Processus de sédimentation des vases dans l'estuaire de la Gironde

Contribution d'un traceur radioactif pour l'étude du déplacement des vases

par

G. P. Allen

Docteur ès-Sciences,
Université de Bordeaux I

R. Bonnefille

Docteur ès-Sciences,
Laboratoire National d'Hydraulique

G. Courtois

Commissariat
à l'Energie Atomique

Cl. Migniot

Laboratoire Central d'Hydraulique
de France

Introduction

L'estuaire de la Gironde a fait l'objet de nombreuses études par le Port Autonome de Bordeaux, l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, le Laboratoire National d'Hydraulique, le Laboratoire Central d'Hydraulique de France et la Section d'Application des Radioéléments du Commissariat d'Energie Atomique. Nous tenons à remercier tout particulièrement le Service des Accès du Port Autonome de Bordeaux pour toute l'aide qu'il a apportée aux études, ainsi que pour la permission d'utiliser les résultats de ses nombreuses campagnes de mesures.

Cet article, divisé en deux parties, comporte d'abord une description des paramètres hydrologiques de l'estuaire, un schéma de la circulation des masses d'eau, et l'examen de ses variations saisonnières, ensuite en une analyse des mécanismes de diffusion et de sédimentation des vases, étayée par une expérience de traceurs radioactifs permettant de suivre la diffusion de la « crème de vase » au sein du bouchon vaseux après remise en suspension.

Géographie et morphologie de la Gironde

L'estuaire de la Gironde forme une profonde indentation dans la côte landaise rectiligne et est constitué par la jonction au bec d'Ambès, à 70 km de l'océan, de deux réseaux hydrographiques, celui de la Dordogne et celui de la Garonne (fig. 1). Celui de la Garonne, le plus important

**1/ Localisation
de l'estuaire de la
Gironde.**

des deux, draine une superficie de 55 000 km² à partir des Pyrénées occidentales et du Massif Central ; la Dordogne draine une superficie de 16 000 km² dans l'ouest du Massif Central et l'est du Bassin d'Aquitaine.

Le nom de Gironde est réservé à la partie de l'estuaire située entre le bec d'Ambès et l'embouchure. Elle occupe, à marée haute, une superficie d'environ 625 km². Il s'agit, en superficie, du plus grand estuaire français, bien qu'il ne vienne qu'au troisième rang pour la surface du bassin versant, après la Loire (115 000 km²) et le Rhône (98 000 km²).

La géométrie de l'estuaire est très régulière et tous les principaux paramètres morphologiques varient de façon sensiblement exponentielle de l'embouchure à la limite d'action des marées, à plus de 165 km de l'océan.

La morphologie générale consiste en deux chenaux, séparés par une succession d'îles alluviales dans le haut-estuaire et de bancs et hauts-fonds dans le bas estuaire. Le chenal de navigation longe la rive gauche, et sa profondeur varie entre 7 et 35 m (sous le zéro hydrographique). Le chenal de Saintonge longe la rive droite, et sa profondeur oscille entre 4 et 35 m.

Hydrologie de l'estuaire

Paramètres hydrologiques de base

Les phénomènes hydrodynamiques dans les estuaires sont régis, en grande partie, par le débit fluvial et les courants de marée. Dans l'estuaire de la Gironde, les variations saisonnières de ces paramètres amènent des conditions hydrologiques très différentes au cours d'une année.

Le débit fluvial

Le débit fluvial annuel moyen de la Garonne et de la Dordogne varie entre 600 et 1 000 m³/s avec une moyenne d'environ 800 m³/s (Garonne : 500 m³/s et Dordogne : 300 m³/s). Le débit mensuel moyen le plus élevé se produit en janvier où, sur 10 ans, on a mesuré une moyenne de 1 450 m³/s. Le débit le plus faible s'observe habituellement en août (moyenne de 235 m³/s sur 10 années). Les valeurs instantanées extrêmes, pour la Garonne, sont d'environ 5 000 m³/s en 1770 et 15 m³/s en 1949.

Schématiquement, on peut distinguer deux saisons fluviales dans une année : une période de forts débits fluviaux en hiver et au printemps, suivie par une période de transition et une période de faibles débits en été et en automne.

