



## **Utilisation des paramètres rhéologiques pour la compréhension des processus liés à la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine.**

Sandric LESOURD, Patrick LESUEUR et Jean-Claude BRUN-COTTAN

*UPRES-A 6143 - "Morphodynamique Continentale et Côtière" - 24, rue des tilleuls 14000 CAEN*

### **Résumé**

L'étude du comportement physico-mécanique des sédiments fins contribue à la compréhension des mécanismes de l'envasement de l'estuaire de la Seine. Les mesures rhéologiques caractérisent soit des sédiments très cohésifs ( $C_u$  de l'ordre du  $\text{kN.m}^{-2}$ ) qui ne sont pas remobilisables par les seuls courants de marées, soit des sédiments fluides ( $\tau_y$  de moins de  $10 \text{ N.m}^{-2}$ ) facilement remis en suspension par les courants de marée. Les valeurs de  $C_u$  varient en fonction du site géographique et selon une occurrence saisonnière liée aux modalités des apports de la Seine. Les mécanismes d'envasement comprennent des dépôts de vases molles ultérieurement redistribués dans l'espace de l'estuaire et une consolidation rapide expliquant la présence actuelle de vases dans un milieu d'embouchure ouverte.

### **Abstract**

The study of the mechanical behaviour of muddy sediment allows to understand the mechanism of the silting up of the Seine estuary. Rheological data characterize (1) either the sediment with high undrained shear strength ( $C_u$  of about  $1 \text{ kN.m}^{-2}$ ) which can not be eroded by tidal currents or (2) the fluid mud with low shear strength ( $\tau_y$  less than  $10 \text{ N.m}^{-2}$ ) that are easily eroded by tidal action. The values of  $C_u$  vary according to the geographical area and the season variations connected with the river flooding. The mechanism of silting up involve thick deposits of underconsolidated mud that are subsequently spreaded in the estuary area. In addition, a very quick consolidation process explains the observed muddy deposits in an opened estuary associated with a high tide energy.

### **1. Introduction**

L'une des problématiques du thème "hydrodynamique et transport sédimentaire" du programme Seine Aval est de comprendre les processus de transport, de dépôt et d'érosion des sédiments fins auxquels sont associés de nombreux contaminants. Le comportement des vases et leur dynamique en relation avec les paramètres hydrodynamiques est analysé par l'intermédiaire d'études cartographiques, du suivi des caractéristiques sédimentologiques de la couverture sédimentaire et de carottages sur lesquels sont étudiés les propriétés physico-

mécaniques des sédiments. L'étude rhéologique des vases est une approche complémentaire, basée sur l'étude de la cohésion, paramètre représentatif du comportement mécanique du matériau. Ce paramètre est lié au degré de consolidation du sédiment.

L'objet de cette étude est de caractériser les sédiments fins de l'estuaire en utilisant la mesure de la cohésion non drainée  $C_u$  (sédiments vaseux) et la mesure de la rigidité initiale  $\tau_y$  (sédiments fluides de type crème de vase, appelée localement vapie). La connaissance des paramètres rhéologiques permet d'apprécier la susceptibilité des vases à être remobilisées sous l'action des agents dynamiques. Elle contribue ainsi à la connaissance du cycle des sédiments fins et de l'envasement de l'estuaire aval.

## **2. Principe d'étude**

Les sédiments vaseux ont été prélevés au moyen d'un carottier-boîte de 0,1 m<sup>3</sup>, qui autorise le prélèvement simultané de deux carottes jumelées, l'une étant destinée à l'étude rhéologique, la seconde faisant l'objet d'une étude sédimentologique classique. Les vases fluides de type crème de vase ont été prélevées au moyen d'une bouteille horizontale autolestée. Les mesures étaient réalisées à bord des navires, immédiatement après le prélèvement, ce qui limite les effets du remaniement et les modifications des sédiments (dessiccation, dégradation de la matière organique) liées au transport et au temps écoulé avant la mesure.

