

Programme scientifique Seine-Aval

# 3 • Sables, chenaux, vasières

Dynamique des sédiments et évolution morphologique

Coordinateur  
Patrick Lesueur

3 - Sables, chenaux, vasières : dynamique  
des sédiments et évolution morphologique



3

Programme scientifique  
Seine-Aval



Ifremer



569  
RES



## Présentation du programme Seine-Aval

Seine-Aval est un programme d'études et de recherches interdisciplinaires à caractère appliqué sur l'estuaire de la Seine qui a débuté en 1995. La zone d'étude couvre les 160 km de Poses (en amont de Rouen) à la baie de Seine.

Il réunit plus d'une centaine de chercheurs dans des disciplines aussi diverses que la physique, la géologie, la chimie, l'écologie, l'écotoxicologie, appartenant à plus d'une vingtaine de laboratoires répartis sur l'ensemble du territoire national et en Belgique.

Le programme Seine-Aval est piloté par un comité exécutif constitué par un directeur, M. Louis-Alexandre Romaña, et trois membres, MM. Daniel Cossa, Ghislain de Marsily et Robert Meyer.

Les objectifs principaux fixés au programme Seine-Aval sont de fournir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème estuarien et de développer des outils d'aide à la décision pour les acteurs régionaux et nationaux :

- dans l'optique d'une restauration de la qualité des eaux de la Seine et de la préservation des milieux naturels de la vallée,
- dans le souci de concilier les différents usages identifiés.

Pour structurer la démarche opérationnelle, quatre axes de recherche ont été développés :

▶ **Hydrodynamique et transport sédimentaire** : sont concernés le régime des eaux, l'érosion et la sédimentation. Ces processus ont une incidence directe sur la formation du bouchon

vaseux, phénomène majeur pour le fonctionnement du système estuarien. Cet axe permet aussi de comprendre le transport et le devenir des contaminants qu'ils soient chimiques ou biologiques ;

▶ **Microbiologie et oxygénation** : ont été étudiés les organismes microscopiques jouant un rôle essentiel dans le maintien de la qualité de l'eau, notamment le taux d'oxygène dissous qui connaît de graves déficits en période estivale. Sont concernés aussi les germes d'intérêt sanitaire ;

▶ **Dynamique des contaminants** : on cherche la détermination des niveaux de concentrations des contaminants chimiques et à mieux connaître les processus régissant le comportement de certaines espèces chimiques dans l'estuaire ainsi qu'à développer et intégrer la modélisation biogéochimique aux modèles hydro-sédimentaires ;

▶ **Édifices biologiques** : le constat de l'état biologique de l'estuaire, l'étude des relations trophiques entre les organismes vivants, la bioaccumulation le long de certaines chaînes alimentaires font partie de ce thème. Cela a impliqué de connaître l'état des populations, d'évaluer leur niveau de contamination et d'apprécier les effets de cette contamination sur les organismes (poissons, mollusques bivalves, etc.).

En outre, un important travail de modélisation mathématique a permis d'intégrer les données obtenues dans ces différents domaines. La traduction, sous une forme synthétique et simplifiée, des mécanismes étudiés permet de produire, dans la mesure du possible, des outils descriptifs et prédictifs du fonctionnement de cet écosystème continuellement en cours de réaménagements.



## Partenaires du programme Seine-Aval

Le programme scientifique Seine-Aval est inscrit au contrat de plan État-Région de Haute-Normandie et au contrat de plan interrégional du Bassin parisien.

Les travaux et recherches réalisés dans ce cadre sont financés par les partenaires suivants :

▶ la Région Haute-Normandie (maître d'ouvrage) et les autres Régions du Bassin parisien (Ile-de-France, Basse-Normandie, Pays de la Loire, Centre, Picardie, Champagne-Ardennes, Bourgogne) ;

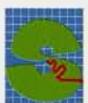
▶ le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ;

▶ les industriels de Haute-Normandie ;

▶ l'agence de l'Eau Seine-Normandie.



**ASICEN**



## Moyens nautiques

Les moyens nautiques sont fournis par les partenaires suivants :

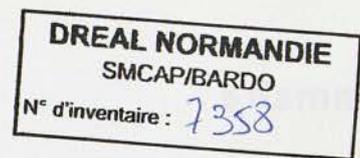
▶ l'Ifremer ;

▶ l'Insu/CNRS ;

▶ la cellule antipollution de la Seine.

**Ifremer**





# Sables, chenaux, vasières... : dynamique des sédiments et évolution morphologique

*Coordinateur* : Patrick Lesueur<sup>(1)</sup>

*Auteurs* : Patrick Lesueur<sup>(1)</sup>, Sandric Lesourd<sup>(1)</sup>

*Contributions* : Jean-Paul Auffret<sup>(1)</sup>, Jacques Avoine<sup>(2)</sup>,  
Philippe Bassoullet<sup>(4)</sup>, Jean-Claude Brun-Cottan<sup>(1)</sup>,  
Jean-Paul Dupont<sup>(3)</sup>, Loïc Guézennec<sup>(3)</sup>, Robert Lafite<sup>(3)</sup>,  
Nicole Poupinet<sup>(1)</sup>.

(1) Université de Caen, laboratoire de morphodynamique continentale et côtière,  
Upres - A 6143 CNRS

(2) Université de Caen, département de géologie

(3) Université de Rouen, laboratoire de morphodynamique continentale et côtière,  
Upres - A 6143 CNRS

(4) Ifremer Brest, Del/ec

# Sommaire

<b>Introduction</b>	3	<b>Chapitre III - La couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine et son évolution</b>	
<b>Chapitre I - Quels sont les sédiments de la Seine aval et d'où proviennent-ils ?</b>		<b>Méthodologie d'analyse</b>	20
<b>Le contexte géologique de l'estuaire de la Seine</b>	4	<b>Les sédiments de l'estuaire fluvial en amont de Rouen</b>	20
Le <i>substratum</i> anté-quaternaire	4	<b>Les sédiments du chenal de la Seine de Rouen à Quillebeuf-sur-Seine</b>	20
Les dépôts quaternaires de la basse vallée de la Seine	4	<b>Les sédiments de l'estuaire en aval de Quillebeuf-sur-Seine</b>	24
<b>Le matériel sédimentaire mobile dans l'estuaire et son origine</b>	7	Les sédiments du chenal de navigation de l'estuaire aval	24
Les sables et graviers	7	Les sédiments dans l'embouchure de la Seine	25
Les apports actuels du bassin versant amont	7	État actuel des lieux : la carte des sédiments de l'embouchure	25
Les apports actuels intra-estuariens de sables et de graviers	7	L'évolution de la sédimentation dans l'embouchure de la Seine depuis le siècle dernier	25
Les apports actuels de sables marins	7	Les fluctuations saisonnières de l'envasement dans l'embouchure de la Seine	27
Les vases	9	Les sédiments couvrant les fonds de la baie de Seine orientale	29
Les apports actuels de particules fines du bassin versant amont	9	Synthèse des études sur la sédimentation dans l'estuaire de la Seine et à ses abords marins	31
Les apports intra-estuariens de vases	9	<b>Conclusions et perspectives</b>	34
Les apports de particules fines depuis le domaine marin	9	<b>Références bibliographiques</b>	36
<b>Chapitre II - La Seine : une morphologie estuarienne sous contrôle humain</b>		<b>Glossaire</b>	37
<b>L'estuaire peu aménagé en amont de Rouen</b>	10		
<b>L'estuaire « chenalisé » de Rouen à Quillebeuf-sur-Seine</b>	10		
<b>L'estuaire salin en aval de Quillebeuf-sur-Seine</b>	10		
L'évolution de l'estuaire entre le XIX <sup>e</sup> siècle et la fin des années soixante-dix	10		
L'histoire des principaux aménagements	10		
L'évolution morphologique de l'estuaire aval jusqu'aux années soixante-dix	11		
L'évolution de l'estuaire aval au cours des vingt dernières années	12		
Les aménagements de 1980 à 2000	12		
Les réajustements morphologiques des vingt dernières années	12		

## Introduction

L'identification de la répartition des sédiments des fonds de l'ensemble de l'aire d'étude du programme Seine-Aval (de Poses à la baie de Seine) est, combinée avec la mise à jour synthétique des variations morphologiques de l'estuaire, un résultat essentiel du thème « Hydrodynamique et transport sédimentaire » de ce programme.

Les travaux antérieurs avaient été réalisés dans le domaine marin de la baie de Seine (Larsonneur & Hommèril, 1967 ; Larsonneur, 1971 ; Avoine *et al.*, 1984, par exemple) et au cours du « Saum-estuaire de la Seine » et dans le domaine estuarien, uniquement en aval de Tancarville (Avoine, 1981). Des reconnaissances plus récentes du domaine de l'embouchure et des abords marins laissaient largement suspecter une évolution des conditions de la sédimentation, mise en relation avec les modifications morphologiques de l'estuaire (Avoine, 1984 ; Avoine & Crevel, 1985). Plus en amont, si de nombreuses études portaient sur la reconnaissance du remblaiement alluvial quaternaire\* de la Seine (Lefebvre, 1977), les données sur la couverture actuelle étaient jusqu'alors ponctuelles en amont de Duclair (Germaneau, 1971 ; Porcher, 1977) et globalement, pour l'estuaire aval et moyen, les cartographies étaient souvent seulement réalisées par coupures granulométriques (Germaneau, 1968, 1969).

En raison d'une précision nécessaire différente ou pour des contraintes pratiques d'accès, tout le domaine géographique n'a pu être étudié avec la même précision. Ainsi, le chenal de navigation (de l'embouchure à Rouen) a été intégralement couvert grâce à la méthode du sonar à balayage latéral. Par contre, en amont de Rouen, les faibles profondeurs, la morphologie complexe (bras morts, îles) ont empêché son prolongement. Le maillage de l'échantillonnage est donc nécessairement plus lâche en amont de Rouen que dans le chenal de navigation, en aval de ce port. Le maillage est également plus large dans le domaine marin car la variabilité spatiale de la couverture sédimentaire y est plus faible. Au contraire, l'embouchure a fait l'objet de la plus grande densité de prélèvements car d'importantes variabilités spatiales et temporelles de la sédimentation vaseuse y sont mises en évidence.

(\*) expliqué dans le glossaire.

## Chapitre I

# Quels sont les sédiments de la Seine aval et d'où proviennent-ils ?

Afin de mieux comprendre les caractéristiques morphologiques et sédimentologiques actuelles de l'estuaire de la Seine, il convient de rappeler brièvement les données géologiques et l'origine du matériel sédimentaire qui ont contribué à son évolution.

## Le contexte géologique de l'estuaire de la Seine

### Le substratum\* anté-quaternaire

En aval de Rouen, le substratum rocheux de la Seine est constitué de formations d'âge secondaire où l'estuaire se serait établi à la fin de l'ère tertiaire. La basse Seine emprunte actuellement une vallée à méandres encaissés, largement incisée dans le plateau crayeux du Crétacé supérieur (pays de Caux au nord, Roumois, Lieuvin et pays d'Auge au sud). Elle passe, après Tancarville, dans une auge encadrée de falaises et dont le fond, à cause du pendage\* des couches, est composé de sables et de marnes (l'Aptien et l'Albien) à Tancarville et d'argiles ou de calcaires argileux (le Kimméridgien) au niveau de l'embouchure (fig. 1).

### Les dépôts quaternaires de la basse vallée de la Seine

Le cours inférieur de la Seine présente typiquement des méandres encaissés dont l'origine date de la fin du Tertiaire ou du début du Quaternaire (le Pléistocène\*). Le profil transversal typique de la vallée intègre un creusement par paliers successifs et des dépôts de terrasses étagées (Alduc *et al.*, 1979). Lors de la dernière phase de refroidissement (le Weichsélien\*), le niveau de la mer chuta jusqu'à 120 m sous le niveau marin actuel. La Manche était alors drainée par un gigantesque fleuve et le littoral était situé à l'ouest de la mer Celtique (Lautridou *et al.*, 1999). Le surcreusement du substratum par la Seine weichsélienne, beaucoup plus puissante qu'aujourd'hui, fut considérable : - 20 à - 25 m vers Tancarville, - 25 à - 30 m à Honfleur. Des dépôts fluviaux grossiers furent abandonnés au fond de ce paléo-lit\* de la Seine, définitivement immobilisés au cours du Tardiglaciaire\* et du début de l'Holocène\* (fig. 1). Ce sont des cailloutis° qui dérivent de dépôts périglaciaires\* (blocs, galets, graviers mélangés à des sables localement argileux). De taille variable, ils composent la nappe de fond, d'une épaisseur moyenne de

l'ordre de 5 à 10 m, atteignant parfois 20 m d'épaisseur (Lefebvre *et al.*, 1974; Porcher, 1977).

L'histoire quaternaire récente correspond à la dernière remontée du niveau marin (la transgression\* flandrienne\*). Elle eut pour conséquence le remblaiement de l'estuaire et de la basse vallée de la Seine par les alluvions qui sont incisées par le fond du chenal actuel de la Seine. Ces alluvions postglaciaires\* de la basse vallée de la Seine sont surtout fines ou organiques. Seuls éléments grossiers, des galets marins ont été poussés dans l'estuaire. Ils se sont mélangés aux cailloutis de fond ou se retrouvent en lentilles dans les sédiments fins (Porcher, 1977; Lefebvre, 1977).

Une coupe synthétique de l'organisation des dépôts holocènes de l'estuaire amont peut être présentée pour la boucle de Rouen (fig. 2).

Au-dessus des cailloutis de fond périglaciaires, les faciès\* holocènes sont très variés et affectés de variations latérales nombreuses et brutales (Lefebvre, 1977). Ils comprennent :

- des tufs\* calcaires d'aspect varié : ce sont des concrétions blanchâtres dues à des algues microscopiques, des grains ou des sables carbonatés (faciès de chenal);
- des sables° coquilliers issus d'organismes d'eau douce; les coquilles sont souvent encroûtées;
- des sables très fins, bien classés, disposés en lentilles sur les tufs dans la partie supérieure du prisme\* alluvial de la zone des chenaux fluviaux;
- une épaisse (jusqu'à 15 m) formation argilo-limoneuse° qui forme les îles et les bourrelets de bordure du lit fluvial;
- des argiles° de décantation ainsi que des intercalations de tourbes, qui correspondent à des accumulations dans les zones marginales (plaine alluviale, accumulations végétales lenticulaires de zones marécageuses);
- des silts° gris-verdâtre, d'origine estuarienne ou marine dans les niveaux supérieurs des alluvions.

Dans l'estuaire aval, outre les nappes de cailloutis marquant le fond de l'incision weichsélienne et le début du colmatage flandrien, sur les dépôts holocènes lenticulaires précédemment décrits (argiles continentales, silts avec des intercalations de tourbes) s'ajoutent des sables fins d'origine marine en remplissage de chenaux en perpétuelle divagation jusqu'aux travaux d'endiguement et des accumulations discontinues de galets° et de graviers° marins (Lefebvre *et al.*, 1974).

° Les particules sédimentaires détritiques sont classées d'après leur granulométrie : les galets et cailloutis excèdent 2 cm, les graviers sont conventionnellement de diamètre compris entre 2 et 20 mm, les sables entre 50 µm et 2 mm. Les pélites ou vases, de dimension inférieure à 50 µm, comprennent les silts ou limons (2-50 µm) et les argiles (< 2 µm).

## Le contexte géologique de la basse vallée de la Seine

Extrait des cartes géologiques de :

- Rouen (1/250 000)
- Caen - Wight (1/250 000)
- La Manche orientale, carte des paléovallées et des bancs sableux (1/500 000)

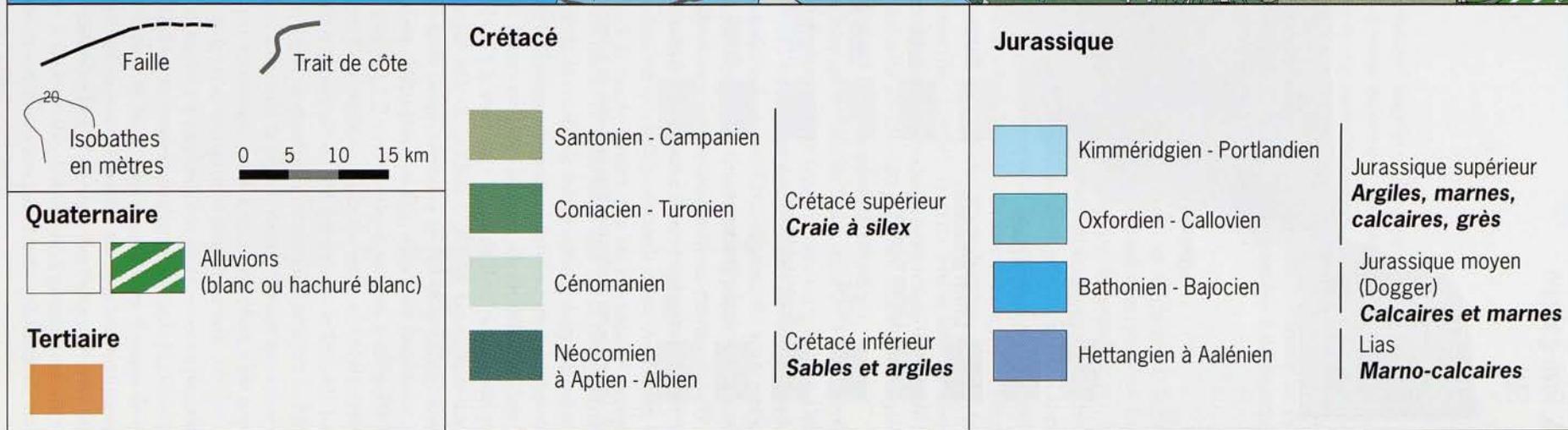
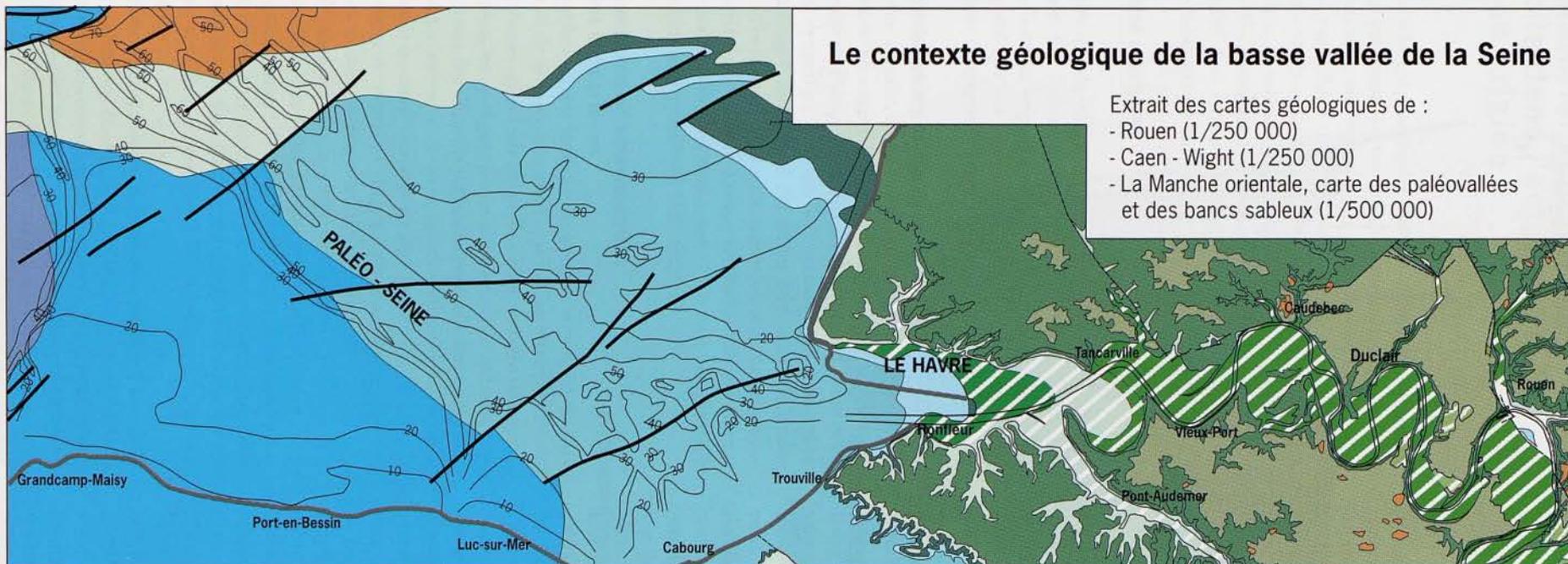


Figure 1 - Carte géologique de la zone d'étude : formations géologiques et paléo-vallée de la Seine.

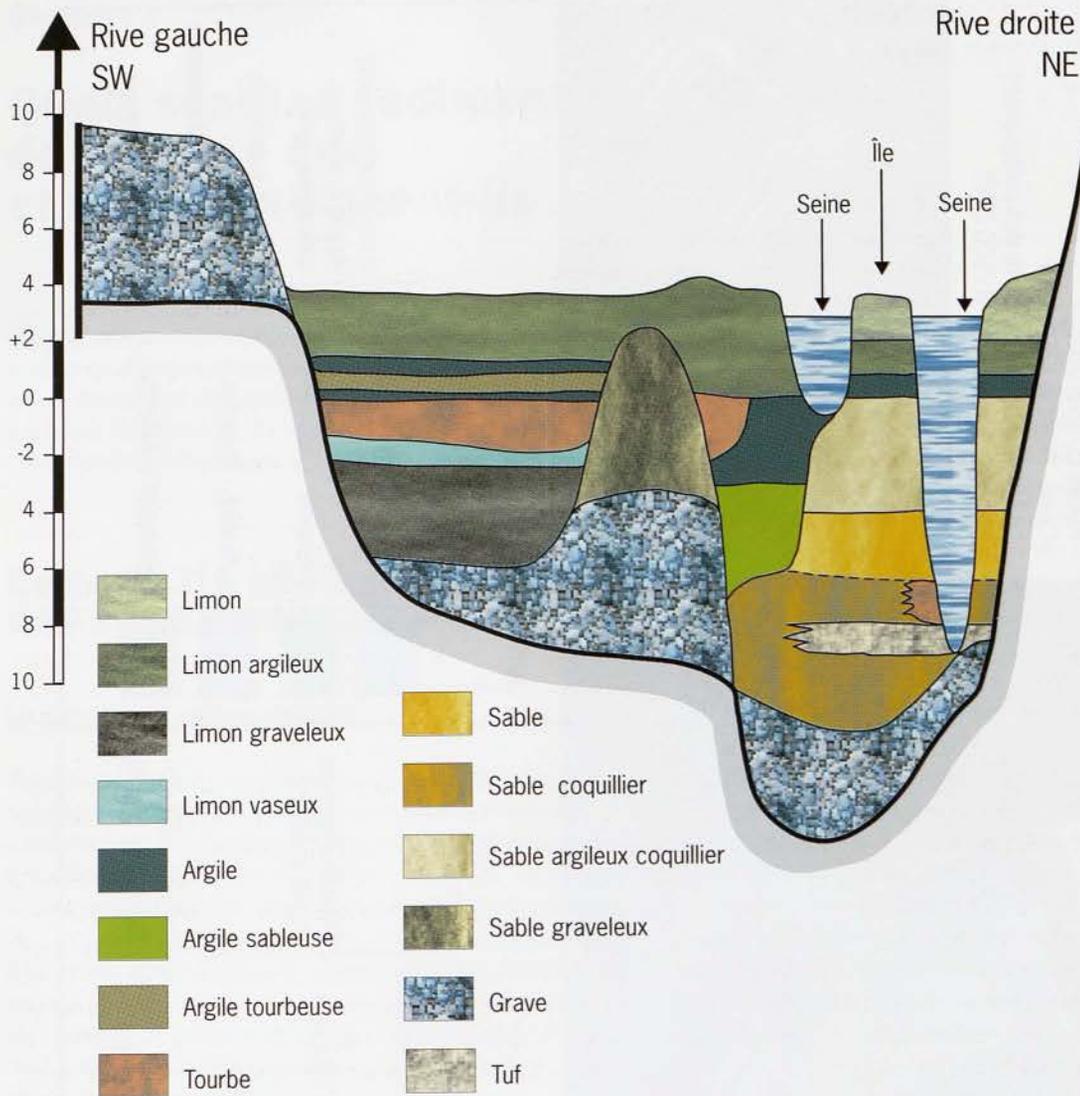


Figure 2 - Coupe type des alluvions holocènes de la vallée de la Seine (d'après Porcher, 1977).

## Le matériel sédimentaire mobile dans l'estuaire et son origine

Dans le cadre du programme Seine-Aval, les particules fines (fraction pélitique<sup>o</sup> ou vaseuse), auxquelles sont associés les contaminants, ont été étudiées. Les particules plus grossières, actuellement mobilisables dans le domaine d'étude, sont celles de la taille des sables et des graviers. La présence de ces deux classes peut être indépendante. Leur association, à laquelle s'ajoute parfois du matériel encore plus grossier, de la taille des cailloutis<sup>o</sup>, est connue sous le terme d'ensemble sablo-graveleux<sup>o</sup>.

### Les sables et graviers

Au cours des dernières années, les sables et les graviers n'ont pas fait l'objet de recherches qui auraient permis d'identifier leur origine et d'en établir le bilan. Les études n'ont porté que sur leurs seules caractéristiques physiques et sur leur description. Leur origine est variée (fig. 3).

