MÉTHODES D'INVESTIGATION SUR MODÈLES RÉDUITS DES DIFFÉRENTS PROBLÈMES D'HYDRAULIQUE CÔTIÈRE

PAR
L. GRESLOU *

Les différents mouvements de la mer : houles, courants, variations de niveaux agissent de façon parfois très importante sur la bordure littorale des continents, provoquant des évolutions perpétuelles de celle-ci.

L'homme est donc sans cesse amené à résoudre des problèmes de protection de côte contre l'érosion, de reconstitution de plage, de protection de ports contre l'ensablement, de maintien de débouchés de lagunes ou de rivières, etc.

Compte tenu des divers facteurs naturels qui entrent en jeu et qui, de ce fait, rendent parfois la solution de ces problèmes fort complexe, il peut paraître intéressant de faire appel au modèle réduit pour rechercher ou mettre au point le dispositif de protection le plus approprié.

L'objet de la présente communication est de faire un bref tour d'horizon des possibilités et des limites de validité du modèle réduit dans le domaine des études d'hydraulique côtière concernant les évolutions du littoral, principalement sous l'effet de la houle.

I. — PROCESSUS D'ACTION DES FACTEURS HYDRAULIQUES SUR LES MATÉRIAUX DE PLAGE

Avant d'examiner le mode de représentation des phénomènes d'évolution d'un rivage à échelles réduites, il est nécessaire de connaître non seulement les facteurs à représenter, mais surtout les processus d'action de ces facteurs sur les matériaux constitutifs du rivage.

La houle

Le principal agent d'évolution est la houle, dont l'énergie est parfois considérable, et peut désagréger des falaises, créer ou faire disparaître des plages en transportant les sables ou galets qui les constituent.

Le mouvement périodique de la houle s'accompagne, dans le sens de la propagation des ondes, d'une part, d'un mouvement orbital des particules et, d'autre part, d'un courant de masse.

Le mouvement orbital des particules entraîne des vitesses au contact du fond susceptibles de mettre en mouvement le matériau constitutif de celui-ci.

Le courant de masse qu'a analysé en particulier Longuet-Higgins, se traduit au voisinage du rivage, par un courant portant vers la plage dans les couches inférieures et supérieures de la masse liquide et par un courant portant vers le large dans la tranche centrale. (fig. 1).

* Ingénieur à la SOGREAH.

On voit donc que, lorsque les particules se déplacent sur le fond, elles sont en général remontées vers l'estran, alors que si elles sont mises en suspension jusqu'à une hauteur suffisante au-dessus du fond, elles peuvent être, au contraire, entraînées au large.

Cette analyse rapide ne donne pas une vue complète du déplacement des particules dans un profil perpendiculaire aux crêtes de houle, car il peut se superposer à ce courant de masse lié à la propagation de la houle, des courants parasites dus soit à des gradients de densité ou de température, soit à l'effet du vent en surface. En effet, si le vent souffle de la mer vers la terre, au voisinage de la plage, il accélérera le mouvement des particules d'eau en surface vers la côte, mais créera, en compensation, un courant de fond vers le large, opposé au courant de masse et pouvant provoquer le départ du matériau, même s'il n'est pas mis en suspension.

On conçoit donc que le profil en travers d'une plage puisse évoluer en fonction des caractéristiques de la houle. Dans les régions où les fortes tempêtes se produisent pendant quelques mois de l'année, on constate un basculement du profil de la plage entre cette saison et la saison plus calme. Les houles de tempête ont tendance à adoucir le profil un peu au-dessous de la laisse et à réduire la zone émergente, car l'énergie contenue dans la houle arrache du matériau et le redescend au large du rouleau de déferlement. Les houles d'énergie plus faible « dites de beau temps » ont tendance à niveler, par charriage vers la plage, la barre formée sous la laisse. C'est ainsi que certaines plages de nos côtes, dont la partie émergente semble avoir presque disparu pendant l'hiver, présentent à nouveau au début de l'été une largeur équivalente à celle de l'été précédent (fig. 2).

Basculement d'un profil de plage entre l'hiver et l'été /2
Change in a beach profile from winter to summer

Ceci suppose toutefois, d'une part, que les particules de matériau arrachées par les tempêtes et entraînées vers le large n'ont pas atteint des profondeurs telles que les houles d'énergie plus faible ne puissent plus les remonter vers le rivage et, d'autre part, que les variations du niveau de la mer sont relativement faibles.

À ces mouvements à deux dimensions, il y a lieu d'ajouter les mouvements à trois dimensions qui engendrent des courants soit parallèlement au rivage, soit vers le large.

Les plus connus de ceux-ci sont : le long shore current, le beach drifting, les rips currents.

