Utilisation des modèles réduits sédimentologiques pour prévoir l'influence d'un ouvrage maritime sur l'évolution d'un littoral

Use of sedimentological scale models for predicting the effect of a coastal engineering structure of the behaviour of a sea coast

Claude Migniot

Ingénieur en Chef
Laboratoire Central d'Hydraulique de France

Introduction

La complexité des mouvements sédimentaires le long des côtes, sous l'action des houles, des courants et des vents, nécessite de recourir à des recherches systématiques avant de réaliser un ouvrage maritime, qu'il s'agisse de la construction d'un grand ensemble portuaire, d'un petit port de plaisance ou d'une simple défense du littoral.

Suivant l'orientation des ouvrages ou de la côte par rapport aux houles, la nature des sédiments transportés, les profondeurs le long des digues, l'importance des courants de houle et des courants d'expansion latérale dans les zones abritées, les atterrissements sédimentaires pourront se former et se développer de façon très différente. Il est difficile, dans ces conditions, d'extrapoler à un cas particulier un phénomène constaté dans un site géographique déterminé et l'on doit faire appel à des techniques plus poussées que la simple intuition basée sur l'analogie.

Parmi ces techniques les études sur modèle réduit physique restent le plus souvent le seul moyen scientifique valable susceptible d'apporter une solution pour :

- définir le processus exact des mouvements sédimentaires,
- prévoir l'évolution d'un littoral au cours des temps si aucun ouvrage n'était réalisé,
- rechercher le type d'ouvrage et l'implantation optimale pour supprimer ou tout au moins réduire une érosion ou une sédimentation.

Il est bien évident que ces recherches en modèle réduit ne peuvent avoir un sens que si elles sont basées sur une bonne connaissance des phénomènes naturels qui interviennent, c'est-à-dire, dans le cas d'un littoral, de la houle, des marées, des courants, des vents, de la configuration des fonds et de leur nature sédimentologique.

La conception d'un modèle réduit La similitude

Similitude

C'est en se basant sur cet ensemble des phénomènes naturels et après avoir bien précisé les problèmes qui doivent être étudiés que l'on peut concevoir cette vaste machine à calculer analogique qu'est un modèle réduit.

Les échelles du modèle seront définies à partir des lois de similitude hydrauliques et sédimentologiques qui permettent de représenter fidèlement à une échelle réduite :

- la géométrie de la zone à étudier ; les dimensions du modèle et leurs homologues en nature étant dans un rapport constant ;
- les phénomènes dynamiques, les forces qui règnent en des points homologues dans le modèle et en nature respectant une relation constante. En particulier on devra respecter *le rapport entre les forces d'inertie* (proportionnelles au carré des vitesses V^2) et *les forces de gravité* (proportionnelles à gH) :

$$\frac{V^2}{gH} = \frac{v^2}{gh} = Fe$$

on en déduira que l'échelle des vitesses est égale à la racine carrée de l'échelle des hauteurs.

On devra également s'imposer sur le modèle le même type d'écoulement qu'en nature c'est-à-dire une valeur déterminée du *rapport entre les forces d'inertie aux forces de frottement visqueux*

$$\frac{VH}{\nu} = \frac{vh}{\nu} = Re \geq 500$$

De même pour avoir les mêmes lignes d'eau on devra s'imposer une similitude de perte de charge (similitude des forces de frottement hydraulique) ;

- les phénomènes sédimentologiques en conservant le même régime d'écoulement autour du grain, les mêmes conditions d'entraînement, les mêmes trajectoires des particules en suspension, les mêmes rapports entre quantités transportées en suspension et en charriage, enfin des échelles de temps qui permettent de représenter sur le modèle pour des mêmes actions hydrauliques des évolutions comparables des fonds en un temps déterminé.

Conception

Les échelles étant définies on devra réaliser le modèle pour que les conditions aux limites soient correctement représentées, ce qui conduit à une dimension du modèle déterminée.