### Les apports actuels du bassin versant\* amont

Le bassin versant de la Seine couvre une superficie de 74 000 km<sup>2</sup> en amont de Rouen. Compte tenu de l'obstacle du barrage de Poses, limite amont de la zone d'étude et de la marée dynamique (160 km de l'embouchure), le transport par charriage\* sur le fond des sables originaires du bassin versant vers le domaine fluvial soumis à la marée dynamique est considéré négligeable. Les apports solides hérités du bassin versant amont sont donc essentiellement composés de matières en suspension\* ou MES (fig. 3a).

### Les apports actuels intra-estuariens de sables et de graviers

Les observations des fonds et des berges immergées du chenal actuel de la Seine montrent que la couverture sédimentaire sableuse, quand elle est présente, est souvent peu épaisse. De plus, les quelques petits affluents de la Seine en aval de Poses ont des débits insuffisants pour alimenter l'estuaire en sables, même si un doute subsiste au niveau de la qualité et de la quantité des apports de l'Eure.

Des sources de sables et de graviers internes au système estuarien existent néanmoins. Il s'agit (fig. 3a) :

- de l'érosion des tufs, appelés localement « falaise » ; ce matériel affleure souvent au fond du chenal en amont ;
- de l'affouillement\* de certaines berges ou de terrasses alluviales (à Vieux-Port par exemple), en particulier au cours des crues ; ce sont parfois d'anciennes chambres de dépôts\* de dragages actuellement érodées (à Bardouville, pk\* 268 par exemple) ;
- d'une fraction organique ; si la faune actuelle est rare dans l'estuaire chenalisé (Costil *et al.*, 1999), on note toutefois la présence de débris coquilliers de deux types principaux : d'une part, des coquilles fossiles associées au remplissage estuarien holocène et, d'autre part, des coquilles d'organismes d'eau douce en amont : des bivalves (*Dreissena polymorpha* ainsi que

des anodontes\* nacrés) et des gastéropodes aquatiques auxquels s'ajoutent en certains sites des escargots terrestres, probablement originaires de prairies marécageuses latérales ; - d'un stock sédimentaire sableux marin, relativement homogène, hérité de l'Holocène, qui contribue au prisme estuarien aval ; ce matériel est impossible à différencier des apports marins actuels.

### Les apports actuels de sables marins

Au cours des dernières décennies, les sédiments de la baie de Seine orientale ont fait l'objet d'études particulières. Ils sont pour leur majeure partie le résultat du remaniement, intervenu sous des actions hydrodynamiques lors de la dernière remontée du niveau marin, de dépôts fluviaux apportés lors des phases antérieures de bas niveau marin sur les fonds alors émergés de la Manche. Ils forment un prisme sédimentaire construit au cours des 8 000 dernières années (Auffret & d'Ozouville, 1986a). À cette phase sablo-graveleuse ancienne s'ajoute une production organique carbonatée holocène à actuelle notable (20 à 25 %). Ces débris coquilliers sont associés à la phase minérale détritique.

Il est connu qu'en baie de Seine les sédiments superficiels sont schématiquement répartis avec un gradient d'affinement\* vers l'est au large des côtes du Calvados et vers le sud entre Antifer et La Hève. Cette répartition, selon une transversale par rapport au littoral, est typique des environnements de mers à forte marée (milieux macrotidiaux\*) : elle correspond à la décroissance d'énergie des courants de marée avec la diminution de la profondeur d'eau. Au Havre, l'amplitude de la marée atteint 7 m en vives-eaux\* moyennes. L'onde de marée se déformant lors de sa propagation par petits fonds, la courbe de marée devient dissymétrique (voir fascicule « Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau »). Dans l'estuaire, la durée du montant est donc plus courte (4 à 5 h avec un « coup de flot\* » très marqué en amont) que celle du perdant (7 à 8 h). Les vitesses des courants associés (respectivement le flot et le jusant) sont par conséquent différentes : en flot, elles sont nettement supérieures (jusqu'à 2,5 m/s en vives-eaux dans le chenal) à celles de jusant. Cela explique, pour ces milieux, le bilan résiduel au profit d'un apport de sédiments vers le littoral. Localement, le dépôt de matériel sédimentaire est alors facilité par la longue durée de la pleine mer, pouvant atteindre deux heures par vives-eaux (cette « tenue du plein » est une particularité de cette région de la baie de Seine).

Plusieurs sources d'informations antérieures au programme Seine-Aval sur la dynamique des sables dans la partie orientale de la baie de Seine sont disponibles. Il s'agit de cartographies sédimentaires basées sur une reconnaissance au sonar à balayage latéral appuyée par l'imagerie sous-marine (Auffret & d'Ozouville, 1986b) ainsi que de quantifications des transits sédimentaires par charriage à l'aide de traceurs radioactifs\* (Avoine, 1987).

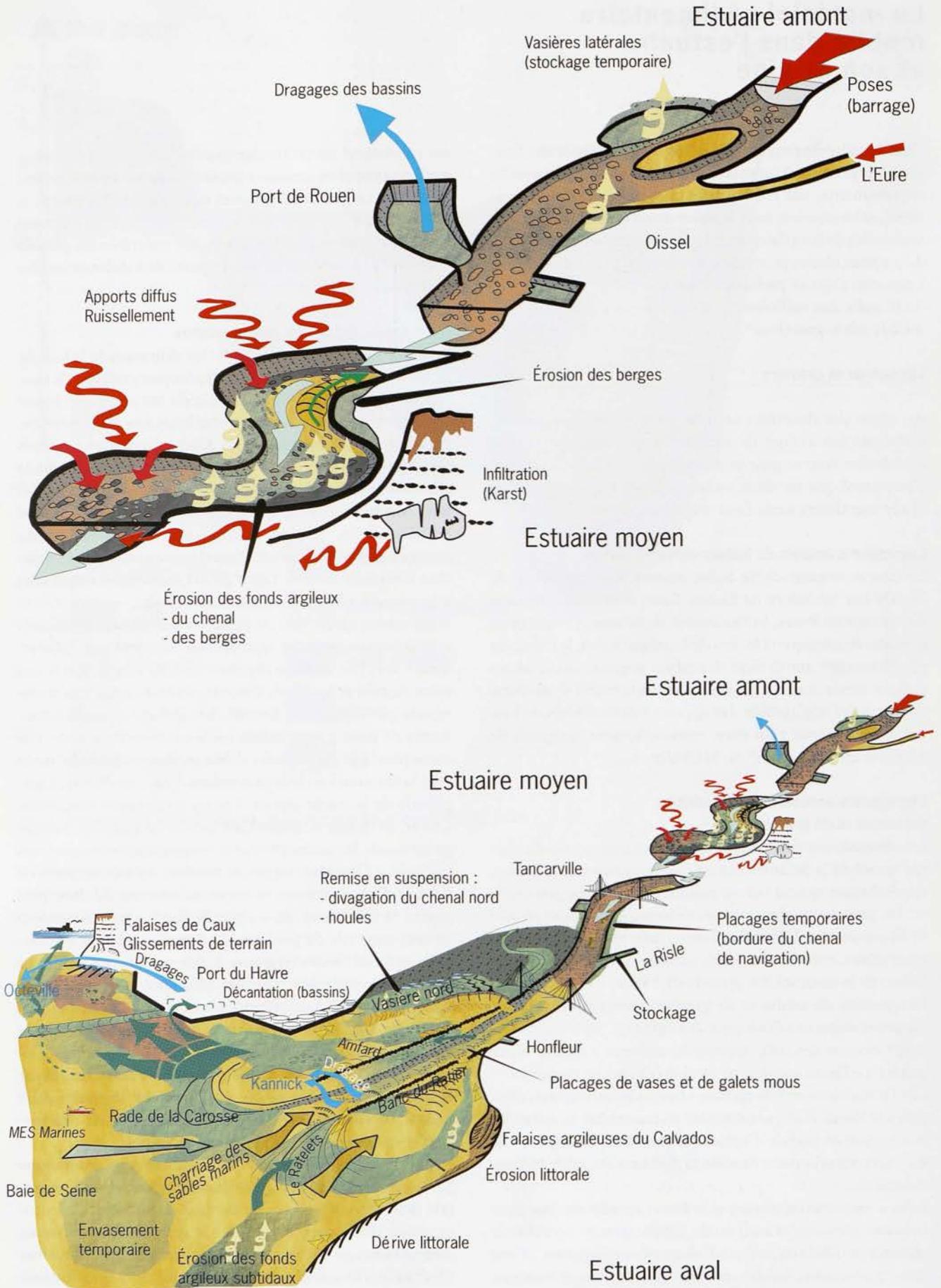


Figure 3 - Schémas des différentes sources du matériel sédimentaire détritique dans l'estuaire de la Seine.

Depuis les déductions de Vigarié (1965), toutes les données démontrent qu'il existe sur les fonds de la baie de Seine, au sud du cap de La Hève, un déplacement par charriage des sables vers l'embouchure de la Seine qui contribue largement au colmatage de l'estuaire (fig. 3b).

Les houles du large sont considérablement amorties au fond de la baie de Seine ; les houles les plus fréquentes sont de secteurs nord-ouest et nord-est, les tempêtes de secteur ouest à sud-ouest (voir fascicule « Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau »). Il est admis que, aux profondeurs inférieures à 6 m, l'action importante des courants de flot est accrue par l'action des houles dominantes qui induisent un transport des sables par dérive littorale\* sur les côtes du Calvados dirigé vers l'est de la baie.

Bien qu'ils soient en grande partie responsables de l'édification du prisme d'embouchure de la Seine et de son actuelle alimentation, la quantification du transit des sables marins demeure insuffisante.

### Les vases

Les particules fines (< 50 µm) sont essentiellement originaires du bassin versant en amont de Poses (fig. 3b). Par ailleurs, une contribution de particules marines actuelles est à prendre en compte. De plus, les fonds reliques\* argileux des faibles profondeurs littorales (ouest de l'embouchure), voire des fonds du chenal, sont susceptibles d'être érodés et de contribuer à alimenter le système estuarien en matières en suspension (fig. 3b).

Il existe des marqueurs d'origine des particules fines (marines *versus* continentales). L'homogénéisation du matériel au cours de l'histoire géologique récente et sous la dynamique intense du milieu rend toutefois impossible la quantification de la part relative des différentes contributions (voir fascicule « Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension »).

### Les apports actuels de particules fines du bassin versant amont

Le débit liquide moyen annuel de la Seine est caractérisé par d'importantes fluctuations interannuelles. Sur la période 1941-1993, il est estimé à 410 m<sup>3</sup>/s (voir fascicule « Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau »). Les débits moyens annuels extrêmes ont été enregistrés par le service de la navigation de la Seine durant la dernière décennie : valeur minimale, 235 m<sup>3</sup>/s en 1990 et valeur maximale, 678 m<sup>3</sup>/s en 1995. La crue décennale correspond à 2 000 m<sup>3</sup>/s et l'étiage quinquennal à 80 mètres cubes par seconde.

Les apports en suspension de la Seine sont, comme les débits liquides, très variables. Le débit solide peut être évalué à partir de relations établies entre débits et concentrations en MES à Poses, où les concentrations en MES varient entre 5 et 220 milligrammes par litre. Les apports journaliers sont compris entre quelques centaines de tonnes en période d'étiage et 20 000 à 30 000 t lors des crues. D'après Avoine (1994), sur la période comprise entre 1960 et 1993, les débits solides annuels varient largement, entre 130 000 t (1973) et

1 730 000 t (1966). Le flux solide moyen calculé pendant cette période s'établit autour de 650 000 t/an.

Les apports à Poses sont essentiellement enregistrés en périodes ascendantes de crues (Avoine, 1981). Hormis les différences de concentration, les spectres granulométriques\* sont comparables et centrés sur une fraction de silts moyens compris entre 10 et 20 micromètres. En crue, les concentrations sont plus élevées et présentent, en comparaison du spectre d'étiage, un enrichissement en silts plus grossiers (20-60 µm).

La prédominance des apports continentaux dans les MES prélevées dans l'estuaire aval a été reconnue grâce à l'emploi de différents marqueurs de particules. En particulier, Dupont *et al.* (1994) ont utilisé les cortèges de diatomées\* pour évaluer à 90 % les apports particuliers d'origine continentale dans le stock de MES de l'estuaire aval.

### Les apports intra-estuariens de vases

Même si les sources internes sont d'importance secondaire et encore mal connues, l'alimentation en particules fines par l'espace estuarien en aval de Poses doit être admise (particules « autochtones »). Par ailleurs, les MES transportées par les affluents, l'Eure surtout, ne sont pas prises en compte dans les bilans.

Ensuite, outre la matière organique (voir fascicule « Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension »), il est difficile de quantifier les apports détritiques discontinus et d'origine parfois locale comme ceux (fig. 3a) :

- du lessivage des pentes et du ruissellement sur le bassin versant, en aval de Poses ;
- des MES originaires de l'écoulement karstique\* et introduites *via* la nappe alluviale ;
- de l'érosion des alluvions holocènes argilo-silteuses mises à nu sur une partie des fonds et des berges de certains tronçons du chenal, sous l'action des courants et de la navigation.

### Les apports de particules fines depuis le domaine marin

Les MES qui transitent actuellement dans la Manche d'ouest en est sont essentiellement d'origine océanique ; les apports terrigènes sont en fait d'importance nettement secondaire dans les bilans de flux (Dupont, 1997).

L'influence marine comme source de matériel particulaire pour la baie de Seine a été identifiée grâce aux traceurs radioactifs. Récemment, il a été démontré que des particules fines marquées par une origine marine (Cobalt 60 caractéristique des rejets de la centrale de retraitement des déchets radioactifs de La Hague) intègrent, en quantités infimes mais mesurables, le stock de MES estuariennes (fig. 3b). La présence de ces particules est ainsi remarquée dans les sédiments jusqu'à 80 km en amont de l'embouchure. En outre, ces particules peuvent être transportées en suspension jusqu'à une centaine de kilomètres de la mer, à La Bouille, au moins en période d'étiage (Boust, 1997).

L'érosion littorale, incontestable, est par nature très discontinue dans le temps. Elle comprend l'érosion des falaises crétacées cauchoises (craie, sables, argiles d'altération) et celle des

falaises jurassiques de l'est du littoral du Calvados (argiles, marnes et calcaires). Au total, elle semble toutefois correspondre à des volumes réduits : 200 000 à 300 000 m<sup>3</sup>/an (Volmat, 1929; LCHF, 1973; LCHF & LNH, 1986).

Enfin, du matériel argilo-silteux holocène, sub-affleurant dans les profondeurs inférieures à 10 m face au littoral du Calvados entre la Touques et la Dives, est susceptible d'être érodé et de fournir des particules fines (Avoine, 1981). Ces argiles, extrêmement compactes et cohésives\*, sont toutefois probablement difficiles à affouiller, à l'exception peut-être durant les phases de tempête.

## Chapitre II

# La Seine : une morphologie estuarienne sous contrôle humain

Avant son aménagement au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la Seine était un fleuve large et peu profond. La pente de son écoulement, extrêmement faible (1 m pour 10 km), a déterminé et entretenu un régime aux typiques méandres libres. De nombreuses îles divisaient alors son cours en plusieurs bras. Les difficultés de navigation sur un tel fleuve, alors comparable à l'actuelle Loire en amont de Nantes, ont conduit, à partir de 1846, à des aménagements de grande ampleur (Joubert *et al.*, 1994).

## L'estuaire peu aménagé en amont de Rouen

La partie amont de la zone d'étude est le domaine géographique le moins modifié par l'homme. Cette partie de l'estuaire n'est actuellement empruntée que par des péniches. Les îles situées en amont de Rouen sont surtout constituées d'un épais ensemble argilo-limoneux ancré sur des tufs ou des sables. Cet ensemble présente une remarquable continuité dans le temps, marquant une évolution purement verticale (Porcher, 1977). Les îles sont donc pérennes et issues d'une accréation\* verticale du lit mineur de la Seine. Les tracés ont été toutefois modifiés par certains aménagements : rectifications de chenaux, raccordements d'îles, endiguements ponctuels. Du point de vue environnemental, cette zone amont préserve encore des espaces privilégiés pour la vie végétale et animale. Il y existe encore de nombreux abris, avec une ripisylve\* là où les rives ne sont pas protégées.

## L'estuaire « chenalisé » de Rouen à Quillebeuf-sur-Seine

À partir de Rouen, la Seine est un chenal unique et profond, endigué sur l'essentiel de sa longueur. Le tirant d'eau garanti est actuellement de 10 m ; le programme d'amélioration à 10,30 m est engagé. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, il existait encore des îles entre Duclair et Val-des-Leux (Ronceray, Ambourville) et entre Grand-Couronne et Rouen. Les dernières digues insubmersibles protégeant les berges en amont de Tancarville ont été aménagées au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

Dans l'ensemble de cette zone, la largeur du chenal est variable. D'une largeur nominale de 120 m, certains méandres atteignent une largeur de 150 mètres. De berge à berge, la largeur de l'écoulement est en moyenne de 300 m,

avec un minimum de 200 m pour certains rétrécissements comme à Heurteauville (pk 297) et un maximum de 500 m en aval. Le plafond\* du chenal n'est pas lisse mais au contraire généralement chaotique. Il est marqué de dépressions naturelles (fosses) et de hauts-fonds indurés qui, au cours de l'aménagement du chenal, ont fait l'objet de dragages mécaniques qui se poursuivent encore ponctuellement pour l'amélioration des accès. Les parties les moins profondes du chenal sont globalement aux extrémités, en amont (seuil naturel de Rouen) et en aval de Quillebeuf-sur-Seine ; la profondeur d'eau du chenal varie entre 5 m et 9 m sous le zéro hydrographique\* des cartes marines du Havre (0 CMH).

## L'estuaire salin en aval de Quillebeuf-sur-Seine

L'évolution morphologique de cette partie de l'estuaire, la plus sensible à la dynamique marine, fut de tout temps la plus active. Les graves problèmes concernant la navigation ont conduit, depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, à y implanter les aménagements les plus élaborés du cours de la Seine. Au XX<sup>e</sup> siècle, il s'est ajouté à cette problématique propre au port de Rouen un besoin d'accroissement de l'espace du port du Havre (gain des terres sur l'espace estuarien aval).

### L'évolution de l'estuaire entre le XIX<sup>e</sup> siècle et la fin des années soixante-dix

#### L'histoire des principaux aménagements

La géométrie actuelle de l'estuaire résulte essentiellement des travaux successifs qui ont régularisé le cours du fleuve en lui imposant un axe d'écoulement calibré et du comblement progressif de l'estuaire par les sédiments. Si l'on excepte l'en-

diguement construit à partir du début du XVII<sup>e</sup> siècle au marais Vernier (gain de terres cultivables), l'amélioration des 120 km qui séparent Rouen de l'embouchure a été entreprise au milieu du siècle dernier. Des endiguements et des dragages des fonds inaffouillables\* ou non ont été nécessaires. L'estuaire « sauvage » du début du XIX<sup>e</sup> siècle correspondait, en aval de Quillebeuf, à un chenal principal divaguant dans une vaste plaine alluviale encombrée de bancs de sables (les bancs changeants). Le chenal d'accès à Rouen n'offrait que des profondeurs maximales de 4,30 m en pleines mers de vives-eaux et seulement de 1,80 m en morte-eau\* (Migniot, 1991). Entre 1853 et 1867, l'endiguement a débuté pour le tronçon compris entre La Mailleraye (pk 302) et le confluent de la Risle sur les deux rives (fig. 4). Le dragage de seuils intervint à Aizier et Vatteville. Pour ce secteur, l'approfondissement du chenal fut satisfaisant. Toutefois, l'aménagement provoqua d'une part un piégeage de sédiment à l'abri des digues (extension de larges bancs herbeux) et, d'autre part, une accentuation de la divagation du chenal dans l'estuaire aval et moyen, avec une profondeur insuffisante limitant fortement l'accueil des navires à Rouen.

Jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'époque fut celle des hésitations sur le choix des solutions pour l'amélioration de la navigation dans l'estuaire aval : projets variés, opposition entre les ports de Rouen et du Havre. Seuls des travaux de consolidation et de fermeture d'anses par endiguement furent entrepris en amont (« trous » à Grand-Couronne, à Moulineaux, au Trait). Pendant ce temps, entre 1876 et 1886, le port du Havre entreprit le creusement du canal de Tancarville et d'une nouvelle passe d'accès portuaire au nord-ouest pour pallier l'envahissement par les sables de l'ancienne passe du sud-ouest.

À partir de 1895 et jusqu'en 1920 environ, les digues insubmersibles nord et sud furent prolongées jusqu'aux environs de Honfleur afin de stabiliser le chenal navigable de la Seine.

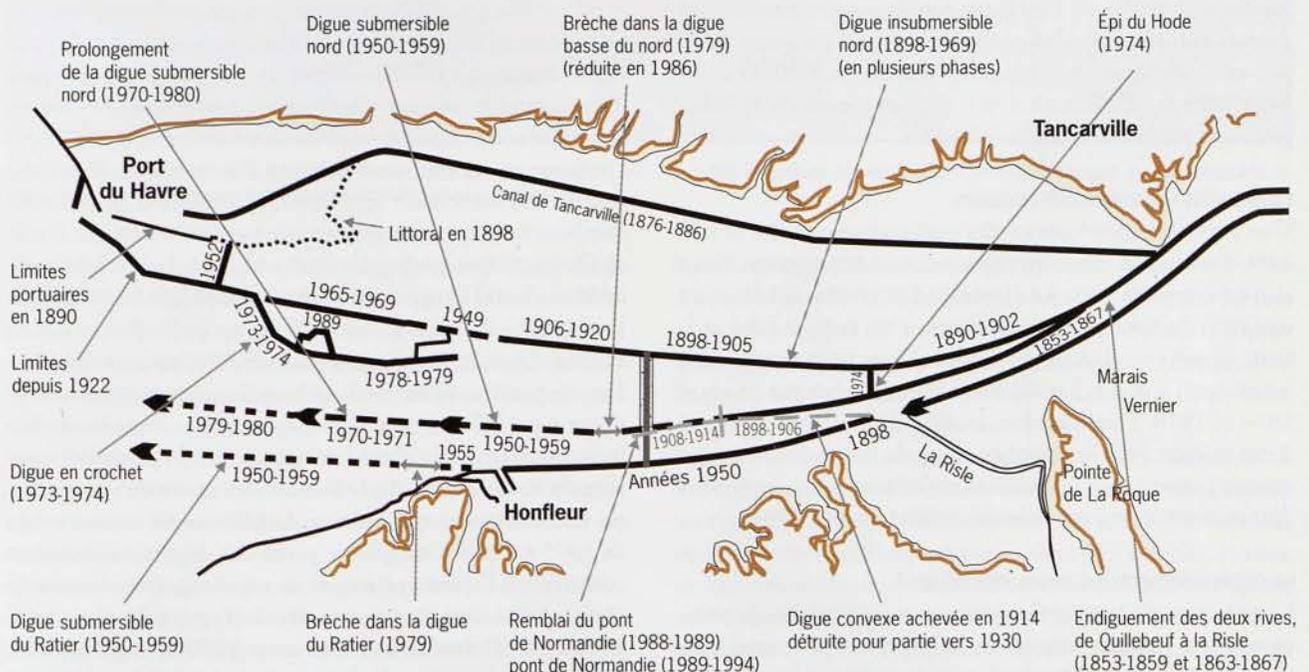


Figure 4 - Chronologie des principaux aménagements dans l'estuaire de la Seine depuis le XIX<sup>e</sup> siècle.

La digue sud, convexe en amont d'Honfleur, qui donnait des résultats médiocres, fut démantelée et d'importants dragages (30 millions de mètres cubes) furent entrepris. Cette portion de digue fut remplacée par une partie concave à la fin des années cinquante, afin d'assurer un chenal unique, calibré, qui devait s'autodraguer (fig. 4).

Après la seconde guerre mondiale, les travaux d'endiguement furent poursuivis vers l'aval. La construction des digues submersibles fut entreprise : digue du Ratier dans sa situation actuelle en rive gauche et digue basse nord jusqu'à Honfleur en rive droite (1950-1959). On peut donc admettre que le tracé de l'actuel chenal de navigation fut figé dès 1960. La digue insubmersible nord fut ensuite prolongée vers l'aval en 1969, fermant ainsi une importante zone de vasières nues afin d'étendre les installations industrielles et portuaires du Havre (fig. 4). La digue basse nord fut prolongée jusqu'au musoir\* de la digue du Ratier, en deux phases : en 1970-1971 (méridiens\* + 11 à + 7) puis en 1979-1980, pour la prolonger jusqu'à sa situation actuelle (méridien + 3). Par ailleurs, afin de gagner des surfaces au sol, en 1973-1974, le port du Havre construisit un épi\* à convexité aval au sud de son emprise, dit « digue en crochet ».

Le facteur déterminant du comblement du chenal nord (ou fosse nord) entre les deux digues (submersible et insubmersible) fut sans aucun doute la construction d'épis, avec principalement l'épi du Hode (fig. 4). Construit en 1974, il s'opposa à la circulation alternative des eaux sous l'effet des courants de marée et délimita un bassin de décantation qui se combla ensuite progressivement vers l'aval.

### L'évolution morphologique de l'estuaire aval jusqu'aux années soixante-dix

Au prix d'importants dragages d'entretien, en particulier en aval du chenal de navigation, la profondeur disponible pour l'accueil des navires à Rouen est passée de 3 m en 1850 à 10 m environ en 1980 (Migniot, 1991). Toutefois, la morphologie actuelle de l'estuaire est largement héritée des grands travaux d'aménagement entrepris au cours de la période 1950 à 1970 (surtout en aval du pk 350). Ces travaux récents ont entraîné des réajustements morphologiques et sédimentaires considérables.

