

Nouvelle approche dans l'étude de la dynamique sédimentaire des estuaires macrotidaux à faible débit fluvial

Hydrodynamique estuarienne
Matières en suspension
Estuaire

Estuary hydrodynamics
Suspended particles
Estuary

Jacky L'YAVANC, Philippe BASSOULLET

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), Centre de Brest, B.P. 70, 29280 Plouzané, France.

RÉSUMÉ

La dynamique sédimentaire des grands estuaires est couramment transposée sur les estuaires de régimes hydrologiques totalement différents. Dans ces grands ensembles, la sédimentation est surtout dominée par les crues des fleuves, mettant en jeu d'énormes volumes d'eau et de matériels solides. A l'inverse, les petits estuaires de la façade Manche-Atlantique observent quelques pics de crues très ponctuels et ont un très faible débit fluvial. Exposés à des marnages importants en marée de vive eau, ils présentent une dynamique sédimentaire très différente, avec des apports terrigènes faibles vis-à-vis de ceux d'origine marine.

L'élaboration d'un modèle numérique hydrosédimentaire a nécessité, d'une part, une étude comparative de documents cartographiques ; d'autre part, un suivi du mouvement saisonnier du sédiment dans l'estuaire de Morlaix, permettant ainsi la mise en évidence d'un nouveau schéma du transit sédimentaire dans les estuaires macrotidaux. En période d'étiage, les sédiments fins migrent vers l'amont, créant une instabilité des talus vaseux ; en période de crue, ce sédiment stocké en amont, remis en suspension par l'action des courants et l'arasement des parties basses des talus, est expulsé dans la partie aval de l'estuaire.

Oceanologica Acta, 1991. Actes du Colloque International sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, vol. sp. n°11, 129-136.

ABSTRACT

A new approach to the sedimentary hydrodynamics study of low river macrotidal estuaries

Sedimentary hydrodynamics in large estuaries are usually transposed to estuaries with totally different hydrological characteristics. In these large estuaries, sedimentation is mainly dominated by river floods which transport large volumes of water and sediment. Conversely, the short estuaries located on the English Channel and Atlantic coasts are distinguished by short-lived flood peaks and a very small average water discharge.

Affected by large tide ranges during spring tides, they exhibit very different hydrosedimentological characteristics with low fluvial sediment input compared to marine sediment input. The formulation of a mathematical model for cohesive suspended matter transport and bottom evolution has necessitated a comparative study of bathymetric data and the recording of seasonal sediment movement in the Morlaix estuary. These studies have led to new concepts for sediment transport in macrotidal estuaries.

Oceanologica Acta, 1991. Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March, 1990, vol. sp. n°11, 129-136.

INTRODUCTION

Le comportement des actions hydrodynamiques dans les estuaires du type Seine, Loire, Gironde engendre des mécanismes responsables d'échanges sédimentaires importants. Alimentés par des apports solides de l'amont ou de l'aval, les masses de sédiments en mouvement oscillent au cours du temps sur tout ou partie de l'estuaire en fonction du débit fluvial et du volume d'eau marine introduit à l'aval. Selon le rapport de ces volumes, les actions du débit fluvial seront plus ou moins importantes et influenceront sur le déplacement longitudinal des matériaux solides correspondant à des sédiments fins sous forme de suspension ou de «crème de vase». De nombreuses études des mouvements sédimentaires ont été réalisées sur ces grands estuaires, qui mettent en jeu d'énormes volumes d'eau et de matériels solides (Allen *et al.*, 1977 ; 1980).

A l'inverse, les estuaires plus modestes, tels ceux du pourtour du Massif Armoricaïn, sont caractérisés par de très faibles débits fluviaux. Les rapports de volumes d'eau introduits en crue ou en étiage représentent des pourcentages peu différents vis-à-vis des volumes d'eau oscillant sous l'effet de la marée. La quantité de sédiments transportés en suspension au cours d'une marée présente des valeurs peu importantes ; le déplacement longitudinal de ces suspensions varie peu au cours du temps, sauf en crue exceptionnelle. Les apports terrigènes peuvent être faibles par rapport à ceux d'origine marine. Ces mouvements sédimentaires sont habituellement abordés par l'étude des paramètres hydrodynamiques (matières en suspension, salinités et vitesses de courant) (Bassoullet, 1979 ; Salomon et Allen, 1983).

L'existence et la comparaison de documents cartographiques anciens et récents sur le site de Morlaix vont permettre d'évaluer quantitativement les mouvements sédimentaires dans différentes zones de l'estuaire sur une période d'un demi-siècle environ. Afin de préciser certains mouvements à court terme dans la partie amont, une étude complémentaire de suivi saisonnier des variations topographiques sur deux années consécutives a permis de dégager un schéma des mouvements sédimentaires dans l'estuaire de Morlaix, en fonction des variations du débit fluvial déjà mis en évidence dans l'estuaire du Tamar [Royaume-Uni (Bale, 1985)].