La cohésion non drainée  $C_u$  (N.m<sup>-2</sup>) a été mesurée au moyen d'un scissomètre de laboratoire, aménagé pour obtenir des mesures directement dans une carotte. L'appareil de type Wykeham Farrance (WF-23500) comporte un moteur à pas constant et une gamme de ressort et de croisillons interchangeableables, ce qui permet une large gamme de mesure. Les caractéristiques des sédiments fluides de type crème de vase (viscosité  $\eta$  et rigidité initiale  $\tau_y$ ) ont été estimées au viscosimètre Fann (Type 35SR12), qui utilise deux cylindres coaxiaux.

Les sites d'échantillonnage qui correspondent à des zones d'envasement de l'estuaire (Lesueur *et al.*, 1997), ont été étudiés en différentes conditions saisonnières afin d'appréhender la variabilité de la cohésion liée à celle de la couverture sédimentaire.

## **3. Résultats**

### **3.1 Mesures de la cohésion non drainée.**

#### **3.1.1 Caractéristiques générales**

La figure 1 présente quelques profils rhéologiques réalisés au scissomètre dans les vases carottées à l'embouchure de la Seine, dans différents secteurs et ce

pour diverses conditions saisonnières.

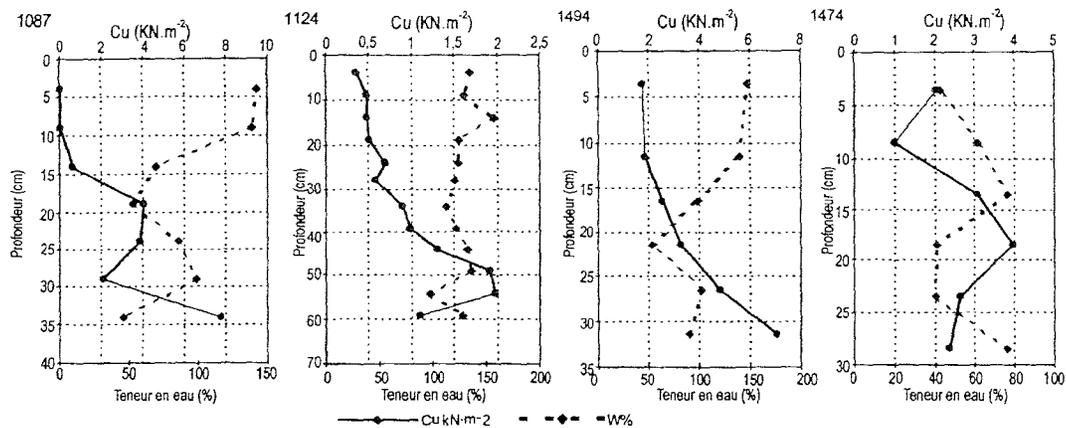
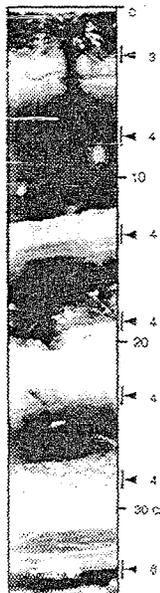


Figure 1. Exemples de profils rhéologiques réalisés dans les sédiments superficiels de l'estuaire aval de la Seine (Variations de Cu, trait plein et de la teneur en eau, trait pointillé).

Les mesures montrent une certaine homogénéité dans les 10 premiers centimètres du sédiment. Les valeurs sont comprises entre 0,05 kN.m<sup>-2</sup> (vases molles) et 10 kN.m<sup>-2</sup> (vase compacte). La cohésion augmente généralement avec la profondeur, de manière très progressive. Cette évolution dans la colonne sédimentaire peut correspondre à un phénomène de tassement, mais les carottes sont trop courtes pour que ces tendances soient réellement confirmées. Ce qui apparaît clairement est la relation inverse qui existe entre la teneur en eau et la cohésion non drainée (Chassefière *et al.*, 1985). Cette relation, rigoureusement explicable dans des sédiments de nature homogène, peut avoir d'autres explications. Ainsi, les brusques divergences avec cette relation inverse peuvent être imputées aux hétérogénéités dans le sédiment, comme par exemple la bioturbation ou les lentilles sableuses qui drainent l'eau interstitielle et augmentent l'angle de frottement interne du sédiment.



