

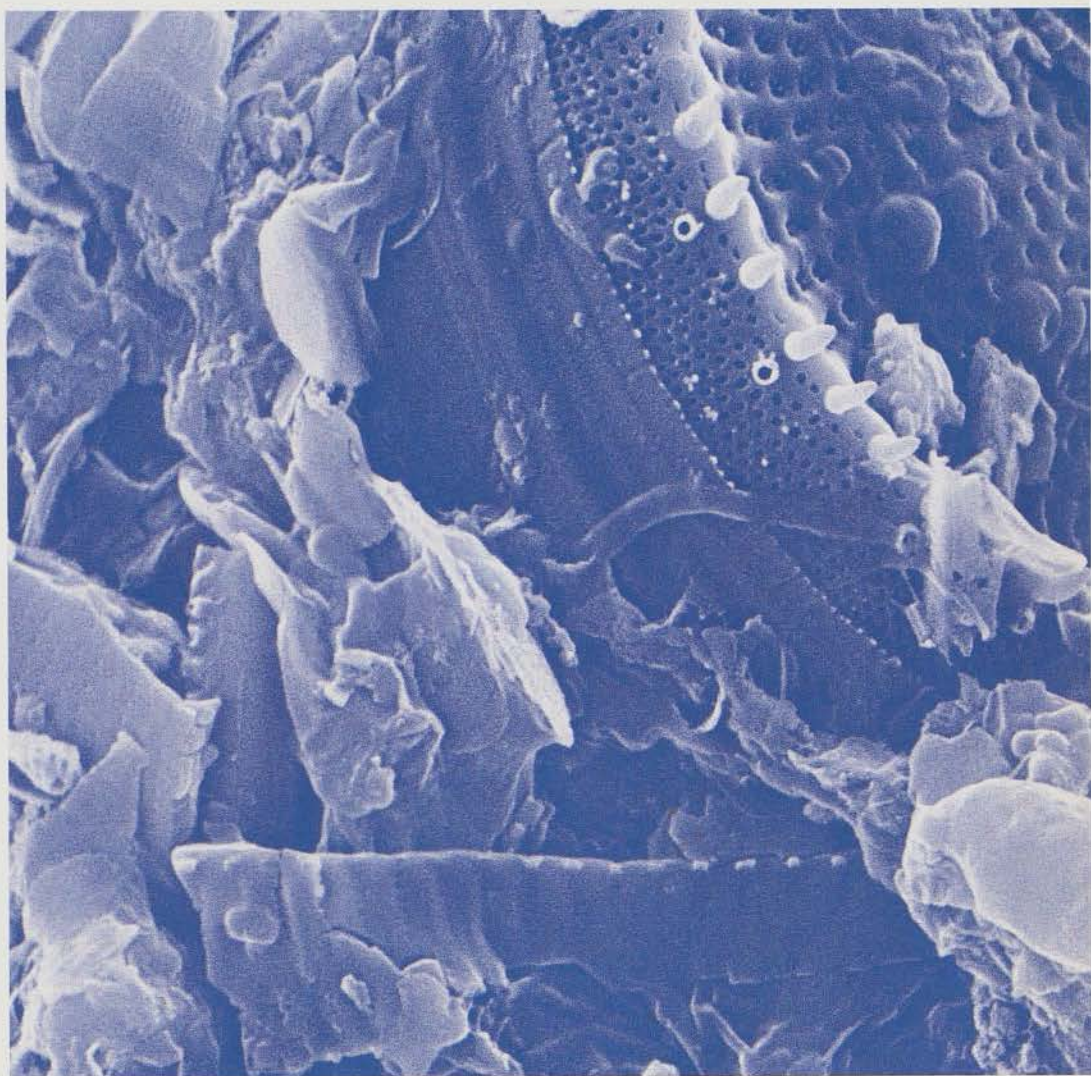
Programme scientifique Seine-Aval

4 • Matériaux fins

Le cheminement des particules en suspension

Coordinateur
Jean-Paul Dupont

4 - Matériaux fins : le cheminement
des particules en suspension



4

Programme scientifique
Seine-Aval



Ifremer



570
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-Ardenne, 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



Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension

Coordinateur : Jean-Paul Dupont⁽¹⁾

Auteurs : Jean-Paul Dupont, Loïc Guézennec⁽²⁾,
Robert Lafite⁽¹⁾, Pierre Le Hir⁽³⁾, Patrick Lesueur⁽⁴⁾

Contributions : Isabelle Brenon⁽⁵⁾, Ricardo Silva Jacinto⁽³⁾,
André Ficht⁽⁶⁾, Sandric Lesourd⁽⁴⁾, Jean-Marie Mouchel⁽⁷⁾,
Fabienne Petit⁽⁸⁾, Irène Zimmerlin⁽¹⁾

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

(2) Agence de l'Eau Seine-Normandie

(3) Ifremer Brest, Del/ec

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

(5) Université de La Rochelle, laboratoire de biologie et biochimie

(6) Cellule antipollution, service de la navigation de la Seine

(7) Cergrene, école nationale des ponts et chaussées

(8) Université de Rouen, laboratoire de microbiologie du froid

Sommaire

Introduction	3	Chapitre III - Modification du transfert fluvial par la marée dynamique dans l'estuaire amont	20
Chapitre I - Les matières en suspension : définitions, origines et comportements	5	Les transferts particuliers en période d'étiage	20
La quantification des matières en suspension	5	L'hétérogénéité spatio-temporelle de la répartition des matières en suspension au cours du cycle semi-diurne de marée	20
Les apports du bassin versant	5	Les fluctuations à l'échelle des cycles semi-lunaires et lunaires	21
Les produits du bassin versant continental amont	5	Les pulsations semi-lunaires des flux particuliers	21
Les fluctuations des apports du bassin versant amont	6	Le transfert du flux particulaire de la crue	23
Les matériaux du bassin versant estuarien	8	Les vasières de l'estuaire amont et le piégeage des dépôts de crue	23
La production biologique, source de matériel particulaire	9	L'évolution amont-aval du pic de turbidité lié à la crue	23
Importance de la production biologique en tant que source de matériel particulaire	9	Les bilans de transfert des flux particuliers liés à la crue	24
Rôle des organismes dans la biotransformation des matières en suspension	10	La remontée de matériaux provenant de l'aval sous le contrôle du pompage tidal	25
Les paramètres mesurés de la diversité du matériel en suspension	11	La mesure des flux dissous et particuliers	25
Taille et nature des matières en suspension	11	Les remontées de particules marines observées au moyen de radiotraçeurs	26
La vitesse de chute : un paramètre fondamental du transport des particules en suspension	12	Synthèse des bilans d'échange de matériaux en suspension entre l'estuaire amont et l'estuaire moyen	27
Les traceurs des apports particuliers	13	Chapitre IV - Dynamique des matières en suspension dans l'embouchure	28
Les informations fournies par les particules	13	Cadre hydrodynamique de l'estuaire moyen	28
Les radionucléides en tant que traceurs géochimiques	14	Les processus de concentration des matériaux fins	28
Chapitre II - Les facteurs hydrodynamiques du transport des matériaux fins dans l'estuaire	15	Le bouchon vaseux d'embouchure	29
Les mécanismes hydrosédimentaires de l'estuaire	15	Les observations de crème de vase (vapies) dans le chenal de navigation	30
Les paramètres mécaniques du déplacement des particules	15	L'impact du forçage hydrodynamique lié aux tempêtes	30
Les facteurs hydrodynamiques de l'estuaire	15	Les processus hydrosédimentaires	30
Les fluctuations des matières en suspension dans la colonne d'eau	15	L'importance de l'érosion liée aux tempêtes dans les bilans de transfert des matériaux	30
L'origine des concentrations turbides de type bouchon vaseux	16	Les cycles de transfert des matériaux fins dans l'embouchure	30
L'intrusion saline et les processus de concentration turbide	16	Conclusions	35
Le bouchon vaseux associé au point nodal hydrodynamique de circulation des masses d'eaux	18	Les acquis et les interrogations dans l'estuaire amont	35
Les concentrations turbides liées à l'asymétrie de la marée	18	L'évolution des connaissances dans l'estuaire soumis à l'intrusion saline	36
		Références bibliographiques	37
		Glossaire	38

Introduction

Le développement des activités humaines dans les basses plaines alluviales* et les secteurs estuariens est à l'origine d'aménagements (voir fascicules « Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes » et « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique ») qui modifient le contexte hydrodynamique* (voir fascicule « Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau ») et les processus de transfert des matériaux en suspension dans l'eau. Puisqu'ils restent dans la colonne d'eau et par opposition aux sables qui transitent sur le fond (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique »), les matériaux concernés sont de taille généralement inférieure à 100 μm et correspondent aux éléments fournis par l'érosion des sols, la production biologique et les activités humaines dans l'ensemble du bassin versant.

Ces éléments fins sont le support de nombreux contaminants chimiques (Martin *et al.*, 1976). Le devenir des contaminants provenant du bassin versant est donc directement dépendant des processus de transfert auxquels ces particules supports sont soumises dans l'estuaire.

Connaître le cheminement des particules en suspension, c'est aussi comprendre le devenir de nombreux contaminants. Cela constitue l'objectif fondamental de ce fascicule qui fait le point sur la diversité des matériaux (en taille et en nature) et leur comportement mécanique (capacité de dépôt ou de remise en suspension, voire de maintien en suspension) dans le cheminement hydrodynamique des masses d'eau au sein de l'estuaire.

Meybeck *et al.* (1998) ont explicité les difficultés de l'étude du transfert des matières en suspension (MES) dans le domaine fluvial de la Seine. Elle doit en effet faire intervenir :

- les spécificités du comportement hydrologique* des sous-unités du bassin versant ;
- les nombreux relais de transport dans le système fluvial (bas de pente, plaine inondable, lit fluvial) ;
- les mécanismes d'agrégation*, de dépôt et de resuspension ;
- les processus géochimiques liés au contexte géomorphologique, aux activités humaines et à leurs effluents.

Dans le domaine estuarien, nous retrouvons les mêmes problèmes hydrosédimentaires* et des difficultés supplémentaires :

- l'inversion cyclique plus ou moins marquée du sens des écoulements en fonction de la marée et du débit fluvial ;
- l'introduction d'aval en amont de matériaux provenant des domaines marins adjacents ;
- les apports non négligeables d'un bassin versant estuarien qui est particulièrement urbanisé et industrialisé (fig. 1).

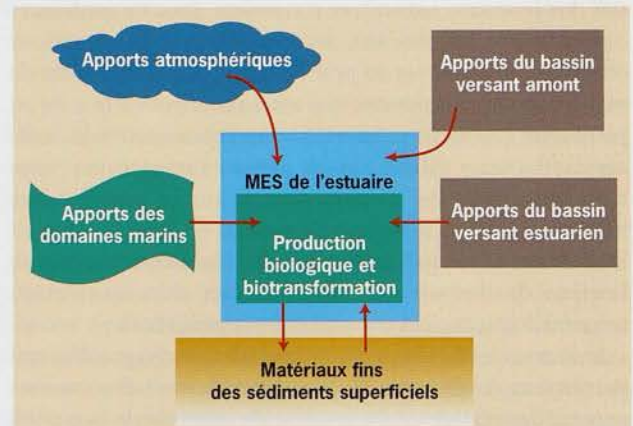


Figure 1 - Origines des matières en suspension de l'estuaire (détails dans le chapitre I de ce fascicule).

Dans le cadre des bilans de transfert des matières en suspension dans l'estuaire, nous bénéficions notamment des données fournies par le programme CNRS Piren Seine (Meybeck *et al.*, 1998) sur le comportement du bassin versant amont et du suivi quantitatif réalisé au niveau du barrage de Poses, limite amont de l'estuaire de la Seine (données SNS*). Les études hydrosédimentaires réalisées dans le cadre du programme Seine-Aval se sont principalement attachées à étudier :

- les modifications engendrées par la marée sur les processus de transfert des matériaux du bassin versant dans le domaine fluvial soumis à la marée dynamique (estuaire amont) ;
- les mécanismes de concentration et de piégeage des matériaux fins plus ou moins contaminés dans l'embouchure ;
- les processus de circulation et de mélange entre les apports continentaux et marins dans la partie estuarienne qui se révèle être soumise à l'intrusion saline.

Deux approches méthodologiques sont menées en parallèle et de façon interactive :

- les mesures de terrain couplées à des analyses complémentaires au laboratoire ;
- la modélisation numérique des processus hydrosédimentaires de transfert des matériaux fins.

La première a pour but d'identifier et de quantifier les processus mais se heurte à des difficultés pour intégrer les mesures dans l'espace et le temps afin d'établir les bilans de transfert.

(*) expliqué dans le glossaire.

La seconde est basée sur l'utilisation des lois de la mécanique des fluides appliquées au transport particulaire*. Ces équations utilisées dans les codes de calcul sont nécessairement réductrices par rapport à la complexité et à la diversité des processus naturels et il convient donc de confronter constamment les résultats des modèles avec les situations observées *in situ*. C'est au prix de cette longue démarche de validation des simulations que nous aboutirons à la mise en place d'un bon outil prédictif permettant de tester le devenir d'effluents « solides » et de prévoir l'impact de projets d'aménagement ou de restauration sur le transfert des matériaux fins.

Dans le domaine de l'application des résultats à la compréhension du devenir des contaminants chimiques et/ou microbiologiques, ces travaux ont pour objectifs :

- de décrire les hétérogénéités spatiales et temporelles qui permettent de discuter de la représentativité des mesures ponctuelles réalisées dans le cadre du contrôle de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine ;
- de quantifier les temps de transit, les taux de mélange ;
- d'identifier les zones de piégeage qui peuvent devenir des sources dans les flux de matériaux contaminés entre les divers compartiments du domaine estuarien.

Il faut, en outre, être attentif aux interactions entre ces paramètres physiques et la vie dans l'estuaire. Les matières en suspension constituent à la fois :

- une perturbation de la production primaire* par diminution de la transmission des rayons lumineux dans la colonne d'eau ;
- un support (abri et source trophique) au développement et à la survie de nombreux microorganismes, y compris les souches pathogènes et les microorganismes bioindicateurs de la présence des précédentes (Le Guyader, 1989 ; Pompey *et al.*, 1992 et travaux Seine-Aval, voir fascicule « Contaminations bactérienne et virale ») ;
- une source de nourriture pour les organismes consommateurs qui vivent dans la colonne d'eau et sur le fond (voir fascicule « Patrimoine biologique et chaînes alimentaires ») ;
- une source de production et/ou de biotransformation du matériel particulaire par les organismes dans les milieux estuariens.

Ces processus trophiques (chaînes alimentaires) induisent des modifications de nature, de texture et de comportement hydrodynamique des particules en suspension qui peuvent jouer un rôle non négligeable dans les bilans de transfert hydrosédimentaire et le devenir des contaminants dans l'estuaire.

Chapitre I

Les matières en suspension : définitions, origines et comportements

La quantification des matières en suspension

Selon les normes d'analyse, les concentrations de matières en suspension (MES) sont définies par une filtration sur membrane de porosité 0,45 μm puis une pesée après dessiccation et élimination du sel (dans les secteurs soumis à l'intrusion saline). C'est un concept méthodologique simple mais les résultats peuvent toutefois être différents selon l'échantillonnage, le mode opératoire (type de membrane et quantité filtrée en fonction de la concentration de matériaux dans l'eau analysée) et la nature des matériaux. Parallèlement, les méthodes optiques fournissent des mesures de la turbidité* qui peuvent être développées au laboratoire sur les prélèvements mais aussi au moyen de sondes qui permettent des mesures *in situ*. Selon les dispositifs, les mesures sont réalisées sur la quantité de lumière (lumière blanche ou infrarouge) transmise (transmissométrie), diffusée à 90° (turbidimétrie) et/ou rétrodiffusée par les particules en suspension selon plusieurs directions de mesure (néphélométrie). Les gammes de concentrations mesurables sont différentes en fonction des dispositifs. La mesure de la turbidité et la quantification pondérale des MES sur les mêmes échantillons d'eau permettent la réalisation d'une calibration directe entre ces deux paramètres

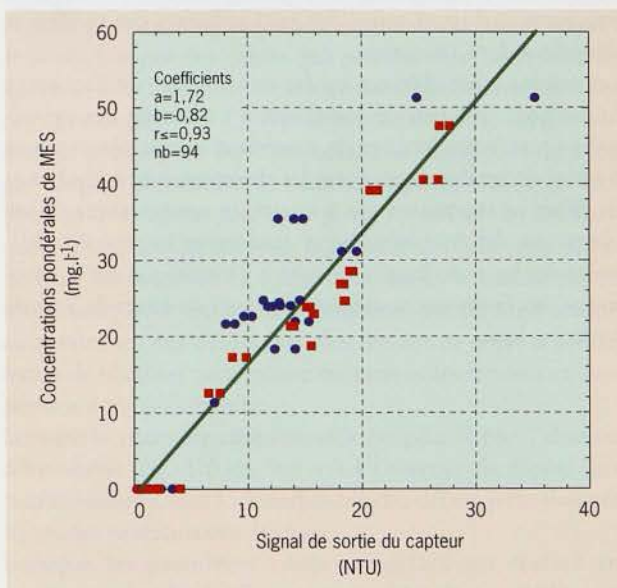


Figure 2 - Exemple de mesure de la relation MES/turbidité (ou néphélométrie) : suivi à Val-des-Leux, mars 1997 (d'après Guézennec, 1994). La relation reste bonne malgré des modifications de la nature des matières en suspension (■ : échantillons riches en diatomées* ; ● : échantillons plus minéraux).

