

CONTRIBUTION DES TRACEURS RADIOACTIFS A L'ETUDE DES MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES
EN BAIE DE SEINE.

AVOINE J. *, CAILLOT A. **, HOSLIN R. **, LARSONNEUR C. *, MASSIAS J. **,
QUESNEY M. **.

INTRODUCTION

L'utilisation de formules de transport pour la quantification des mouvements sédimentaires sur le littoral et en domaine subtidal est source d'imprécisions importantes. En effet, la plupart des équations proposées ne prennent pas en compte les effets combinés des courants de marée et des houles. Aussi, le recours à des observations directes s'avère-t-il souvent nécessaire, notamment par la mise en oeuvre de traceurs radioactifs. La comparaison avec les transports théoriques déterminés à partir de mesures de courants et d'enregistrements de houles permet en outre de vérifier la validité des équations proposées (Heathershaw, 1981).

En baie de Seine, les dépôts sablo-vaseux présentent des fluctuations importantes au cours du temps (Crevel, 1983 ; Avoine *et al.*, 1984). Ces mouvements sédimentaires en régime hydrodynamique de forte énergie occasionnent des atterrissements d'origine marine dans l'estuaire de la Seine, contribuant ainsi à son comblement (Avoine, 1981). Pour préciser ces phénomènes, des campagnes de mesures ont été réalisées dans la partie sud-orientale de la baie, à l'aide de traceurs radioactifs, entre 1979 et 1984. Plusieurs sites expérimentaux ont été choisis, de Ouistreham à Honfleur, afin de quantifier les transits sédimentaires et de fixer la limite d'action des courants de marée et des houles en fonction de la nature des dépôts et de leur profondeur. Les techniques utilisées consistent à introduire dans le milieu des matériaux aisément détectables ayant même comportement hydrodynamique que le sédiment naturel ; elles ont été décrites dans le détail, notamment par Courtois et Monaco (1969), Caillot (1982 et 1983). En baie de Seine, les traceurs utilisés ont permis d'étudier, d'une part le charriage des sables entre - 2 m et - 15 m, d'autre part la remise en suspension de sédiments vaseux à différentes concentrations.

Nous rapportons ici les principaux résultats obtenus que nous complétons par les conclusions des expériences effectuées antérieurement pour le compte du Port Autonome du Havre sur le littoral cauchois (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1973 ; Tola, 1984). Nous discutons ensuite du rôle des mouvements sédimentaires mis en évidence dans le comblement de l'estuaire de la Seine.

* Laboratoire de géologie marine, Université de Caen, 14 032 Caen Cedex.

** CEA/SAR, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. BP 2, 91190 Gif-sur-Yvette.

Sites et Dates	Profondeur (m)	Granulométrie (mm)				Traceur	Durée de l'étude (jours)	Transport solide (m ³ /m et par jour)
		Sédiment naturel		Traceur				
		Etalement	d ₅₀	Etalement	d ₅₀			
OUISTREHAM (1979)	-2,5	0,04 à 0,62	0,21	0,16 à 0,20	0,185	Verre à	1,5.10 ⁻² vers l'Est	
	-5,5	0,04 à 0,42	0,18	0,16 à 0,20	0,185	l'Iridium 192	10 ⁻² vers l'Est	
	-7,5	0,04 à 0,50	0,21	0,20 à 0,31	0,25	Période 74 j.	3,6.10 ⁻³ vers l'Est	
HOULGATE (1983)	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	< 0,04	(a) 250g/l	Vase marquée à l'Hafnium 181	remise en suspension avec U _c = 0,7 cm/s	
	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	< 0,04	350g/l	Période 45 j.		
	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	< 0,04	500g/l			
	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	0,10 à 0,25	0,16	Verre à l'Iridium 192	200	équilibre
DEAUVILLE Ouest (1982)	-5,0	0,04 à 0,40	0,18	0,12 à 0,25	0,18	Verre à l'Iridium 192	équilibre	
	-10,0	0,04 à 0,40	0,18	0,16 à 0,31	0,22		1,5.10 ⁻² vers l'Est	
	-15,0	0,04 à 0,40	0,18	0,16 à 0,31	0,22		4,5.10 ⁻⁴ vers l'Est	
HONFLEUR chenal (1980) Débit fluvial: 300 m ³ /s	-12,1	0,04 à 0,08	0,05	0,16 à 0,20	0,17	Verre au Néodyme 147 Période 11 j.	En vives-eaux: 14 tonnes par marée vers l'amont.	
	-11,3	0,08 à 0,20	0,16	0,16 à 0,20	0,17			
	-11,5	0,08 à 0,20	0,16	0,23 à 0,26	0,26		En mortes-eaux: 0,25 tonne par marée vers l'amont.	