La marée

Dans le golfe de Gascogne, les marées sont semi-diurnes. A l'embouchure, le marnage varie entre 1,55 m en morte-eau et 5 m en vive-eau. Dans le haut-estuaire, le marnage de vive-eau peut atteindre 6 m. Les courbes marégraphiques sont symétriques dans l'embouchure mais, plus en amont, elles deviennent nettement dissymétriques, le perdant devenant plus long que le montant. Ce phénomène est particulièrement marqué dans le haut-estuaire et pendant les marées de vive-eau. A Bordeaux, pendant les vives-eaux, le perdant dure 8 heures et le montant seulement 4 h 23 mn. La rapide élévation du niveau de l'eau, au front du montant,

est la cause quelquefois d'un phénomène de mascaret identique à celui que l'on peut observer dans la Seine. La dissymétrie des courbes de marée s'accompagne d'une semblable dissymétrie dans les courbes de vitesse-temps. Ce phénomène, amplifié au fond des chenaux et dans les zones où la stratification saline est marquée, produit une augmentation rapide de la vitesse du flot au début du montant, alors que les courants de jusant sont relativement faibles au début du perdant. L'amplification de ce phénomène donne lieu à la « lentille immobile » au fond, décrit en Loire par Berthois (1964).

Le prisme de marée à l'embouchure (volume d'eau marine introduit dans l'estuaire par le montant) est d'environ 2×10^9 m³ en vive-eau et $1,1 \times 10^9$ m³ en morte-eau. Ce volume décroît exponentiellement vers l'amont, et à Bordeaux le volume introduit n'est plus que de $5,2 \times 10^7$ m³ en vive-eau (tout ceci pour un débit fluvial moyen).

La vitesse des courants de marée varie beaucoup en fonction de la morphologie, du débit fluvial et du coefficient de marée. Les vitesses maximales sont observées dans les chenaux où, en vive-eau, ils peuvent atteindre 3 m/s en surface et plus de 1,5 m/s à un mètre du fond. Pendant les périodes de faibles débits fluviaux, le point le plus en amont atteint par la marée dynamique se situe à 165 km de l'embouchure. En période de très forts débits fluviaux, ce point ne se situe plus qu'à 70 km de l'embouchure.

Hydrologie de l'intrusion saline

Les variations saisonnières du rapport (débit fluvial/prisme de marées) sont telles que la stratification saline subit des modifications au cours de l'année.

Ce rapport, qui contrôle celui des processus de diffusion et des processus d'advection, a été utilisé par plusieurs auteurs pour classer les estuaires en différents types. Quelque soit la classification choisie, la Gironde se range généralement dans un type ou un autre en fonction du débit fluvial :

CLASSIFICATIONS	Classement de l'estuaire girondin	
	FORTS DÉBITS FLUVIAUX (hiver et printemps)	FAIBLES DÉBITS FLUVIAUX (été et automne)
Pritchard (1955)	Type B : Coin salé avec marées.	Type C : Partiellement mélangé.
Hansen et Rattray (1966)	Type 2B : Ecoulement à deux couches, stratification saline appréciable.	Type 2A : Ecoulement à deux couches, pas de stratification saline.
Bowden (1967)	Ecoulement à deux couches avec entraînement.	Ecoulement à deux couches avec mélange vives-eaux.

Dans la Gironde et dans le chenal de navigation, la limite amont de l'intrusion saline (salinité moyenne inférieure à 0,5 ‰) est située à environ 75 km de l'embouchure pendant les périodes d'étiage des fleuves.

Le gradient de salinité vertical est fonction de la morpho-

logie, du débit fluvial et du coefficient de marée. La stratification saline la plus marquée se produit dans le chenal de navigation au moment des forts débits fluviaux par marée de morte-eau. La valeur de la salinité au fond peut alors être supérieure à deux fois la valeur en surface. Par ailleurs, toujours dans le chenal, il existe une zone où le gradient vertical est particulièrement bien prononcé. Cette zone migre vers l'amont ou l'aval en fonction du débit fluvial. Elle est localisée à 25 km de l'embouchure pendant l'été et l'automne, et dans l'embouchure en hiver et au printemps.

Il existe aussi un gradient de salinité transversal. L'eau est, en moyenne, plus salée près de la rive gauche que près de la rive droite. Dans une section, les isohalines moyennes d'une marée sont inclinées vers la rive droite. On explique généralement ce phénomène par l'action de la force de Coriolis, qui, dans l'hémisphère Nord, imprime aux particules en mouvement une accélération vers la droite, ce qui fait que le jusant a tendance à dévier vers la rive droite et le flot vers la rive gauche.

