ÉTUDE SUR MODÈLE RÉDUIT DE LA SÉDIMENTATION DANS L'ESTUAIRE DE LA VILAINE APRÈS CONSTRUCTION DU BARRAGE D'ARZAL

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 21 mars 1968

PAR C. ORGERON *

Rappel des données du problème

1. Les conditions naturelles.

La Vilaine et ses affluents, dont le principal est l'Oust, drainent un bassin versant de 10 400 km².

L'estuaire de la Vilaine, qui est l'un des centres mytilicoles les plus actifs de France, débouche à 25 km environ au nord de l'estuaire de la Loire, au fond d'un golfe peu profond, où la marée a une amplitude de 6 m en vives-eaux (fig. 1).

Le domaine fluvio-maritime de la Vilaine et de ses affluents est très vaste. Au cours des derniers millénaires, il a été sédimenté par des vases dont l'accumulation, sur des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres, a constitué des marais s'étendant sur 10 000 ha, au travers desquels serpentent les lits mineurs des rivières.

Le sol des marais est stabilisé à une cote un peu inférieure à celle des pleines mers de vives-eaux.

En vue essentiellement de faciliter la navigation, autrefois très active sur la Vilaine, des ouvrages de canalisation des rivières et de contention de la marée ont, dans les derniers siècles, réduit le domaine fluvio-maritime aux cinquante derniers kilomètres séparant la ville de Redon de la mer.

2. Le projet de barrage d'Arzal **.

La situation actuelle présente de multiples inconvénients :

- dans la zone fluviale, l'insuffisance des pentes et des sections d'écoulement provoque, en hiver, une submersion prolongée des marais et l'inondation en crue des agglomérations riveraines, Redon en particulier;
- dans la zone fluvio-maritime, la pénétration des eaux marines entraîne des inondations périodiques des marais et la salure des terres;
- en saison sèche, par contre, les apports sont insuffisants pour permettre l'irrigation et l'entretien des profondeurs dans le lit.

Toutes les activités de cette région — cultures, élevage, commerce, navigation, tourisme — pâtissent donc de cet état de fait.

Pour y remédier, l'Administration du Génie Rural a prévu la réalisation de grands travaux, dont les pièces maîtresses sont :

- la construction à Arzal, à 5,5 km de l'embouchure, d'un barrage pour arrêter la marée et contrôler l'écoulement des rivières;
- le recalibrage du lit mineur, afin de faciliter l'écoulement des crues et la navigation;
- l'endiguement des rives des marais, pour réduire leur submersion et permettre la constitution d'une réserve d'eau douce utilisable à des fins diverses : irrigations, besoins urbains, entretien des fonds, etc.

* Ingénieur en Chef au Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

** Les caractéristiques et les techniques de réalisation de cet ouvrage font l'objet d'une communication de M. Caquot.

3. Les études confiées au L.C.H.F.

L'Administration du Génie Rural a demandé au Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.) de l'aider à résoudre les problèmes hydrauliques et sédimentologiques relatifs à la mise au point de l'avant-projet du barrage et des ouvrages annexes, l'exploitation ultérieure de l'aménagement et ses effets sur le régime de l'estuaire.

La première tâche du L.C.H.F. a consisté à réaliser une campagne d'observations en nature, au cours de laquelle ont été étudiés, entre Redon et la mer : l'hydrographie de l'estuaire et de la rivière, le régime de la marée et des courants, la nature, l'origine et le mode de transport des vases.

Ces renseignements ont permis l'exploitation, dans les halls d'essais de Maisons-Alfort, de deux modèles réduits :

- a) un modèle d'ensemble (photo 1), à l'échelle 1/750 (distorsion 7,5), représentant l'estuaire et ses abords maritimes, ainsi que la Vilaine, l'Oust et leurs marais, jusqu'aux barrages de contention des marées;
- b) un modèle partiel, à l'échelle 1/150 (distorsion 1,5), représentant le cours de la Vilaine, sur 3 km de part et d'autre du barrage.

Une première phase des recherches a permis d'étudier l'influence du barrage sur la *salinité* dans l'estuaire et certains problèmes généraux d'ordre *hydraulique*.

En fonction des premiers résultats des essais, et de nouvelles observations en nature réalisées par le Génie Rural et le L.C.H.F., une seconde phase d'expérimentation a permis d'achever les études hydrauliques et de mener à bien l'étude *sédimentologique* qui fait l'objet de cette communication.

4. Principaux résultats obtenus.

Les résultats obtenus peuvent être classés en deux groupes :

Les uns, d'ordre pratique, ne sont susceptibles de s'appliquer qu'à l'élaboration du projet du barrage d'Arzal et à l'exploitation ultérieure de l'ouvrage.

Les autres sont d'un intérêt plus général et il est possible d'en tirer des enseignements sur le régime, les techniques d'étude et les améliorations possibles de la Vilaine bien entendu, mais aussi d'estuaire du même type.

