

Transit littoral et conception des ports : l'exemple du port de Cotonou

Pierre Sireyjol

Ingénieur Général des Ponts et Chaussées,
Chef de la division Ports et Voies navigables au B.C.E.O.M.

Présentation du sujet

Le transit littoral, lorsqu'il est important, constitue une difficulté majeure pour la construction d'un port.

Le port de Cotonou est tout à fait typique des problèmes que pose un tel phénomène puisque la conception du port, dans son ensemble, a été, dans une large mesure, déterminée par l'existence d'un tel transit. En outre, la construction du port ayant eu pour effet de perturber ce transit, il a été nécessaire de concevoir un système de défense du rivage capable de faire face à la situation nouvelle qui venait d'être créée.

Le port étant maintenant terminé depuis plus de 12 ans, de nouvelles études ont été lancées sur le terrain, afin d'examiner, en vue de l'extension du port, comment les choses s'étaient passées en réalité et dans quelle mesure l'évolution qui s'est produite a été conforme aux idées que l'on pouvait avoir a priori ou à l'image qu'avaient pu en donner les modèles réduits. Cette confrontation ne manque pas d'enseignements.

Je me propose dans la présente communication de rappeler tout d'abord comment se pose le problème du transport littoral dans le cas du port de Cotonou, d'examiner les dispositions qui ont été prises pour y faire face, de rendre compte enfin des diverses campagnes qui ont été entreprises récemment montrant l'évolution du rivage et les enseignements qu'il est possible d'en tirer.

Le site du port de Cotonou et les conditions naturelles du rivage

La ville de Cotonou est bâtie au débouché d'une lagune dans le golfe du Bénin. La côte y est basse,

rectiligne, sablonneuse, orientée sensiblement Est-Ouest, largement ouverte à l'action des houles du large.

Ces houles ne sont pas différentes de celles régnant dans l'ensemble de la région, entre Monrovia et Pointe-Noire. Longues et régulières, elles présentent une obliquité très nette par rapport au rivage, qui tend à faire dériver les matériaux en direction de l'Est. Quand a été posée au B.C.E.O.M. vers 1952, la question d'un port sur cette côte, il est apparu immédiatement que le problème du transit littoral devrait y jouer un rôle prédominant. Les seuls éléments dont on disposait à l'époque pour estimer ce transit se limitaient aux renseignements suivants :

a) Connaissance approximative du transit à Lagos à 100 km à l'Est de Cotonou, où l'on avançait le chiffre de 800 000 m³/an. L'obliquité du rivage sur la direction de la houle étant légèrement plus faible à Lagos qu'à Cotonou, il y avait donc lieu de penser que le transit était sensiblement plus important à Cotonou ;

b) Observation des évolutions du débouché lagunaire à Cotonou qui, avec ses phases successives de lagune ouverte et de lagune fermée, confirmait de façon évidente l'existence d'un fort transit, mais dont il était pratiquement impossible de déduire un chiffre précis.

L'évolution est schématiquement la suivante : le transit littoral qui s'exerce sur le rivage a tendance à fermer le débouché lagunaire. Cette fermeture se produit effectivement à un certain moment en saison sèche alors que la puissance de déblaiement des eaux qui transitent par le débouché est particulièrement faible. Dès lors, le cordon de fermeture du débouché a tendance à se consolider et il peut résister même pendant plusieurs saisons à des pluies consécutives. Le plus souvent, c'étaient les habitants de la région, pendant une saison des pluies particulièrement humide, où ils souffraient de la remontée des eaux de la lagune, qui décidaient d'amorcer une ouverture dans le cordon. Du fait de la différence de niveau, l'effet de chasse était alors très puissant,

l'ouverture s'élargissait et l'on arrivait rapidement à une situation lagune ouverte et le cycle recommençait avec son rythme, non périodique, de quelques années.

Enfin, l'observation des ensablements qui s'étaient produits entre des épaves abandonnées sur l'estran et le rivage, donnait également une idée de la puissance du transit littoral dans la région.

L'analyse de cet ensemble de phénomènes avait conduit à estimer assez rapidement dès le début des études le transit devant Cotonou à un chiffre compris entre 700 000 et 1 500 000 m³/an. Toutes les observations qui ont pu être faites pendant les années suivantes n'ont pas permis, jusqu'à la construction du port, de serrer davantage cette fourchette. Ceci montre combien il est difficile malgré son caractère fondamental, de mesurer pratiquement ce phénomène.

Bien entendu, des efforts considérables ont été poursuivis pendant toute la durée des études et aussi pendant la construction du port, pour s'assurer des caractéristiques de la houle génératrice de cet important transit littoral. Je rappellerai seulement ici les principaux résultats auxquels nous sommes parvenus :

- En ce qui concerne la période, il s'agit d'une houle toujours longue. La période constatée le plus fréquemment est celle de 12 secondes;
- Pour ce qui est de l'amplitude et de la direction, on est frappé par la grande régularité du phénomène. Il s'agit en effet d'une houle moyenne venant presque toujours du S-SW. Il est exceptionnel que l'amplitude tombe au-dessous de 50 cm, cependant que l'amplitude significative ne dépasse jamais 4 m. L'amplitude la plus fréquemment rencontrée est celle comprise entre 1 et 2 m, l'amplitude moyenne sur une longue période étant de 1,40 m. Il y a des variations saisonnières, les plus fortes houles étant de juin à août, mais les moyennes mensuelles ne varient pas de plus de 30 % autour de la moyenne.