#### La réduction du volume de l'estuaire

Une première conséquence des endiguements a été la très forte diminution des différentes sections de l'estuaire. Dans la zone comprise entre Le Havre et Tancarville, la réduction moyenne du volume de l'estuaire avait été évaluée à 2,6 millions de mètres cubes par an entre 1677 et 1834 (estuaire dit « sauvage »), et à 5,3 millions de mètres cubes par an entre 1834 et 1978. Parallèlement, le volume oscillant\* (quantité d'eau entrant dans l'estuaire au cours du flot) a été divisé par quatre, passant de 870 millions de mètres cubes en 1834 à 220 millions de mètres cubes en 1980 (Avoine, 1981).

#### Le rétrécissement des zones intertidales\*

La réduction de la superficie des zones intertidales est principalement liée aux travaux d'endiguement pour améliorer la navigation, ayant favorisé la sédimentation à leur abri, et

au remblaiement de vasières nues pour étendre la zone industrielle et portuaire du Havre (années 1950-1960).

La sédimentation naturelle n'avait réduit que très lentement l'aire de ces zones qui est passée de 140 km<sup>2</sup> en 1677 à 130 km<sup>2</sup> en 1834. Par contre, depuis le début des travaux d'aménagement et surtout depuis 1880, la réduction s'est considérablement accélérée. Ainsi, en 1978, il ne restait plus que 31 km<sup>2</sup> de zones intertidales (Avoine, 1981).

### L'évolution de l'estuaire aval au cours des vingt dernières années

#### Les aménagements de 1980 à 2000

Après la fin des années soixante-dix, les aménagements comprennent la création de brèches dans les digues submersibles, l'endiguement vers l'amont pour clore la « digue en crochet » du port du Havre (1978-1979) et la construction du remblai du pont de Normandie sur la rive nord (1988-1989). La brèche dans la digue nord fut aménagée sur 1 km en 1978-1980. Elle fut ensuite réduite à 600 m en 1986 car la sédimentation était trop importante à cet endroit dans le chenal de navigation. Au sud de ce chenal, une autre brèche fut ouverte près de l'enracinement de la digue du Ratier. Large de 100 m seulement, elle a moins influencé l'évolution morphosédimentaire\* de la zone sud (fig. 4).

Au total, les remblais ont évidemment réduit l'espace disponible, induisant de surcroît une élévation locale des fonds, particulièrement en amont des travaux. À l'inverse, les brèches ont eu une influence positive dans la lutte contre le comblement des chenaux nord et sud, en produisant une relative préservation ou une érosion des fonds.

#### Les réajustements morphologiques des vingt dernières années

Le comblement estuarien en amont de la Risle et l'endiguement ont déplacé vers l'aval la zone active de sédimentation et de colmatage. La dynamique actuelle comprend aussi le réajustement interne des masses de sédiments déposés et le déplacement de certains ensembles sédimentaires typiques des estuaires en régime macrotidal, comme les bancs longitudinaux et les chenaux qui leur sont associés (fig. 5).

Certaines zones sont en érosion et d'autres, plus étendues, sont en sédimentation importante. L'évolution générale de l'embouchure est surtout marquée par l'élévation des fonds et l'avancée par progradation\* vers l'ouest des bancs de l'embouchure. Durant cette courte période, la migration de l'isobathe\* - 2 m vers la baie de Seine est de l'ordre de 500 m et peut atteindre localement plus de 2000 mètres (fig. 5).

Dans la partie nord de l'embouchure, le colmatage naturel est masqué par l'élévation artificielle des fonds : c'est le site des rejets de dragage du chenal de navigation du port de Rouen (site du Kannick, fig. 5). L'essentiel des matériaux dragués y est rejeté, soit une quarantaine de millions de mètres cubes de 1975 à 1988. Une grande partie des dépôts y subsiste et contribue à l'alimentation de la proche barre\* d'embouchure. La sédimentation y a été de l'ordre de 2 m entre 1990 et 1995 et a atteint 9 m entre 1970 et 1990 (fig. 5). Durant ces vingt ans, le chenal nord s'est très rapidement

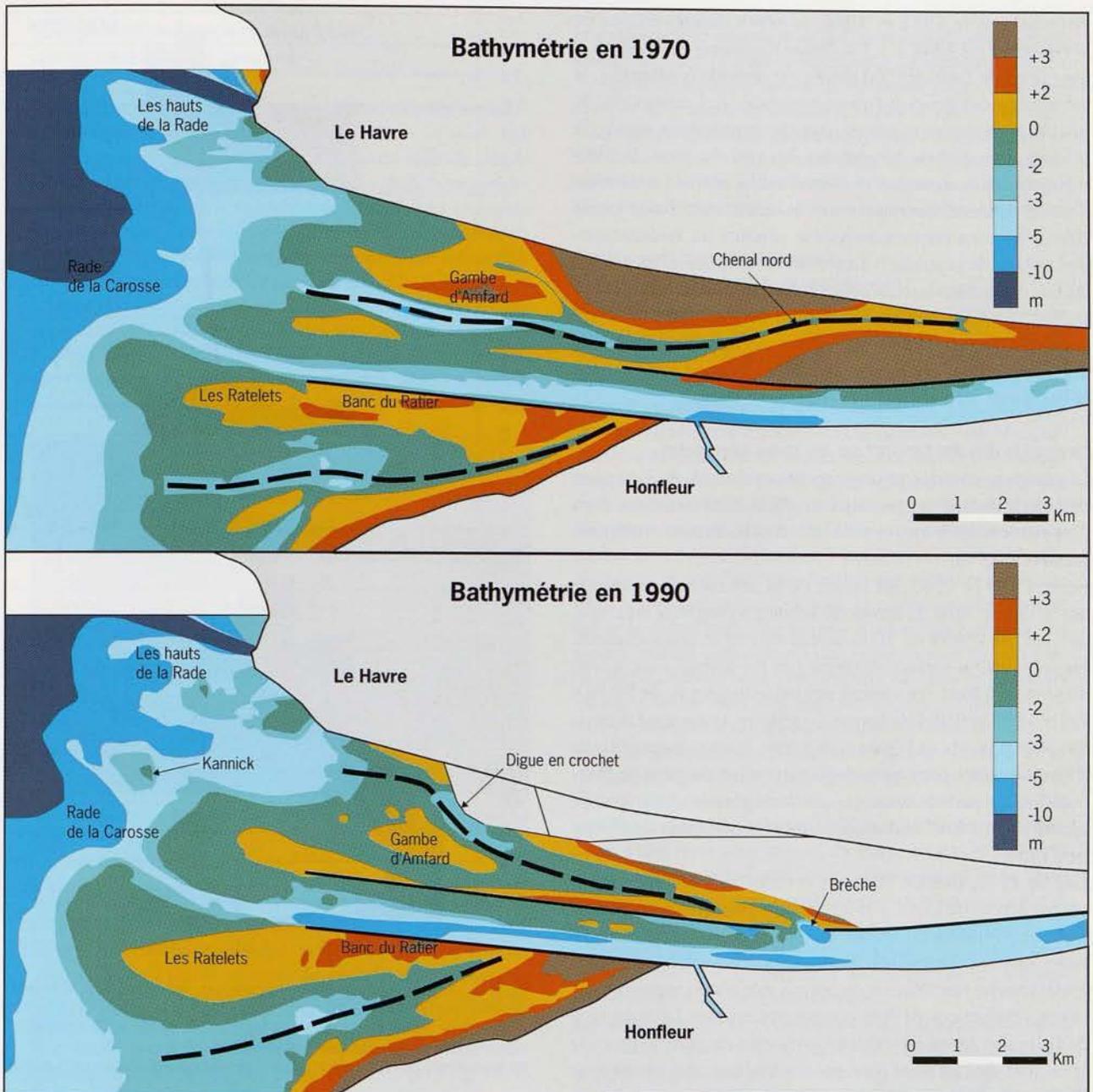


Figure 5 - Cartes récentes de la bathymétrie\* dans l'estuaire aval : situations 1970 et 1990. Simplifiées et redessinées d'après les sondages du port autonome de Rouen. Les axes des chenaux nord et sud sont matérialisés par des tirets.

comblé. En aval, le banc sableux appuyé sur la digue basse nord a migré vers le nord-ouest, alors que la Gambe d'Amfard a démaigri et s'est déplacée vers le sud. Ce mouvement convergent entraîne l'effacement de l'ancien chenal nord au profit d'un nouvel axe de circulation, situé au nord du précédent, au contact de la digue en crochet.

Dans la partie sud de l'estuaire, on observe une progradation importante vers l'ouest du banc des Ratelets et le comblement du chenal sud, un nouveau chenal se creusant au nord du précédent.

Quelques autres secteurs de l'estuaire sont au contraire en forte érosion : d'une part le chenal de navigation de la Seine, entretenu par des dragages intensifs annuels de l'ordre de 4 millions de mètres cubes, d'autre part le chenal nord à proximité de la brèche où l'érosion a atteint 4 m entre 1970 et 1990.

Le volume de l'estuaire poursuit sa réduction

Entre 1978 et 1992, la sédimentation annuelle a atteint une moyenne de plus de 5 millions de mètres cubes. L'importance des apports est due principalement au comblement de la partie nord de l'estuaire et à la construction de la barre d'embouchure qui progresse vers le large.

Sur la vase nord, entre les pk 346 et 353, 1,6 million de mètres cubes de sédiments, en moyenne, se sont déposés au cours des trente dernières années (avec des fluctuations interannuelles très importantes). De 1963 à 1986, le taux de sédimentation moyen y a atteint 0,6 m/an et la majeure partie des fonds dépasse maintenant la cote + 8 m CMH, ce qui entraîne le développement rapide du schorre\*. Dans la partie aval, entre les pk 353 et 364, la sédimentation a été en moyenne de 1,5 million de mètres cubes par an de 1963 à 1986.

Au total, entre 1962 et 1988, le dépôt annuel moyen de sédiments s'est élevé à 3,3 millions de mètres cubes dans la zone nord de l'estuaire. En amont du pont de Normandie, le colmatage est pratiquement terminé. À l'exception de quelques chenaux envasés en voie de comblement rapide, le schorre domine très largement. En aval du pont, la sédimentation a également été considérable, mais la vase est limitée dans son extension vers le sud et vers l'aval par le chenal nord au contact duquel se produit un raidissement de la pente de la slikke\*. La surface de celle-ci va diminuer, du fait de la colonisation progressive par la végétation halophile\*. Plus en amont, le volume de l'estuaire est resté stable (le comblement y est devenu négligeable), malgré le déplacement des chenaux marginaux (chenaux nord et sud) et des bancs sableux associés (fig. 6).

La progression des herbus\* sur les zones intertidales

La comparaison des photographies aériennes de l'estuaire illustre le caractère spectaculaire de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine, voué à une continentalisation\* progressive (fig. 7).

Entre 1978 et 1985, en raison de la sédimentation rapide sur la vase nord, la limite du schorre a progressé très rapidement, de l'ordre de 50 m à plus de 150 m annuellement. En sept ans, la surface couverte par les herbus s'est accrue d'environ 4 km<sup>2</sup> (extension annuelle moyenne de 58 ha). Entre 1985 et 1994, la limite du schorre a progressé d'environ 500 m vers le sud (vitesse moyenne d'avancée annuelle de 55 m). Pendant cette période (construction du pont de Normandie), la surface couverte par la végétation s'est encore accrue de 1,9 km<sup>2</sup> (extension annuelle moyenne de l'ordre de 21 ha).

Depuis 1978, près de 90 ha de vasières nues ont été colonisés par le schorre (fig. 7). Il ne subsiste pratiquement plus de zones intertidales en amont du pont de Normandie, et les hauts niveaux occupés par la végétation halophyte sont progressivement transformés en marais maritimes puis en roselières, révélatrices de leur continentalisation. La réduction de l'aire des zones intertidales nues met en péril le pouvoir épurateur de l'estuaire joué par ces vasières, qui nécessitent d'être préservées d'urgence (voir p. 15 à 19).

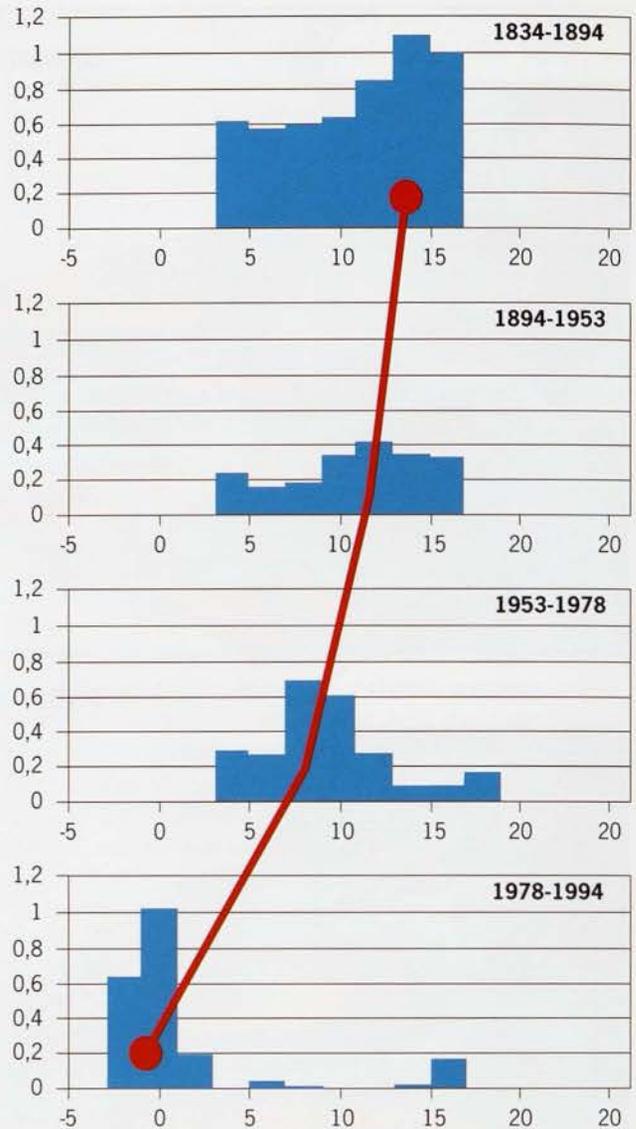


Figure 6 - Distribution longitudinale des volumes sédimentés pour différentes périodes (d'après Avoine et al., 1981, complétée pour la période 1978-1994). - En abscisse, distance à l'embouchure (en km); 0 = Le Havre, 12 = Honfleur. - En ordonnée, volume sédimenté en 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an. Le déplacement du dépôt-centre\* de la sédimentation est visualisé en trait gras.

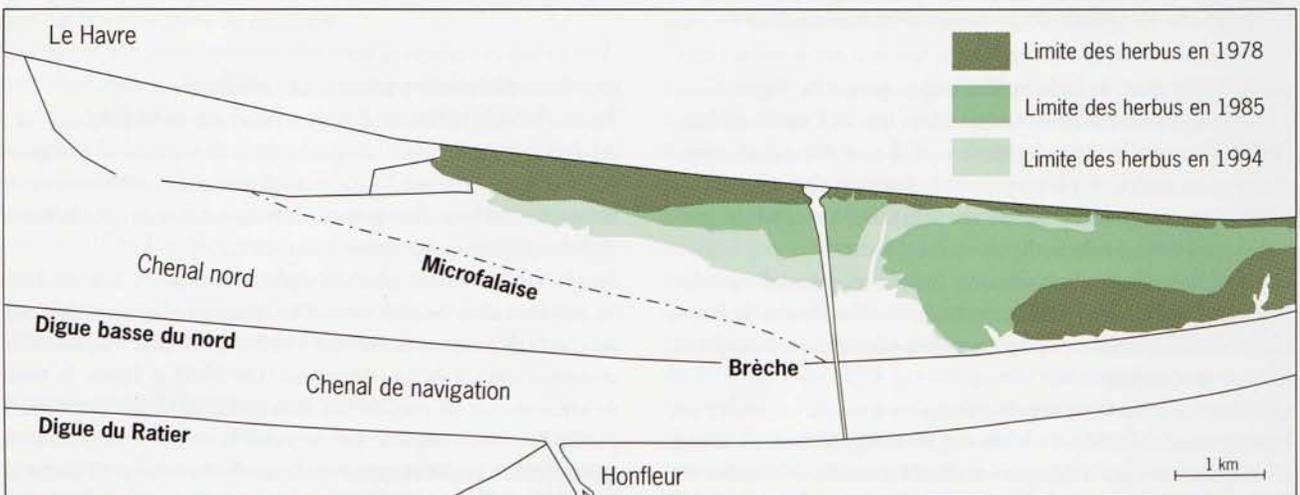


Figure 7 - Extension des herbus sur la vase nord durant la période de 1978 à 1994.

## Les vasières de l'estuaire de la Seine : des ateliers en vraie grandeur

### Une vasière de stockage temporaire dans l'estuaire amont : la vasière de Oissel

La vasière de Oissel a été étudiée comme exemple de site de stockage temporaire des particules fines dans l'estuaire en amont de Rouen. Elle se situe (pk 229,5) dans une zone d'élargissement du chenal principal de la Seine où l'influence de la marée dynamique est encore très présente (photo A). Ses dimensions sont restreintes (largeur : 75 m, longueur : 250 m, superficie d'environ 9 500 m<sup>2</sup>). Sa formation est récente (1981). Elle est due à des aménagements, en vue d'élargir le chenal de navigation, qui ont créé une zone d'abri dans laquelle les particules fines se sont ultérieurement accumulées, en recouvrement de tufs.

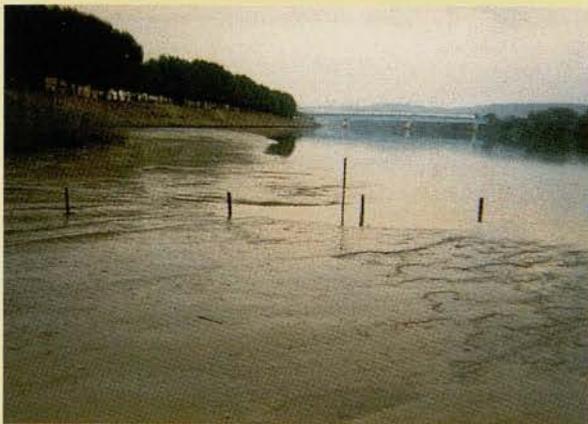


Photo A - Vue de la vasière de Oissel. Des formes d'érosion sont visibles sur la partie droite de la photo.

Le suivi topographique de cette vasière révèle une sédimentation importante en période de crue et une érosion ultérieure décroissant transversalement vers la berge (Guézennec, 1999). D'abord rapide au cours du premier mois de décrue, cette érosion se poursuit plus lentement pendant l'étiage de la Seine.

La granulométrie des sédiments composant cette vasière est variable. Elle révèle un peu de sables et de petits graviers (débris carbonatés de tufs), des sables fins et une fraction fine qui correspond à une décantation des MES de la Seine (mode principal autour de 10 µm). Les taux de carbonates sont toujours proches de 30 %. Les teneurs en matières organiques sont de l'ordre de 5 % en surface et proches de 10 % dès les premiers centimètres de profondeur dans le sédiment. Le dépôt de crue est une vase de type « crème\* », contenant près de 80 % d'eau. Cette vasière est caractérisée par un gradient transversal de diminution de la granulométrie depuis le chenal vers le haut du profil.

L'érosion suivant la crue entraîne préférentiellement les particules fines. En outre, la navigation des péniches, par l'action des vagues d'étrave, occasionne au niveau des berges une nette turbulence dont l'effet est important dans l'érosion des vasières latérales.

### La vasière nord de l'estuaire aval de la Seine

La vasière nord de l'estuaire de la Seine, anciennement nommée « Grande Vasière », est le reliquat intertidal de l'estuaire « sauvage » (voir p. 10). Elle demeure cependant un

ensemble actif et nécessaire de la dynamique sédimentaire de l'estuaire. C'est un espace écologique fondamental, espace de repos, de reproduction et de nutrition pour 28 espèces marines et 74 espèces d'oiseaux (CSLHN, 1999) et une véritable zone d'épuration naturelle en relation directe avec le bouchon vaseux\* : les contaminants adsorbés sur les particules fines peuvent y être stockés et ainsi soustraits du système hydrologique dont l'issue est le domaine marin ouvert.

### Quelles sont les caractéristiques morphosédimentaires de la vasière nord ?

La vasière nord compose le plus vaste espace intertidal actuel de l'estuaire de la Seine (environ 320 ha en 1999). Elle est limitée à l'ouest par la digue en crochet du port du Havre et en amont près du pont de Normandie (fig. A). Au nord et en aval, cette surface nue a des caractères communs d'une vasière et d'un estran\* sablo-vaseux s'appuyant sur la digue. Au nord et en amont, la vasière nue (la slikke) devient une large zone végétalisée (les herbues et roselières). La partie sud de la vasière (la basse slikke) est limitée par le chenal nord. La morphologie de cette basse slikke évolue d'aval en amont en fonction de son exposition à l'agitation et à la propagation de la masse d'eau sous l'action des courants de marée. Dans le profil transversal, en aval, la vasière est en pente très faible et monotone ; c'est la zone d'estran vaso-sableux. En amont, elle est marquée par une nette rupture de pente au contact du chenal nord avec une microfalaïse de plusieurs mètres. Comme dans la plupart des espaces estuariens, cette partie amont de la vasière est entaillée de chenaux transversaux qui peuvent atteindre 20 à 30 m de large et jusqu'à 5 m de profondeur à leur raccordement avec le chenal nord (fig. A). Ils forment généralement des méandres et sont très ramifiés à leur tête (la haute slikke) ; c'est la zone des chenaux. Dans cette zone amont, en partie haute du profil, la slikke est sans relief particulier. La moyenne et la basse slikkes sont par contre entaillées par un réseau superficiel de drainage des eaux qui s'écoulent à marée descendante, en délimitant des petites banquettes linéaires vaseuses de hauteur décimétrique. Le clapot\* et les courants de flot érodent ces reliefs de manière dissymétrique.

Les sédiments de la vasière nord sont de nature variable tant dans l'espace qu'en l'épaisseur (donc au cours du temps). Il existe une nette distinction entre les vases superficielles de la vasière (> 90 % de pélites) et les sédiments du chenal nord composés de sables fins (< 5 % de pélites). Cette répartition est liée à l'altitude différente mais aussi à la dynamique distincte. La brèche dans la digue submersible, qui maintient la circulation alternative des eaux dans le chenal nord, empêche tout dépôt durable de vases du fait de l'importance des vitesses des courants de marée. De manière générale, les sédiments de la vasière présentent plus de 70 à 90 % de sédiments fins (< 50 µm). Ceux-ci ont des modes compris entre 10 et 20 µm et des fractions carbonatées remarquablement constantes (30 % environ). La fraction sableuse augmente de façon significative dans les dépôts superficiels vers l'aval de la vasière. En aval du chenal nord, la basse slikke est nettement sableuse. Elle est marquée par des mégarides\* de flot qui démontrent le déplacement des sables directement sur les faciès vaseux intertidaux, vers l'intérieur de l'estuaire. La partie haute de la vasière est aussi soumise temporairement à des apports de sables depuis l'aval, sous l'action des houles et des vents de mer dominants lors de l'émersion.

Comme dans tous les environnements dominés par la marée, le sédiment est typiquement lité du fait des changements à haute fréquence des conditions de sédimentation, conséquences des cycles de marée et des vagues. La faune fouisseuse de vers et de lamellibranches, par bioturbation, occasionne localement la déformation de ce litage\*.