Il apparaît ainsi nécessaire d'associer une étude sédimentologique précise aux mesures rhéologiques. Dans l'exemple de la figure 2, les valeurs de cohésion sont constantes sur l'ensemble de la carotte et laissent suggérer une colonne sédimentaire homogène. En fait, les mesures concernent des niveaux de nature granulométrique analogue, comme le montrent les faciès radiologiques identiques, mais la variabilité lithologique est importante, ce que ne montre pas la mesure rhéologique.

Figure 2. Mesures de la cohésion en regard du faciès sédimentaire. Carotte 1076, Rade de la Carosse, 15 m de profondeur/CMH. Positif de radiographie aux rayons X : Les sables sont sombres, les vases en clair. Les triangles indiquent les niveaux testés au scissomètre (en kN.m<sup>-2</sup>).

La radiographie permet donc d'interpréter correctement les mesures ponctuelles de cohésion et ainsi de rendre compte des hétérogénéités, tels les contacts de faciès, le remplissage différentiel des terriers, l'état de perturbation du sédiment et les bioclastes qui peuvent entraver la rotation du croisillon.

### 3.1.2 Evolution saisonnière de la cohésion dans les sédiments de surface

#### 3-1-2-1 Zonation de la cohésion des vases superficielles

Les valeurs présentées sur la figure 3 correspondent à la cohésion de surface ( $\text{kN.m}^{-2}$ ), c'est-à-dire qu'elles ne concernent que les dix premiers centimètres superficiels.

Pour une période d'échantillonnage donnée, les cohésions, de l'ordre de grandeur d'autres vases estuariennes (Barbaroux, 1980), sont plus élevées dans l'estuaire interne (chenal Nord et chenal Sud) que dans l'estuaire externe (i.e. à l'W de  $0^{\circ}5\text{E}$ ). Les valeurs varient de 1 à 5  $\text{kN.m}^{-2}$  en estuaire interne (chenal Nord), alors qu'elles ne dépassent pas 0,3 à 0,5  $\text{kN.m}^{-2}$  dans l'estuaire externe.

Dans l'estuaire interne, les mesures portent sur des vases qui forment des épaisseurs assez importantes ( $>30$  cm). Dans cette zone abritée, où l'envasement est plus ancien, la permanence de la sédimentation fine et l'épaisseur des dépôts correspondent à de fortes cohésions (Lesourd *et al.*, 1997).

Dans l'estuaire externe, les valeurs mesurées peuvent être mises en relation avec la bathymétrie. Aux faibles profondeurs (3 à 5 m sous le zéro hydrographique), les cohésions des vases carottées restent faibles en toutes saisons. Les fonds sont soumis à une agitation qui ne permet pas la permanence de la sédimentation ni la consolidation des dépôts fins, très fréquemment remaniés par les courants de marée et surtout par les vagues. C'est au-delà de l'isobathe -10 m, dans des profondeurs où l'action des houles diminue, que les cohésions sont nettement plus importantes (3  $\text{kN.m}^{-2}$  en septembre à 1,3  $\text{kN.m}^{-2}$  en mars).

#### 3.1.2.2 Variations saisonnières de la cohésion

Une évolution saisonnière de la cohésion des sédiments est mise en évidence. Son occurrence est notamment fonction du régime fluvial de la Seine. Les faibles valeurs de cohésion mesurées au printemps 1997 correspondent à des vases peu consolidées, résultant des apports des crues de janvier-mars 1997 ( $1200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Les vases prélevées en septembre 1996 ont des cohésions plus importantes : elles correspondent à des dépôts vaseux résiduels des apports hivernaux.