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Situé sur la côte nord de la Bretagne, l'estuaire de Morlaix (fig. 1), de direction nord-ouest/sud-est, se subdivise en deux parties distinctes :

- une partie amont, la rivière maritime de Morlaix, limitée au sud par un bassin à flot situé à la confluence de deux cours d'eau, le Jarlot et le Queffleuth. Ces cours d'eau drainent un bassin versant de 191 km². Les débits moyens fluviaux sont faibles (3 m³/s). La rivière maritime, longue de 5,5 km, est marquée par un chenal de basse mer peu profond et étroit (10 m), bordé de talus instables, souvent émergés et aux pentes fortes. L'axe du chenal est formé de

cailloutis. La largeur des sections décroît d'un facteur 10 entre la pleine et la basse mer, et augmente vers l'aval ;

- une partie aval (baie ou rade), limitée au nord par la pointe de Penn al Lann. Longue de 5 km et large de 3,5 km dans sa plus grande dimension, elle prend naissance à la confluence de la rivière maritime de Morlaix et du Dourduff, affluent de moindre importance. Le zéro des cartes marines se situe dans cette baie qui présente, à basse mer, un vaste estran largement découvert.

Le marnage dans cet estuaire est de l'ordre de 9 m en vive eau.

BILAN SÉDIMENTAIRE A LONG TERME

Dans le cadre du programme «Rejets Urbains en Mer», l'IFREMER a développé un modèle numérique hydrosédimentaire afin de prédire le devenir des particules fines et des polluants associés. Pour la mise en place de ce modèle, un levé bathymétrique a été réalisé en 1986. La comparaison de ce levé avec des documents cartographiques anciens, réalisés par le Service Hydrographique de la Marine en 1929, a permis de mettre en évidence des phénomènes sédimentaires (dépôt-érosion), et d'établir une estimation quantitative du volume de sédiments en mouvement sur environ 55 ans. L'étude détaillée de l'importance des dépôts ou érosions dans différentes zones de l'estuaire fait apparaître :

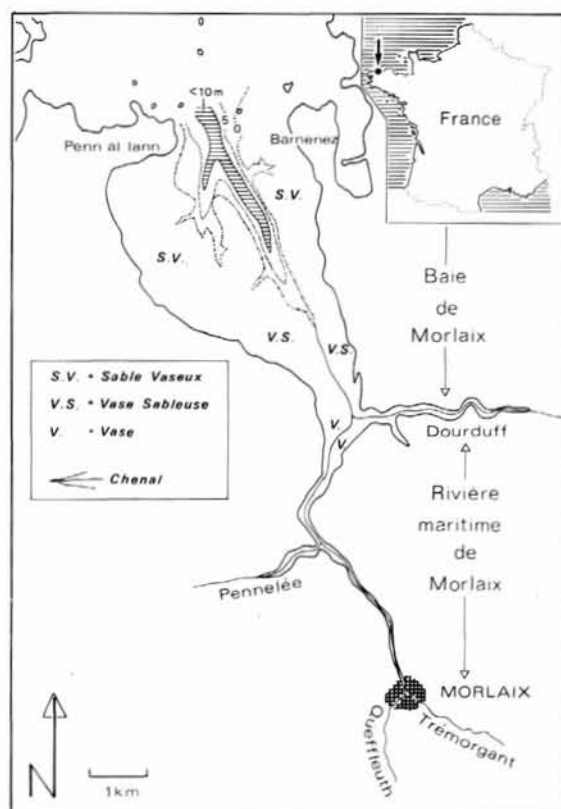


Figure 1

Localisation de la zone d'étude.

Location map of the study area.

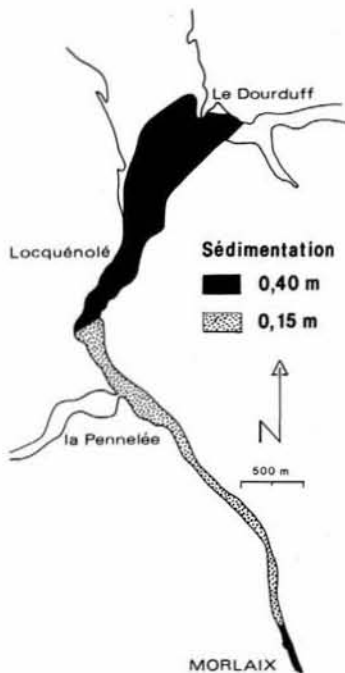


Figure 2
Phénomènes sédimentaires à long terme (zones amont et médiane).
Sedimentological characteristics (upstream and median areas).