Tableau 1 : Conditions expérimentales des études réalisées par traceurs radioactifs entre 1979 et 1983. Principaux résultats obtenus. (a) concentration des vases marquées.

Parallèlement, devant Ouistreham, par des fonds de - 3,5 m et de - 5 m, l'action de la houle, dominante de secteur W à NW, se traduit par un mouvement du traceur en direction de la côte. Une action comparable est également visible à l'Ouest de Deauville par des fonds de - 5 m et devant Houlgate à - 8 m. L'influence d'un courant de retour pendant les périodes de mauvais temps est constatée devant Ouistreham.

Au total, le transit observé, principalement lié à la prédominance des courants de flot, entraîne, par charriage, de faibles quantités de sables en direction de l'estuaire. Le débit volumique mesuré est au maximum de $1,5. 10^{-2}$ m³/m et par jour.

Devant Houlgate, par des fonds de - 8 m, l'étude des phénomènes de remise en suspension a été entreprise parallèlement. Il s'agissait d'examiner le comportement de dépôts vaseux qui forment un stock sédimentaire important en baie de Seine orientale. La remise en suspension de ces matériaux cohésifs dépend principalement de leur rigidité initiale, elle-même fonction de leur concentration (Migniot, 1977). L'expérience à l'aide de vases marquées a montré que les courants de marée, même les plus faibles, sont capables de remettre en suspension 85 % de sédiments cohésifs plus ou moins concentrés, mais non consolidés, la rigidité initiale des dépôts étant inférieure à 2 N/m². Lors de cette expérience, la mesure en continu des vitesses de courants près du fond a permis de déterminer la vitesse critique d'érosion U_{*} en fonction du coefficient de marée (tableau 2, d'après Hoslin *et al.*, 1984).

coefficient de marée	42	52	60	68	86	106	112
U _* en flot (cm/s)	0,64	0,70	0,86	0,94	1,20	1,70	1,73
U _* en jusant (cm/s)	0,62	0,65	0,71	0,78	0,95	1,22	1,33