Ces données alliées aux études hydrologiques suggèrent un mécanisme impliquant en crue un dépôt relativement rapide de vases (sédiments alors peu cohésifs), suivi de leur remobilisation partielle et de leur redistribution en période d'étiage. La persistance des sédiments est en relation avec une augmentation de la cohésion.

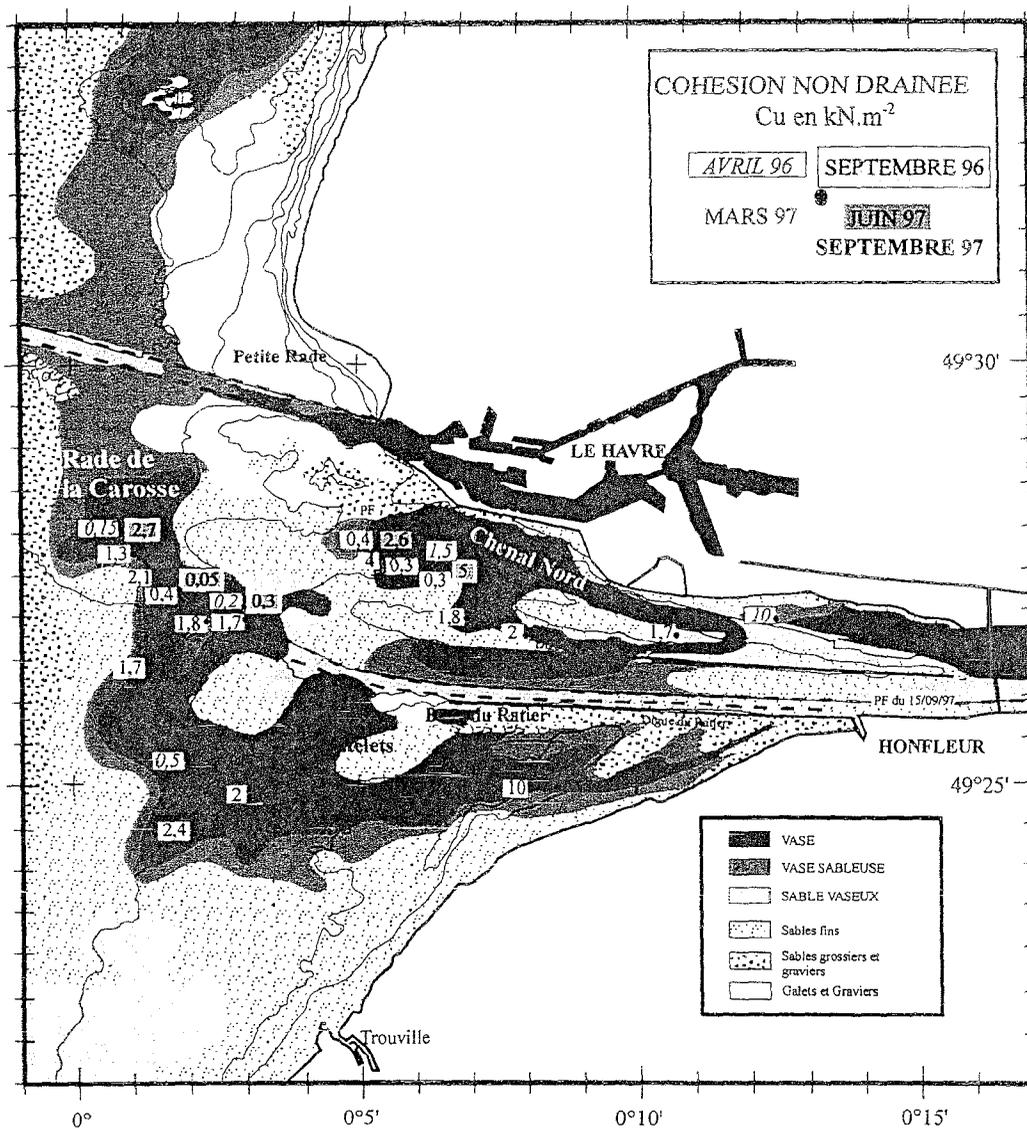


Figure 3. Cohésion non drainée des sédiments superficiels de l'estuaire de la Seine