**Comment évolue actuellement la vasière nord dans la zone des chenaux ?**

L'évolution à court et moyen termes de cette vasière a été suivie en un certain nombre de stations matérialisées par des repères sur des radiales (profils transverses) orientées nord-sud (fig. A). Dans la zone des chenaux, le comportement de cette vasière est complexe :

- à long terme (échelle de temps de plusieurs années), il apparaît une tendance à la sédimentation par accrétion ;

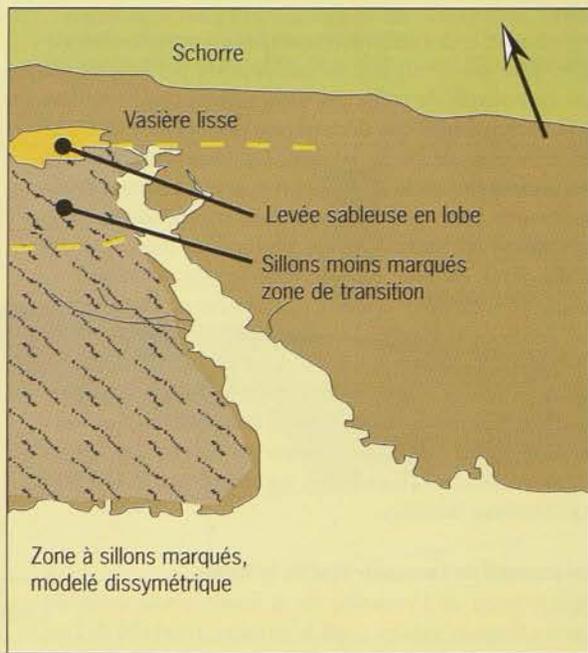
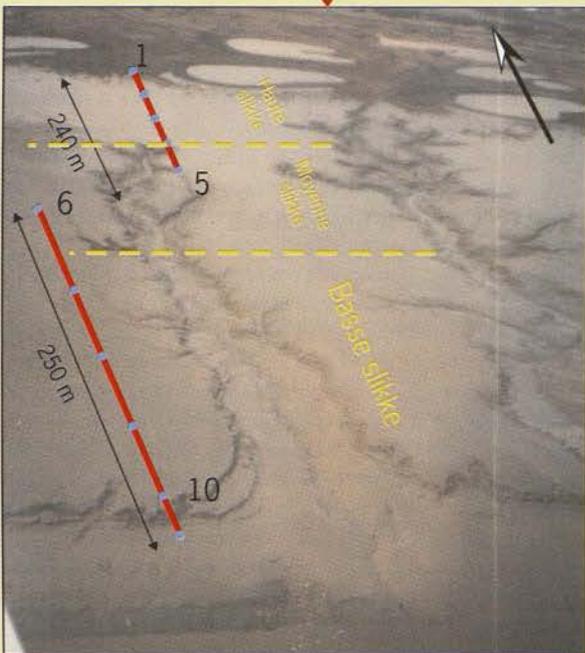
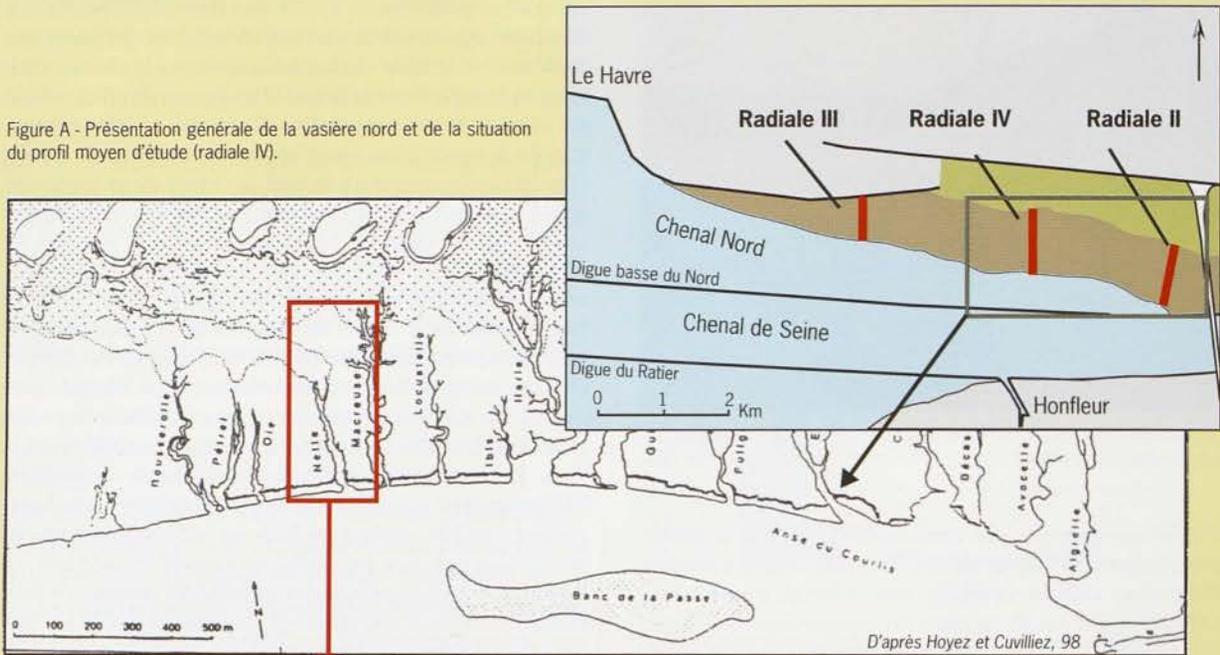
- à court terme (échelle de temps de la saison ou du jour), il ressort une tendance aux phénomènes paroxystiques, parfois de sédimentation, plus souvent d'érosion.

**Il y a une sédimentation sur la vasière**

À long terme, l'accrétion conduit à la colonisation progressive de la haute slikke par les plantes halophiles. Cette évolution se fait tantôt sous la forme d'un dépôt plurimillimétrique de vase (hautes mers de vives-eaux), tantôt sous la forme d'un épandage sableux d'origine éolienne\* (partie aval de la vasière). Les chenaux transverses raccordés au chenal nord sont le lieu préférentiel de l'invasion par la masse d'eau lors du montant.

En période hivernale (agitation élevée, bouchon vaseux situé plus en aval), les chenaux sont très creusés (photo B, gauche p. 17). Sous l'action des courants de flot, les chenaux peuvent

Figure A - Présentation générale de la vasière nord et de la situation du profil moyen d'étude (radiale IV).



véhiculer du matériel sableux originaire du chenal nord. Il en résulte localement un ensablement de la haute slikke, au débouché de la tête de ces chenaux (levées\* de débordement de flot). En période estivale (agitation réduite, bouchon vaseux reconstitué dans la zone de la vasière), les chenaux sont le siège de la décantation et le lieu de stockage de vase molle (photo B, droite). En extrapolant les volumes piégés sur le profil d'étude à l'ensemble de la zone des chenaux, la masse de matériel fin stocké en quelques mois est de l'ordre d'une centaine de milliers de tonnes.

#### Il y a aussi des phénomènes d'érosion de la vasière

L'accrétion générale de la vasière est contrariée lors des périodes d'agitation (houles, clapots) et surtout de tempêtes, responsables d'épisodes érosifs de grande ampleur. Les mesures hydrosédimentaires réalisées en zone d'estran sablo-vaseux lors d'une tempête importante ont mis en évidence des concentrations en particules dépassant 60 g/l au-dessus du sédiment, originaires de sa remise en suspension. En deux jours, l'érosion du sédiment a été de 10 à 12 cm sur le profil d'étude. L'impact de cette tempête, ressentie sur l'ensemble de la vasière, suggère une remise en suspension de 300 000 à 400 000 t de sédiments. Cette valeur est de l'ordre de grandeur de celui du bouchon vaseux par vives-eaux. Ceci démontre l'importance de la météorologie dans le bilan actuel des matières en suspension dans l'estuaire aval. Après une telle phase d'agitation, le retour progressif au niveau topographique initial est généralement obtenu au bout de quelques semaines.

Au remaniement du sédiment superficiel à court pas de temps s'ajoute l'érosion des dépôts consolidés due au dépla-

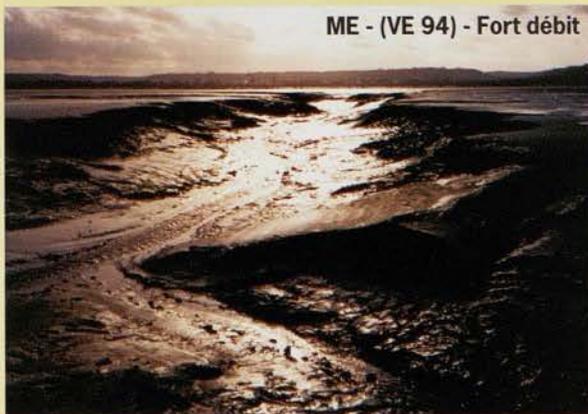
cement progressif du chenal nord. Fixé au sud par la digue submersible et la brèche, ce chenal tend à divaguer vers le nord dans la zone des chenaux, où il provoque l'érosion de la vasière. En un an et demi (juillet 1997 - novembre 1998), le recul de la microfalaise a dépassé 50 mètres. Une translation de près de 70 m de la tête des chenaux vers le schorre accompagne cette érosion, par réajustement de la pente d'équilibre du réseau de drainage (fig. B).

La période d'étude correspond au remaniement de l'ordre de 200 000 t de sédiments. Une partie des produits de l'érosion s'accumule temporairement au pied de la microfalaise où se développe alors un bourrelet sablo-vaseux de blocs basculés\* et de galets mous\*, dont le matériel sera ultérieurement remis en suspension et redistribué au sein de l'estuaire. Les dernières observations (juin 1999) montrent une stabilisation de la migration du chenal nord.

De manière générale, dans la zone des chenaux, les études montrent que les basse et moyenne slikkes sont soumises à des variations d'altitude plus importantes que la haute slikke (fig. C).

Au cours de la période d'étude, il apparaît une érosion résiduelle d'environ 10 cm pour la moyenne et la basse slikkes. Dans la zone aval, les études de terrain sur une autre radiale montrent que la partie intermédiaire du profil est soumise à des fluctuations, alors que les zones de basse et haute slikkes restent assez stables.

En résumé, la vasière nord n'est pas seulement le siège d'une simple élévation des fonds, matérialisant le comblement de l'estuaire. Si l'on convient d'admettre que l'avancée du schorre marque le comblement de la zone nord, cette vasière constitue encore une entité dynamique.



ME - (VE 94) - Fort débit



ME - (VE 90) - Faible débit



08/01/98



20/07/98

Photos B - Comparaison de deux situations morphosédimentaires distinctes dans la zone des chenaux : à gauche en hiver et à droite en été. Les conditions de marées sont analogues dans les deux cas : mortes-eaux succédant à des vives-eaux comparables.

Sa situation particulière dans l'estuaire, héritée des aménagements, en fait un système toujours très actif, dont le rôle dans l'ensemble de la dynamique estuarienne doit être préservé. Son fonctionnement est marqué par une érosion à différents pas de temps, mettant en jeu de très importantes quantités de matériel sédimentaire vaseux et sableux, en bonne partie d'âge supérieur à la dizaine d'années. Les efforts

consentis, au cours des dernières décennies, dans le traitement du rejet des effluents industriels et urbains font que ce matériel ancien piégé contient davantage de contaminants que les matières en suspension fraîchement introduites dans l'estuaire. Ce simple constat confirme l'évidence du besoin de poursuivre l'étude de la vasière nord par une approche pluridisciplinaire...

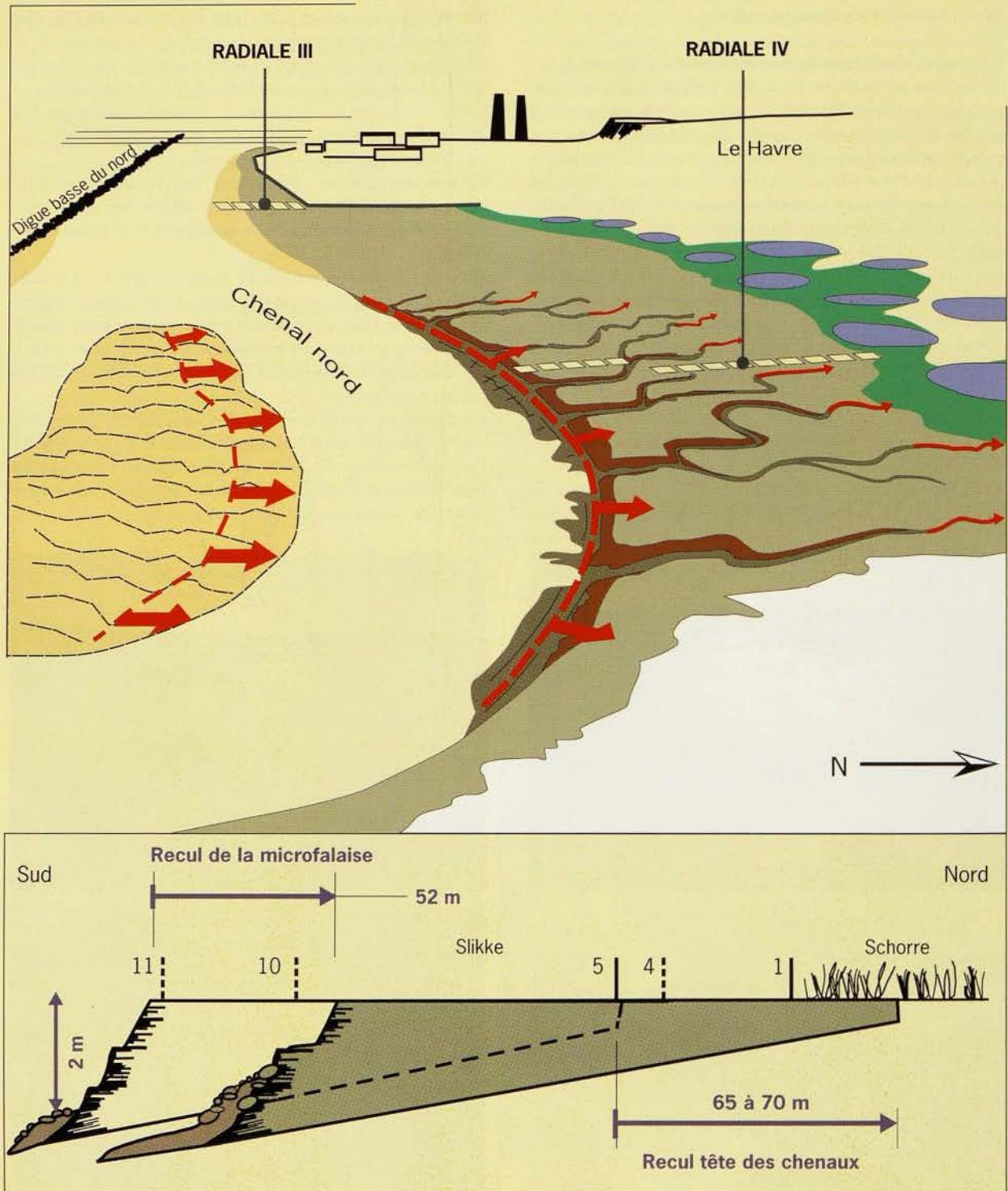
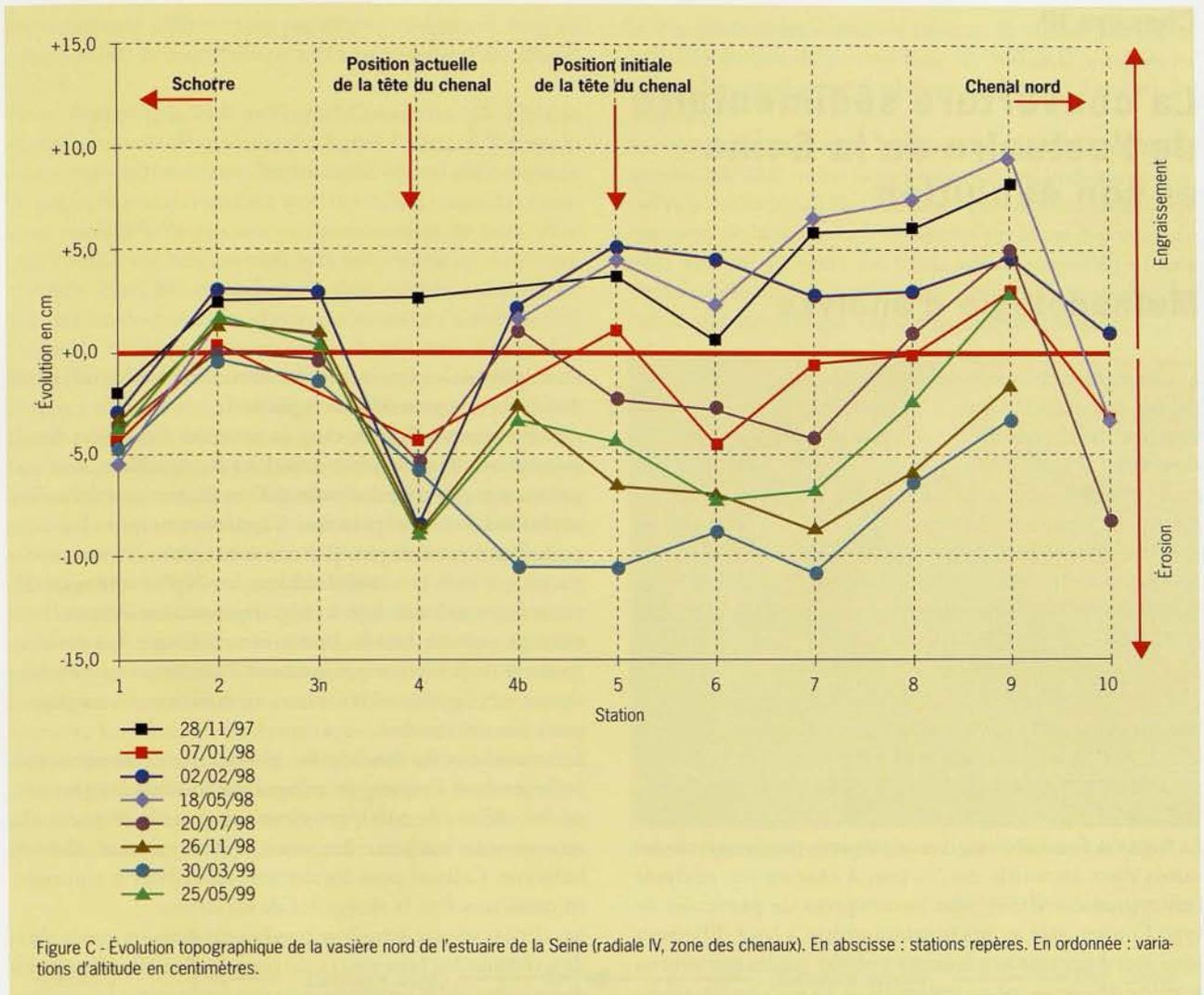


Figure B - Schéma d'évolution morphologique de la vasière nord de l'estuaire de la Seine dans la zone des chenaux. Les numéros matérialisent les stations repères situées en figures A et C.



## Chapitre III

# La couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine et son évolution

## Méthodologie d'analyse

La description des prélèvements, réalisée au cours des campagnes embarquées, fournit les premières indications qualitatives sur l'organisation générale de la couverture sédimentaire : il s'agit du faciès (vase, sables coquilliers, galets de silex et débris ligneux, tourbe, etc.), information visuelle essentielle basée sur l'observation et la description précise du sédiment. Le besoin de quantification passe ensuite par des analyses sédimentologiques. L'accent mis, dans le cadre du programme, sur la compréhension du cycle des particules de la dimension des silts et des argiles (voir fascicule « Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension ») implique la connaissance de la distribution granulométrique et de la quantification de la fraction pélitique ( $< 50 \mu\text{m}$ ). De plus, la recherche de l'origine des sédiments sous-entend des mesures de la fraction carbonatée et éventuellement organique et l'analyse minéralogique des argiles. La fraction fine (silty-argileuse), séparée par lavage sur un tamis dont la maille est  $50 \mu\text{m}$ , a ensuite été analysée (microgranulométrie), soit au compteur de particules de type Coulter, soit au microgranulomètre à laser. Elle peut ainsi être comparée aux mesures réalisées sur les matières en suspension avec le même appareillage. La fraction des sables et graviers est séparée à sec sur une colonne de tamis à maille carrée de norme Afnor. Les données granulométriques obtenues sont exprimées en pourcentages dans les six classes principales de taille suivantes.

Qualification des classes de taille	Définition granulométrique des classes de taille
Cailloutis, galets <sup>o</sup>	$> 2 \text{ cm}$
Graviers <sup>o</sup>	$2 \text{ mm} < x < 2 \text{ cm}$
Sables grossiers <sup>o</sup>	$500 \mu\text{m} < x < 2 \text{ mm}$
Sables moyens <sup>o</sup>	$200 < x < 500 \mu\text{m}$
Sables fins <sup>o</sup>	$50 < x < 200 \mu\text{m}$
Silts et argiles <sup>o</sup> (ou pélites)	$< 50 \mu\text{m}$

## Les sédiments de l'estuaire fluvial en amont de Rouen

Trois campagnes d'échantillonnages (1970, 1996 et 1997) ont permis de constater l'hétérogénéité de la zone estuarienne en amont de Rouen. Celle-ci peut être schématiquement divisée en deux parties :

- de Poses à Freneuse (pk 215), c'est une zone relativement

rectiligne où les fonds sont constitués de cailloutis (grave de fond) et de gros débris coquilliers ;

- de Freneuse à Rouen, c'est la zone des îles où les fonds sont essentiellement sablo-graveleux et coquilliers, avec une présence importante de bivalves d'eau douce. Les dépôts fins sur le fond du chenal principal n'apparaissent qu'en lentilles et de façon sporadique. Ils sont constitués de vases compactes qui sont peu mobilisables : les dépôts sont signalés aux mêmes endroits depuis vingt-cinq ans. Les sables vaseux existent souvent dans les bras morts du fleuve. Les prélèvements réalisés révèlent un gradient d'affinement général du chenal vers l'intérieur de ces bras, en direction des zones propices à la décantation.

Les matériaux du fond du lit, plus particulièrement ceux prélevés dans l'espace de navigation (cailloutis, graviers, sables, débris de tufs), proviennent en grande partie du remaniement sur place des produits de la terrasse alluviale holocène. Celle-ci peut localement contribuer à alimenter en matériaux fins la charge solide du fleuve.

Les dépôts vaseux actuels se produisent dans les zones abritées comme les bras morts, le port de Rouen et certaines zones intertidales protégées des courants comme les vasières de la zone des îles (voir p. 15). Du point de vue granulométrique, les fractions fines de ces dépôts sont comparables à celles des matières en suspension prélevées à Poses ainsi qu'au spectre granulométrique des fractions fines des formations holocènes.

En amont de Rouen, à l'échelle de temps pluriannuelle, les fonds constamment immergés montrent une relative constance de la couverture sédimentaire quelle que soit sa nature. Toutefois, les échantillonnages dans des conditions saisonnières extrêmes montrent, après les crues, une légère tendance à la sédimentation fine (vases, sables fins) dans les secteurs reconnus nettement sableux en étiage.

## Les sédiments du chenal de la Seine de Rouen à Quillebeuf-sur-Seine

L'étude des fonds du chenal par la technique du sonar à balayage latéral, validée par l'analyse de plusieurs centaines de prélèvements de sédiments superficiels (voir p. 33), conduit à découper la zone d'étude en tronçons où les fonds présentent un certain nombre de points communs.

La couverture sédimentaire est décrite ci-après et mise en relation avec la morphologie et l'aménagement du chenal (fig. 8).

Entre Rouen (pk 244) et Grand-Couronne (pk 254), le chenal est bordé de quais ou de digues à talus. À Rouen, la couverture sédimentaire des fonds du chenal est composée de galets et graviers de silex avec des débris coquilliers souvent encroûtés de calcaire et des morceaux de bois. Plus vers l'aval, c'est un ensemble très hétérogène où dominent les sables blanchâtres, carbonatés (leur origine est attribuée aux tufs fossiles), avec des graviers calcaires (médiane\* de 300 à plus de 1 000  $\mu\text{m}$ , très mauvais classement). L'ensemble est mélangé à d'abondants débris organiques (débris de bivalves d'eau douce dont de nombreuses valves de dreissenés\*, débris de bois) et, au contact de la zone portuaire, de débris anthropiques (charbon, céréales...). La vase est seulement rencontrée, parfois compacte, dans les zones abritées de la dynamique de l'écoulement : accès aux bassins portuaires et quelques zones d'approfondissement (zones d'évitage\*, souilles\* au pied des quais).

De Grand-Couronne (pk 254) à Val-des-Leux (pk 265) se développe un unique méandre, limité par des digues à talus. La couverture sédimentaire y est très peu épaisse, hormis en rive droite (rive convexe). En rive gauche (berge concave, La Bouille), la dynamique de l'écoulement provoque une érosion qui met à nu les fonds consolidés ou une couverture sédimentaire de galets et graviers. Sur le fond et dans l'axe du chenal, de nombreuses traces de déplacement de sables (rubans sableux\*, queues de comètes\*) démontrent

la très haute énergie dans ce tronçon de chenal. Les sables grossiers de rive droite (médiane de 900  $\mu\text{m}$ ), modelés en mégarides, envahissent le plafond du chenal à l'amorce du méandre.

Le tronçon compris entre Val-des-Leux (pk 265) et Yville amont (pk 286) inclut deux portions quasi linéaires de chenal et le méandre de Duclair. Son trait essentiel est la faible épaisseur de la couverture sédimentaire. Le *substratum*, souvent dénudé, présente des fonds à forte rugosité (« fonds durs »), difficiles à échantillonner : des argiles compactes, des tufs y sont observés par vidéo sous-marine (photo 1).



Photo 1 - Photo vidéo sous-marine dans une zone d'affleurement de tufs.

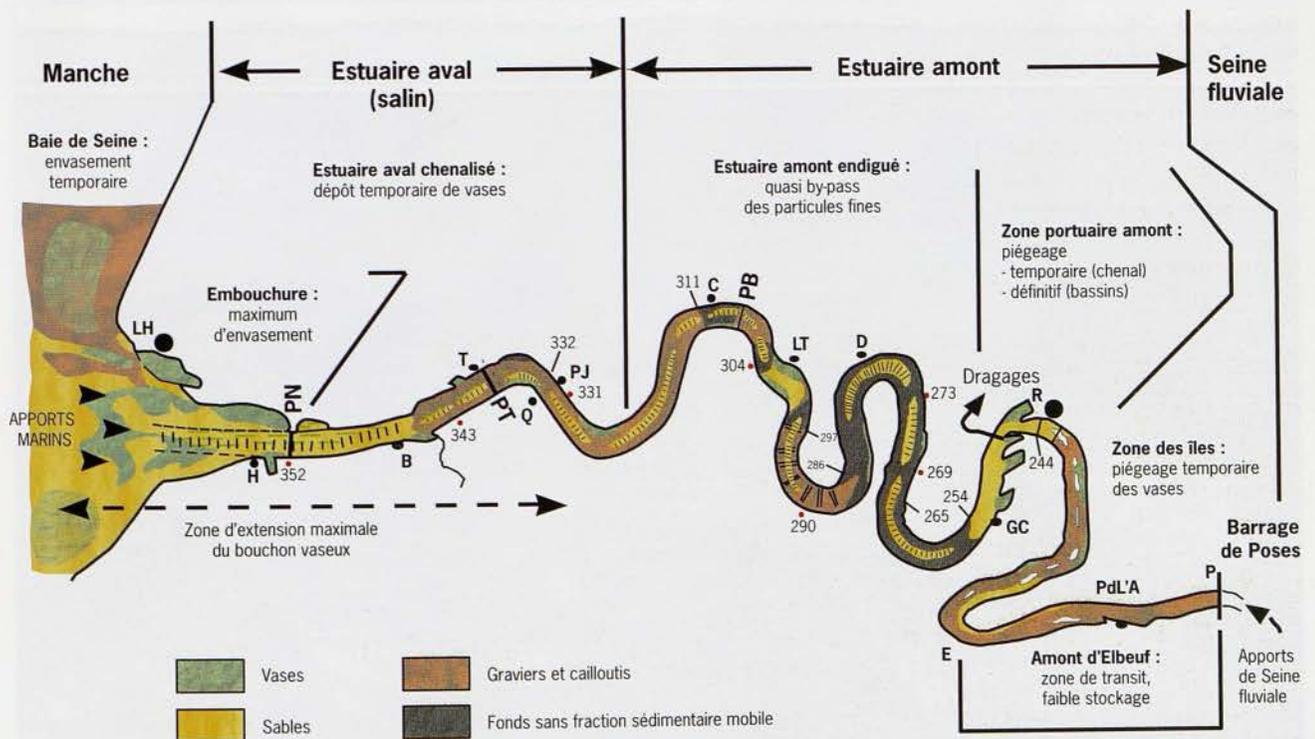


Figure 8 - Carte synthétique de la couverture sédimentaire meuble des fonds de l'estuaire de la Seine. LH : Le Havre, H : Honfleur, PN : pont de Normandie, B : Berville, T : Tancarville, PT : pont de Tancarville, Q : Quillebeuf, PJ : Port-Jérôme, C : Caudebec, PB : pont de Brotonne, LT : Le Trait, D : Duclair, GC : Grand-Couronne, R : Rouen, E : Elbeuf, PdL'A : pont de l'Arche. Les nombres sont les pk cités dans le texte. NB : La largeur du chenal est considérablement majorée en amont de Tancarville.