Tableau 2 - Valeurs de U_{*} en fonction du coefficient de marée

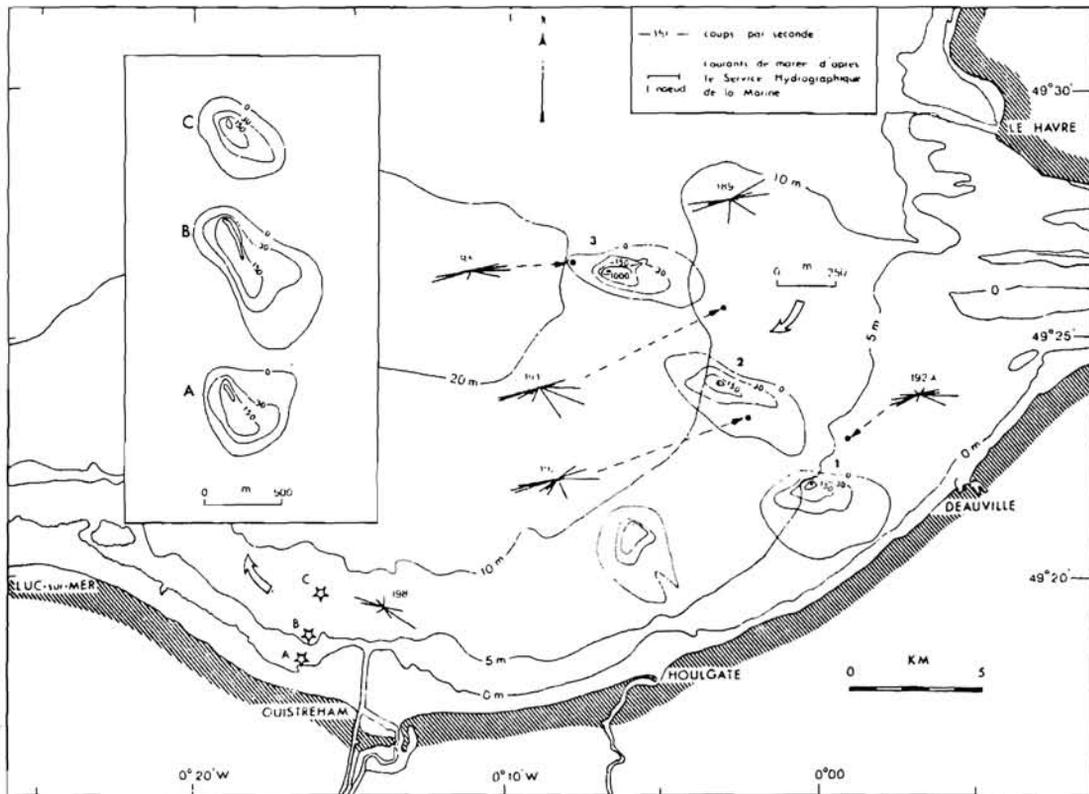


Fig. 2 - Expériences de Ouistreham, Deauville Ouest et Houlgate : courbes isochocs 4 mois après l'immersion des traceurs.

Ces mesures montrent que les vases non consolidées sont remises en suspension pour des valeurs de U_* très faibles (0,7 cm/s). Une grande mobilité des sédiments vaseux est ainsi mise en évidence ; elles permet de rendre compte des fluctuations saisonnières observées dans la partie orientale de la baie. Les dépôts vaseux résultant d'apports de crue ou de la remobilisation de sédiments fins reliques, sont très instables, particulièrement en période agitée durant laquelle la turbidité des eaux augmente fortement (Avoine *et al.*, 1984).

Dans l'estuaire de la Seine, et plus précisément devant Honfleur, une expérience par traceurs radioactifs a été réalisée en période d'étiage. Elle a permis de déterminer le début d'entraînement, le transport avec début de remise en suspension et le transport en suspension généralisé de particules identiques aux sédiments en place (Caillot, 1982). Il ressort que la vitesse critique d'érosion U_* doit être trois fois supérieure à celle du début d'entraînement pour obtenir une remise en suspension de 30 à 40 %, soit 3,5 cm/s pour des particules de 0,175 mm, et 4,8 cm/s pour celles de 0,26 mm. Ces valeurs de U_* correspondent respectivement à des vitesses instantanées à 1 m du fond de 0,7 m/s et de 0,95 m/s. Le transport est généralisé (90 % de remise en suspension) lorsque U_* dépasse 4,8 cm/s pour les particules de 0,175 mm et 6 cm/s pour celles de 0,26 mm, ce qui équivaut à des vitesses de 0,9 m/s et de 1,1 m/s. Ces résultats se rapprochent des calculs théoriques selon la formule de transport d'Einstein (Caillot, 1982). La pénétration vers l'amont des sédiments marins, observée avec les traceurs radioactifs, est due à l'asymétrie de l'onde de marée qui entraîne dans l'estuaire, sous l'action dominante des courants de flot, un transport résultant supérieur à celui occasionné par les courants de jusant (Avoine *et al.*, ce colloque).