Pour étudier par exemple l'évolution d'un littoral après construction d'un ouvrage portuaire ou de défense, on devra reproduire une étendue de côte de 4 à 6 km et atteindre des profondeurs de l'ordre de — 20 m. On choisira des échelles en plan comprises entre le 1/150 et le 1/200 en admettant une certaine distorsion des hauteurs. L'examen de la stabilité d'un ouvrage nécessite des étendues moins importantes mais une plus grande précision dans le détail de l'ouvrage, les échelles seront comprises entre le 1/20 et le 1/70 sans distorsion. La représentation d'une évolution de tout un ensemble

Figure 1 — Vue d'un modèle au 1/150. Oued Sebou

Figure 2 — Vue d'un modèle au 1/40. Digue de l'Adour

Figure 3 — Vue d'un modèle au 1/1250. La Loire

géographique comme par exemple la Baie du Mont Saint Michel ou l'Estuaire de la Loire devra au contraire faire appel à des échelles en plan variant entre le 1/500 et le 1/2000 avec une forte distorsion que l'on prend en général voisine de la racine cubique de l'échelle en plan pour respecter les trajectoires des particules solides en suspension dans les eaux (Photos 1 — 2 et 3).

La représentation des phénomènes hydrauliques et sédimentologiques

Le modèle étant réalisé dans une vaste cuve avec toute la topographie de ses fonds et de sa côte il faut lui donner la vie en représentant l'ensemble des phénomènes hydrauliques et sédimentologiques que l'on rencontre en nature.

Phénomènes hydrauliques

La marée sera reproduite à l'aide d'un générateur qui permet d'imposer une loi de variation du niveau des eaux identique à celle de la nature avec la variation plus ou moins sinusoïdale de la cote d'eau, les différences de marnages entre les vives eaux et les mortes eaux. En introduisant un débit d'eau constant dans le

Figure 4 — Générateur de marée et loi de niveau

Figure 5 — Générateur de houle pivotant

Figure 6 — Différents types de houles représentés en modèle

modèle et en enlevant un débit variable suivant une loi déterminée, on obtient cette loi de marée et, en 10 à 30 mn, suivant les échelles, on représentera les 12 h 25 mn d'une marée naturelle (Photo 4).

Les courants généraux ou les courants de marée seront reproduits aux limites du modèle en introdui-

sant ou en enlevant un certain débit réparti lui aussi suivant les valeurs mesurées en nature. Une vis d'Archimède immergée dans un canal ceinturant le modèle et tournant à une vitesse déterminée dans un sens ou dans un autre assurera la loi des courants en flot ou en jusant.

Un générateur de houle pivotant permettra de reproduire les différentes houles observées en nature avec leurs directions, leurs périodes, leurs amplitudes et leurs fluctuations dans le temps. Il est possible de cette façon de représenter très exactement tout ce qui se passe en nature au cours d'une année moyenne avec les alternances de tempêtes —qui ne dureront que quelques minutes sur le modèle —, de houles moyennes et de beaux temps. (Photos n° 5 et 6).

Les crues des rivières seront éventuellement reproduites en introduisant un débit programmé représentant la loi des débits au cours d'une année.

Phénomènes sédimentologiques

Les sédiments naturels, qu'il s'agisse de galets, graviers, sables ou vases seront schématisés en utilisant des matériaux plus légers et de granulométrie appropriée qui permettront d'avoir sous les mêmes actions hydrauliques le même début d'entraînement des grains et les mêmes conditions de transport en charriage, saltation ou suspension.

Dans ce domaine, la grande expérience acquise depuis plus de trente ans par le L.C.H.F. permet d'avoir une bonne représentation des phénomènes en respectant non seulement l'évolution des fonds mais les triages granulométriques constatés en nature. Pratiquement en un jour sur un modèle sédimentologique littoral, on représentera l'ensemble des phénomènes qui se produisent en un an en nature. (Figure n° 7).

