EROSION ET PROTECTION DES CÔTES

par **Martin A. MASON**

Chief of the Research Section Beach Erosion Board

English text p. 29

I. — L'IMPORTANCE DES PROBLÈMES L'ORGANISATION DE LEURS ÉTUDES

L'importance des études de côtes réside dans les conséquences géographiques et économiques des modifications du littoral. D'habitude, l'observateur superficiel n'aperçoit nettement ni les conséquences de ces modifications naturelles, ni celles des changements qui en résultent pour les systèmes d'écoulement des eaux intérieures et les chenaux navigables qui débouchent sur les côtes. Cependant, ces conséquences sont importantes et à portée lointaine, comme le savent bien les observateurs avertis qui les étudient sur une période relativement longue.

Aux Etats-Unis, par exemple, on peut dire que l'effet d'ensemble sur la totalité de la ligne des côtes est une perte de terrain ; on peut l'évaluer à un recul d'un pied (30 cm.) au minimum sur un périmètre de quelque 52.000 milles (84.000 km.) en y comprenant les rives des Grands Lacs. Dans quelques régions, ces pertes sont généralisées et très importantes ; citons par exemple la région de la baie de Chesapeake où l'érosion a fait disparaître en une génération des îles entières et où les rivages non protégés de terres cultivées ou bâties se sont érodés à des vitesses atteignant 15 pieds (4 m. 50) par an.

Dans d'autres régions, il y a eu un gain de terrain, comme à Fire Island Inlet sur la côte Sud de Long Island, où les transports littoraux sont bloqués par une jetée de construction récente.

En général, les modifications de la côte se font à l'échelle macroscopique et à l'échelle microscopique. Les plus considérables sont celles qui font intervenir une modification physiographique importante, par exemple l'érosion des caps ainsi que la formation et la croissance concomitantes de flèches littorales et de barres. Citons également le phénomène très important de la formation des cordons littoraux et des lagunes qui leur sont associées. Ce dernier phénomène est à l'origine des caractéristiques actuelles de la côte sud de Long Island et de celles du New-Jersey,

familières à la plupart des Américains ; il constitue un des aspects les plus importants des modifications des côtes par atterrissement. Le cordon littoral joue le rôle d'un rempart de protection pour la lagune ; cette dernière, en général, se comble lentement, par suite de l'envasement produit par les cours d'eau qui y débouchent. Finalement, il y a gain de terrain sur la surface de l'eau. Cette évolution, longue et à grande échelle, a des conséquences importantes sur la faune et la flore. Par exemple, l'eau des lagunes isolées de la mer est diluée par l'eau douce ; sa salinité décroît au point que la faune du lieu se transforme et finit par présenter les caractères d'une faune d'eau douce. Cette transformation a une portée économique, en particulier pour l'ostréiculture et présente une importance matérielle considérable pour la flore et la faune sauvages.

Les systèmes qui assurent l'écoulement des eaux intérieures sur des côtes sujettes à des modifications peuvent avoir leur cours inférieur changé de façon appréciable par la migration ou la fermeture de leurs embouchures. Il n'est pas rare de voir ces dernières se déplacer de plusieurs kilomètres le long de la côte, ou encore présenter des alternances d'ouverture et de bouchure par suite des mouvements de matériaux le long du littoral. Ainsi, des zones de terrains, qui normalement ne seraient pas sujettes à l'inondation ou à l'envahissement par la mer, sont compromises et perdent une grande partie, sinon la totalité de leur valeur économique. Des zones de dépôt se créent dans les parties inférieures du système d'écoulement, modifiant le régime des cours d'eau.

L'effet du régime des côtes sur la navigation est particulièrement intéressant. Les modifications des côtes produisent fréquemment l'ensablement des chenaux navigables naturels ou artificiels, l'obstruction des entrées de ports et l'envasement de ces derniers. L'envasement des passes sur la côte, la croissance des barres du large — tous phénomènes produits par les transports de matériaux qu'impliquent les modi-

fications des côtes — exigent une attention constante et des dragages d'entretien coûteux. De même, il est nécessaire de protéger les passes et les entrées de rivières par des jetées, non seulement pour protéger les navires contre la houle, mais aussi pour éviter l'obstruction des passes par les transports littoraux. Les problèmes techniques posés par ces conjonctures ont, aux Etats-Unis, occupé pendant des années les meilleurs spécialistes du « Corps of Engineers ».

Les conséquences économiques de ces modifications sont aussi importantes, sinon plus, que les effets géographiques et physiques que nous venons d'exposer brièvement.

C'est à propos des stations balnéaires que le problème se pose de la façon la plus évidente à l'homme de la rue. Celui-ci peut utiliser les

plages simplement en tant que visiteur ; dans ce cas, il dépense son argent et passe son temps sur les plages qui l'attirent, délaissant celles qui sont en mauvais état. L'état matériel de la plage se reflète donc directement dans les revenus que l'on retire de ces amateurs saisonniers du bord de mer ; il prend, par conséquent, une importance financière appréciable non seulement pour les propriétaires des plages, mais aussi pour les autorités locales qui imposent des taxes. Pour le propriétaire d'une plage, l'intérêt économique de cette dernière est double : non seulement il peut en faire usage personnellement ou la louer, mais il a tout intérêt à ce que son capital investi soit préservé et si possible accru. Les phénomènes d'érosion ou d'engraissement des côtes peuvent menacer ou anéantir ces deux sortes d'intérêts.

La plage de CONEY ISLAND, près de New-York, envahie par la foule au moment du week-end

La protection, l'entretien et la restauration des plages sont des problèmes dont les répercussions humaines nous semblent illustrées de façon particulièrement frappante par ce cliché.

Notons qu'aux Etats-Unis, on pense qu'une superficie de 5,6 à 6,9 mètres carrés par personne est indispensable.

CONEY ISLAND BEACH, near New-York, thronging with a week-end crowd.

Protection, upkeep and restoration of beaches are problems having social consequences which are illustrated in a particularly striking fashion by this picture.

In the U.S.A., the provision of an area of 5,6 to 6,9 square meters per person is considered essential.

Mais les stations balnéaires ne représentent qu'une partie des côtes ; il y a également grand intérêt à maintenir une ligne de côtes donnée dans les zones d'habitation. A l'appui de ceci, citons le désastre de Galveston (Texas) aux Etats-Unis, en 1900, exemple qui pourrait se répéter en bien des points de leurs côtes.

Généralement on considère comme faible l'importance économique de l'érosion des terres agricoles ou des régions inexploitées, encore que, pour l'ensemble des Etats-Unis, le total des pertes soit impressionnant. En fait, leur importance intrinsèque est réelle, mais la protection coûte cher et cette considération a découragé toute étude approfondie de l'aspect économique du problème ; de ce point de vue, en effet, il est peu logique de dépenser 50 dollars par pied de front de mer, pour protéger une propriété qui, sur le marché, ne vaut que 100 dollars l'acre.

En ce qui concerne les chenaux navigables, on peut avoir quelque idée de l'importance économique que présente pour eux le régime des côtes en relevant les dépenses de dragage qu'a exigées leur entretien. Voici quelques exemples choisis au hasard aux Etats-Unis :

Indian River Inlet, Delaware	..... \$ 30.000
Absecon Inlet, New-Jersey	..... 100.000
Ocean City, Maryland	..... 35.000
York Spit Channel, Virginia	..... 150.000
Charleston, South Carolina entrance	210.000
Savannah, Georgia entrance	..... 321.000
St-Augustine, Florida	..... 60.000
Pensacola, Florida	..... 70.000
Galveston Harbor, Texas	..... 150.000

et cette liste est bien loin d'être complète.

Dans le cadre fédéral comme dans celui des Etats, il y a bien longtemps qu'aux Etats-Unis, la législation reconnaît l'importance géographique et économique des études des côtes ; ce n'est pourtant qu'en 1945-1946 qu'a été adoptée une réglementation reconnaissant la responsabilité fédérale au point de vue financier.

Le paragraphe II du « River and Harbor act » approuvé le 3 juillet 1930, autorise la constitution d'organismes pour l'étude des rivages, dont la mission consiste à mettre au point les moyens propres à éviter l'érosion des côtes des lacs et des océans par la houle et les courants.

Le coût de ces études est supporté moitié par l'Administration Fédérale, moitié par un organisme associé qui peut être un Etat, une Municipalité, une Subdivision politique quelcon-

que ou l'un de leurs services officiels habilités à étudier les problèmes de rivages. Il convient de préciser que le but de ces études se limite à déterminer la solution la meilleure au problème posé par une situation donnée : aucuns travaux, quels qu'ils soient, ne peuvent être entrepris.

Le paragraphe 5 du « River and Harbor act » approuvé le 30 août 1925, exige que les projets d'amélioration d'une embouchure ou d'une passe prennent en considération la configuration du rivage et les répercussions probables des améliorations sur une distance d'au moins 10 milles (18 km.) de part et d'autre de cette entrée. A notre connaissance, cette prise en considération des conséquences des aménagements n'a pas été étendue à la prise en charge des travaux de réparation ou de restauration qui pourraient en résulter. On remarquera également que la législation n'interdit pas l'exécution de travaux d'amélioration, même s'il s'avère probable qu'ils auront des effets nuisibles.