Ce sont ces derniers résultats qui sont développés ci-après, en distinguant successivement :

- les résultats de l'analyse *in situ* du régime de l'estuaire;
- quelques aspects particuliers des techniques de recherche sur le modèle sédimentologique;
- les effets du barrage sur la sédimentation.

Analyse du régime de l'estuaire

1. Etude hydrologique.

A l'époque des recherches, c'est-à-dire entre 1960 et 1964, on ne disposait pas de données certaines quant aux débits d'amont.

Dans une mesure suffisante pour les nécessités de l'étude, nous avons pu y suppléer en exploitant la documentation d'ordre climatologique disponible et les résultats des quatre premières années de relevé des débits journaliers faits par la Troisième Circonscription Electrique (1959-60-61-62) sur la Vilaine, à Malon (bassin versant de 4 200 km² sur un total de 10 400 km²).

Cette étude — pour laquelle M. Réménieras a été un guide et un conseil précieux — a constitué une première application des méthodes de l'hydrologie classique au bassin de la Vilaine et, malgré son caractère d'approximation, fixé des ordres de grandeur particulièrement utiles :

a) PRÉCIPITATIONS.

La méthode de Thiessen, à partir du réseau des stations pluviométriques du bassin observées pendant 29 ans (1922-1950), a permis de fixer à 760 mm la hauteur moyenne annuelle des précipitations.

Leur répartition statistique a pu être traduite d'une manière relativement satisfaisante par la loi normale représentée ci-après, qui a notamment permis d'évaluer le degré de probabilité des précipitations des années 59 à 62, pour lesquelles on disposait de jaugeages journaliers à Malon (fig. 2).

b) LAMES D'EAU ÉCOULÉES. — DÉBITS MOYENS ANNUELS. — MODULES.

Sur la période de référence 1922-1950, la lame d'eau écoulee sur l'ensemble du bassin — calculée à partir des formules de Turc et Coutagne — représente le tiers des précipitations et conduit à un débit moyen annuel de 80,5 m³/s et un module de 7,74 l/s.km².

Pour la fraction du bassin contrôlée par Malon, un calcul analogue a fait apparaître une excellente concordance avec les débits moyens annuels calculés à partir des relevés journaliers en cette station.

ANNÉES	FORMULES DE TURC ET COUTAGNE (m ³ /s)	RELEVÉS A MALON (m ³ /s)
1959	24,9	25,3
1960	52,9	50,4
1961	21,4	25,4
1962	22,9	21

Ce résultat valorisait les calculs relatifs à l'ensemble du bassin et, surtout, fournissait la valeur du coefficient à appliquer aux relevés de Malon pour obtenir des estimations de débits moyens à Arzal.

c) DÉBITS CLASSÉS. — RÉPARTITION MENSUELLE. — CRUES.

En raison du petit nombre d'années d'observations à Malon (quatre, dont une d'hydraulicité exceptionnelle) nous n'avons pu obtenir de renseignements statistiques en ce domaine mais seulement des indications sur l'ordre de grandeur de la variabilité des phénomènes. Les périodes de retour des débits moyens journaliers maximaux ont été, en première approximation, estimées à 1 an pour 700 m³/s, 5 ans pour 1 000 m³/s, 10 ans pour 1 200 m³/s et 100 ans pour 1 750 m³/s.

1/ Cours fluvio-maritime de la Vilaine.
The Vilaine and its estuary.

2/ La Vilaine. Loi statistique des précipitations (période 1922-1950).
The Vilaine. Statistical precipitation graph (1922-1950 period).

Photo 1/

2. Les vases de la Vilaine.

a) NATURE DES VASES.

Ce qu'il est convenu d'appeler les « vases » de la Vilaine provient en fait du mélange de deux stocks sédimentaires.

— Un stock « fin », constitué de minéraux argileux, de colloïdes, etc., de granulométrie comprise entre quelques microns et quelques centièmes de microns, la médiane étant le plus souvent entre 0,1 et 0,2 micron (particules élémentaires).

La composition minéralogique de ce stock — association triple : illite, kaolinite, chlorite — est très constante dans toute la zone étudiée.

— Un stock « grossier », constitué par un sablon très bien trié, dont le diamètre des grains s'étage entre la dizaine et la centaine de microns.

En valeur relative, ces deux stocks sont associés en proportions souvent voisines.

b) ORIGINE.

La mise en service, au siècle dernier, du barrage de Redon avait été suivie d'un approfondissement lent et régulier de la Vilaine, à l'amont. Ce fait pouvait être interprété comme un indice de l'origine marine des vases, dans le processus actuel de sédimentation.

Toutefois, la question était restée controversée, jusqu'au début des recherches entreprises par le L.C.H.F.

En novembre 1960, M. Lafond, maintenant chargé de cours à la Sorbonne, et qui avait alors participé à la Mission hydrographique du L.C.H.F., comparait les compositions minéralogiques des vases en aval et en amont de Redon, et en retirait la certitude d'une origine marine.