De la craie est localement suspectée, des failles surgissent parfois, comme à Ambourville (pk 273). Des traces des dragages apparaissent localement nettement (fig. 9).

Des fonds résiduels grossiers sont fréquents : blocs, cailloutis, galets, silex, débris crayeux, graviers coquilliers (photo 2).



Photo 2 - Photo vidéo sous-marine dans une zone de fonds durs, sans couverture sédimentaire mobile.

Les berges présentent ponctuellement des signes d'instabilité : secteurs en érosion dans les méandres et glissements de pente en rive gauche (pk 266 à 270). Là où la couverture sédi-

mentaire meuble est présente, le passage latéral d'un faciès à un autre est extrêmement abrupt. Vers Bardouville, dans l'axe du chenal, la mince couverture mobile actuelle est formée de sables calcaires grossiers (médiane de 700 à 900  $\mu\text{m}$ ) bien classés, gorgés d'eau (pk 269). Des dépôts sablo-vaseux sont associés aux rares zones non endiguées (à Ronceray, pk 267 à 269) ou relativement abritées des courants (rive gauche à la Pâturage-aux-Rats, pk 283 à 285).

Dans la boucle de Jumièges, entre Yville amont (pk 286) et Yainville amont (pk 297), la Seine est endiguée sur presque toute sa longueur. Les fonds très grossiers, fossiles, y dominent très largement : des galets de silex et de craie, des graviers silico-calcaires hétérométriques\*, de tailles très variées, sont largement présents en recouvrement du substrat. Des mégarides s'observent dans des sables très grossiers (médiane de 1 mm) ou des graviers, comme à Barneville en rive droite, au fond du chenal (fig. 10).

Les sédiments plus fins (vases et sables fins), quand ils sont échantillonnés, sont plaqués en une très étroite bande sur la berge interne du méandre (rive droite), là où les courants sont moins énergiques (par exemple à Mesnil-sous-Jumièges, pk 287).

Le tronçon compris entre Yainville amont (pk 297) et l'aval de Caudebec (pk 311) est formé d'une succession de méandres. Sur ces 14 km, presque tous les faciès identifiés dans l'estuaire sont représentés ; les variations morphologiques semblent y régler les changements de faciès sédimentaires. Les fonds sans couverture sédimentaire mobile

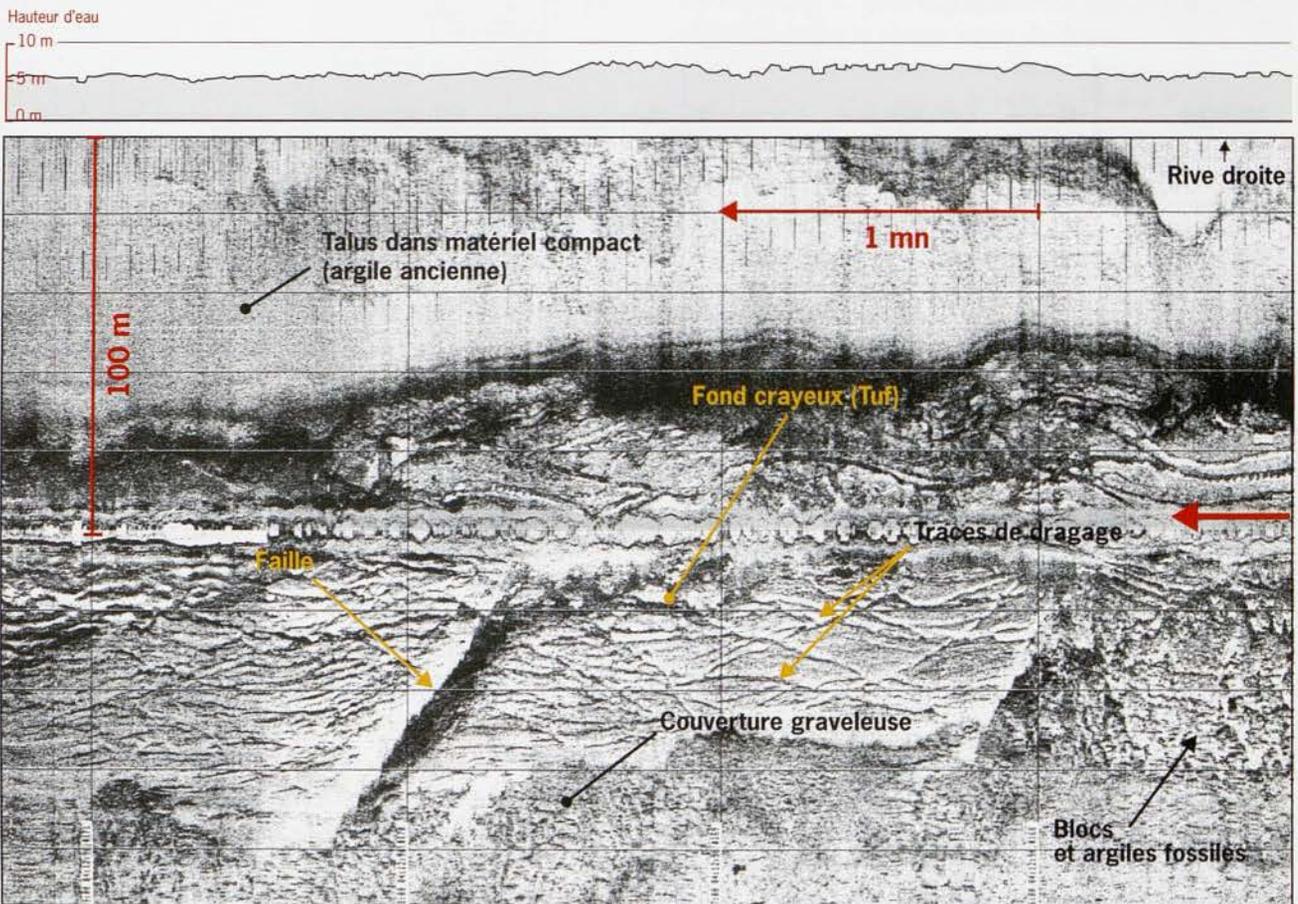


Figure 9 - Extrait de sonogramme\* à Ambourville (pk 273).

affleurent fréquemment, avec la présence d'importants seuils. Ceux-ci conduisent à des dragages nettement visibles sur les sonogrammes\* (Yainville amont, La Mailleraye, Meule amont entre pk 304 et 306). Des fonds fossiles affleurent souvent : tourbes, tufs, argiles, blocs de craie. Ailleurs, des sédiments graveleux apparaissent mais l'axe du chenal est généralement occupé par des ensembles sableux façonnés en mégarides (pk 298 à 300 et pk 305 à 309). De la vase se dépose sur certaines berges immergées ou dans quelques zones intertidales de ce tronçon. Une des rares vasières de l'estuaire fluvial en aval de Rouen se développe en rive droite sur environ 1 km en aval du Trait (pk 302); elle est prolongée par des vases argileuses vers le fond du chenal. Il s'agit du banc du Malaquis (photo 3). Cette vasière est un lieu de stockage permanent de particules fines. Elle a un équivalent plus restreint sur la rive opposée en amont de La Mailleraye (banc de la Piette) et plus en aval, face à Caudebec.

Le long tronçon entre l'aval de Caudebec (pk 311) et Quillebeuf (pk 332) ne présente plus d'affleurement de substrat argilo-tourbeux. C'est une importante zone de transit de matériel sableux au fond, en recouvrement de graves caillouteuses (silex et craie). La période d'étude au sonar à balayage latéral (morte-eau, crue) correspondait, pour les formes sédimentaires reconnues dans l'axe du chenal, à de longs rubans de sables fins à moyens (médiane de 150 à 400  $\mu\text{m}$ ) façonnés en mégarides (fig. 11). Lors de notre reconnaissance, le sens du transit était toujours orienté vers

l'aval mais l'inversion de cette polarité a pu être localement observée dans d'autres conditions hydrodynamiques. Les dépôts vaseux sont confinés sur la bordure interne du méandre, face à Vieux-Port et Aizier (mince vasière sableuse, pk 323 à 326) et près de Quillebeuf-sur-Seine (pk 332).



Photo 3 - La vasière du Malaquis au Trait, vue de la rive droite en mai 1999. Notons les litages apparents, en relief du fait de l'érosion, et la présence de galets mous.

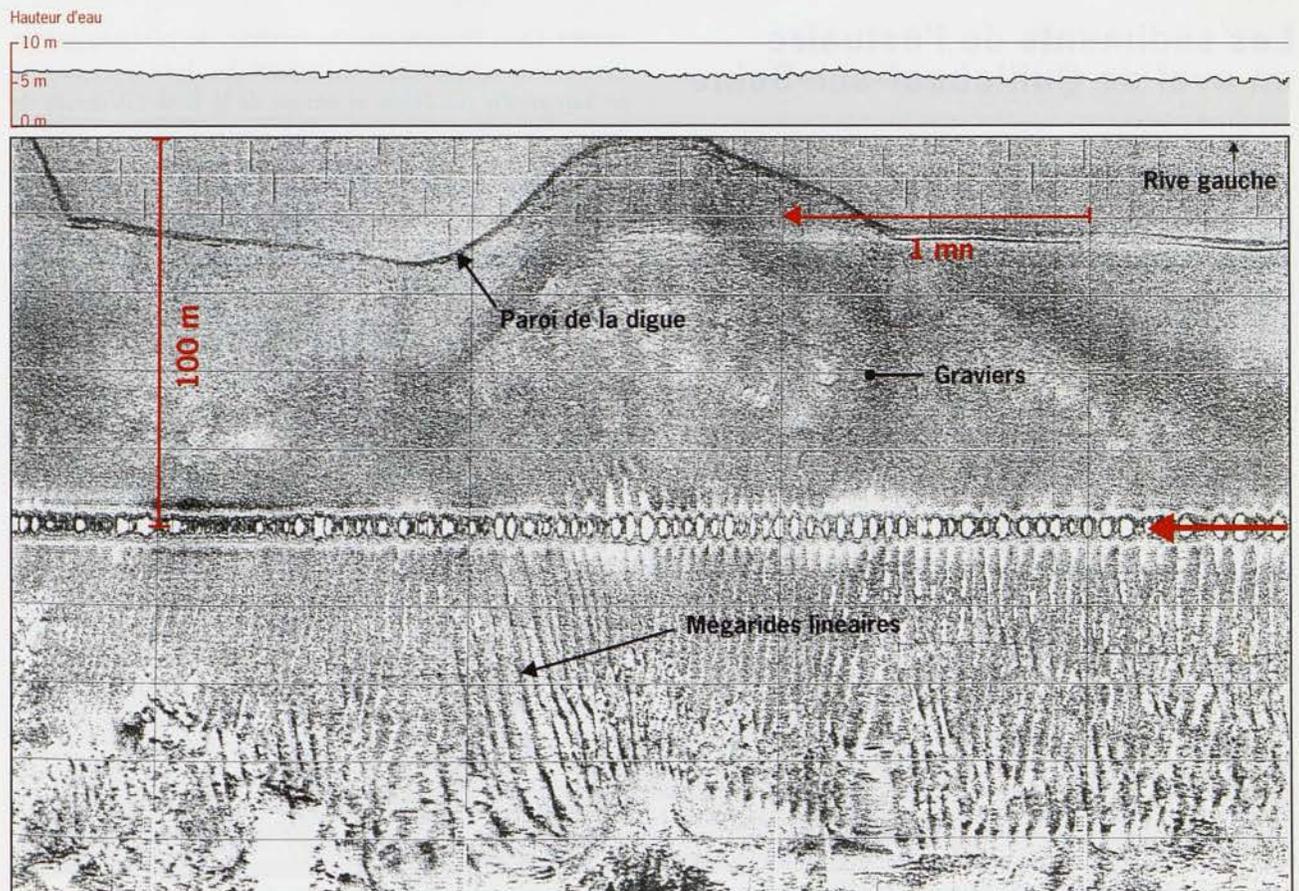


Figure 10 - Extrait de sonogramme à Barneville (pk 290).

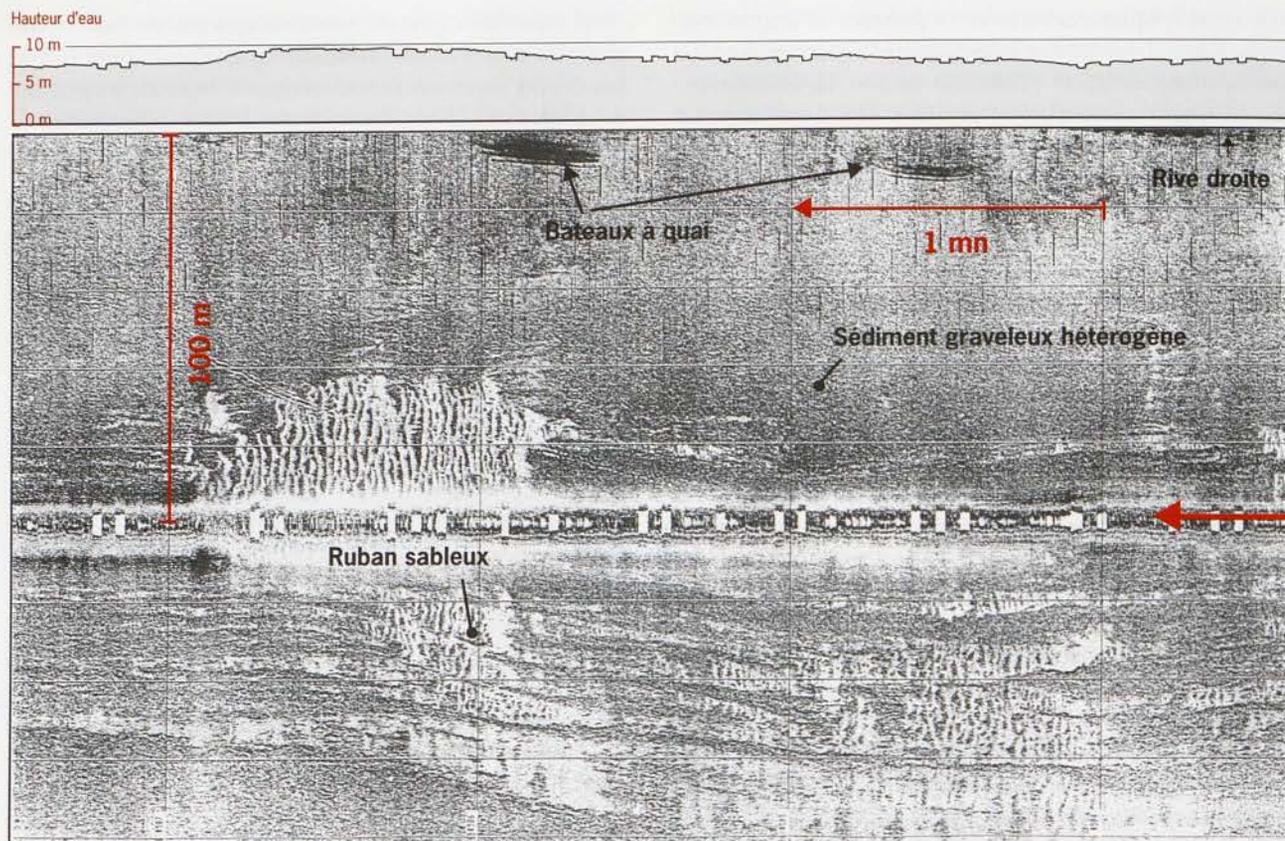


Figure 11 - Extrait de sonogramme à Port-Jérôme (pk 331).

## Les sédiments de l'estuaire en aval de Quillebeuf-sur-Seine

À partir d'Aizier ou du Vieux-Port, l'estuaire devient saumâtre ; c'est la partie amont du domaine d'extension du bouchon vaseux. Le chenal s'élargit alors notablement vers l'aval. En rive gauche du méandre de Tancarville, dans une aire protégée par un ancien enrochement\*, de la vase est associée à des dépôts sablo-graveleux. Il y persiste une importante accumulation sableuse modelée en mégarides.

### Les sédiments du chenal de navigation de l'estuaire aval

À partir de Quillebeuf (pk 332) et vers l'aval, les dépôts temporaires ou permanents de vases apparaissent presque partout.

Le plafond du chenal présente les mêmes sédiments que plus en amont, avec des figures sédimentaires sableuses recouvrant un fond de graviers. À la confluence avec la Risle, entre l'épi de la Roque (pk 343) et Berville-sur-Mer (pk 347), un important épandage de galets de silex apparaît : cette accumulation est le résidu probable d'un éventail alluvial quaternaire. En aval, les sables sus-jacents sont très mobiles (fond ridé) et montrent une tendance à l'affinement par rapport aux sables de l'estuaire amont.

En aval de Quillebeuf, des vases se déposent sur les berges, dans la largeur variable de la zone de balancement des

marées. Dans l'étroite zone intertidale, des placages vaseux temporaires apparaissent au contact des deux rives en aval de Tancarville (Le Hode et amont de la Risle). L'entrée de l'écluse de Tancarville est le lieu d'une importante accumulation de vases : l'abri relatif qu'elle forme est un lieu de décantation connu dans la zone de déplacement du bouchon vaseux. La partie du chenal en amont du pont de Normandie (pk 347 à 352) est caractérisée par un plafond couvert de sables fins (180 à 250  $\mu\text{m}$ ) souvent envasés. La vase forme des placages éphémères (vase très molle ou fluide) ou des galets mous (éléments issus de remaniements de vases déjà consolidées). La couverture sédimentaire présente ici une certaine variabilité temporelle : les vases y sont en situation instable. Au cours de la période hivernale et par morte-eau, des dépôts de vase molle peuvent toutefois atteindre une épaisseur supérieure au décimètre. Localement, des traces de dragages, imposés par les apports sablo-vaseux transitant depuis la brèche de la digue submersible nord, sont identifiables dans le chenal près du pont de Normandie (pk 349 à 353).

Encore plus vers l'aval (pk 352 à bouée 9), les sables sont globalement moins envasés et forment souvent des ensembles de mégarides asymétriques, leur orientation variant avec les conditions hydrauliques. Ces formes sédimentaires sableuses peuvent être reconnues presque en continu sur 17 km. Dans ce tronçon, la dynamique de transport des sables fins (200  $\mu\text{m}$ ) est extrêmement active. Les vases se déposent surtout (placages et galets mous) sur la bordure nord du chenal, avant la digue submersible.

Le chenal de navigation en aval des digues submersibles est recouvert de sables fins (médiane de 160  $\mu\text{m}$ ) envasés. Le débouché marin du chenal de Rouen, nommé « l'engainement », est le siège d'une intense activité de dragages (fig. 12). C'est la partie du chenal qui pose au port de Rouen les plus importants problèmes d'entretien des fonds (Delouis, 1997). Le talus sud du chenal est marqué de ruptures de pente, imputables à des glissements de berges et au débordement, depuis le sud et vers le chenal, de sables originaires du banc du Ratier.

### Les sédiments dans l'embouchure de la Seine

#### État actuel des lieux : la carte des sédiments de l'embouchure

Cet état des lieux sur la couverture sédimentaire de l'embouchure est le premier réalisé depuis le milieu des années quatre-vingt. La modification principale notée depuis cette époque est un net envasement (fig. 13).

Seules quelques zones présentent peu de modifications :

- l'affleurement des cailloutis et des galets fossiles des Hauts de la Rade et de la Petite Rade du Havre ;
- des sables fins peu envasés, subsistant aux plus faibles profondeurs des hauts-fonds les plus exposés aux vagues et aux courants : les Ratelets, le Ratier, Amfard, ainsi qu'aux faibles profondeurs situées près du littoral du Calvados.

Si l'on excepte la zone sableuse particulière du Kannick (lieu de clapage\* des dragages du chenal de navigation du port

de Rouen), le fait nouveau est l'extension des vases dans une vaste aire comprise entre la rade de la Carosse et la fosse sud du Ratier ainsi qu'au nord du chenal de navigation, entre le sud de la digue Charles Laroche (port du Havre) et le chenal nord.

Dans l'embouchure, les vases sont globalement en extension, les sédiments ayant des teneurs en vase largement plus élevées que ceux des bilans antérieurs. En particulier, la large prédominance des sédiments de teneurs en vase supérieures à 25 % est marquante. De surcroît, nombreux sont les secteurs de l'embouchure qui présentent des teneurs excédant 75 %. Les teneurs les plus remarquables, supérieures à 90 %, ont été mesurées au sud du port du Havre, à proximité de la CIM. De tels pourcentages en vases sur des aires aussi étendues n'avaient jamais été mis en évidence au cours des études antérieures.

#### L'évolution de la sédimentation dans l'embouchure de la Seine depuis le siècle dernier

Le bilan cartographique basé sur la description des faciès sédimentaires peut être comparé à des archives sédimentologiques anciennes de l'embouchure (fig. 14).

Les premiers documents historiques fiables ont été élaborés à partir de données inédites du service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom). Ces cartes descriptives ont été réalisées par la méthode du plomb suiffé\*, appliquée à plusieurs milliers de points de sondage.

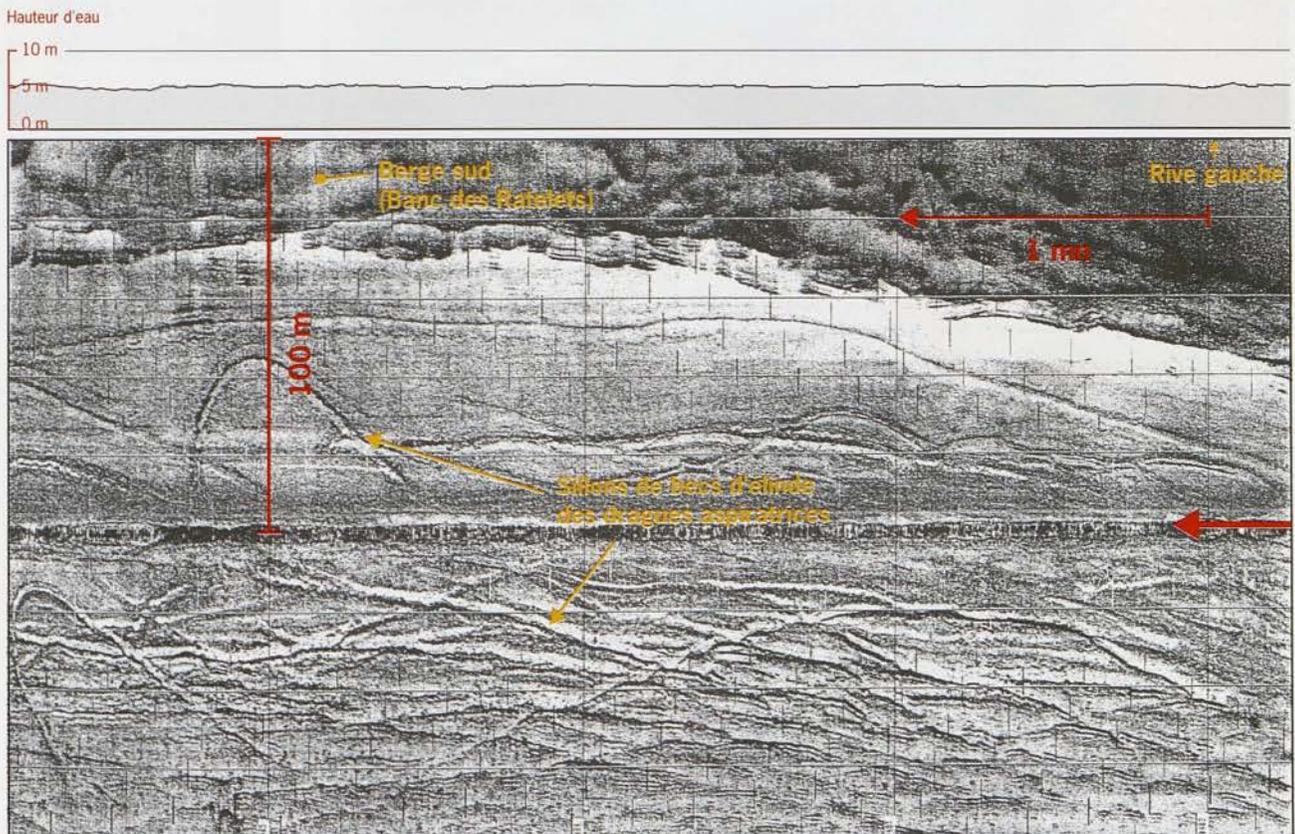


Figure 12 - Extrait de sonagramme à l'embouchure du chenal de navigation de Rouen.