Quant à la direction, elle a été observée pendant une très longue période, par observations purement visuelles, à l'extrémité de l'ancien wharf, par fonds voisins de - 10. On a trouvé que la direction moyenne de provenance était le gisement 198°. La direction de la houle ne varie pas beaucoup autour de cette moyenne, les observations extrêmes ne s'écartant jamais de plus de 30 degrés de part et d'autre de celle-ci.

Les différentes solutions examinées pour le port

Si l'on réfléchit à la nature des difficultés que présente pour la construction d'un port l'existence d'un transit littoral important, on s'aperçoit que le problème est d'assurer le passage de ce transit au droit du chenal d'entrée du port, c'est-à-dire par des fonds de l'ordre de - 10. Des solutions astucieuses ont, dans d'autres cas, pu être trouvées à cette difficulté, alors que des circonstances favorables se trouvaient réunies : tel est le cas du port d'Abidjan où l'on a pu ménager dans le chenal d'entrée d'importants courants de marée et où l'on avait en outre l'avantage de la proximité du "trou sans

fond" où l'on pouvait espérer voir disparaître le sable du transit littoral. Il faut croire que cette carte n'est pas facile à jouer puisque même dans le cas d'Abidjan, où étaient réunies ces circonstances favorables, il a fallu construire ces dernières années un épi d'arrêt des sables destiné à arrêter le cheminement du transit littoral et empêcher ainsi ce transit d'envahir le chenal d'entrée du port.

Aucune de ces circonstances favorables ne se présente dans le cas de Cotonou ; aussi, a-t-on recherché, dès les premières études du port, les dispositions qui pourraient être adoptées pour empêcher que le sable du transit littoral ne puisse se déposer dans la passe d'entrée du port.

Trois solutions différentes ont été examinées à cet égard :

- a) Port-ilôt
- b) Port à transit artificiel de sable
- c) Port à accumulation.

L'adaptation de chacune de ces solutions au cas de Cotonou a été étudiée sur modèle réduit par le Laboratoire Neyrpic à Grenoble (devenu S.O.G.R.E.A.H.), de façon à définir pour chacune de ces solutions, un avant-projet sommaire permettant de faire des comparaisons de coûts. Ce sont ces études préliminaires qui ont conduit à retenir définitivement la solution "port à accumulation". Nous rendons compte ci-dessous des résultats essentiels de ces recherches, parmi lesquels certains d'entre eux sont sans doute transposables à des cas analogues.

a) Solution du port-ilôt

Dans cette solution, les installations portuaires sont placées sur un îlot (voir figure 1) relié à la côte par un appontement sur pieux perméable à la houle, les dimensions de l'îlot et son éloignement étant suffisants pour que le transit littoral puisse continuer à s'exercer entre l'îlot et le rivage. La nécessité de disposer pour les navires d'un plan d'eau protégé conduit à donner à

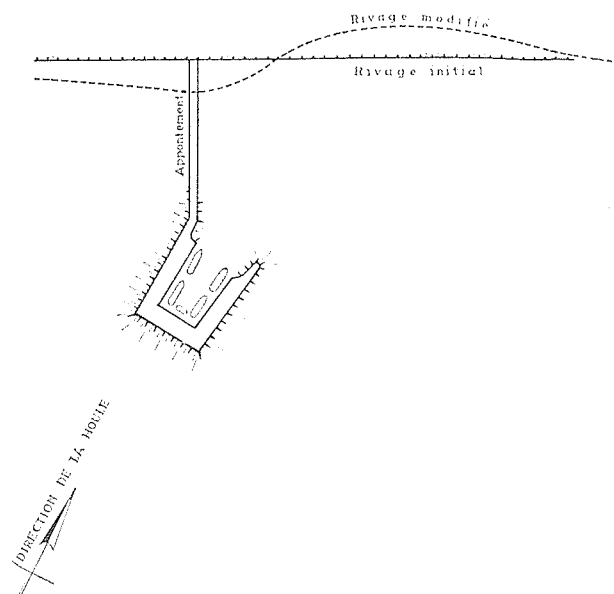


Figure 1 - Port Ilot

l'îlot une forme en fer à cheval, l'entrée des navires s'effectuant du côté opposé à la houle, donc vers le rivage. Dans un tel système, le plan d'eau compris entre l'îlot et le rivage, du côté opposé à la houle, bénéficie d'une certaine protection, d'autant plus faible que l'on s'éloigne de l'îlot.

