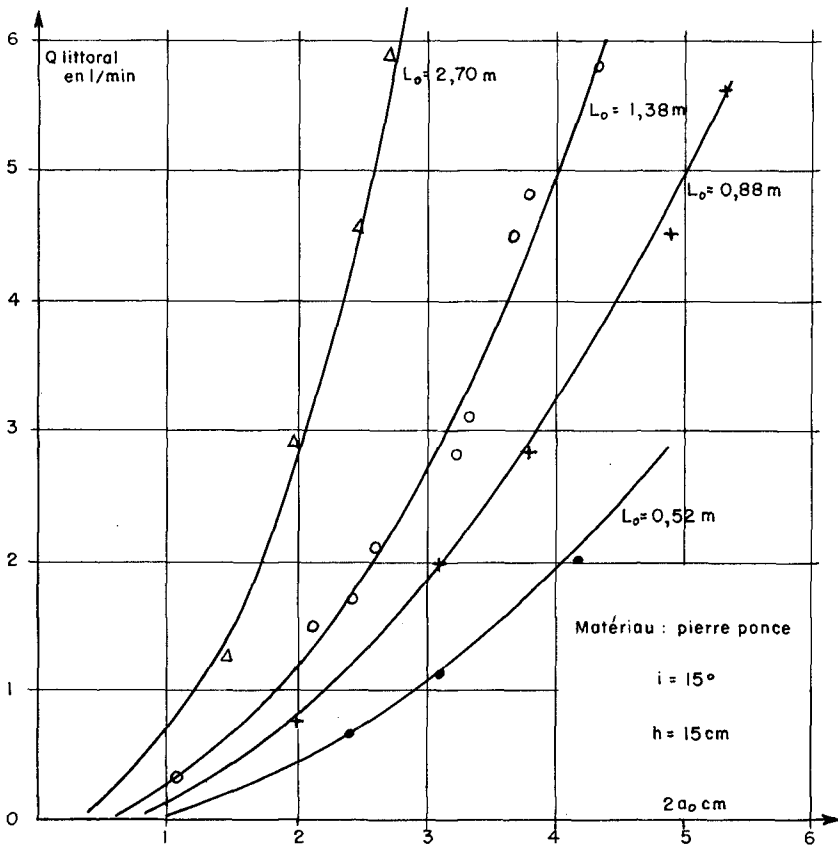


Fig. 2. Débit solide littoral rapportée aux caractéristiques de la houle en eau profonde, l'inclinaison des crêtes de houle sur le rivage ainsi que la profondeur étant constantes.

régime de transport s'établissait le long du rivage formé ; lorsque son inclinaison demeurait inchangée, celle-ci était notée.

Première série d'essais -

Au cours de cette première série d'essais nous nous sommes proposés d'étudier l'influence de l'amplitude de la houle, de la longueur d'onde et de la nature du matériau sur l'intensité du transport littoral : l'inclinaison des crêtes déferlantes sur le rivage était maintenue constante, égale à 15° - la profondeur d'eau était également maintenue constante, égale à 15 cm.

Le matériau principal utilisé était de la pierre ponce de granulométrie moyenne 1,5 mm. et de densité moyenne 1,4 environ.

a - Influence de l'amplitude de la houle -

Les valeurs de l'intensité du transport littoral mesurées au cours des essais ont été rapportées aux caractéristiques de la houle en eau profonde ; en effet, en supposant la conservation du débit d'énergie entre deux orthogonales du réseau des crêtes de houle, on peut relier l'amplitude $2a$ et la longueur d'onde L à $2a_0$ et L_0 , caractéristiques en eau profonde.

C'est ainsi que nous avons tracé (fig. 2) le graphique traduisant la variation de l'intensité du débit solide littoral q_{litt} en litres par minute en fonction de l'amplitude $2a_0$ de la houle pour 4 valeurs de la longueur d'onde L_0 . Les caractéristiques de la houle ont été respectivement : pour L_0 : 0,52 m. - 0,88 m. - 1,38 m. - et 2,72 m. ; les valeurs de $2a_0$ s'échelonnaient entre 1 et 5 cm.

Afin d'essayer d'exprimer ces résultats expérimentaux par une relation empirique simple, la courbe expérimentale obtenue a été assimilée à une parabole dont le degré a été déterminé en traduisant les résultats expérimentaux en coordonnées logarithmiques (fig. 3).

On remarquera d'après ce graphique que le transport littoral commence par une certaine valeur de $2a_0$, cette valeur remarquable paraît être, pour un matériau donné également fonction de L_0 .

Les points expérimentaux portés sur le diagramme de la fig. 3 se placent bien sur une droite de pente 2. Il semble ainsi que le débit solide littoral peut, dans le domaine expérimenté, s'exprimer en fonction de l'amplitude $2a_0$ de la houle en eau profonde par une relation de la forme :

$$q_{litt} \sim (2a_0)^2$$

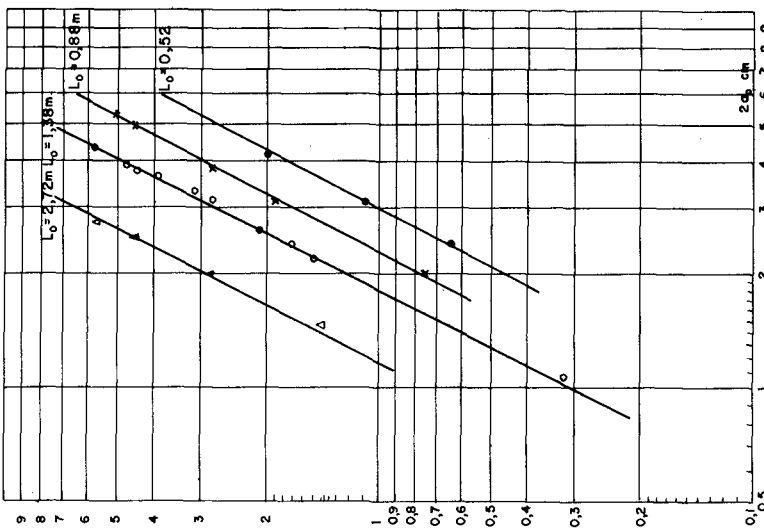


Fig. 3. Variation du débit solide littoral avec l'amplitude en eau profonde ($2 a_0$).

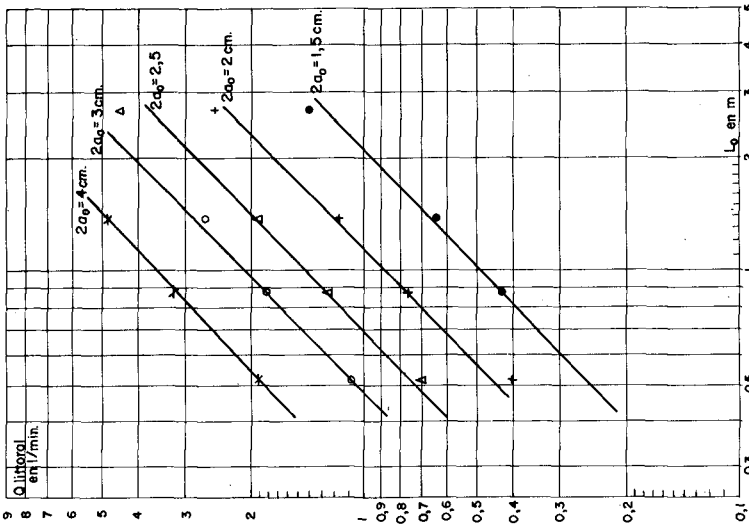


Fig. 4. Variation du débit solide littoral avec la longueur d'onde en eau profonde (L_0).

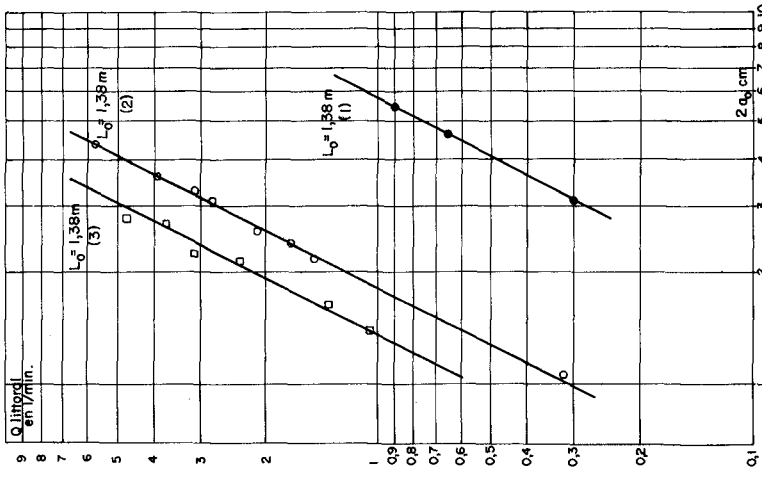


Fig. 5. Variation du débit solide littoral avec la nature du matériau de la plage.

b - Influence de la longueur d'onde

De même les points expérimentaux traduisant la variation du débit solide littoral en fonction de la longueur d'onde en eau profonde L_0 pour différentes valeurs de l'amplitude $2 a_0$ (fig. 4) se placent, assez correctement dans le domaine de nos expériences, sur une droite de pente unité.