Par la suite, il découvrait par diffractométrie, dans les sédiments de la Vilaine moyenne et supérieure, un minéral, la pyrophyllite, qui est absent des vases du cours fluvio-maritime et de l'estuaire. Il concluait : « ...l'absence de pyrophyllite, d'une part, et la valeur du rapport kaolinite-illite d'autre part, permettent d'affirmer que la sédimentation de l'estuaire dans les conditions actuelles, a une origine presque exclusivement marine. Même en période de crue, l'apport solide des régions situées en amont du barrage de Redon peut être considéré comme négligeable vis-à-vis du stock vaseux mobile dans l'estuaire (*) ».

Une étude plus récente, celle de Milles Durand et Kerfourn (**) conclut aussi que, d'après l'analyse pollinique des dépôts et dans les derniers 2 500 ans, le val de Vilaine a été comblé par les dépôts marins de la transgression flandrienne.

Les vases qui encombrant les cours inférieurs de la Vilaine et de ses affluents proviennent donc bien, dans la phase géologique actuelle, de l'Océan, selon un processus qui se retrouve dans toutes les embouchures et les baies abritées, entre la Bretagne et l'Aquitaine.

3. Le transport des vases.

a) CARACTÈRES DISTINCTIFS DU TRANSPORT DES VASES.

Le transport des vases a lieu en suspension et est influencé par les caractéristiques physico-chimiques du fluide, et par les propriétés rhéologiques et thixotropiques de ce type particulier de sédiments.

En particulier :

— Les conditions de floculation et de sédimentation (vitesses de chute, teneur en eau, caractéristiques rhéologiques du dépôt) différent, en eaux fluviales, de celles observées en eaux de salinité supérieures à 2 ou 3 ‰.

— L'augmentation progressive de la concentration et de la viscosité des dépôts en fonction du temps entraîne un accroissement de leur « vitesse de reprise », par les courants.

— Le caractère thixotropique des dépôts de vase à forte concentration, laisse supposer qu'en nature tout comme en laboratoire — où l'expérience en a été faite maintes fois — les fluctuations périodiques de pression engendrées par les houles diminuent la viscosité superficielle de ces dépôts, les font participer aux mouvements de la houle : mise en sus-

pension, puis entraînement par les courants si la couche limite est turbulente, ou bien, dans le cas d'une couche limite laminaire, *progression de la couche superficielle de vase dans la direction de la houle*.

b) SECTEURS A CONSIDÉRER.

L'analyse de l'ensemble des mesures *in situ* a permis de reconstituer, avec un bon degré de probabilité, les mécanismes de transport des vases en Vilaine.

Ces mécanismes dépendent du régime hydrodynamique de la région considérée et une distinction s'impose donc entre :

- la *partie extérieure* de l'estuaire où prédominent l'agitation et les courants de vitesse moyenne (environ 0,50 m/s au maximum) ;
- l'*estuaire*, zone de transition où la vitesse des courants augmente, cependant que l'agitation de la mer diminue rapidement ;
- le *cours fluvio-maritime* où les actions hydrodynamiques se réduisent à celles des courants de marée et des courants fluviaux (vitesses parfois supérieures à 1,50 m/s).

c) EXTÉRIEUR DE L'ESTUAIRE.

Dans cette région, les vases arrachées des fonds par l'agitation, sont ensuite transportées par les courants. *C'est la conjugaison des effets de l'agitation et du flot de la marée* qui fait pénétrer dans le fleuve des eaux marines chargées de vases prises aux fonds du large ou du littoral.

On remarquera que, malgré la coloration intense des eaux, on n'a pas trouvé de charges supérieures à 1 g/l devant l'embouchure, lors de mesures faites avec une agitation modérée. Seul, les fort mauvais temps semblent à même de provoquer des reprises importantes. Le flot faisant pénétrer dans la Vilaine, en marée moyenne, environ 40 000 000 m³ d'eau, ce sont alors quelques dizaines de milliers de tonnes de vases marines que les eaux peuvent véhiculer de la mer vers la rivière, et dont une partie est susceptible de se déposer.

d) ESTUAIRE.

Dès l'embouchure, le régime des courants prend très vite une allure fluviale et les mesures de turbidité montrent que ce sont ces courants qui sont principalement responsables de la *mise en suspension* et du *transport* des vases.

En effet :

- *en flot*, on constate, entre l'extérieur et l'intérieur de l'estuaire, un accroissement notable de la turbidité au fond qui ne peut s'expliquer que par *reprises des sédiments de l'estuaire* (de moins de 1 g/l à quelques g/l) ;
- *au jusant*, un effet inverse se manifeste, et prouve que le dépôt des vases est lié au ralentissement du courant et se produit dans l'estuaire et non à l'extérieur.

L'agitation n'est cependant pas entièrement calmée dans l'estuaire, et elle contribue certainement au maintien ou à la remise en suspension des vases devant certaines parties exposées de la rive nord.