Hydrologie des courants

Dans la plupart des estuaires, il existe un réseau de « circulation résiduelle » qui représente le mouvement des masses d'eau, abstraction faite de l'alternance des courants de marées. Ces courants résiduels sont produits par les phénomènes d'advection liés aux gradients verticaux de densité dus au non mélange des eaux douces et des eaux marines. Ces gradients de densité, qui sont matérialisés par les gradients de salinité, donnent lieu à des courants résiduels, orientés d'une façon générale vers l'amont au fond et vers l'aval en surface. Cette superposition des courants résiduels existe généralement dans toute l'étendue de l'intrusion saline des estuaires. A l'extrémité amont de l'intrusion saline, il existe une zone de convergence des courants résiduels au fond, car, en amont de celle-ci, l'écoulement résiduel est vers l'aval sur toute la tranche d'eau. Cette zone de convergence est appelée le « point nodal » de l'estuaire (Harleman et Ippen, 1969) et a été matérialisée en Gironde par Bonnefille (1971).

Dans le bas-estuaire et dans le chenal principal, il existe une bonne corrélation entre le débit fluvial et la configuration verticale des courants résiduels (Allen, 1972) : plus le débit fluvial est élevé, et plus les courants résiduels vers l'amont au fond et vers l'aval en surface ont des valeurs élevées. Les vitesses résiduelles peuvent atteindre 10 à 15 cm/s à 0,50 m du fond et plus de 40 cm/s en surface. Le seul moment où on observe des courants résiduels vers l'aval au fond, se produit lorsque le débit fluvial est très faible en période de vive-eau.

La morphologie entre aussi, pour une large part, dans la détermination de la configuration des courants résiduels. Bien qu'à long terme la morphologie soit déterminée par la circulation résiduelle, à court terme d'importantes variations de la circulation résiduelle sont induites par la topographie. Un bon exemple en est la rupture du banc de Saint-Estèphe (Migniot, 1971) situé en bordure du chenal principal à 40 km en amont de l'embouchure ; cette brèche entraîne en aval, dans le chenal de navigation rive gauche, une perte de jusant puisque les lignes de courant tendent à prendre dans cette région une orientation vers la rive droite ; ceci a pour effet de renforcer relativement la compétence du flot dans le chenal et, par suite, de créer un point de

2/

convergence des courants résiduels au fond (« un point nodal »).

Origine, transport et sédimentation des vases

Les apports fluviaux

Les sédiments en suspension dans la Gironde proviennent de la Dordogne et de la Garonne, à l'exclusion de tout apport du plateau continental. D'avril 1959 à décembre 1965, le Port Autonome de Bordeaux a mesuré, tous les jours, la concentration des sédiments en suspension dans la Garonne et la Dordogne, afin d'évaluer l'apport provenant des fleuves. Cet apport, étroitement lié au débit fluvial, varie annuellement entre 1,5 et 3 millions de tonnes par an, avec une moyenne de 2 à 2,5 millions de tonnes.

Le bouchon vaseux

La conjonction de cet apport, relativement important, et de la circulation résiduelle, qui forme un « piège à sédiments » dans la zone du point nodal, provoque la formation d'un bouchon vaseux estuarien (Glangeaud, 1939) qui est localisé dans la partie amont de l'intrusion saline et migre suivant les saisons en fonction du débit fluvial (fig. 2). La concentration des sédiments en suspension est très élevée dans le bouchon vaseux et dans le « noyau » de celui-ci, elle dépasse 1 g/l en surface et 10 g/l au fond.

(a)

(b)

3/ Accumulation de crème de vase
(reproduction de bande d'écho-sondeur) en période de morte-eau (a),
et érosion quelques jours plus tard, en vive-eau (b).

Les variations de la turbidité, au cours de la marée en un point donné, dépendent de la vitesse des courants qui remettent en suspension les sédiments et de la position du point de mesure par rapport à la position moyenne du noyau du bouchon vaseux. En aval de celle-ci, des turbidités élevées pourront être observées à marée basse ; on les rencontrera en amont à marée haute.

Par une étude comparée des volumes mensuels dragués, Migniot (1971) a montré que, pendant les périodes de faibles débits fluviaux, les dépôts se font entre Bordeaux et le Bec d'Ambès, alors qu'ils se font dans le bas-estuaire pendant les périodes de forts débits. Le dépôt des sédiments en suspension est donc bien lié à la position du bouchon vaseux et, de ce fait, varie en fonction des saisons.