Sur le rivage, le transit littoral existant sur l'ensemble de la côte n'est possible que moyennant une modification de la forme du rivage. Il se produit une avancée au droit de la partie Ouest du port, compensée par une érosion immédiatement à l'Est. De la sorte, l'inclinaison de la houle sur le rivage, dans la partie la plus protégée, est plus inclinée qu'ailleurs, ce qui permet au transit de se poursuivre. On peut donc arriver ainsi à une forme stable, à la condition que les dimensions de l'îlot soient assez faibles, eu égard à son éloignement du rivage.

Dans le cas contraire, la déformation initiale se poursuit jusqu'à donner naissance à un tombolo entre l'îlot et le rivage.

Les essais ont été faits dans le cas de Cotonou en schématisant l'îlot par sa largeur frontale (parallèle aux fronts d'onde) et par sa distance au rivage, les quatre combinaisons suivantes ayant été étudiées :

- distance au rivage : 1 500 et 2 500 m
- largeurs frontales : 440 et 800 m.

Ces essais ont montré d'abord que la solution avec îlot à 1 500 m n'était pas viable et qu'il y avait formation d'un tombolo même pour l'îlot de 440 m de largeur frontale. Pour une implantation à 2 500 m, les essais ont montré que le tombolo se formait encore pour un îlot de 800 m de largeur frontale. Au contraire, la modification du rivage reste toujours peu importante avec un îlot de 440 m de largeur.

Bien entendu, ces essais supposent que l'on a reproduit sur le modèle les diverses directions de houle telles qu'elles existent dans la nature. Ils montrent que la tendance à la formation du tombolo est plus forte que ce que l'on aurait pu penser a priori. En cherchant à chiffrer le coût nécessairement très élevé d'un port-îlot, qui devrait être implanté à 2 500 m du rivage et conserver néanmoins des dimensions limitées, il est facile de se convaincre que ces essais démontrent que la solution du port-îlot n'est pas économiquement viable dans le cas de Cotonou.

b) Port à transit artificiel

L'idée du port à transit artificiel est la suivante : si l'on construit en saillie par rapport au rivage, un port sur

une côte à fort charriage, il se produit une accumulation du côté par où arrive le sable. Pour éviter l'ensablement du port, une solution peut consister à pomper ce sable et à le refouler par des conduites posées à terre et contournant le port, sur le rivage, du côté aval par rapport au transit, ce qui reconstitue celui-ci. On sait que quelques exemples existent de par le monde où cette solution a été mise en œuvre dans des conditions satisfaisantes. On cite notamment le cas des ports de Durban au Natal, Santa Barbara et Port-Hueneme en Californie.

Dans le cas de Cotonou, la difficulté consistait à pomper, dans les conditions les plus économiques possibles, le sable qui tend à se déposer à l'Ouest du port et à le refouler à l'Est. Les essais ont montré que le pompage devait avoir lieu sur l'estran lui-même et à proximité des rouleaux, de façon que l'agitation régnant dans la zone où l'on effectue le pompage ramène une nouvelle quantité de sable qui peut se déposer à l'endroit même où l'on avait pompé, ce qui permet à l'opération de se poursuivre. Ces constatations conduisaient à prévoir que le pompage serait effectué à partir d'une passerelle perpendiculaire au rivage sur laquelle se déplacerait le matériel de pompage et qui supporterait la canalisation de refoulement.

Finalement, la solution s'est révélée viable dans son principe, mais a été condamnée pour des raisons de prix. L'étude économique a montré en effet qu'il était moins onéreux d'allonger l'ouvrage d'arrêt des sables, perpendiculaire au rivage, de façon à accroître la capacité du piège à sable ainsi constitué que de vider ce piège par pompage. Cette conclusion n'est pas différente de celle à laquelle on arrive généralement lorsqu'on se demande s'il vaut mieux surélever un barrage dont le réservoir s'est envasé, ou dévaser le réservoir. Dans le cas où elle est techniquement possible, c'est le plus souvent la première solution qui prévaut.

c) Solution du port à accumulation

Dans un tel cas, le port peut être schématisé par un ouvrage d'arrêt perpendiculaire au rivage. La saillie que présente cet ouvrage par rapport au rivage détermine le temps pendant lequel se produit l'accumulation. Au-delà, l'accumulation n'est que partielle, un certain pourcentage du transit contourne l'ouvrage et va se déposer dans la zone du port. Ce pourcentage, d'abord faible, augmente progressivement jusqu'à représenter la totalité du transit.