— le long shore current est un courant parallèle au rivage, dû à l'obliquité de la houle, se produisant plutôt dans le rouleau de déferlement et donnant un mouvement en hélice aux particules;

— le beach drifting est un mouvement en dent de scie des particules, analogue et dérivé du précédent, qui se produit dans le jet de rive; les particules solides sont alors poussées vers le haut de plage, dans le sens de propagation de la lame puis, lorsque la lame se retire, redescendent suivant la ligne de plus grande pente;

— les rips currents sont des courants de retour vers la plage se produisant plutôt lorsque l'obliquité de la houle est assez faible et qui se traduisent le long d'une plage par des festons.

À ces divers courants il faut ajouter aussi :

— le courant d'expansion latérale mis en évidence par le Professeur Iribaren, courant qui, comme son nom l'indique, s'établit depuis une zone de forte amplitude vers une zone plus abritée.

Les courants

Indépendamment des courants dus à la houle, les côtes peuvent subir l'action d'autres types de courants :

- des courants marins généraux, dont l'intensité est en général faible au voisinage des côtes;
- des courants de marée, dont l'action est très variable dans l'espace et dans le temps, mais qui peuvent occasionner des mouvements très importants, en particulier au voisinage du débouché d'un estuaire ou d'une lagune;
- des courants fluviaux, au voisinage du débouché des rivières, dont l'action contrecarre habituellement celle de la houle en rompant la continuité du rivage que la houle a tendance à reconstituer, d'où les phénomènes bien connus de barres d'embouchures;
- des courants dus au vent, dont nous avons parlé précédemment;
- des courants de densité, dus à des gradients de température, de salinité, etc.

Les variations de niveau

La marée, les vents, les variations de pression atmosphérique provoquent des variations du niveau de la mer ayant, elles aussi, une influence sur les évolutions littorales, tout spécialement en modifiant la zone d'action de la houle.

Les vents

Le vent agit de manière indirecte sur les évolutions littorales :

- en engendrant la houle et en la faisant éventuellement déferler (moutons);
- en créant des courants à l'intérieur de la masse liquide et en particulier des courants de retour vers le large au voisinage du fond, quand il souffle de la mer vers la terre;
- en modifiant le niveau de la mer de façon d'autant plus sensible qu'il agit sur une baie plus fermée.

Il peut agir aussi directement en arrachant des particules dans les zones sèches de la plage. Celles-ci peuvent, soit se déposer dans d'autres zones sèches plus abritées, soit tomber dans la mer où les courants les transporteront à leur tour.

De tous ces facteurs, le houle, avec les courants qu'elle engendre, constitue toutefois l'agent principal de l'évolution du littoral, aussi nous attacherons-

nous, dans cette communication, à examiner surtout les divers modes de reproduction possible sur modèle réduit de son action sur les rivages.

II. — PRINCIPAUX PHÉNOMÈNES A REPRÉSENTER SUIVANT LA NATURE DES PROBLÈMES

L'analyse précédente permet de constater que les évolutions observées sur un littoral peuvent être dues à la conjugaison de nombreux facteurs et même en se limitant à la houle aux divers paramètres suivants :

- direction générale des vagues;
- caractéristiques des vagues (période, amplitude);
- nature de la tempête : houle du large ou mer du vent;
- niveau moyen et variations de niveau de la mer pendant la tempête.

Une même tempête peut d'ailleurs conduire à une évolution différente du littoral suivant les conditions océanographiques intervenues auparavant (caractéristiques de la tempête précédente) et, par conséquent, le relief de la plage créé avant son apparition.

On conçoit donc aisément que la représentation sur modèle de l'ensemble des facteurs qui provoquent l'évolution du littoral oblige à certaines schématisations, en supposant même, ce qui est rarement le cas, que les caractéristiques de ces divers paramètres soient bien connues.

Cette schématisation pourra être plus ou moins poussée, suivant la nature des problèmes à traiter, et suivant les possibilités de reproduction en similitude des paramètres prépondérants dans chaque cas.

A cet effet, on peut distinguer deux grandes séries de problèmes liés aux évolutions littorales : ceux concernant les évolutions de la ligne générale du rivage par transport longitudinal, et ceux ayant trait à l'érosion d'un littoral et aux évolutions des profils de la plage sous l'effet de houles quasi frontales.

Bien entendu, ces deux types d'évolution sont en général liés, mais les problèmes à résoudre ne sont pas forcément de même nature et peuvent souvent être traités séparément.

Dans le premier cas peuvent se ranger les problèmes liés à l'évolution des flèches littorales, à l'ensablement des ports implantés le long d'une côte où règne un transport littoral, au basculement de la laisse d'une plage sous l'effet de différentes directions de houle, etc.