La responsabilité fédérale pour le développement d'une science de la protection des côtes, dans le sens d'un perfectionnement des moyens, des procédés et des techniques a été définie par la « Public Law » 166 du 79^e Congrès, approuvée le 31-7-45. D'après cette loi, le « Chief of Engineers » agissant par l'intermédiaire du Beach Erosion Board, est chargé de se livrer, aux frais de l'Administration Fédérale, à des études d'ensemble en vue d'éviter l'érosion des côtes des U.S.A. par la houle et les courants et en vue de déterminer les moyens les plus propres à assurer la protection, la restauration et l'amélioration des plages ; il est également chargé de la publication des données et des informations concernant l'érosion et la protection des plages et des côtes. Le but de cette mission est de réunir le « bagage technique » nécessaire pour arriver à des solutions saines du problème complexe de l'aménagement des côtes.

Le deuxième paragraphe de cette loi place les études d'aménagement des côtes et d'érosion des plages sur le même plan que les études de rivières et de ports, ce qui offre ainsi au Gouvernement Fédéral la possibilité de remédier directement aux défauts éventuels en adoptant un projet fédéral d'amélioration à réaliser partiellement ou totalement sur le budget fédéral.

La législation la plus récente, en ce qui concerne l'étude des côtes, est constituée par la Loi 127 du 79^e Congrès, approuvée le 13-8-46, qui déclare que la politique des Etats-Unis con-

Une unité physiographique : la baie de Monterey en Californie.

A physiographic unit : Monterey Bay (California).

siste à soutenir la construction, mais non l'entretien, des ouvrages assurant l'amélioration et la protection contre l'érosion par la houle et les courants de celles des côtes américaines qui sont propriété publique. La loi limite la contribution fédérale à un maximum égal au tiers du coût total de ces améliorations, sauf dans le cas de certains murs de protection. Des dispositions sont prévues afin que les travaux puissent être exécutés, soit par le Corps of Engineers, soit par l'Administration locale. La responsabilité fédérale dans la surveillance des côtes et dans les recherches sur le régime des côtes ne repose pas complètement sur le « Corps of Engineers ». Le « National Park Service », le « Bureau of Yards and Docks », le « Bureau of Ships », l'« Hydrographic Office » du « Navy Department » s'y intéressent profondément et endossent une

grande part de responsabilité dans certaines phases des études côtières et des travaux de protection.

Certains Etats ont assumé une responsabilité dans les questions côtières ; en particulier la Californie, le New-Jersey, l'Etat de New-York, l'Association Pensylvanie - Massachussets. Une participation active aux études et aux travaux de construction des ouvrages de protection est assurée par chacun de ces Etats, les dépenses étant en général également réparties. Dans la plupart des Etats, la législation actuelle permet une contribution fédérale aux dépenses entraînées par les travaux de protection. Il n'y a pas de règle uniforme parmi les Etats en ce qui concerne la désignation de l'administration responsable de la législation côtière : on s'attache généralement pourtant à se servir des adminis-

EMERALD BAY (Californie)

Cette Baie, située en côte rocheuse et protégée par des caps, constitue une unité physiographique isolée. Remarquer particulièrement les caps et la plage située au fond de la baie. A l'extrême droite, la houle se diffracte suivant un dessin circulaire autour de petits îlots.

EMERALD BAY (California)

Situated on a rocky coast and protected by headlands, this bay forms an isolated physiographic unit. Note particularly the headlands and the sandy beach at the head of the bay. On the extreme right, the waves are refracted in a circular pattern around some small islands.

trations existantes plutôt qu'à organiser des administrations spécialisées ; il y a quelques exceptions locales, comme l'Ohio et la Californie qui prescrivent la création de services distincts à cet effet. Sous l'autorité de cette Administration d'état, les problèmes de côtes sont en général confiés aux services techniques locaux, ou dans certains cas, à l'Etat-Major des Ponts et Chaussées, ceci à la suite de quelque obscure perversion de la logique.

II. — PRINCIPES DE BASE DANS LA CONNAISSANCE DES PHÉNOMÈNES CÔTIERS

Dans cet article, il est évident que nous devons nécessairement nous contenter d'un bref aperçu de ce que l'on sait des phénomènes côtiers et d'un examen des idées générales sur lesquelles sont basées les solutions des problèmes en cause.

Deux concepts sont fondamentaux pour l'étude des phénomènes côtiers :

— Le premier est celui de **l'unité physiographique**. Celle-ci peut être définie comme une zone côtière à l'intérieur des limites de laquelle les phénomènes côtiers ne sont pas affectés par les conditions physiques des régions voisines. L'analyse des problèmes côtiers montre que, en ce qui concerne les études destinées à la protection ou à la modification de la côte, tous les phénomènes importants dépendent des matériaux et de l'énergie disponible sur la côte. Par conséquent, l'unité physiographique que nous recherchons est une zone côtière limitée de telle sorte que l'énergie et les matériaux disponibles ne dépendent pas des zones adjacentes. Ainsi, par exemple, une île peut être considérée comme une unité physiographique ; il est probable que, aux U.S.A., toute la côte Atlantique du New-Jersey, de Sandy Hook au Cap May, est une unité ; de même, à une moindre échelle, les baies de Emerald et Monterey en Californie sont des unités. L'unité physiographique définit les limites de la zone que l'on doit étudier lorsqu'on envisage des problèmes côtiers.

— Le second concept de base est celui du **bilan matériau-énergie à l'intérieur de l'unité physiographique**. L'équilibre des matériaux correspond à l'égalité entre la quantité de matériaux apportés à la côte et la quantité de matériaux arrachés à la côte. Evidemment, il faut introduire un facteur « temps », ce qui exige que le volume des matériaux pris en compte soit

considéré comme un débit d'apport ou de perte. C'est ainsi qu'entre autres, nous pouvons avoir affaire à des bilans de matériaux se rapportant à des jours, à des mois, à des saisons ou à des années. Nous devons d'autre part, parler de taux de travail effectué ou de débit d'énergie ; en effet, le transport solide en provenance ou en direction d'une longueur déterminée de rivage, exige l'application d'une force.

Examinons brièvement les facteurs intervenant dans l'équilibre des matériaux. Prenons par exemple une certaine bande de littoral et considérons l'état des matériaux qui s'y trouvent ; nous voyons que, pour exprimer complètement ce bilan, il est nécessaire de connaître les débits :

- 1° — du transport littoral s'approchant et s'éloignant de cette région,
- 2° — des échanges de matériaux entre la côte et les fonds marins adjacents,
- 3° — des échanges de matériaux entre la côte et les terrains voisins, y compris en particulier les dunes et les autres formations côtières particulières,
- 4° — des apports de matériaux dûs aux systèmes d'écoulements des eaux intérieures.

Malheureusement, il n'est pas possible dans l'état actuel de nos connaissances, d'évaluer ces facteurs autrement que de façon qualitative. Une étude comparative peut indiquer l'importance relative probable de chacun des facteurs mais il est rare que des données quantitatives puissent être prises en considération. Dans beaucoup de régions, il suffit d'un examen rapide pour établir que le transport littoral est le plus important (exemple : la côte de New-Jersey) ; d'autres régions sont au contraire très compliquées, par exemple la Baie de Monterey sur la côte de Californie, où des apports importants dûs à des rivières et une vallée sous-marine réagissent profondément sur le régime côtier.

Les transports littoraux peuvent être évalués d'après la quantité de matériaux bloqués par les obstacles côtiers naturels ou artificiels ou d'après la connaissance du taux de pertes de certaines sources d'approvisionnement comme des falaises ou des caps soumis à l'érosion.

L'estimation du volume de matériaux en provenance ou à destination des fonds adjacents n'est pas satisfaisante actuellement. Des expériences sur modèle réduit sont en cours en laboratoires : elles promettent de confirmer

quelques-unes des conclusions atteintes grâce à des considérations théoriques sur le transport solide au fond de la mer. Cependant, très rares, sinon inexistantes sont les renseignements d'un caractère définitif concernant ce phénomène dans la nature.

La quantité des matériaux gagnés ou perdus en provenance ou à destination des terrains littoraux peut être évaluée de façon assez précise par une étude comparative de la topographie de la région à différentes époques, compte tenu des caractéristiques des terrains littoraux et des matériaux du rivage.

La détermination du volume de matériaux amené sur une région côtière par des rivières, des eaux de ruissellement ou d'autres genres d'écoulements, se trouve facilitée si l'on connaît le débit solide transporté en suspension et charrié par le courant. Ceci peut parfois être déduit d'une étude du delta, mais il est plus simple d'utiliser les statistiques concernant le taux d'envasement du cours d'eau en amont de son embouchure. Il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue que le débit solide peut varier considérablement suivant que l'on est en période normale ou en période de crues.

Comme nous l'avons déjà indiqué, le transport des matériaux vers la zone côtière, et parfois leur enlèvement à partir de centres d'émission de cette zone, résulte de la mise en œuvre d'une certaine énergie pouvant revêtir des aspects divers. Les plus importants de ces aspects sont la houle et les courants ; mais l'énergie de la marée, qui se manifeste par une élévation et un abaissement de la surface de la mer, est d'une importance toute particulière.