Ainsi les mesures réalisées en avril 1996 caractérisent deux sortes de dépôts : (1) dans les zones à envasement persistant (chenal nord) des dépôts résiduels de crue à différents degrés de consolidation et (2) dans les zones d'envasement temporaire, des dépôts de vases molles issus du remaniement du dépôt de crue (SW Ratelets). Les valeurs mesurées en période d'étiage montrent les mêmes tendances: (1) dans les zones à envasement persistant (chenal nord; Carosse), les cohésions sont relativement importantes et (2) dans les zones d'envasement temporaire (embouchure), les faibles cohésions caractérisent des dépôts remaniés par l'agitation, et localement par les dragages.

D'une manière générale, de crue à étiage, les valeurs de cohésion évoluent dans un rapport de l'ordre de 1 à 6. Les dépôts vaseux sont caractérisés par une

consolidation relativement rapide : en un même site du chenal Nord, les cohésions mesurées en 1997 croissent de 0,4 kN.m<sup>-2</sup> (mars) à 2,6 kN.m<sup>-2</sup> (juin), puis 4 kN.m<sup>-2</sup> (septembre).

### 3.2 Mesures de la rigidité initiale

Les résultats des analyses qui portent sur la vase fluide et la crème de vase prélevées dans le chenal Nord et le chenal de navigation sont reportés dans le tableau 1.

Zone de prélèvement	$\tau_v$ (N.m <sup>-2</sup> )	$\eta$ (Pa.s)	W%	C (g.l <sup>-1</sup> )	Mode ( $\mu$ m)
Chenal nord	10,2	0,18	200	417	38
Chenal de navigation 1	0,79	0,004	415	221	35
Chenal de navigation 2	2,9	0,012	198	424	87
Chenal de navigation 3	5,1	0,019	128	600	96
Chenal de navigation 4	9,1	0,04	228	376	96

Tableau 1. Résultat des analyses physico-mécaniques réalisées sur la vase fluide.

Les résultats font apparaître des rigidités très variables en fonction des sites de prélèvements, de la granulométrie et de différents états de consolidation. Ils sont cependant proches de ceux de la SOGREAH (1991) qui par comparaison avec d'autres estuaires montre que les vases de la Seine sont plutôt rigides pour une concentration identique.

Des mesures réalisées à intervalles de temps réguliers font apparaître que la rigidité initiale est multipliée selon un facteur 5 à 30 en 24h alors que la teneur en eau subit une diminution de 25 à 75 % dans le même temps. Ceci indique une disposition de la crème de vase à consolider très rapidement. Cette faculté est probablement en relation avec une teneur importante en silts et sables fins dans le cas de la crème de vase de la Seine.

### 4. Action des courants de marée sur les sédiments

Les mesures de cohésion non drainée et de rigidité initiale permettent de déterminer les tensions de cisaillement critique d'érosion des sédiments soumis à l'action d'un courant, ceci en utilisant les lois établies par Migniot (1968, 1989). Cette valeur peut être comparée aux tensions de cisaillement induites par le courant, déterminée selon la loi de Karman-Prandtl à partir de vitesses des courants mesurées *in situ*. Les flux d'érosion sont déduits de la formule de Parthéniades (1962).