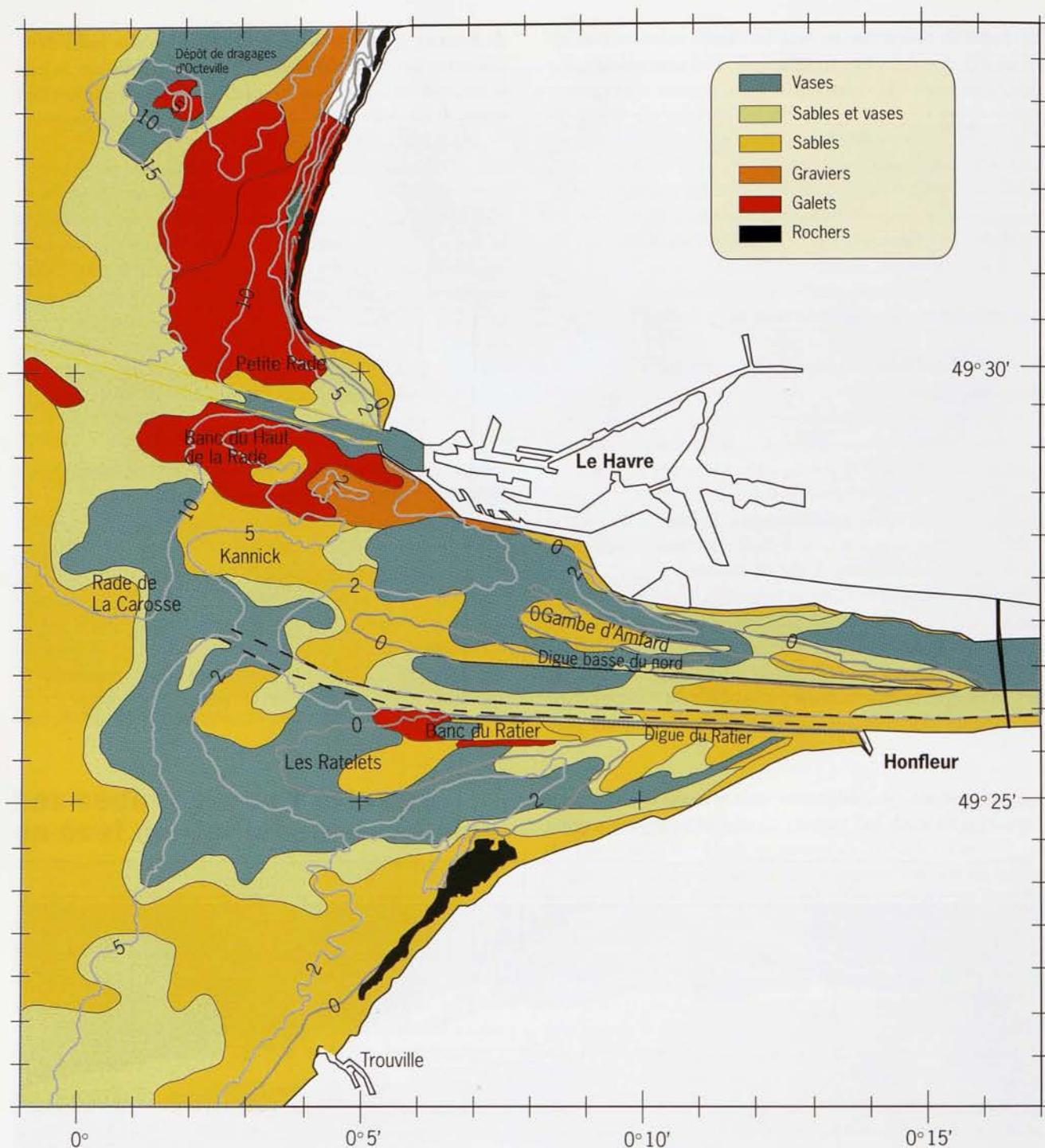


Figure 13 - Carte des faciès sédimentaires superficiels actuels dans l'embouchure de la Seine. Synthèse des échantillonnages réalisés de 1993 à 1996 au cours du programme Seine-Aval.

Ainsi, une carte établie vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, période antérieure ou juste contemporaine des premiers aménagements estuariens, montre qu'à cette époque les faciès typiques de l'embouchure sont des sables et des graviers. Au large des côtes du pays de Caux, un faciès encore plus grossier (graviers et galets) domine le sédiment superficiel. S'il existe bien à cette époque des zones envasées, elles sont associées à des pièges bathymétriques\*, comme l'ancien chenal d'embouchure.

Une autre carte éditée en 1913, après les premiers aménagements estuariens en amont de la Risle, montre toujours une nette domination du faciès sableux (fig. 14). Ces sables apparaissent toutefois plus largement en recouvrement partiel des graviers et des galets du large des côtes du pays de Caux. Cette tendance s'accompagne de quelques placages vaseux. Par rapport à la situation précédente, une tendance globale à l'affinement de la couverture sédimentaire se dégage. Les vases restent localisées dans des dépressions ou en bordure

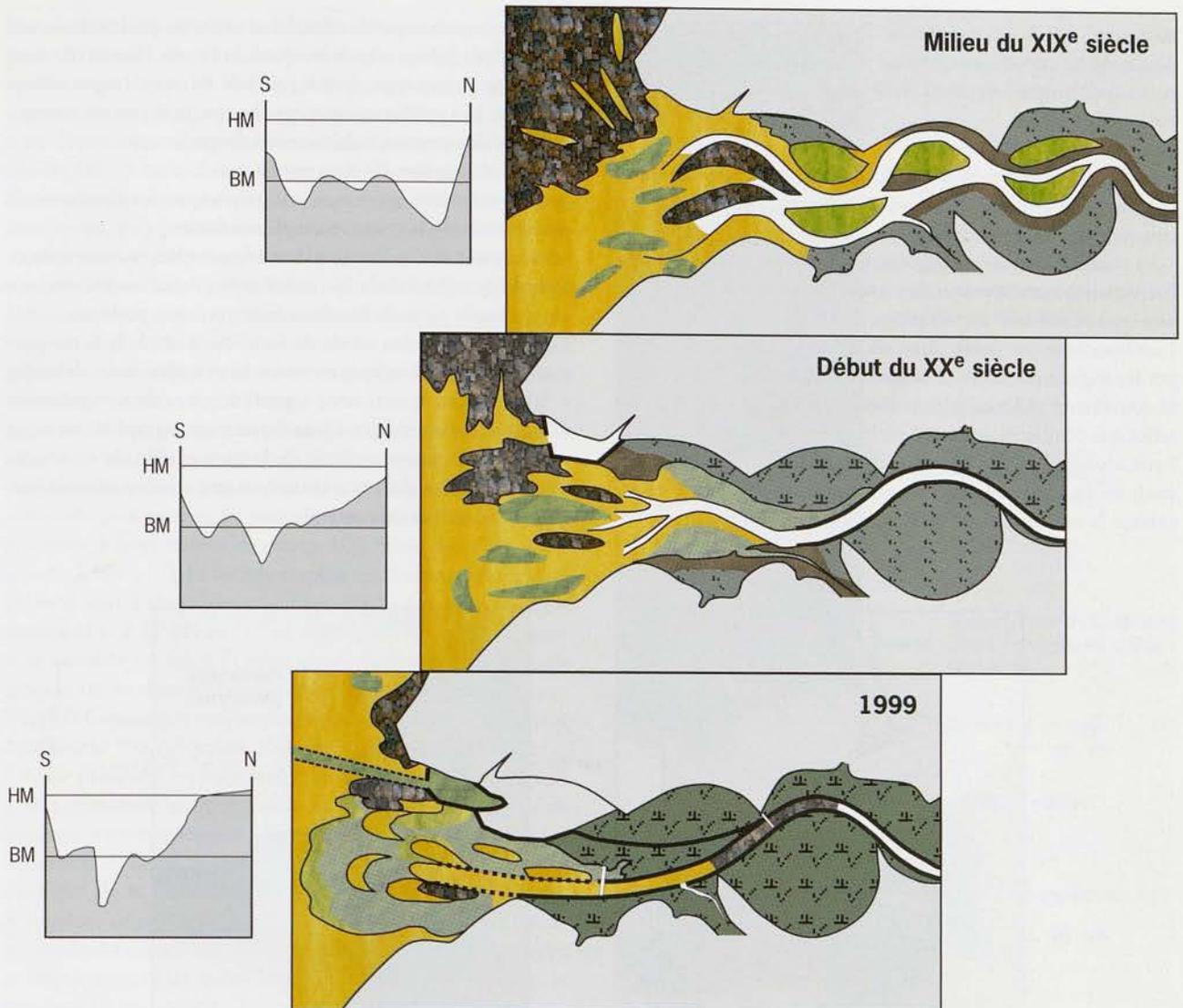


Figure 14 - Schéma de l'évolution morphosédimentaire historique de l'estuaire aval de la Seine du XIX<sup>e</sup> siècle à 1999. Pour chaque époque, à droite : interprétation des faciès sédimentaires (vert sombre : marais et herbus, vert clair : vase, jaune : sable, gris : cailloutis et graviers), à gauche : interprétation d'une coupe bathymétrique\* virtuelle (S : sud, N : nord) montrant la réduction de section (BM : basse mer, HM : haute mer).

nord du chenal (vasières remblayées lors des extensions portuaires du Havre).

Les cartes établies récemment confirment cette tendance au recouvrement progressif des fonds grossiers par des sédiments plus fins, en montrant une extension des vases dans l'embouchure (Avoine, 1981 ; 1987). Notre carte synthétique de 1993 à 1996 illustre un net envasement (fig. 13), qui ne concerne plus seulement les zones en dépression.

L'évolution au cours du temps des faciès sédimentaires compose un ensemble superposé dont la dimension des particules diminue en progressant vers le haut, composé de galets, puis de sables et enfin de vases. L'ensemble correspond à une continentalisation du milieu, par déplacement des dépôts estuariens vers la mer. Cette tendance est naturelle dans le cas d'un estuaire actuel en contexte de haut niveau marin relatif. Toutefois, dans le cas de la Seine, l'accélération de cette évolution est liée principalement à l'aménagement de l'estuaire depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

L'envasement actuel de l'embouchure suit donc le comblement de l'estuaire aval et la progradation des dépôts depuis l'embouchure vers la baie de Seine orientale. La réduction, voire l'absence, de l'espace disponible et la canalisation de l'estuaire, qui a augmenté les vitesses des courants de jusant, ont entraîné le déplacement du dépôt-centre\* de la sédimentation, pour partie vaseuse, vers l'ouest jusqu'à la longitude du Havre. La question se pose aussi de savoir si les concentrations de matières en suspension transportées depuis le bassin versant vers l'estuaire aval ont augmenté au cours du dernier siècle, sous l'effet d'une érosion accrue des sols, par les pratiques culturales modernes...

#### Les fluctuations saisonnières de l'envasement dans l'embouchure de la Seine

La carte synthétique précédente (fig. 13) laisse supposer une monotonie apparente des sédiments superficiels (définis par les dix à vingt premiers centimètres de l'interface eau-

sédiment) sur de larges espaces. En réalité, l'étude détaillée de ces dépôts révèle une intense variabilité des faciès, inhérente aux fluctuations des conditions de milieu de cet environnement côtier.

Ces variations comprennent :

- des phases de sédimentation des apports continentaux issus des crues ou de matériel d'origine marine apporté par les courants de marée et de la houle ;
- des phases d'érosion originaires des mêmes facteurs, dont les événements extrêmes sont les courants de marée de grande vive-eau et surtout les tempêtes.

L'embouchure, en particulier, où les conditions d'agitation par les vagues prennent le relais des courants de marée, voit sa couverture sédimentaire présenter des variations temporelles qui sont liées aux conditions saisonnières et au régime hydrodynamique de l'estuaire. Le millier d'échantillons analysés au cours de diverses saisons entre 1993 et 1996 a permis la réalisation de trois cartes (fig. 15).

Ces documents représentent les teneurs en pélites au cours de trois périodes caractéristiques, la fin de l'hiver (février-mars), le printemps (avril-juin) et l'été (septembre-octobre). Les prélèvements plus récents, non pris en compte dans ces documents, confirment ces tendances.

L'analyse complète de ces cartes a conduit :

- à proposer une synthèse cartographique des fluctuations temporelles de la couverture sédimentaire ;
- à représenter ces fluctuations temporelles par un échantillonnage répétitif du sédiment (carottages courts) en une vingtaine de sites de l'embouchure (ou sites ateliers).

L'exploitation de ces cartes de l'embouchure de la Seine permet d'évaluer la teneur en vases (particules fines de taille < 50 µm) dans le sédiment superficiel dans deux conditions saisonnières contrastées. Dans l'espace cartographié, les vases occupent en moyenne 40 % de la surface d'étude en conditions hivernales alors que cette teneur moyenne décroît jusqu'à 20 % en période estivale.

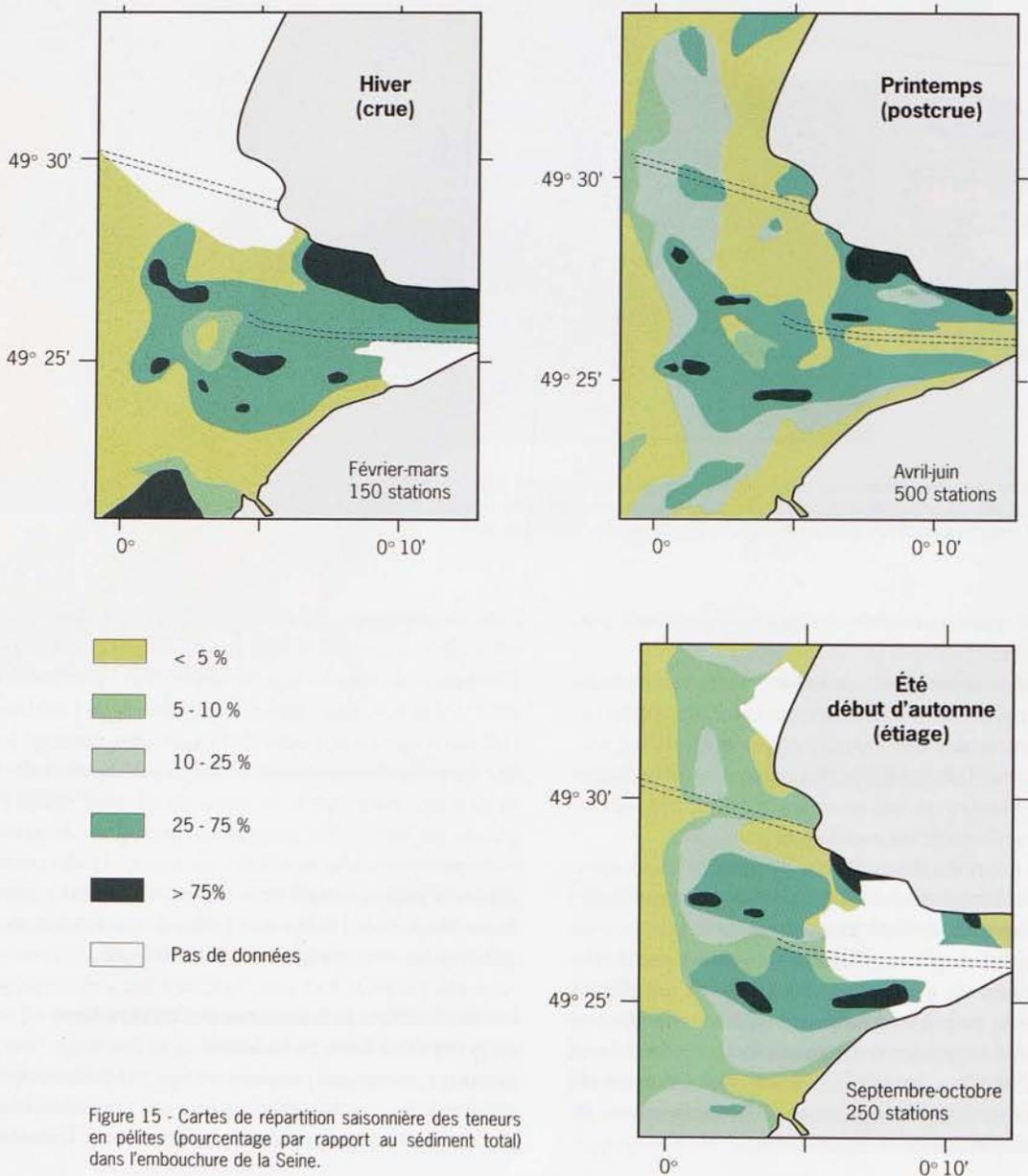


Figure 15 - Cartes de répartition saisonnière des teneurs en pélites (pourcentage par rapport au sédiment total) dans l'embouchure de la Seine.

Les sites ateliers ont été choisis afin de mettre en évidence, pour différents secteurs de l'embouchure et à différentes profondeurs d'eau, les fluctuations du sédiment superficiel au cours du temps. En chaque point, ces variations sont donc considérées comme représentatives de l'espace qui l'entoure (exemples : la rade de la Carosse ou le chenal nord).

Cette analyse a été menée par carottages courts de 30 cm maximum, peu perturbants (voir p. 33) qui ont été répétés toujours au même point, avec la précision du DGPS\*. Une analyse sédimentologique (description des faciès d'après radiographie, granulométrie, teneur en eau) et une caractérisation géotechnique\* (mesure de la cohésion) des vases superficielles collectées ont été réalisées à chaque échantillonnage sur les sites ateliers.

La couleur, certaines caractéristiques physiques comme la teneur en eau ou la cohésion, permettent d'identifier les dépôts vaseux frais, non consolidés, et de les distinguer du sédiment plus ancien. La vase récente est molle, de couleur gris clair, à forte teneur en eau (> 100 %) et de faible cohésion (< 1 kN.m<sup>-2</sup>). Le sédiment plus ancien sous-jacent correspond soit à du sable coquillier, soit à une vase noirâtre compacte (2 à 15 kN.m<sup>-2</sup>). Ces dépôts récents ont une épaisseur variable : 1 cm à l'embouchure et dans le chenal sud, jusqu'à 10 cm dans le chenal nord. En certains sites (les Ratelets et la Carosse), la vase molle hivernale issue des crues peut représenter 5 cm d'épaisseur sur d'importantes surfaces.

L'étude détaillée des nombreux carottages des dépôts superficiels démontre la complexité des processus sédimentaires dans cet environnement. Pour un site atelier donné, les variations de faciès sédimentaires témoignent à la fois de la mobilité de la fraction sableuse fine et de celle des vases non encore consolidées, sous l'action conjointe des différents agents hydrodynamiques (courants de marée, houle, clapot et leur interaction) mêlée aux fluctuations des apports de matières en suspension.

Les variations temporelles de faciès sont étudiées en détail grâce à la radiographie aux rayons X qui permet de montrer les variations fréquentes des conditions de dépôt.

Le cliché radiographique (fig. 16) révèle en outre :

- des lits sableux (teintes sombres), limités à leur base par des surfaces érosives, interprétés comme la conséquence d'événements particuliers énergétiques (vagues, tempêtes);
- des niveaux vaseux homogènes (teintes claires) de plusieurs centimètres, témoignant d'épisodes de décantation lors de périodes de forts apports de matières en suspension, pouvant être associés à l'expulsion du bouchon vaseux lors de crues du fleuve.

Une telle observation détaillée des différents secteurs de l'embouchure permet de montrer, par exemple, qu'entre l'automne d'une année et le début du printemps de l'année suivante une dizaine de centimètres de vases récentes se sont déposés. L'échantillonnage le plus récent se situant peu après une importante période de crues, au cours de l'été suivant, une partie de cette vase a été érodée : il ne subsiste alors que 4 à 5 cm de vase en cours de consolidation.

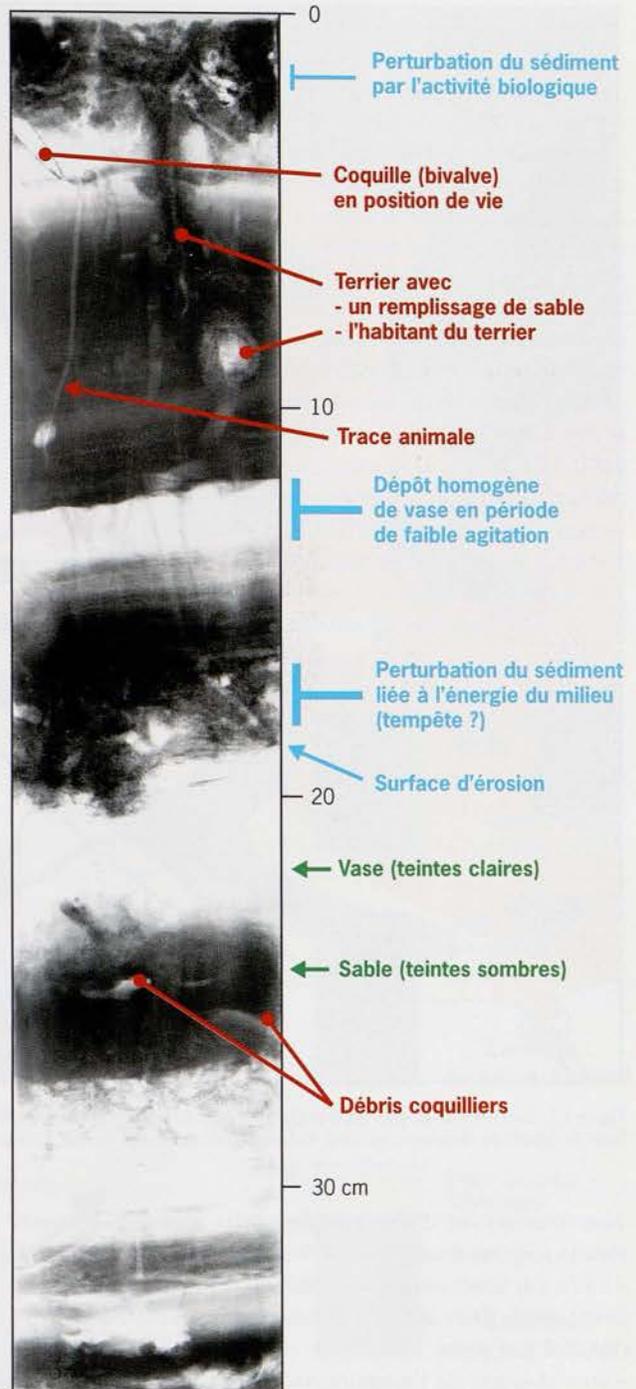


Figure 16 - Cliché radiographique (positif) d'une carotte courte de vases et sables interlités de l'embouchure (rade de la Carosse).

### Les sédiments couvrant les fonds de la baie de Seine orientale

La baie de Seine orientale a fait l'objet, dès la fin de 1993, d'une mise à jour des connaissances (300 stations). Des prélèvements complémentaires ont été réalisés ultérieurement, enrichis ponctuellement par la reconnaissance avec un sonar à balayage latéral.

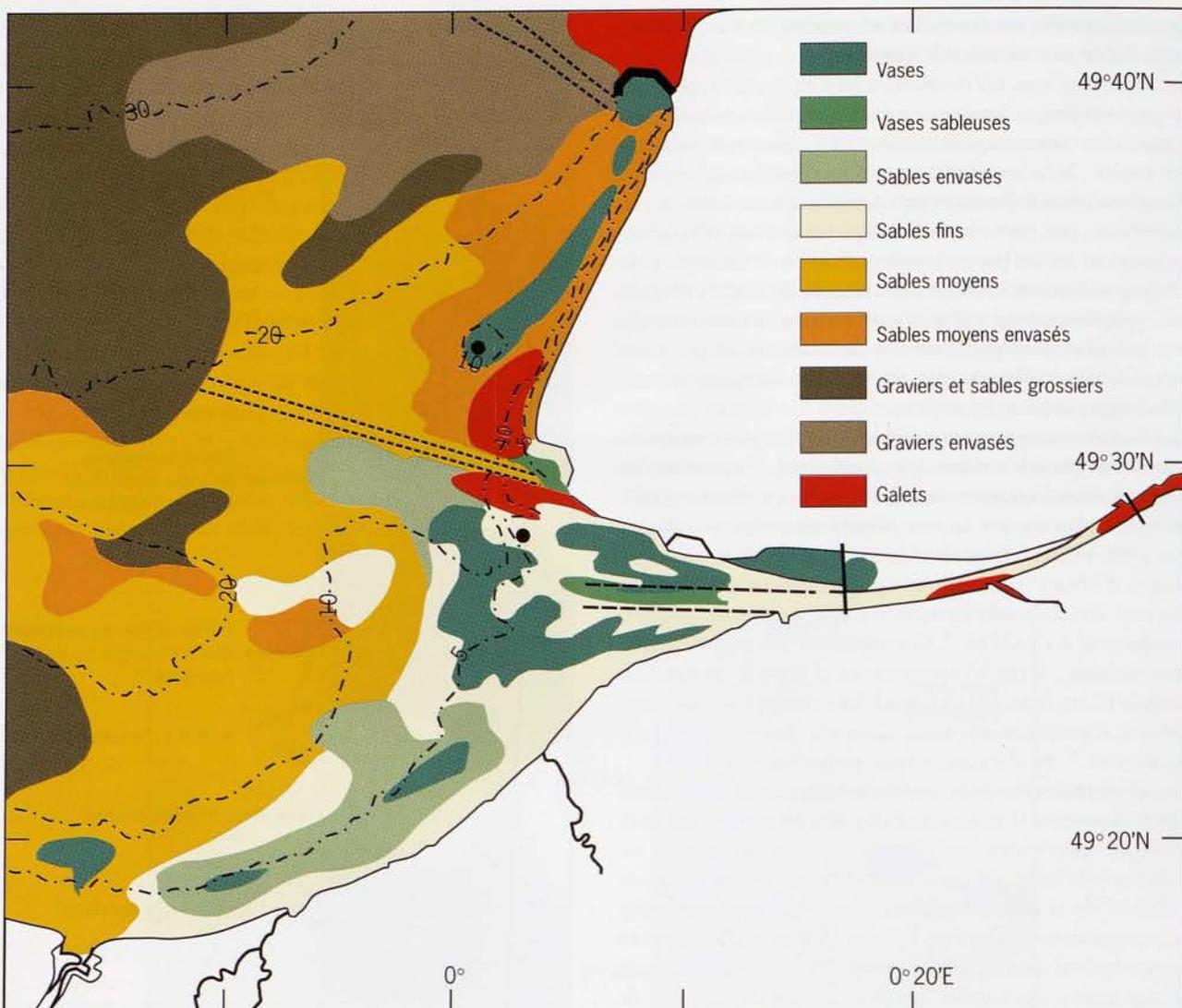


Figure 17 - Carte des sédiments superficiels de la baie de Seine orientale (synthèse des prélèvements réalisés entre 1993 et 1996). Les points noirs représentent les lieux de dépôts de dragages : au nord, Octeville (port du Havre) ; au sud, Kannick (port de Rouen).