En première approximation, le problème se ramène alors à l'effet, sur la partie haute de la plage, des courants dus à l'obliquité de la houle et en particulier le long shore current et le beach drifting qui sont, en général, les phénomènes prépondérants, l'essentiel du transport se situant entre le déferlement et le haut du jet de rive.

Dans le deuxième cas, on trouvera, par exemple, les problèmes de protection d'une plage en érosion pour lesquels on cherche à définir l'implantation et les caractéristiques d'ouvrages de protection tels que brise-lames, ou épis.

De telles études supposent une reproduction suffisamment précise, sur modèle, de l'action de la houle sur toute la zone du profil en évolution, pour

pouvoir déterminer les caractéristiques des ouvrages à implanter et reproduire correctement leur effet en similitude.

Ces évolutions des profils peuvent être alors délicates à reproduire, si on a affaire à une région de mers de vent fréquentes, à fortes variations de niveau, engendrant des plages très plates.

III. — DIVERS MODES DE REPRÉSENTATION DE CES PHÉNOMÈNES SUR MODÈLES RÉDUITS

La distinction, d'ailleurs assez arbitraire, que nous avons cherché à faire au chapitre précédent avait pour but de montrer que les divers problèmes côtiers pouvaient s'étudier sur modèle de façons différentes suivant leur nature.

L'analyse des conditions de similitude à remplir pour reproduire simultanément divers processus d'évolution peut conduire, en effet, à des impossibilités pratiques, et là, comme pour d'autres problèmes de similitude hydraulique, il est nécessaire de rechercher les paramètres ayant l'action principale sur l'évolution et à admettre des compromis pour la reproduction des autres paramètres.

En se limitant au cas de l'action de la houle sur un rivage, la représentation correcte en similitude de cette action supposerait entre autres :

1° *La reproduction de la propagation de la houle sous ses trois principaux aspects :*

- réfraction;
- diffraction,
- réflexion.

— pour la réfraction, le plan de vagues sera respecté si le rapport h/L de la profondeur à la longueur d'onde reste le même; il faudrait donc que la longueur d'onde de la houle soit choisie suivant l'échelle des hauteurs du modèle. L'échelle des amplitudes devrait être aussi voisine de cette échelle pour ne pas modifier la cambrure de la houle;

— pour la diffraction autour de décrochements du rivage, ou derrière des ouvrages artificiels, ce phénomène s'effectuant suivant une loi proportionnelle à la distance de l'obstacle, il faudrait que la longueur d'onde de la houle soit rapportée à l'échelle des dimensions des ouvrages, c'est-à-dire à l'échelle en plan du modèle;

— pour la réflexion qui se produira sur la plage, il faudrait en toute rigueur que la partie du rivage où se réfléchirait la houle ait une pente identique à la pente naturelle; mais, heureusement, cette réflexion est, en général, faible et joue un rôle secondaire.

On voit donc que la propagation de la houle en similitude supposerait un modèle non distordu.

Il reste, de plus, que le choix d'échelles trop petites peut entraîner, sur modèle, un amortissement de la houle dans sa propagation, supérieur à celui de la réalité.

2° *La reproduction du mode de génération de la houle :*

Si la zone considérée est soumise, en général, à des houles du large relativement régulières, la création de la houle sur modèle par un batteur à houle doit, en principe, suffire pour reproduire correctement l'effet de la houle sur le rivage.

Par contre, pour examiner l'évolution de plages soumises, la plupart du temps, à des mers de vent, il peut être nécessaire de reproduire l'effet du courant de retour sur le fond dû au vent et l'effet de l'irrégularité de cette houle, et, par conséquent d'engendrer de la même manière la houle sur le modèle.

3° *La reproduction de l'effet de la houle sur le matériau constitutif de la plage :*

C'est là que réside la principale difficulté. Il faut en effet que le matériau ait, aux échelles réduites adoptées pour le modèle, les mêmes susceptibilités de transport que le matériau réel sous l'effet des houles nature, c'est-à-dire en particulier que soient reproduits en similitude :

- la vitesse de démarrage et la vitesse de chute des grains;
- le débit de transport solide sous l'effet de la houle;
- la proportion du débit de suspension et du débit de charriage de ce transport solide pour une houle donnée.

Cette dernière condition a une importance réelle dans les problèmes d'érosion, car nous avons vu que le matériau emporté vers le large est, en général, celui qui a été mis en suspension jusque dans la zone centrale de la masse d'eau où le courant de masse de Longuet-Higgins porte vers le large.