C'est le vent, local ou lointain, qui, par suite d'une interaction entre l'atmosphère et la surface de la mer, engendre la houle. L'énergie de la houle comprend de l'énergie potentielle, qui se manifeste par une élévation variable de la surface de la mer, et de l'énergie cinétique qui se manifeste par le mouvement des particules participant au phénomène. Si une houle déferle sur la côte, la plus grande partie de son énergie est à même de mettre les matériaux en mouvement, que ce soit pour les amener ou pour les éloigner. Il est probable que le déferlement transforme toute l'énergie de la houle en énergie cinétique : le mouvement des matériaux est alors une fonction du régime des vitesses dans la zone côtière. Il est évident que la bande côtière affectée par ces phénomènes est approximative-

ment limitée d'une part, par le point de déferlement, d'autre part, par la limite extrême atteinte par le jet de rive.

La direction de propagation de la houle au large est rarement parallèle ou perpendiculaire à la côte ; le plus souvent, elle fait avec la côte un angle intermédiaire. Lorsque la houle atteint des zones où la hauteur diminue, ses caractéristiques se modifient dès que la profondeur est aux environs de la moitié de la longueur d'onde. La période de la houle reste la même, mais sa vitesse de propagation, son amplitude et sa longueur d'onde changent ; en particulier, la vitesse de propagation et la longueur d'onde diminuent. Cet effet du fond produit ce que l'on appelle une « réfraction » ; autrement dit, la houle s'infléchit et s'oriente parallèlement aux lignes de sondes. L'observation a montré que l'angle sous lequel la ligne des crêtes aborde la côte ne dépasse en général pas 15°. Quelques instants de réflexion montrent que, dans le régime des vitesses dont il a été question plus haut, il doit y avoir une composante parallèle à la côte. C'est cette composante qui fournit l'énergie entretenant les transports littoraux.

Quand les courants existent ils mettent dans la balance un apport d'énergie cinétique, et il faut les prendre en considération, même s'ils n'ont en apparence qu'une très faible intensité. La raison en est qu'ils peuvent transporter les matériaux mis en suspension par le déferlement. Les courants dont la vitesse dépasse 1,5 pied par sec. (0,50 m./sec.) environ, peuvent d'eux-mêmes mettre en suspension et transporter des matériaux.

Alors qu'il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'établir un décompte numérique des énergies, un bilan qualitatif peut être obtenu grâce à une étude comparative des différentes sources d'énergie.

Les matériaux qui engraisent les plages peuvent provenir de l'attaque de la côte par la houle, ou d'apports à partir de la zone littorale sous l'action des cours d'eau, du vent, ou d'autres agents d'érosion subaérienne. De toutes façons, ces matériaux sont en définitive des produits de désagrégation de roches dures ou tendres. On peut dire ainsi que les plages sont constituées de fragments de roches, de particules minérales ou de produits de désagrégation de ces deux éléments. Dans nos études des matériaux côtiers, nous avons donc affaire à des groupements ou à des agrégats de particules distinctes. Le compor-

tement de ces groupements est évidemment conditionné et déterminé par le caractère des particules qui en sont les membres individuels. Les matériaux provenant de roches dures, comme le granit, le schiste, l'ardoise ou le calcaire, se présentent en général sous la forme de fragments de la roche mère ; autrement dit, le principal résultat de l'action de la houle est une réduction de la granulométrie des matériaux. Par contre, l'érosion des roches tendres se traduit par la production de matériaux hétérogènes, ceci étant dû à la fois au caractère hétérogène de la roche mère et à la facilité relative avec laquelle les roches tendres peuvent être décomposées mécaniquement en leurs minéraux constitutifs.

Chacune des nombreuses sources de matériaux impose un caractère d'uniformité à certaines caractéristiques des produits qui en dérivent. Par exemple, sous l'action de la houle, les roches dures se brisent toujours en fragments à arêtes vives, alors que les moraines glaciaires fournissent toujours des fragments arrondis et des matériaux plus fins. Cette uniformité dans les caractéristiques nous fournit une méthode d'identification des sources. Bien plus, beaucoup de ces caractéristiques subissent des modifications bien particulières sous l'action des phénomènes dynamiques auxquels ils peuvent être soumis : ceci permet d'identifier et de décrire ces phénomènes dynamiques à partir de l'examen des matériaux modifiés.

Nous voyons maintenant l'importance des analyses de matériaux. De telles analyses comportent la détermination : d'une part de la taille, de la forme, de la structure et de la constitution minéralogique de chaque particule, d'autre part de la granulométrie, de la nature et des diverses compositions des groupements de particules.

A côté de l'utilité de ces analyses pour l'identification des sources et des processus dynamiques, l'information analytique ainsi obtenue est précieuse dans la prédiction des conséquences des modifications de ces sources et de ces processus.

Nous ne pouvons pas aborder ici une discussion détaillée de la méthodologie et de l'interprétation de ces analyses de matériaux, mais nous allons consacrer quelques lignes à la discussion des effets du transport, car ils jouent un très grand rôle dans les phénomènes côtiers. Des expériences et des observations nombreuses ont permis de définir un processus appelé « transport sélectif ». Si nous suivons un groupe de parti-

cules pendant son transport, nous constatons que, dans l'ensemble, la grosseur moyenne va en diminuant dans le sens du mouvement. Ceci est dû davantage à l'abandon des particules les plus grosses, par suite de l'insuffisance de la puissance de charriage du courant, qu'à une brisure ou à une usure des particules. En d'autres termes, sous l'action d'une même énergie, les grosses particules sont transportées moins loin que les petites. De plus, par suite de l'usure et de l'entrechoquement des particules, leur forme évolue et peut se rapprocher de la forme sphérique. Le transport a également pour effet de modifier l'état de la surface des particules. Au voisinage de la source, celles-ci peuvent être relativement rugueuses, alors que, après avoir été soumises à un transport prolongé, elles sont lisses. Le transport par le vent donne à la surface un grain caractéristique qu'on ne rencontre jamais lorsqu'il s'agit de transport hydraulique. On peut dire que, à l'heure actuelle, les effets sélectifs du transport comptent parmi les indications les plus sûres des processus dynamiques auxquels les matériaux d'une plage ont été soumis. Nous ne nous étendrons pas davantage sur l'étude des matériaux des plages.

L'énergie qui parvient à la côte lui est transmise par l'un quelconque ou l'ensemble des trois milieux qui s'y rencontrent : la terre, l'air et l'eau. Seuls, les deux derniers sont actuellement considérés comme importants, sauf dans les cas exceptionnels de secousse sismique ou d'autres mouvements métamorphiques tels que les glissements de faille. On pense que le vent constitue le principal agent de l'énergie aérienne. Les deux conséquences importantes de l'action du vent sont : d'une part un transport solide engraisant ou érodant la plage avec en général, la formation de dunes, d'autre part une génération ou une modification de la houle. L'efficacité de la houle en tant que transmetteur d'énergie confère à ce dernier résultat une importance considérable. La production de courants ne doit pas être négligée dans l'étude de l'énergie atmosphérique, bien que, en général, on puisse ne pas la tenir pour un facteur déterminant de l'évolution de la côte. L'énergie atmosphérique, sous la forme du vent, se manifeste sur le rivage par le transport de ceux des matériaux qui ont pu sécher après avoir été jetés à la côte par la houle. Si une grande quantité de matériaux est ainsi rendue propre au transport, il en résulte généralement une zone de dunes derrière la plage. Heureusement, le volume de ces échanges entre les dunes et la

plage peut être obtenu facilement par une étude comparative de la topographie des dunes et par une simple détermination de leur volume. Les effets de ce transport sélectif sont visibles, bien qu'ils soient moins importants que ceux qui résultent des phénomènes de transport plus étendus : celui de ses effets qui frappe le plus

est une modification du grain de la surface, chaque particule prenant un aspect granuleux.

Il semble que les vents engendrent les vagues par une action combinée de frottement et de pression. La vitesse du vent, le temps pendant lequel il souffle et le fetch (distance sur laquelle le vent souffle de manière constante) doivent

Dommages causés par une forte tempête à Atlantic City (New-Jersey)

Une promenade, une jetée légère et des constructions côtières ont été endommagées. La houle que l'on aperçoit sur la photographie n'est pas très forte, mais est cambrée et désordonnée, du fait de l'action d'un vent local. Remarquer l'aspect du déferlement : il est très écumeux.

La construction d'ouvrages de protection de côtes constitue un moyen de prévenir de tels dommages.

Damage caused by a big storm at Atlantic City (New-Jersey)

A promenade, a light jetty and some coastline structures were damaged. The waves seen in the photograph are not very high but steep and irregular due to local wind action. Notice the very frothy appearance of the surf.

The construction of shore protection works is a means of preventing the occurrence of such damage.

atteindre certaines valeurs minima pour que se réalise un transfert maximum d'énergie du vent vers l'eau. L'importance de l'énergie atmosphérique dans ce cas réside dans le fait que, en donnant naissance à une houle capable d'agir directement sur la côte avec un rendement acceptable, elle peut influencer les phénomènes côtiers bien plus qu'elle ne le pourrait autrement.