1.2. Partie nord-orientale de la baie

Pour mieux connaître les mouvements des produits de dragage du port de Havre, rejetés au large d'Octeville par des fonds de - 14 m, plusieurs expériences par traceurs radioactifs ont été réalisées le long du littoral du Pays de Caux (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1973 ; Tola, 1984). Elles permettent de tirer de précieux enseignements sur les directions de transits sédimentaires dans cette partie de la baie (fig. 1). La première étude consistait à immerger près de la surface, à la hauteur du dépôt de dragages, 70 tonnes de sédiments sablo-vaseux marqués à l'or 198, pendant le flot d'une marée de vives eaux. Cette expérience montre que les vases ont parcouru 7 km vers le NNE en 4 heures, en formant un nuage turbide qui se sédimente progressivement. Les sables rejetés parallèlement se répartissent plus rapidement sur les fonds sur une distance de 1500 m. Une deuxième étude a été entreprise pour suivre l'évolution dans le temps des produits déposés sur le fond. Deux immersions de verre à l'iridium 192, de granulométrie identique à celle des matériaux dragués, ont été effectuées de part et d'autre du dépôt de dragages. Une troisième immersion de sables marqués, de granulométrie proche de celle des sédiments naturels du fond, a été faite au large de Cauville, par des fonds de - 14 m (fig. 1). Il apparaît que les sédiments naturels en place ne subissent qu'un très faible mouvement vers le NNE, comparativement aux matériaux dragués, très mobiles sous les mêmes actions hydrodynamiques. Ainsi, les houles de secteur dominant W à NW font remonter la fraction sableuse la plus fine des produits de dragage en direction de la côte, tandis que la fraction la plus grossière se déplace rapidement vers le NNE dans la direction du flot.

Entre le Havre et Antifer, les expériences par traceurs radioactifs permettent de conclure à un mouvement général des sédiments vers le NE par des fonds inférieurs à - 15 m, ce qui occasionne notamment l'envasement progressif du terminal pétrolier d'Antifer (Crevel, 1983). D'autres expériences, réalisées à la limite du domaine étudié, d'une part au N du terminal pétrolier, d'autre part sur les ridins situés au NE de la baie de Seine (fig. 1), confirment l'existence d'un transit sédimentaire depuis la partie nord-orientale de la baie vers la Manche orientale.

2 - DISCUSSION

Les différentes expériences par traceurs radioactifs dans la partie sud-orientale de la baie de Seine montrent que la résultante des transits sédimentaires par charriage est dirigée vers l'est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Ce transit est dû à l'action des courants de flot dominants. Près du rivage, au-dessus de l'isobathe - 6 m, les fortes houles de secteur ouest à nord-ouest provoquent en outre un déplacement des sables vers la côte, d'autant plus important que la tranche d'eau diminue.

En extrapolant à toute la largeur de l'embouchure (12 km) les débits solides calculés dans les marquages de sables réalisés au NW de Deauville, le volume annuel introduit en charriage dans l'estuaire serait de 65 000 m³. Nos résultats montrent également que les sédiments fins de la baie sont aisément remis en suspension par les courants de marée, même les plus faibles. D'après le modèle numérique établi par Salomon et Le Hir (1981) le déplacement résiduel de ces charges turbides s'effectue vers le secteur oriental.

L'ensemble des mouvements sédimentaires mis en évidence contribue donc au comblement de l'estuaire de la Seine, mais certains problèmes se posent.

Les atterrissements annuels évalués par comparaison de relevés bathymétriques (Vigarié, 1964 et 1965 ; Avoine, 1981) sont de l'ordre de 4,5 millions de m³ (moyenne établie sur la période 1934-1978). Le débit solide de la Seine est au maximum de 0,7 million de m³. La majeure partie des dépôts provient donc de la mer. De plus, 0,7 million de m³ de vase sont dragués annuellement dans l'avant-port du Havre. Ce matériel se rattache directement à celui de l'estuaire de la Seine d'après ses caractéristiques minéralogiques et géochimiques (Avoine, 1981 ; Boust, 1981) ; il s'ajoute donc au bilan positif relevé. Ainsi, c'est environ 4,5 millions de m³ de sédiments qui proviennent annuellement de l'horizon marin.