La crème de vase

Plusieurs études ont établi que le dépôt des suspensions dans le chenal de navigation se fait, par accumulation, sur le fond de lentilles d'eau extrêmement turbides. La concentration des sédiments en suspension dans cette « crème de vase » peut atteindre 300 à 400 g/l, avec des valeurs moyennes comprises entre 100 et 300 g/l. Les lentilles de crème de vase s'accumulent sur plusieurs mètres d'épaisseur,

plusieurs centaines de mètres de largeur et parfois plus de 10 à 15 km de long. Elles peuvent être aisément détectées par un sondeur (fig. 3.). Les profils de concentration, établis à travers la crème de vase et l'eau sus-jacente, montrent que la transition entre l'eau estuarienne « normale » (0,1 à 10 g/l) et la crème de vase est extrêmement rapide, concernant quelques décimètres à peine.

Au cours d'un cycle de marée, il peut n'y avoir pratiquement pas de mouvement dans la crème de vase, alors que la vitesse du courant dans l'eau sus-jacente peut dépasser 50 cm/s (fig. 4). De même, la salinité dans la crème ne varie pratiquement pas, bien que, dans l'eau située au-dessus, les fluctuations suivent la marée (fig. 4). Ce fait indique qu'il n'y a pratiquement pas d'échanges entre la crème et l'eau sus-jacente.

Enfin, la crème de vase subit un cycle d'érosion et d'accumulation lié au coefficient de marée (Allen, 1971). Pendant les périodes de coefficients décroissants, la crème de vase commence à s'accumuler dans les dépressions du chenal et, pendant les mortes-eaux, elle atteint son extension maximum (fig. 3), débordant au-delà du chenal. Pendant les périodes de coefficients croissants, la crème de vase se fractionne en plusieurs lentilles, puis est complètement érodée et remise en suspension dans le bouchon vaseux aux vives-eaux (fig. 3). Ce cycle d'érosion et de dépôt s'effectue avec une hysteresis notable lors des coefficients décroissants (fig. 5). Il est probable qu'à la base de la crème, une certaine quantité de vase est suffisamment compactée (concentrations supérieures à 500-600 g/l) pour ne plus être érodée aux vives-eaux suivantes. Ainsi, à chaque lunaison, une couche de vase peut se déposer dans le chenal de navigation.

La proportion de sédiments en suspension dans le bouchon vaseux varie avec le coefficient de marée, mais inversement avec le volume de la crème de vase, puisque le bouchon vaseux fournit la plus grande partie du sédiment qui se concentre dans la crème.

La formation de la crème de vase est liée à l'existence de la lentille d'eau immobile (Berthois, 1964) qui apparaît, au fond, à l'avant du courant de jusant dans la partie amont du coin salé, dans la zone du point nodal. Cette lentille d'eau immobile est particulièrement notable au cours des mortes-eaux où elle peut subsister plusieurs heures. Il s'agit là d'une amplification de la dissymétrie normale des courbes de vitesses au fond dans un estuaire au cours d'une marée.

Lorsqu'une lentille d'eau immobile se forme dans le noyau du bouchon vaseux (concentrations ≥ 10 g/l), la vase peut rapidement se décanter et, en quelques heures, la valeur de la turbidité passe de 10 g/l à plus de 100 g/l (Allen, 1973). Les courants de morte-eau sont alors trop faibles pour remettre la vase en suspension et la lentille subsiste en s'accroissant.

La position de la crème de vase, liée au noyau du bouchon vaseux, lui-même situé à l'amont de l'intrusion saline, varie saisonnièrement en fonction du débit fluvial (fig. 6).

En dehors du chenal de navigation, il ne se forme pas de crème de vase car la dissymétrie de la répartition dans le temps des vitesses de flot et de jusant au fond, due à la stratification saline, n'est pas assez marquée, et la concentration du bouchon vaseux y est moins élevée. Dans ces zones, le dépôt se fait directement à partir du bouchon vaseux aux étales de marée et en morte-eau.