Nous avons discuté plus haut des caractéristiques du transport par la houle. Nous devons examiner maintenant l'effet de l'action de la houle sur les constructions côtières. Ce problème, qui est essentiellement une question de stabilité de ces constructions, comporte deux aspects : le premier est l'aptitude de la construction à résister aux effets directs des vagues, le second est l'aptitude des constructions à résister aux effets secondaires des vagues tels que les déchaussements. Le premier de ces aspects amène à rechercher des dispositions d'ouvrages capables de résister aux chocs et aux charges statiques qui peuvent résulter des conditions usuelles ou exceptionnelles de l'action de la houle. Ceci suppose une connaissance très approfondie des caractéristiques locales de la houle, connaissance qui, généralement, n'existe pas à l'heure actuelle. Le second de ces aspects implique la connaissance des effets hydrauliques ou autres de la houle sur la zone où l'on doit édifier la construction. Parmi ces effets, citons comme particulièrement intéressants : la formation de clapotis, les affouillements au pied des ouvrages et les phénomènes d'érosion ou d'engraissement des fonds. On possède quelques renseignements sur ces sujets.

III. — MÉTHODE DE RÉOLUTION DES PROBLÈMES CÔTIERS

Jusqu'ici, nous avons passé en revue les bases législatives des études côtières, les principes fondamentaux présidant à la résolution des problèmes côtiers, puis, très rapidement, quelques-unes des connaissances essentielles dont dispose l'Ingénieur aux prises avec ces problèmes. Maintenant, nous allons examiner comment on peut résoudre les problèmes de côte.

Nous supposons clairement défini le but de l'étude. Celui-ci peut consister à arrêter la perte de terrains au profit de la mer, à donner à une plage d'agrément un aspect et une extension déterminés, à protéger telle zone de falaises en conservant une plage, etc... Le premier problème

est de déterminer quels sont les renseignements nécessaires pour pouvoir définir un bilan matériau-énergie au moins qualitatif. Avant tout, il faut avoir une base de référence permettant le repérage horizontal et vertical de la situation géographique. Cette base est réalisée par une ligne de repère des niveaux et des directions matérialisée en permanence par des ouvrages, donc réutilisable à une date quelconque et reliée aux levées topographiques d'ensemble.

Il faut être familiarisé avec la géographie physique locale dont les caractéristiques sont fournies par les relevés hydrographiques et topographiques de la région étudiée. C'est là qu'intervient la notion d'« unité physiographique ». Il est bien évident que la documentation nécessaire sera recueillie beaucoup plus facilement et avec beaucoup plus de précision pour une unité isolée que pour une unité soumise à des influences extérieures. La région est examinée au point de vue de la physiographie côtière, des sources probables de matériaux et des facteurs susceptibles d'influencer le transport littoral, dans le but de déterminer les limites de la zone dans laquelle doivent être relevées les conditions géographiques régnantes, ainsi que les forces modifiant ces conditions. La région à étudier ayant été précisée, il est nécessaire de se renseigner en détail sur son relief sous-marin, en général jusqu'à 18 ou 30 pieds (5,50 à 9 m.) en basses eaux moyennes, sur sa structure, ses cultures et les aspects critiques de sa topographie. Des photographies aériennes sont presque toujours indispensables pour compléter les renseignements hydrographiques et topographiques. De plus, grâce à une interprétation judicieuse, celles-ci sont susceptibles de fournir une documentation appréciable sur de nombreux aspects du problème. On doit prendre soin de s'assurer de la très bonne qualité des clichés, car les plages sont particulièrement difficiles à photographier de façon satisfaisante.

Un certain nombre d'éléments doivent être pris en considération pour remédier à l'insuffisance des informations essentielles : enregistrement des vents dominants, caractéristiques et conséquences des tempêtes, en mettant l'accent sur celles-ci et sur leur mécanisme d'action sur la côte, études de la géologie locale relatives en particulier aux matériaux présents pouvant être considérés comme des sources en activité ou en puissance, et aux formations géologiques dominant la physiographie de la région.

ELK RIVER sur la côte du Pacifique aux ETATS-UNIS (Oregon)

Exemple typique de migration d'embouchure de rivière ; remarquer les lits précédents maintenant abandonnés ; la migration de l'embouchure se fait dans le sens du courant littoral qui se dirige vers le cap, c'est-à-dire de droite à gauche sur la photographie ; ce processus peut d'ailleurs être remis en cause par les tempêtes ou les crues qui peuvent ouvrir un nouveau chenal dont le trajet est plus direct. Remarquer la petite barre à l'embouchure, qui avance le point de déferlement.

ELK RIVER on the Pacific Coast of the United States (Oregon)

This is a typical example of the shifting of a river outlet. Notice the former river-beds, now abandoned. The shifting of the river mouth is in the direction of the off-shore current which is directed towards the headland, that is, from right to left in the photograph. This displacement can be nullified by the action of storms or floods in opening a new channel with a more direct alignment. Observe the small bar near the mouth which advances the breaking point of the waves.

En se rappelant les principes énoncés plus haut, sur le bilan matériau-énergie à l'intérieur de l'unité physiographique, on doit s'efforcer d'obtenir les renseignements supplémentaires nécessaires à l'établissement de ces bilans. Les éléments généralement nécessaires à cet effet sont : l'étude des accumulations ou blocages de sable associés aux ouvrages côtiers existants, ce qui indique la direction prédominante et la grandeur approximative du transport littoral ;

des spécimens des matériaux constituant la plage, et leurs sources probables, avec toutes analyses de taille, de forme, de structure, etc... qui peuvent être utiles pour définir le processus de transport et les actions auxquelles le matériau a été soumis ; des renseignements sur les caractères de l'action de la houle à l'intérieur de la région étudiée avec la connaissance corollaire des courants importants. Les sources de matériaux, si elles ont été décelées, doivent être examinées

dans le but d'évaluer le débit solide qu'elles ont fourni dans le passé ou qu'elles fournissent actuellement.

L'analyse du problème nécessite la détermination des événements et de leur cause. L'expérience montre que cette détermination est facilitée par l'usage du questionnaire suivant :

- 1° quelles sont les sources et les caractéristiques du matériau de la plage ?
- 2° quels sont les débits d'arrivée et de départ du matériau de la plage ?
- 3° quel est le mode de déplacement du matériau, de la source à la plage, puis de la plage vers d'autres régions ?

Il apparaît immédiatement que, si l'on peut obtenir des réponses à ces questions, les conditions physiques régissant la situation en cause seront déterminées. Le problème se trouve dès lors défini. D'après l'expérience des chercheurs dans ce domaine, il s'avère que le problème est habituellement défini de façon unique, c'est-à-dire que ce sont toujours des cas particuliers différents, et que les méthodes de résolution par analogie ne sont pas satisfaisantes. On a eu tendance à appliquer de telles méthodes ; cette tendance continue à se faire sentir dans une certaine mesure mais de moins en moins, au fur et à mesure du développement des connaissances dans ce domaine.

Quant à l'analyse du problème, elle se réduit à la prise en considération des facteurs suivants :

- 1° suivant quelles méthodes pratiques peut-on modifier les débits d'apport ou de perte des matériaux, de façon à obtenir les résultats désirés, et quels sont les effets de telles modifications ?
- 2° quelles sont les exigences techniques de ces méthodes ?
- 3° comment se présente chacune de ces méthodes sur le plan économique ?

Les méthodes pratiques actuellement connues se limitent à une exception près, à divers types et dispositions d'ouvrages : chacun les connaît sous leurs désignations de brise-lames, jetées, murs de protection de divers types, revêtements et épis. Une méthode fréquemment recommandée, qui est la seule à ne pas impliquer de construction, est celle de l'engraisement artificiel.

Les brise-lames, ainsi que leur nom l'indique, sont des ouvrages dissipant l'énergie de la houle

en la faisant briser ; on évite ainsi la propagation de la houle dans la zone que l'on désire protéger. Leur effet sur le transport solide provient entièrement de la modification qu'ils apportent, en général dans le sens d'une réduction, à l'énergie incidente de la houle.

Les murs de protection, les revêtements sont des constructions dont le rôle principal consiste à substituer à un matériau susceptible d'érosion, un matériau « résistant » ; en même temps, ils réalisent une dissipation d'énergie.

Sur le transport solide, ils agissent directement grâce à cette substitution des matériaux et indirectement grâce à la transformation et quelquefois à la dissipation de l'énergie de la houle incidente et des courants. Cette méthode est très répandue et convient tout particulièrement à la conservation d'une limite côtière bien définie en un lieu donné. Leur usage s'accompagne presque toujours d'un accroissement des dégradations.

Les épis sont des ouvrages dont le but est d'intercepter les matériaux se déplaçant le long du littoral et aussi de modifier directement les débits d'apport et de départ des matériaux. Leur influence sur le bilan d'énergie est presque entièrement indirecte et peut être inexistante. Il est à noter que, lorsqu'ils sont efficaces, les épis, en modifiant les conditions physiographiques avoisinantes, jouent beaucoup plus qu'un simple rôle de barrières s'opposant au mouvement. Grâce aux changements des conditions physiographiques, ils peuvent en effet être à l'origine de modifications appréciables de tout l'ensemble du régime côtier.