Les études sédimentologiques littorales en modèle réduit

Connaissance des phénomènes naturels

Les études effectuées en modèle réduit permettent tout d'abord d'avoir une meilleure connaissance des

Figure 7 — Triage granulométrique représenté en modèle réduit

Figure 8 – Mouvements orbitaires de la houle

Figure 9 – Clapotis

Figure 10 – Déferlement

Figure 11 – Courant dans le fluide sain

interactions entre fluide et solide, entre les actions hydrodynamiques et les sédiments. En particulier, les recherches en canal ont apporté les éléments qui ont été utilisés pour définir les conditions de déferlement des vagues sur les rivages, les vitesses instantanées engendrées, les courants de houles, les débuts d'entraînement

des sédiments naturels et, d'une façon générale, le comportement des sédiments sous les actions des courants et de la houle. Tous ces résultats ont ensuite été vérifiés en nature et sont à la base des lois ou tout au moins des connaissances que l'on a sur le dynamique sédimentaire. (Photos n° 8 - 9 - 10 et 11).

L'étude de l'évolution d'un littoral sans ouvrage de protection

Sur les modèles à trois dimensions, ou cuve à houle, il a été possible, partant des connaissances de cette dynamique sédimentaire et de sa représentation en modèle réduit, de rechercher comment évoluera un littoral soumis à des actions océanographiques connues agissant sur des matériaux déterminés.

Les mouvements dans le profil, le transit littoral, les engraisements ou les érosions par suite d'une modification des apports sédimentaires peuvent être prévus sur de tels modèles.

C'est ainsi que dans le cas de la côte d'Anglet on a pu représenter très exactement l'évolution du littoral au cours des dernières années avec la destruction progressive du mur de protection du front de mer, les érosions devant les Sables d'Or, les menaces sur Marinella et le recul rapide de tout le secteur situé au centre et au Nord de Chiberta. (Photos n° 12 et 13).

Figure 12 – Destruction du front de mer sur le modèle (Anglet)

Figure 13 – Destruction du front de mer en nature

Sur le modèle d'Anglet on constate que les petits fonds marins sont littéralement "rabotés" par les houles à des cotes de - 4 et de - 5 m où un plateau de 300 m de largeur apparaît. Les vagues n'étant plus freinées par les petits fonds viennent attaquer directement l'estran qui se dégrade à une grande rapidité en partant tout d'abord des approches de l'hippodrome et en gagnant progressivement vers le Sud. On avait prévu en 1974 que ce recul pourrait atteindre 120 mètres environ en 1984, 150 m en 1990, l'érosion moyenne de 12 m par an au cours des 10 premières années se réduisant progressivement pour passer à 5 m par an les années suivantes.

En 1984, si aucun ouvrage n'avait été réalisé, la limite des pleines mers de vives eaux se serait située très en arrière de l'Hôtel Marinella, qui deviendrait un îlot isolé de la terre, le mur de protection des Sables d'Or aurait été entièrement contourné, le Golf et l'Hippodrome très endommagés. Seuls les abords immédiats et la petite jetée Sud se seraient maintenus, les sables et la madrague continuant à s'ébouler dans le chenal de navigation à chaque tempête et à l'obstruer.

En une dizaine d'années, plus de 3 millions de m³ de sable auraient disparu devant le littoral d'Anglet.

Les recherches de solutions de protection d'un littoral – L'exemple d'Anglet et d'Agadir

a) La côte d'Anglet

Devant l'ampleur de ces phénomènes d'érosion, que la nature a malheureusement confirmée, différentes solutions ont été examinées sur le modèle. Ces solutions devaient tenir compte de deux impératifs : les possibilités de réalisation en nature et le prix de revient.

Dans une mer aussi forte que celle de la côte d'Anglet les ouvrages bas, que l'on souhaite préconiser, ont dû être abandonnés pour permettre aux entreprises de travailler par toutes marées. Dans une mer sans marée ou à faible marnage le problème aurait été évidemment beaucoup plus simple tant sur le plan technique qu'économique.

Des épis droits, des épis en T, des rechargements à la côte et des déversements au large de produits de dragages ont été successivement étudiés. Il a été démontré que des épis en T ou des petits brise-lames donnaient de bons résultats pour la stabilité de la plage mais leur coût était prohibitif. Des épis droits associés à des rechargements offraient un compromis entre la technique et l'économie. Il a donc été décidé de protéger en priorité la zone urbanisée de la partie Sud d'Anglet, de freiner la dispersion des sédiments vers le chenal et de laisser une zone sauvage entre les deux où les érosions ne seraient pas supprimées.