Dans les zones intertidales latérales, le dépôt des sédiments fins est accru du fait de la stagnation des eaux tur-

4/ Mesures hydrologiques et sédimentologiques effectuées au cours d'une marée dans une zone d'accumulation de crème de vase :
A/ courants - B/ turbidité et salinité.

bides du bouchon vaseux de part et d'autre des étales. La vitesse des courants dans ces zones est très faible et les périodes d'été sont beaucoup plus longues que dans les chenaux, ce qui prolonge la période de décantation. Pendant les vives-eaux et les périodes de mauvais temps (l'amplitude du clapot peut atteindre 50-70 cm), les zones intertidales sont érodées et les vases remises en suspension.

5/ Évolution de l'étendue de la crème de vase au cours d'un cycle de marée.

Transport vers le large

La Gironde fournit des éléments fins en suspension au plateau continental. Ceci est matérialisé par l'épandage d'eau turbide qui sort de l'estuaire au moment des forts débits fluviaux. A ces moments et à marée basse, l'extrémité aval du bouchon vaseux est située sur le plateau continental interne. Les courants de marée résiduels entraînent en partie cette eau turbide vers le nord. Une autre partie des suspensions va se décanter sur le plateau continental, dans la vasière située par des fonds de 40 à 60 m au large de l'embouchure.

Au point de jonction entre le bas-estuaire et l'embouchure, les mesures de courant et de turbidité montrent que, sur toute la section, le transport résiduel total des suspensions est dirigé vers l'océan bien, qu'au fond, le transport résiduel se fasse vers l'amont. Le volume des suspensions rejetées à la mer varie directement en fonction du coefficient de marée et du débit fluvial (Allen et al., 1973).

Traçage radioactif de la crème de vase (*)

Afin de mieux préciser les modalités du transfert de sédiment entre la crème de vase et le bouchon vaseux, ainsi que de mettre en évidence l'intensité de la dilution de la crème dans celui-ci, permettant d'évaluer la masse des sédiments en suspension dans l'estuaire, il a été procédé à un traçage de vase radioactive dans une lentille de crème de vase. Cette expérience, effectuée à la demande du Port Autonome de Bordeaux, par le Service des Techniques avancées et des Applications des Radioéléments du Commissariat à l'Energie Atomique, a consisté en trois immersions de vase marquée au ^{40}Sc (période de 84 jours), en juin 1973, en période de décroissance des débits fluviaux et de migration du bouchon vaseux vers l'amont.

Les premières détections, par marées de coefficients croissants, ont montré que, contraire aux prévisions, il existe des mouvements, quoique très lents, au sein des lentilles de crème de vase. Cette reptation s'effectue vers l'aval, à des vitesses moyennes de l'ordre de 0,17 cm/s. Pendant toute l'existence des lentilles de crème, les bilans des radioactivités introduites et retrouvées étaient concordants, et donc la remise en suspension était négligeable. La diffusion transversale et longitudinale de la vase était rapide et, au bout de quatre marées, le chenal était contaminé sur toute sa largeur (environ 500-600 m) et au-delà de 1 000 m du point d'immersion.

Pendant les marées de vives-eaux qui ont suivi l'immersion, la crème de vase a été érodée et remise en suspension dans le bouchon vaseux. Aux coefficients décroissants du cycle suivant, la crème s'est reformée en trois îlots, dont deux en amont des positions initiales. Dans chacun de ces îlots, il a été trouvé de la vase marquée. Lors des cycles successifs, et jusqu'en septembre 1972, les zones d'accumulation des îlots de crème ont migré vers l'amont, pour

atteindre la Garonne en amont du bec d'Ambès et, à chaque fois, de la vase marquée a été retrouvée (fig. 7).

Cette expérience met clairement en évidence la remontée de la vase en Gironde de l'aval vers l'amont en période d'étiage, en montrant que, en partie, ce sont les mêmes sédiments qui migrent vers l'amont en cheminant entre le bouchon vaseux et la crème de vase. Un résultat nouveau, obtenu par l'étude de la dilution pendant le premier cycle de marée, est que la masse de vase en suspension (en vive-eau) dans l'estuaire serait de l'ordre de 6 millions de tonnes.

Conclusion

La connaissance de l'ampleur des phénomènes hydrologiques et sédimentaires, qui se produisent dans l'estuaire de la Gironde, a nécessité la recherche puis l'évaluation des multiples processus caractéristiques de ce milieu en évolution permanente. La compréhension des interrelations entre les données hydrauliques, climatiques, rhéologiques, sédimentologiques, géologiques, etc., du système, a impliqué la mise en œuvre d'études pluridisciplinaires. Celles-ci ont permis d'imaginer et, progressivement, d'améliorer des mo-

7/ Migration de la crème de vase en 1972.