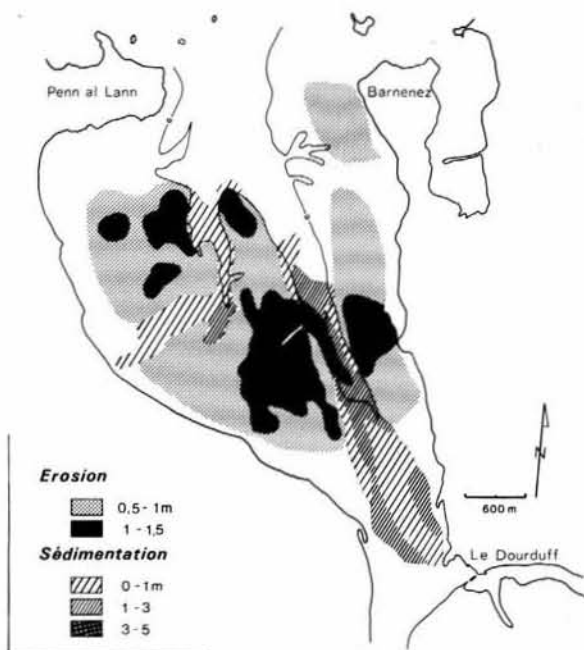


Figure 3
Phénomènes sédimentaires à long terme (zone aval).
Sedimentological characteristics (downstream area).

ESTUAIRE DE MORLAIX
EVOLUTION LONGITUDINALE DE LA SALINITE (%)
BASSE MER

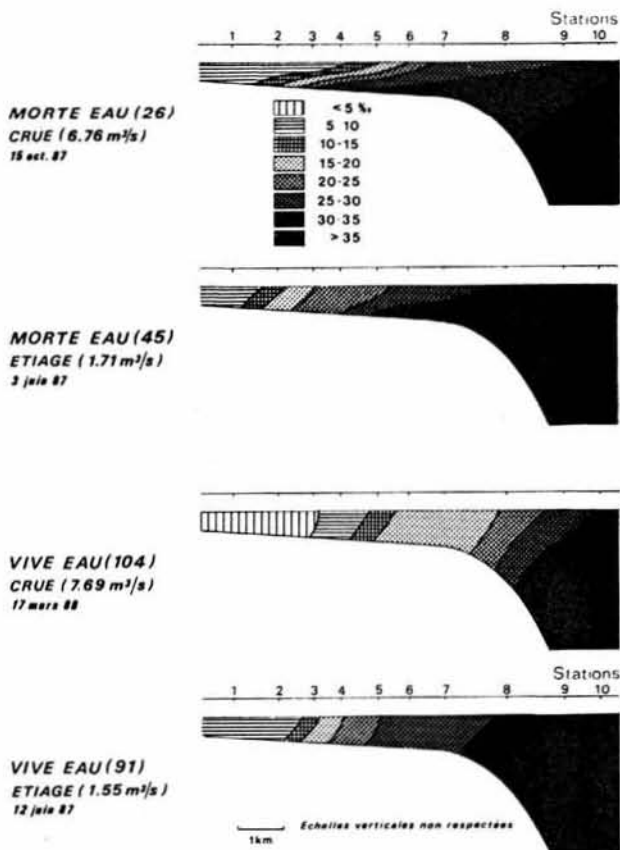
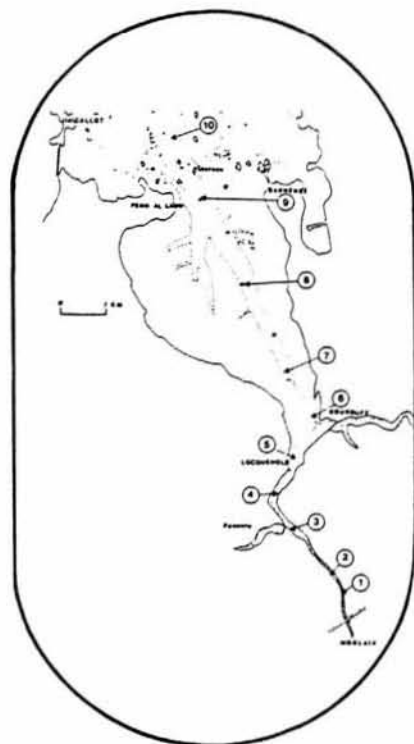


Figure 4
Évolution longitudinale de la salinité à basse mer.
Longitudinal behaviour of salinities during low tide.