Les jetées sont des ouvrages ayant des buts multiples ; leurs fonctions peuvent grouper celles des brise-lames, des épis et des murs de protection. Généralement associés à des passes, à des embouchures, à des accès de ports, elles provoquent fréquemment des changements physiographiques importants. Analyser les effets des jetées sur les côtes représente dans notre domaine un des problèmes les plus difficiles à résoudre dans le détail, la facilité avec laquelle les caractères généraux de ces actions peuvent être prévus étant en contradiction avec la difficulté d'une analyse approfondie.

L'engraisement artificiel, comme son nom l'indique de façon très satisfaisante, est une méthode consistant à ajouter un matériau additionnel à celui qui est disponible naturellement. Elle est utile pour la remise en état ou la reconstitution de plages, pour le maintien de

EAST ROCKAWAY INLET (New-York) : Chenal protégé par une jetée en côte sablonneuse

On voit nettement l'arrêt des matériaux par la jetée qui est au centre de la photographie. Remarquer l'aspect de la houle : à gauche de la jetée, de petites ondulations dues à l'action locale du vent, se superposent aux grandes ondulations venues du large et dont la ligne de crêtes est sensiblement parallèle au bord supérieur de la photographie : la houle se réfracte au voisinage de la côte et se réfléchit sur la jetée : ces deux effets se combinant donnent une houle croisée. A droite de la jetée, se produit une réfraction de la houle dans la vallée sous-marine constituée par le chenal avec, à l'extrême droite du cliché, déferlement partiel sur un haut-fond. Des épis au bas du cliché assurent la protection des berges du chenal contre l'érosion.

EAST ROCKAWAY INLET (New-York) : an inlet on a sandy coast protected by a jetty

The way in which drift is checked by the jetty in the centre of the photograph can be action, are superimposed on large waves with a crest-line approximately parallel to the upper edge of the photograph, coming in from the open sea. The waves are refracted near the coast and are reflected from the clearly seen. Note the wave pattern ; on the left of the jetty, small waves due to local wind jetty ; these two effects combine to give a criss-cross wave pattern. On the right of the jetty, the waves are refracted by the submarine channel created by the inlet and, at the extreme right, there is partial breaking of the waves over a shoal. Groins, shown in the lower part of the photograph, protect the banks of the inlet against erosion.

PLAGE DE PALM BEACH (Floride)

Avant et après engraissement artificiel. Ces photographies donnent une idée de l'importance des travaux que peut nécessiter l'entretien d'une plage très fréquentée et des résultats obtenus.

PALM BEACH (Florida)

Before and after artificial fill. These photographs give an indication of both the extent of maintenance work which may be required on a much-used beach and of the results obtained.

conditions existantes jugées convenables ou pour la transformation à une plus ou moins grande échelle de conditions qui ne sont que partiellement désirables. Quoique cette méthode devienne de plus en plus à la mode, il n'existe, à l'heure actuelle, que bien peu de renseignements faisant autorité sur ses conditions d'application ou ses résultats.

Ces méthodes de modification des débits d'apport et de perte s'accompagnent d'exigences techniques qui leur sont évidemment étroitement liées et qui sont particulièrement importantes pour leur mise en œuvre. Nous ne pouvons pas les discuter ici en détail, mais il est possible d'en déterminer les caractères généraux.

Les exigences techniques se rangent en deux catégories : celles concernant la stabilité de l'ouvrage, et celles concernant ses effets au point de vue hydrographique. La stabilité de l'ouvrage est évidemment une fonction du matériau de construction, des charges auxquelles il est soumis et de la nature de ses fondations. Ce sont les charges éventuelles à prendre en compte qui constituent ici la principale inconnue. Les exigences techniques hydrauliques sont un peu plus difficiles à manier ; la raison en est pour une grande part, que l'on ne connaît que très peu de choses au sujet des phénomènes hydrauliques dans le voisinage des ouvrages. L'écueil à éviter particulièrement est la possibilité de créer, par suite de l'établissement des ouvrages, des conditions hydrauliques génératrices d'érosions. Dans beaucoup de cas, on aura le choix entre plusieurs solutions aux problèmes côtiers, à la suite de l'analyse des données physiques. Dans d'autres cas, une seule solution se présentera. Lorsqu'un choix s'avère possible, l'examen du problème doit comporter une information sur le plan économique suffisamment détaillée pour permettre de choisir finalement, entre plusieurs projets réalisables par ailleurs équivalents, celui qui présente le plus d'avantages économiques. Il peut se trouver que, d'une part, deux de ces projets ou même davantage soient réalisables sans être également désirables du point de vue géographique, et que d'autre part, les conditions économiques aient leur importance. Dans ce cas, c'est le prix de revient qui est la donnée maîtresse dictant le choix d'un projet, même si c'est au détriment des avantages géographiques désirés.

Notons d'ailleurs qu'au cours de ces études les solutions multiples sont à prendre en considération seulement quand l'analyse du problème les

fait ressortir comme admissibles. De toutes façons, la possibilité matérielle d'exécution doit être l'ultime critère.

La mise en forme de la solution est l'opération simple qui consiste à adapter le plan d'action choisi dans la région étudiée de façon à atteindre l'objectif de l'investigation. Si, par exemple, il découle de l'analyse que la construction d'un épi résout le problème, cette mise en forme implique : la détermination du profil de l'épi, le choix de son implantation, la mise au point d'un planing de travaux (à quelle époque faut-il construire les épis, dans quel ordre, etc...).

Si c'est l'engraissement artificiel qui est la solution indiquée par l'analyse, la mise en forme implique alors le choix d'une méthode de dépôt du matériau additionnel, un plan détaillé du transport du matériau jusqu'à la zone de dépôt, le choix de la saison de l'année la plus favorable aux travaux, etc...

IV. — PROGRÈS FUTURS

Il doit être maintenant évident que, même dans notre connaissance des phénomènes les moins compliqués du comportement des côtes, il existe de grandes lacunes. C'est à juste raison, par conséquent, que nous pouvons nous demander ce que l'avenir nous réserve concernant les aménagements côtiers.

Je crois que les progrès à venir dans l'étude et dans l'aménagement des côtes dépendent de deux facteurs : le premier et le plus important consiste en des recherches de bases sur les matériaux, le transport solide et les moyens de modifier le bilan matériau-énergie d'une région ; le second, que l'on pourrait qualifier de politico-financier, régit l'intérêt et l'aide apportés à ces recherches de base.

Dans le domaine de nos recherches, ainsi que dans beaucoup d'autres domaines techniques, il y a une pénurie sérieuse, presque tragique, d'informations de base. Sans de telles informations, le technicien juge impossible de faire avancer la recherche appliquée, ce genre de recherches qui économise des dollars et des cents sur les applications pratiques. La science cesse de progresser et la décadence est inévitable, à moins que l'absence de progrès ne provoque des recherches de base. Si nous avons pu progresser comme nous l'avons fait dans notre domaine,

c'est pour une très grande part en nous appuyant sur des recherches de base dans des domaines différents, tels que la géologie, l'hydraulique, les mathématiques, la physique, mais nous n'avons apporté aucune contribution fondamentale qui nous soit propre. Il est nécessaire que la recherche de base, en même temps que la recherche appliquée bénéficie dans notre domaine d'initiatives et d'appuis vigoureux. C'est de travaux de ce genre, concernant les matériaux côtiers et les transports solides en mer que nous avons le plus grand besoin. La connaissance des lois du transport unidirectionnel des matériaux dans les cours d'eau n'a qu'une valeur partielle pour nous dans nos problèmes d'écoulement multidirectionnel sous l'action de forces périodiquement variables. Il nous faut connaître plus de choses au sujet de la façon précise dont les matériaux proviennent de roches-mères, au sujet des processus de destruction, d'extraction et de transport, au sujet enfin des transformations possibles des particules élémentaires ou des groupements de particules. Il est essentiel de connaître en détail le mouvement des matériaux le long du littoral, les relations liant l'énergie et le transport solide, les caractéristiques du transfert et de la dissipation de l'énergie au voisinage des côtes, les conditions nécessaires à la modification du bilan matériau-énergie, et même la manière d'évaluer quantitativement et de façon précise un bilan matériau-énergie.

Le problème est techniquement difficile ; il est insoluble sans une aide financière et politique très vigoureuse. L'aide politique est indispensable : d'une part, elle permet de poursuivre la centralisation des efforts au sein d'organisations spécialisées dans les problèmes d'aménagements côtiers avec tous les avantages résultant de l'utilisation la plus efficace des ressources intellectuelles et financières disponibles ; d'autre part, elle est à même de stimuler la mise en œuvre par les groupements diversément intéressés à ces problèmes des techniques ainsi perfectionnées. En ce qui concerne l'aide financière il me paraît presque superflu de dire quoique ce soit. Il est bien évident qu'aucun progrès ne peut être réalisé si l'on ne dispose pas des crédits nécessaires non seulement pour financer les applications pratiques de nos connaissances, mais aussi et c'est aujourd'hui le plus important, pour financer le développement des connaissances de base sans valeur immédiate en dollars et en cents.