On a retrouvé après construction de ces ouvrages les prévisions du modèle et il suffit de se souvenir de l'état du littoral en 1973 pour comprendre toute l'amélioration apportée par les ouvrages de protection. (Photos n° 14 et 15)

Dans tous les cas les études en modèle réduit avaient montré qu'en se limitant aux ouvrages retenus on freinait une érosion mais on ne la supprimait pas, sauf aux abords immédiats des Sables d'Or où le recul du littoral aurait atteint 14 m par an si rien n'avait été fait.

Figure 14 – Reconstitution de la plage au Nord des Sables d'Or en modèle.

Figure 15 – Reconstitution de la plage au Nord des Sables d'Or en nature

A 2400 m au Sud de l'embouchure les essais montrent qu'avec une côte partiellement aménagée l'érosion atteindra encore 9 m par an entre 1976 et 1982 et 5 m par an entre 1982 et 1988.

Ici encore ces prévisions du modèle, que l'on croyait pessimistes, se trouvent confirmées.

Pour réduire les érosions, il faudrait aller plus loin dans les investissements, réalimenter artificiellement ce littoral exsangue, non seulement par des déversements de produits de dragages par petits fonds, mais par une réalimentation de l'estran, et renforcer les ouvrages de génie civil.

b) La côte Sud d'Agadir

L'exemple de la côte Sud d'Agadir est un autre exemple de l'utilisation d'un modèle réduit pour prévoir l'érosion d'un littoral.

Il a été possible de définir l'influence de la construction du port sur l'équilibre de la plage Sud et de montrer que l'arrêt du transit littoral allait entraîner d'une part une flèche sédimentaire en extrémité de la jetée principale, d'autre part un recul de la grande plage à raison de 5 m par an environ, cette valeur diminuant ensuite progressivement au cours du temps.

Figure 16 – Erosion du littoral en nature (Agadir)

Figure 18 – Vue générale de la plage d'Agadir après aménagement

Figure 17 – Protection de la plage d'Agadir par un brise-lames

En nature, ces prévisions de 1950 se trouvèrent confirmées et l'on assista en 1963 à de sérieuses dégradations du littoral le long duquel devaient se développer les installations touristiques. (Photo n° 16).

Différents systèmes de défense furent alors étudiés sur un nouveau modèle réduit en 1964. Une protection par des épis droits ne donna pas de résultats satisfaisants, le sable étant trop fin pour rester piégé entre les ouvrages.

On rechercha alors à réalimenter la plage par des produits de dragages provenant de la flèche sédimentaire qui se forme à l'entrée du port. Les résultats montrent que, dans le cas d'Agadir, il fallait déposer les produits de dragages par des fonds de -1 à -3 m sous le zéro hydrographique (dépôt de $250\,000\text{ m}^3/\text{an}$).

Ces dépôts permettent de stopper l'érosion de la plage mais non de la reconstituer. Il a fallu leur associer la construction d'un brise-lames de 200 m de longueur implanté par des fonds de -3 à -4 m pour obtenir très rapidement une avancée spectaculaire du littoral et une plage de grande étendue dans toute la zone située à l'abri du brise-lames et entre ce dernier et le port. Plus au Sud, cet ouvrage n'apportait pas d'amélioration, la côte continuant à reculer mais dans un secteur non urbanisé (Photos n° 17 et 18)

Figure 19 – Influence d'un épi en T (modèle). Comparaison nature-modèle des évolutions de fonds

c) Les plages alvéolaires

Une autre solution étudiée en modèle réduit consistait à réaliser des épis en T. Les résultats obtenus tant en modèle qu'en nature furent assez spectaculaires à l'abri des ouvrages où des plages alvéolaires se forment très rapidement. Les matériaux étant empruntés latéralement, la plage entre les épis subissait malheureusement une érosion nécessitant d'associer les épis en T à des rechargements. (Figure 19).