(*) M. Lafond appelle « estuaire » l'ensemble estuaire + cours fluvio-maritime.

(**) *Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 1961, Nouvelle série, Fascicule 1, 2 mai 1963.

e) COURS FLUVIO-MARITIME.

Les mesures de turbidité dans ce secteur en fonction de l'époque de la marée, montrent la dépendance entre les transports de vase et les vitesses de courants (fig. 3) :

— Les turbidités sont plus élevées en V.E. qu'en M.E.

— Au fond, les maximums de turbidité se produisent le plus souvent aux époques de fort courant et au voisinage des étales (par décantation des couches supérieures).

— Près de la surface, au contraire, les maximums n'apparaissent guère qu'entre les étales, quand les courants sont forts. Ces maximums, assez variables, atteignent des valeurs de 5 à 15 g/l, les plus fortes valeurs ayant été trouvées entre Tréhi-guier et La Roche-Bernard.

Les quantités de vase qui sont ainsi alternativement transportées d'amont en aval, et vice versa, ont été évaluées par la Mission du L.C.H.F. à 9,5 km de l'embouchure. Les valeurs suivantes ont été calculées :

- 200 t en marée de morte-eau (coef. 36);
- 7 000 t en marée moyenne (coef. 74-82);
- 33 000 t en marée de vive-eau (coef. 107-105).

On vérifie aisément, d'après ces valeurs, que la quantité de vase transportée est proportionnelle à une puissance 4,64 du coefficient, donc de l'amplitude, de la marée.

Toute marée un peu forte provoque donc, à l'intérieur du fleuve, des échanges sédimentaires supérieurs à ceux qui existent normalement entre la mer et l'estuaire.

4. Evolution des fonds.

a) RÉSULTANTE DES TRANSPORTS.

Si les courants de marée étaient seuls en cause, la résultante des transports serait dirigée vers l'amont, en raison de la dissymétrie des courbes de marées et de courants (flots plus courts, avec des maximums de vitesse plus accusés que les jusants) et du fait que les quantités transportées sont proportionnelles à une puissance de la vitesse de degré très supérieur à 1.

Mais le débit propre de la rivière modifie le régime des échanges sédimentaires dus à la marée. Son action est double : *hydrodynamique*, par réduction du flot et renforcement du jasant et *chimique*, par modification des conditions de floculation, donc de dépôt et de reprise.

Ce double effet suit le rythme du cycle hydrologique : aux périodes de moyennes et hautes eaux la résultante des mouvements de vase, dans la moitié amont du cours fluvio-maritime, est dirigée vers l'aval : les berges sont érodées, les eaux relativement claires, les dépôts sur les zones inondables presque inexistantes.

Aux périodes d'étiage, au contraire, les débits fluviaux deviennent négligeables devant celui de la marée, et la résultante des mouvements de vase est dirigée vers l'amont. Ce sont les fameuses « marées vaseuses » de l'été, responsables des envasements jadis si gênants en Vilaine pour la navi-

gation. Les services des Ponts et Chaussées et du Génie Rural ont pu observer que les marées de V.E. déposent alors dans les zones qu'elles inondent et sur les berges, en amont de Foleux, plusieurs centimètres de vase par marée.

b) LES COMPOSANTES DE L'ÉVOLUTION.

Les causes des transports de vases analysées ci-dessus, ont un caractère périodique : semi-diurne pour les flots et jusants, bi-mensuels pour les époques de vives-eaux et mortes-eaux, annuel pour les débits fluviaux. Même pour l'agitation de la mer à l'embouchure, les mauvais temps sont plus fréquents en hiver et au printemps.

Il a donc semblé intéressant d'analyser les évolutions de fonds, d'une part, sur une période de l'ordre du siècle, afin de dégager une résultante et, d'autre part, sur une période de un an, commune au cycle hydrologique et aux mauvais temps.

Les résultats de cette analyse peuvent être résumés comme suit :

— *L'évolution séculaire* apparaît comme un très lent colmatage équivalant, en moyenne, à quelques millimètres par an : 10 m sur les 2 500 dernières années pour l'ensemble des marais et 0,74 m de 1821 à 1960 dans le cours fluvio-maritime actuel, soit 4 à 5 mm/an.

Le premier chiffre résulte des analyses polliniques de Mlles Durand et Kerfourn. Le second ressort d'une comparaison détaillée des levées hydrographiques de Beaupré (1821), Bouquet de la Grye (1866) et L.C.H.F. (1960).

— *L'évolution annuelle* consiste en une oscillation d'amont en aval, et vice versa, d'une partie des vases du lit. Ce mouvement s'effectue au rythme de la succession des périodes d'étiage et des périodes des hautes et moyennes eaux, selon le mécanisme décrit précédemment.