Nos résultats ont d'abord confirmé des informations antérieures acquises dans la baie de Seine orientale (Avoine, 1981, 1987). En fonction de la problématique du programme Seine-Aval, deux zones d'envasement attirent l'attention (fig. 17) :

- au sud-ouest de l'estuaire, face aux côtes du Calvados, l'envasement des profondeurs inférieures à 10 m apparaît jusqu'à l'Orne ;

- au nord, l'envasement des fonds inférieurs à 20 m face au littoral cauchois jusqu'à Antifer, en relation avec les dépôts de dragages du port du Havre sur le site d'Octeville-sur-Mer. Les sédiments de la baie de Seine orientale sont aussi marqués par une modification depuis les années quatre-vingt : il s'agit de l'envasement des sables grossiers coquilliers et graviers couvrant une vaste zone située au large d'Antifer (fig. 17). Le constat d'un faciès vaseux est nouveau pour ce site, aujourd'hui marqué par des teneurs en vases toujours supérieures à 5 %. Des valeurs atteignant localement 12 à 13 % y sont mesurées. L'échantillonnage avait d'abord eu

lieu en période estivale, sans agitation notable, facilitant la décantation des matières en suspension. Une vérification en avril 1996 (une cinquantaine de stations) a permis de confirmer cette tendance à l'envasement, en la modulant toutefois : les teneurs en pélites ne dépassaient alors jamais 10 %, ce qui va dans le sens de constatations antérieures (Avoine *et al.*, 1984) mettant en avant le caractère saisonnier de la sédimentation fine en baie de Seine orientale.

Malgré les réserves que l'on doit émettre sur les difficultés d'échantillonnage des fonds accidentés et des sédiments grossiers hétérogènes, il est évident que le secteur situé à l'ouest du cap d'Antifer est actuellement nettement en envasement. Ce secteur fait par ailleurs l'objet d'études particulières (programme Pnec, chantier « baie de Seine ») : la sédimentation fine y est localement associée à un très dense développement d'ophiures\* (*Ophiotrix fragilis*). Ces organismes captent les matières en suspension, les piègent et composent de véritables tapis recouvrant les fonds sablo-graveleux.

### Synthèse des études sur la sédimentation dans l'estuaire de la Seine et à ses abords marins

La comparaison des sédiments superficiels prélevés aux mêmes sites de l'estuaire aval et au cours de différentes conditions saisonnières ou événementielles conduit à un schéma général descriptif des processus sédimentaires (fig. 18).

On admet pour niveau référentiel initial un dépôt superficiel vaseux consolidé. Différents mécanismes se succéderont alors, expliquant les variations de faciès observées dans les dépôts superficiels.

La période hivernale combine statistiquement deux phénomènes antagonistes :

- lors des crues, des apports importants et relativement soudains proviennent du bassin versant amont et de zones de stockage temporaire intra-estuariennes (Guézennec, 1999). Le bouchon vaseux est alors translaté vers l'aval (voir fascicule « Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension »). Celui-ci, situé vers l'embouchure, y est res-

ponsable d'une sédimentation vaseuse dans les faibles profondeurs subtidales\* et peut subir une expulsion en baie de Seine orientale ;

- une agitation souvent importante par les vagues du plan d'eau de l'embouchure. Celle-là s'oppose à la stabilisation des dépôts pélitiques frais et entraîne une remise en suspension des vases fluides situées au fond des chenaux secondaires, ainsi qu'une érosion des vases consolidées et des sables fins des zones intertidales (dont les slikkes de la vasière nord).

De la combinaison de ces deux actions résulte la généralisation d'un envasement en situation instable. L'envasement observé augmente avec le ratio entre (1) les apports solides, qui sont une fonction de la concentration en MES, elle-même liée aux débits et à la durée depuis la dernière crue (Avoine, 1981) et (2) la dynamique de la masse d'eau, liée à l'interaction vagues - courants de marée. À titre d'exemple, de très importants dépôts vaseux observés dans l'embouchure en mars 1999 étaient associés à une crue soutenue pendant près d'un mois à plus de  $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ , durant une période sans événement d'agitation important.

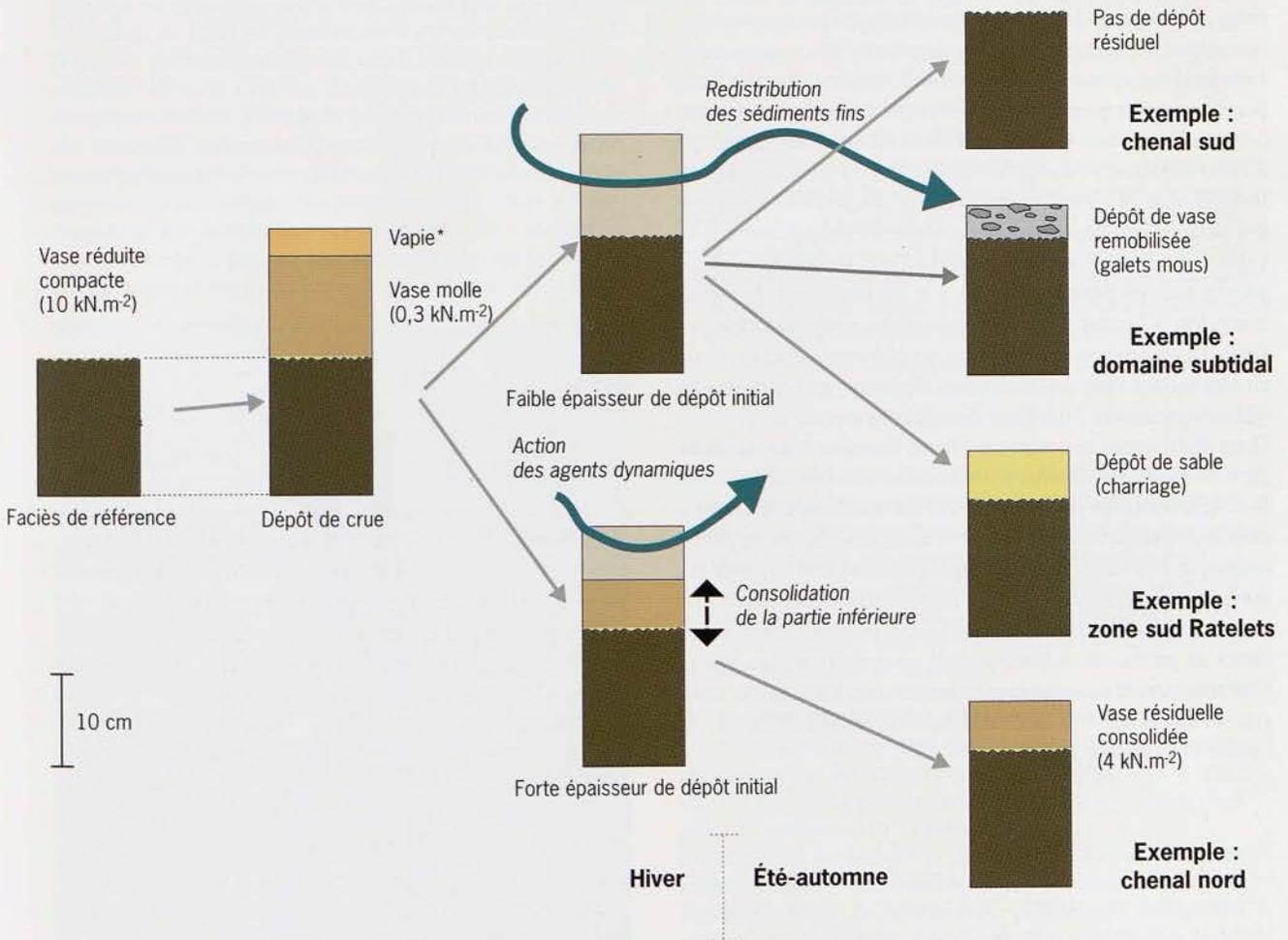


Figure 18 - Synthèse des processus sédimentaires dans l'embouchure de la Seine (interprétation des carottages de sédiments superficiels).

En ce site ouvert et exposé aux agents hydrodynamiques, le dépôt de crue peu consolidé subit une érosion partielle. Le matériel fin hivernal est donc déplacé vers les zones moins exposées (zones en creux, plus grandes profondeurs d'eau) et dans les faibles profondeurs de la baie de Seine orientale. La dynamique du milieu y empêche la stabilisation des vases subtidales : ce sont donc des vasières temporaires et mobiles. Une des conséquences des courants de marée est de remanier ce matériel instable et de le réintroduire dans l'estuaire en suspension, par l'intermédiaire des courants de flot. Ce matériel sera ultérieurement responsable de l'envasement de zones situées plus en amont. Il en résulte, principalement pendant les périodes d'étiage et de morte-eau (bouchon vaseux migrant vers l'amont, voir fascicule « Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension »), un engraissement des zones intertidales encore disponibles (surtout la vasière nord, voir p. 15-16), où il semble qu'une épaisseur de dépôt vaseux suffisante permette sa préservation partielle du fait de sa consolidation.

En fonction du secteur de l'embouchure, on distingue donc (fig. 18) :

- des secteurs sans dépôt vaseux frais (chenal sud) : les faibles concentrations en MES qui y transitent ne permettent pas leur dépôt ou leur préservation durable ;
- des fonds subtidaux de l'estuaire où le dépôt vaseux est temporaire : la vase y est remaniée et déplacée après les crues ;
- des secteurs (chenal nord, rade de la Carosse) où, en dehors d'événements acycliques (divagation de chenal, dragages), le dépôt vaseux consolidé est préservé. Ils peuvent ainsi être des sites de comblement par du matériel sédimentaire fin ;
- des secteurs de l'estuaire externe (sud Ratelets) et de la proche baie de Seine, marqués par un charriage de sables marins vers l'estuaire ou vers les faibles profondeurs littorales. La sédimentation sableuse y prédomine encore, mais en alternance avec des situations d'envasement temporaire qui posent un net problème d'environnement.

Dans le site relativement ouvert de l'embouchure actuelle de la Seine, la météorologie a désormais un rôle capital dans la distribution des sédiments. Par l'intermédiaire des houles dans les secteurs externes ou par le biais des clapots en partie interne de l'estuaire, l'agitation (particulièrement au cours des tempêtes de secteur ouest) est responsable de l'érosion des dépôts les plus compacts dans les faibles profondeurs. L'abondance de galets mous témoigne de cette érosion. Les dépôts vaseux remaniés peuvent être dispersés sous les courants associés à l'agitation et à la marée dans un délai très court, de l'ordre de quelques semaines.

## Les méthodes de reconnaissance des fonds de l'estuaire de la Seine

Plusieurs méthodes de reconnaissance de la couverture sédimentaire de la Seine ont été exploitées au cours du programme Seine-Aval. Elles comprennent des investigations directes par prélèvements de sédiments et l'application d'une méthode acoustique (méthode du sonar à balayage latéral). Plus localement, une visualisation des fonds grâce à l'imagerie vidéo a été entreprise. Quand elles ont été exploitées sur les mêmes sites, ces diverses méthodes se sont révélées parfaitement complémentaires.

Toutes les missions embarquées au cours de ces quatre années pour l'investigation sédimentologique ont été organisées grâce aux navires d'océanographie côtière de l'Insu/CNRS (navires *Côte de Normandie*, *Côte d'Aquitaine* et *Côtes de la Manche*), tous équipés d'un système de positionnement par satellites fonctionnant en mode différentiel (DGPS) et embarquant les moyens de prélèvements de sédiments.

### Les prélèvements de sédiments

Le mode de prélèvement des sédiments superficiels le plus ponctuel et le plus simple est la benne de type Shipeck. Son principe est celui d'un godet semi-cylindrique qui se ferme au contact du fond, en rotation autour d'un axe horizontal. Il permet l'échantillonnage de cubes de dimensions maximales de 20 x 20 x 20 cm, destinés aux analyses sédimentologiques de base. L'étude de la superposition des faciès et des structures sédimentaires ainsi que celle des paramètres géotechniques nécessitent en revanche, pour l'interface sédimentaire, l'utilisation d'un carottier-boîte court à volet, remaniant peu le sédiment. La boîte (30 x 20 x 10 cm) du carottier Reineck permet des sous-carottages sur le pont du navire (photo ci-dessous). Enfin, le prélèvement d'une épais-



seur importante de sédiments contraint à l'utilisation d'un carottier lourd. Il s'agit d'un carottier gravitaire à piston stationnaire de type Kullenberg (photo ci-dessous). Ce matériel nous permet de collecter des carottes dans des chemises en PVC (10 cm de diamètre, longueur comprise entre 1 m et 2,5 m) analysées ensuite au laboratoire.



### L'étude des fonds par sonar à balayage latéral

Le sonar à balayage latéral permet une cartographie rapide des fonds, en continu. Le principe est, à partir d'un appareillage tracté (le « poisson »), l'émission bilatérale d'ondes acoustiques (100 kHz) sous deux faisceaux obliques émis par des transducteurs\*. Les impulsions ultrasonores se propagent dans l'eau et sont réfléchies différemment sur les fonds, selon leur nature (tonalités sombres : sédiments grossiers, par exemple) ou selon leur morphologie (ombres soulignant les reliefs). Le signal rétrodiffusé aux transducteurs est enregistré et traité. Il est visualisé sur une bande d'enregistrement (le sonogramme) correspondant à une largeur balayée de 100 m de part et d'autre de l'axe du poisson (et du navire). L'image acoustique est comparable à une photographie du fond qui aurait été réalisée en vue oblique avec un éclairage rasant (voir figures 9 à 12 dans ce fascicule).

La campagne de reconnaissance au sonar latéral dans l'estuaire de la Seine s'est déroulée du 2 au 6 décembre 1996 inclus, conjointement par l'université de Caen-M2C et l'Ifremer Brest, Del/ec. Des relevés en passage montant (rive gauche) et en passage descendant (rive droite) ont permis d'obtenir un enregistrement de l'intégralité des fonds du chenal. Du fait de leur largeur parfois inférieure aux 400 m potentiels au total, certains tronçons présentent un recouvrement des deux enregistrements. L'étalonnage des images a été réalisé grâce à plus de 400 échantillons de sédiment prélevés par bennes et carottages.

### L'observation des fonds par vidéo sous-marine

Outre les faciès acoustiques classiquement observés en prospection marine, les sonogrammes des fonds de la Seine présentent des échos particuliers, qui ont dû être interprétés grâce à l'utilisation de la vidéo sous-marine.

Du fait de la turbidité\* et de la vitesse du courant en ce milieu estuarien, l'observation n'a pu être entreprise que dans l'estuaire amont, la caméra étant positionnée sur un bâti vertical pour une observation des fonds à une distance maximale de cinquante centimètres. L'information acquise, quelquefois des séquences très lisibles (photos 1 et 2, p. 21-22), parfois seulement quelques images fugitives, s'est révélée très précieuse pour l'identification de certains faciès chaotiques, certaines natures d'objets ou de figures sédimentaires.

## Conclusions et perspectives

Les études entreprises au cours du programme Seine-Aval sur la morphologie et la couverture sédimentaire de l'estuaire nous amènent à restituer les processus étudiés à une échelle de temps du jour à l'année, dans le fonctionnement global, à une échelle de temps allant du siècle ou plus de ce système sous forte influence anthropique.

À niveau marin relativement stabilisé, l'évolution de tout estuaire tend vers son comblement. La vitesse de ce comblement sédimentaire est fonction de plusieurs paramètres : (1) l'ampleur de l'incision antérieure au Flandrien induisant l'espace disponible initial, (2) les caractéristiques hydrodynamiques (notamment liées à la marée) qui conditionnent l'évolution morphologique, (3) le volume et la nature des apports solides d'origines continentale et marine. Comme pour la plupart des estuaires actuels, le comblement de la Seine aval dépend de ces différents facteurs. L'échelle de temps associée est alors de l'ordre de plusieurs milliers d'années.

L'intervention anthropique a toutefois largement influencé les tendances naturelles. Dans le cas de la Seine, l'aménagement a eu des conséquences croissantes depuis 150 ans. Comme souvent (Allen & Posamentier, 1993), l'essentiel du remplissage estuarien en aval de la vallée incisée est ici sableux. Le comblement historique de l'estuaire de la Seine résulte du déplacement vers l'aval du dépôt-centre sédimentaire, dû à la réduction de son volume depuis l'amont. Cette sédimentation vers la mer (ou progradation) a été considérablement accélérée par l'aménagement. L'échelle de temps de cette évolution devient alors de l'ordre du siècle ou moins.

Les endiguements et les dragages ont créé des zones latérales d'abri et diminué le volume oscillant, augmentant l'effet de chasse des débits fluviaux combinés avec les courants de jusant, dans le chenal de navigation. Le lieu principal de la sédimentation a donc progressivement suivi les aménagements vers l'embouchure actuelle.

En amont de Rouen, les sédiments sont principalement hérités du contexte géologique local associé au remaniement des formations de la terrasse alluviale de la Seine. La couverture sédimentaire de Poses à Rouen est relativement stable à une échelle de temps pluriannuelle, les aménagements et les dragages y étant assez limités. Les fluctuations saisonnières de la couverture sédimentaire des zones toujours immergées sont peu importantes et doivent être associées aux dépôts de crues et à leur remaniement ultérieur. Elles affectent surtout localement, mais de manière importante, les secteurs abrités de certaines berges (petites vasières latérales), de bras morts ou de chenaux secondaires limités par les îles, qui sont les lieux privilégiés des dépôts vaseux. L'étude saisonnière de petites vasières en amont de Rouen montre que les dépôts fins peuvent être en partie remaniés

et remis en suspension par les courants liés aux forts débits de crue. Le phénomène original mis en évidence est le suivant : lors des crues, les apports de particules décantent et engraisent les zones d'abri ; après la crue, ils sont soumis à une érosion partielle sous l'action des courants de marée (Guézennec, 1999).

Dans l'estuaire non salin en aval de Rouen, le fait essentiel est la minceur de la couverture sédimentaire actuelle sur des surfaces importantes. L'énergie hydrodynamique y est révélée par des formes sédimentaires typiques d'un conduit où les eaux sont canalisées en fonction des débits fluviaux et des cycles de marée. En relation avec l'épaisseur croissante du remplissage holocène vers l'aval, la couverture sédimentaire apparaît continue en aval de Caudebec, composée d'une grave de fond sur laquelle une couverture de sables mobiles apparaît, étirée et intermittente.

Dans l'estuaire aval, le comblement étant pratiquement achevé en amont de Honfleur (digue insubmersible en rive gauche, altitudes proches des niveaux de plus hautes mers en rive droite), la zone de dépôt des vases suit en surface la tendance au déplacement vers l'aval du dépôt-centre de la sédimentation sableuse. Les teneurs en particules fines des sédiments superficiels de l'embouchure sont en moyenne actuellement bien supérieures à ce qu'elles étaient il y a vingt ans. Ces particules peuvent couvrir près de 40 % de la surface de l'embouchure après les crues.

La zone d'accumulation (zone mobile) s'est déplacée au cours des vingt dernières années au voisinage de la longitude du Havre, construisant un delta de jusant sablo-vaseux en progradation vers les fonds de la baie de Seine orientale. Désormais, les vases se déposent dans les faibles profondeurs instables de l'embouchure, en fonction des taux d'apports solides et des conditions hydrodynamiques. La préservation temporaire d'une partie du sédiment fin est liée aux propriétés physiques des vases de l'estuaire de la Seine, qui tendent à acquérir rapidement leur cohésion après dépôt : la condition initiale nécessaire est une concentration suffisante en MES par rapport à la dynamique du milieu. Dans cette région naturellement dominée par la marée, les houles et les clapots prennent donc une importance accrue, en remaniant, dans certaines conditions, des quantités importantes de vases en cours de consolidation. Celles-ci réintègrent partiellement le matériel en suspension (le bouchon vaseux) et sont déplacées soit vers l'estuaire interne sous les courants de flot, soit vers la proche baie de Seine. Le cycle très complexe des particules fines dans cet estuaire à fortes marées ne permet pas encore d'établir le bilan quantitatif des vases en fonction de leurs origines (voir fascicule « Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension »). En un siècle et demi, l'estuaire de la Seine dans son ensemble est donc passé, en ce qui concerne le matériel vaseux, d'une

situation de puits (époque de l'estuaire « sauvage ») à une situation de conduit de transit et de stockage temporaire de plus en plus court. Dans une moindre mesure, les fonds latéraux de l'embouchure et les sédiments holocènes du chenal sont aussi une source de matériel fin pour les fonds marins adjacents. C'est le cas, sous l'agitation (houle, clapot) et la migration des chenaux de marée qui subsistent, de la vasière nord, formée de sédiments d'un âge supérieur à dix ans.

Dans les conditions d'environnement actuelles (apports sédimentaires et paramètres hydrodynamiques constants) et avec l'aménagement existant en 1999 (maintien des ouvrages en l'état, activités de dragages d'entretien à profondeurs constantes), l'évolution morphosédimentaire à l'échelle de plusieurs décennies est la poursuite de la progradation de l'estuaire vers l'ouest. Cette évolution suivra les tendances précédemment énoncées :

- soit avec : (1) un déplacement vers l'ouest des zones de dépôt préférentiel (lobes\* et bancs sableux) et de la décanation temporaire des vases (ce déplacement sera alors réduit du fait de l'élargissement de l'estuaire vers la baie de Seine), (2) une décroissance des sections mouillées\* de l'estuaire aval et éventuellement un raidissement des pentes des zones intertidales, du fait de leur accrétion en antagonisme avec la divagation de chenaux latéraux, (3) une progression des herbues vers le chenal principal et vers l'aval, précédant la continentalisation des zones bordières (vasière nord);

- soit en convergeant vers un état instable : la vase ne pouvant se consolider durablement dans les faibles profondeurs ouvertes à l'agitation (houles et clapots), il ne pourra pas s'établir vers l'aval de nouvelles vasières pérennes occupant la même fonction que l'actuelle vasière nord. Il est en effet probable que l'orientation de l'embouchure actuelle et celle du littoral normand vis-à-vis des houles dominantes s'opposeront à toute construction naturelle de barrière littorale sableuse susceptible de protéger des zones intertidales vaseuses comme c'est le cas, sous l'influence de la dérive littorale, pour d'autres estuaires plus petits de la côte basse-normande (par exemple l'Orne).

Parmi les principales conséquences de cette évolution, il faut envisager l'expulsion plus fréquente du bouchon vaseux en baie de Seine. Après une migration vers l'aval jusqu'en 1975, sa position moyenne semble s'être relativement stabilisée depuis la fin de la construction des endiguements, au début des années quatre-vingt. Depuis, sa situation a surtout changé en fonction des débits fluviaux. Les mesures des caractéristiques du bouchon vaseux (situation, concentration en MES, composition) réalisées au cours du programme Seine-Aval ne montrent pas de changement notable depuis cette dernière date, hormis durant les épisodes de tempêtes et les grandes vives-eaux où les concentrations sont accrues, du fait des remises en suspension des vases déposées.

On observe toujours une relation entre la position du bouchon vaseux et les zones de piégeage temporaire des matériaux fins, comme les vasières intertidales. Ainsi, à la diminution de la section d'embouchure devraient être associés :

- un plus faible temps de résidence des particules fines dans un espace estuarien au volume réduit et canalisé;
- la translation des masses turbides et des secteurs de dépôt des sédiments fins vers l'aval et vers la baie de Seine, induisant des apports accrus de vases au domaine marin, déjà perceptibles lors des périodes de crues et de vives-eaux;
- une très probable augmentation des envasements des fonds de la baie de Seine orientale, pouvant aboutir à des dépôts vaseux prenant la forme de placages dans les faibles profondeurs. Ce phénomène existe déjà de manière permanente à l'est du littoral du Calvados (Vasouy). Plus à l'ouest, ces placages seront d'abord temporaires, mais probablement favorisés en période estivale, en raison des conditions d'agitation statistiquement modérées.