Les essais sur modèle ont permis de représenter tout d'abord la plage avec son transit littoral, avant

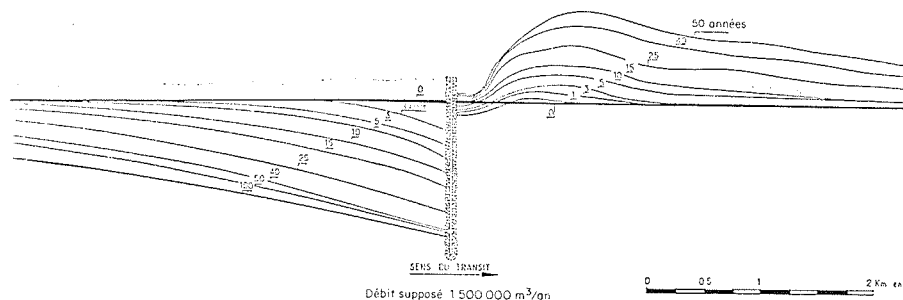


Figure 2 — Port à accumulation. Déformation du rivage produite par un épi de 1 500 m.

construction du port. L'échelle des temps sédimentologiques était telle que le transit annuel supposé égal à 1 500 000 m³ s'écoulait en 20'. La figure 2, extraite du rapport faisant suite aux essais, représente les formes successives du rivage côté accumulation et côté érosion, résultant de la construction d'un ouvrage d'arrêt présentant par rapport au rivage une saillie de 1 500 m. Le modèle, qui avait été taré pour tenir compte des conditions réalisées à Cotonou, permettait donc de prévoir pour un port présentant par rapport au rivage une saillie donnée :

- les quantités de sable pouvant être stockées à l'Ouest du port et le temps pendant lequel le transit serait complètement arrêté,
- la courbe du rétablissement progressif du transit, à partir du moment où l'ouvrage commencerait à être contourné,
- la forme et la zone des dépôts et des érosions se produisant à l'amont et à l'aval du port, etc.

Tous ces résultats étaient d'ailleurs très voisins de ceux que laissait prévoir la théorie élaborée par M. Pelnard-Considère au sujet de ces divers phénomènes.

Sur le plan économique, ces essais ont montré que des 3 solutions envisagées, celle du port à accumulation était la plus intéressante pour construire le port de Cotonou.

Mise au point du projet du port

Le type de port étant ainsi arrêté, il restait à en déterminer la forme et les dimensions exactes. L'incidence oblique de la houle avec une direction de provenance presque toujours comprise entre le Sud et le Sud-Ouest devait conduire à prévoir une passe ouverte à l'Est et couverte par une jetée Ouest comportant une première branche fortement inclinée sur le rivage et servant d'arrêt des sables et une deuxième branche à peu près parallèle à celui-ci.

L'étude d'exploitation devait montrer que la meilleure façon d'utiliser un tel plan d'eau était de le doter d'un quai unique parallèle au rivage. Une telle disposition, évitant les môles et les quais de faible longueur, est en effet plus favorable en ce qu'elle favorise les circulations et permet de jouer avec la longueur variable des navires. D'un autre côté, l'inconvénient qu'on pouvait lui

objecter, de limiter la longueur du quai possible à l'intérieur du plan d'eau, n'était pas à considérer. En effet, l'étude de l'ensablement à l'Ouest du port avait montré que cet ensablement serait assez rapide pour permettre le creusement d'un nouveau bassin dans les sables d'apport avant la date à partir de laquelle l'extension du trafic en justifierait la nécessité. En attendant, le port comporte 4 postes à quai parallèles au rivage, les aménagements du port de pêche, ceci sans parler des accostages prévus le long de la traverse.

Le projet étant ainsi arrêté dans ses grandes lignes, il comportait un inconvénient tenant à ce que le port étant essentiellement gagné sur la mer, le volume de sable nécessaire à la constitution des remblais ne se trouvait pas à l'intérieur du port et devait être apporté avec une drague marine. Une solution originale devait être trouvée à ce problème, consistant à remplacer une première branche de la jetée Ouest par un appontement d'environ 200 m de longueur, perméable à la houle et atteignant les fonds - 5.

Cette modification présentait les avantages suivants :

- a) Retarder d'autant l'accumulation du sable à l'Ouest du port et l'érosion du rivage dans le port et plus à l'Est;
- b) Permettre l'accumulation du sable dans le port. En effet, l'appontement étant perméable, rien ne se produit pendant sa construction. Dès que l'on a construit, au contraire, une certaine longueur de jetée en enrochements au bout de l'appontement, il se produit un effet d'ombre qui déforme le rivage et amorce très vite un tombolo. Le phénomène a été étudié d'abord sur modèle, puis suivi de près ensuite tout au long des travaux. La concordance entre les prévisions du modèle et la réalité fut d'ailleurs excellente.

Les points suivants doivent être signalés comme particulièrement frappants dans cette évolution :

- si l'influence sur la forme du rivage de la construction de l'appontement s'est avérée insignifiante, celle des premiers enrochements mis en place pour constituer la jetée a été au contraire flagrante. Dès que ces enrochements ont constitué un îlot, le rivage s'est déformé et le tombolo a commencé à se former ;
- ce tombolo s'est ensuite développé comme une langue de sable du côté Est à l'abri de la jetée. Mais, chose curieuse, prévue par le modèle et confirmée dans la nature, le tombolo n'a jamais rejoint complètement