Malheureusement dans la plupart des cas, la nécessité de reproduire une zone assez vaste du littoral entraîne le choix d'une échelle en plan assez petite, comprise par exemple entre 1/300 et 1/1000. Pour assurer une propagation correcte de la houle, il ne faudrait pas admettre de distorsion, d'où, par conséquent, une échelle en hauteur également petite et des caractéristiques de houle n'ayant, à échelle réduite, qu'une énergie très faible. Le matériau devrait alors avoir, sur le modèle, une très grande susceptibilité de transport pour reproduire, sous l'effet de ces petites vagues, les mêmes mouvements que le matériau réel.

Sans entrer dans le détail des théories du transport solide et des lois de similitude qui peuvent en être déduites, on conçoit aisément qu'un tel résultat ne pourra pas être obtenu, en général, avec un matériau de même densité que le matériau réel dont on réduirait simplement la granulométrie suivant une loi de similitude appropriée.

On est donc conduit à choisir un matériau de densité plus faible. Malgré cela, pour arriver à une similitude correcte de suspension, il faudrait adopter des matériaux dont la densité serait très voisine de celle de l'eau, et dans ce cas, outre la difficulté de trouver un tel matériau, on se heurte à des problèmes de décantation; le matériau fait, avec l'eau, une véritable émulsion qui modifie complètement le mécanisme de dissipation d'énergie de la houle sur la plage, en accroissant exagérément l'amortissement de la houle sur modèle.

Pratiquement, le choix se portera souvent sur un matériau de densité voisine de 1,4 (matière plastique, pierre ponce, charbon, etc.) dont on déterminera la granulométrie la plus appropriée pour obtenir des profils d'équilibre de plage représentative, à échelle réduite, la plage naturelle avec le minimum de distorsion. Il sera toutefois, en général, pratiquement impossible de n'obtenir, avec ces matériaux, aucune distorsion, compte tenu de l'échelle en plan

pratiquement imposée par les dimensions de la zone à représenter.

On sera donc amené à choisir pour l'échelle des caractéristiques de houle des valeurs qui pourront être différentes suivant l'importance relative de la réfraction ou de la diffraction sur le modèle.

Il est bien évident que si la plage est reproduite sur modèle avec une distorsion importante, le processus d'action de la houle dans le profil ne pourra pas être reproduit avec une précision suffisante pour examiner le détail de l'évolution de ce profil.

Par ailleurs, comme nous l'avons déjà signalé, la proportion de matériau en suspension sera le plus souvent très inférieure à la réalité et, de ce fait, le départ du matériau vers le large ne sera pas reproduit en similitude. On a pu observer fréquemment sur modèle que la houle produite par un batteur à houle avait généralement tendance à remonter le matériau vers le rivage et provoquait rarement une érosion de celui-ci avec les matériaux adoptés.

Par contre, une érosion est obtenue sur modèle assez facilement lorsqu'on reproduit la houle en la créant par le vent. Le courant de retour par le fond qui s'établit dans la masse liquide reproduit ce départ vers le large. L'emploi de ce mode de génération de la houle permet, en outre, d'obtenir, sur modèle, des profils d'équilibre plus plats et une distorsion plus réduite. On peut alors analyser avec plus de précision l'évolution de détail du profil.

Ce mode de reproduction de la houle est toutefois d'un emploi beaucoup plus délicat et suppose une installation très importante, pour engendrer à l'échelle désirée des houles de vents d'énergie suffisante.

Il n'en reste pas moins qu'il est pratiquement impossible de trouver un matériau qui permette de représenter sur le même modèle aux mêmes échelles, simultanément, l'action de la mer du vent et l'action de la houle du large. Comme nous l'avons vu, en effet, cela supposerait, en principe, un matériau ayant la même susceptibilité de transport aux échelles considérées, sous l'effet des courants produits par le vent dans la mer de vent et sous l'effet des courants de masse de la houle du large.

Ces diverses considérations montrent, qu'en pratique, on est conduit à rechercher des compromis compatibles avec la nature des problèmes à résoudre et nous allons voir maintenant comment on peut adapter à chaque cas, les divers modes de reproduction sur modèle qu'il est possible d'adopter, ainsi que les limites de validité des résultats qu'on peut en déduire.