L'amplitude de l'évolution, ou plus exactement de la fluctuation annuelle est sans commune mesure avec celle de l'évolution séculaire, puisqu'elle est de l'ordre de 2 m dans la région de Redon. La charnière de ces échanges entre l'amont et l'aval se situe en amont de Foleux (fig. 4).

c) INFLUENCE DES STATIONS MYTILICOLLES.

Localement, des influences diverses peuvent altérer le schéma qui vient d'être décrit. Parmi ces influences, la plus importante est celle des parcs d'élevage des moules, constituée par des rangées de pieux en bois, battus dans les berges de l'estuaire. Il y a une relation de cause à effet indiscutable entre l'édification de ces parcs et une augmentation considérable de la sédimentation des berges, de l'ordre de 1 m en 10 ans. Les causes du phénomène sont multiples. L'écran formé par les pieux ralentit les courants et facilite le dépôt. Les débris de bois, d'écorce, de coquille et de byssus consolident ce dépôt. Enfin, la filtration par les moules des eaux chargées (30 l d'eau par jour et par moule) et l'action des sucs sécrétés par l'animal sont peut-être également à l'origine d'une coagulation d'un type particulier des sédiments en suspension.

Quelques aspects des études sur le modèle sédimentologique

1. Représentation des sédiments naturels.

Pour reproduire des transports en suspension, il est possible d'utiliser des vases naturelles, des argiles et certaines poudres industrielles. Dans le cas présent, le choix a été guidé principalement par les considérations suivantes :

Pour que les « longueurs de transports » en suspension soient homologues entre le prototype et le modèle, il est nécessaire que, sur l'un et l'autre, le rapport longueur de transport/hauteur de sédimentation, soit égal au rapport vitesse horizontale du courant/vitesse de chute du sédiment. En passant aux échelles, cela signifie que la distorsion Δ doit être égale au rapport de l'échelle des vitesses horizontales $[V]$ à l'échelle des vitesses de chute $[V_c]$. On en déduit très simplement, en similitude de Froude, la relation

$$\Delta^3 = [L] : [V_c]^2$$

$[L]$ étant l'échelle des longueurs.

Avec $[L] = 750$ et $\Delta = 7,5$ il s'ensuivait

$$[V_c] = 1,33.$$

Les vitesses de chute des vases de la Vilaine étant de l'ordre de 0,35 mm/s en milieu naturel, le sédiment du modèle devait avoir une vitesse de chute d'environ 0,26 mm/s.

Ce sédiment devait aussi reproduire avec une approximation suffisante le tassement, l'augmentation progressive de la cohésion des dépôts avec le temps et ses conséquences sur les remises en suspension.

Après examen de toutes ces conditions, il a été estimé que l'emploi d'une vase naturelle convenablement traitée pouvait convenir. Cette vase était de composition analogue à celle de la Vilaine, et les dimensions de ses particules élémentaires défloculées étaient de l'ordre de 0,90 micron pour la médiane.

2. Contrôle des propriétés de la suspension et des dépôts.

L'ajustement et le contrôle de la floculation, la vitesse de chute, les dépôts et reprises de ce sédiment ont nécessité le traitement de l'eau du modèle par un agent chimique, le pyrophosphate de soude. Cela a conduit à étudier systématiquement le comportement de suspensions contenant jusqu'à 60 g/l de sédiments, dans de l'eau de ville additionnée de doses de pyrophosphate comprises entre 0 et 1 g/l.

Il a ainsi été possible de définir les quantités et concentrations à utiliser pour obtenir les vitesses de chute et de reprise désirées.

Mais, outre ce résultat, il a également été mis en évidence que pour chaque concentration de la suspension, il existait une teneur critique en pyrophosphate conduisant à ce que nous avons appelé une « macrofloculation », caractérisée par des flo-

cons très gros, très lâches, gorgés d'eau, de grande vitesse de chute, mais très facilement repris et remis en suspension.

Or, des expériences ultérieures, réalisées au L.C.H.F. avec des vases de la Vilaine mises en suspension dans des mélanges d'eau de mer prélevée en dehors de l'estuaire et d'eau de rivière prélevée à Fouy (Vilaine) et Saint-Perreux (Oust), donnent à penser qu'un phénomène analogue se produit aussi en nature dans des zones de faible salinité. Il pourrait être à l'origine de la liquidité très grande de certains dépôts (observations de la Mission L.C.H.F. dans la région de Béganne) et en relation avec le fait, apparemment paradoxal que, dans des conditions de hauteurs d'eau et de vitesses de courants identiques, les « marées d'hiver » à l'époque des pluies sédimentent très peu, comparative-ment aux « marées d'été ».

3. Le problème de l'échelle des temps sédimentologiques.

Après ajustement des conditions d'utilisation du sédiment introduit dans le modèle et mise au point de cycles expérimentaux bien représentatifs des différentes actions hydrodynamiques (houles, marées, apports fluviaux), le modèle a fait apparaître des évolutions des fonds confirmant l'analyse faite d'après les observations *in situ*, et notamment les échanges annuels de sédiments entre l'amont et l'aval.