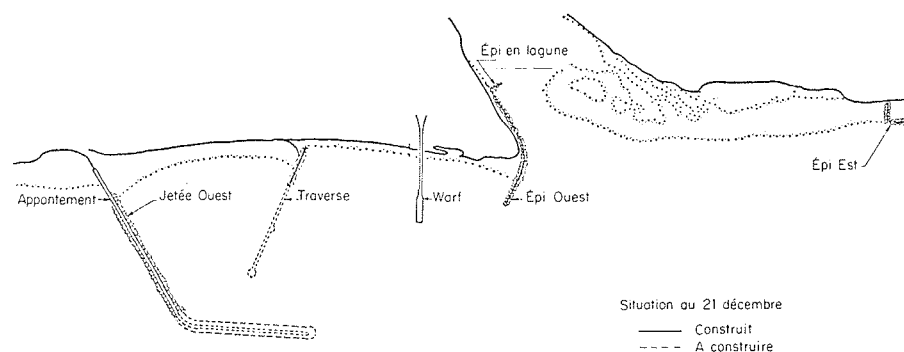


Figure 3 — Port de Cotonou. Ensemble des ouvrages.

la jetée pleine. Une communication notée à marée haute, et qui était le siège de forts courants dirigés vers l'Est, s'est maintenue immédiatement à l'arrière de la jetée. Dans ces conditions, une partie du sable pouvait continuer à transiter par ce couloir et aller se déposer dans le port, dans la zone à l'abri de la jetée.

Ce procédé a donc permis d'accroître considérablement la quantité de sable disponible dans le port, à tel point qu'elle risquait à un certain moment de devenir excédentaire. Le processus a été alors arrêté (en avril 1962) par construction d'un cavalier en enrochements le long de l'appontement de la jetée Ouest, dépassant légèrement le niveau de la pleine mer. Cet ouvrage de faible hauteur (2 à 3 m au maximum) n'a représenté qu'un volume insignifiant d'enrochements et a permis, en quelques semaines, d'arrêter complètement le transit.

Ouvrages de défense à l'Est du port

La construction du port à accumulation devait bien entendu entraîner l'érosion du rivage à l'Est du port. Le phénomène était d'autant plus important que l'on se trouvait au droit de la ville de Cotonou construite au bord même du rivage. En outre, l'important ensemble lagunaire Bénin - Ouest Nigéria comporte un débouché à la mer immédiatement à l'Est de la ville de Cotonou, à 1 200 m seulement de la traverse qui marque l'extrémité du port de Cotonou.

Avant la construction du port, ce débouché présentait des alternances d'ouverture et de fermeture. Les courants de marée dont il était le siège avaient tendance à en déboucher l'entrée que menaçait d'obstruction, au contraire, le sable apporté par le transit littoral. L'action de celui-ci était prépondérante en saison sèche et aboutissait périodiquement à la fermeture complète du débouché. Au cours d'une des saisons des pluies suivantes, les lagunes ne communiquant plus avec la mer que par l'ouverture permanente de Lagos, leur niveau montait exagérément jusqu'à déverser au-dessus du cordon sableux déposé par la mer à l'entrée du débouché ; celui-ci s'érodait alors rapidement et l'on se retrouvait, après quelques jours, dans la situation lagune ouverte.

Il était clair que la construction du port devant arrêter le transit littoral, la tendance à la fermeture de la lagune disparaîtrait et l'on se trouverait en permanence en situation lagune ouverte.

Le phénomène méritait toutefois d'être étudié avec précision, en particulier parce qu'il commandait le système d'ouvrages à adopter pour la défense du rivage. Un modèle particulier fut donc construit par le Laboratoire S.O.G.R.E.A.H. pour étudier ces ouvrages. Les résultats en furent les suivants :

a) Confirmation de l'ouverture permanente de la lagune dans la situation future. Le modèle montra toutefois, contrairement à ce qu'on aurait pu penser a priori, que cette ouverture permanente, si elle devait

être plus large qu'elle l'était dans le passé en période d'ouverture, n'aboutissait pas au dégagement complet des bancs existant dans le débouché lagunaire. Le chenal de communication devait se stabiliser contre la berge Ouest et offrir des profondeurs de l'ordre de 3 m sous le zéro.

b) Le modèle a montré par ailleurs que, dans la situation dans laquelle on allait se trouver, d'un rivage soumis à une houle oblique, le long duquel le transit littoral allait être brutalement interrompu, le système de défense du rivage le plus efficace consistait en la construction d'un petit nombre de longs épis plutôt que dans la construction d'un plus grand nombre d'épis courts.

c) La constatation précédente a conduit à disposer le système des ouvrages de défense à l'Est du port comme suit (voir figure 3) :