(fig. 2) et la transcription des mesures et enregistrements optiques en concentrations pondérales de matières en suspension.

La mise en place de stations de mesure *in situ* de la turbidité permet d'enregistrer les fluctuations temporelles locales de la charge particulaire* en fonction des variations des paramètres hydrodynamiques. Cela a constitué une démarche forte du programme Seine-Aval. Les enregistrements *in situ* en station fixe ont fait apparaître les conséquences hydrosédimentaires des cycles semi-diurnes*, diurnes, semi-lunaires et lunaires ainsi que celles du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Seine (fluctuation des débits et des apports de matériaux au cours des alternances crue*-étiage*) et du cycle saisonnier des processus biologiques.

Parallèlement, les enregistrements verticaux et horizontaux de turbidité dans la colonne d'eau permettent de quantifier les fluctuations spatiales de la répartition des MES dans le contexte géomorphologique des écoulements.

Les analyses complémentaires du carbone organique particulaire* (COP) et des pigments photosynthétiques* (également mesurables *in situ* par la fluorimétrie*) ont permis de différencier la part organique et la contribution de la production primaire.

Les apports du bassin versant

Les produits du bassin versant continental amont

La Seine draine la plus grande part du Bassin parisien avec un bassin versant de 78 650 kilomètres carrés. Il est caractérisé par des reliefs peu accusés et une part importante de substrats calcaires plus ou moins fissurés.

Ce contexte géomorphologique et le climat de type tempéré à influence océanique sont à l'origine :

- d'un débit faible par rapport à la superficie du bassin versant comparativement à celui des autres grands fleuves français (tableau) et, plus encore, au niveau mondial ;
- d'un taux d'érosion mécanique très faible (8,1 t.km².an⁻¹) qui se solde par de faibles apports de matériaux en suspension dans l'estuaire ;
- d'un rapport « charge particulaire/charge dissoute* » faible.

Les eaux de la Seine se distinguent également par leur richesse en matières organiques (COT du tableau) avec des concentrations de 2 à 100 fois plus élevées que dans le cas de la plupart des grands fleuves mondiaux. Le carbone organique particulaire y représente en moyenne 62 % du carbone organique total* contre 50 à 55 % pour les autres fleuves français et 45 % en moyenne pour les grands fleuves mondiaux.

Comparaison des bilans de transfert des grands fleuves français.

Fleuve	Superficie 10 ⁶ km ²	Débit liquide km ³ .an ⁻¹	Débit solide 10 ⁶ t.an ⁻¹	Taux d'érosion t.km ² .an ⁻¹	COT 10 ⁶ t.an ⁻¹
Rhône	0,10	53,6	3,3	33	0,12
Loire	0,12	27,0	1,5	12,5	0,11
Garonne + Dordogne	0,08	24,1	2,2	27,5	0,19
Seine	0,08	13,0	0,65	8,1	0,05

En crue, les matériaux fins de l'estuaire de la Seine proviennent principalement du bassin versant continental (66 870 km²) situé en amont du barrage de Poses (fig. 3). Ils correspondent aux produits de l'érosion mécanique des sols, cultivés ou non, et du lit fluvial.

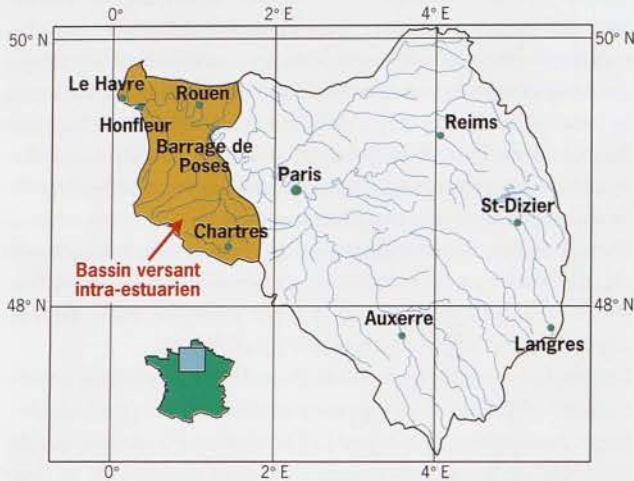


Figure 3 - Carte du bassin versant incluant la partie strictement continentale en amont de Poses et le bassin versant estuarien.

La couverture limoneuse des formations superficielles du bassin de Paris fournit la majorité des éléments minéraux (particules siliceuses de la taille des silts* ou des limons*, comprise essentiellement entre 5 et 30 µm, photo 1). Les matières organiques proviennent à la fois du lessivage des sols et de l'activité humaine (rejets du traitement des eaux usées, en particulier de l'agglomération parisienne). Cette dernière est aussi la cause principale d'un apport de microorganismes et d'un flux de nutriments qui favorisera à la fois le développement d'une microflore bactérienne adaptée et l'émergence temporaire de blooms phytoplanktoniques*. Les faibles débits, les pentes douces et les aménagements du lit fluvial (barrages, écluses...) expliquent la quasi-absence des apports sableux actuels du fleuve.

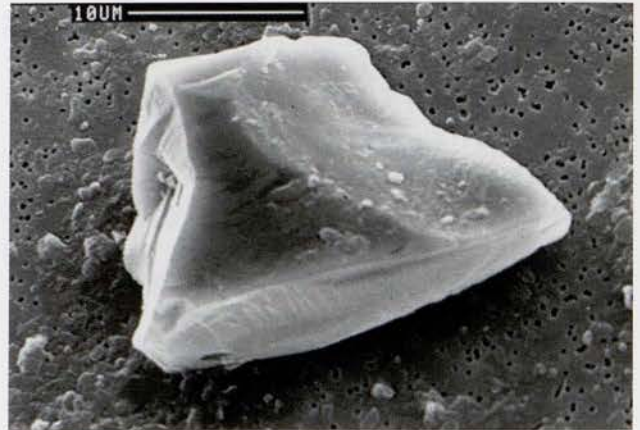


Photo 1 - Grain de quartz (d'environ 20 µm de long) de la couverture limoneuse.

Les fluctuations des apports du bassin versant amont

L'enregistrement simultané à Poses des débits et des turbidités (exprimées en mg/l de MES) souligne l'augmentation des concentrations pondérales avec les débits sans qu'il y ait une véritable proportionnalité entre ces deux paramètres. Le produit des deux fournit un flux des matières en suspension exprimé en tonnes par jour (fig. 4).

Dans le bassin versant amont, Meybeck *et al.* (1998) ont montré que 75 à 80 % des MES sont transférées lors des montées de crue. Ces apports aboutissent à l'entrée du système Seine aval (Poses) pendant une période n'excédant guère le quart de l'année tandis que, au niveau des ruisseaux du bassin versant amont, les flux particuliers de crue sont concentrés en épisodes très courts dont la somme ne représente que 1 à 2 % du temps annuel. Cela traduit l'existence de nombreux relais de transport des MES dans le système fluvial (bas de pentes, plaine inondable, lit fluvial). Des processus analogues, amplifiés par l'influence des marées, se déroulent dans l'estuaire.

Les faibles crues d'étiage en été et au début de l'automne fournissent très peu de matériaux à l'estuaire. Les principales crues « productives de matériaux » sont observées en hiver mais les décalages entre les chroniques de turbidité et de débit ne répondent pas à une règle systématique. Nous observons des hystérésis* qui traduisent la réponse sédimentologique du bassin versant à l'historique de la chronique des événements météorologiques au cours de l'année hydrologique.

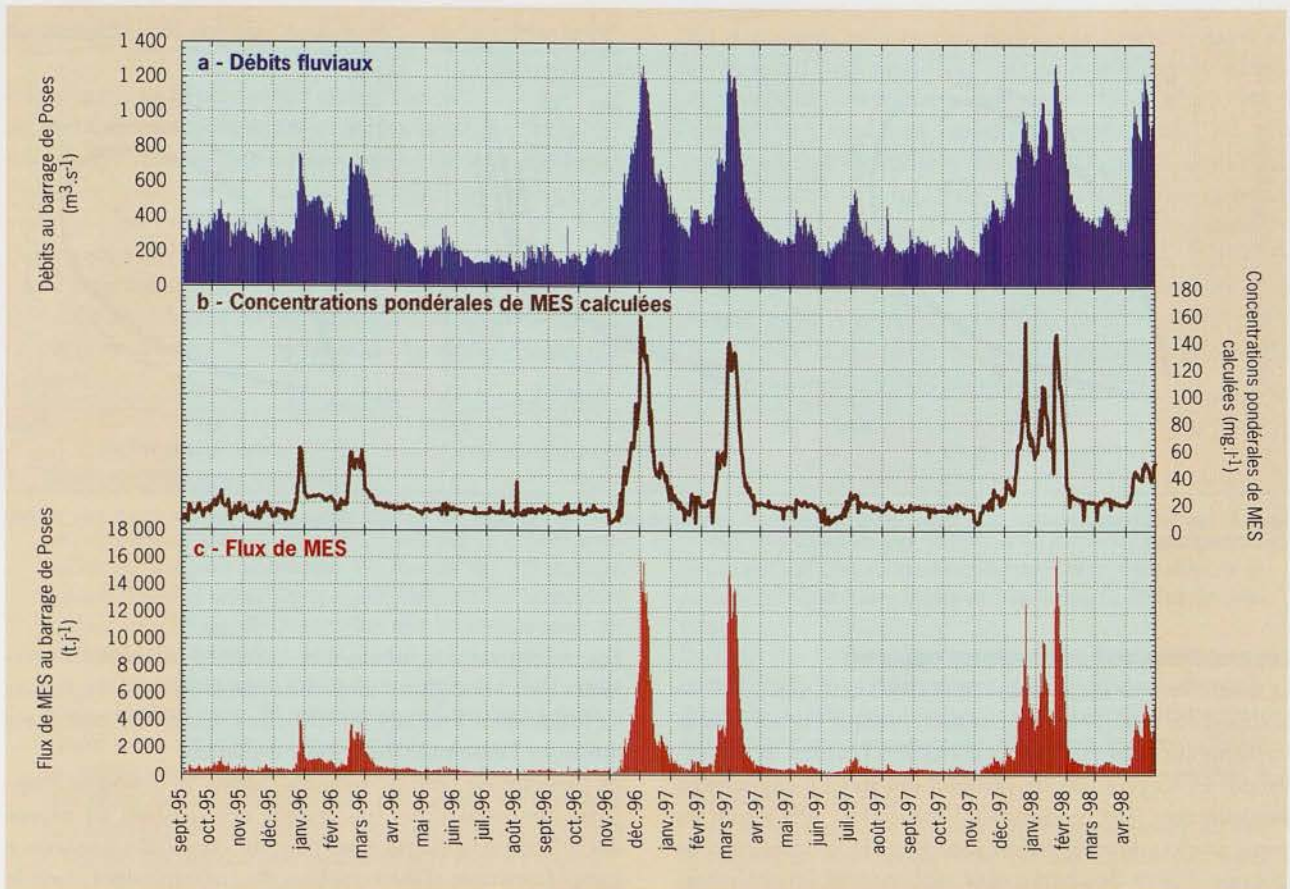


Figure 4 - Évolution quotidienne (a) des débits fluviaux, (b) des concentrations pondérales de MES calculées et (c) des flux de MES au barrage de Poses (pk* 202,00) entre le 1^{er} septembre 1995 et le 30 avril 1998 (données SNS).

Lorsque la première grande crue correspond à une longue période pluvieuse répartie sur l'ensemble du bassin versant et se traduit par des débits qui peuvent être supérieurs ou égaux à $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nous observons des hystérésis dites rétrogrades (fig. 5a). Ce type d'hystérésis révèle un accroissement plus rapide des concentrations pondérales de MES par rapport aux débits. Il s'explique par la remise en suspension des dépôts fins dans le lit fluvial et sur les banquettes latérales au cours de la montée des débits en début de crue. Cette remise en suspension locale est suffisamment importante pour masquer le deuxième pic de MES associé au maximum des débits liquides. En fin de crue, la source locale de matériel particulaire est tarie et les remises en suspension sont plus faibles.

Lorsque la première crue annuelle est plus faible, l'absence d'hystérésis (fig. 5b) est liée soit à l'absence de dépôts fins remobilisables, soit à l'insuffisance des débits pour évacuer les stocks particuliers déposés.

Lorsque les premières crues annuelles ont réalisé un « curage » des dépôts fins remobilisables dans le lit fluvial, les crues ou les augmentations de débits suivantes provoquent des hystérésis dites orthogrades (fig. 5c). Cette relation

charge solide-débit liquide s'explique par un déphasage entre l'onde de crue qui affecte les masses d'eaux et le transfert plus lent des matériaux de l'érosion du bassin versant.

Avant la date de démarrage des enregistrements de turbidité à Poses (1995), nous ne disposions que de mesures bimestrielles de MES et l'évaluation des flux était réalisée au moyen d'un calcul qui tentait de modéliser une relation discutable entre les débits et les concentrations de MES (voir p. 25 « Calcul des flux particuliers amont »).

Depuis lors, l'utilisation des enregistrements conjoints de débit et de turbidité pour l'estimation des flux particuliers et les mesures ponctuelles de MES fournissent des flux particuliers satisfaisants qui peuvent être introduits dans les modèles. Il reste toutefois nécessaire :

- de confirmer la qualité des estimations des débits (notamment en période d'étiage) ;
- de calibrer pondéralement les données de l'enregistrement ponctuel de turbidité par rapport à l'ensemble de la section du fleuve (travaux en cours) et aux fluctuations de la nature des matériaux au cours des hystérésis et des cycles hydrologiques et saisonniers.

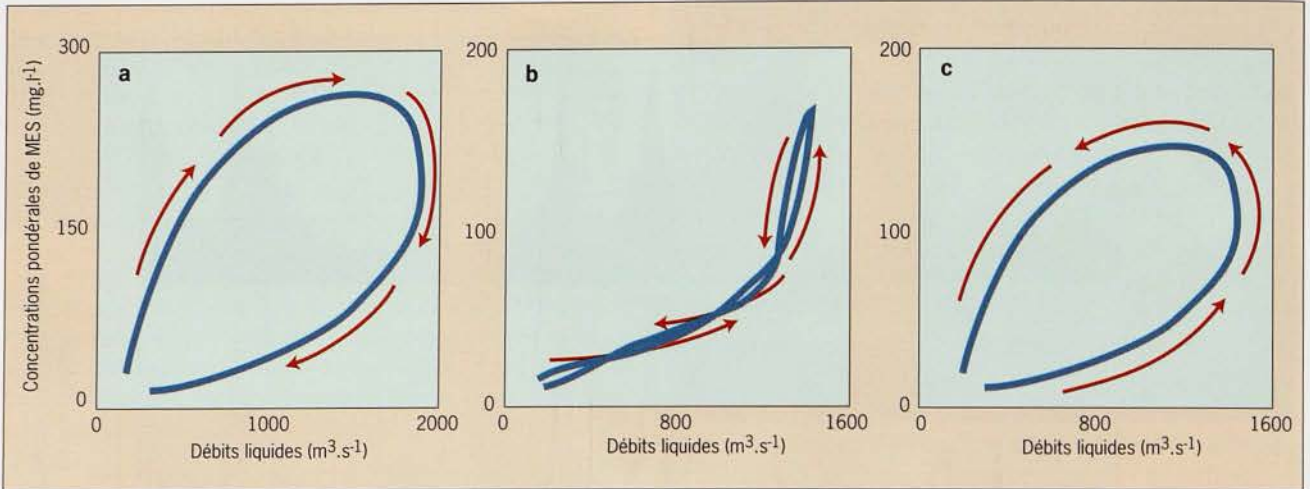


Figure 5 - Les hystérésis d'évolution de la relation entre concentrations pondérales des MES et les débits : (a) évolution rétrograde, (b) absence d'hystérésis, (c) évolution orthograde.

Les matériaux du bassin versant estuarien

Le bassin versant intra-estuarien (11 780 km², soit 15 % de la superficie totale) est, pour sa part, presque exclusivement implanté sur substrat crayeux karstifié*. Les eaux de ruissellement et les produits de l'érosion des sols s'y engouffrent partiellement. Les produits de l'érosion des sols y sont en partie stockés dans les cavités karstiques et la dissolution de la craie libère des particules carbonatées (coccolithes, photo 2) et des éléments insolubles (Lacroix *et al.*, 2000).

En termes de bilan, les flux particulaires du bassin versant intra-estuarien sont encore imparfaitement quantifiés (multiplicité des petits affluents) mais, compte tenu du contexte géomorphologique local, le cumul n'excéderait guère 10 % des apports de matériaux du bassin versant amont.