Il semble ainsi que le débit solide littoral puisse s'exprimer en fonction de $2 a_0$ et de L_0 par une expression de la forme :

$$Q_{litt} \sim (2 a_0)^2 L_0$$

Ainsi il apparaît de ces premiers résultats de l'étude expérimentale que l'intensité du débit solide littoral, le long d'un rivage rectiligne constitué d'un matériau homogène et soumis à l'action d'une houle à caractère permanent dont la crête présenterait une inclinaison constante par rapport à la direction générale de celui-ci, serait directement proportionnelle à l'énergie contenue dans une longueur d'onde de la houle en eau profonde.

Il est intéressant de noter que cette expression est voisine de celle proposée par les ingénieurs du *Beach Erosion Board*.

Néanmoins présentée sur cette forme, la relation exprimant l'intensité du transport littoral risque de perdre une partie de son intérêt étant donné la difficulté matérielle qu'il y a en réalité à apprécier les caractéristiques de la houle en eau profonde.

Il peut y avoir intérêt à exprimer Q_{litt} en fonction des caractéristiques de la houle près du rivage, pour ce faire on rappellera, selon les hypothèses précisées précédemment, que sur la profondeur h on a en première approximation :

$$L_0 = \frac{L}{\operatorname{th} \frac{2 \pi h}{L}} ; (2 a_0)^2 = (2 a)^2 \operatorname{th} \frac{2 \pi h}{L} \left(1 + \frac{4 \pi h/L}{\operatorname{sh} \frac{4 \pi h}{L}} \right)$$

soit

$$Q_{litt} \sim (2 a)^2 L \left(1 + \frac{\frac{4 \pi h}{L}}{\operatorname{th} \frac{4 \pi h}{L}} \right)$$

Expression qui, avec une approximation suffisante pour l'usage pratique, peut être simplifiée pour les valeurs très faibles de la

profondeur relative $\frac{h}{L}$; pour celles-ci on peut en effet admettre

$$\frac{4}{L} \frac{\pi h}{L} \approx th \frac{4}{L} \frac{h}{L} \text{ et } L = T \sqrt{gh}.$$

L'expression du débit solide littoral s'écrit donc finalement

$$Q_{litt} \sim (2 a)^2 T$$

Nous remarquerons là encore que cette relation est voisine de celle proposée par les ingénieurs du Laboratoire de DELFT. (LAVAL, Cours de Travaux Maritimes).

c - Influence de la cambrure de la houle sur le débit solide littoral -

Il nous est apparu intéressant de comparer nos résultats expérimentaux avec ceux obtenus par T. SAVILLE (b) et J.W. JOHNSON (c). Pour ce faire nous avons tracé (fig. 6) les courbes q_{litt} en fonction de γ (cambrure) à énergie constante et à égalité d'inclinaison des crêtes de houle, à partir des résultats obtenus au cours de nos essais.

Il est intéressant de noter, selon ces résultats, que, dans le domaine expérimenté et pour une houle d'énergie donnée q_{litt} varie en raison inverse de la cambrure. Néanmoins pour des valeurs très faibles de la cambrure, le débit littoral est nul ou presque nul.

Si l'on admet (comme cela paraît naturel) que la variation $q(\gamma)$ est continue on conçoit aisément que la loi $q(\gamma)$ passe par un maximum.

Le débit littoral serait donc pour une inclinaison des crêtes déferlantes sur le virage de la forme

$$q_{litt} = (2 a_0)^2 L_0 f(\gamma, \text{matériau})$$

la fonction f affecterait pour les matériaux étudiés sur notre modèle l'allure représentée sur la fig. 7. Le maximum du débit littoral, serait d'ailleurs fonction de l'énergie de la houle au large.

Pour essayer de comprendre l'allure de ces courbes, il faudrait porter son attention sur le mécanisme même du déferlement ainsi que sur sa position par rapport à l'estran en fonction de la cambrure de la houle afin de déterminer la portion d'énergie restant disponible après déferlement pour engendrer le transport littoral. Cette étude reste quantitativement très délicate; un examen qualitatif permet cependant de ne pas trouver surprenante l'allure des courbes de la figure 7.

Les points expérimentaux obtenus au cours de nos essais semblent indiquer que les valeurs remarquables de la cambrure pour

laquelle se produit un maximum relatif de q_{litt} sont relativement faibles. En fait la comparaison des deux séries de résultats expérimentaux obtenus les uns avec du sable (SAVILLE et JOHNSON), les autres avec de la pierre ponce n'est pas aisée. Il est en effet vraisemblable, en particulier pour les faibles cambrures, que les proportions entre les quantités de matériau transportées par charriage et par suspension soient assez différentes pour les deux matériaux.

Nous avons indiqué sur le schéma fig. 8, la proportion apparente de matériau transporté par charriage et par suspension, pour la pierre ponce et pour les conditions d'essai. Il est probable que pour le sable utilisé par MM. SAVILLE et JOHNSON les courbes correspondantes soient, à égalité d'énergie, étalées vers des valeurs de γ plus importantes, de telle manière que les valeurs de $\gamma_q = q_{max}$ soient sensiblement les mêmes que celles pour lesquelles il se produit un changement caractérisé du type de déferlement.

Il résulterait donc de nos résultats, quoique légèrement différents de ceux de MM. SAVILLE et JOHNSON, qu'à égalité d'énergie et à égalité d'inclinaison des crêtes déferlantes sur le rivage, les houles de faibles cambrures seraient susceptibles de transporter de plus grandes quantités de matériaux le long d'un rivage. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que les houles peu cambrées, généralement longues, sont bien souvent celles qui se réfractent le plus en abordant le rivage et dont, par conséquent, les crêtes sont souvent faiblement inclinées sur le rivage.

Etant donné l'importance que prend l'inclinaison des crêtes déferlantes sur le transport littoral il pourrait être erroné de dire que généralement, à égalité d'énergie, les houles faiblement cambrées sont à l'origine d'un transport littoral plus intense ; aussi faut-il ajouter à égalité d'inclinaison de leurs crêtes déferlantes sur le rivage.

Il est intéressant de noter que, corrélativement, ce maximum relatif de transport littoral s'effectuera généralement sur des plages à pente relativement forte étant donné précisément que, pour un matériau donné, l'action de houles faiblement cambrées entraînera assez rapidement de telles pentes.

c - Influence de la nature du matériau -

Les essais expérimentaux répétés pour trois matériaux (1) (2) (3), respectivement de densité moyenne 2,6 - 1,4 - 1,1 et de granulométrie moyenne 0,5 mm., 1,5 mm., 1 mm., ont permis de rendre compte de l'influence de la nature des matériaux.

Les résultats obtenus sont encore très incomplets pour que nous ayons pu mettre en évidence l'influence des diverses caractéristiques

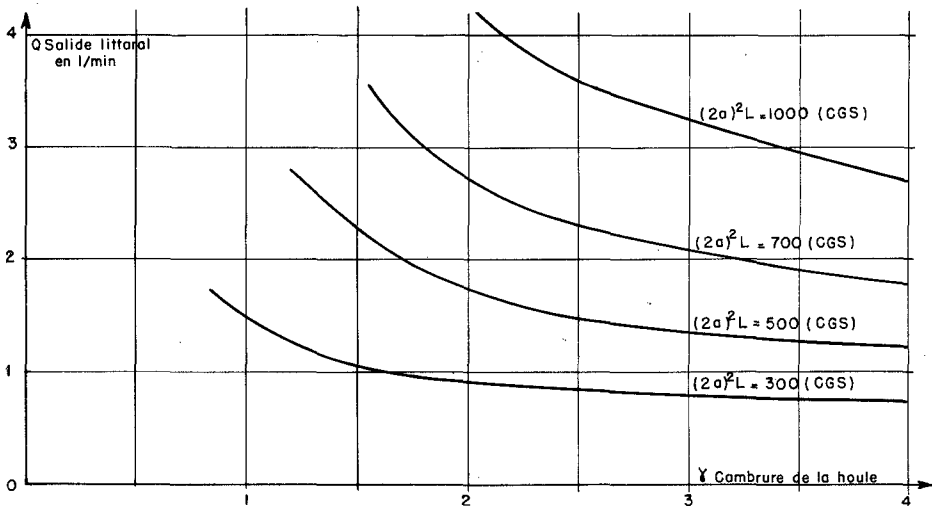


Fig. 6. Influence de la cambrure de la houle près du rivage sur le débit solide littoral.

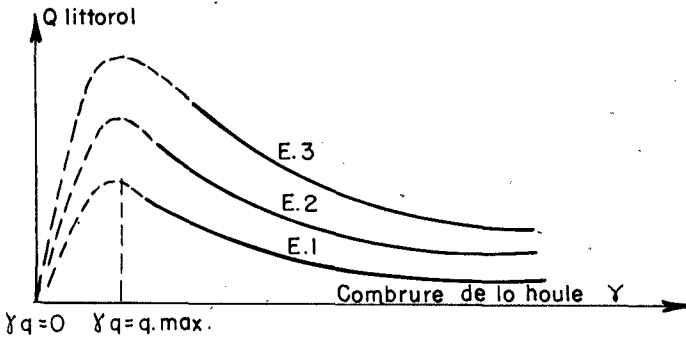


Fig. 7. Influence de la cambrure de la houle près du rivage sur le débit solide littoral.