- une zone globalement en équilibre, située dans la partie amont de la rivière maritime (fig. 2), caractérisée par de fortes turbidités à basse mer (supérieures à 1 g/l), par des variations importantes des salinités et une dissymétrie de la marée. Le taux de sédimentation est faible, l'exhaussement du fond ne dépasse pas 0,15 m durant la période considérée, le volume de sédiments fins déposés est de 70 000 m³ ;

- une zone médiane, en évolution, ayant les mêmes caractéristiques hydrodynamiques que celles rencontrées plus en amont. Les talus vaseux sont remplacés par des slikkes importantes. La dissymétrie entre le flot et le jusant est moins prononcée. L'exhaussement de ces slikkes vaseuses atteint 0,40 m, soit un volume de sédiments déposés de 870 000 m³ ;

- une zone aval (fig. 3), caractérisée par un engraissement important dans le chenal (3 à 5 m), à la limite amont du zéro des cartes marines. Le volume de sédiments fins déposés s'élève à 1 200 000 m³. De part et d'autre de cette zone, on observe, sur les vasières découvrantes, une érosion générale atteignant 1 m dans les zones situées en bordure du chenal. Cette érosion représente un volume de 1 800 000 m³ de sédiments remaniés. Les conditions hydrodynamiques font apparaître des courants alternatifs dans le chenal et giratoires sur les vasières découvrantes. En crue et en vive eau, on observe des dessalures importantes, malgré un caractère marin de la baie (fig. 4). Cette stratification engendre des différences importantes, en directions et en vitesses de courant sur la verticale, favorisant le piégeage du matériel en suspension (Beslier, 1981).

APPORTS SOLIDES PAR LES BASSINS VERSANTS

Les apports doivent être pris en compte dans l'évaluation du bilan sédimentaire de l'estuaire. Une étude des débits liquides et solides a été réalisée sur une année au déversoir du bassin à flot de Morlaix. Les résultats de cette étude prenant en compte les principales modifications anthropiques (remembrement, gestion des bassins à flot...), permettent d'extrapoler et d'estimer le volume de sédiments fins susceptible de se déposer dans l'estuaire au cours de ces 55 dernières années ; celui-ci s'élève à 420 000 m³ (l'étude des teneurs en eau des sédiments de la zone amont montre qu'une tonne de matériel fin sec correspond à un volume de 2 m³ de dépôts). L'estimation des apports de la rivière du Dourduff, par comparaison des bassins versants et du débit moyen, s'élève à 140 000 m³. L'apport total à prendre en compte est donc estimé à 560 000 m³.

DISCUSSION

Aucun élément ne permet de préciser si l'engraissement du chenal et l'érosion des vasières découvrantes en aval durant ces 55 dernières années se sont produites à des moments privilégiés. Le volume de sédiments fins en mouvement sur l'ensemble de l'estuaire est important (fig. 5).

En cumulant le volume de sédiments érodés en aval, estimé à 1 800 000 m³, avec les apports solides introduits par les bassins versants, estimés à 560 000 m³, la quantité de sédiments en mouvement s'élève à environ 2 400 000 m³. On retrouve là un ordre de grandeur correspondant au volume de sédiments déposés durant ce demi-siècle, et qui s'élève à 2 100 000 m³. Ces chiffres caractérisent l'importance des remaniements sédimentaires de la baie face aux apports des bassins versants. En utilisant les résultats obtenus par cette comparaison cartographique, il reste à préciser le transit de ces sédiments remaniés par une étude des mouvements à court terme dans la partie amont de l'estuaire.

MOUVEMENT SAISONNIER AMONT-AVAL DES SÉDIMENTS FINS

Afin de mettre en évidence les transits sédimentaires à court terme en fonction des caractéristiques hydrologiques, un suivi, par enregistrement des variations topographiques, a été effectué sur deux années consécutives.

Méthode et matériel

L'étude synoptique des mouvements sédimentaires dans la rivière maritime de Morlaix a nécessité l'implantation et le