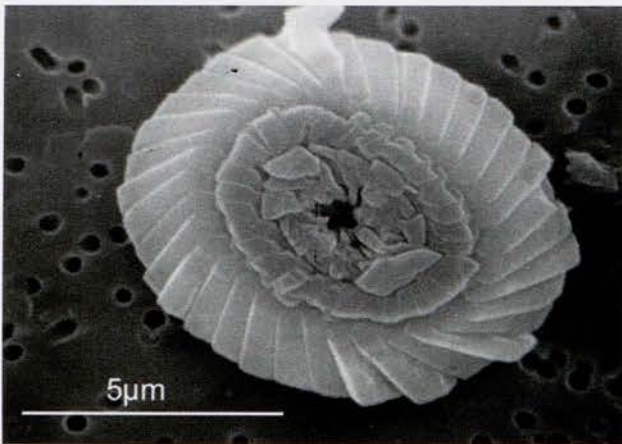


Photo 2 - Coccolithe de la craie.

Les concentrations urbaines et l'activité industrielle riveraines sont à l'origine d'un flux de matériaux peu important en masse dont l'impact est difficile à quantifier tant il est diffus sur l'ensemble du linéaire estuarien.

La présence de cendres volantes (photo 3) témoigne d'apports atmosphériques qui restent négligeables au niveau des bilans particulaires mais peuvent constituer une source complémentaire d'introduction de contaminants dans le milieu étudié.



Photo 3 - Cendre volante (résidu de combustion d'hydrocarbures) de près de 20 µm de diamètre.

L'érosion dans le lit fluvial amplifiée par les travaux de dragage fournit en outre des matériaux plus grossiers (sables fins et éléments de tufs*) qui proviennent des terrasses alluviales. Ces éléments sont principalement transportés par charriage sur le fond. Ils participent à l'organisation des dépôts dans le chenal et sur les berges et ne sont qu'exceptionnellement remis en suspension dans la colonne d'eau, lorsque les courants atteignent un niveau suffisant.

La production biologique, source de matériel particulaire

Importance de la production biologique en tant que source de matériel particulaire

La part des apports particulaires liée à la production biologique est tributaire des cycles saisonniers qui se superposent avec les cycles hydrologiques crue-étiage : elle reste faible, voire négligeable, dans le cadre des apports liés aux crues hivernales. Elle devient conséquente dès l'apparition des premiers blooms phytoplanctoniques du printemps et ce jusqu'en septembre-octobre selon les cycles climatiques annuels.

Son importance peut être abordée par les teneurs en chlorophylle *a* qui permettent de quantifier la biomasse phytoplanctonique, premier maillon de la chaîne alimentaire. Pendant les périodes de bloom, les teneurs dans l'estuaire amont peuvent atteindre et dépasser $100 \mu\text{g.l}^{-1}$, ce qui correspond à plus de 3 mg.l^{-1} de COP (carbone organique particulaire), soit environ 10 mg.l^{-1} de matières organiques en suspension (Garnier *et al.*, 1997 in Mouchel, 1999). En période d'étiage, cette biomasse, limitée à la quantification du seul maillon phytoplanctonique, peut représenter près de 50 % de la masse totale des concentrations pondérales totales (notamment dans les eaux de surface).

Suivi des MES dans l'estuaire

Le suivi réalisé depuis plus de 25 ans par la cellule anti-pollution du port autonome de Rouen sur 22 stations échantillonnées selon un rythme mensuel ou bimestriel fournit une image de l'évolution des concentrations des matières en suspension.

Les prélèvements sont toujours effectués au flot* et en vives-eaux* au cours de campagnes aval-amont en suivant autant que faire se peut l'onde de flot.

La vitesse du bateau ne permet pas d'obtenir une image synchrone de la distribution des MES dans l'estuaire mais la constance de la stratégie d'échantillonnage permet d'aborder les fluctuations saisonnières et interannuelles.

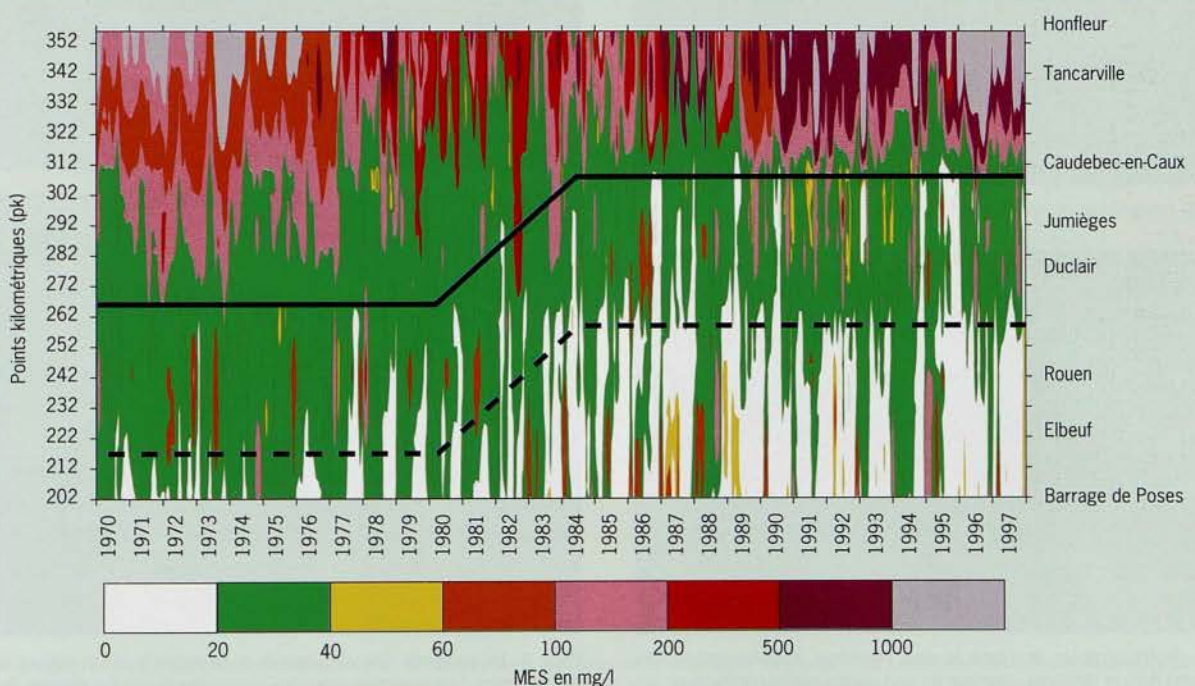
Cette représentation permet de visualiser le bouchon vaseux* (fortes concentrations particulaires) dans la partie aval du système estuarien.

Les travaux de chenalisation réalisés par le port autonome de Rouen dans les années soixante-dix ont eu pour conséquence une migration vers l'embouchure du bouchon

vaseux (matérialisée par le trait noir continu) avec un renforcement des concentrations observées et ce, notamment en période d'étiage (essentiellement en été et au début de l'automne).

En dépit des fluctuations interannuelles des apports particulaires du bassin versant amont, nous constatons, depuis le début des années quatre-vingt, une diminution des concentrations particulaires observées en amont de Rouen. Cette évolution, soulignée par le tireté noir, peut être attribuée à deux causes principales :

- une décroissance des apports particulaires amont du fait des efforts de diminution de la fraction turbide des rejets domestiques de l'agglomération parisienne ;
- les travaux de dragage du port autonome de Rouen (avec mise à terre des produits de dragage) et le renforcement de la canalisation de la Seine en aval de Rouen qui favorisent l'évacuation des eaux et de leur charge particulaire vers le bouchon vaseux de l'embouchure.



L'observation de pics très marqués (hauts et étroits) au sein des microgranulométries des MES témoigne de cette large contribution de la fraction phytoplanctonique (voir p. 12 « Granulométrie des matières en suspension »). Ils correspondent à des développements limités dans le temps (durée de 1 à 2 semaines) et dans l'espace, y compris dans les zones turbides du bouchon vaseux* de l'estuaire moyen.

Rôle des organismes dans la biotransformation des matières en suspension

Par leur capacité d'agrégation passive ou active des particules les plus petites, certains organismes peuvent contribuer à la réalisation de floccs* ou agrégats* (ex. diatomées, photo 4).

Les voiles algaires qui se développent à la surface des sédiments, en particulier dans les zones exondables, assurent des liens entre des éléments minéraux de taille variable. En fonction de l'action de cisaillement des courants sur le fond, ces structures organominérales sont susceptibles d'être remises en suspension sous la forme de floccs de grande taille ou macrofloccs*. Le développement de biofilms bactériens à la surface de particules minérales en suspension ou sur le fond peut également faciliter de telles floculations organominérales (photo 5).

Les animaux planctoniques rejettent des pelotes fécales qui constituent des agrégats organominéraux cohérents dont le

contenu peut être révélateur du régime alimentaire (par exemple, relation trophique entre les copépodes et le phytoplancton*, photo 6).

Enfin, les organismes filtreurs tels que la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), relativement abondante dans l'estuaire amont (voir fascicule « Patrimoine biologique et chaînes alimentaires) participent largement à la floculation* des matériaux fins en suspension par le rejet de pelotes fécales en ruban et de pseudofèces correspondant à des voiles organiques engluant des éléments minéraux et des débris biologiques.

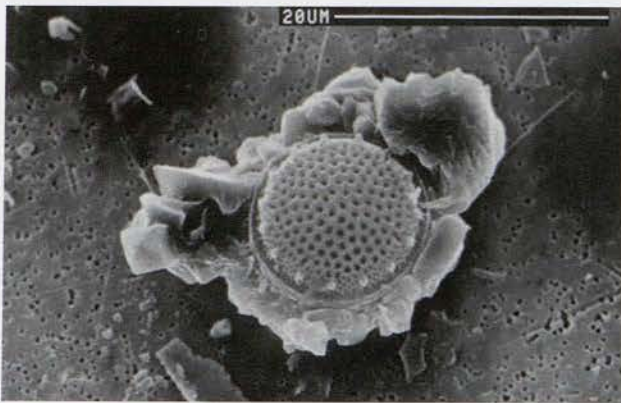


Photo 4 - Diatomée encroûtée du fait de l'agrégation de particules fines.

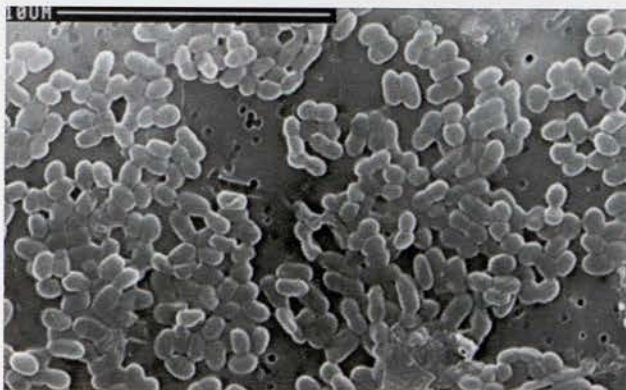


Photo 5 - Biofilm bactérien : la colonie de corps bactériens grossièrement ovoïdes est engluée dans un polymère organique qui peut se fixer sur les particules en suspension.

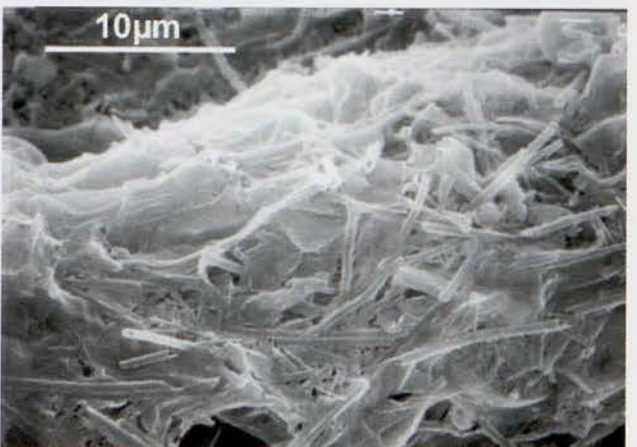
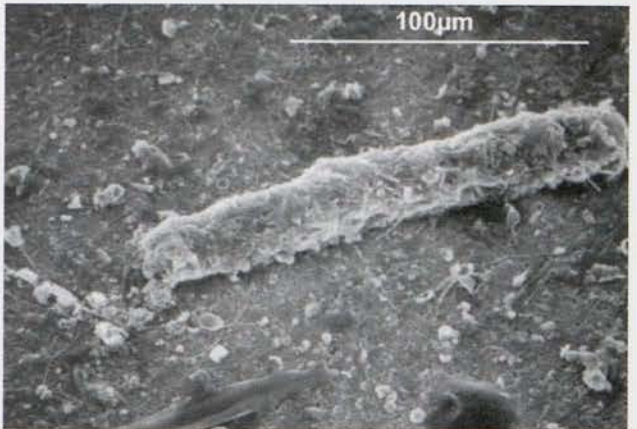
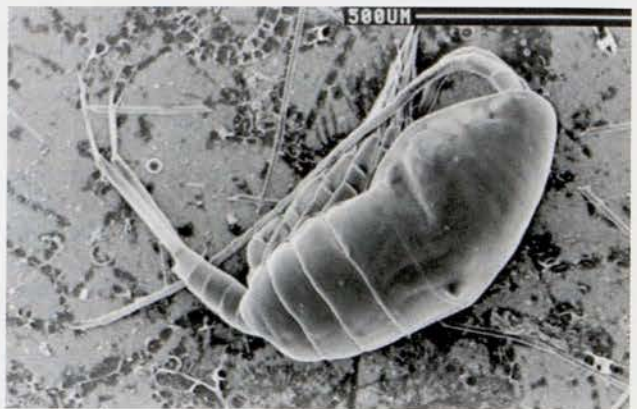


Photo 6 - Un copépode, une vue générale de sa pelote fécale et une vue agrandie qui montre l'abondance de soies de *Chaetoceros* (diatomées marines dont se nourrit le copépode).

Les paramètres mesurés de la diversité du matériel en suspension

En raison de la diversité des apports, le matériel particulaire en suspension dans l'estuaire de la Seine est hétérogène et correspond à un mélange complexe. Pour le décrire, nous utiliserons trois paramètres principaux :

- la nature des particules qui est identifiée par observation au microscope électronique à balayage ;
- la taille des particules qui est déterminée par diverses méthodes (voir p. 12 « Granulométrie des matières en suspension ») ;
- la vitesse de chute des particules qui fournit un élément quantitatif du comportement mécanique des particules en suspension dans la colonne d'eau en fonction des paramètres hydrodynamiques locaux du système estuarien. Ce dernier paramètre peut être mesuré (Dupont *et al.*, 1995).

Taille et nature des matières en suspension

Pour une taille donnée, nous retrouvons plusieurs types de matériaux (fig. 6). Les analyses granulométriques ne suffiront donc pas à distinguer les proportions relatives des divers types de matériaux.

L'observation au microscope électronique à balayage permet à la fois d'identifier la nature des particules mais aussi d'en mesurer la taille. L'abondance relative de certains constituants au sein des classes de taille permet donc de qualifier la composition principale des populations granu-

lométriques majeures qui caractérisent le mélange naturel dans les échantillons.

Les observations révèlent que, dans l'estuaire de la Seine, les éléments minéraux sont rarement isolés et généralement associés avec les matières organiques pour constituer des structures organominérales compactes (agrégats) ou plus ou moins lâches (flocs que l'on divise en fonction de leurs tailles : les microflocs* inférieurs à 100 µm et les macroflocs supérieurs à 100 µm et pouvant atteindre des tailles de l'ordre du millimètre).

La prédominance des microflocs dans les suspensions de l'estuaire de la Seine est à mettre en relation avec l'abondance des apports de matières organiques (photo 7).

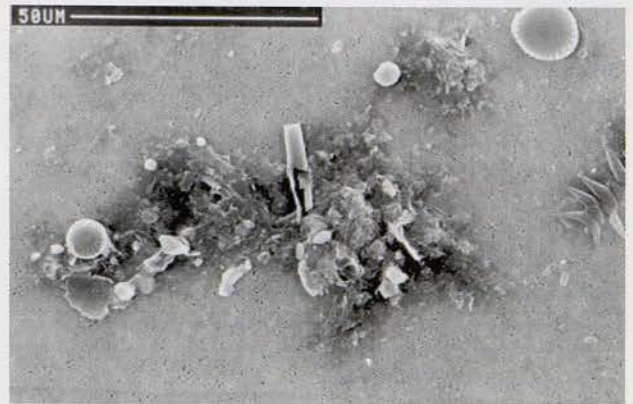


Photo 7 - Exemple de microfloc organominéral.