Il restait à préciser l'échelle des temps sédimentologiques applicable au modèle.

On peut avoir recours à deux méthodes pour définir cette échelle :

- la *méthode théorique*, qui consiste à établir une « loi » du phénomène, dans laquelle n'interviennent que des grandeurs dont on connaît l'échelle;
- la *méthode empirique*, qui revient à comparer les temps nécessaires, en nature et sur modèle, pour aboutir à un certain résultat.

La première méthode, plus satisfaisante pour l'esprit, n'était pas utilisable pour l'étude sédimentologique de la Vilaine, car des éléments essentiels faisaient défaut, notamment en ce qui concerne les quantités de vase échangées entre la mer et la rivière.

Remarquons que la deuxième méthode ne préjuge pas du processus mis en œuvre pour arriver au résultat, et n'assure pas qu'il a été fidèlement reproduit par le modèle. En l'occurrence, les principaux mécanismes des transports des vases ayant été reproduits par le modèle, la définition d'une échelle des temps purement empirique était admissible.

Les termes de comparaison choisis étaient :

- en nature, l'envasement en aval du site du barrage — entre 1821 et 1960 — envasement qui est de l'ordre de 0,74 m en 139 ans;
- dans le modèle, les envasements mesurés dans le même bief, après quatre cycles d'essais. En répétant l'expérience trois fois de suite, on a trouvé des envasements de 0,25 m, 0,19 m et 0,21 m (moyenne 0,22 m).

En raison de son importance sur la sédimentation, ce problème a fait l'objet d'une étude chronophotographique qui a notamment montré que :

a) *Après construction du barrage et quand celui-ci était fermé*, les vitesses des courants étaient réduites à la moitié, à l'entrée de l'estuaire et au tiers, dans la zone des bouchots.

Cela revient à dire qu'une V.E., avec barrage, engendrait dans l'estuaire, des courants comparables à une M.E., sans barrage.

L'effet s'accroissait en approchant du barrage, comme le montre le tableau ci-dessous, relatif à une V.E.

SECTION ORIGINE	LONGUEUR MOYENNE DE L'EXCURSION (km)		VITESSE MAXIMALE DE FLOT (m/s)	
	Sans barrage	Avec barrage	Sans barrage	Avec barrage
K 0	20	3,5	1,70	0,50
K 3	19,5	2,5	1,40	0,20

On remarquera toutefois que, pendant 1 heure à 1 heure 1/2 environ après la basse-mer, l'établissement du flot se faisait avec la même soudaineté qu'avant construction du barrage, avec un maximum restant de l'ordre de 1,20 m/s (fig. 5).

Enfin, les amplitudes des marées étaient inchangées à l'entrée de la rivière, mais une irrégularité de la loi de variation du niveau marquait la réflexion de l'onde-marée sur le barrage.

b) *En période de crue, le barrage étant ouvert*, la perturbation apportée par l'ouvrage était beaucoup moins sensible : les directions des courants étaient les mêmes et les vitesses voisines de celle mesurée dans l'état actuel. L'apport fluvial compensait le volume de marée arrêté par le barrage.

2. Envasement à l'aval du barrage.

a) MÉCANISME DES TRANSPORTS.

Après la mise en service du barrage, le facteur déterminant du nouveau régime des transports de sédiments, en aval de l'ouvrage, a été la réduction des courants de marée qui vient d'être évoquée.

Alors que l'on s'attendait plutôt à un envasement près du barrage — les consignes de manœuvre des vannes ayant déjà été choisies en conséquence — il a au contraire été constaté que les vitesses des courants de marée étaient insuffisantes pour exercer des reprises sur le fond et transporter la vase, dans un sens ou dans l'autre. A l'aval de Tréhigui, à l'entrée de l'estuaire, seul le premier flot de marées de V.E. était suffisamment fort pour provoquer des mouvements de vase vers l'intérieur.

Lorsque cette pointe de courants de flot, et plus encore le mauvais temps, mettaient des vases en suspension dans l'embouchure, leur excursion vers l'amont était limitée, et la fraction qui se déposait n'atteignait pas le barrage.

Près du barrage, les courants de chasse étaient seuls susceptibles d'éroder les vases et de les entraîner. La résultante des mouvements était donc dirigée vers l'aval.

3. Evolution des fonds.

L'évolution des fonds après construction du barrage et à l'aval de celui-ci a été analysée au cours d'expériences répétées. La dispersion des résultats a été finalement assez réduite et l'on peut résumer comme suit les observations faites sur le modèle :

— L'ordre de grandeur des épaisseurs des dépôts au cours d'un essai n'était pas changé par la présence du barrage. L'ouvrage n'entraînait donc pas une accélération du processus d'envasement.

— L'importance des dépôts à l'entrée de l'estuaire restait également du même ordre de grandeur après construction du barrage, compte tenu de l'estimation faite pour l'échelle des temps sédimentologiques.