BEACH EROSION AND SHORE PROTECTION

by **MARTIN A. MASON**

Chief of the Research Section Beach Erosion Board

Texte français page 14

(illustrations can be seen in French text, p. 14 to 28)

I. — IMPORTANCE OF THE PROBLEMS AND ORGANISATION OF THEIR STUDY

The importance of Shore studies lies in the physical and economic consequences of modification of coastal frontiers. To the casual observer the direct and indirect effects of natural modifications of a shore line and of the resulting changes in the **contributory drainage** system and navigable channels are not usually apparent. Yet these effects are important and far reaching - as critical observers who study the effects over relatively long periods well know.

There is good evidence that the aggregate effect of present shore line modifications over the entire shore line of the United States is a loss of land area, which might be conservatively estimated as approximating an annual loss of one foot (30 centimeters) over some 52,000 miles (84,000 kilometers) of shore line, including the Great Lakes shores. In some areas losses are general and excessive, for example, the Chesapeake Bay region, where entire islands have disappeared by erosion within the memory of man, and where the unprotected shores of both developed and agricultural lands are being lost at rates as high as 15 feet (4.50 meters) per year. In other sections land is being gained, as at Fire Island Inlet on the south shore of Long Island where littoral drift is being trapped by a recently constructed jetty.

In general, shore line modifications are both of macro-and-microscopic scale. The larger changes are those involving considerable physiographic modification, for example, the truncation of headlands and the associated formation and growth of **spits** and **bars**; or the very important formation of **barrier beaches and associated lagoons**. This latter phenomenon is responsible for the present shore features of the shore of Long Island and the New Jersey coast, which are familiar to most Americans, and is one of the most important aggradational aspects of shore modification. The barrier serves as a protective bulwark of the lagoon, which usually is slowly filled by sedimentation from the drainage channels discharging

into it, thus ultimately reclaiming water areas. The process is a long one and of large scale, and is not without some important effects on the associated animal and plant life. Lagoons, for example, which are cut off from salt water become diluted with fresh water and frequently decrease in salinity to the point that the fauna of the area changes from that characteristic of salt water to that of fresh water. This change has economic significance, particularly for the shellfish industry, and physical significance of great importance to wild life.

Drainage systems emptying through shores subject to modification can have their lower reaches appreciably changed by migration or closing of their outlets. It is not uncommon for outlets to migrate along the shore over distances of thousands of feet, or to be alternately open or closed by littorally moving material. Thus land areas which normally would not be subject to inundation or submergence are compromised and lose much if not all their economic significance. Sediment deposit areas are created in the lower reaches of the drainage system thereby modifying the flow regime of the streams.

Of particular interest is the physical effect of shore modification on navigation. Silting of natural and artificial navigable channels, obstruction of harbor entrances, and deterioration of harbor depths are all effected frequently by shore modification. The deterioration of dredged channels crossing shore lines and outer bars requires constant attention and the expenditure of large sums in maintenance dredging, all by reason of the littoral movement of shore material involved in shore modification. The protection of inlets and river entrances by jetties is required both for protection of shipping from wave action and of the channel from closure by littorally moving material. The engineering problems posed by these situations in the United States of America have taxed the best minds in the Corps of Engineers for years.

The physical effects of shore phenomena which we have discussed briefly are often

equalled and surpassed by the economic consequences of the modifications. From the viewpoint of the average individual the problem is most apparent in resort areas. The individual may only use the beaches at various localities as a visitor, in which case he spends his time and money at those beaches which appeal to him, leaving deteriorated or damaged areas to the owners. The physical condition of the beach is reflected directly in the income derived from these peripatetic devotees of the seashore, and assumes therefore a measurable monetary importance not only to the beach proprietors but to the taxing authorities of the area. If the individual is a beach property owner his economic interest in the beach is doubled, for not only has he interest in his personal use or rental of his property, but also a very real interest in the preservation and, if possible, augmentation of his capital investment in the property. Shore phenomena of erosion, and sometimes, accretion may seriously endanger or obliterate both his interests.

Further than the resort areas, which represent only a fraction of our line, there is an important interest in the maintenance of a specified shore boundary in residential areas. Witness the Galveston disaster of 1900 as an example of this type of economic interest, an example which can be repeated for every section of the United States' coastline.

The economic importance of erosion of agricultural or undeveloped lands is generally considered to be slight, though in the aggregate, over the country as a whole, the total is impressive. The intrinsic importance is real, however, though the high cost of protection has prevented any extensive consideration of the economics of such problems, it being readily apparent that it is not economically sound to spend \$ 50 a front foot to protect property worth only \$ 100 an acre on the market.

The records of expenditures and estimates for the annual maintenance of dredged channels at inlets give some idea of the magnitude of the economic importance of shore processes in respect to navigable channels. A few cases selected at random are :

Indian River Inlet, Delaware	\$ 30.000
Absecon Inlet, New Jersey	100.000
Ocean City, Maryland	35.000
York Spit Channel, Virginia	150.000
Charleston, South Carolina entrance	210.000

Savannah, Georgia entrance	321.000
St Augustine, Florida	60.000
Pensacola, Florida	70.000
Galveston Harbor, Texas	150.000

and these few by no means exhaust the list.

In the United States, the physical and economic importance of shore studies has been recognized by Federal and State legislation for a long time, though it was only in 1945 and 1946 that a policy recognizing Federal financial responsibility was adopted.

Cooperative studies of beach erosion, designed to develop effective means preventing erosion of coastal and lake shores by waves and currents, were authorized by Section 2 of the River and Harbor Act approved July 3, 1930. The cost of these studies is borne equally by the **United States** and the cooperating agency, which must be a State, municipality, political subdivision, or one of their governmental agencies with authority to study shore problems. It is to be noted that these studies result simply in a determination of how a problem situation can be remedied best, they do not provide for any action.

Section 5 of the River and Harbor Act approved August 30, 1935, required that plans for the improvement of the entrance at the mouth of any river or at any inlet consider the configuration of the shore line, and the probable effect of the improvement that may be expected for a distance of not less than 10 miles on either side of the entrance. So far as is known the responsibility thus recognized to consider the effects of improvements has not been extended to include reparations or restoration of damage caused by inlet or entrance improvements. It will be noted also that the legislation does not in itself prohibit improvement even though there be found a probable deleterious effect.

Federal responsibility for the development of a science of shore protection, in the sense of development of means, procedures and techniques, was assumed by Public Law 166 of the 79th Congress, approved July 31, 1945. This act declares the duty of the Chief of Engineers, active through the Beach Erosion Board, to make general investigations, entirely at Federal expense, with a view to preventing erosion of the shores of the United States by waves and currents, and determining the most suitable methods for the protection, restoration and development of beaches ; and to publish data and information concerning the erosion and protection of beaches and shore lines. The

purpose of this authorization is to provide the technical "know-how" to arrive at sound solutions of the complex problems of shore control.

The second section of this act establishes studies of erosion and shore control on the same level as river and harbor studies, opening the possibility for direct remedial action by the Federal government in the form of adoption of a Federal project for improvement to be accomplished partially or wholly at Federal expense.

The most recent Federal legislation regarding shore control is Public Law 127, 79th Congress, approved August 13, 1946 which declares the policy of the United States to assist in the construction, but not the maintenance, of works for the improvement and protection against erosion by waves and currents of the publicly-owned shores of the United States. It restricts the Federal contribution to a maximum of one-third the total cost of such improvements, except in the case of certain sea walls. Provision is made for the prosecution of the work by either the Corps of Engineers or the local political subdivision.

Federal responsibility in shore control and research in shore processes is not completely vested in the Corps of Engineers. The National Park Service, the Bureau of Yards and Docks, the Bureau of Ships, and the Hydrographic Office, Navy Department, all have an intimate interest in, and responsibility for certain phases of shore studies and protective works.

State responsibility in shore control matters has been assumed notably by the States of California, New Jersey, New York, Ohio and the Commonwealths of Pennsylvania and Massachusetts. Active participation in studies and the construction of protective works is provided in each of these states, the costs being equally divided in general. Most existing state legislation permits Federal contribution to the costs of construction of protective works. There is no uniformity between the states in designation of the State governmental unit responsible for administration of shore control legislation, generally, however, the policy is to employ existing units rather than establishing unique organizations. Notable exceptions are Ohio and California, which prescribe distinct offices for the purpose. Below the State administration level, shore problems are usually assigned to the engineering staff of the political unit, or, in

some cases, to the highway staff, the latter by some obscure perversion of logic.

II. — BASIC KNOWLEDGE OF SHORE PHENOMENA

In this paper, it obviously will be impossible to consider more than a brief outline of what is known of shore phenomena or to discuss more than the elements of the philosophy on which methods of solution are based.

Two concepts are fundamental to the study of shore phenomena. The first is that of the physiographic unit. This unit may be defined as a shore area so limited that the shore phenomena within the area are not affected by the physical conditions in adjacent areas. Analysis of shore problems indicates that, for the purposes of studies directed toward protection or modification of the shore, all important phenomena depend upon the material and energy available to the shore. What we seek in a physiographic unit, therefore, is a shore area so defined that the energy and material available within the area are not dependent upon adjacent areas. Thus, for example, we may consider an island as a physiographic unit; it is probable that in the United States, the entire Atlantic coast of New Jersey, from Sandy Hook to Cape May, is a unit; and on a smaller scale, Monterey and Emerald Bays in California are units. The physiographic unit defines the boundaries of the area to be studied when considering shore problems.