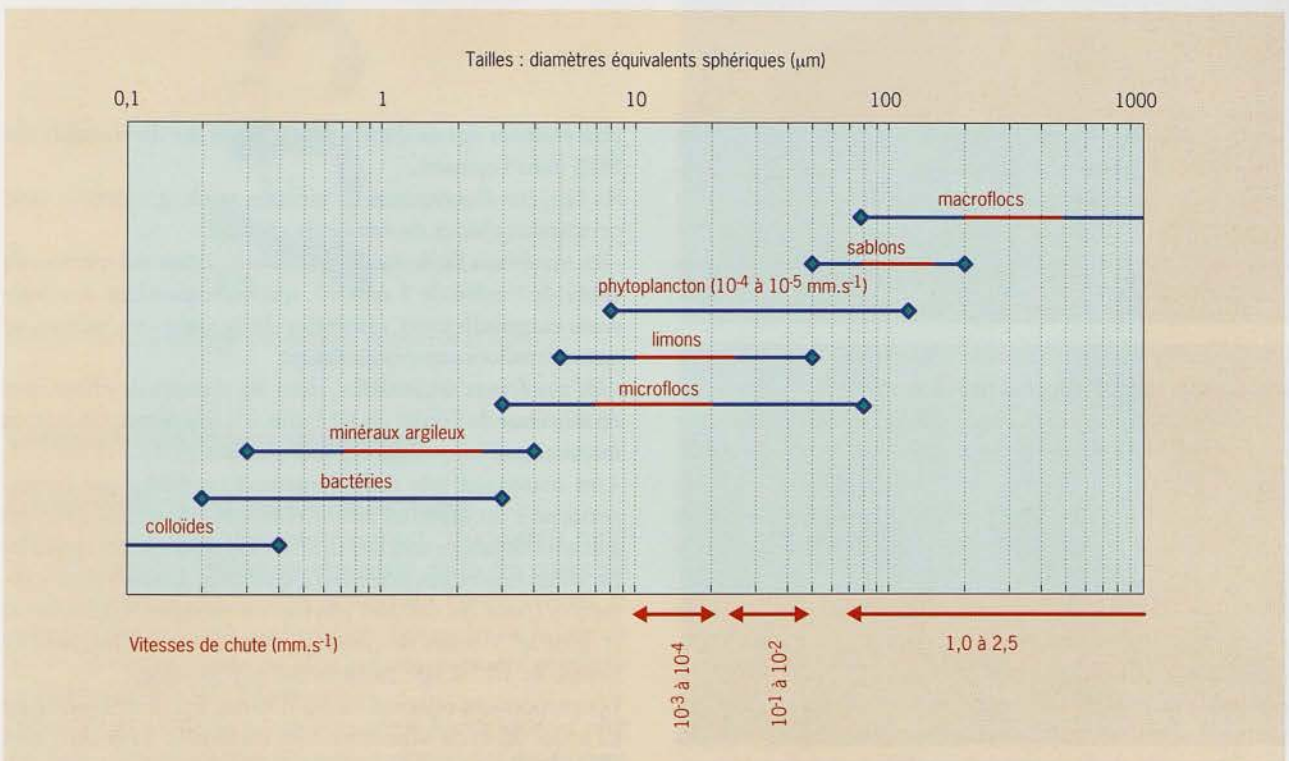


Figure 6 - Matériel particulaire en suspension coexistant dans les eaux de l'estuaire amont. Le secteur rouge des traits correspond aux tailles dominantes pour chaque type de matériel particulaire. Les secteurs bleus représentent les variations de taille jusqu'aux valeurs extrêmes marquées par les losanges verts.

Granulométrie des matières en suspension

La granulométrie s'emploie à quantifier l'abondance relative des particules en fonction de leurs tailles. Dans les eaux, les techniques granulométriques sont :

- soit optiques, par visualisation directe (caméra avec analyse d'images, notamment pour l'analyse des macroflocs) ou par utilisation d'un granulomètre laser lorsque les concentrations de particules en suspension sont suffisantes,
- soit par l'utilisation d'un compteur de particules de type Coulter qui mesure le volume des particules en suspension et peut s'appliquer sur des eaux peu turbides.

Principe de la mesure :

La solution électrolytique est aspirée par un orifice dont le diamètre impose la gamme des tailles mesurées.

Un courant de faible voltage est appliqué entre les électrodes placées de part et d'autre de l'orifice dont la taille (volume cylindrique) constitue la contrainte de circulation du courant.

Lors de leur passage dans l'orifice, les particules induisent un déficit d'électrolyte correspondant à leur volume et produisent ainsi des perturbations de l'intensité du courant mesuré en continu entre les deux électrodes. L'analyse du signal électrique permet de détecter et donc de comptabiliser le passage des particules et l'anomalie électrique de chacune d'entre elles est proportionnelle à son volume respectif.

Nous obtenons ainsi des dénombrements de particules en fonction de leurs volumes.

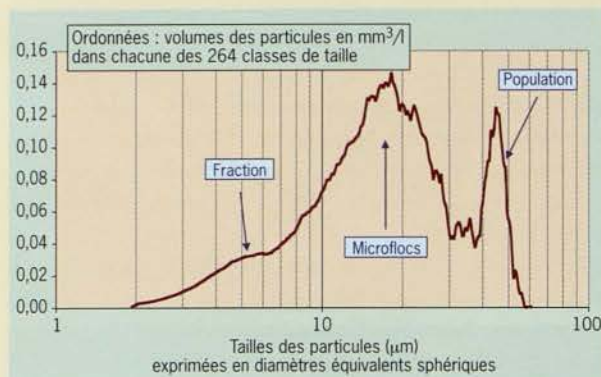
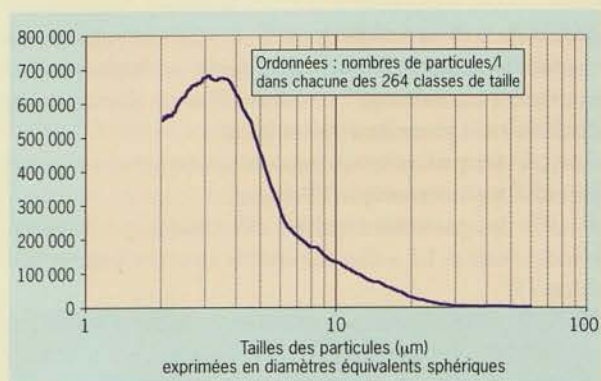
La connaissance du volume d'eau aspiré pendant la mesure permet d'exprimer les résultats en concentrations volumiques de particules dans chacune des 264 classes de taille mesurées.

Les distributions granulométriques et leurs fluctuations temporelles et spatiales permettent de traduire les conditions hydrodynamiques de transport et les fluctuations du contenu de la charge particulaire en suspension et peuvent contribuer au suivi spatio-temporel des fractions particulières identifiées.

La vitesse de chute : un paramètre fondamental du transport des particules en suspension

Les processus hydrosédimentaires de décantation, de remise en suspension et de transport sont convenablement représentés par les mesures de vitesse de chute. Globalement, la vitesse de chute augmente avec la taille des particules mais cette relation ne s'applique pas pour la fraction phytoplanctonique notamment.

La vitesse de chute est le principal paramètre descriptif du matériel en suspension utilisé dans la modélisation des processus hydrosédimentaires (voir fascicule « Les modèles : outils de connaissance et de gestion »). La valeur de 1 mm/s est la plus généralement utilisée. Les observations réalisées dans l'estuaire de la Seine ont conduit à choisir préférentiellement 0,5 mm/s pour valeur moyenne de vitesse de chute des MES. Ce choix permet d'obtenir des simulations



Résultats obtenus pour un échantillon prélevé dans l'estuaire amont, le 5 juillet 1996.

plus réalistes des modalités observées *in situ* du transfert des MES dans l'estuaire.

En fait, les observations et mesures tendent à définir trois principales classes de vitesse de chute :

- les matériaux facilement décantables, ayant des vitesses de chute de l'ordre de $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, qui correspondent aux fractions essentiellement minérales de la taille des sables et aux macroflocs organominéraux ;
- les matériaux décantables, dont les vitesses de chute sont en moyenne de l'ordre de $10^{-2} \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, qui correspondent en majorité aux microflocs organominéraux ;
- les matériaux très difficilement décantables qui correspondent à du matériel essentiellement organique avec des gammes de tailles très larges allant du micromètre (pour les bactéries isolées par exemple) à quelques dizaines de micromètres (pour les cellules phytoplanctoniques notamment) et dont les vitesses de chute, extrêmement faibles, sont de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} millimètres par seconde.

Les proportions relatives de ces diverses fractions évolueront au cours du cycle saisonnier : les matériaux de la crue sont plus minéraux avec des vitesses de chute moyennes plus élevées ; inversement, les périodes de bloom phytoplanctonique produisent des particules difficilement décantables.

Les fluctuations des vitesses de courant au cours des cycles de marée sont à l'origine de phases d'érosion et de décantation sélectives qui se traduisent par une évolution des concentrations et des proportions relatives de ces fractions dans la colonne d'eau.

Par ailleurs, il est reconnu que les concentrations en MES peuvent influencer sur la floculation des matériaux, notamment par l'augmentation de la fréquence des contacts entre particules au sein de la colonne d'eau. L'accroissement des tailles moyennes conduit alors à une augmentation des vitesses de chute moyennes, comme cela a été montré dans d'autres estuaires (Puls *et al.*, 1988; Van Leussen, 1994). Les macroflocs ainsi produits restent toutefois des structures très fragiles susceptibles de se dissocier au cours de leur chute notamment (photo 8). L'influence des gradients de salinité a souvent été décrite comme un facteur déterminant de ces mécanismes de floculation-défloculation. Dans l'estuaire de la Seine, les processus physiques (courants, turbulences et concentrations) alliés aux composants organiques semblent prépondérants.

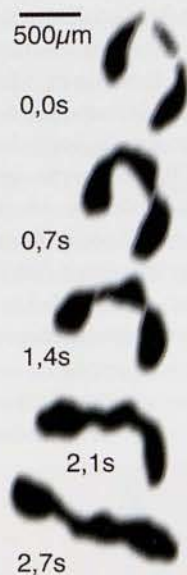


Photo 8 - Plasticité et fragilité d'un macrofloc au cours de sa chute.

Les traceurs des apports particulaires

Les informations fournies par les particules

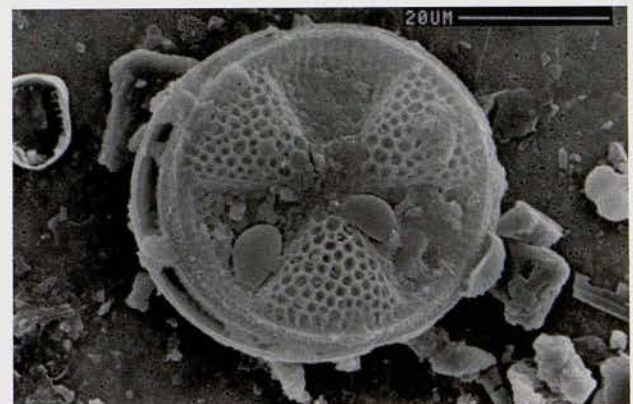
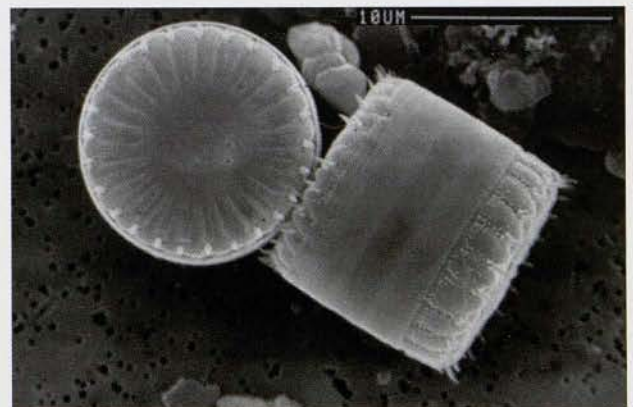
Dans l'état actuel des connaissances, il apparaît qu'il n'existe pas de différences marquées entre les contenus minéralogiques des apports actuels du bassin versant et ceux des matériaux des paléovallées fluviales de la baie de Seine qui constituent la plus grande part des produits apportés par la mer à l'embouchure.

Il faut donc rechercher dans le matériel biologique, et plus particulièrement au sein des premiers maillons des édifices biologiques (phytoplancton et phytobenthos), les mar-

queurs des échanges particulières entre les différentes masses d'eau.

C'est le cas notamment des diatomées dont les conditions de développement de chaque espèce sont bien connues. Les squelettes siliceux (porteurs des critères de détermination) se conservent généralement bien et permettent de suivre le devenir *post mortem* de ces particules dans des masses d'eaux qui n'ont plus les conditions vitales requises pour la survie de l'espèce considérée. Ces éléments appartiennent à la fraction difficilement décantable et fournissent des données qualitatives, voire quantifiables, sur les processus hydrosédimentaires de transport et de mélange. Par exemple :

- la présence de diatomées benthiques dans la colonne d'eau témoigne de processus de remise en suspension (phénomène observé dans la colonne d'eau lorsque les courants sont les plus forts); elles sont particulièrement fréquentes dans les matériaux du bouchon vaseux, ce qui traduit l'importance des remobilisations à partir des sédiments superficiels dans la constitution de ce stock particulaire;
- dans le bouchon vaseux, les contributions relatives des microflore planctoniques d'eau douce et marines (photos 9, 10) permettent d'évaluer la part des apports continentaux et marins dans la fraction fine peu décantable des échantillons; d'après ces observations, l'origine continentale des microflocs à dominante organique notamment serait très largement majoritaire dans le bouchon vaseux.



Photos 9 et 10 - Exemples d'une diatomée d'eau douce (en haut) et d'une diatomée marine (en bas).

Les radionucléides en tant que traceurs géochimiques

La décroissance d'activité des radionucléides est une dimension connue, exprimée par la durée de demi-vie. Certains sont intégrés dans les réseaux cristallins des minéraux, en particulier des argiles, d'autres peuvent être adsorbés à la surface de ces matériaux fins. Actuellement, les doses mesurées sont toujours très inférieures aux niveaux internationalement reconnus comme non dommageables à la qualité de l'environnement. Mais, connaissant leurs origines et leurs durées d'activité, les radioéléments deviennent des « horloges » qui peuvent permettre de quantifier certains paramètres du transit des matériaux fins.

Il existe dans la nature une grande variété de radionucléides. On a coutume de distinguer les radionucléides dits « naturels », parce qu'ils sont naturellement présents dans l'environnement et les radionucléides dits « artificiels », parce qu'ils proviennent des utilisations civile et militaire de l'énergie nucléaire.

Les premiers sont dits soit primordiaux tels le potassium 40 (^{40}K) ou les radionucléides des séries du thorium 232 (^{232}Th) ou de l'uranium 238 (^{238}U), soit cosmogéniques parce qu'ils sont produits en permanence dans la haute atmosphère de la Terre sous l'effet du rayonnement cosmique tel le béryllium 7 (^7Be).

Les seconds proviennent des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (tel le césium 137 : ^{137}Cs), de sources spécifiques (dont la centrale nucléaire de Nogent à l'amont), d'activités utilisant des radionucléides de durée de vie généralement courte (les hôpitaux par exemple), de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague (côté façade maritime : ^{137}Cs , ^{60}Co , antimoine ^{125}Sb ...), voire des suites des retombées de l'accident de Tchernobyl dans le

bassin versant amont. Certaines activités industrielles non nucléaires peuvent en outre modifier le cycle de certains radionucléides : c'est le cas du traitement de minerais phosphatés qui, au niveau des enregistrements sédimentaires, perturbe les profils verticaux d'excès de plomb 210 (^{210}Pb de la série de ^{238}U) utilisés pour la datation des dépôts.

Dans le cadre de la dynamique des matériaux fins de l'estuaire de la Seine, la recherche des radioéléments liés à la fraction particulaire est développée pour répondre à des questions :

- évaluer le temps de transit des matériaux fins depuis le bassin versant jusqu'à son entrée dans le système estuarien amont ; les particules transportent trois marqueurs radioactifs intéressants : le ^7Be qui a une durée de demi-vie de 53 jours et dont l'importance témoigne de l'arrivée de matériaux fraîchement érodés sur les sols, notamment en crue, le ^{137}Cs d'une durée de demi-vie de 30 ans et qui correspond à un héritage des années soixante perturbé par quelques apports récents mais qui, couplé au précédent, témoigne de la contribution de matériaux plus anciens et le ^{210}Pb en excès dont la durée de demi-vie est de 22 ans ;
- évaluer la limite de pénétration des particules marines et le taux de mélange entre particules marines et fluviales ; le cobalt 60 (^{60}Co , durée de demi-vie de 5 ans) et le ^{137}Cs sont deux radionucléides artificiels introduits depuis le bassin versant amont et, du côté marin, à partir des rejets en mer de l'usine de La Hague ; les flux respectifs des apports amont et des apports aval sont caractérisés par des rapports $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ différents ; les données recueillies au niveau des dépôts témoignent d'une remontée des matériaux fins décantables (minéraux argileux notamment) plus de 50 km en amont de l'intrusion saline (aspects repris dans le chapitre IV).