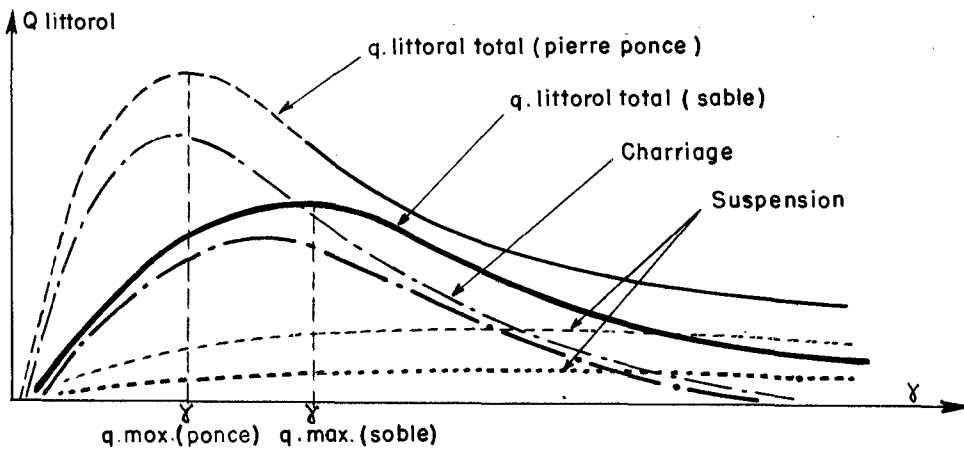


Fig. 8. Influence de la cambrure de la houle près du rivage sur le débit solide littoral.

des matériaux : densité, granulométrie, forme des grains... ; néanmoins les points expérimentaux portés sur le graphique (fig. 5) permettent de tirer certaines conclusions valables dans le domaine expérimenté :

1 - L'allure de la fonction $q_{\text{litt}} = f(2 a_0, L_0)$ semble rester la même quel que soit le matériau.

2 - Le débit solide du matériau (2) est sensiblement 10 fois plus intense que celui du matériau (1) alors que le débit solide du matériau (3) l'est environ 18 fois.

Enfin si l'on réfléchit à l'importance du rôle joué par le déferlement dans cette question de transport des matériaux, on peut penser que le matériau d'une plage peut également agir d'une façon indirecte sur l'intensité du débit littoral ; en effet suivant sa pente d'équilibre sous l'action d'une houle oblique le point de déferlement varie et par là le débit solide également.

Deuxième série d'essais -

e - Influence de l'inclinaison (i) des crêtes déferlantes par rapport au rivage sur l'intensité du transport littoral -

Les résultats les plus caractéristiques trouvés au cours de nos premiers essais ont été indiqués (fig. 9) dans le système de coordonnées polaires (courbes $Q_{\text{sol. litt.}}(i)$). Pour ces essais, la profondeur d'eau était toujours 15 cm. et les caractéristiques de la houle, pour la courbe 1 ($2 a_0 = 2,6$ cm., $L_0 = 1,38$ m.), pour la courbe 2 ($2 a_0 = 3,7$ cm. $L_0 = 1,38$ m.).

Nous remarquerons la dissymétrie des courbes par rapport à la valeur remarquable de l'inclinaison i_r , pour laquelle le débit solide littoral est maximum. Cette inclinaison remarquable est, pour les conditions d'essais, voisine de 53° .

Pour les valeurs de l'inclinaison comprises entre 90° et i_r , $\frac{\partial Q_{\text{sol. litt.}}}{\partial i}$ est relativement plus important que dans le domaine des valeurs de i comprises entre 0 et i_r ; en particulier pour les valeurs de i telles que $20^\circ < i < i_r$, le gradient de variation du débit solide littoral est relativement faible.

Cette influence de l'obliquité des vagues sur le transport littoral a été remarquée par plusieurs auteurs, MM. BLOSSET et PELNARD-CONSIDERE (e) ont été à notre connaissance, les premiers à donner quelques précisions sur ce sujet.

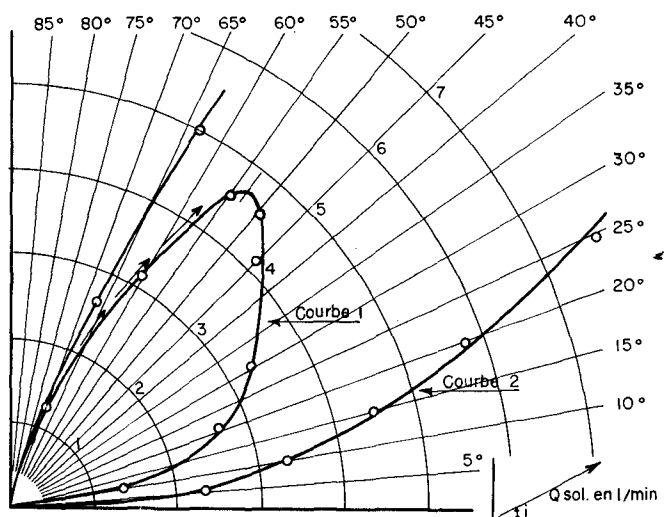


Fig. 9. Influence de l'inclinaison des crêtes de houle près du rivage sur le débit solide littoral.

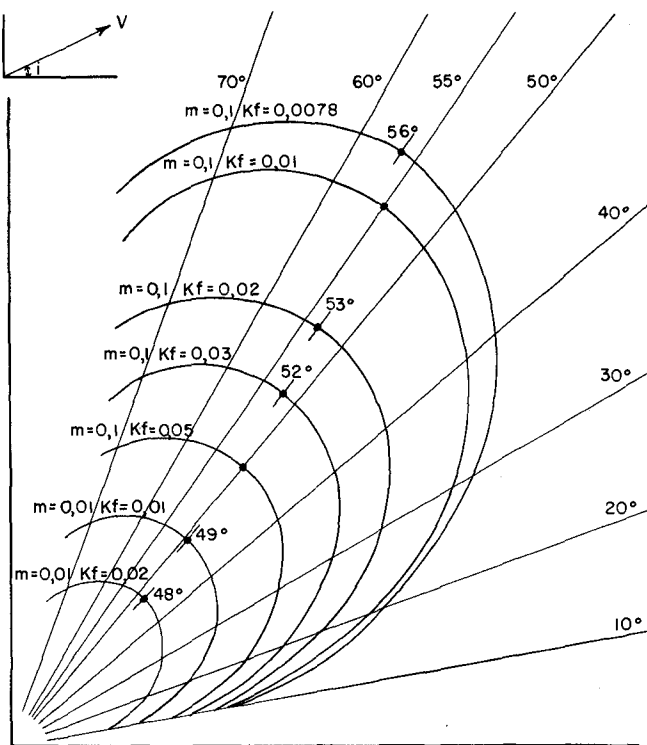


Fig. 10. Influence de l'inclinaison des crêtes de houle près du rivage sur l'intensité du "longshore current" d'après l'expression de MM. PUTNAM, MUNK et TRAYLOR.

Les résultats donnés par ces auteurs, d'après des expériences qui ont été faites au Laboratoire de DELFT, mettent en évidence une augmentation du transport solide avec l'inclinaison des crêtes de houle sur le rivage, passant par un maximum pour 65° dans les conditions de leur étude. Au-delà de cette inclinaison le transport solide décroît ou plutôt la situation serait instable en ce sens que la moindre saillie du rivage donnerait naissance à une flèche de sable inclinée à 65° par rapport aux crêtes de houle.

Le fait que les auteurs cités aient indiqué pour la valeur remarquable de l'inclinaison à laquelle correspond un maximum de débit solide littoral un chiffre légèrement différent de celui trouvé au cours de nos essais n'est pas en lui-même inquiétant; la différence provient probablement de la direction retenue pour les crêtes de lame, généralement variable du large vers le rivage par suite de la réfraction si le fond n'est pas horizontal ce qui n'était pas le cas pour nos essais.

Nous concluons en indiquant que pour les valeurs de $i > i_r$ l'équilibre est particulièrement instable, par contre lorsque les crêtes de houle sont relativement peu inclinées sur la direction générale du rivage, l'équilibre est plus stable, la meilleure stabilité correspondant aux valeurs de i voisines de i_r .

Il peut paraître intéressant de rattacher la notion de transport littoral à celle de courant littoral.

Dans la première partie de cet exposé nous avons vu que le transport littoral global était essentiellement l'oeuvre d'un courant littoral de déferlement agissant dans un milieu généralement très turbulent.

Par analogie à ce qui se passe dans un écoulement en rivière, par exemple, où l'on connaît assez bien le rôle que joue la vitesse moyenne de l'écoulement sur le transport solide il paraît particulièrement utile, chaque fois que l'occasion se présente, d'essayer de lier le transport littoral au courant littoral.

Il est à ce sujet un fait remarquable à noter c'est la coïncidence que l'on peut constater entre la valeur de l'inclinaison trouvée au cours de nos essais pour le maximum de débit solide littoral et les valeurs que l'on peut obtenir pour le maximum du "longshore current" à partir de l'expression proposée par MM. PUTNAM, MUNK et TRAYLOR (f).