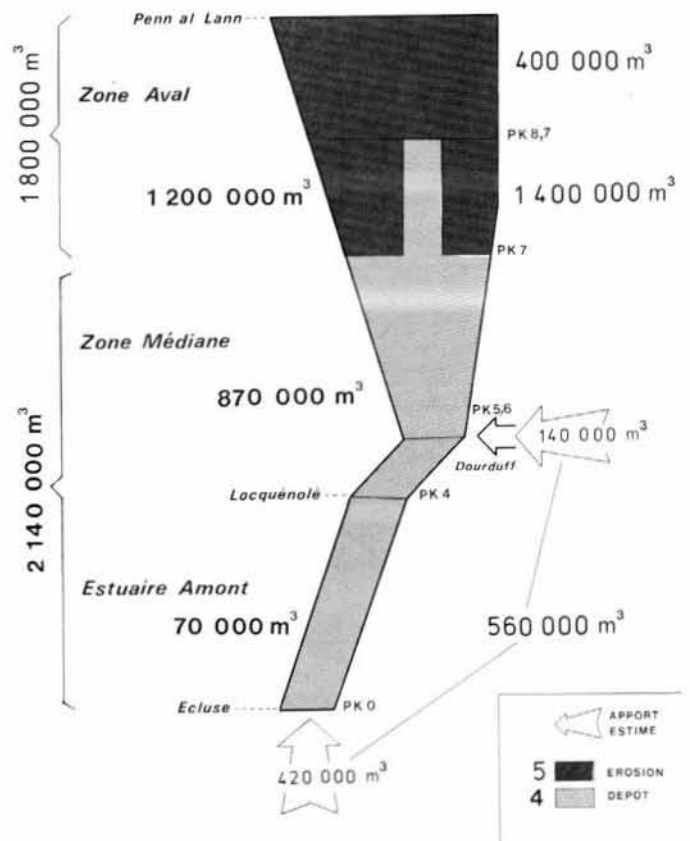


Figure 5
Bilan sédimentaire sur la période 1929-1986.
Sedimentary assessment covering the period 1929-1986.



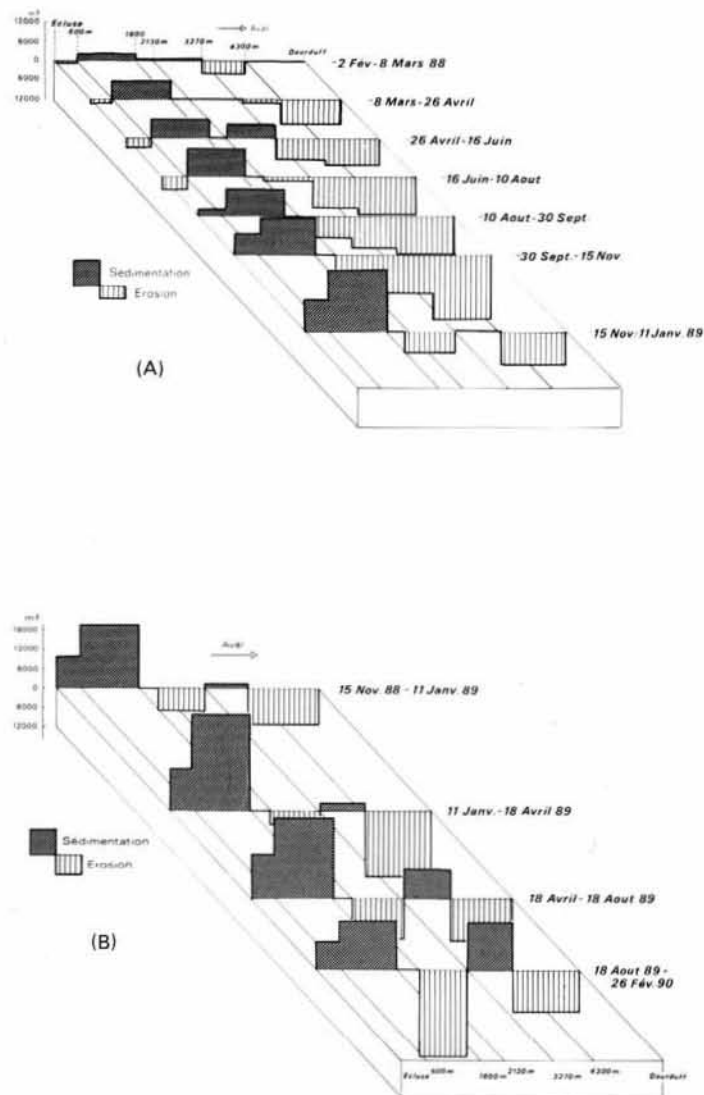
Figure 6

Transit sédimentaire dans l'estuaire de Morlaix. Bilan saisonnier amont-aval. a) période février 1988-janvier 1989 ; b) période novembre 1988-février 1990.

Sedimentary drift in the Morlaix estuary. Upstream/downstream seasonal assessment. a) February 1988-January 1989; b) November 1988-February 1990.

suivi de 70 stations de mesures. Ces stations sont réparties à différentes hauteurs sur les talus vaseux, de part et d'autre du chenal de basse mer et sur un axe perpendiculaire à celui-ci. La répartition de ces stations, non régulière, est dépendante de la morphologie d'une part et des phénomènes observés d'autre part. Chaque point de mesure est constitué de deux jalons en PVC, la référence de la mesure étant assurée par un axe rigide mobile et horizontal, disposé au niveau supérieur des jalons. Une règle graduée et perpendiculaire à cet axe est située à mi-distance des deux jalons. Ce dispositif permet d'annuler les erreurs dues aux affouillements, aux exhaussements ou aux salissures éventuelles (algues...), inévitables au pieds des jalons.