The second basic concept is that of material-energy balance within the physiographic unit. Material balance connotes equality between the quantity of material supplied to, and that lost from a shore area. Obviously a time factor must be introduced, which requires that the volume of material considered be thought of as a rate of supply or loss. Thus we may be concerned with material balances pertaining to days, months, seasons, or years, among others. Since material is moved from its source into and away from any given beach or shore section only by the application of forces we must think also of rates of doing work, or energy.

Let us examine briefly the factors involved in material balance. If we assume some hypothetical shore stretch and consider the material situation therein we find that formulation of a complete balance requires knowledge of the rates of :

- 1 - Littoral drift to and from the area.

- 2 - Supply and loss from and to the adjacent sea bottom.
- 3 - Supply and loss from and to the adjacent land, including specifically dune area and other marginal land features.
- 4 - Supply of material contributed by drainage features.

Unfortunately it is not possible, in the present state of the science, to evaluate these factors in other than a qualitative fashion. Comparative study can indicate the probable relative importance of each of the factors, but only rarely is quantitative data available. In many areas only cursory examination is required to establish the littoral drift as the most important item, for example, the New Jersey Coast; whereas other areas are very complicated, for example the Monterey Bay, California coast where large supplies of material brought to the coast by streams and a submarine canyon greatly influence the coastal regimen.

Littoral drift can be evaluated by the amount of material trapped by shore structures, either natural or man-made, and from knowledge of the rate of depletion of sources of supply for example, eroding cliffs or headlands.

Estimation of the material volume derived from or lost to the adjacent sea bottom is unsatisfactory at present. Experiments are in progress at reduced scale in the laboratory which give promise of confirming some conclusions reached from theoretical considerations as to material transportation on the sea bottom. However, there is little, if any, evidence of a conclusive nature, with respect to this phenomenon in nature.

The quantity of material derived from or lost to the land can be evaluated with fair accuracy by comparative study of the topography of the area at various times, coupled with knowledge of the character of the land and shore material.

The determination of the volume of material supplied to a shore area by streams, gully washes, or other drainage features is facilitated by knowledge of the suspended and bed load carried by the flow. Sometimes this information can be gained from study of the stream mouth delta, more easily from records of the rate of silting, or filling, of the stream upstream of the mouth. The wide variation of material load carried, between flood and normal stages, must be kept in mind.

As we have mentioned already, material is transported in the shore area, and sometimes derived from area sources, by the application of energy available in several forms. The more important forms are waves and currents, though tidal energy in the form of elevation and depression of the sea surface is important in a unique fashion.

Waves are generated by wind, either local or distant, by the interaction of the atmosphere and the sea surface. The energy of the wave is divided into potential energy, represented by the variation in surface elevation of the sea, and kinetic energy, represented by the internal movement of water participating in the wave motion. If a wave breaks on the shore essentially all of its energy is available to move material within or out of the beach environment. At the break the total energy of the wave probably becomes kinetic and material movement then is a function of the velocity regime in the shore area. It is apparent that the beach area affected is bounded approximately by the point of break of the wave and the most landward extent of the wave wash on the beach.

Waves offshore seldom travel in directions perpendicular or parallel to the shore, generally approaching the shore at some intermediate angle. As the wave reaches shoaling water of a depth equal to about one-half the wave length, its characteristics are modified. The wave period remains the same, but the velocity of advance of the wave form, the height, and the wave length change. Particularly, the velocity of advance is reduced and the length shortened. This bottom effect causes a so-called "refraction" or bending of the wave, in a direction to cause the wave to become parallel to the depth contours. Observation has shown that wave crests usually reach an exposed shore with a direction not exceeding about 15° from the shore line direction. A moment's study shows that the velocity regime mentioned previously must have an alongshore component. It is this component that furnishes the energy maintaining littoral drift.

When currents exist they contribute kinetic energy to the balance, and they must be considered though they may be of apparently minor magnitude. The reason for their inclusion lies in the power they have to transport material that is thrown into suspension by breaking waves. Currents of velocity in excess of about

1.5 feet per second are component in themselves to pick up and transport material.

While it is not possible at present to establish a numerical energy balance, a qualitative balance can be reached by comparative study of the individual energy sources.

The material supplied to beaches is derived from coastal land by wave attack or is supplied to the littoral zone by stream action, wind transportation, or other agents of subaerial erosion. In any case the material must derive ultimately from the decomposition products of hard or soft rocks. Thus shore materials can be said to consist of rock fragments, mineral grains, or decomposition products of these two. What we are concerned with in studying beach materials is then a population or aggregation of discrete particles. The behavior of the population is obviously conditioned by, and a function of the character of the discrete member particles.

The character of the materials derived from hard rocks, such as granite, schist, slate, or sandstone, is usually that of fragments of the parent; that is, a size reduction of the material is the chief metamorphic effect of the wave action. Soft rock erosion, on the other hand, usually results in the production of heterogeneous materials, both because of the heterogeneity of the parent and of the relative ease of mechanical deterioration of soft rocks into mineral constituents. Each of the numerous sources of materials show a consistency in certain characteristics of derived products. For example, hard rocks always break down under wave action into angular fragments, whereas glacial till always furnishes rounded fragments with smaller size material. These consistent characteristics furnish us with a method of identifying sources. Further, many of these characteristics are modified in unique fashion by the dynamic processes to which they may be subjected, thus establishing the possibility of identifying and describing dynamic processes from examination of modified materials.

We now see the significance of material analyses. Such analyses are concerned with the determination of the size, shape, texture, and mineral constituents of the discrete particles, and the size range, materials, and variations of composition of the populations of particles. Aside from the usefulness of analyses in the identification of sources and dynamic processes, the analytical information is of great value in predicting the effects of modification of sources and processes.

We cannot now discuss in detail the methodology and philosophy of material analyses but a few moments must be given to discussion of transportation effects since these are so important in shore line phenomena. Many experiments and observations have defined a process known as selective transportation. If we follow a given population of particles through a period of transportation we find that the average or median size of the population decreases in the direction of movement. This effect results more from the loss of larger particles through incompetence of the carrying stream than from the attrition or wearing away of individual particles. In other words, for a given energy input the large particles are transported smaller distances than the small particles. Further, by reason of abrasion and impact of individual particles the shapes of the particles are modified to more nearly approach true spheres. An additional transportation effect is that of change in the surface texture of particles. Particles near their source may be relatively rough, whereas those subjected to long transportation are smooth. Wind transportation produces a characteristic frosted surface absent when water transportation is involved. At the moment it can be said that selective transportation effects are among our most reliable indicators of the dynamic processes to which the beach material has been subjected. So much for our discussion of beach materials.

Energy at the shore line may be applied through any or all the three coincident media concerned, land, air, and water. Only the latter two are considered presently to be important, except in the rare cases of seismic disturbance or other metamorphic changes, such as slippage due to faulting. Energy of the air is considered to be applied principally by the wind. Two important results of wind action are: transportation of material to and from the beach and usually associated dune areas; and generation or modification of water waves. The effectiveness of waves as an energy transfer medium lends great importance to the latter result. Current generation is not to be neglected when studying atmospheric energy, though usually it can be neglected as a determining factor in shore processes.

Atmospheric energy in the form of wind is expended on beach areas in the transportation of material cast onshore by waves and allowed to dry on the upper reaches of the beach. If large quantities of material are thus made

available for movement the result is usually a dune area landward of the beach. Conveniently, the volume of material removed from the beach or lost from the dune area and supplied to the beach by this process is easily determinable by comparative study of the dune area topography and simple cubature. Selective transportation effects are present, though less importantly than for longer transportation processes, the most evident effect being a surface texture change, the frosting of individual particles.

Winds are believed to generate water waves by a combined frictional drag and pressure action. Certain minimum wind velocities, duration times, and fetches, or distances over which the wind blows in a constant fashion, are related to the achievement of maximum energy transfer from the wind to the water. The significance of atmospheric energy here lies in the fact that by the generation of water waves which can act directly on the shore with little loss of effectiveness, the atmospheric energy can affect shore processes much more powerfully than would be possible otherwise.

We have discussed previously the transportation characteristics of water waves. In addition we must examine the effect of wave action on shore line structures. The problem is chiefly one of structural stability and has two phases ; one, the ability of the structure to withstand the force of wave attack ; two, the ability of the structure to withstand secondary effects of the wave action, such as undermining. The first phase is concerned with the design problem of sustaining impact and static loads which can be expected from usual and unusual conditions of wave action. This requires quite extensive knowledge of the wave characteristics at the locality, knowledge which is generally not available at present. The second phase involves knowledge of the hydraulic and other effects, of wave action on the environment in which the structure is located. Among these effects, formation of clapotis, or standing waves ; erosion of the bottom at the toe of the structure ; and loss or fill of bottom material are those of chief interest. Some information on these matters is available.

III. — METHOD OF SOLUTION OF SHORE PROBLEMS

To this point we have considered the basic responsibility for shore studies, the fundamentals of the philosophy of solution of shore

problems, and, very briefly, some of the basic knowledge available to the engineer in his attack on the problem. Now we will consider how we may solve shore problems.