Néanmoins il ne faut pas perdre de vue, ainsi que nous l'indiquions précédemment, que le transport littoral ne résulte pas seulement de l'action du "longshore current" dans le milieu turbulent du déferlement mais également de l'action du "beach drifting" c'est-à-dire du "jet de rive" de la houle.

Notons simplement que l'existence de cette coïncidence pourrait renforcer l'idée admise au début de cette communication sur l'interdépendance étroite des deux phénomènes qui ont en fait une origine commune : le déferlement de la houle.

Nous avons tracé fig. 10 V_L (i) d'après l'expression donnée par les auteurs américains pour les valeurs de $m = 0,1$ et $0,01$; k_f variant de $0,0078$ (*) à $0,05$ (k_f étant considéré ici indépendant de V_L) (**) - caractéristiques de la houle $T = 10$ sec., $2a = 1,80$ m., $L = 55$ m.

Les valeurs remarquables de l'inclinaison ont été indiquées (fig. 10) ; on remarquera que lorsque k_f ou m varient dans de fortes proportions, V varie de manière importante alors que i_p oscille autour de 53° .

Nous n'avons pas l'intention d'insister, dans cet exposé, sur l'applicabilité de l'expression considérée, mais nous remarquerons que, du point de vue de l'influence de l'inclinaison, l'expression du courant littoral donnée par MM. PUTNAM, MUNK et TRAYLOR présente à première vue une certaine analogie avec les résultats obtenus expérimentalement, particulièrement pour les inclinaisons critiques.

III - PREMIERES IDEES D'INTERPRETATION DES PHENOMENES DE LA NATURE -

a - Erosion et engraissement d'un rivage -

D'une manière générale il paraît intéressant de lier le transport solide global le long d'une zone littorale à un certain pouvoir de transport de la houle. Nous avons vu l'influence sur le débit de transport de l'inclinaison des crêtes de houle par rapport au rivage. La cambrure de la houle joue également un rôle important ; les houles longues se réfractent fortement en approchant du rivage abordent souvent l'estran avec une faible inclinaison et ne donnent pas nécessairement de forts transports littoraux, alors que des houles cambrées peuvent modifier profondément l'allure des profils de plages.

Un rivage rectiligne et continu recevant à une extrémité un débit littoral constant en moyenne sera généralement le siège d'un régime de transport littoral tel que le débit solide dans une section soit indépendant de la position de celle-ci. Le rivage sera alors en régime d'équilibre dynamique.

(*) Valeurs empruntées à MM. PUTNAM, MUNK et TRAYLOR.

(**) D'après D.L. INMAN et H. QUINN (g) k_f varierait avec V selon une loi voisine de :

$$k_f = 0,024 V^{-3/2}$$

Mais on conçoit aisément que si les mêmes conditions naturelles de débit solide et de houle se présentent le long d'un rivage irrégulier, il se produira des discontinuités de transport se traduisant par des engraissements ou des érosions locales du rivage. Il en sera de même si le rivage rectiligne et continu précédent est soumis à des houles d'inclinaison et caractéristiques variables ou s'il reçoit un débit solide d'apport irrégulier. Ce sera d'ailleurs le cas le plus fréquent dans la réalité. Cependant on observe parfois une alternance, entre les diverses inclinaisons de houle par exemple, qui permet de conclure qu'en moyenne, sur une période de temps suffisamment longue la plage est dynamiquement stable.

On pourrait en première analyse comparer le "pouvoir de transport d'une houle" sur un matériau à celui d'un courant en rivière. Nous avons vu précédemment que l'analogie pouvait porter sur les modes de transport (charriage et suspension) ; nous pourrions être tentés de l'utiliser également pour expliquer certains phénomènes d'engraissement et d'érosion d'un rivage.

En effet, de même que des singularités dans le profil en long d'une rivière peuvent provoquer des dépôts ou des affouillements, en diminuant ou en augmentant localement l'intensité du courant soit le transport des matériaux, le découpage d'une côte ou la présence d'ouvrage artificiels peuvent entraîner des engraissements ou des érosions locales du rivage par variation de l'intensité du pouvoir de transport de la houle. Une pointe rocheuse ou un épi artificiel perpendiculaire à la côte jouera le même rôle qu'un seuil en rivière occasionnant des dépôts en amont et une érosion de la plage à l'aval. Les baies ou les bassins de port peuvent se comparer aux plaines d'alluvionnement ou aux émissaires et peuvent être sujets à ensablement.

b - Formations littorales particulières -

Les irrégularités d'une côte, les ouvrages artificiels construits par les hommes peuvent être à l'origine d'évolutions importantes dans la configuration d'un rivage. Parfois même, comme nous l'avons vu, les variations non cycliques des conditions naturelles suffiront à amorcer de telles évolutions, par exemple l'augmentation brusque du débit d'apport occasionné par une forte crue d'une rivière avoisinante.

Nous n'avons pas l'intention d'entrer ici dans l'analyse détaillée des différentes formes possibles d'évolution littorale entraînant une modification de la configuration d'un rivage. Celles-ci sont en effet multiples et nous n'en retiendrons que deux parmi les plus fréquentes, à savoir les flèches littorales et les tombolos.

Les premières sont des langues de sables s'avancant en mer à partir d'une singularité du rivage (pointe rocheuse, changement d'inclinaison de la côte, ouvrage artificiel enraciné au rivage), dans une

direction souvent différente de la direction générale du rivage et se terminant de ce fait en eau libre. Les seconds sont des seuils sableux reliant au rivage un obstacle isolé à une certaine distance de celui-ci (flot ou brise-mer).

Nous allons maintenant, à la lumière de différentes recherches expérimentales, essayer d'analyser comment naissent et évoluent ces deux types de formations littorales.

B - ETUDE DES FLECHES LITTORALES -

- POSITION DU PROBLEME -

S'il est rare qu'un rivage reçoive en permanence une houle de caractéristiques et direction peu variables, il est néanmoins souvent possible de définir, sur un rivage déterminé, un régime de transport littoral avec cheminement résultant dans un certain sens s'étendant sur une période relativement longue ; régime littoral correspondant, par exemple, à la houle moyenne au cours d'une année.

Considérons (fig. 11) le schéma simple d'un port construit sur un littoral sableux, rectiligne, continu, homogène et supposons que le long de ce littoral se manifeste un tel régime. L'ouvrage nouvellement construit jouera tout d'abord, par sa partie a b, le rôle d'une barrière littorale. Il y aura engraissement du rivage en amont et érosion en aval de la singularité. A partir du moment où l'ouvrage aura terminé son rôle d'épi, des modifications substantielles des fonds pourront intervenir le long de (b c) et au-delà. Il s'établira alors le long de (b c) un régime de transport correspondant à un certain équilibre dynamique moyen, puis des matériaux se déposeront au voisinage de l'extrémité de (b c), constituant ainsi l'amorce d'une flèche.

L'étude expérimentale effectuée récemment au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique avait pour but de préciser le processus de la naissance puis de l'évolution d'une telle flèche et de déterminer les paramètres particulièrement influents sur cette formation.

L'exposé des conclusions de cette étude a été divisé en deux parties ; dans la première nous analyserons plus spécialement comment s'amorce la flèche, en deuxième partie nous verrons comment elle se développe.

I - NAISSANCE DES FLECHES -

Pour cette étude expérimentale nous opérons dans un bassin sensiblement rectangulaire de dimensions $14 \times 10 \times 0,3$ m. environ. Le

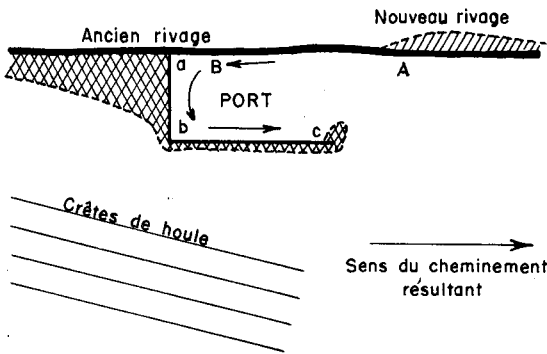


Fig. 11. Schema de l'ensablement d'un port.

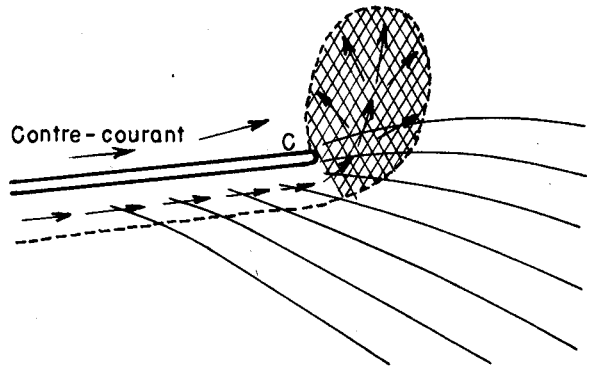


Fig. 12. Epanouissement du courant littoral a l'extremite d'une jetee artificielle.