Dans ces apports, les données de Volmat (1929) et les travaux synthétiques du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1973 et 1980) montrent que l'érosion côtière ne contribue que pour 200 000 à 300 000 m³/an qui se répartissent comme suit :

- 60 000 à 100 000 m³ de sable provenant des falaises du Pays de Caux entre Le Havre et le cap d'Antifer,
- 200 000 m³ environ de matériaux (suspensions surtout) issus de l'érosion du littoral du Calvados entre Ouistreham et Honfleur.

L'essentiel des transits sédimentaires s'effectue donc en domaine subtidal. Compte-tenu des volumes impliqués et rapportés ci-dessus, le transport en charriage établi à l'aide des traceurs radioactifs (65 000 m³/an) apparaît sous-estimé. Cependant, il est probable que dans l'estuaire la majeure partie du matériel est introduite en suspension.

L'origine de ces sédiments peut maintenant être posée. Dès 1929, Volmat suggérait une érosion des fonds de la baie de Seine orientale à l'est du méridien d'Houlgate. Il se basait sur la comparaison de relevés bathymétriques successifs et concluait à un abaissement moyen des fonds de 0,68 m pour la période 1834-1913. C'est un chiffre voisin de 1cm/an. Sachant que la surface considérée (limitée au Nord par le parallèle du Havre) est d'environ 170 millions de m², on obtient ainsi un démaigrissement annuel de l'ordre de 1,7 millions de m³. En élargissant le périmètre intéressé à une ligne joignant Le Havre - Le Parfond - Luc-sur-Mer (extrémité orientale des rochers du Calvados) l'érosion annuelle s'élève à 3 millions de m³. Ces chiffres sont évidemment à prendre avec les plus grandes réserves sachant que les conclusions de Volmat demandent à être vérifiées et que s'il y a érosion, elle doit être très inégalement répartie. Néanmoins, ils aboutissent à des volumes dont l'ordre de grandeur est proche de celui que nécessitent les atterrissements dans l'estuaire de la Seine. Une érosion de la partie sud-orientale de la baie de Seine est donc très probable, le prisme sédimentaire holocène y est d'ailleurs mince (Auffret et d'Ozouville, ce colloque), les formations argilo-tourbeuses post-glaciaires affleurent largement (Avoine, 1981). Cette hypothèse n'exclut pas des apports en suspension d'origine plus lointaine venant sédimenter dans un fond de baie de moyenne à faible énergie. De tels apports sont prouvés par la présence de radionucléides issus des rejets de La Hague dans les sédiments fins de la zone considérée (Guéguéniat *et al.*, 1979 ; Jeandel *et al.*, 1980). Par contre, une alimentation par charriage de la baie de Seine sud-orientale doit être probablement très faible. La contribution des apports du large par rapport aux sources proximales est inconnue de même que la production biologique qui représente 20 à 25 % du matériel sédimenté.

Il faut encore noter que la possibilité d'une alimentation par des sédiments de la partie nord-orientale de la baie semble à exclure, compte tenu des résultats obtenus par les traceurs radioactifs montrant dans ce secteur

un transit sédimentaire général vers le NNE, par des fonds inférieurs à - 15 m. D'autres travaux permettent de confirmer cette tendance, en particulier le calcul de l'intégrale de sollicitation au transport d'après un modèle numérique de courants (Salomon et Le Hir 1981), ainsi que la mesure des flux résiduels de sédiments en suspension en différents points du littoral entre Le Havre et Antifer (Crevel, 1983). Ces travaux montrent cependant que les mouvements sédimentaires, pour l'essentiel du sud vers le nord au-dessus de - 15 m, s'inversent au-delà ; l'ampleur de ce transit du N vers le S doit toutefois être modérée.