Étude des problèmes liés au transport littoral et à l'évolution de la ligne du rivage

Comme nous l'avons vu, le point capital dans ce cas est de reproduire le transport littoral sous l'effet de l'obliquité de la houle. Celui-ci s'effectuant en majeure partie dans la zone située entre le déferlement et le haut du jet de rive par le long shore current et le beach drifting, il est en général suffisant en première approximation, pour examiner l'évolution de la ligne du rivage, de reproduire l'action sur le littoral de l'énergie correspondant à chaque direction de houle et d'engendrer la houle

/3

avec un batteur à houle dont on peut faire varier rapidement l'orientation, même si la houle est parfois une mer du vent. Il est important en effet, dans ce cas, de pouvoir faire agir successivement, sur le littoral, les diverses directions de houle, chacune avec ses caractéristiques moyennes de période et d'amplitude, et ceci dans des proportions correspondant à la répartition annuelle de l'énergie de chacune des directions. Ceci suppose donc qu'on puisse définir ce spectre d'énergie annuel en fonction des différentes directions de houle et que le modèle soit conçu pour permettre très rapidement ces changements de direction et de caractéristiques de houle suivant le programme donné déduit du spectre précédent.

Le laboratoire de SOGREAH possède deux bassins à houle équipés de batteurs spéciaux à éléments orientables avec commande à distance non seulement de l'orientation, de la période et de l'amplitude, mais aussi du déphasage des mouvements des batteurs (fig. 3).

Il est à noter, à ce sujet, qu'une houle de direction peu fréquente et de force très moyenne peut avoir toutefois une influence très importante sur l'orientation d'une flèche littorale par exemple.

C'est ainsi que, pour une étude destinée à rechercher le maintien du débouché de l'étang de Leucate, dans la Méditerranée, la solution que nous avons préconisée sur modèle s'est inspirée du fait que les tempêtes de sud-est, qui provoquaient une fermeture rapide du chenal par formation de flèches littorales, se terminaient toujours par une tempête d'est. La solution préconisée (fig. 4) a con-

Grau de Leucate. Tracé en plan des ouvrages futurs
 Grau de Leucate. Plan layout of futur structures

/4

sisté à construire une jetée enveloppante le long de laquelle pouvait se rétablir le transport littoral allant du sud au nord. Mais un profil plongeant a été réalisé à l'extrémité de cette jetée, de sorte qu'à la fin de la tempête le sable qui avait pu contourner l'ouvrage et se déposer devant le barrage mobile se trouvait repris par la houle d'est qui, en déferlant sur l'extrémité plongeante de la jetée, créait une agitation suffisante tangentiellement au barrage pour repousser, sur la partie nord du rivage, le dépôt qui avait pu se constituer devant le barrage. Ce dispositif a été réalisé dans la nature il y a quelques années et a donné toute satisfaction.

Ce genre de représentation des phénomènes, quoique nécessitant une certaine distorsion des échelles, est très satisfaisant pour examiner ces problèmes d'évolution de rivage. A l'occasion d'une étude de la protection de la baie de Callao, en face de Lima au Pérou, nous avons reproduit ainsi, sur modèle

cas, d'adopter pour l'échelle de la longueur d'onde de la houle une échelle plus voisine de l'échelle des hauteurs ou au contraire de l'échelle en plan, suivant l'importance respective de la réfraction ou de la diffraction dans le problème à résoudre.

C'est ainsi que, dans le cas de l'étude de différentes solutions envisagées pour l'implantation d'un port sur la côte du Dahomey soumise à un fort transport littoral, nous avons été conduits à utiliser trois modèles différents :

- l'un aux échelles $1/700^e$ en plan, $1/150^e$ en hauteur, avec de la pierre ponce où la longueur d'onde de la houle était reproduite à une échelle voisine du $1/150^e$, ce modèle étant destiné à l'étude d'une solution de port arrêtant le transport littoral;
- une deuxième aux échelles du $1/500^e$ en plan et du $1/150^e$ en hauteur avec du pollopas (matière plastique), où la longueur d'onde de la houle

Baie de Callao /5/ Callao bay
Modèle de reconstitution de la formation de la pointe A model used to reconstitute the formation of a headland

au $1/1500^e$ en plan et $1/500^e$ en hauteur, l'évolution géologique du rivage qui, d'après notre hypothèse, résultait d'une lente érosion par la mer du cône de déjection du Rio Rimac (fig. 5 et 6).

Pour tous ces problèmes, on est en général amené à ajuster les caractéristiques de la houle en même temps que la distorsion, compte tenu du matériau employé, de manière à reproduire un profil de plage correspondant au profil moyen naturel.

Toutefois, comme nous l'avons signalé précédemment, on peut être obligé aussi, dans certains

était reproduite à une échelle voisine du $1/500^e$, ce modèle étant destiné à l'étude d'une solution de port îlot et à l'examen des risques de formation d'un tombolo;

- enfin, un modèle partiel à grande échelle, aux $1/100^e$ en plan et $1/60^e$ en hauteur, avec de la poussière de charbon, donc très peu distordu, sur lequel a été étudiée une solution avec transit artificiel du sable qui nécessitait l'examen plus détaillé de l'ouvrage de pompage.