(*) Un article détaillé de cette expérience sera publié prochainement par G. COURTOIS du Service des Techniques avancées et des Applications des Radioéléments.

dèles dynamiques représentatifs et des programmes de mesures significatives, des divers facteurs régissant le système. Encore maintenant, la quantification des paramètres définis à la faveur de ces études reste un préalable conseil à l'utilisation, la maîtrise et l'aménagement rationnel de l'estuaire.

Bibliographie

- ALLEN (G.-P.). — Déplacements saisonniers de la lentille de « crème de vase » dans l'estuaire de la Gironde (1971). *C. R. Acad. Sc.*, Paris, t. 273, p. 2429-2431.
- ALLEN (G.-P.). — « Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde » (1972). Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université de Bordeaux I, 313 p.
- ALLEN (G.-P.). — Un modèle représentatif de la formation d'une lentille de crème de vase en milieu estuarien (1972). *C. R. Acad. Sc.*, Paris, t. 276, ser. D, p. 3277-3280.

- BERTHOIS (L.). — Etudes de dynamiques estuariennes dans le fleuve « La Loire » (1964). 4^e Congrès Inter. Portuaire, Anvers, 22-27 juin 1964, section III, 1^{re} partie, p. 32-41.
- BONNEFILLE (R.). — Remarques sur les écoulements moyens à l'aval de la Gironde (1971). *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, n° 11, p. 361-364.
- BOWDEN (K. F.). — Circulation and diffusion (1967). In : « Estuaries », G. H. Lauff éd., Washington, p. 25-36.
- GLANGEAUD (L.). — Le mouvement des sédiments et la formation des bancs, seuils et mouilles dans la Garonne et l'estuaire de la Gironde (1939). *Extr. Congrès Inter. Géodésique et Géophys.*, Washington.
- HANSEN (D. V.), RATTRAY (M.). — New dimensions in estuary classification (1966). *Limnology and Oceanogr.*, Baltimore, vol. XI, n° 3, p. 319-326.
- HARLEMAN (M.), IPPEN (A. T.). — Salinity intrusion effects in estuary shoaling (1969). *Proc. Am. Soc. Civ. Engin.*, J. Hydraulics Div., New York, vol. 95, NO.HY1, January 1969, p. 9-27.
- MIGNIOT (C.). — L'évolution de la Gironde au cours des temps (1971). *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, n° 11, p. 221-281.
- PRITCHARD (D. W.). — Estuarine circulation patterns (1955). *Proc. Am. Soc. Civ. Engin.*, New York, vol. 81, p. 1-11.

Discussion

Président : M. J. LARRAS

Je tiens, dit M. le Président, à féliciter les deux conférenciers pour leurs exposés extrêmement intéressants et documentés.

Avant de donner la parole aux personnes qui voudraient poser des questions, je voudrais souligner un point : ce qui a été dit concerne des estuaires rectilignes et à fort coefficient de mélange. Je m'excuse de le dire aux chercheurs, car ils ont vraiment apporté des choses nouvelles, mais ils se sont trouvés dans un cas relativement simple car ils connaissaient les courbes de répartition des vitesses. Dans le Betsibouka, à Madagascar, les choses eussent été d'une complication extraordinaire. Je n'en félicite pas moins les auteurs car ils ont dégrossi largement le problème. J'emploie le mot « dégrossi » nullement dans un sens péjoratif mais il n'existe jamais de problème parfaitement résolu. Ils ont surtout précisé un point d'un très vif intérêt : ce sont les raisons pour lesquelles le bouchon vaseux se trouve à un endroit déterminé plutôt qu'à un autre. On savait évidemment que, plus il y a d'eau qui s'en va vers l'aval, moins le bouchon vaseux a des chances de remonter et inversement ; mais, ce qui est intéressant, c'est de voir qu'il se situe à la limite de deux régimes, l'un à prédominance de flot, l'autre à prédominance de jusant. Je crois que ceci est absolument capital.

J'irai plus loin : comme un estuaire n'est pas quelque chose de linéaire — et vous avez également tous deux insisté sur le point qu'un estuaire a une certaine largeur, et que ce n'est pas du tout la même chose dans le chenal de navigation et sur les bords — peut-être une des tactiques possibles consisterait-elle à rejeter le bouchon vaseux sur le côté du chenal de navigation. Je parle ici en ingénieur ; la seule chose qui intéresse l'ingénieur, ce sont les quelque 300 m de largeur du chenal de navigation. Ce rejet sur le côté serait peut-être possible grâce à des jeux de courants de flot et de jusant, en donnant une prédominance au jusant, car on sait, depuis un siècle, qu'il convient de donner une prédominance au jusant dans un estuaire bien aménagé.