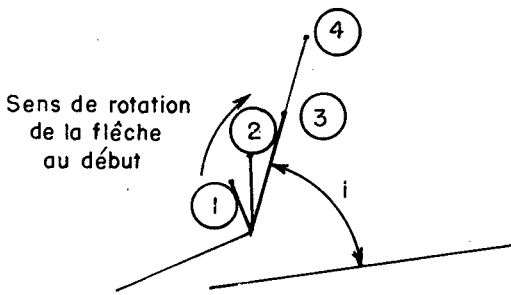


Fig. 13. Changement de direction d'une flèche littorale dès son émerision.

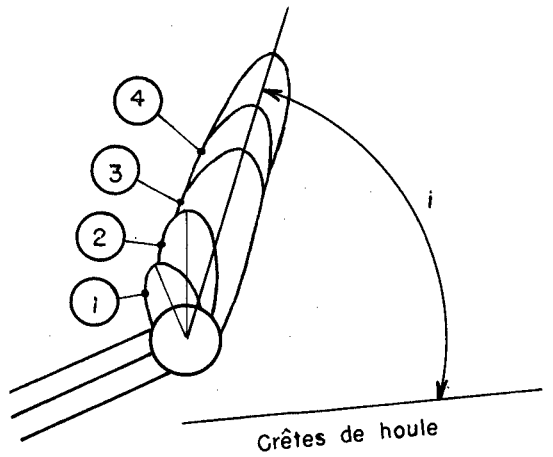


Fig. 14. Changement de direction d'une flèche littorale dès son émerision.

matériau employé était de la sciure de sapin ; ce matériau, très mobile, avait l'avantage de permettre la réduction de la durée des essais sans que ceux-ci perdent leurs valeurs comparatives.

Le générateur de houle permettait de produire des houles de directions et caractéristiques réglables à volonté. Après avoir déterminé approximativement l'amplitude et la période de la houle entraînant un déplacement raisonnable du matériau, celles-ci furent maintenues constantes tout au long des essais. La direction de houle, également maintenue invariable au large, était telle que l'inclinaison des crêtes déferlantes au voisinage de la laisse restait, pour cette phase de l'étude, en permanence égale à 15° .

Un distributeur de matériau à vis d'Archimède, mis au point pour ce genre d'étude, permettait l'introduction sur la plage, à une certaine distance de l'extrémité de la jetée, d'un débit constant de matériau ; nous eûmes soin de le répartir au mieux sur toute la largeur du profil intéressé par le transport.

Ne connaissant pas exactement la loi de répartition du débit solide dans un profil, nous introduisîmes probablement une certaine erreur dont l'importance disparaissait rapidement lorsque le matériau se déplaçait vers l'extrémité de la jetée.

Au cours de cette première phase de l'étude expérimentale les conditions d'essais ont été les suivantes :

profondeur d'eau constante égale à 20 cm.
houle : amplitude $2a = 4$ cm.
période $T = 0,75$ sec.

Le débit solide maximum de sciure introduite était environ de 8 l./min.

a - Observations du phénomène -

Le premier phénomène important observé est la décroissance rapide de l'amplitude de la houle franchissant l'extrémité de la jetée par suite de la diffraction, de la réfraction et autres phénomènes secondaires. Cette décroissance locale de l'énergie des vagues entraîne une réduction notable des forces hydrodynamiques dans le voisinage immédiat de l'extrémité de la jetée qui facilite la sédimentation des matériaux.

Le deuxième phénomène remarquable est la naissance le long du rivage abrité, opposé à la jetée, d'un contre-courant qui a son origine le long du rivage de A vers B ; ce courant de houle peut être considéré comme une conséquence de la décroissance progressive de l'agitation de A vers B (fig.11). Ce courant donne naissance dans le bassin, à l'abri de la jetée ac, un vaste tourbillon dont l'influence

peut être appréciable sur la sédimentation des matériaux et par conséquent sur la formation de la langue de sable.

Ce tourbillon peut être notablement amplifié s'il se superpose à un tourbillon de même sens induit dans cette zone par les courants de marée ou le débouché d'un exutoire.

b - Influence du courant de houle au voisinage de l'extrémité de la jetée -

Dans le détail on remarque que le courant de houle qui se manifeste au voisinage immédiat de l'extrémité de la jetée joue un rôle important au moment de la naissance de la flèche (fig. 12). Ce courant longitudinal de déferlement, dont nous avons eu l'occasion de parler au cours de la première partie de cette communication et qui est, le long de la jetée, à l'origine du transport solide, diminue avec l'importance du déferlement. Corrélativement les forces hydrodynamiques qui sont la cause essentielle du mouvement des particules solides décroissent rapidement.

En fait il semble que la plupart des particules "charriées" s'arrêtent là où prend fin le jet de rive. Les particules solides "en suspension" sont entraînées à partir de l'extrémité de la jetée par la composante horizontale du courant de houle qui, par analogie avec un courant ordinaire, diffuse dans une zone telle que celle hachurée (fig. 12) et dépose de ce fait les particules dans cette zone.

On conçoit donc que, pour une certaine configuration des fonds et pour une houle de caractéristiques et direction données, par rapport à celle de la jetée artificielle, il existe une amplitude critique de l'agitation à l'abri de la jetée pour laquelle il y a dépôt des particules solides et par conséquent amorce de la flèche.

c - Influence du contre-courant de la houle -

Le contre-courant qui prend naissance à l'abri de la jetée a une importance notable, en particulier sur les particules solides en suspension. Il donne, là où la suspension est abondante, un transport local *sensiblement opposé* à celui de la houle. Cette action tend à réduire les forces hydrodynamiques du mouvement horizontal des particules et par là à créer un *front de sédimentation* qui est probablement à l'origine de la netteté de la limite de la langue de sable côté port.

Au début, ce contre-courant qui peut atteindre la face intérieure de la jetée varie peu en intensité avec le développement de la langue de sable ; au fur et à mesure que celle-ci se développe, la limite extérieure du rouleau s'éloigne de la jetée dont il est détourné par les hauts-fonds qui apparaissent progressivement autour du musoir, en même temps son intensité diminue.

En résumé, quoique cette analyse soit schématique, elle fait apparaître un certain nombre de paramètres prépondérant, dans cette formation.

1) Le courant de houle au voisinage de l'extrémité de la jetée - lui-même lié à l'inclinaison respective de la jetée et des crêtes de vagues, aux caractéristiques des vagues, à la forme de la jetée ainsi qu'à la présence éventuelle de courants marins ordinaires.

2) L'allure locale des fonds à laquelle sont liés étroitement l'espace de diffusion de ces courants, ainsi que l'agitation due à la houle ;

3) Le contre-courant de houle dit "*d'expansion latérale*" ;

4) L'intensité du transport littoral à l'amont.

d - Résultats obtenus au cours de cette première partie de l'étude -

Nous constaterons en nous reportant à la (fig. 13) que le sous-bassement immergé de la flèche se développe tout d'abord en tournant vers la zone abritée. Il présente vers le large une pente douce qui est sensiblement celle de la plage qui s'est développée le long de la face extérieure de la jetée en amont. Du côté port, la langue de sable est limitée par une pente plus abrupte correspondant sensiblement à la pente d'équilibre en eau calme du matériau immergé.

On verra sur la dernière photo de la figure 13 la flèche qui commence à émerger, cette direction initiale d'émergence se trouve très à l'abri de l'extrémité de la jetée. Si on poursuit l'essai toujours dans les mêmes conditions, le développement de la flèche proprement dite devient plus lent par suite de son étalement et en même temps la flèche tourne lentement de (1) vers (3) (fig. 14). Pour un certain angle (i) correspondant aux conditions locales il y a "allongement" de la flèche suivant cette direction qui reste alors invariable tant que n'intervient pas un autre facteur tel que haut-fond ou raccordement au rivage (fig. 15). Il est à remarquer que si le débit solide introduit à l'amont reste constant, comme c'était le cas pour nos essais, le développement de la flèche est continu. Nous n'avons pas observé au cours de ces essais, ainsi que certains auteurs l'ont constaté, la formation et la disparition plus ou moins périodique d'un bourrelet en tête de la flèche.

Nous avons remarqué, par contre que, si avant d'atteindre la position (4) le débit solide de transport littoral est réduit à l'amont la partie émergente de la flèche rétrograde ; il y a alors rotation de la flèche de la position (3) vers (2) puis vers (1). Lorsque le débit solide amont reprend sa valeur primitive le cycle de progression recommence c'est-à-dire que l'on constate à nouveau le passage de la

position (1) aux positions (2) et (3) ; en quelque sorte, au début de sa formation l'inclinaison de la flèche dépend de son état de maturité et du débit littoral momentané à l'amont.

Ces diverses observations font apparaître une étroite relation entre les directions successives de la flèche et l'importance des apports solides littoraux. De même l'existence d'une direction favorable à l'allongement pose le problème de l'existence d'une inclinaison préférentielle des flèches - problème dont nous parlerons dans le paragraphe suivant.

II - EVOLUTIONS DES FLECHES -

Les résultats expérimentaux relatés précédemment mettent en évidence l'existence d'une relation étroite entre l'intensité du transport littoral et l'inclinaison des rivages en général ou des flèches en particulier dès l'origine de leur formation ; il paraît intéressant de confronter ces résultats avec ceux obtenus au cours des recherches expérimentales liant l'influence de l'inclinaison des crêtes de vagues au transport littoral le long d'un rivage supposé rectiligne.