Figure 20 – Ouvrage de haute plage (Hauteville)

d) Les ouvrages de protection de haute plage

Pendant très longtemps on s'est contenté pour assurer la protection du littoral de réaliser des ouvrages de haute plage constitués par une digue longitudinale plus ou moins réfléchissante. (Photo n° 20)

Les résultats obtenus montrent qu'un tel système de défense, non seulement n'apporte pas d'amélioration dans la tenue de la plage mais peut être très préjudiciable à sa stabilité si l'ouvrage est réfléchissant. On peut assurer que partout où un ouvrage longitudinal réfléchissant a été réalisé, la plage a disparu mettant les fondations de cet ouvrage en péril. Nos côtes ont malheureusement de nombreux exemples de ces ouvrages préjudiciables à l'équilibre du littoral et il serait souhaitable de ne réaliser que des digues longitudinales à faibles pentes ayant un coefficient d'absorption de la houle élevé évitant les réflexions.

L'influence d'ouvrages maritimes sur l'évolution du littoral

L'équilibre d'un littoral est en général très précaire et il suffit que des interventions humaines soient réalisées pour entraîner des évolutions importantes du trait de côte. Suivant l'emplacement des ouvrages par rapport à la répartition du transit littoral et des mouvements dans

Figure 21 – Ouvrages implantés par petits fonds (bassin de prise d'eau)

le profil, ces réalisations peuvent perturber plus ou moins l'évolution des fonds.

a) Ouvrages implantés par petits fonds

Les ouvrages de petite dimension, implantés à l'intérieur de la fosse de lévigation, c'est-à-dire très près de la côte, peuvent être constitués par des bassins de prise d'eau ou de petits abris pour des bateaux de tirant d'eau inférieur à 2 ou 1,50 m.

De tels ouvrages se comportent comme des épis et n'agissent pratiquement que sur le transit d'estran ; ils n'arrêtent pas le transit général en tempête qui représente la plus grande masse des matériaux déplacés (Photo n° 21).

b) Ouvrages de dimensions moyennes implantés au voisinage de la barre

Ces ouvrages posent les problèmes les plus délicats car ils sont situés en plein dans la zone du transit littoral actif. Ils dévient les mouvements sédimentaires qui viennent se concentrer le long du brise-lames extérieur avec formation d'un haut fond en extrémité, c'est-à-dire au voisinage de la passe d'entrée (Photos n° 22-23-24).

La majeure partie du transit littoral se trouvera arrêtée par de tels ouvrages et il faudra attendre que les fonds se soient exhaussés au large pour qu'une partie du transit soit rétablie. La zone sous le vent risque donc d'être érodée tout au moins pendant quelques années à la suite de la construction.

Figure 22 – Ouvrages implantés au voisinage de la barre

c) Ouvrages de grandes dimensions implantés par fonds de 15 m environ

De tels ouvrages arrêtent la totalité du transit littoral et les études en modèle réduit permettent de prévoir les formes d'accumulation et d'érosion de part et d'autre (Photo n° 25).

Dans la zone au vent, on devra se méfier immédiatement après la construction du port d'un approfondissement passager le long de l'enracinement des ouvrages à la rencontre du courant de houle qui se trouvera dévié vers le large. Quelques temps après cette zone se trouvera au contraire sous l'effet de la sédimentation par suite de l'arrêt des sables et de leur accumulation (Figure n° 26).

Une attention particulière doit être donnée à la face sous le vent des ouvrages portuaires où l'on peut ren-

BRISÉ LAMES PARALLÈLE A LA CÔTE

BRISÉ LAMES INCLINÉ

Figure 23 – Influence de l'inclinaison de la digue extérieure

Figure 24 – Influence d'une réduction du transit par réalisation d'épis dans la zone au vent.

Figure 25 – Ouvrages de grandes dimensions arrêtant le transit littoral. Nature-Modèle.