Chapitre II

Les facteurs hydrodynamiques du transport des matériaux fins dans l'estuaire

Les mécanismes hydrosédimentaires de l'estuaire

Les paramètres mécaniques du déplacement des particules

Par analogie à un écoulement fluvial simple et unidirectionnel, nous pouvons considérer que le transfert des particules correspond à la résultante entre 3 forces principales (fig. 7) :

- la force advective F_a qui traduit le déplacement longitudinal des masses d'eaux et dépend de la vitesse des écoulements (ou courants);
- la force gravitaire F_c qui est l'expression des lois classiques de chute des particules et dépend de la taille, de la forme et de la densité des particules (voir chapitre précédent concernant la vitesse de chute des particules);
- la force de remise en suspension F_r , opposée à la précédente, qui résulte de la remise en suspension des particules sous l'effet des gradients de vitesse s'appliquant à des écoulements turbulents conformes aux lois classiques d'hydraulique (voir fascicule « Courant, vagues et marées : les mouvements de l'eau »).

Le déplacement résiduel observé des particules en suspension correspond à la résultante de ces contraintes. Il intègre la double composante verticale et horizontale. Dans le milieu naturel, il convient de ne pas oublier les composantes latérales liées à l'hétérogénéité transversale de la distribution des vitesses de courant en fonction de la géomorphologie* des écoulements.

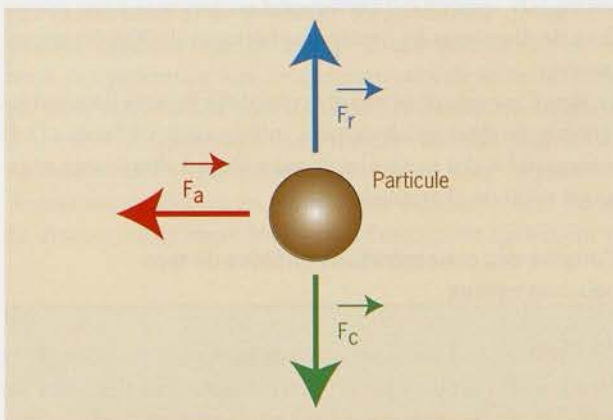


Figure 7 - Schéma conceptuel simplifié de l'interaction des forces qui sont à l'origine du déplacement de la particule en suspension au sein de la colonne d'eau.

Les facteurs hydrodynamiques de l'estuaire

Les processus hydrosédimentaires dans l'estuaire résultent du couplage entre les écoulements amont-aval qui dépendent des fluctuations du débit fluvial et de l'influence cyclique des marées qui, théoriquement, décroît de l'aval

vers l'amont mais se fait sentir jusqu'au barrage de Poses (voir fascicule « Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes »). Lors de sa propagation à l'intérieur de l'estuaire, l'onde sinusoïdale de marée est déformée par différents facteurs (voir fascicule « Courant, vagues et marées : les mouvements de l'eau ») :

- le frottement sur le fond qui entraîne une diminution exponentielle de l'amplitude de l'énergie depuis l'embouchure vers l'amont;
- la diminution de la hauteur d'eau qui provoque l'asymétrie de l'onde et l'inégalité des durées de flot et de jusant* et des vitesses d'écoulement associées;
- le rétrécissement des sections (ou convergence des rives) qui concentre l'énergie et peut favoriser un renforcement localisé de l'amplitude de la marée et/ou des vitesses des courants.

L'embouchure est en outre soumise au forçage hydrodynamique de la houle et des vagues qui dépend des conditions météorologiques locales.

Ces aspects hydrodynamiques font l'objet du fascicule « Courant, vagues et marées : les mouvements de l'eau » et nous n'en retiendrons que les facteurs principaux qui conditionnent le transport des matériaux fins.

Les fluctuations des matières en suspension dans la colonne d'eau

Dans l'estuaire, les vitesses des courants varient en intensité et s'inversent au cours d'un cycle semi-diurne de marée. Ces fluctuations cycliques des capacités de transport se traduisent par l'alternance de phases de :

- remise en suspension et/ou érosion lorsque la vitesse de frottement U dépasse le seuil de la vitesse critique d'érosion U_{CE} (fig. 8);

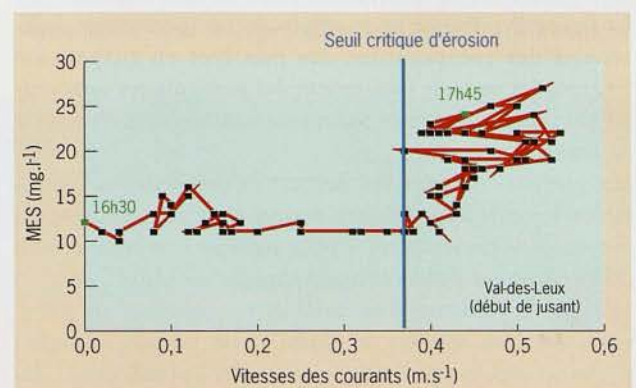


Figure 8 - Exemples de relation entre teneurs en MES et vitesses des courants mesurées à 50 cm sous la surface sur le site du Val-des-Leux pendant le jusant (Guézennec, 1994).

Les lois hydrodynamiques de remise en suspension

Dans les écoulements turbulents, les processus de remise en suspension (trajet figuré en rouge) dépendent principalement de 2 facteurs qui interagissent entre eux :

- la nature (dépôts cohésifs ou non) et la rugosité du fond (frottement sur le fond);
- le profil vertical des vitesses dans la colonne d'eau (voir figure incluse dans l'encadré).

Pour qu'une particule soit transportée en suspension, il est nécessaire qu'une pression orientée s'applique sur elle (contrainte de cisaillement) et soit susceptible de l'arracher au fond. La contrainte de cisaillement est proportionnelle au gradient des vitesses au-dessus du fond.

À cette notion délicate de contrainte τ_0 , on préférera souvent la notion de vitesse de frottement U qui s'exprime de la manière suivante :

$$U = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

avec ρ , elle peut être reliée à la vitesse V_z mesurée à une cote Z du fond selon la relation :

$U^2 = C \cdot V_z^2$ avec C , paramètre dépendant de la rugosité du fond.

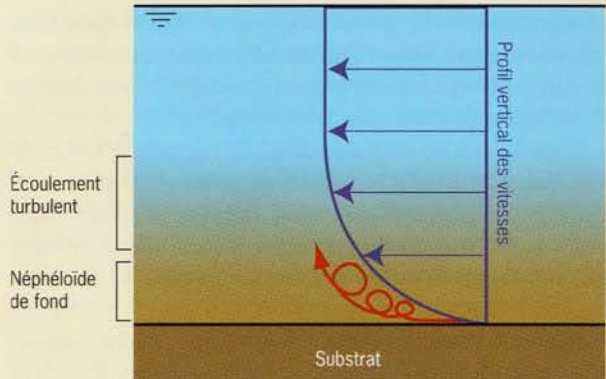
Dans la colonne d'eau, le profil des vitesses permet de distinguer :

- la couche supérieure dans laquelle les processus turbulents sont faibles;
- la couche inférieure caractérisée par les écoulements turbulents avec, à sa base, une couche plus turbide ou néphéloïde de fond qui correspond à la couche limite de fond à écoulement laminaire à turbulent.

Les processus de remise en suspension peuvent affecter l'ensemble de la colonne d'eau lorsque la couche turbulente se développe jusqu'à la surface.

Lorsque les dépôts sont dits cohésifs (dépôts vaseux), les processus de remise en suspension sont susceptibles d'affecter les niveaux superficiels. La quantité de matériaux concernée dépend, d'une part, de l'état de cohésion et de consolidation des dépôts et, d'autre part, de la contrainte de cisaillement τ_0 déduite du profil des vitesses lorsque celle-ci atteint la vitesse critique d'érosion U susceptible de mobiliser les matériaux fins du fond.

Dans le cas de dépôts non cohésifs (sables, graviers et cailloutis), les processus de remise en suspension se bornent à redistribuer les matériaux du néphéloïde de fond dans l'ensemble de la couche turbulente.



- décantation et sédimentation lorsque l'énergie est insuffisante pour supporter le matériel en suspension, c'est-à-dire pour des vitesses en deçà d'une vitesse critique de sédimentation U_{CS} .

La vitesse critique de près de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ produit une remise en suspension affectant l'ensemble de la colonne d'eau.

Cette réponse mécanique des matières en suspension en fonction des fluctuations des courants reste dépendante des caractéristiques des particules (taille, forme et densité).

La figure 9 présente un exemple du comportement différentiel des composantes des matières en suspension (regroupées en trois sous-ensembles particulières caractérisés par leurs capacités de sédimentation) au cours d'un cycle de marée.

Les proportions relatives des stocks particulières constituant les matières en suspension sont représentées au moyen de « camemberts » pour pouvoir être comparées à celles observées dans les dépôts superficiels (fond).

Le type A, facilement décantable, est constitué de particules dont les vitesses de chute et les vitesses critiques d'érosion sont fortes. Il correspond à des macroflocs et à des particules minérales de la taille des sables (vitesses de chute de l'ordre de $1,0$ à $2,5 \text{ mm.s}^{-1}$).

Le type B, moyennement décantable, est constitué de particules présentant des vitesses de chute faibles (de l'ordre de 10^{-1} à $10^{-3} \text{ mm.s}^{-1}$). Il correspond en majorité à des microflocs de diamètres équivalents sphériques de 20 à 50 micromètres.

Le type C est constitué de particules difficilement décantables (vitesses de chute généralement inférieures à $10^{-4} \text{ mm.s}^{-1}$). Il correspond à des particules et microflocs à dominante organique et/ou de phytoplancton.

L'origine des concentrations turbides de type bouchon vaseux

Les apports du bassin versant amont sont à l'origine de la plus grande part des apports particuliers dans l'estuaire. Le transfert amont-aval n'est pas continu puisque nous enregistrons des concentrations turbides telles que celles du bouchon vaseux observé dans l'estuaire moyen.

L'intrusion saline et les processus de concentration turbide

L'estuaire est, par définition, la zone d'affrontement entre les masses d'eaux fluviales et marines. Le mélange n'est

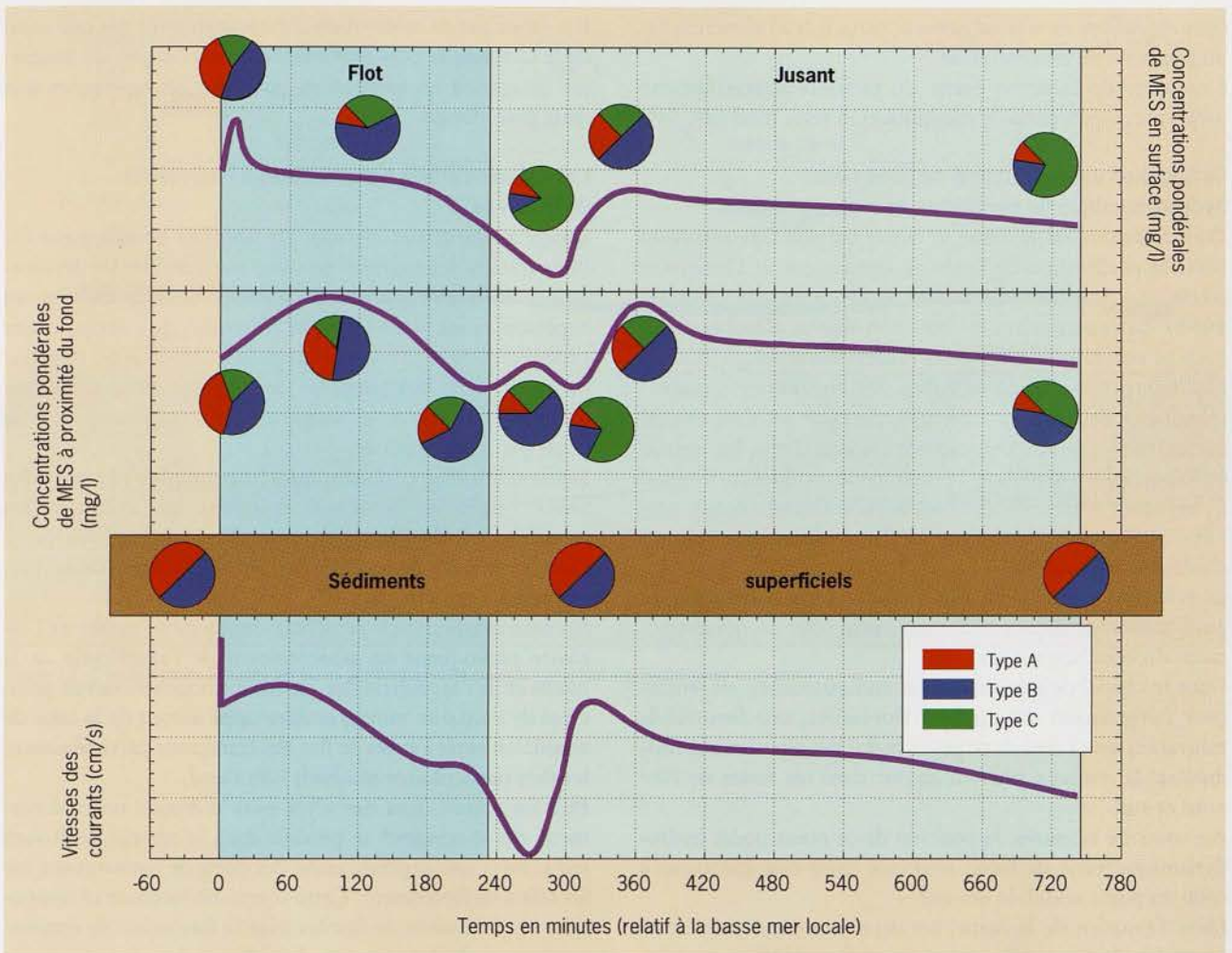


Figure 9 - Schéma de l'évolution des concentrations pondérales des MES dans la colonne d'eau en fonction des fluctuations courantologiques mesurées dans l'estuaire amont sur le site du Val-des-Leux (Guézennec, 1999).

pas instantané et le gradient longitudinal de salinité observé dans les eaux de surface donne une image incorrecte des processus. Les profils verticaux de salinité, température et turbidité réalisés dans l'embouchure attestent d'une stratification des masses d'eau : les eaux plus denses du biseau salé* qui progressent sur le fond et les eaux douces moins denses en surface qui s'écoulent vers l'aval. La discontinuité entre les masses d'eaux peut également se

traduire dans la distribution verticale des matières en suspension dans la colonne d'eau.

La limite amont du biseau salé est encore appelée « point nodal de densité ». Lorsque la stratification est importante, ce point de convergence induit la formation d'une zone de concentration turbide ou bouchon vaseux de turbidité (fig. 10). Les processus de décantation à partir des eaux fluviales sus-jacentes et les processus de floculation-défloculation

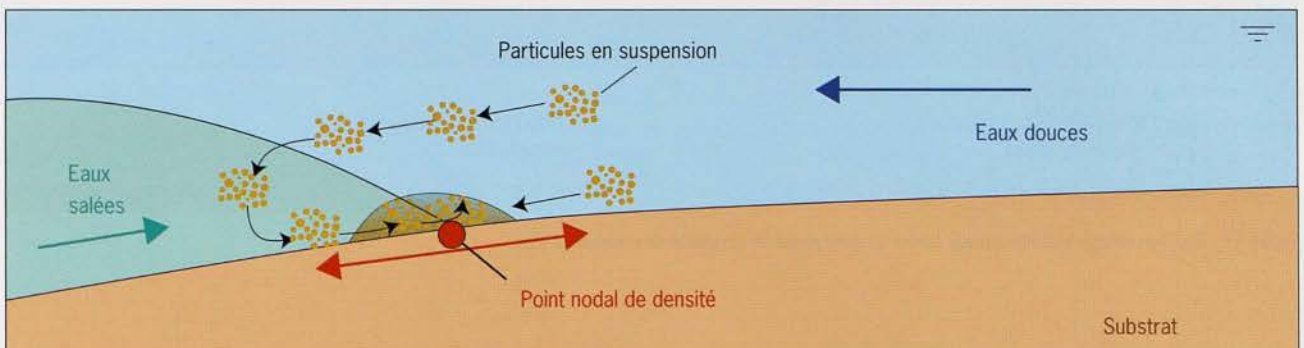


Figure 10 - Représentation schématique de la mise en place du bouchon vaseux de densité.

dans le gradient de salinité peuvent participer à l'alimentation du processus de concentration.

L'estuaire de la Seine étant un estuaire partiellement mélangé, ce processus de concentration reste modeste.

Le bouchon vaseux associé au point nodal hydrodynamique de circulation des masses d'eaux

Dans l'estuaire de la Seine, il existe un décalage temporel entre la pénétration de la marée dynamique et l'intrusion saline qui peut atteindre une heure en amont (Avoine, 1981). La constitution du bouchon vaseux d'embouchure reste principalement liée à des causes courantologiques.

Nous pouvons établir le bilan des courants résiduels* (résultante des vitesses à l'échelle du cycle semi-diurne de marée) sur les profils verticaux de colonne d'eau. En amont, en dépit de l'onde de flot, l'écoulement résiduel correspond à l'exportation fluviale. En aval, le débit fluvial s'écoule vers l'aval en surface et surmonte un flux résiduel vers l'amont au-dessus du fond (fig. 11).