— Par contre, la répartition des dépôts était modifiée : les plus forts envasements, observés dans l'état actuel à l'amont du kilomètre 1, se produisaient en aval de ce point après la mise en service de l'ouvrage. On n'a pas observé de dépôt dans le bief proche du barrage, mais plutôt une tendance à l'érosion (fig. 6).

4. Effet des chasses.

On peut, *a priori*, distinguer deux types de chasses :

- *les chasses imposées*, destinées à prévenir les submersions en cas de crue. Ces chasses sont évidemment très efficaces sur les dépôts, mais comme leur durée et leur débit doivent être maximaux, on ne dispose d'aucun degré de liberté sur la manœuvre des vannes, et l'on ne peut orienter leurs effets; au surplus, on sait que les remontées de vase ne sont pas à craindre au moment des hautes-eaux;
- *les chasses volontaires*, en moyennes-eaux ou étiage; ces chasses se caractérisent par le fait que la quantité d'eau disponible est alors inférieure à celle qu'il serait possible d'évacuer pendant la marée considérée; on peut donc, dans certaines limites, choisir les heures de manœuvre des vannes.

Si l'on remarque qu'en étiage, compte tenu des autres besoins en eaux et de la cote à maintenir dans la retenue, le volume total disponible pour les chasses n'est que de 10⁷ m³ environ (0,5 % de l'apport fluvial annuel), il apparaît que, seules, les chasses volontaires en périodes de moyennes-eaux pouvaient être exploitées avec profit.

Cela est d'autant plus vrai que, en année normale, la moitié environ des apports fluviaux provient des moyennes-eaux, dont la durée totale est de l'ordre de 4 mois (printemps et une partie de l'automne).

Les essais ont effectivement montré que, à ces époques, des lâchers de 2 à 6 millions de mètres cubes permettaient de réduire les dépôts dans l'estuaire, à condition de respecter les consignes suivantes :

- a) Effectuer les chasses de préférence par marées de coefficients égaux ou supérieurs à 80;
- b) Pour réduire les dépôts dans l'estuaire, ces chasses doivent être faites sous une charge aussi grande que possible, donc le plus près possible de la basse-mer, sous réserve d'être

arrêtées 1 h avant celle-ci, pour faciliter la dispersion hors de l'embouchure des vases remises en suspension;

- c) Pour agir sur les vases proches du barrage, les chasses peuvent être faites avec seulement 2 m de dénivellation au barrage, et arrêtées 2 h à 3 h avant basse-mer, pour que les sédiments soient entraînés assez loin. Ce type de chasse sera avantageusement réservé pour les marées de coefficient voisin ou supérieur à 100.

Conclusions

L'ensemble des recherches d'ordre sédimentologique effectuées par le L.C.H.F., en vue de l'établissement du projet du barrage d'Arzal, a finalement mis en évidence les principaux résultats suivants :

1. Situation actuelle.

a) La rivière a atteint un quasi-équilibre dynamique. Hormis la zone des bouchots, l'envasement est extrêmement lent.

b) Elle est le siège, chaque année, de transports alternés entre l'amont et l'aval, au rythme de la succession des étiages et des pluies. Ces échanges intéressent des quantités de vase beaucoup plus importantes que celles venues de l'extérieur, dont tout indique qu'elles sont faibles.

c) Les débits fluviaux ont un double rôle sur les sédiments : par les courants qu'ils engendrent, mais aussi par la modification radicale des conditions de floculation, dépôt et reprise des vases, au-dessous d'un certain seuil de salinité.

2. Influence du barrage.

a) L'implantation du barrage n'accélère pas le processus d'envasement, mais reporte vers l'estuaire et l'embouchure les zones de fort dépôt.

b) Par l'exécution de chasses judicieuses, on peut maintenir en aval du barrage une situation des fonds aussi favorable que l'actuelle pour la navigation, situation caractérisée comme suit :

- expulsion des dépôts, voire tendance à l'érosion entre le barrage et K 4;
- maintien approximatif des sections entre K 1 et K 4;
- maintien des profondeurs sur les seuils, mais comblement des fosses dans le chenal d'estuaire;
- limitation de l'envasement sur le seuil d'embouchure qui s'étend vers l'intérieur de l'estuaire, mais ne s'exhausse pas.

Le barrage d'Arzal, qui présente, par ailleurs, de nombreux avantages, n'est donc pas incompatible avec la renaissance d'une navigation en Vilaine, mais peut obliger à déplacer certains établissements mytilicoles, pour tenir compte de la nouvelle répartition des aires d'envasements.

Discussion

Président : M. TALUREAU

M. le Président rappelle que M. ORGERON est un spécialiste des études maritimes et fluvio-maritimes en particulier, sur modèle réduit. Pendant six ans, il a assuré la Direction du Laboratoire National d'Hydraulique de Peñaflor au Chili. L'exposé de M. ORGERON se présente comme un prélude à la communication que M. CAQUOT présentera dans la séance de l'après-midi.