En considérant l'ensemble de la baie de Seine orientale, entre le cap d'Antifer et l'embouchure de l'Orne, c'est-à-dire en prenant en compte les atterrissements dans les petits estuaires du Calvados (Orne, Dives, Touques), le volume des apports marins annuels est d'environ 5 millions de m³. A ce rythme, le prisme sédimentaire accumulé dans la partie orientale de la baie de Seine s'est considérablement appauvri au cours des derniers siècles tandis que se colmataient les estuaires, celui de la Seine principalement.

-
- AUFFRET J.-P. et d'OZOUVILLE L. (1985).- Cartographie du prisme sédimentaire holocène en Baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition. Ce volume, N° 8.
- AVOINE J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 236 p.
- AVOINE J., CREVEL L., DUBRULLE L., BOUST D. et GUEGUENIAT P. (1984).- Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. XVIIIème Journées de l'hydraulique, Marseille, p. I.3.1. - I.3.8.
- AVOINE J., DUBRULLE L. et LARSONNEUR C. (1985).- La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Baie de Seine - conséquences sur l'environnement. Ce volume, N° 16.
- BOUST D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse 3ème cycle, Caen, 186 p.
- CAILLOT A. (1982).- Quelques emplois de traceurs radioactifs en milieu estuarien. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. n°144, p. 111-115.
- CAILLOT A. (1983).- Guidebook on nuclear techniques in geology. Techn. Rep. Ser. 91, AIEA, p. 109-128.
- COURTOIS G. et MONACO A. (1969).- Radioactive methods for the quantitative determination of coastal drift. Mar. Geol., Vol. 7, p. 183-206.
- CREVEL L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse 3ème cycle, Caen, 164 p.
- GUEGUENIAT P., AUFFRET J.-P. et BARON Y. (1979).- Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans les sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. Oceanol. Acta, vol. 2, n°2, p.165-180.
- HEATHERSHAW A.D. (1981).- Comparisons of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents. In : Sedimentary dynamics of continental shelves, Mar. Geol. sp. iss., vol. 42, n°1/4, p. 75-104.

- HOSLIN R., MASSIAS J., PUJOL J.-P., REGNARD P. et ROLL T. (1984).- Etude au moyen de traceurs radioactifs des mouvements sédimentaires en baie de Seine. Rap. ronéot., CEA/ORIS/SAR/S/84-09/H 47, Saclay, 27 p.
- JEANDEL C., MARTIN J.M. et THOMAS A.J. (1980).- Origine et comportement des isotopes du plutonium et du césium 137 dans l'estuaire de la Seine. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 291, p. 125-128.
- LABORATOIRE CENTRAL d'HYDRAULIQUE de FRANCE (1973).- Etude du littoral entre le Havre et Antifer. Rap. ronéot., Maisons-Alfort.
- LABORATOIRE CENTRAL d'HYDRAULIQUE de FRANCE (1980).- Catalogue sédimentologique des côtes de France : de l'estuaire de la Seine à la baie du Mont-Saint-Michel. Rap. ronéot., Maisons-Alfort.
- MIGNIOT C. (1977).- Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. Houille Blanche, n°1, p. 9-47.
- SALOMON J.C. et LE HIR P. (1981).- Etude de l'estuaire de la Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques. Rap. ronéot., Univ. Bretagne occidentale, 286 p.
- TOLA F. (1984).- Etude du rejet de produits de dragage à l'aide de traceurs radioactifs. Transfert et dispersion des fines particules en suspension et évolution dans le temps des sédiments déposés sur le fond. XVIIIème Journées de l'Hydraulique, Marseille, p. I.15.1-I.15.8.
- VIGARIE A. (1964).- Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine. Thèse compl., Paris, 239 p.
- VIGARIE A. (1965).- Les modalités du remblaiement alluvial dans l'estuaire de la Seine. Cah. Océanogr., vol. XIV, n°5, p. 301-330.
- VOLMAT M. (1929).- Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22e Cah. Rech. Hydr. sur le régime des côtes, Paris, Imp. Nat., 39 p.