- Un premier ouvrage, dit épi Ouest, à 1 100 m environ à l'Est de la traverse, prolongeait la berge Ouest du débouché lagunaire. Il devait s'avancer en mer sur une longueur d'environ 200 m et atteindre des fonds de l'ordre de - 6. Cet épi devait se prolonger côté terre par un ouvrage de défense de la berge Ouest du débouché lagunaire, sur 450 m environ. Il se terminait par un épi perpendiculaire au rivage destiné à éloigner de la berge les forts courants qui tendaient à se produire dans cette région.
- Un deuxième ouvrage, dit épi Est, à 1 900 m environ à l'Est du précédent. Cet ouvrage est le seul prévu à l'Est du débouché lagunaire, zone où les terrains ayant beaucoup moins de valeur, on ne s'est pas proposé d'empêcher tout recul du rivage, mais seulement de limiter ce recul. L'objectif essentiel à atteindre était d'ailleurs de faire en sorte que le recul du rivage ne risque pas de mettre en cause le pont de Cotonou. L'étude sur modèle devait montrer l'intérêt d'un ouvrage en forme d'L ne s'avancant guère en mer mais comportant une importante réserve de matériaux destinés à lui permettre de subsister après que se seraient produits les érosions et les reculs attendus après la construction du port. Dans la situation finale, la branche de l'ouvrage parallèle au rivage doit même protéger un petit plan d'eau qui ne devrait pas manquer d'être apprécié par les baigneurs.

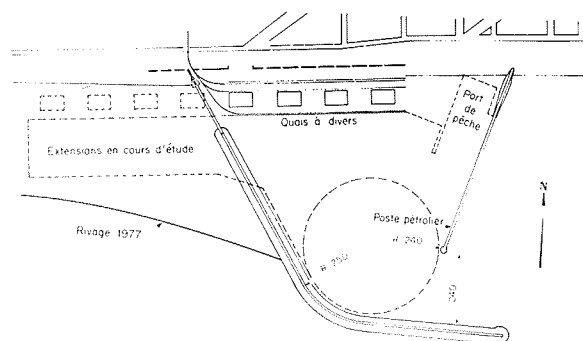


Figure 4 - Projet d'extension du port de Cotonou

La situation en 1977

Le port de Cotonou a été construit entre 1959 et 1965, la construction progressive de la jetée Ouest ayant interrompu le transit littoral au cours de l'année 1961. Cela veut dire qu'au cours de ces 16 dernières années, le sable s'est accumulé à l'Ouest de cette jetée, causant une importante avancée du rivage, cependant qu'une puissante érosion se manifestait à l'Est. Il n'est pas sans intérêt pour l'un et l'autre de ces phénomènes, de voir dans quelle mesure la nature est venue confirmer les idées que l'on avait pu s'en faire a priori.

La sédimentation à l'Ouest du port

L'avancée du rivage a été suivie tout au long de la construction, puis moins régulièrement au cours des années suivantes.

Indiquons tout d'abord qu'à l'intérieur de la fourchette 700 000 à 1 500 000 m³ par an que nous nous étions donnée pour définir le transit littoral, les cubatures des dépôts ont montré que la sédimentation annuelle se rapprochait de 1 400 000 m³. Des observations plus récentes ont donné 1 200 000 m³.

L'avancée du rivage a donc été extrêmement rapide à l'Ouest du port et, d'après le dernier lever qui a été effectué en Septembre 1976, le rivage se rapproche maintenant du coude de la jetée Ouest, l'avancée atteignant dans cette région 700 m environ. On se trouve donc bien dans la situation qui avait été prévue lors de l'étude, dans laquelle un important ensablement s'étant produit à l'Ouest du port, on est en position de draguer une darse dans ce sable pour permettre l'extension. De fait, cet extension étant maintenant reconnue nécessaire, le projet en est en cours d'étude et l'on se prépare à construire prochainement 4 nouveaux postes à quai en prolongement vers l'Ouest des quais actuels. Les matériaux obtenus par démolition partielle de la jetée Ouest pour ouverture de cette darse, seront utilisés à la construction d'un épi d'arrêt des sables de 300 mètres de longueur qui s'enracinera dans le coude de la jetée Ouest.

Il est intéressant d'examiner plus à fond comment se produit cet ensablement afin de recouper ces observations avec les idées théoriques que l'on peut avoir à partir de la théorie du transport littoral sous l'influence de la houle.

Il convient tout d'abord d'observer et il est facile de le faire sur les levés récents (1972 et 1976) que les nouvelles isobathes entre 0 et la cote - 10 sont sensiblement parallèles entre elles et au nouveau rivage. La pente de l'estran, sur ce rivage en cours d'ensablement, est nettement plus forte qu'elle ne l'était sur l'ancien rivage stabilisé. Au-dessous de - 10, il n'y a pratiquement pas d'ensablement si bien que l'on peut dire que chacun des profils en travers du rivage comprend une partie au-dessus de - 10 qui vient de se déposer et une partie au-dessous de - 10 qui diffère peu du fond marin ancien.