L'implantation des stations a été effectuée en février 1988. La périodicité des relèvements est d'environ 45 jours durant la première année. Par la suite, dans l'attente d'une modification notable de l'hydrologie et en particulier d'un régime de crue, les enregistrements sont plus espacés dans le temps. Les variations topographiques, exprimées en centimètres, sont ensuite moyennées sur une même zone lorsque celle-ci est représentative d'un même phénomène d'érosion ou de dépôt. Connaissant la superficie des zones concernées, les résultats sont convertis en volume et cumulés depuis la mesure initiale de février 1988.



Cinq zones ont été individualisées, représentant chacune un même phénomène d'érosion ou de dépôt. Deux zones (de l'écluse Pk 0 au Pk 1,8) représentent la partie amont et trois zones (du Pk 2,1 au Pk 5,6) représentent la partie aval. Entre le Pk 1,8 et 2,1, la rivière maritime a été canalisée, et les mouvements sédimentaires sont peu significatifs.

Résultats et discussion

La zonation des différents phénomènes sédimentaires permet d'estimer les volumes de sédiments fins en mouvement dans la rivière maritime. Le bilan quantitatif est résumé dans le tableau, et représenté globalement dans les figures 6 et 7.

Le suivi saisonnier en 1988 (fig. 6 a) fait apparaître :

- un engraissement important en amont de la rivière maritime (estimé pour l'année 1986 à 2 800 m³), qui ne s'explique pas par le seul apport des bassins versants ; cet engraissement met donc en évidence une source d'apport aval, particulièrement notable entre novembre 1988 et janvier 1989 où l'ensemble de l'estuaire marque un dépôt très conséquent, avec un volume de 40 000 m³. La faiblesse des débits (inférieurs à 3 m³/s) durant cette période, favorise le

transit et le stockage des sédiments en amont ;

- une érosion dans les 600 premiers mètres à partir de l'écluse entre février et août 1988, alors que les débits sont supérieurs à 5 m³/s durant cette période ;

- des phénomènes sédimentaires irréguliers en aval, des périodes d'érosion alternent avec des périodes de dépôts. La tendance est toutefois à l'érosion, avec un maximum du phénomène atteint entre septembre et novembre 1988.

Au cours de la deuxième année (fig. 6 b), en 1989, le débit fluvial est resté très faible (inférieur à 3 m³/s) ; la partie amont marque toujours un engraissement important tandis que la partie aval montre une érosion fluctuante.

En janvier et février 1990 de fortes pluies ont engendré un régime de crue très important ayant pour conséquence une érosion de la partie amont de la rivière maritime, expulsant les sédiments fins en aval.

Les résultats obtenus par le suivi des variations topographiques prennent en compte tous les phénomènes liés à la dynamique sédimentaire. Quelques études

similaires sont menées sur ce sujet, notamment sur l'estuaire du Tamar (Bale, 1985). Parallèlement aux actions hydrodynamiques sur le comportement des sédiments fins, d'autres paramètres, tels que les conditions météorologiques d'une part et les propriétés physico-chimiques (régies par des lois complexes dont l'étude est peu aisée à aborder ; cf. Migniot, 1968), d'autre part, peuvent expliquer les fluctuations irrégulières dans les phénomènes de dépôt et d'érosion rencontrés dans la partie aval de la rivière maritime. Parmi ces paramètres :

- les conditions météorologiques (vent, houle, clapot...) dans les zones ouvertes aux vents dominants engendrent des remises en suspension locales à prendre en compte dans la dynamique sédimentaire ;

- la consolidation des vases, qui s'effectue lentement par la perte de l'eau interstitielle. L'ensoleillement, l'existence de couches de natures diverses peuvent favoriser l'expulsion des eaux et induire des variations topographiques non assimilables à des remises en suspension ;

Tableau

Zonation à l'issue des différentes périodes d'enregistrements des phénomènes d'érosion (nombres négatifs) ou de dépôt (nombres positifs). Les volumes sont cumulés à partir de la mesure initiale en février 1988.

Sediment budget of erosive (negative) and silting up (positive) phenomena at the end of each period. Volumes are cumulated from the initial measurements (February 1988).