Figure 26 – Ouvrages de grandes dimensions, schéma des mouvements sédimentaires.

contrer des accumulations locales dans la zone abritée soumise aux courants d'expansion latérale de la houle (Figure n° 27).

d) Formation de flèches en extrémité des ouvrages portuaires

Ici encore les modèles réduits sédimentologiques permettront de prévoir la forme et l'extension des accumulations en extrémité des ouvrages portuaires.

Figure 28 — Formation de flèche à Pointe Noire sur le modèle

Figure 27 — Accumulation des sables au Nord du Port de Safi

Figure 29 — Formation de flèche à Pointe Noire en nature

NATURE PERIODE 1958 - 1961

MODELE PERIODE 1958 - 1961

Figure 30 — Comparaison des résultats nature-modèle à Pointe Noire

Figure 31 — Formation de flèche à Agadir modèle

Figure 32 — Formation de flèche à Agadir nature.

Suivant l'importance des apports, l'obliquité des houles par rapport à l'ouvrage, les profondeurs, la flèche prendra une orientation qui lui est propre et qui, en régime "saturé" aura une inclinaison de 55 à 60°, cette valeur augmentant lorsque le régime est "sous-alimenté".

Les prévisions faites pour le port d'Agadir et de Pointe Noire illustrent ces deux types de formation de flèche que l'on a retrouvés en nature une dizaine d'années après les prévisions du modèle (Photos n° 28-29-30-31-32).

*

On pourrait s'étendre beaucoup plus sur l'utilisation des modèles réduits sédimentologiques pour prévoir l'évolution d'un littoral.

Dans l'état actuel, après plus de trente années d'études sur de tels modèles et un contrôle entre les prévisions qui ont été faites et les réalisations en nature, on peut assurer que les recherches en modèle réduit répondent parfaitement à ce que l'on était en droit d'attendre d'elles. De tels modèles qui permettent de mieux comprendre les phénomènes complexes naturels, de prévoir l'évolution d'un littoral, de rechercher le type de solution le plus rationnel à réaliser, offrent aux Pouvoirs Publics ou aux Collectivités locales un admirable outil de travail sur lequel on peut visualiser une multitude de phénomènes qui échappent à l'observation et aux prévisions lorsque ces phénomènes sont à l'échelle de la nature.

LA HOUILLE BLANCHE

Boite postale 264
F 38008 GRENOBLE CEDEX

*rappelle ses
volumes hors-série*

PRIX AU 1^{er} NOVEMBRE 1979

Génissiat (1950). — 296 p.....	150 F
Hydraulique et Electricité Françaises (en anglais) (1950). — 413 p.	200 F
Bort (1953). — 367 p.....	175 F
Donzère-Mondragon (1955). — 486 p.....	250 F
Le Marais Vernier (1957). — 60 p.....	60 F
Tignes (1958). — 440 p.....	210 F
Influence des rejets thermiques sur le milieu vivant en mer et en estuaire. (Journées de la Thermo-Ecologie-Centre Océanologique de Bretagne — Novembre 1976). — 622 p.....	200 F

SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE / ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES

Recherches sur les turbines hydrauliques (Symposium de Nice, 16-20 septembre 1960). — 431 p. (repr. Xérox)	460 F
--	-------

SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE: JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE

1/ Résumé paru dans <i>La Houille Blanche</i> , n° 27 (B-1949). — 104 p.	48 F
2/ Transport hydraulique et décantation des matériaux solides (1952). — 224 p. (repr. Xérox)	205 F
3/ Pluie, évaporation, filtration et écoulement (1954). — 316 p. (repr. Xérox)	290 F
4/ Les énergies de la mer (1956). — 752 p.....	300 F
5/ Turbines et pompes hydrauliques (1958). — 730 p.....	290 F
6/ L'hydraulique souterraine (1960). — 664 p.....	265 F
7/ Bulles et gouttes : la tension superficielle en hydraulique (1962) — 624 p.	300 F
8/ Les instabilités en hydraulique et en mécanique des fluides (1964). — 674 p. (repr. Xérox)	600 F

Voir en page 2 de couverture la liste complète des numéros de la collection et des numéros spéciaux