Le lever de 1972 permet déjà d'observer que le sable commence à passer au Sud de la jetée Ouest et le phénomène est plus net encore sur le lever de 1976. C'est ainsi

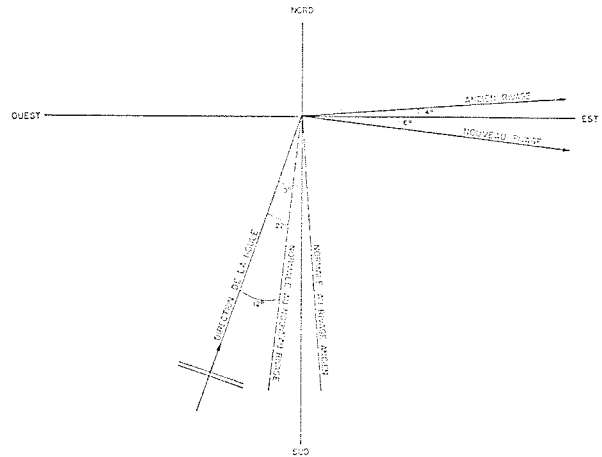


Figure 5 — Directions relatives de la houle et du rivage

que les fonds voisins de - 11 qui existaient au pied de la branche du large de cette jetée, se sont beaucoup sédimentés et une flèche sous-marine s'est formée au pied de son talus. Le haut de cette flèche est vers la cote - 5 et, progressant de l'Ouest à l'Est, elle n'est pas loin d'atteindre maintenant le musoir de la jetée. Il est donc devenu urgent de construire l'épi d'arrêt des sables si l'on ne veut pas voir la flèche progresser dans le chenal d'accès au port.

Il est également intéressant de vérifier sur cet exemple les idées théoriques que l'on peut avoir sur le transit littoral sous l'influence de la houle. Sur la base de l'observation faite suivant laquelle les isobathes comprises entre 0 et - 10 sont parallèles entre elles et au niveau rivage, on est conduit à penser que le transit littoral résultant de l'action de la houle doit être proportionnel, pour les incidences faibles, à l'angle formé par la direction de la houle, par fonds - 10, et la normale au rivage. L'ensemble des observations faites peut se résumer ainsi qu'il suit :

- Direction de l'ancien rivage : Est 4° Nord
- Direction du nouveau rivage, immédiatement à l'Ouest de la jetée Ouest : Est 6° Sud
- Direction moyenne de provenance de la houle telle qu'elle a été mesurée par fonds - 10 sur une longue période à Cotonou ⁽¹⁾ : Gisement 198°
d'où il résulte :
- Obliquité moyenne de la houle par fonds - 10 par rapport à l'ancien rivage : $18 + 4 = 22^\circ$
- Obliquité moyenne de la houle par fonds - 10 par rapport au nouveau rivage : $18 - 6 = 12^\circ$

Si nos diverses supputations sont exactes, le transit littoral au point considéré devrait donc se trouver réduit dans la situation nouvelle dans le rapport de ces deux incidences, c'est-à-dire :

$$\frac{12}{22} \text{ soit } 0,55 \% \text{ environ de ce qu'il était.}$$

En réalité, la comparaison des levés hydrographiques de 1972 et 1976 conduit à penser que la réduction du

(1) Cette mesure ne saurait avoir une grande précision.

transit est sensiblement plus importante. Cela signifie probablement que la houle est légèrement plus au Sud qu'il n'a été mesuré. Si la direction moyenne de la houle était dans le 192° , au lieu de 198° , la réduction du transit devrait être dans le rapport :

$$\frac{12 - 6}{12 + 4} = \frac{6}{16} = 0,37, \text{ ce qui est plus vraisemblable.}$$

L'érosion à l'Est du port

On a décrit ci-dessus le dispositif de protection du rivage qui a été mis en place lors de la construction du port afin de contrôler l'évolution qui allait se produire. Il faut dire que cette partie du projet avait été conduite avec beaucoup de circonspection car c'est un domaine dans lequel les phénomènes naturels ne sont pas exactement connus, aussi s'attendait-on à devoir reprendre certains ouvrages pour parer aux effets de la mer. Il n'en a rien été et, contrairement à notre attente, les divers ouvrages ont pu être laissés tels qu'ils avaient été projetés.

Voyons donc ce qui s'est passé dans les diverses zones.

A) Entre le port et l'épi Ouest

On a constaté dans cette zone ainsi qu'il était prévu, un balancement du rivage comportant une certaine érosion dans la partie Ouest et un sensible engraissement contre l'épi Ouest. Après avoir craint un moment que l'érosion à l'Ouest devienne menaçante pour le boulevard front de mer, les choses se sont stabilisées assez vite sans qu'aucun nouveau dispositif ait dû être mis en œuvre.

B) Zone du débouché lagunaire entre épi Ouest et épi Est

Ainsi qu'il était prévu, le débouché s'est ouvert dès le début des travaux et ne s'est plus refermé depuis. Le chenal de communication entre la lagune et la mer au lieu d'être divagant comme il l'était auparavant, est venu se bloquer contre la berge Ouest de la lagune comme l'avait montré le modèle, ce qui justifiait pleinement les ouvrages de défense installés dans cette zone ainsi que l'épi en lagune. Des sondages récents ont montré que les courants de marée étaient très forts dans cette zone où l'on a constaté la présence de fosses au-dessous de - 10.

Ceci étant, la mobilisation des sables qui occupent la partie Est du débouché lagunaire est lente à se manifester, si bien qu'aucun recul important du rivage ne s'est encore produit dans cette zone. Tout au plus doit-on signaler que l'ouverture du débouché, facilitant la pénétration de la houle à l'intérieur de la lagune, a obligé à installer en quelques points de petites protections du rivage sur la berge Est de la lagune.