Ces divers ajustements d'échelles peuvent laisser

craindre que le modèle ne donne pas de conclusions très valables. En réalité, lorsqu'il s'agit de problèmes de ce type, c'est-à-dire de l'examen des modifications de la forme en plan du rivage, sous l'effet de houles du large assez obliques agissant sur une bande assez réduite du littoral, le modèle peut donner des indications très précieuses tant sur les modifications de la ligne du rivage que sur l'effet d'ouvrages destinés à contrecarrer cette évolution naturelle. Il n'en reste pas moins que ceci suppose un réglage préalable du modèle assez délicat, pour que les schématisations nécessaires ou les compromis adoptés permettent de reproduire avec une fidélité suffisante l'action des houles nature, tant du point de vue reproduction du profil de plage que du point de vue intensités relatives du transport littoral pour les différentes directions de houle.

Nous citerons encore, à l'appui de cette affirmation, les résultats obtenus dans l'étude de la protection du littoral devant la ville de Cotonou après la construction du port dont le tracé arrêtera le transport littoral en amont de la ville.

Sur un modèle général au $1/350^{\circ}$ en plan et au $1/100^{\circ}$ en hauteur, où le sable de la plage était représenté par de la pierre ponce, nous avons mis au point le dispositif général de protection. L'étude était d'ailleurs encore compliquée dans ce cas par la présence, à proximité de la ville, du débouché d'une lagune dont les courants d'échange avec la mer devaient être également reproduits (fig. 7).

Nous ne nous étendrons pas ici sur les modalités de reproduction de ces phénomènes, qui ont obligé également à rechercher une similitude d'effets, en ajustant les différents paramètres, car les lois de similitude de reproduction de l'effet des houles et des courants sur le matériau choisi n'étaient évidemment pas identiques.

Malgré cela, les nombreuses observations faites sur place depuis cette étude tout au long de la construction du port commencée il y a trois ans ont déjà largement confirmé les résultats du modèle et l'efficacité du système de défense préconisé.

En résumé, ce type de modèle réduit, malgré la distorsion qu'on est en général obligé d'admettre et les approximations qu'elle nécessite, peut donner des indications très intéressantes sur l'évolution de la forme en plan d'un rivage sous l'effet de houles du large de différentes directions. Si le débit annuel du transport solide est assez bien connu dans la nature, on pourra même déduire de ces modèles des ordres de grandeur sur la durée d'efficacité d'un épi d'arrêt en fonction de sa longueur ou sur l'évolution d'une flèche littorale. Par contre, la distorsion rendra délicate l'étude de détail de l'évolution du profil de la plage et le dimensionnement précis des ouvrages de protection, surtout si une partie importante du profil peut être remaniée par la houle.

Étude de l'évolution d'une plage dans son profil en travers et des phénomènes d'érosion dus à l'attaque frontale de la houle

De telles études peuvent nécessiter la reproduction plus précise de l'action de la houle sur toute la zone du profil en évolution.

Ceci suppose donc :

- d'une part, que la distorsion des échelles soit la plus réduite possible pour que les phénomènes de réfraction, de réflexion et de diffraction autour des ouvrages de protections envisagés soient simultanément en similitude;
- d'autre part, que le départ du matériau vers le large soit reproduit sur modèle dans des conditions analogues à la réalité.

L'étude des différents profils des plages naturelles semble indiquer que celles qui présentent des pentes assez plates en perpétuelle évolution sont, en général, dans des régions où règnent des variations de niveau importantes et de fréquentes mers de vent assez courtes et irrégulières.

On constate que la création sur modèle de la houle par le vent permet également d'obtenir des plages assez plates et de reproduire par le courant de retour qu'engendre le vent au contact du fond un départ du matériau vers le large représentant bien l'érosion constatée dans la nature pour certaines conditions de tempêtes :

Différentes études de ce type ont été effectuées à la SOGREAH :

- Tout d'abord, dans un canal, on a fait agir indépendamment ou simultanément un batteur à houle et un éjecteur branché sur une canalisation d'air comprimé pour reproduire le basculement du profil de la plage de Cannes entre l'hiver et l'été;
- puis, ce canal a été équipé avec des ventilateurs, lors de l'étude de l'évolution d'un profil d'une plage allemande soumise à une mer de vent. La houle était engendrée seulement par ces ventilateurs et, en outre, étaient reproduites les variations de niveau dues, d'une part à la marée, et, d'autre part à des surélévations de niveau moyen importantes dans cette région.