Après avoir rendu hommage au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou, pour les très nombreuses études qu'il a réalisées pour tenter de mieux comprendre les processus de transport et de sédimentation en Gironde, M. MIGNIOT intervient en ces termes :

Il convient, tout d'abord, d'estimer la quantité de vase disponible dans l'estuaire de la Gironde et susceptible de se déplacer sous

le jeu des marées et des crues. Des études, faites par les équipes de la Section d'Applications des Radio-éléments du C.E.A., ont abouti à un chiffre de 6 millions de tonnes répartis sur la totalité de l'estuaire. Ce chiffre n'est pas très éloigné de la valeur de 4 millions de tonnes que nous avions pu calculer antérieurement, à partir des observations faites sur les matériaux transportés en suspension sur l'ensemble de l'estuaire ou déposés dans la « crème de vase ». En supposant la totalité de ces vases disponibles déposés sur les fonds, elles ne représenteraient qu'un taux de sédimentation de 2,5 cm.

Compte tenu que l'estuaire de la Gironde est en équilibre dynamique, c'est-à-dire que les quantités évacuées en mer sont voisines des apports fluviaux, on peut se demander si l'enlèvement, par un coup de baguette magique, de ces 6 millions de tonnes de vase disponibles, ne permettrait pas de résoudre le problème des dragages pour l'avenir. Une telle opération n'est, évidemment, qu'une vue de l'esprit car ces matériaux sont trop fluides pour être dragués en totalité et déposés en dehors de l'estuaire. Il n'en reste pas moins que, finalement, la quantité de vase disponible en suspension dans les estuaires français, aussi bien en Gironde qu'en Loire, représente des volumes relativement faibles eu égard au volume d'eau oscillant.

C'est d'ailleurs la raison, observe M. le Président, pour laquelle j'avais parlé d'estuaires européens, car les chiffres de teneurs en vase de 10 et 100 g par litre, que vous avez cités, paraîtraient extrêmement faibles à certains ingénieurs familiarisés avec les estuaires d'Extrême-Orient dans lesquels on va jusqu'à 500 et 600 g par litre, ce qui change complètement le problème. Mais, dans de tels cas, les bouchons vaseux sont tellement peu compacts qu'un bateau peut naviguer dans ces estuaires avec un tirant d'eau supérieur au tirant d'eau de la carte marine, si bien qu'on peut se demander si l'on doit employer ici l'expression de « bouchon vaseux ».

J'aimerais poser une question à propos des essais faits avec des traceurs radio-actifs. Il semble ressortir de votre exposé qu'il n'y a pas un bouchon vaseux, mais plusieurs bouchons vaseux ou, plus exactement, que le bouchon vaseux, à une certaine époque, se dissocie ou que certains matériaux sortent du bouchon vaseux pour aller reformer d'autres bouchons vaseux plus loin. Cette interprétation est-elle correcte ?

Pour répondre à la question posée par M. le Président, observe M. BONNEFILLE (L.N.H. Chatou), il convient de préciser que la vase se présente dans l'estuaire sous deux formes :

— Le « bouchon vaseux », qui intéresse une grande largeur de l'estuaire et dont le front aval est fixé par la prédominance de flot.

— La « crème de vase », intéressée par l'expérience de traceur radioactif, laquelle peut être « saupoudrée » le long de l'estuaire et alimentée par (ou alimentant) le bouchon vaseux suivant l'importance des marées.

M. MAQUET formule la remarque ci-après, concernant l'exposé de M. ALLEN :

Il faut préciser que les échanges importants se produisent entre le « bouchon vaseux » et la « couche crème » pendant un cycle de marée et que, par fort coefficient, on peut même ne pas du tout constater la présence de la « couche crème » alors qu'il y a toujours le « bouchon vaseux ».

En ce qui concerne la « théorie de la prédominance » exposée par M. BONNEFILLE, celle-ci ne semble pas permettre de prendre en compte les échanges de vases avec les vasières latérales, mais permet-elle de rendre compte de l'extension en longueur du « bouchon vaseux » et de la « couche crème » ?