En estuaire de Seine les valeurs maximales des courants à 1 m du fond sont de l'ordre de 1,5 m.s<sup>-1</sup> (Avoine, 1981), il apparaît que des sédiments dont la cohésion

est supérieure à  $45 \text{ N.m}^{-2}$  sont difficilement érodables par les seuls courants de marées. Cette observation conduit à remarquer que l'action de la houle est un paramètre déterminant dans les processus d'érosion des sédiments vaseux. Il est par ailleurs souligné l'importance du milieu de dépôt et des paramètres propres au sédiment, notamment l'influence des organismes fouisseurs sur la cohésion (Rowden *et al.*, 1998).

L'extrême mobilité des sédiments fluides, spécialement au moment des forts courants de flot, est montré par la figure 4, qui présente les valeurs de cisaillement critique, déterminées à partir des mesures des rigidités initiales, comparées aux vitesses des courants, mesurées lors d'un point fixe dans le chenal de navigation.

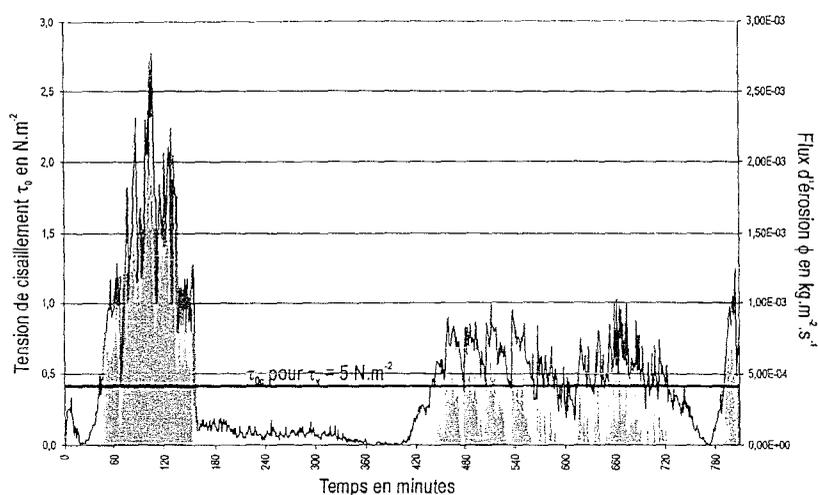


Figure 4. Evolution des tensions de cisaillement (trait noir) et des flux d'érosion (surface grise) au cours d'une marée de vives-eaux. Les calculs sont établis d'après les mesures des vitesses de courant à 1 m du fond pour une crème de vase de  $5 \text{ N.m}^{-2}$  de rigidité. Chenal de Seine, 15/09/97, coef 104, débit de  $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

## 5. Discussion et Conclusion

Les données rhéologiques permettent de compléter les caractéristiques sédimentologiques dans la compréhension des mécanismes de l'envasement accru de l'embouchure de la Seine (figure 5). Dans le contexte morphosédimentaire de lieu de transit que représente le chenal de navigation, la période de fin d'hiver correspond généralement à des apports solides peu différés et brusque de la Seine. Il en résulte dans l'embouchure la présence d'un dépôt étendu de vases molles (Lesueur *et al.*, 1997). Le plan d'eau y étant soumis à une agitation qui s'oppose à la stabilisation des dépôts frais, le dépôt vaseux récent, peu consolidé, est en partie remobilisé par les agents dynamiques et partiellement recyclé vers l'amont, particulièrement vers le chenal Nord, sous l'effet des courants de flot. Si l'épaisseur du dépôt résultant de la crue est suffisamment importante (c'est la notion d'épaisseur initiale définie par

Migniot, 1989), une partie du dépôt est susceptible d'être préservé ; la partie inférieure, soumise à une contrainte de consolidation verticale qui augmente la concentration et donc la cohésion tandis que la partie superficielle est rapidement érodée.