L'étude d'ensemble de la protection de cette dernière plage contre l'érosion a été effectuée ensuite à trois dimensions dans un bassin de 600 m^2 équipé de 32 ventilateurs de 2 ch chacun. Les échelles étaient le $1/100^{\circ}$ en plan et le $1/60^{\circ}$ en hauteur, avec, comme matériau représentant le sable de la plage, une matière plastique broyée. Le bassin a été équipé également des dispositifs nécessaires à la reproduction des variations de niveau de marée et des variations du niveau moyen dont l'amplitude peut être du même ordre (fig. 8 et 9).

Sur le modèle, l'action des diverses tempêtes types liées aux variations de la marée, d'une part, et du niveau moyen de la mer, d'autre part, a permis d'obtenir des évolutions comparables à celles de la nature sur une zone apparemment équivalente correspondant à 500 m à partir de la dune littorale, soit sur 5 m modèle.

Il faut signaler toutefois que si l'évolution des bancs de sable qui peuvent se déplacer dans toute la zone comprise entre 500 m et le rivage a pu être représentée dans de bonnes conditions, la formation de ces bancs a été beaucoup plus délicate. Ces bancs sont formés apparemment au cours des périodes de houles longues du large dites « houles de beau temps » qui sont plus régulières et sont donc assimilables aux barres formées par les houles océaniques.

La reproduction de la formation de ces bancs sur modèle a été possible en faisant agir le batteur à

- 7/ Etude sur modèle
de la protection
du littoral devant
la ville de Cotonou
contre l'érosion
après construction
du port.

*Model investigation
of the protection
of the coast
at Cotonou against
erosion after
the construction
of a harbour.*

6/ Reproduction
sur modèle
de l'évolution
géologique
du littoral
devant la ville
de Lima.

*Reproduction
of geological coast
development
at Lima
on a model.*

8/ et 9/ Bassin d'étude
pour évolution de plage
sous l'effet de houles
produites par le vent.

*A tank
for a study
of beach development
due to wind waves.*

houle dont était également équipé le bassin à vent, mais pendant un temps très court, car on a constaté rapidement que le profil d'équilibre vers lequel tendait la plage sous l'effet de cette houle était nettement plus raide que dans la nature.

Il est vraisemblable que, dans la nature, ces houles agissent également trop peu de temps pour pouvoir modifier de façon sensible le profil général de la plage, mais on peut penser aussi que, comme dit précédemment, puisque l'organisation des courants dans une houle venant du large est différente de celle qui s'établit dans une houle de vent, le matériau utilisé sur le modèle n'évoluait pas suivant la même similitude sous l'effet de houles du large, compte tenu en particulier d'une plus faible capacité de suspension que dans la nature.

On retrouve donc ici la difficulté que nous avons évoquée précédemment, concernant la quasi-impossibilité de trouver, pour un modèle à une échelle relativement petite, un matériau donnant une suspension suffisante sur modèle pour que les courants de masse de la houle puissent le transporter dans les mêmes conditions que dans la nature.

Il semble que ce résultat ne peut être atteint qu'à une échelle suffisamment grande pour permettre le choix d'un matériau approprié. Mais ceci n'est évi-

demment possible que pour l'examen, soit d'un problème très local ne nécessitant que la reproduction d'une zone limitée, soit d'un aspect particulier d'un problème plus général.

Dans le cas où on est amené à examiner des problèmes d'érosion par houle frontale venant du large à une échelle trop petite pour pouvoir reproduire correctement le départ vers le large du matériau modèle, on peut tourner la difficulté en utilisant, sur modèle, une houle de vent pour reproduire cette érosion. Ceci n'est évidemment qu'un artifice qui revient à substituer l'entraînement du matériau vers le large en suspension dans le courant de masse, par un départ par charriage dans le courant de retour sur le fond, dû au vent.

Cet artifice peut être toutefois admissible dans la mesure où le réglage préalable des caractéristiques de houles produites sur modèle permet de reproduire des évolutions observées dans la nature. C'est ainsi que nous avons reproduit, dans certains essais en canal à houle, des érosions ou des basculements de profil de plage en faisant intervenir tantôt de la houle de vent, tantôt de la houle de batteur et même, parfois, en combinant les deux modes de reproduction.

CONCLUSION

L'étude expérimentale sur modèle réduit hydraulique peut donc apporter dans l'étude des problèmes liés aux évolutions du littoral sous l'action de la houle des indications très intéressantes malgré les difficultés rencontrées pour reproduire, en similitude, l'action sur le matériau constitutif du littoral des divers paramètres liés à la nature et à la propagation de la houle.