Il y aurait, d'après ces résultats expérimentaux, deux positions d'équilibre remarquables : l'une serait une position d'équilibre stable obtenue pour $i = 0$, la deuxième serait, selon MM. BLOSSET et PELNARD-CONSIDERE, la direction privilégiée que tendrait à prendre directement, c'est-à-dire sans passer par d'autres stades intermédiaires d'équilibre, tout dépôt de sable dans le cas où l'obliquité de la houle serait supérieure à une valeur remarquable qui pour ces auteurs serait voisine de 65° .

Cependant, tout en remarquant que si une telle position d'équilibre remarquable existe, nous croyons que sa valeur n'est pas *unique*, elle dépend vraisemblablement de différents paramètres encore mal précisés. Nos essais montrent en effet qu'à un certain apport littoral dans des conditions déterminées (action continue d'une houle constante en moyenne) correspond un certain transport littoral et par voie de conséquence une certaine orientation de la flèche, (ou du rivage libre à l'aval). L'équilibre obtenu est un équilibre dynamique stable ; il est *arbitraire* en ce sens que si l'intensité de l'apport littoral change, le transport solide littoral change lui-même et un nouvel équilibre apparaît.

La direction de la houle étant fixe, l'inclinaison du rivage se trouve modifiée selon l'importance de l'apport en sables sur le rivage.

Il semble ainsi que l'inclinaison critique remarquée par les auteurs cités, pour laquelle le débit littoral perd sa valeur maximum

EVOLUTION D'UNE LANGUE DE SABLE

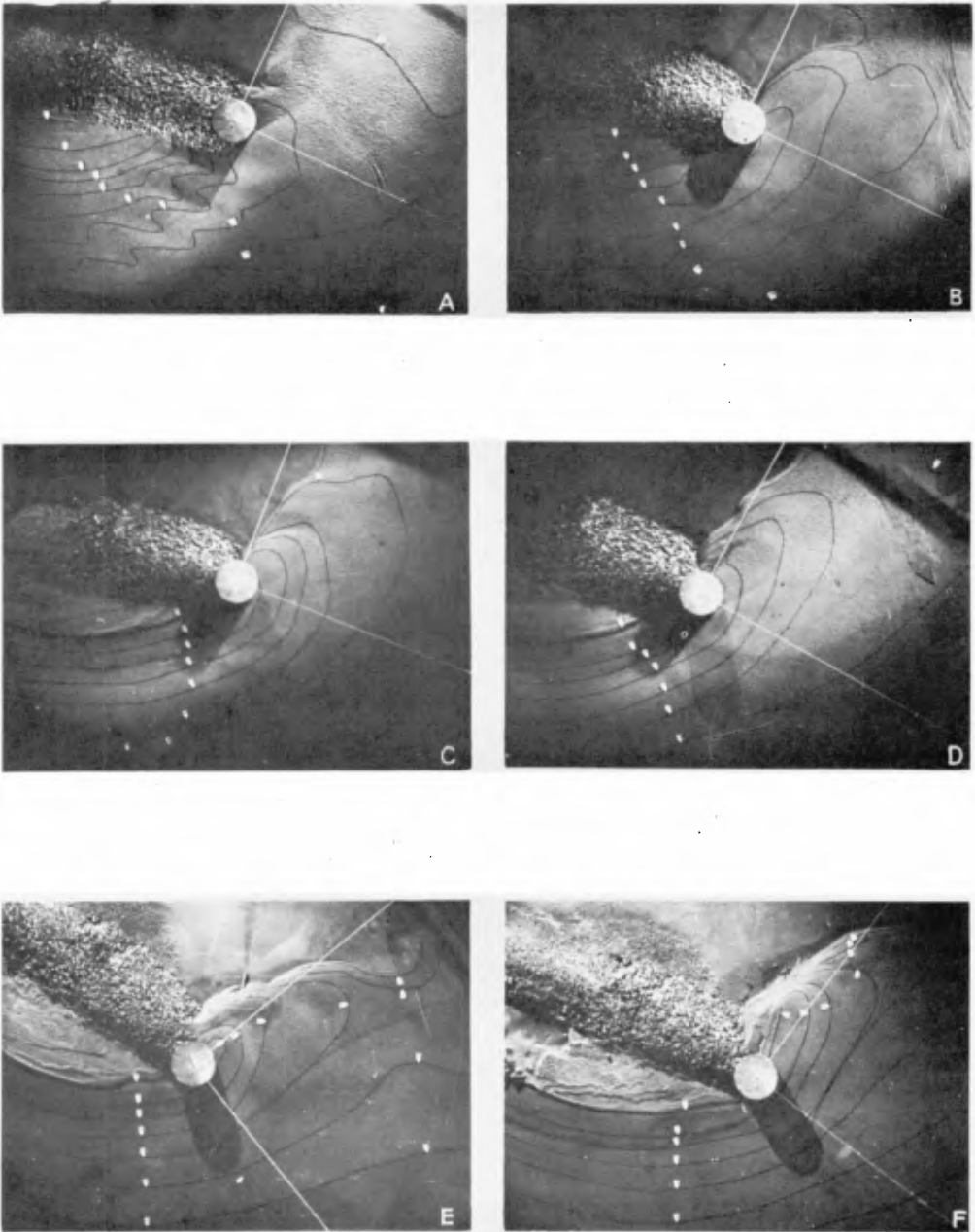


Fig..15. Différentes phases de la naissance d'une flèche avant son émerision.

serait atteinte en régime saturé. Si donc on disposait en un point d'un rivage (à l'aval du débouché d'un exutoire par exemple), d'une quantité "surabondante" de matériau, une flèche de sable pourrait s'amorcer à l'aval de ce dépôt et son inclinaison prendrait la valeur critique indiquée ; - ce qui supposerait que le pouvoir de transport moyen de la houle reste sensiblement constant et agisse en permanence ou presque.

C'est-à-dire lorsque l'intensité de l'apport littoral serait supérieur à l'intensité du transport littoral maritime compatible avec la houle atteignant le rivage.

Enfin il paraît intéressant de noter, comme nous l'indiquions précédemment, que des valeurs de l'inclinaison du rivage ou de la flèche telles que $i > i_r$, l'équilibre paraît particulièrement instable, par contre lorsque les crêtes de houle sont relativement peu inclinées sur la direction générale du rivage l'équilibre est plus stable, cette stabilité étant particulièrement marquée pour les valeurs de l'inclinaison voisines de i_r pour lesquelles les variations

$$\frac{\partial q_{sol. litt.}}{\partial i}$$

sont faibles.

Ce résultat est à rapprocher des phénomènes constatés lors de la formation d'une flèche. Si on observe en effet que la flèche émerge au moment de sa naissance selon une direction sensiblement normale aux crêtes de vague, donc pour une valeur de $i > i_r$, très vite celle-ci tourne vers les indécroissants (passage de la position (1) aux positions (2), (3) figure 15) lorsque la fraction du transport littoral qui contribue directement au développement de la flèche va en croissant pour atteindre finalement la valeur du débit littoral d'amont.

Les essais montrent bien qu'au début l'équilibre de la flèche est particulièrement instable ; ce "régime" se traduit sur la courbe de la fig. 9 par un déplacement suivant le sens indiqué. Par contre si, lorsque la flèche s'est orientée selon la direction correspondant au transport littoral maximum, la quantité de sédiments arrivant à l'enracinement de la flèche est réduite, la flèche a tendance à s'orienter vers les directions primitives, à la recherche d'un nouvel équilibre correspondant à un point sur la même branche de la courbe. Au cas limite, si le débit solide est annulé pendant un temps suffisamment long, la flèche se rompt à l'enracinement, elle se comporte en "flèche morte" ; on peut constater alors une translation en bloc de la flèche si la position (4) fig 15 a été atteinte depuis un certain temps. Une nouvelle flèche s'amorce si l'introduction de débit solide est de nouveau abondante.

Nous reproduisons fig. 16 le résultat d'un essai de formation d'une flèche par apport continu et surabondant de matériau littoral à son enracinement. On remarquera la continuité du rivage obtenu, l'inclinaison de la flèche est égale à 53° correspondant donc au régime de transport littoral maximum avec le matériau et les caractéristiques de houles adoptés. La fig. 17 représente la même flèche après suppression de l'alimentation, la flèche s'est rompue à l'enracinement.

III - PROTECTION DU DEBOUCHE D'UN CHENAL CONTRE LA FORMATION D'UNE FLECHE -

Bien souvent la formation d'une flèche, surtout à l'extrémité d'un ouvrage artificiel, constitue une gêne considérable pour la navigation, soit qu'elle vienne obturer le débouché d'un chenal faisant communiquer une lagune avec la mer, soit qu'elle provoque l'ensablement de la passe d'entrée d'un port en se développant à partir de l'extrémité d'une des jetées de celui-ci.