C) Zone de l'épi Est et Est de cet épi

Dans l'évolution du rivage, l'épi Est a joué le rôle de point dur qui lui était assigné. Constituant une petite saillie par rapport au rivage, il s'est d'abord engraisé à l'Ouest et démaigri à l'Est. Par la suite, les sables entre les deux épis se mobilisant progressivement, le rivage à l'Ouest de l'épi Est a eu tendance à reculer mais très lentement. Si bien que l'approfondissement annoncé par le modèle autour de cet épi, approfondissement en prévision duquel des réserves de matériaux importantes ont été constituées sur l'épi, ne s'est pas encore produit de façon très évidente. A l'Est de l'épi, au contraire, on constate une importante érosion qui atteint dès maintenant 250 mètres. Comme il faut bien que se reconstitue le transit littoral interrompu par la construction du port, on ne fait rien pour lutter contre cette érosion, peu gênante puisqu'il s'agit de terrains de très faible valeur. On a donc créé, avec la construction du port, un état de déséquilibre à caractère permanent qui se traduit par une sédimentation à l'Ouest du port (12 hectares par an) et une érosion à l'Est de l'épi Est, sensiblement moins importante. Il s'agit bien entendu d'une facilité que l'on a admise pour favoriser le projet, facilité qui ne serait guère pensable dans un pays développé où les terrains en bord de mer ont toujours une grande valeur.

S'agissant de recevoir à l'Ouest 1 500 000 m³ de sable par an, et de mobiliser à l'Est le même volume pour reconstituer le transit, on aurait pu s'attendre, les 2 phénomènes se produisant sur des épaisseurs à priori comparables (une dizaine de mètres dans chaque cas), à ce que la surface érodée soit sensiblement égale à celle sédimentée. Il n'en a rien été puisque la surface érodée n'a pas dépassé jusqu'ici 50 % des engraisements à l'Ouest du port. Cela provient probablement des sables qui ont pu être mobilisés dans la zone du débouché lagunaire. Il y a là néanmoins quelque chose que nous expliquons mal et qu'il sera intéressant de surveiller dans l'avenir.

Discussion

Président : M. VALLS

M. VALLS remercie M. SIREYJOL dont l'exposé très clair donne un excellent exemple de port réalisé – sous la direction du B.C.E.O.M. – dans une zone soumise à un fort transport littoral ; il ouvre ensuite la discussion.

M. BOULARD (D.T.M., Brest) pose au Conférencier les deux questions suivantes :

1/ Les calculs effectués – calés sur les résultats du modèle réduit – ont-ils confirmé les théories couramment admises concernant le transport littoral, et en particulier, celle de M. PELNARD-CONSIDERE ?

2/ Peut-on envisager qu'une étude globale puisse être entièrement effectuée à partir de modèles mathématiques, sans recourir à des modèles réduits souvent coûteux ?

M. SIREYJOL indique que les observations effectuées confirment raisonnablement les lois proposées par M. PELNARD-CONSIDERE. La difficulté essentielle dans ce genre de problème réside dans la connaissance de la direction de la houle au cours du temps. A Cotonou, le problème est simplifié, du fait que les houles sont très régulières (il s'agit presque uniquement de houles longues) et leur direction ne varie guère de plus de 20 degrés par rapport à la moyenne. Ces conditions assez fréquentes sur la côte d'Afrique ne se retrouvent guère dans les mers européennes.

M. ORGERON (L.C.H.F., Maisons Alfort) a été frappé par le fait que la sédimentation le long du rivage à l'Ouest du port se produit par tranches parallèles avec un talus extérieur de pente

plus forte que celle des fonds naturels. Cette constatation, qui facilite la prévision de l'efficacité des ouvrages d'arrêt du transit littoral, contredit, dit-il, certains schémas théoriques dans lesquels l'avancée d'un rivage se raccorde aux fonds anciens sans solution de continuité.

Comment s'explique le processus différent, observé à Cotonou : régime particulier de la houle, discontinuité granulométrique ... ?

La contradiction que vous signalez, répond M. SIREYJOL, provient vraisemblablement du fait que la côte est toujours en pleine évolution et loin de son équilibre ; les pentes alors observées sont plus fortes que celles qui correspondent à l'équilibre naturel du site.

Avez-vous, demande M. AUGUSTIN (Météorologie Nationale) une série de mesures annuelles du volume de l'ensablement à l'ouest du port ? Si ce volume est indépendant de la situation du rivage, il donnerait un indice intéressant de l'activité météorologique dans l'Atlantique Sud, au niveau des "roaring forties".

Malheureusement non, répond M. SIREYJOL, car il s'agit d'un gros travail nécessitant des moyens importants ; les mesures sont de plus en plus difficiles car l'ensablement se produit sur une grande longueur ; l'avancée annuelle est de l'ordre de 15 mètres mais varie d'une saison à l'autre.

M. le Président clôt la discussion et donne la parole à M. FLISKIN pour l'exposé de sa Communication.