Enfin, outre les conséquences environnementales soulignées précédemment, il faut envisager un accroissement de la sédimentation vaseuse dans les zones portuaires actuelles ou à venir qui aboutira à l'augmentation des dragages d'entretien, ce qui posera un problème d'environnement concernant leur rejet en mer ou leur réutilisation à terre.

### Références bibliographiques

- Outre les résultats des auteurs et collaborateurs acquis lors du programme Seine-Aval et publiés dans les rapports annuels thématiques, les études sur lesquelles s'appuie ce fascicule sont les suivantes.
- Alduc D., 1978. Évolution historique récente de l'estuaire de la Seine. Saum estuaire de la Seine, mission d'aménagement de la Basse-Normandie, 39 p., 4 cartes.
- Alduc D., Auffret J.-P., Carpentier G., Lautridou J.-P., Lefebvre D., Porcher M., 1979. Nouvelles données sur le Pléistocène de la basse vallée de la Seine et son prolongement sous-marin en Manche orientale. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris., 16 (2), 2, 27-34.
- Allen G.P., Posamentier H.W., 1993. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill : the Gironde estuary, France. J. Sediment. Petrol., 63, 378-391.
- Auffret J.-P., d'Ozouville L., 1986a. Cartographie du prisme sédimentaire holocène en baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition. In : La baie de Seine, (Greco Manche), Caen, avril 1985, Ifremer (éd.), 1986, Actes de colloques, 4, 109-116.
- Auffret J.-P., d'Ozouville L., 1986b. Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en baie de Seine. In : La baie de Seine, (Greco Manche), Caen, avril 1985, Ifremer (éd.), 1986, Actes de colloques, 4, 201-210.
- Avoine J., 1981. L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, université de Caen, 236 p.
- Avoine J. *et al.*, 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary: effects of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. Mar. Geol., 40.
- Avoine J., 1984. Évolution hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Seine. In : L'estuaire de la Seine, enjeux écologiques et économiques. Actes de colloques, Le Havre, 53-67.
- Avoine J., Crevel L., Dubrulle L., Boust D., Guéguéniat P., 1984. Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. Soc. Hydrol. Fr., XVIII<sup>e</sup> Journées de l'hydraulique, Marseille, I.3.1.-I.3.8.
- Avoine J., Crevel L., 1985. Influence des apports fluviaux en baie de Seine. In: La baie de Seine. (Greco Manche), Caen, avril 1985, Ifremer (éd.), 1986, Actes de colloques, 4, 125-134.
- Avoine J., 1987. Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. J. Geol. Soc. London, 144, 135-148.
- Avoine J., 1994. Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. Sédimentologie, rapport Ifremer-Pah, 154 p.
- Boust D., 1997. Étude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire de la Seine par l'analyse des radionucléides naturels et artificiels. Programme scientifique Seine-Aval, rapport 1996/FIN-1, thème Hydrodynamique et transport sédimentaire, 158-168.
- Costil K., Rybarczyk H., Boucht L., Gérard C., 1999. Le chenal de la Seine est-il azoïque? Recueil des résumés, séminaire scientifique Seine-Aval, Rouen, 9-10 mars 1999, 28 p.
- Cellule de suivi du littoral haut-normand (CSLHN), 1999. Étude sur la restauration et la création de vasières intertidales. Étude du port autonome du Havre, 98/4, 172 p.
- Delouis A., 1997. Les dragages en Seine. Bull. Liaison Progr. Sci. Seine-Aval, 1997, 7, 4-5.
- Dupont J.-P., 1997. Transferts particuliers du domaine continental au domaine marin épicontinental soumis à de fortes marées. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches, université de Rouen, 142 p., + annexes, 255 p.
- Dupont J.-P., Lafite R., Huault M.-F., Homméric P., Meyer R., 1994. Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (the Seine estuary, northwestern France). Mar. Geol., 120, 27-40.
- Germaneau J., 1968. Étude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine : origine, déplacement et dépôt des sables. Trav. Cent. Rech. Océanogr., VIII (1-2), 1-63.
- Germaneau J., 1969. Étude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine : origine, déplacement et dépôt des suspensions. Trav. Cent. Rech. Océanogr., IX (1-4), 1-100.
- Germaneau J., 1971. Sédiments actuels et sédiments fossiles dans la Seine maritime et dans la Seine fluviale. Trav. Cent. Rech. Océanogr., XI (1-4), 55-110.
- Guézennec L., 1999. Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). Thèse de l'université de Rouen, agence de l'Eau Seine-Normandie (éd.), 240 p.
- Joubert A., Lemoine M.-H., Rousselet D., 1994. La Seine : mémoire d'un fleuve. SER (éd.) - Parc naturel régional de Brotonne, 305 p.
- Laboratoire central d'hydraulique de France, 1973. Étude du littoral entre Le Havre et Antifer. Maisons Alfort, 38 p.
- Laboratoire central d'hydraulique de France et laboratoire national d'hydraulique, 1986. Catalogue sédimentologique des côtes de France : côtes de la mer du Nord et de la Manche. Eyrolles (éd.), 406 p.
- Larsonneur C., 1971. Manche centrale et baie de Seine : géologie du *substratum* et des dépôts meubles. Thèse d'État de l'université de Caen, 394 p.
- Larsonneur C., Homméric P., 1967. Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la baie de Seine. Rev. Soc. Sav. Haute-Normandie, Sciences, 47, 45-75.
- Lautridou J.-P. *et al.*, 1999. Le fleuve Seine, le fleuve Manche. Bull. Soc. Géol. Fr., 4, 545-558.
- Lefebvre D., 1977. Les alluvions holocènes de la Basse-Seine. Bull. Soc. Géol. Normandie et des amis du muséum du Havre, LXIV, 4, 73-74.

- Lefebvre D., Huault M.-F., Guyader J., Giresse P., Homméric P., Laronneur C., 1974. Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine : synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris., 39, 27-36.
- Migniot C., 1991. Les estuaires : étude comparative des caractéristiques géométriques, hydrauliques et sédimentologiques. Rapport LCHF-Sogreah, 160 p.
- Porcher M., 1977. Lithostratigraphie des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. L'estuaire de la Seine au Quaternaire. Bull. Soc. Géol. Normandie et des amis du muséum du Havre, XIV, 4, 181-201.
- Vigarié A., 1965. Les modalités du remblaiement alluvial dans l'estuaire de la Seine. Cah. Océanogr., XVII, 1, 301-330.
- Volmat M., 1929. Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22<sup>e</sup> Cah. Rech. Hydrol., 39 p.

## Glossaire

- Accrétion* : développement progressif d'une accumulation sédimentaire recevant constamment des apports nouveaux.
- Affouillement* : creusement dû aux remous et aux tourbillons d'un courant.
- Anodonte* : mollusque lamelibranche comprenant des espèces à grande coquille vivant dans des eaux douces tempérées.
- Barre (ici barre d'embouchure)* : accumulation sédimentaire due au dépôt de sable induit par le ralentissement du courant au débouché d'un rétrécissement (ici le chenal de navigation).
- Bassin versant* : aire où les eaux pluviales sont collectées par des affluents ou par des écoulements souterrains, en direction du fleuve principal.
- Bathymétrie* : équivalent sous-marin de la topographie, c'est-à-dire description du relief immergé grâce aux mesures de profondeurs.
- Bloc basculé* : masse de sédiment meuble basculant sous l'action de la gravité sur une pente ou une berge en voie d'érosion.
- Bouchon vaseux* : zone de turbidité maximale particulière aux estuaires, comprise entre des eaux douces peu chargées en matières de suspension à l'amont et les eaux salées marines. Sa situation n'est pas stable car il évolue au gré des conditions hydrologiques (débits, cycles de marée).
- Chambre de dépôt* : site de rejet de dragages à terre, limité par une digue et composé de remblais refoulés par voie hydraulique.
- Charriage* : mode de déplacement de particules sédimentaires en contact avec le fond de l'eau.
- Clapage* : vidange en mer des produits de dragage en un lieu réservé à cet effet.
- Clapot (ou mer de vent)* : état de la mer dans lequel l'agitation superficielle, engendrée par les vents locaux, est encore désordonnée (vagues inconstantes en hauteur, direction et période).
- Cobésion* : propriété des sédiments fins (sédiments cohésifs) liée aux forces de surface entre grains, leur permettant de résister à un courant d'entraînement.
- Continentalisation* : progression des caractères continentaux aux dépens de caractères marins.
- Coup de flot (ou mascaret)* : surélévation brutale du niveau de l'eau dans un estuaire peu avant la pleine mer, provoquée par la dissymétrie de l'onde de marée engendrant la formation d'une vague ou d'un train de vagues.
- Crème de vase* : mélange instable de vase et d'eau situé près du fond des chenaux estuariens en zone saline, associé au bouchon vaseux.
- Dépôt-centre* : lieu principal de la sédimentation sur un axe continent-domaine marin.
- Dérive littorale* : migration progressive le long du littoral de masses de sédiments sous l'action de houles obliques.
- DGPS* : mode de positionnement par satellite (Differential Global Positioning System).

*Diatomée* : algue microscopique marine ou lacustre à une coque siliceuse.

*Dreissène* : moule d'eau douce à valves zébrées, originaire d'Europe centrale.

*Enrochement* : protection d'un littoral ou d'un chenal réalisée grâce à l'accumulation de blocs de pierre ou de béton.

*Éolien* : qui a rapport au vent.

*Épi* : ouvrage appuyé sur une berge et disposé perpendiculairement à celle-ci, destiné à favoriser la sédimentation en sa partie amont.

*Estran* : étendue de terrain couverte à pleine mer et découverte à basse mer.

*Faciès* : ensemble de caractères permettant de classer un sédiment ou une roche par identification à l'œil nu.

*Flandrien* : étage marquant la dernière partie du Quaternaire, qui correspond à une transgression sur l'ensemble de l'Europe.

*Galet mou* : vase en voie de consolidation, découpée en morceaux et remaniée par les eaux.

*Géotechnique* : dans notre cas, qualifie une propriété du sédiment expliquant son comportement et pouvant être mise en relation avec les propriétés de la masse d'eau (voir cohésion).

*Gradient d'affinement* : tendance progressive à la diminution de la taille du grain d'un sédiment, dans un sens donné.

*Halophile (ou halophyte)* : qui croît dans des terrains imprégnés de sels.

*Herbu (ou marais maritime ou schorre)* : marais s'installant dans une aire submersible par pleine mer de vives-eaux, peuplé de végétation halophile.

*Hétérométrique* : pour un sédiment, décrit des tailles de particules très variables.

*Holocène* : période géologique se poursuivant actuellement et qui a débuté il y a 10 000 ans, au cours du plus récent réchauffement global du climat.

*Inaffouillable* : que l'eau ne peut creuser.

*Intertidal* : dans un régime de mers à marées, zone comprise entre la plus haute mer et la plus basse mer de vive-eau (zone de balancement des marées).

*Isobathe* : courbe joignant les points de même profondeur d'eau sur une carte bathymétrique (origine fixée pour le lieu, ici 0 CMH : zéro des cartes marines du Havre).

*Karstique* : associé à un ensemble calcaire affecté par des dissolutions, avec une circulation très rapide des eaux souterraines dans des fractures, des grottes.

*Levée sédimentaire* : amas naturel continu de sédiments grossiers en bordure d'un lit mineur ou d'un chenal.

*Litage* : disposition de roches sédimentaires en lits successifs distincts, centimétriques à décimétriques.

*Lobe tidal\** : forme particulière aux embouchures soumises à marées, dessinant une convexité vers le large.

*Macrotidal* : relatif à un milieu soumis à un marnage\* important (par convention > 4 m).

*Marnage* : dénivellation entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer. Le marnage maximal en un lieu est la dénivellation entre la plus haute mer et la plus basse mer.

*Matières en suspension ou MES* : ensemble des particules solides de petite taille transportées au sein de la masse d'eau.

*Médiane* : valeur statistique correspondant à la fréquence de 50 % ; du point de vue de la taille, permet de décrire par un chiffre la valeur granulométrique centrale.

*Mégaride* : ride aquatique de sables ou de graviers mise en place par un courant important (longueur d'onde comprise entre 0,60 m et plusieurs dizaines de mètres).

*Méridien* : dans l'estuaire aval, les repères sont fixés à l'aide d'un quadrillage kilométrique dont l'origine fut fixée au XIX<sup>e</sup> siècle au cap de La Hève. Les valeurs croissent vers l'est (ou méridien) et vers le sud. À titre d'exemple, Honfleur est situé au méridien +12.

*Morphosédimentaire* : ensemble des caractéristiques morphologiques et sédimentologiques caractérisant un lieu.

*Morte-eau* : marée d'amplitude la plus faible se produisant deux fois par mois (premier et dernier quartiers de lune).

*Musoir* : pointe extrême d'une digue ou d'un épi.

*Ophiure* : échinoderme caractérisé par un corps formé de disques articulés et de fins bras rayonnants.

*Paléo-lit* : ancien lit d'une rivière, souvent fossilisé par un remplissage de sédiments.

*Pérites* : particules les plus fines, de taille inférieure à 50 µm (silts et argiles).

*Pendage* : angle de plongement de la ligne de plus grande pente d'une couche géologique par rapport au plan horizontal.

*Périglaciaire* : proche des régions des glaciers, et étendu à d'autres régions marquées par l'action du gel dans l'évolution du relief ; adjectif principalement associé aux périodes froides, comme le Weichsélien.

*pk* : point kilométrique le long d'un fleuve ou d'un estuaire ; en Seine, c'est la distance mesurée vers l'aval à partir de l'ancienne écluse de la Monnaie à Paris.

*Plafond* : fond d'un chenal ou d'une rivière.

*Pléistocène* : partie inférieure et essentielle de l'ère quaternaire, comprise entre 2 millions d'années et 10 000 ans avant notre époque, comportant des alternances de froids intenses (glaciations) et de réchauffements (interglaciaires).

*Plomb suiffé* : ancienne méthode hydrographique permettant de sonder sur les fonds et de prélever du sédiment à l'aide d'un plomb creux enduit de suif pour en identifier la nature.

*Postglaciaire* : caractérise une formation géologique mise en place après la dernière période froide.

*Prisme sédimentaire* : ensemble des sédiments comblant une ancienne vallée (prisme alluvial ou estuarien) ou s'adossant au fond d'une baie (prisme littoral).

*Progradation* : processus selon lequel la sédimentation s'opère par déplacement latéral (superposition de couches nouvelles en pente sensible) depuis le continent vers la mer.

*Quaternaire* : ère géologique au cours de laquelle nous vivons et qui a débuté il y a environ deux millions d'années.

*Queue de comète* : accumulation de sédiments à l'arrière d'un obstacle.

*Relique* : témoin d'un état ancien du milieu.

*Ripisylve* : formation végétale ligneuse et herbacée en bordure de rivière qui joue le rôle de transition entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. Grâce à sa diversification, à ses caractéristiques protectrices, à sa richesse en matière organique, c'est une zone biologiquement riche.

*Ruban sableux* : forme sédimentaire due à une dynamique très importante, étirée dans le sens du courant dominant et reposant sur un *substratum* plus grossier ou rocheux.

*Schorre* : nom flamand des prés salés ou des marais maritimes, utilisé dans le langage morphologique des environnements littoraux tempérés.

*Section mouillée* : dans un chenal, surface mesurée perpendiculairement à l'axe de l'écoulement, limitée par les berges immergées, le fond et la surface de l'eau.

*Slikke* : mot flamand désignant, dans un estuaire ou une baie, une étendue de vase limitée vers le haut par le niveau de haute mer de morte-eau (où elle passe au schorre).

*Sonogramme* : enregistrement d'un sondage géophysique à l'aide d'un sonar à balayage latéral.

*Souille* : zone creusée pour le stationnement à quai d'un navire.

*Spectre granulométrique* : représente les différentes tailles des particules formant une suspension ou un sédiment.

*Substratum* : base sur laquelle repose une formation géologique ou des alluvions.

*Subtidal* : zone située au-dessous de la zone de balancement des marées et ne découvrant jamais à marée basse.

*Tardiglaciaire* : époque de la fin de la dernière période froide (entre 13 000 et 10 000 ans par rapport à notre époque).

*Tidal* : relatif à la marée.

*Traceur radioactif* : isotope radioactif introduit dans le milieu dont on peut suivre le déplacement.

*Transducteur* : organe qui convertit un phénomène physique en vue de sa transmission.

*Transgression* : avancée de la mer vers le continent, pouvant être due à une surélévation du niveau marin ou à une érosion du rivage.

*Tuf* : roche calcaire très poreuse et friable à aspect concrétionné associée à des sources (= travertin).

*Turbidité* : fait, pour l'eau, d'être chargée en particules solides en suspension qui augmentent la densité du mélange et réduisent sa transparence.

*Vapie* : nom local de la crème de vase. Matériel composé de vase très fluide associée à des sablons qui, très mobile, se dépose temporairement dans les fonds des chenaux de l'embouchure de la Seine.

*Vive-eau* : marée d'amplitude maximum correspondant aux périodes de pleine et de nouvelle lunes.

*Volume oscillant* : masse d'eau qui, dans un estuaire, se déplace alternativement vers l'amont puis l'aval sous l'influence de la marée.

*Weichsélien* : dernière période froide du Quaternaire comprise entre 115 000 et 10 000 ans avant notre époque.

*Zéro des cartes marines (ou zéro hydrographique)* : altitude de référence des cartes marines, fixée pour un lieu donné, en dessous des plus basses mers possibles (ici par référence au zéro des cartes du Havre, 0 CMH).

*Zone d'évitage* : espace nécessaire sur un plan d'eau pour le changement cap par cap d'un navire.

Réalisation, mise en page : XLC (02 98 30 50 07)

Achévé d'imprimer sur les presses de Cloître Imprimeurs

ISBN 2-84433-028-2 Programme Seine-Aval  
ISBN 2-84433-024-X / Dépôt légal 4<sup>e</sup> trimestre 1999

© 1999, Ifremer. Tous droits de reproduction, même partielle,  
par quelque procédé que ce soit, sont réservés pour tous pays.

Crédits photos : DGO université de Bordeaux, p. 29 - S. Lesourd, couverture, p. 33  
P. Lesueur, p. 17, 23 - J.-M. Mouchel, p. 15 - N. Poupinet, p. 21, 22.



## Laboratoires participants au programme Seine-Aval

### Cellule antipollution

- **Service de la navigation de la Seine**  
Île Lacroix  
71, avenue Chastellain  
76100 Rouen

### Cellule de suivi du littoral haut normand

16, quai Casimir Delavigne  
76600 Le Havre Cedex

### Cemagref

- **Division qualité des eaux**  
14, avenue de Saint-Mandé  
75012 Paris

### Cergrene

- **École nationale des ponts et chaussées**  
6-8, avenue Blaise Pascal  
Cité Descartes Champs/Marne  
77455 Marne-la-Vallée Cedex 2

### CHU Rouen

- **Laboratoire de virologie**  
1, rue de Germont  
76031 Rouen Cedex

### CIG - École des Mines de Paris

- **Centre d'informatique géologique**  
35, rue Saint-Honoré  
77305 Fontainebleau

### Ifremer

Direction de l'environnement  
et de l'aménagement littoral

- **Département Del/EC**  
BP 70  
29280 Plouzané
- **Département Del/PC**  
BP 21105  
44311 Nantes Cedex 3
- **Département Del/PC**  
BP 330  
83507 La Seyne/Mer Cedex

### IPSN

- **Laboratoire d'études radio-écologiques de la façade atlantique**  
Rue Max-Pol Fouchet - BP 10  
50130 Octeville

### Muséum national d'histoire naturelle

- **Laboratoire de biologie des invertébrés marins et malacologie**  
57, rue Cuvier  
75231 Paris Cedex 05

### Parc naturel régional de Brotonne

- **Mission patrimoine naturel**  
Maison du Parc  
76940 Notre-Dame-de-Bliquetuit

### Université de Caen

- **Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière - UPRES - A 6143 CNRS**
- **Groupe ornithologique normand (GONm)**
- **Laboratoire de biologie et biotechnologies marines**  
Esplanade de la Paix  
14032 Caen Cedex

### Université du Havre

- **Laboratoire d'écotoxicologie**  
25 rue Philippe Lebon,  
BP 540  
76600 Le Havre Cedex
- **Laboratoire de mécanique**  
Centre havrais d'études  
et de recherche  
Quai Frissard - BP 265  
76055 Le Havre Cedex
- **Cirtai**  
BP 1123  
76063 Le Havre Cedex

### Université de La Rochelle

- **Laboratoire de biologie et biochimie**  
**Pôle sciences et technologie**  
Avenue Marillac  
17042 La Rochelle Cedex 1

### Université libre de Bruxelles

- **Groupe de microbiologie des milieux aquatiques**  
Campus de la Plaine  
CP 221  
B 1050 Bruxelles

### Université de Lille

- **Laboratoire de chimie analytique et marine UPRES - A 8013 ELICO**  
Bâtiment C 8  
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
- **Station marine de Wimereux UPRES - A 8013 ELICO**  
28, avenue Foch  
BP 80  
62930 Wimereux

### Université Pierre et Marie Curie

- **Laboratoire d'hydrobiologie**  
12, rue Cuvier  
75005 Paris
- **Laboratoire CNRS - UMR Sisyphe 7619**  
4, place Jussieu, tour 26, 5<sup>e</sup> étage  
75005 Paris
- **Institut d'hydrologie et de climatologie**  
**Laboratoire de chimie analytique**  
4, place Jussieu, boîte courrier 122  
75252 Paris Cedex 5

### Université de Rennes 1

- **Laboratoire de zoologie et d'écophysologie**  
**UA INRA et UMR 1853 du CNRS**  
Campus Beaulieu  
Avenue du Général Leclerc  
35042 Rennes Cedex

### Université de Rouen

- **Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière - UPRES - A 6143 CNRS**
- **Laboratoire de microbiologie du froid**
- **Laboratoire de biologie végétale et écologie**  
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex



### 3 ▸ Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique

Ce fascicule présente le cadre du programme Seine-Aval, en faisant le bilan des connaissances actuelles sur la morphologie et la couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. L'environnement géologique et les différentes sources de particules sédimentaires composant les fonds de l'estuaire sont rappelés. La morphologie de l'estuaire est caractérisée en prenant en compte son évolution séculaire, influencée par l'aménagement pour la navigation et le gain des terres. La couverture sédimentaire est ensuite caractérisée ou mise à jour, en privilégiant l'étude des vases. Au total, plus de deux mille échantillons de sédiments ont été analysés, complétés par des campagnes d'imagerie acoustique (sonar latéral) et de vidéo sous-marine. L'évolution à long terme (échelle du siècle) et à court terme (échelle inférieure à l'année) de la couverture sédimentaire est décrite et interprétée et une prospective sur la possible évolution morphodynamique de l'estuaire est envisagée.

*This fascicle presents the frame of the environmental studies undertaken into the Seine-Aval Programme. Its aim is to describe the present-day knowledge of geomorphology and sediments distribution in the studied area. The geological setting and the different sources of sediment particles that form the channels bottom and the banks of the estuary are summarized. The morphology of the estuary is described, including its secular evolution, taking into account the training works for sailing and reclamation marshes. The actual sedimentary covering is then characterized or revised, giving a large place to the fine-grained sediments. More than two thousand samples of superficial sediments (grabs and cores) and sonar lateral and underwater-video investigations have been analysed. Changes in surface sediments distribution are described and interpreted, including the secular time-scale and the seasonal time-scale variations. A conditional prospective on the morphodynamical evolution of the Seine estuary is finally proposed.*

**Cette collection présente l'ensemble des résultats du programme Seine-Aval. Chaque fascicule de cette collection a été élaboré de manière à pouvoir être lu indépendamment des autres.**

Chaque année, l'essentiel de l'information scientifique produite est consigné dans des rapports thématiques et de synthèse pouvant être consultés auprès de la cellule de coordination du programme :

#### **Programme Seine-Aval**

Université de Rouen (Régis Hocdé)  
Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière  
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex  
e-mail : regis.hocde@univ-rouen.fr  
tél. 33 (0)2 35 14 65 27 - fax 33 (0)2 35 14 70 22



programme scientifique  
**Seine-Aval**

- 1 - Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes
- 2 - Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau
- 3 - Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique**
- 4 - Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension
- 5 - L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique
- 6 - Contaminations bactérienne et virale
- 7 - Patrimoine biologique et chaînes alimentaires
- 8 - La contamination métallique
- 9 - Fer et manganèse : réactivités et recyclages
- 10 - Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire
- 11 - La dynamique du mercure
- 12 - Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir
- 13 - Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant ?
- 14 - Des organismes sous stress
- 15 - Zones humides de la basse vallée de la Seine
- 16 - Les modèles : outils de connaissance et de gestion
- 17 - La résistible dégradation d'un estuaire

Région Haute-Normandie  
25, boulevard Gambetta, BP 1129,  
76174 Rouen Cedex, France  
tél. 02 35 52 23 31 - fax 02 35 52 22 38

Agence de l'Eau Seine-Normandie  
51, rue Salvador-Allende  
92027 Nanterre Cedex  
tél. 01 41 20 16 00 - fax 01 41 20 16 89

Éditions Ifremer  
BP 70, 29280 Plouzané, France  
tél. 02 98 22 40 13 - fax 02 98 22 45 86  
e-mail : editions@ifremer.fr

**Diffusion : ALT Brest  
Service Logistique  
3, rue Edouard Belin  
BP 23 29801 Brest Cedex 9  
tél. 02 98 02 42 34 - fax 02 98 02 05 84**

ISBN 2-84433-028-2 Programme Seine-Aval  
ISBN 2-84433-024-X  
**45 F - 6,86 €**



9 782844 330246