Nous n'avons pas la prétention de passer en revue les différentes solutions susceptibles d'éviter ce dépôt ou de le repousser dans une zone où il ne gênera plus la navigation, nous donnerons seulement à titre d'exemple sur les figures 18 et 19 un procédé applicable lorsqu'il est possible de disposer d'un débit de chasse suffisant. On réalise alors un véritable "soufflage" hydraulique de la flèche qui avait tendance à obturer l'extrémité du chenal. Si le débit de chasse est faible, la flèche est seulement repoussée légèrement vers le large (v. fig. 18) mais s'il est suffisamment important la flèche est alors reportée à l'enracinement de la 2^e jetée (fig. 19).

IV - CONCLUSIONS RELATIVES AU TRANSPORT LITTORAL ET AUX FLECHES -

De cette étude nécessairement rapide, nous retiendrons :

- l'action prépondérante de la cambrure de la houle sur le transport littoral le long d'un rivage.
- l'influence de l'inclinaison des crêtes de vagues déferlantes sur le rivage quant à leur pouvoir de transport ;
- l'existence d'une inclinaison remarquable pour laquelle le pouvoir de transport d'une houle est maximum et au-delà de laquelle l'équilibre n'est pas instable à proprement parler mais peu stable pratiquement.

Nous remarquerons encore que le contre-courant qui prend naissance à l'abri de l'amorce de la flèche peut avoir une importance

notable sur l'inclinaison générale du dépôt sableux.

Il est utile d'attirer l'attention sur le fait que nous avons effectué nos expériences avec une houle relativement régulière tant en caractéristiques qu'en inclinaison et agissant presque continuellement ; or la houle ne présente pas cette régularité dans la nature. On pourrait évidemment dire que cette houle régulière représente la houle moyenne au cours d'une année. Mais rien ne prouve que de telles vagues auront les mêmes effets que des vagues de direction et de caractéristiques sans cesse changeantes.

C - ETUDE DES TOMBOLOS -

GENERALITES SUR LES TOMBOLOS -

Nos connaissances actuelles sur les mouvements littoraux permettent certaines explications schématiques des évolutions littorales dont le tombolo est un cas particulier.

Qu'est-ce qu'un tombolo ?

L'Encyclopédie indique : bande étroite de terre, de galets ou de sable qui, dans certains cas, relie une île à la terre ferme.

Cette définition apparaît suffisamment complète. Pour mieux distinguer flèche littorale et tombolo, nous pourrions encore l'appeler : remblai de terre se terminant finalement sur une île. Que celle-ci soit naturelle ou artificielle, dans la plupart des cas il y aura effectivement passage à la "presqu'île".

D.W. JOHNSON (b) donne une terminologie particulièrement complète et significative des différentes sortes de tombolos rencontrés sur les rivages actuels : ce sont les "tombolos simples", les "tombolos doubles" (MONT ARGENTARIO) les "tombolos en y" pour lesquels le MORRO del PUERTO SANTO (VENEZUELA) est un exemple type ; enfin les "tombolos complexes". Nous ajouterons à cette liste le tombolo que constitue en FRANCE la presqu'île de GIENS sur la côte Méditerranéenne.

La différence entre la flèche et tombolo n'est pas toujours très nette. Les "cusate-bars" de D.W. JOHNSON ont, semble-t-il, une formation se rattachant aux premières pour aboutir finalement à une prééminence du rivage se rapprochant par leur forme, de celle des tombolos. Pourtant ces deux "accidents littoraux" diffèrent totalement quant à leur formation.



Fig. 16



Fig 17

Fig. 16. - Formation d'une flèche littorale par alimentation surabondante en amont de son enracinement, la direction générale de la flèche fait avec celle des crêtes de houle près du rivage un angle voisin de 53° .



Fig. 17 bis.

Fig. 17. - La même flèche littorale après suppression momentanée de l'alimentation ; la flèche s'est rompue à l'enracinement.

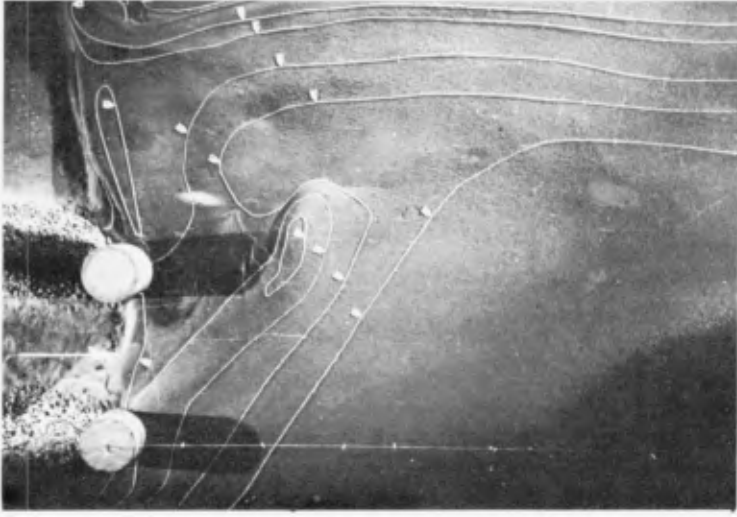


Fig. 18. Déviation d'une flèche par un courant de chasse.



Fig. 19. Transport de la flèche d'une jetée à l'autre par courant de chasse plus important.

I - FORMATION D'UN TOMBOLO SIMPLE -

Etudions plus particulièrement comment se forme un tombolo simple ; le plus classique : tombolo se formant à l'abri d'une île relativement peu importante et suffisamment rapprochée du rivage, île qui peut éventuellement être artificielle.

Considérons pour simplifier une plage rectiligne devant laquelle à une certaine distance, un brise-mers vient d'être construit parallèlement au rivage.

En supposant que les conditions soient requises pour que puisse se développer un tombolo (nous verrons plus loin quelles sont ces conditions), l'allure même du tombolo dépendra du régime de la plage.

Si le cheminement le long de la plage, au-delà de la zone perturbée par le brise-mers, est nul en permanence (crêtes de houles en permanence parallèles au rivage) ou nul en moyenne (houles symétriques par rapport à la normale au rivage), il y a de fortes chances pour que le tombolo soit symétrique. On aura très probablement l'un des deux schémas indiqués sur les fig. 20 et 21.

Dans le 3ème cas où il y a transport littoral résultant dans un certain sens le long de la plage, le tombolo sera généralement dissymétrique ; le phénomène s'accompagnant d'un engraissement du rivage à l'amont et d'une érosion à l'aval de l'amorce de tombolo (fig. 22). Le brise-mers agira en somme comme un simple épi d'efficacité croissante (barrière littorale). Un tel ouvrage peut être d'une application pratique particulièrement importante.

II - ETUDE EXPERIMENTALE - DETAILS SUR LA FORMATION D'UN TOMBOLO -

Les essais effectués au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (GRENOBLE) mettent en évidence des détails intéressants sur la formation des tombolos. Pour ces essais, le matériau mobile était de la sciure de sapin de densité très peu supérieure à 1 donc facilement mis en mouvement même par une houle de faibles caractéristiques. Ce matériau a, répétons-le, l'avantage de conserver aux essais leurs valeurs comparatives tout en permettant de réduire considérablement leur durée.

• La plage sur laquelle nous opérons était stable sans cheminement littoral (les crêtes de vagues abordant le rivage lui étaient parallèles). Sur cette plage nous avons implanté à une distance l de la laisse un obstacle peu réfléchissant qui peut être caractérisé par sa dimension principale d les caractéristiques de la houle au voisinage du rivage sont $2a, L$.

Pour observer le phénomène de formation du tombolo nous introduisons en permanence en A et en B, dans la zone de déferlement, des quantités égales de matériau. Pour les valeurs de l supérieures à une certaine valeur remarquable de l_c la plage se déplaçait parallèlement à elle-même. Lorsque l_c était atteinte, l'influence de l'obstacle se faisait sentir, le tombolo s'amorçait et se développait, la laisse occupait des positions respectives (2), (3), (4) ... (voir fig. 23 et photographie fig. 26). (*)

Le même résultat eut été obtenu sans apport latéral de matériau mais en approchant progressivement l'ouvrage du rivage primitif (position (0)) ; le procédé employé n'est qu'un artifice expérimental.

LII - L'AMORCE DU TOMBOLO -

La formation des tombolos est plus spécialement liée à la notion de courant de houle "d'expansion latérale", le courant d'expansion latérale résultant surtout de la décroissance progressive des amplitudes à l'abri de l'obstacle. Ce phénomène se manifeste ici de manière assez symétrique à partir de chacune des deux autres extrémités du brise-mers par diffraction et réfraction locales combinées de la houle, le phénomène de diffraction étant prépondérant.

Dans la zone abritée de la jetée de longueur relativement faible, le rapport de l'amplitude de la houle diffractée en un point de coordonnées polaires, (r, θ) (fig. 24) à l'amplitude de la houle incidente est une fonction de la forme :

$$F(r, \theta) = \psi \left[\frac{r}{l}, (\theta_0 \pm \theta), \frac{d}{l} \right]$$

ici

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2}$$

En particulier en E

$$f(l, \theta_1) = \psi \left[\left(\frac{l}{l} \right), (\theta_0 \pm \theta_1), \frac{d}{l} \right]$$

(*) Il paraît intéressant de comparer les résultats obtenus expérimentalement fig. 26 et ceux obtenus dans la nature au breakwater of SANTA MONICA (CALIFORNIA) (proceedings of first conference on coastal engineering, Long Beach California Oct. 1950).