Le point de convergence des masses d'eaux correspond au point nodal hydrodynamique qui est le siège du développement du bouchon vaseux.

Dans le chenal de navigation, les endiguements, en renforçant l'évacuation des apports fluviaux, ont favorisé la migration vers l'aval de ce point nodal des circulations résiduelles. Il remonte plus en amont dans les fosses de Flot nord et sud.

Au cours de la marée, la position de ce point nodal hydrodynamique varie de façon analogue mais non identique à celle du point nodal de densité.

Dans l'estuaire de la Seine, les deux processus précédemment décrits se superposent ou se renforcent pour produire un bouchon vaseux qui reste cantonné dans l'estuaire moyen, sans se désolidariser complètement du gradient de salinité.

Il n'en est pas de même dans d'autres estuaires tels que celui de la Gironde et cela provient de l'intervention du processus de remise en suspension qui vient se superposer aux deux précédents.

Les concentrations turbides liées à l'asymétrie de la marée

Conformément aux aspects mécaniques décrits page 15, l'orientation des courants ne suffit pas à décrire les déplacements des particules en suspension. Ce sont les vitesses supérieures au seuil critique d'érosion qui doivent être prises en compte et l'asymétrie de la marée joue un rôle fondamental dans la répartition des vitesses efficaces (nécessaires pour la remise en suspension des matériaux fins) au cours du cycle de marée.

Les facteurs géomorphologiques (topographie et nature des fonds, largeur de la section mouillée), qui induisent des modifications dans la propagation de la marée, constituent donc les facteurs de contrôle des zones de concentration turbide dans l'estuaire (fig. 12).

Le rétrécissement et la remontée des fonds à l'entrée de l'estuaire provoquent un renforcement de l'amplitude de la marée et de l'asymétrie flot-jusant. Le bouchon vaseux principal de l'estuaire moyen se développe autour de la zone de transition entre l'excès de flot des transports particuliers et les flux particuliers résiduels vers l'aval.

Plus en amont, lors des vives-eaux d'étiage, un renforcement des marnages* se produit dans le secteur de Rouen par suite d'une augmentation des effets de convergence sur les effets de frottement. Cette inversion localisée et temporaire vers un excès de flot favorise la formation de concentrations turbides annexes dans l'estuaire amont, moins pérennes et moins importantes que le bouchon vaseux principal de l'estuaire moyen.

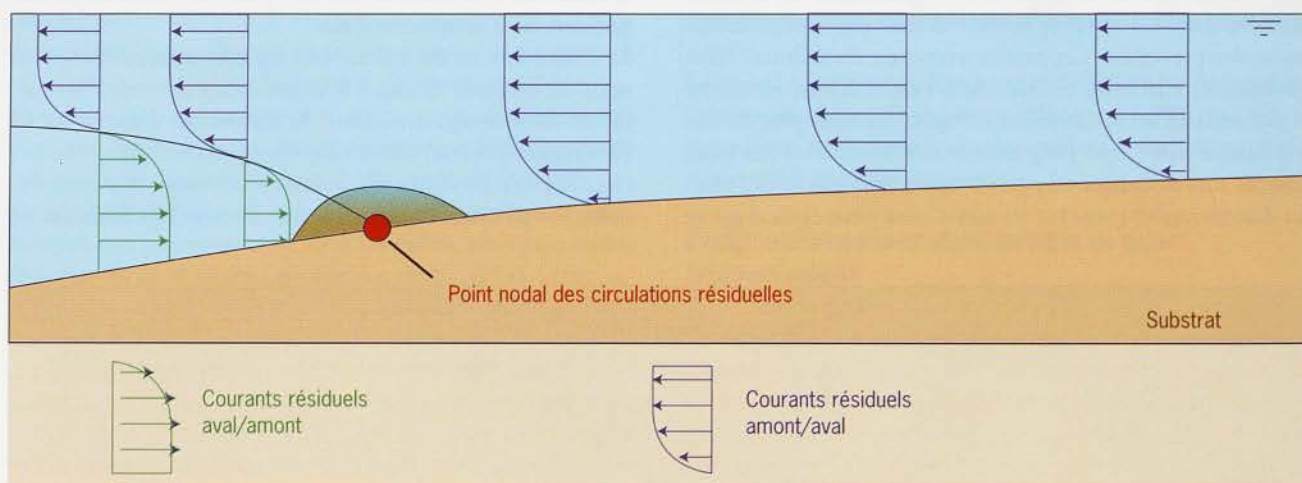


Figure 11 - Bouchon vaseux hydrodynamique autour du point nodal de circulation des masses d'eaux.

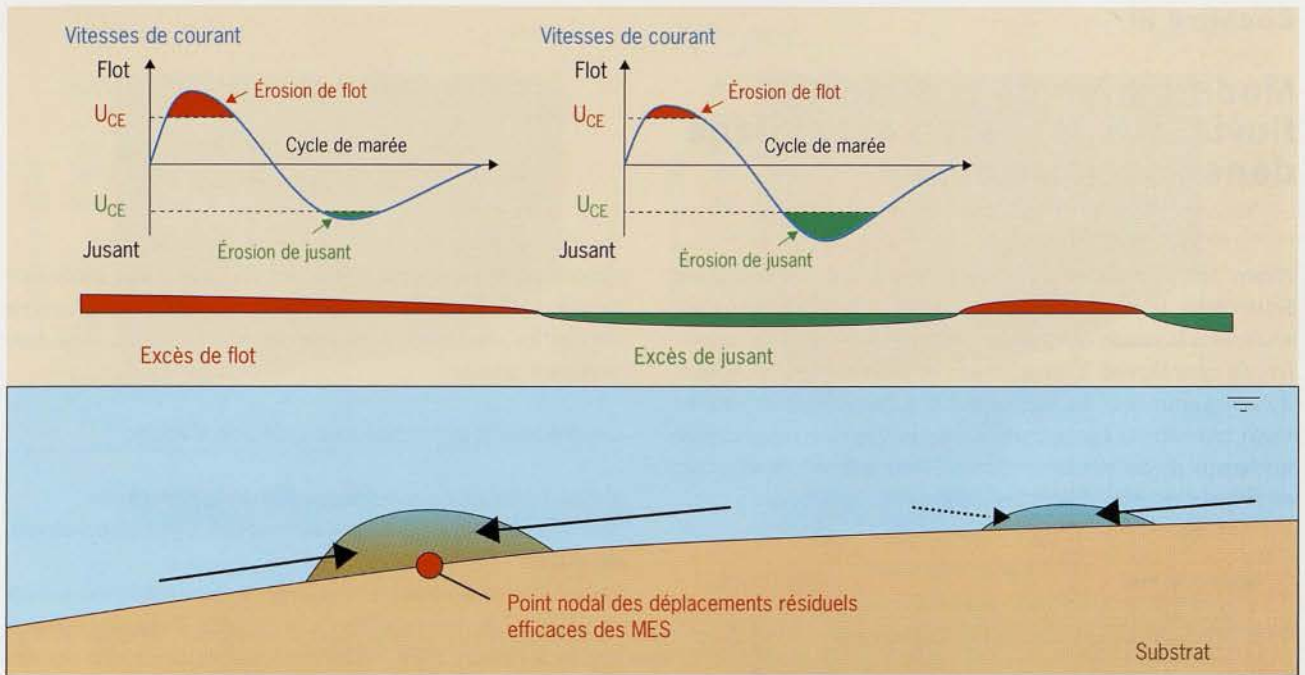


Figure 12 - Concentrations turbides générées par les bilans de transport résiduel des matières en suspension.

Chapitre III

Modification du transfert fluvial par la marée dynamique dans l'estuaire amont

Avant les travaux réalisés dans le cadre du programme Seine-Aval, les transferts particuliers dans la zone fluviale soumise à la marée dynamique étaient assimilés à un transfert de type fluvial. L'estuaire amont était considéré comme un canal simple et les flux entrants à Poses étaient simplement transférés à l'entrée de l'estuaire moyen en appliquant un temps de transit des masses d'eaux calculé en fonction du débit mesuré à Poses (fig. 13).

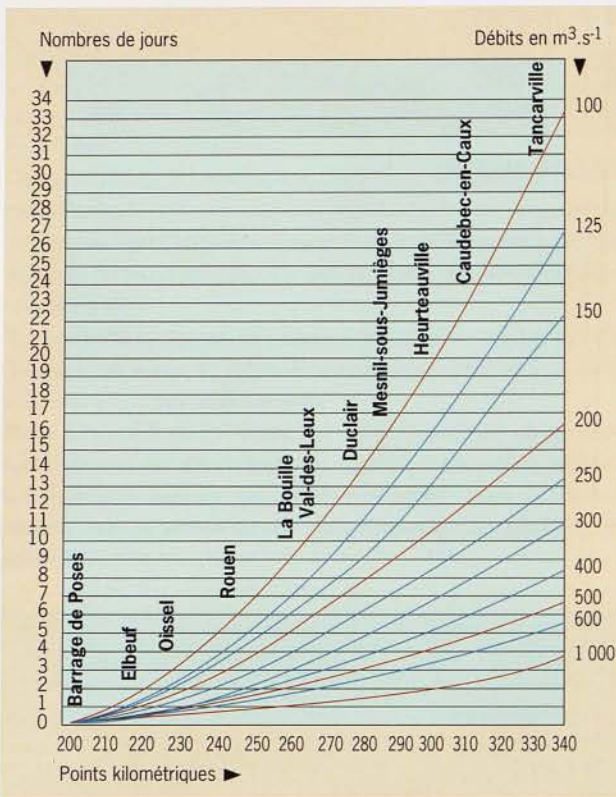


Figure 13 - Durée de l'écoulement moyen du débit de la Seine à partir du barrage de Poses (données SNS).

La réalisation de mesures au cours des cycles semi-diurnes de marée, la mise en place de stations de suivi en continu sur l'année, la caractérisation des matières en suspension et de leur comportement mécanique dans la colonne d'eau, les relations entre les particules en suspension et les dépôts superficiels, la recherche de traceurs des origines des maté-

riaux fins, la mesure des flux particuliers et la modélisation constituent les outils fondamentaux qui permettent de décrire les modalités du transfert des matériaux fins dans l'estuaire amont.

Les transferts particuliers en période d'étiage

L'hétérogénéité spatio-temporelle de la répartition des matières en suspension au cours du cycle semi-diurne de marée

Les processus hydrosédimentaires de décantation et remise en suspension observés dans une colonne d'eau de l'estuaire amont au cours d'un cycle semi-diurne de marée ont été présentés dans le chapitre précédent. Ils sont à l'origine des fluctuations de la distribution des matériaux fins (Guézennec *et al.*, 1996) dans la colonne d'eau (fig. 14).

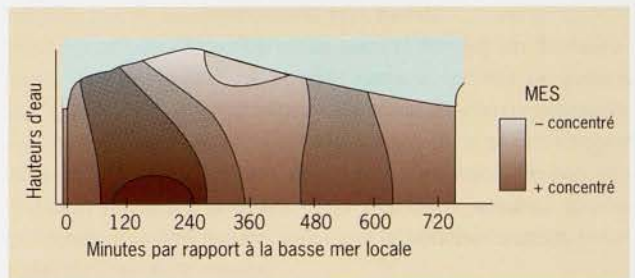


Figure 14 - Schéma d'évolution des concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension dans la tranche d'eau au cours d'un cycle semi-diurne de marée sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55).

Les méandres et la morphologie du fond et des berges induisent des hétérogénéités transversales des écoulements et de la distribution des matières en suspension dans la section (fig. 15). Globalement, les vitesses de courant sont plus fortes au centre et les eaux y sont moins turbides qu'à proximité des berges. L'effet « méandre » est bien visible sur la figure. Les concentrations mesurées ponctuellement peuvent varier de 1 à 10 au moins selon le moment de marée et la position de la station de prélèvement, ce qui pose les problèmes de la représentativité de l'échantillonnage ponctuel et de la mesure dans le cadre du suivi de la qualité des eaux de l'estuaire.

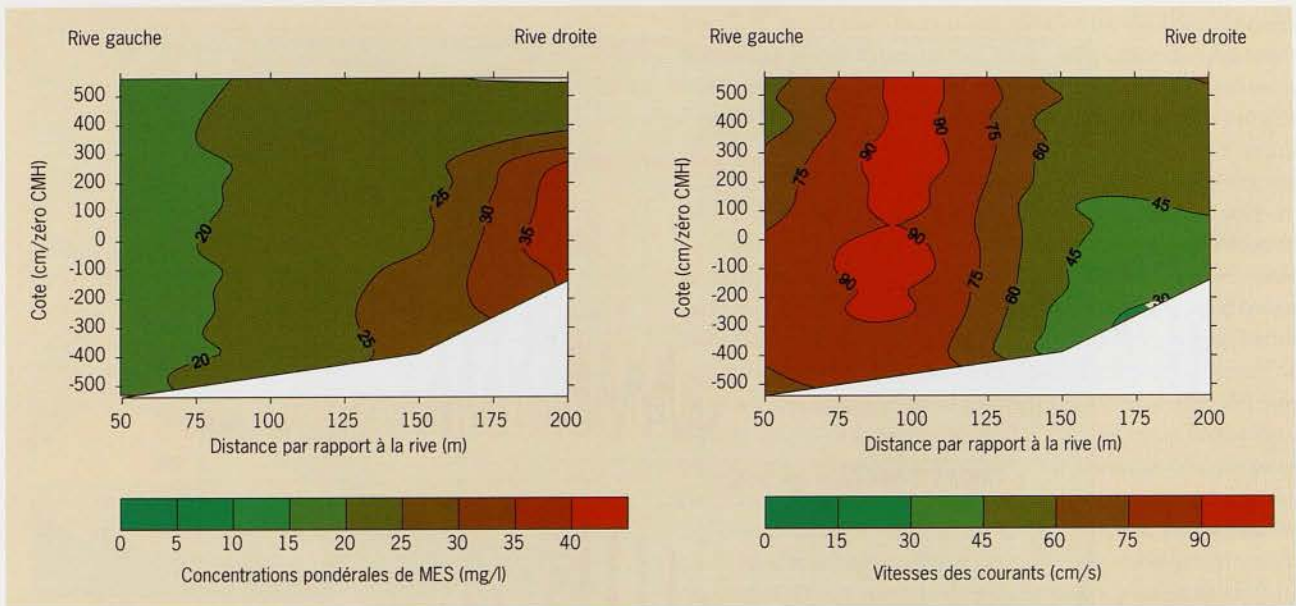


Figure 15 - Distribution des vitesses de courant et des concentrations pondérales de MES sur une section transversale de la Seine sur le site de Moulineaux (pk 258,50) le 20 avril 1996 au cours d'un cycle semi-diurne de marée (coefficient 94, débit fluvial à Poses : $216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Les fluctuations à l'échelle des cycles semi-lunaires et lunaires

Les enregistrements en continu de turbidité, réalisés au niveau de 3 stations de mesure réparties d'amont en aval, font apparaître la superposition d'évolutions semi-lunaires aux fluctuations semi-diurnes précédemment illustrées (fig. 16).

Les concentrations moyennes mesurées dans l'estuaire amont sont supérieures à celles arrivant à la même époque au barrage de Poses.

Les fluctuations semi-diurnes sont nettement renforcées en aval de Rouen.

À Caudebec-en-Caux, les fluctuations semi-diurnes, très marquées en vive-eau et déchet*, s'estompent en morte-eau* et début de revif*.

Au cours du cycle semi-lunaire, nous observons une remontée des niveaux moyens de concentration pour atteindre un maximum en fin de vive-eau, début de déchet. Les turbidités moyennes décroissent ensuite jusqu'en morte-eau, début de revif.

Les pulsations semi-lunaires des flux particuliers

Les données marégraphiques du port autonome de Rouen permettent de mettre en évidence l'anomalie hydrodynamique dite du « point caractéristique » qui correspond à l'intersection des niveaux de basses mers de vive-eau et de morte-eau (fig. 17).

En amont de ce point, les volumes d'eaux restants à basse mer sont donc plus importants en vive-eau qu'en morte-eau,

indépendamment des volumes oscillants en fonction de la marée. Cela traduit une fonction de stockage partiel temporaire d'eaux et des fluctuations semi-lunaires des temps de transit des masses d'eaux dans le secteur concerné. Nous pouvons donc établir un comportement schématique du transfert des masses d'eaux et de leur contenu particulière au cours des cycles semi-lunaires (fig. 18).

Au cours des périodes de vive-eau, l'écoulement des eaux fluviales et le transport des particules en suspension sont ralentis du fait de l'accroissement du volume d'eau présent dans la partie amont de l'estuaire (en amont du point caractéristique) tandis que les forts courants de marée sont responsables d'une remise en suspension de l'ensemble des stocks particuliers disponibles.

En fin de vive-eau, les concentrations particulières sont maximales. La diminution du niveau des basses mers au cours de cette période de déchet favorise l'évacuation vers l'aval des eaux et du matériel en suspension. Parallèlement, la diminution progressive des courants favorise la décantation des matériaux fins, ce qui limite la durée du pic de flux particulière.