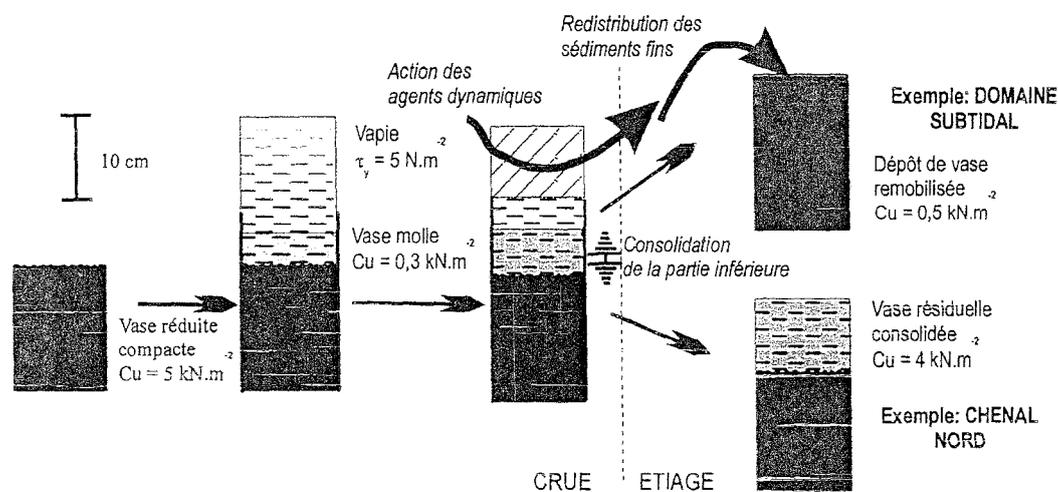


Figure 5. Mécanismes de dépôt et de préservation des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine.

L'étude des caractéristiques rhéologiques des vases constitue donc un outil intéressant pour la compréhension des mécanismes d'envasement dans la zone étudiée. Elle permet d'appréhender les paramètres représentatifs de l'état de consolidation, qui expliquent la persistance d'un dépôt vaseux dans un espace soumis à de puissants courants de marée et parfois à de fortes agitations.

### Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du Programme scientifique Seine-Aval, financé par les partenaires suivants : l'Etat, la Région Haute-Normandie et les autres Régions du Bassin Parisien, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et les industriels de Haute-Normandie.

### Bibliographie

- Avoine J., 1981. L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse 3e cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Barbaroux L., 1980. Evolution des propriétés physiques et chimiques des sédiments dans le passage continent-océan. L'effet estuarien (estuaire de la Loire et ses parages). *Thèse doctorat Sci. Nat., Université de Nantes*, 431 pp.
- Chassefière B., Aloisi J.C., Monaco A., 1985. Geotechnical properties of Shelf and slope Deposit off the Rhône Delta. *Geo-Marine Letters*, 5:121-126.
- Lesourd S., Lesueur P., Brun-Cottan J.C., 1997. Intérêt des études rhéologiques de sédiments

vaseux littoraux. Le cas de l'embouchure de la Seine. *6ème Congrès Français de Sédimentologie*, Poster et Résumés, Publ. ASF, Paris, n° 27, p. 169-170.

Lesueur P., Lesourd S., Auffret J.P., Avoine J., Brun-Cottan J.C., Levoy F., 1997. Etat des connaissances sur la distribution et l'évolution des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. Programme Scientifique Seine Aval, Rapport 1996/FIN-1 (Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire), 82-115.

Migniot C., 1968. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions dynamiques. *La Houille Blanche*, 7:591-620.

Migniot C., 1989. Tassement et rhéologie des vases. *La Houille Blanche*, 1:11-29; 2:95-111.

Partheniades E., 1962. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 19, N°HY1,105-139.

Rowden AA. Jago CF. Jones SE. 1998. Influence of benthic macrofauna on the geotechnical and geophysical properties of surficial sediment, North Sea. *Continental Shelf Research*. 18(11):1347-1363.

SOGREAH, 1991. Estuaire de la Seine. Etude sur les dragages d'entretien dans le chenal de navigation. Identification de la vapie et étude de son incidence sur la navigation. *Port autonome de Rouen, rapport S.1097.R14*, 28 pp., annexes.