Si, pour une analyse des évolutions de la ligne du rivage sous l'effet de houles obliques, on peut en général admettre un modèle un peu distordu et reproduire la houle par un batteur à houle, par contre, pour l'étude de l'évolution d'un littoral en érosion sous l'effet d'une houle sensiblement frontale, la reproduction de la formation de la houle par

le vent peut être indispensable, soit pour représenter effectivement l'action des mers de vent, soit comme artifice pour obtenir le départ vers le large du matériau modèle.

Il ne faut pas perdre de vue toutefois que le modèle réduit ne peut être qu'un outil susceptible de donner des indications précieuses ou de préciser des idées. Le manque de données de base sur les houles et les débits de transport, ainsi que les approximations que nécessitent la conception et le réglage du modèle ne peuvent permettre en général de donner à ces résultats une valeur quantitative précise. Il sera donc toujours utile d'en vérifier les conclusions sur place par des relevés périodiques effectués après la construction des ouvrages, afin d'ajuster si nécessaire le dimensionnement de ceux-ci.

Abstract

Methods of investigating coastal hydraulics problems on scale models

by L. Greslou *

This article gives a brief review of the possibilities and the range of applicability of the scale model as a means of hydraulic research into changes undergone by a sea coast.

Considering only the action of waves on a sea shore, some of the conditions for its representation in correct similitude on the model are as follows:—

* Engineer at SO.GR.E.A.H., Grenoble.

- 1) Reproduction of the main aspects of wave propagation—i.e. refraction, diffraction, reflection—which requires an undistorted model;
- 2) Reproduction of the mode of wave generation, for waves from the open sea generally do not produce the same beach profiles as local wind waves;
- 3) Reproduction of the effect of waves on the beach material. It is very difficult to choose a suitable model material as Froude similitude is seldom achieved; not only the grain size of the material, but especially its density must be carefully determined if it is to show the same "potential transportability" as the prototype material.

The model and prototype materials should, in theory, be in similitude with regard to the following properties:—

- (i) Grain acceleration from rest and sinking velocity;
- (ii) Sediment discharge for a given wave size;
- (iii) Respective proportions of bed and suspended sediment loads.

These conditions cannot generally be reconciled, except in very special cases where a very local effect is investigated to a comparatively large scale. The choice of a bed material and the corresponding model scale distortion and wave reproduction scales thus finally depends on the type of problem to be solved. This may also apply to the mode of wave generation.

In view of this difficulty, an attempt has been made to classify such problems, as follows:—

Investigation of problems associated with sediment drift along a coast and changes in the shore line.

The all-important requirement here is to reproduce the sediment drift as affected by wave obliquity, most of which takes place within the area between the breaking waves and the top edge of their wash.

In this case, even though wind waves may sometimes be involved, paddle generating equipment may be adequate if rapidly adjustable for direction so as to enable the energy spectrum resulting from the various wave directions during the year to be reproduced.

This type of representation provides a perfectly acceptable means of studying the development of a coastal spit, the silting-up of a harbour, methods of keeping a lagoon in open communication with the sea, etc.

Though these models are usually slightly distorted and involve a certain amount of compromising, they can nevertheless be made to supply some very interesting indications. It is difficult, however, to use them for really accurate quantitative interpretation of the effects of the requisite structures and the determination of their dimensions.

Investigation of the development of a beach cross-section and erosion due to head-on wave attack.

This type of problem necessitates a more precise reproduction of wave action throughout the developing cross-section and, especially, of sediment drift out to sea.

It is difficult to reproduce these effects with a paddle type generator, for the outward current along the sea bed associated with real-life wind waves is not reproduced on the model. Wind generating facilities may prove necessary in such cases; a 600 square metre tank featuring a set of thirty-four 2 H.P. fans has been built at S.O.-G.R.E.A.H. to investigate a protection scheme for a beach subjected to wind waves at various sea level conditions.

The adjustment of such a model is obviously a very delicate matter; an essential prerequisite is the reproduction of developments observed in real life, with the waves and water levels which are likely to have caused them.

The authors have found by experience that such effects can be very satisfactorily reproduced with such wind wave generating equipment, which also enables very flat beaches to be obtained on the model with very little scale distortion.

Conclusion.

An experimental hydraulic model study can contribute some very interesting indications for problems associated with the effect of wind waves on coasts and beaches; such information provides very useful guide lines for coastal development and protection work, despite the difficulty of reproducing to a correct scale the effects of the various factors associated with wave type and propagation upon the shore.

Though a model with slight scale distortion and conventional wave generating equipment is generally adequate to study the effects of oblique wave attack upon a sea shore, a study of shore erosion under practically head-on wave attack may, to be really accurate, also require means of simulating wind wave formation in order to reliably reproduce the action of such waves, or to produce the requisite "seaward" drift of the model shore material.