À Caudebec-en-Caux (situé en aval du point caractéristique et à la limite de l'estuaire moyen), les fluctuations cycliques sont différentes : les fluctuations semi-diurnes renforcées en vive-eau et atténuées en morte-eau s'inscrivent principalement dans l'évolution du bouchon vaseux de l'estuaire moyen ; l'atténuation de morte-eau est accrue par la vidange des eaux partiellement décantées accumulées en amont.

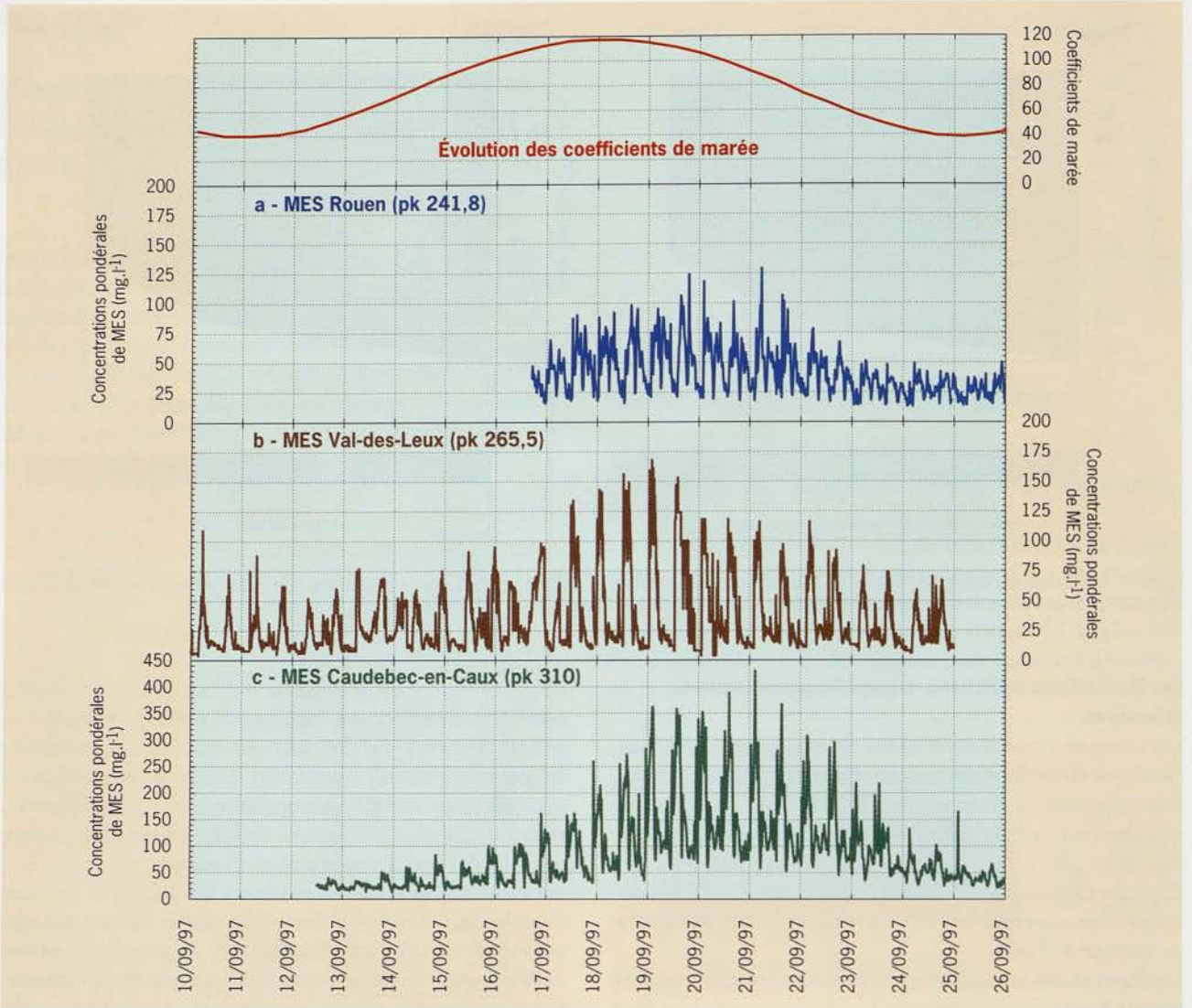


Figure 16 - Évolution des concentrations pondérales de MES et des coefficients de marée sur trois sites de l'estuaire amont de la Seine au cours d'un cycle semi-lunaire de marée. (a) Rouen (pk 241,80), (b) Val-des-Leux (pk 265,55), (c) Caudebec-en-Caux (pk 310,00).

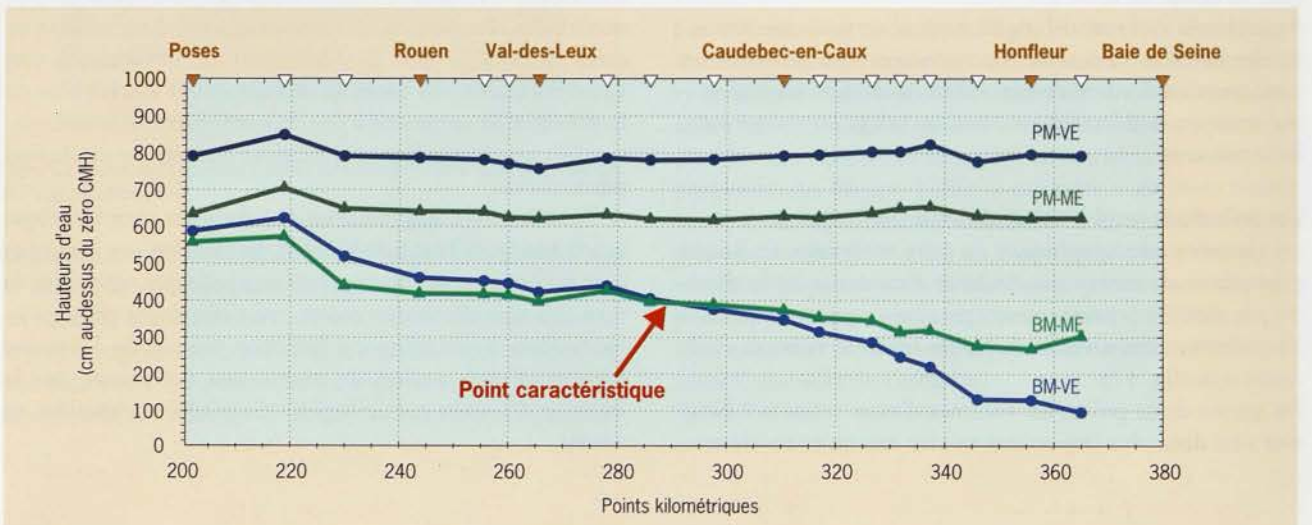


Figure 17 - Niveaux de pleine mer et de basse mer en vives-eaux (PM-VE, BM-VE) et en mortes-eaux (PM-ME, BM-ME) dans l'estuaire de la Seine pour un débit d'étiage (coefficients 113 et 46 pour un débit du fleuve au barrage de Poses de 300 m³.s⁻¹).

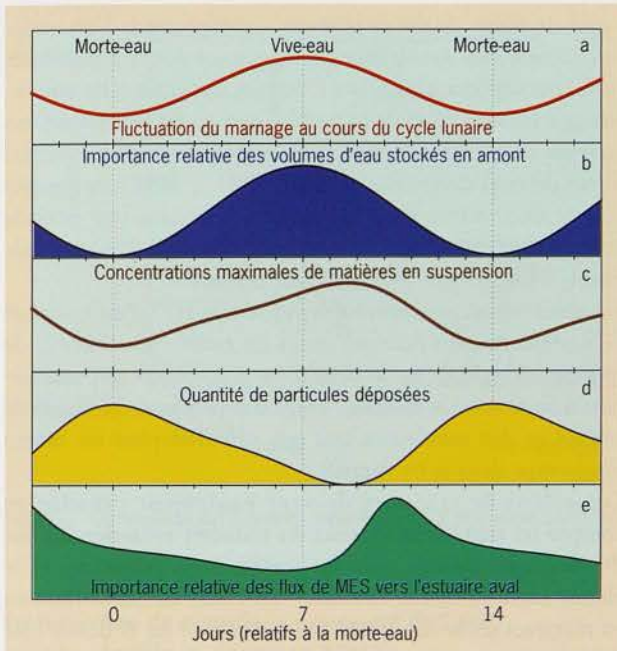


Figure 18 - Schéma conceptuel du transfert particulaire en étiage, à l'échelle des cycles vives-eaux-mortes-eaux dans l'estuaire amont à l'aval de Rouen.

Le transfert du flux particulaire de la crue

Les vasières de l'estuaire amont et le piégeage des dépôts de crue

Dans l'estuaire amont, la morphologie des écoulements est à l'origine de sites potentiels de stockage plus ou moins temporaires de matériaux fins (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique ») :

- le secteur des îles, localisé entre Elbeuf et Rouen, qui comprend des chenaux envasés à l'abri des îles, des bras morts et quelques vasières latérales comme celles de Cléon et de Oissel ;

- l'ensemble de l'aménagement portuaire de Rouen qui englobe l'élargissement du chenal et les développements latéraux des bassins portuaires qui constituent une zone bien identifiée de piégeage de matériaux fins dont une partie est exportée par dragage.

Pour examiner la rythmicité des processus de dépôt et de remise en suspension au cours d'un cycle hydrologique annuel complet, nous avons choisi de suivre l'exemple de la vasière de Oissel. Cette vasière découvrante a fait l'objet d'un suivi topographique et qualitatif des sédiments déposés.

En période de crue, l'accroissement du niveau des eaux permet l'immersion totale durant plusieurs semaines de ces zones latérales de pente faible, hydrodynamiquement protégées. Une partie du matériel particulaire apporté par la crue décante sur place.

Après la crue, le suivi topographique montre une lente érosion régressive (depuis le chenal vers la berge) qui se développe dès que la vasière est à nouveau soumise à des émergences tidales. Le processus est double : entraînement par drainage des dépôts exondés et érosion liée aux turbulences générées par le passage des bateaux et le clapot lié au vent.

Les flux verticaux de matière au-dessus du fond ont été quantifiés par des mesures de haute fréquence de vélocimétrie laser acquises dans une cellule de mesure cylindrique de 3 mm (Mouchel, 1999). Elles fournissent des taux d'érosion de 25 g/m^2 par épisode d'immersion, soit un flux érosif d'environ 17 kg/m^2 de vase et par an. Du fait des limites de l'instrumentation, ces flux mesurés de remise en suspension sont évalués par défaut et ne traduisent pas l'érosion globale enregistrée par le suivi topographique et sédimentaire qui fait état d'une perte de 100 à 200 kg de matériaux par mètre carré et par an. Les conséquences en matière de bilan de transfert peuvent alors devenir considérables si l'on rapporte ces taux d'érosion par rapport à l'ensemble des surfaces concernées (vasières de berge, bras morts et zones abritées dans le secteur des îles). La morphologie complexe de ces zones de piégeage rend difficile la mesure directe des dépôts de crue. L'approche indirecte par la modélisation peut être envisagée. Dans ce cadre, la mise en place de mailles latérales dans la simulation des processus de piégeage et de remobilisation est encourageante : les concentrations de MES en décrue fournies par le modèle en aval de Rouen sont alors plus élevées et correspondent mieux aux données mesurées.

L'évolution amont-aval du pic de turbidité lié à la crue

À la lueur des observations précédentes, le transfert des matériaux de la crue dans l'estuaire amont peut être analysé. L'interprétation des enregistrements réalisés à Poses, Rouen et dans la zone canalisée située en aval de Rouen conduit à la réalisation d'un schéma qui permet la définition de séquences fonctionnelles (fig. 19) :

- l'augmentation des débits fluviaux se traduit par des concentrations particulières plus élevées dans l'estuaire amont que celles des apports fluviaux ; cette mobilisation des dépôts, en début de crue, est généralement plus importante dans le secteur des îles compris entre Elbeuf et Rouen, siège de dépôts de berges (voir précédemment), elle explique les concentrations élevées en amont de Rouen ; les concentrations souvent moins élevées en aval de Rouen s'expliquent par le fait que les infrastructures portuaires constituent des pièges de sédiments moins facilement mobilisables ;

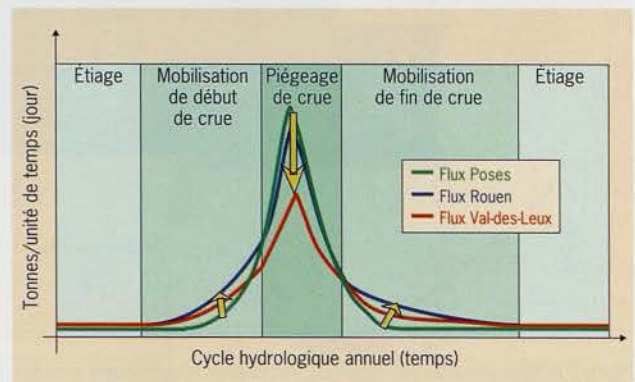


Figure 19 - Schéma de l'évolution des concentrations particulières dans l'estuaire amont au cours d'une crue au niveau de trois sites : l'amont du barrage de Poses (pk 202 : courbe verte), l'amont immédiat de Rouen (île Lacroix, pk 241,8 : courbe bleue) et l'aval de Rouen (Val-des-Leux, pk 265,5 : courbe rouge).

- le piégeage des matériaux du pic de crue dans le secteur des îles et les infrastructures portuaires de Rouen explique le déficit des matériaux transférés vers l'estuaire moyen ; l'amointrissement de l'onde de flot (contrariée par le débit fluvial) et les niveaux atteints lors de pleine mer (immersion des parties hautes des berges et des petits développements latéraux annexes) facilitent le piégeage en dépit de la poussée hydraulique fluviale ;
- la diminution des débits entraîne une diminution des hauteurs d'eau sur les berges et les zones annexes ; la remise en suspension par le clapot naturel, le passage des bateaux et l'alternance inondation-exondation sont à l'origine d'une mobilisation des dépôts de crue au cours de la décrue ; les turbidités de l'estuaire amont sont alors plus fortes que celles des apports du bassin versant amont.

Les bilans de transfert des flux particulaire liés à la crue

Les données enregistrées le long de l'estuaire amont permettent d'établir des bilans des processus de piégeage et de mobilisation par remise en suspension des dépôts superficiels en fonction des chroniques hydrologiques observées (fig. 20). Selon l'importance de la crue et de ses apports particuliers et selon qu'il s'agisse d'une première crue ou d'une crue succédant à une ou plusieurs crues antérieures, les proportions de mobilisation des dépôts et de piégeage seront variables.

Globalement, les pertes par piégeage sont de l'ordre de 30 à 50 % au moins selon la chronique hydrologique antérieure. Ces pertes sont compensées dans une proportion de 50 à 100 % par le produit des :

- mobilisations de début de crue dont l'âge des dépôts peut être de quelques mois, voire d'une année hydrologique complète ;

- mobilisations de fin de crue qui correspondent à un transfert différé des matériaux (de quelques jours à plusieurs mois) par rapport à leur date d'arrivée dans l'estuaire amont. Jusqu'à présent, il était considéré que 75 % des matériaux arrivant dans l'estuaire moyen correspondaient à un transfert direct de ceux de la crue (Avoine, 1981, 1985). Ces apports étaient donc supposés être transférés pendant une période extrêmement courte de l'année, soit 15 jours à 2 mois maximum, selon le cycle hydrologique annuel.

Les résultats récents témoignent à la fois : (1) d'un transfert de matériaux plus étalé au cours du cycle annuel et (2) de processus de dépôt et de remise en suspension qui conduisent à la notion de mélange entre des produits fraîchement arrivés et des matériaux qui ont séjourné plus ou moins longtemps dans le lit fluvial.

Ces bilans de transfert doivent également prendre en compte les matériaux extraits du transfert estuarien du fait des dragages réalisés dans les installations portuaires et le chenal entre Rouen et Caudebec-en-Caux. La quantification en matières sèches des produits de dragage est délicate. Elle englobe une part de sables fins et sablons provenant du remplissage alluvial holocène de la Seine. Nous pouvons toutefois estimer que 150 à 200 millions de tonnes de matériaux fins par an sont ainsi sortis du transfert amont-aval, ce qui représente une perte de 25 à 30 % du flux annuel du bassin versant amont.

Si l'on combine enfin les modifications des apports de la crue enregistrées dans l'estuaire amont avec le caractère impulsionnel rythmé par les cycles semi-lunaires des flux particulaire d'étiage, nous aboutissons à un schéma conceptuel qui témoigne du caractère très discontinu des apports de matériaux à l'estuaire moyen (fig. 21).