SECTIONS	600 m	1 800 m	2 100 m	3 300 m	4 300 m	5 600 m
SUPERFICIE	35 000 m ²	140 000 m ²		220 000 m ²	280 000 m ²	850 000 m ²
Nb JALONS	7	10		23	16	14
1988 8 mars	- 2 cm	1,5 cm		0	- 1,5 cm	0,3 cm
	- 700 m ³	2 100 m ³		0 m ³	- 4 200 m ³	2 500 m ³
26 avril	- 2 cm	2,5 cm		0	1 cm	1,2 cm
	- 1 400 m ³	5 600 m ³		0	- 1 400 m ³	7 500 m ³
16 juin	- 6 cm	0 cm		2 cm	- 2 cm	- 0,1 cm
	- 3 400 m ³	5 600 m ³		4 400 m ³	- 7 000 m ³	- 8 250 m ³
10 août	- 3 cm	2,5 cm		- 2,5 cm	- 1 cm	- 0,5 cm
	- 4 400 m ³	9 400 m ³		- 1 100 m ³	- 9 800 m ³	- 12 000 m ³
30 Sept.	18 cm	± 2,5 cm		- 2,5 cm	± 2 cm	± 1 cm
	2 100 m ³	9 400 m ³		- 6 600 m ³	- 9 800 m ³	- 12 000 m ³
15 Nov.	8 cm	2 cm		- 2,5 cm	- 1 cm	- 1 cm
	4 900 m ³	11 800 m ³		- 12 100 m ³	- 12 600 m ³	- 21 000 m ³
1989 11 Janv.	8 cm	6 cm		2 cm	5 cm	1,5 cm
	7 700 m ³	20 200 m ³		- 7 700 m ³	1 400 m ³	- 10 500 m ³
19 Avril	12 cm	7 cm		1 cm	0 cm	- 1,5 cm
	11 900 m ³	30 000 m ³		- 5 500 m ³	1 400 m ³	- 21 000 m ³
18 Août	8 cm	- 3 cm		- 3 cm	3 cm	1 cm
	14 700 m ³	25 800 m ³		- 12 600 m ³	9 800 m ³	- 13500 m ³
1990 26 Février	- 15 cm	- 7 cm		- 7 cm	2 cm	- 2,5 cm
	9 200 m ³	16 000 m ³		- 28 000 m ³	15 400 m ³	- 13500 m ³