M. le Président remercie M. ORGERON, d'une part, pour le brillant exposé qu'il vient de faire, d'autre part, pour l'aide précieuse et souvent déterminante qu'il a apportée — en liaison avec ses collaborateurs — à l'étude de ces problèmes particulièrement difficiles pour la mise au point de l'aménagement du bassin de la Vilaine.

M. CARLIER constate que les essais sur modèle ont montré qu'une des conséquences du barrage d'Arzal, sera l'extension vers l'amont du plateau de vase existant actuellement à l'extrémité aval de l'estuaire. Ce phénomène ne va-t-il pas avoir des conséquences gênantes sur la navigation et, surtout sur les installations mytilicoles existant actuellement sur la rive Sud de l'estuaire?

M. le Président précise que le problème a été étudié sous tous ses aspects; il n'est pas certain qu'un envasement important puisse subsister malgré l'action des chasses provoquées, en temps opportun, par la manœuvre du hersage; mais, s'il, se produisait, d'autres solutions de rechange sont prévues.

Seule, l'expérience permettra de vérifier les essais faits en Laboratoire; mais toutes les précautions ont été prises pour suivre l'évolution des fonds; une Commission paritaire comprenant les mytiliculteurs et les représentants de l'Administration, va être créée pour constater la situation de fait et un envasement éventuel des « bouchots » : si cela s'avère nécessaire, les « bouchots » seront transportés dans les marais, à l'intérieur de la presqu'île.

M. ORGERON précise que le modèle a montré que l'extension vers l'amont du plateau de vase ne s'accompagnait pas d'un exhaussement de sa cote et qu'il subsistait toujours, plus en amont, un canal bien marqué.

Si l'on fait une coupe longitudinale de l'embouchure de la Vilaine, on rencontre d'abord, en venant de la mer, le plateau en question, dont la cote d'arasement semble plutôt liée aux caractéristiques de l'agitation qu'à celles des courants. Ce n'est qu'en pénétrant plus avant dans l'embouchure, c'est-à-dire dans le domaine des courants, que l'on retrouve un chenal bien marqué entre les rives peu profondes. L'effet du barrage serait donc de réduire l'extension vers l'aval de ce chenal, mais sans diminuer les profondeurs minimales sur le plateau qui le sépare de la mer.

Il faut noter que les « bouchots » ne descendent pas au-dessous de la cote zéro.

M. CORMAULT revient sur l'existence de deux stocks dans les sédiments de la Vilaine :

- des matériaux colloïdaux de diamètre médian voisin de 0,1 à 0,2 μ ,
 - des sables de d_{50} compris entre 10 et 100 μ ;
- et demande quelle était l'importance relative de ces deux stocks, et s'il a été nécessaire d'en tenir compte sur le modèle.

M. ORGERON indique que ces deux stocks constituent ce que l'on appelle les vases de la Vilaine et n'ont pas été distingués sur le modèle réduit, le transport des deux fractions s'effectuant en suspension. Pour une fraction comprise entre 100 et 200 μ , le problème aurait été différent.

M. le Président lève la séance à 11 h 55.

See English Abstract on next page.

Abstract

A scale model study of silting in the river Vilaine due to the Arzal dam

by C. Orgeron *

After a brief review of the previous state of the Vilaine and the Arzal scheme in course of construction, certain aspects of the sediment studies carried out by the Laboratoire Central d'Hydraulique de France for the dam project design are discussed at greater length.

The most important information obtained from the field observations carried out during the project study and official statistical data are considered first, which are connected with the following:

- (i) Precipitation affecting the catchment area, for which a statistical distribution law is put forward;
- (ii) River flow regimena;
- (iii) The origin of the river mud and how it is conveyed;
- (iv) Changes in the river bed.

Emphasis is laid upon the distinction one should make between very gradual warping of the river by *sediment from outside sources* and the cyclic annual river bed changes which are associated with *internal exchanges* between different parts of the fluvial and maritime river course.

A few special points are then mentioned regarding the model tests, notably the simulation of the river mud with mud of a similar composition and the chemical checking of the properties of the suspensions fed into the model. It is pointed out that treatment of the water in the model produces similar effects to those observed in the Vilaine in winter, when fresh water inflows from upstream reduce the salinity of the river water to less than 2 or 3 per 1 000, even when these inflows are so small as to be without any appreciable effect upon the river flow velocities.

The final point considered is the effect of the dam on silting between it and the sea, as determined from the model tests. It was found that the dam does not accelerate silting but that it causes the biggest deposits to form farther downstream than before and the sill at the river mouth to extend farther up the estuary, but without gaining in height. Sluicing operations during the mean water period (about four months for this river) are an effective means of maintaining adequate depth.

Bois gravé du XVI^e siècle.

* Senior Chief Engineer at the Laboratoire Central d'Hydraulique de France.