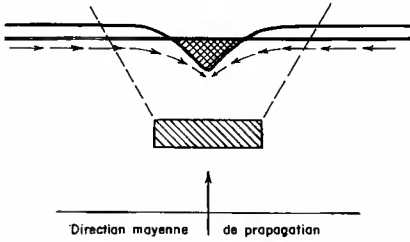


Fig. 20. Schéma d'un tombolo formé par l'action d'une houle parallèle au rivage.

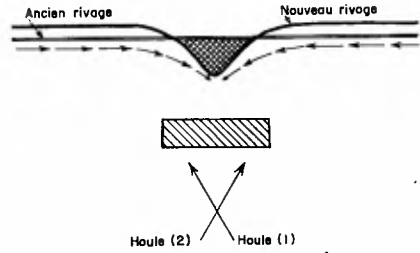


Fig. 21. Schéma d'un tombolo formé par l'action de houles d'inclinaisons symétriques donnant un transport littoral résultant nul.

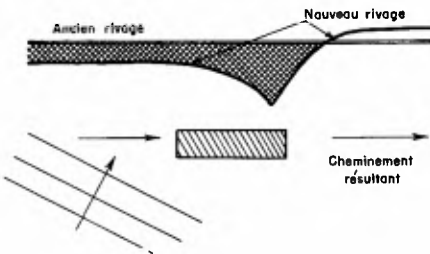


Fig. 22. Schéma d'un tombolo formé par l'action de houles donnant un transport littoral résultant dans un certain sens le long du rivage.

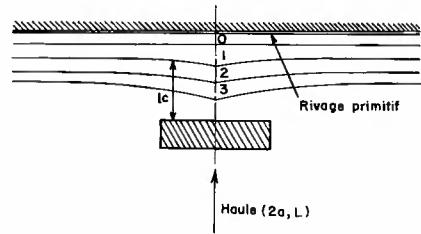


Fig. 23. Position du rivage pour laquelle le tombolo apparaît.

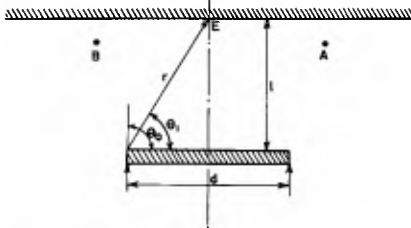


Fig. 24. Paramètres intervenant dans le calcul de la houle diffractée.

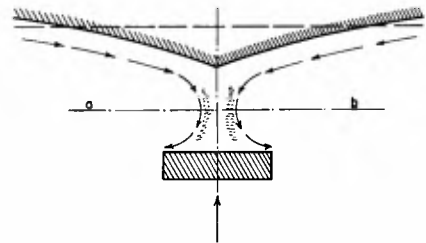


Fig. 25. Contre-courant derrière l'obstacle pouvant entraîner la formation de deux haut-fonds symétriques.

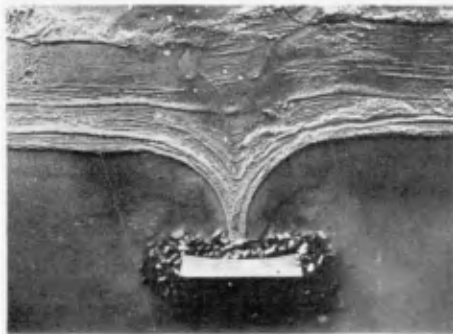


Fig. 26. Etude expérimentale: tombolo formé par l'action d'une houle dont les crêtes sont parallèles au rivage.

Pour une certaine valeur de l , l'amplitude de la houle en E et le long de la médiatrice Ex atteint une valeur favorisant le dépôt. Le premier résultat de nos essais met effectivement en évidence de manière particulièrement nette l'importance fondamentale, pour un ouvrage de longueur déterminée, du rapport $\frac{l}{L}$.

A l'abri du brise-mers, les vagues ainsi que les courants qu'elles engendrent viennent se heurter sensiblement suivant la ligne médiatrice. Le long de cette ligne et dans le voisinage de celle-ci il se crée une zone favorable à la sédimentation des particules apportées par les courants de houle ; sédimentation favorisée, d'une part, par la **rencontre** de deux courants de sens opposés, d'autre part par la décroissance de l'agitation due à la houle donc de la turbulence.

On remarque néanmoins que, lorsque le tombolo est suffisamment formé, contrairement à ce que l'on pourrait croire, les dépôts ne se développent pas toujours rigoureusement le long de la médiatrice de l'ouvrage. On constate tout d'abord à l'arrière de l'obstacle (dans le plan a b fig. 15) deux petits hauts-fonds symétriques pouvant s'expliquer par le fait que les zones à moindre turbulence sont reportées légèrement au-delà de la ligne sur laquelle se produit la rencontre des vagues diffractées à partir des deux extrémités du brise-mers. Cette remarque laisse apparaître le processus de formation des tombolos doubles.

Résultats -

Nous avons obtenu une valeur de $\frac{l_c}{L}$ égale à $\frac{5}{4}$ pour les conditions d'essais qui étaient :

$$\frac{d}{L} = 1$$

avec $L = 80$ cm. ($T = 0,8$; $h = 10$ cm. devant l'obstacle).

IV - CONCLUSION RELATIVE AUX TOMBOLOS SIMPLES -

Cette étude rapide, axée plus particulièrement sur le processus de la formation d'un tombolo simple symétrique peut être en fait étendue à la formation de tombolos plus complexes.

Deux phénomènes dominent la formation des tombolos ; le courant local de houle résultant surtout de la diffraction qui contribue d'une part à l'apport latéral des sables, d'autre part à la création d'un front de sédimentation et la zone de calme relatif existant à l'abri du

du brise-mers dans laquelle la sédimentation des particules solides est facilitée.

Cette sédimentation est possible dans certaines circonstances à l'arrière du brise-mers, conditions qui dépendent principalement sur un certain rivage soit de la longueur de l'ouvrage, soit de sa distance au rivage.

On pourra suivre sur la photographie de la fig. 26 l'évolution particulièrement spectaculaire d'un tombolo symétrique. Enfin, une conclusion qui se dégage tout naturellement de cette étude est qu'il n'est pas toujours sans inconvénients de construire un brise-mers au voisinage d'un rivage sableux sans une étude préalable particulièrement soignée.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- (a) D.W. JOHNSON - *Shore processes and shoreline development*
NEW-YORK : JOHN WILLEY and Sons 1938.
- (b) THORNDIKE SAVILLE IR - "Model study sand transport along and infinitely long, straight beach" - *Transactions, American Geophysical union Vol. 31 - 4 - August 1950.*
- (c) J.W. JOHNSON - "Sand transport by Littoral currents - *Proceedings of the Fifth Hydraulics Conference June 9/11/1952 University of IOWA.*
- (d) N.C. KURMBEIN - *Shore currents and sand movement on a model beach - Technical memorandum n° 7 - Beach Erosion board, Office of the chief of engineers WASHINGTON D.C. September 1944.*
- (f) PUTNAM J.A. MUNK W.H. TRAYLOR M.A. - "The prediction of longshore currents" - *Transactions American Geophysical Union - Vol. 30 - Juin 1949 -*
- (g) D.L. IMMAN and W.H. QUINN - *Proceedings of second conference on coastal engineering (HOUSTON, TEXAS Nov. 1951).*
- (e) BROQUAIRE, ETIENNE, BLOSSET - "Tracé des ouvrages extérieurs entretien des profondeurs des ports en plage de sable et devant les embouchures lagunaires. Résultats obtenus. XVIIe Congrès International de Navigation BRUXELLES 1953 rapport 70.

RESUME

LITTORAL DRIFT
FORMATION OF SPITS AND TOMBOLOSG. Sauvage de Saint Marc
and
G. Vincent

This paper, entirely devoted to the study of phenomena connected with the evolution of sand banks, is introduced by a rapid survey of a few basic ideas about littoral drift; we point out the fundamental role of wave currents and more particularly of the currents caused by breaking waves.

We have attempted to determine the influence on littoral drift of such factors as : the wave characteristics, the wave steepness, the inclination of the wave crests breaking onto the beach, the nature of the beach material... The few experimental results given need to be completed and then compared with figures resulting from observations in nature; it is unfortunate that these latter are difficult and expensive to obtain.

After these general remarks on littoral drift, we consider a few aspects of the development of sand banks such as the birth and evolution of littoral spits and tombolos, both of which are littoral formations presenting an obvious practical interest for the engineer responsible for the construction of ports on sandy coasts.

By making use of experimental research carried out at the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique NEYRPIIC, we have tried to determine the factors playing a part in the processes of birth and evolution of spits, whether they be littoral ones due to some singularity of the sand bank or tongues of sand appearing at the extremity of some artificial construction.

We pay special attention to certain tendencies for spits to take particular directions and to the possibility of their rectilinear growth after they have reached a certain phase of their evolution.

Finally, and using again the experiments carried out in our Laboratory as a foundation, we describe the formation of certain types of tombolos found in nature.