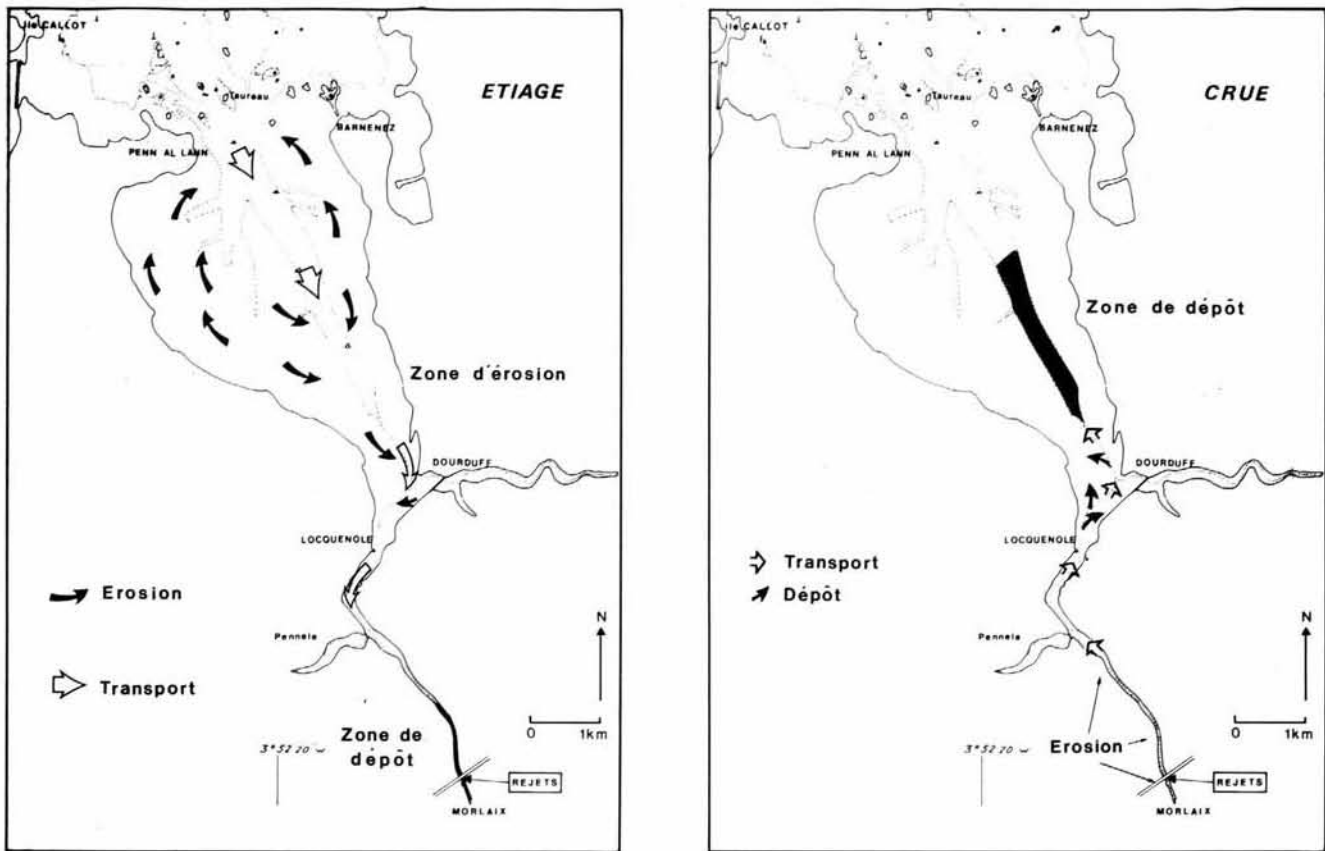


Figure 7

Schéma des mouvements sédimentaires : a) en situation d'étiage ; b) en situation de crue.

Outline of the sedimentary drifts: a) during low river discharge; b) during high river discharge.

- la pente d'équilibre des dépôts qui, accumulés sur les pentes fortes des talus, peuvent glisser et alimenter les chenaux par des apports latéraux ;

- la conséquence des activités humaines (zones conchylicoles dans la baie) qui, par l'entretien des parcs et le ramassage des huîtres, nécessitent de fréquents dragages, favorisant également des remises en suspension.

Ces fluctuations saisonnières dépôt/érosion en estuaire ont une implication extrêmement importante sur les transits de polluants, sur leur distribution et concentration, comme le montrent les travaux de Ackroyd *et al.* (1987), Uncles *et al.* (1988) ou encore Kawara (1988).

CONCLUSION

Sous l'action du débit fluvial et des courants de marée, les vases vont être remises en suspension et se déplacer dans l'estuaire selon un schéma annuel complexe.

En effet, en étiage (fig. 6 a), les sédiments fins érodés dans la zone aval par le clapot, les courants de marée et les actions humaines sont véhiculés vers la partie amont de l'estuaire, provoquant un engraissement sur les parties hautes des talus.

En période de crue (fig. 6 b), les courants de marée, renforcés au jusant par le débit fluvial, créent une

dynamique de redistribution des sédiments fins dans la zone amont de l'estuaire. En fin de période, quand seul le débit fluvial intervient dans le chenal de basse mer, l'action continue de cet écoulement provoque l'arasement des parties basses des talus vaseux, et conduit à des glissements et éboulements importants du matériel induré.

D'autre part, le suivi saisonnier des variations topographiques montre :

- l'importance des transits sédimentaires ;
- l'importance des apports de la zone aval face aux apports des bassins versants ;
- l'importance du débit fluvial sur les mouvements sédimentaires par rapport aux effets de la marée.

Ces mesures ont permis de mettre en place et de caler un modèle de transport sédimentaire.

RÉFÉRENCES

- Ackroyd D.R., G.E. Millward et A.W. Morris (1987). Periodicity in the trace metal content of estuarine sediments. *Oceanologica Acta*, 10, 2, 161-168.
- Allen G.P., G. Sauzay et P. Castaing (1977). *Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. Estuarine Processes. Vol. II (Circulation, Sediments and Transfer of Material in the Estuary)*. Academic Press, Inc., 63-81.

Allen G.P., J.-C. Salomon, P. Bassoullet, Y. du Penhoat et C. de Grandpré (1980). Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedim. Geol.*, **6**, 69-90.

Bale A.J., A.W. Morris et R.J.M. Howland (1985). Seasonal sediment movement in the Tamar estuary. *Oceanologica Acta*, **8**, 1, 1-6.

Bassoullet P. (1979). Étude de la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de l'Aulne (rade de Brest). *Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest*, 136 pp.

Beslier A. (1981). Les hydrocarbures de l'Amoco Cadiz dans les sédiments subtidaux au nord de la Bretagne. *Thèse de Doctorat, Université de Caen*, 204 pp.

Kawara O. (1988). Study on the seasonal variation of surface sediment composition in estuaries. *Wat. Sci. Technol.*, **20**, 6/7, 123-132.

Migniot C. (1968). Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche*, **7**, 591-620.

Salomon J.-C. et G.P. Allen (1983). Rôle sédimentologique de la marée dans les estuaires à fort marnage. *Notes Mém. Cie fr. Pétrol.*, **18**, 35-44.

Uncles R.J., J.A. Stephens et T.Y. Woodrow (1988). Seasonal cycling of estuarine sediment and contaminant transport. *Estuaries*, **11**, 2, 108-116.