Pour le moment, répond M. BONNEFILLE, cette théorie permet seulement de localiser le « bouchon vaseux ».

M. LESPINE fait la mise au point suivante :

Il est précisé que la théorie de prédominance de jusant, mise au point par M. BONNEFILLE, a été développée à partir de mesures faites essentiellement dans le chenal. Il reste à analyser les phénomènes dans les profils en travers, et notamment dans les chenaux secondaires.

De même, pour l'estimation du cube de vase qui sort de la Gironde chaque année, il apparaît nécessaire de faire des mesures complémentaires dans les profils en travers à la limite de l'estuaire.

Quand à l'objectif visé par le Port Autonome de Bordeaux, il consiste à déplacer encore vers l'aval, le « bouchon vaseux » dans le chenal en période de crue, de manière à ce que, durant cette période de l'année, les dépôts s'effectuent dans une zone où ils ne seront pas gênants en raison des grandes profondeurs naturelles. Par contre, nous n'avons pas la même prétention, en période d'étiage, puisqu'alors le « bouchon vaseux » se situe très en amont, dans la région d'Ambès ou même de Bordeaux.

M. le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui ont contribué à l'animer et donne la parole à M. MIGNIOT pour l'exposé de sa communication.

Abstract

Sedimentary processes of the mud in the Gironde estuary Contribution of a radioactive tracer to the study of mud displacements

The hydraulic and sedimentological processes operating in the Gironde estuary (SW France) are linked to the interaction between the river discharge (mean values between 800-1,000 m³/s), tides (ranges from 2 to 6 m), the suspended sediment influx from the rivers (2 to 3 million tons per year), and the general morphology of the estuary, consisting in two channel systems separated by a series of islets, shoals and bars.

The fluvial discharge undergoes important seasonal variations, and the length of the salinity intrusion varies correspondingly: during periods of low river flow (summer-fall) it extends above Bec d'Ambès (73 km from the inlet), and during high river flow, below Pauillac (45 km from the inlet). The residual circulation pattern is linked to the intensity of the density gradients, and also varies seasonally, following changes in the ratio of river flow to tidal prism. Generally speaking, in the zone of the saline intrusion the residual currents are stratified: upstream on the bottom, and downstream toward the surface. The channel and shoal topography can locally disrupt the residual currents by amplifying the flood or the ebb flow. The principal null point, or zone of convergence of the bottom residual currents upstream of which the bottom residuals are always oriented downstream, generally coincides with the upstream extremity of the salinity intrusion, and follows the same seasonal migrations.

There is a marked lateral salinity gradient in the lower estuary, with less saline water flowing along the right bank (looking downstream).

A well marked "turbidity maximum" forms at the upstream limit of the salinity intrusion, in the zone of bottom residual current convergence. This turbidity maximum migrates seasonally, in response to the migration of the salinity intrusion

and null point. The concentration of suspended sediment in the turbidity maximum is very high (0.1 to 10 g/l).

The deposition of suspended sediment in the main estuarine channel occurs through the formation of pools of extremely turbid bottom water (100-300 g/l). Practically no movement is discernible in these pools of "fluid mud", and intense bottom deposition by settling occurs. These pools are formed in the turbid core of the turbidity maximum, in zones of "motionless lenses", on the bottom occurring at flood slack by the amplification of the velocity time asymmetry in the salinity intrusion.

This fluid mud follows a cycle of erosion and deposition linked to the monthly cycle in tidal ranges. During neap tides the mud accumulates, and during spring tides, it is eroded and resuspended into the overlying turbidity maximum.

It appears, from suspended sediment flux measurements in the lower estuary, and analysis of the plume of turbid estuarine water escaping out onto the continental shelf during river floods and spring tides, that a significant amount of alluvial suspended sediment bypasses the estuary and is deposited in a silt and clay zone on the inner continental shelf. Possibly part of this estuarine water is recirculated in an estuarine and lagoonal system further north.

In order to study and assess the diffusion of the fluid mud into the turbidity maximum during spring tides, and also to follow the upstream migration of these fluid mud pools during a period of decreasing river discharge, a radioactive tracer study was made of the fluid mud. This study showed that a very slow movement, on the order of 0.1-0.2 cm/s occurs in the fluid mud, and appears to be directed downstream. Also it was shown that at each cycle of erosion and deposition of the fluid mud, which reformed further upstream at each cycle, the same sediment appears to be recycled.