It is assumed that the objective of the study is clearly defined. This may be to prevent further loss of land to the sea, or to provide recreational beach of specified character and extent, or to protect a certain area of upland by provision of a beach, etc...

The first problem is to determine what information is needed to enable formulation of, at least, a qualitative material-energy balance. We must have, first of all, a reference base for horizontal and vertical positioning of the physical situation. This takes the form of a base line of level and azimuth, permanently monumented to allow recovery at a future date, and referenced to triangulation and level nets.

There must be knowledge of existing physical conditions, which is provided by hydrographic and topographic surveys of the area to be studied. Here we make use of the concept of the physiographic unit. Obviously an answer can be obtained with greater ease and accuracy for an isolated unit than for one which is subject to extraneous influences. We examine our problem area from the viewpoints of coastal physiography, probable sources of material, and probable factors influencing littoral drift, with the purpose of determining the boundaries of the area which must be surveyed to existing physical conditions and the forces modifying such conditions. Having selected the area to be studied we require accurate knowledge of the water depths, generally to the 18 foot or 30 foot depth mean low water, of the intimate topography and culture of the problem area, and of the critical topographic features of the study area.

Aerial photographs are usually required to supplement the hydrographic and topographic survey information, and can be expected to furnish valuable collateral information on many aspects of the problem through critical interpretation. Care must be taken to insure high quality photography since beach areas are extremely difficult to photograph satisfactorily.

A number of items must be included to supply incomplete basic information. Such items are records of the average wind regimen, studies of the character and effects of storms with particular reference to their effects, and the reason for such effects, on the shore ; studies of the geology of the area, particularly of the materials

present which can be considered as present or potential sources and of the geologic relations controlling the areal physiography.

Recalling the previously stated principles of material-energy balance within the physiographic unit attempt should be made to obtain additional information required to compute these balances. Items usually required for this purpose are : studies of the impounding or sand trapping associated with existing shore structures to indicate the predominant direction and approximate magnitude of the littoral drift ; samples of the beach material and probable source material, with such analyses of size, shape, texture, etc... as may be desirable to define the transportation processes and effects to which the material has been submitted ; information on the character of the wave action within the study area, with corollary knowledge of important current phenomena. Sources of material, if they are defined, should be examined with a view to evaluating the rate at which they have and are presently supplying material.

The analysis of the problem is dependent upon the definition of what is happening and how it happens. It has been found that this definition is facilitated by use of the following questions :

- 1 - What are the sources and character of the beach material ?
- 2 - What are the rates of supply and loss of material to and from the problem area ?
- 3 - What is the manner of movement of material from the source to the beach and from the beach to other areas ?

It is immediately apparent that, if answers to these questions can be obtained, the physical conditions causing the problem situation will be defined. This is the definition of the problem. It has been the experience of investigators in this field that there are usually unique definitions of the problems, viz. each problem is separate and distinct, thus making the solution of such problems by analogy an unsatisfactory method. There has been a tendency to practice solution by analogy, which still continues to some extent but which also is on the decline as more and more knowledge of the problem is developed.

Analysis of the problem reduces to consideration of the following factors :

- 1 - What are the feasible methods of modifying rates of supply and loss of material to achieve the desired results, and what are the effects of such modification ?

- 2 - What are the design requirements of the feasible methods of modifying supply and loss rates ?

- 3 - What is the economic cost of each of the feasible methods of modifying rates of supply and loss ?

Presently known feasible methods of modifying supply and loss rates are limited with one exception to various types and placements of structures. You know these by their designations as breakwaters jetties, bulkheads, sea walls, revetments, and groins. One method which has been recommended frequently, and is the only non-structural method, is that of artificial nourishment.

Breakwaters, as the name implies, are energy dissipating structures employed to break or dissipate water waves and thus prevent their incidence on an area it is desired to protect. Their effect on material movement arises entirely from modification, usually in the form of reduction, of incident energy in the form of water waves.

Bulkheads, sea walls, and revetments constitute a class of structures whose chief function is to substitute non-erodible for erodible material and concurrently provide for energy dissipation. Their effect on the movement of material is direct, by the substitution of materials, and indirect, by the modification, sometimes dissipative, of the energy in incident waves or currents. They are employed widely and are particularly suited for the preservation of a definite land-water boundary at a given location. There is almost always an increase in degradational action associated with their use.

Groins are structures designed and built to intercept material in littoral movement and thus modify rates of supply and loss of material directly. Their influence on the energy pattern is almost entirely indirect, and may be non-existent. It should be noted that because groins, if effective, change the physiographic conditions adjacent to them, their function should be considered as more than to act simply as barriers to movement. They may be the cause, through changing physiographic conditions, of appreciable modification of the entire littoral regimen.

Jetties are multi-purpose structures, whose functions may include those of breakwaters, groins, and bulkheads. They are usually associated with inlets, river mouths, or harbor entrances, and frequently result in major

physiographic changes. Analysis of the effects of jetties on shore lines is one of the most difficult of shore problems to solve in detail, the ease with which general features of the effects can be predicted belying the difficulty of a detailed analysis.

Artificial nourishment, is adequately described by its name as a method of supplying material additional to that available naturally. It is useful for rehabilitating or rebuilding beaches, for maintaining a desired existing beach condition, or for modifying to a large or small extent partially desirable conditions. Although gaining in popularity as a shore control method little authoritative data on its requirements or performance are available.

Closely associated with these methods of modifying rates of supply and loss, and important in consideration of their use, are the design requirements of the methods. These cannot be discussed in detail here but the general features of the requirements may be listed.

Design requirements fall into two categories, those controlling structural stability, and those governing the hydraulic effects of the structure. Structural stability is obviously a function of the structural material, the loads to which the structure may be subjected, and the foundation character. The major unknown here is the loads which may affect the structure ; static load of surcharged material, wave impact, ice loading, are some of the loads which must be considered. Hydraulic design requirements are somewhat more difficult to handle, largely because so little is known of the hydraulics of the structure situations. The important point to guard against is the possibility of creating erosive hydraulic conditions by action of the structure.

In many instances it will be found that alternate solutions of shore problems are indicated by the analysis of the physical problem. In other instances there will be a unique solution. When a choice is possible, the problem analysis should include information on the comparative economic cost in sufficient detail to permit final selection of a plan of solution on the basis of economic advantage between otherwise equal plans. It may be found that two, or more, plans are feasible but not equally desirable from a physical viewpoint, and considerations of economy are important. In this case, economic cost is the controlling item dictating the selection of a plan, even at the expense of desirable physical advantages. Note that throughout this

discussion we are considering alternate solutions only when the problem analysis indicates such solutions are admissible. In every case the criterion of physical feasibility must be the ultimate control.

The formulation of the solution is a simple process of fitting the selected plan of control into the problem area in such fashion as to achieve the objective of the study. For example, if the analysis indicates that groin construction is the solution to the problem, then formulation involves determination of the profile of the groin, selection of locations for groin placement, and determination of the construction plan, i.e. when the groins should be built, in what order they should be built, etc... If artificial nourishment is the solution indicated by analysis, then formulation of the solution involves selection of a method of depositing the additional material, detailed planning of the transport of material to the area of deposit, selection of the season of year most favorable for the work, etc...

IV. — FUTURE DEVELOPMENTS

It must be apparent by now that there are great deficiencies in our knowledge of even some of the less complicated phenomena of shore line behavior. We can reasonably inquire therefore what the future holds for shore line control.

It is my belief that the future developments in shore study and control are contingent upon two factors : first and most important, fundamental research in materials, the transportation of materials, and methods of modifying the material-energy balance of an area ; second, what might be called political-financial considerations, which control the interest in and support given to the required fundamental research.

In the field we are concerned with, as in many other technical fields, there is a serious, almost critical shortage of basic information. Without such information, the technical man finds it impossible to advance applied research, the sort that pays off in dollars and cents practical applications. The science ceases to progress and decadence is inevitable unless the lack of progress initiates fundamental research. In our field we have progressed as far as we have largely on fundamental research in other fields, notably geology, hydraulics, mathematics, and physics, we have made no fundamental contributions of our own. It is necessary that we initiate and support vigorously both fundamental and applied research in our field. Our greatest need is for such work on shore materials and the transpor-

tation of materials under maritime conditions. The knowledge of uni-directional transportation of material in streams is of only partial value to us in our problem of multi-directional flow under periodically varying forces. We must know more about the details of material derivation from source rocks, the degradational processes of derivation and transportation, the possibilities of metamorphosis of constituent particles and populations of particles. It is essential to know the details of littoral movement of materials, the relationships of energy to material movement, the feature of energy transfer and dissipation in the coastal environment, the requirements for modification of the material-energy balance, even how to compute an accurate, quantitative material-energy balance.

The problem is difficult technically, it is insoluble without strong and vigorous political and financial support. Political support is required to continue the centralization of effort in organizations devoted solely to the problem of shore control, with its attendant benefits of most effective utilisation of available mental and financial resources, and to foster the use of knowledge thus developed by all groups concerned with shore control. About financial support almost anything I can say would be redundant. Obviously no progress can be made without funds to finance not only the application of knowledge but also, and more importantly, at present, to finance the development of basic knowledge which has no immediate discernible dollars and cents value.