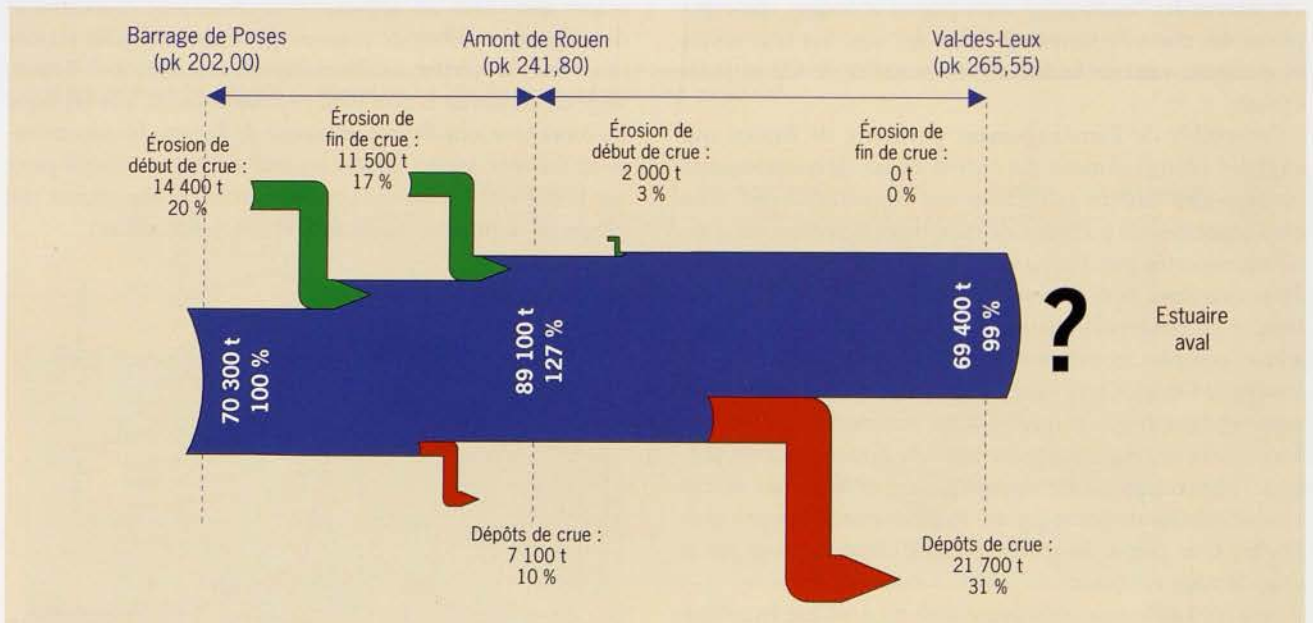


Figure 20 - Bilan en masse des transferts particulaire dans l'estuaire amont de la Seine pour l'exemple du premier pic de crue 1997-1998 (du 16 novembre 1997 au 31 décembre 1997).

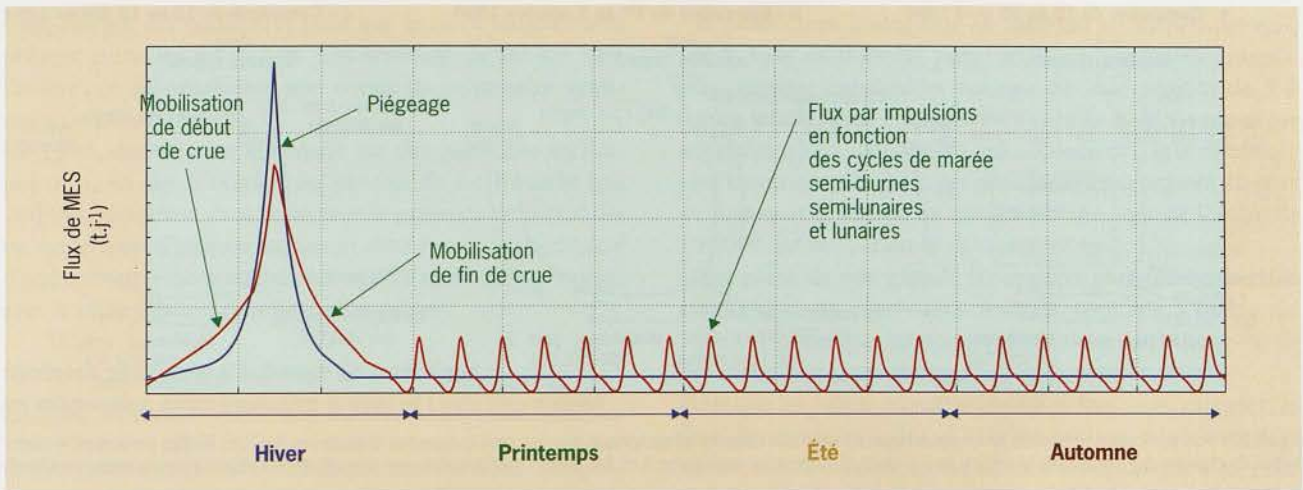


Figure 21 - Comparaison des évolutions annuelles des flux de matériel particulaire dans la partie continentale (en bleu) et dans l'estuaire amont de la Seine (en rouge).

La remontée de matériaux provenant de l'aval sous le contrôle du pompage tidal

Dans les développements qui précèdent, nous nous sommes focalisés sur le transfert amont-aval des matériaux fins. Les mesures des flux particulaires et des radiotraçeurs permettent de mettre en évidence l'existence d'un flux de matériaux provenant des domaines marins et estuariens moyens.

Nous ne sommes pas encore en mesure de quantifier la proportion réelle de ces apports dans les MES et les dépôts de l'estuaire amont.

La mesure des flux dissous et particulaires

Des mesures de flux ont été réalisées dans des sections transversales de l'estuaire amont au cours de cycles semi-diurnes (voir ci-dessous, « Calcul des flux particulaires amont »).

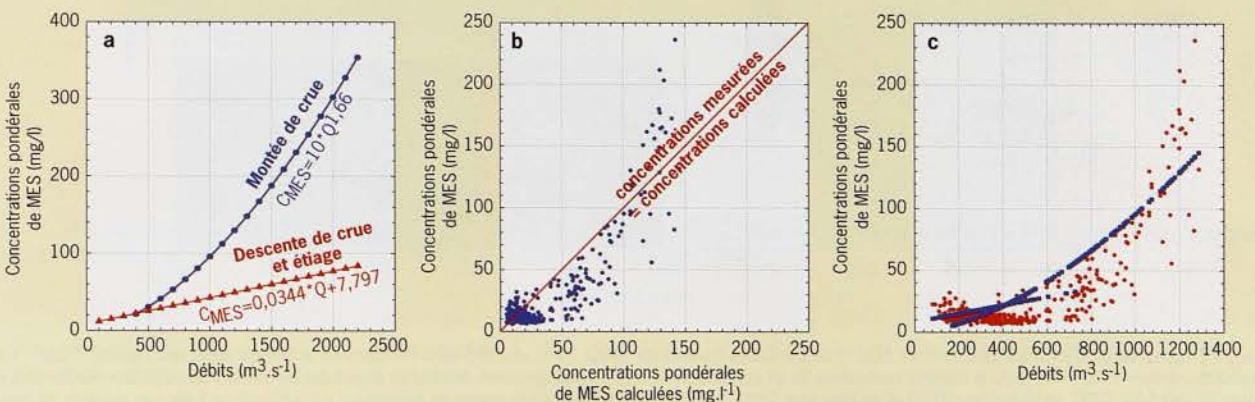
Calcul des flux particulaires amont (documents SNS)

Avant 1995, deux équations empiriques étaient appliquées pour l'évaluation des concentrations pondérales de MES en fonction des débits estimés à Poses, tenant compte de la pente du plan d'eau du secteur fluvial situé en amont (a) en montée de crue (courbe bleue), en descente de crue ainsi qu'en étiage (courbe rouge). Elles tentent de reproduire notamment l'hystérésis rétrograde de la première grande crue.

La relation entre les concentrations ainsi calculées et les concentrations mesurées (b) souligne que le calcul tend à majorer les concentrations réelles lorsqu'elles sont inférieures à 100 mg/l et à minorer les concentrations les plus élevées.

La confrontation des courbes de concentrations calculées (courbes bleues déduites des relations de la figure a) avec le nuage de points des concentrations mesurées (points rouges) en fonction des débits (c) montre que la rupture dans la qualité des estimations est placée autour de 1 000 mètres cubes par seconde.

En moyenne, le flux global annuel était sans doute satisfaisant mais les flux journaliers n'étaient pas assez fiables d'où le développement d'un enregistrement en continu de la turbidité exprimée par sa moyenne journalière.



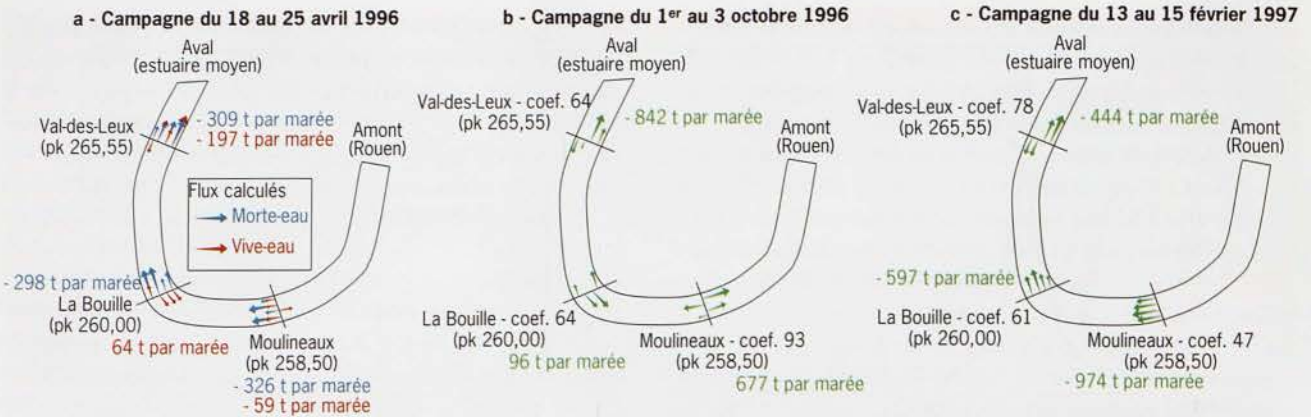


Figure 22 - Flux particulaires résiduels horizontaux replacés dans leur contexte géographique pour les trois campagnes d'étude des flux. Les flèches présentent la contribution de chacune des stations de la section au flux résiduel particulaire semi-diurne. Les flux positifs sont orientés vers l'amont, les flux négatifs sont orientés vers l'aval.

Indépendamment des inversions de courant, les flux résiduels d'eaux mesurés à l'échelle d'un cycle semi-diurne correspondent globalement à l'écoulement normal du débit de la rivière et sont toujours orientés d'amont en aval.

Les calculs des flux résiduels particulaires à l'échelle du cycle semi-diurne de marée montrent qu'ils ne sont pas toujours orientés dans le sens amont-aval de l'écoulement résiduel des eaux (fig. 22). Des transferts particulaires résiduels aval-amont se produisent notamment en période de vive-eau. Ils ne sont pas homogènes selon les sections et les stations considérées. Ils dépendent notamment de l'hétérogénéité des écoulements liée à la morphologie des fonds et au tracé méandrique.

Le mécanisme de pompage tidal peut être responsable de remontées particulaires localisées par impulsions et ce processus peut s'exercer de manière différente selon la taille et la nature des matériaux. En effet, les contraintes d'érosion au moment du coup de flot peuvent être supérieures à celles développées au maximum de jusant. Les premières sont susceptibles de mobiliser des particules facilement décantables

et difficilement remises en suspension par les courants de jusant; ces matériaux (y compris sables fins et sablons qui transitent sur le fond) sont susceptibles de subir un transit résiduel spécifique aval-amont.

Les remontées de particules marines observées au moyen de radio-traceurs

Les mesures de ^{60}Co et le ^{137}Cs dans chacun des pôles de mélange, marin et fluvial, offrent la possibilité d'étude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire. Elles ont été réalisées en 1990, 1993 et 1995 sur du matériel particulaire fin déposé tout au long de l'estuaire. En 1996, en fin d'étiage, deux mesures ponctuelles ont été réalisées sur du matériel particulaire en suspension à La Bouille (pk 260,00). Le suivi d'un stock de particules marines, identifié à l'aide d'un rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ proche de 0,2, montre une remontée de ce stock dans l'estuaire. En 1990, ces particules marines se retrouvent entre les pk 318,00 et 354,00; ce même stock est retrouvé jusqu'aux environs du pk 310,00 en 1993. En 1995, il est localisé entre les pk 280,00 et 310,00 (fig. 23).

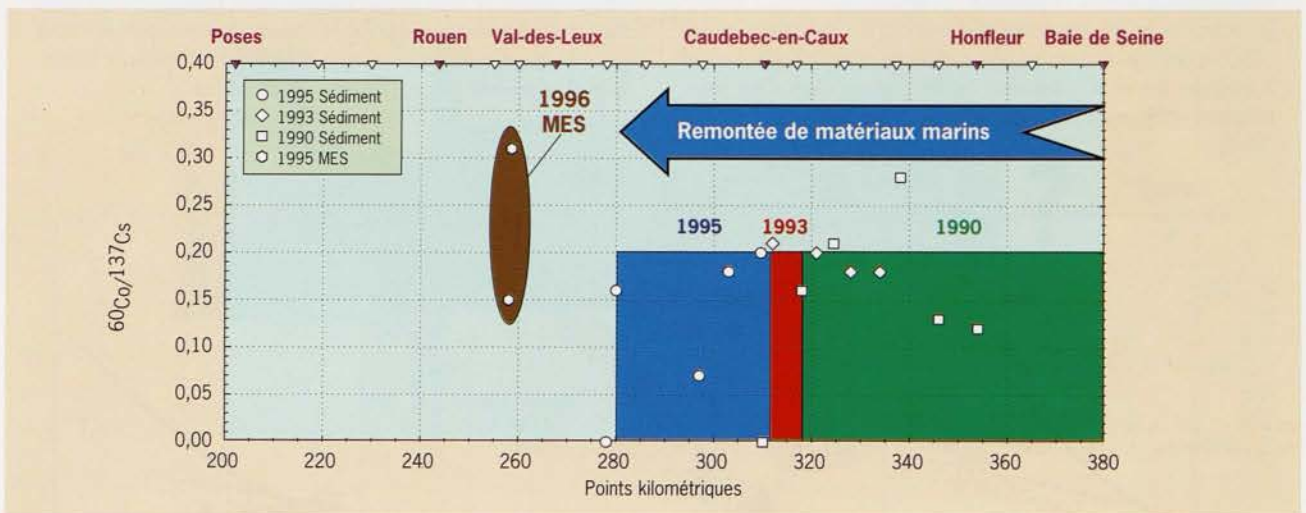


Figure 23 - Localisation d'un stock sédimentaire déposé de particules marines en 1990, 1993 et 1995 dans l'estuaire de la Seine d'après leur rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ et mesure du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans le matériel particulaire fin en suspension en 1996. La progression des limites amont des remontées de matériaux marins sont soulignées en vert pour 1990, en rouge pour 1993 et en bleu pour 1995. La limite amont des apports marins en suspension est soulignée en brun. Les résultats de mesure correspondent aux points (signification des symboles incorporés dans la figure) positionnés dans le profil longitudinal exprimé en pk.

Cinq ans ont été nécessaires pour que le stock sédimentaire présent entre les pk 318 et 354 remonte de 60 km vers l'amont, ce qui représente une vitesse de progression apparente de 10 km par an.

En 1996, des mesures effectuées sur des particules en suspension, en fin d'étiage, au niveau de La Bouille (pk 260,00), montrent dans ce secteur la présence de particules en suspension d'origine marine et confirment la possibilité d'une remontée du matériel particulaire ayant été en contact avec le milieu marin dans l'estuaire amont.

Synthèse des bilans d'échange de matériaux en suspension entre l'estuaire amont et l'estuaire moyen

Outre les remontées de matériaux marins dont l'importance quantitative n'est pas encore bien mesurée, les apports de matériaux fins de l'estuaire amont vers l'estuaire moyen doivent prendre en compte (fig. 24) :

- les matériaux issus du bassin versant intra-estuarien et les rejets directs qui sont de l'ordre de 60 000 tonnes par an (bilan restant à préciser) ;

- la production biologique de matériel en suspension qui, sur la base de données ponctuelles de production phytoplanctonique extrapolées sur une période propice de 5 à 6 mois par an, peut être estimée à près de 60 000 tonnes par an (estimation quantitative qui nécessitera d'être vérifiée) ;

- les matériaux des dragages dans les infrastructures du port de Rouen et le chenal de navigation qui sont de l'ordre de 200 000 tonnes par an (à préciser).

D'un point de vue global, les apports particuliers amont annuels dans l'estuaire moyen sont de l'ordre de 500 000 tonnes par an en moyenne dont seulement 80 % des matériaux proviennent du bassin versant amont.

Pour que les bilans soient complets, il faut aussi intégrer les flux de matériaux fins d'origine marine dans l'estuaire amont dont l'existence a été démontrée (en particulier pour ce qui concerne les fractions décantables) mais non réellement quantifiée.

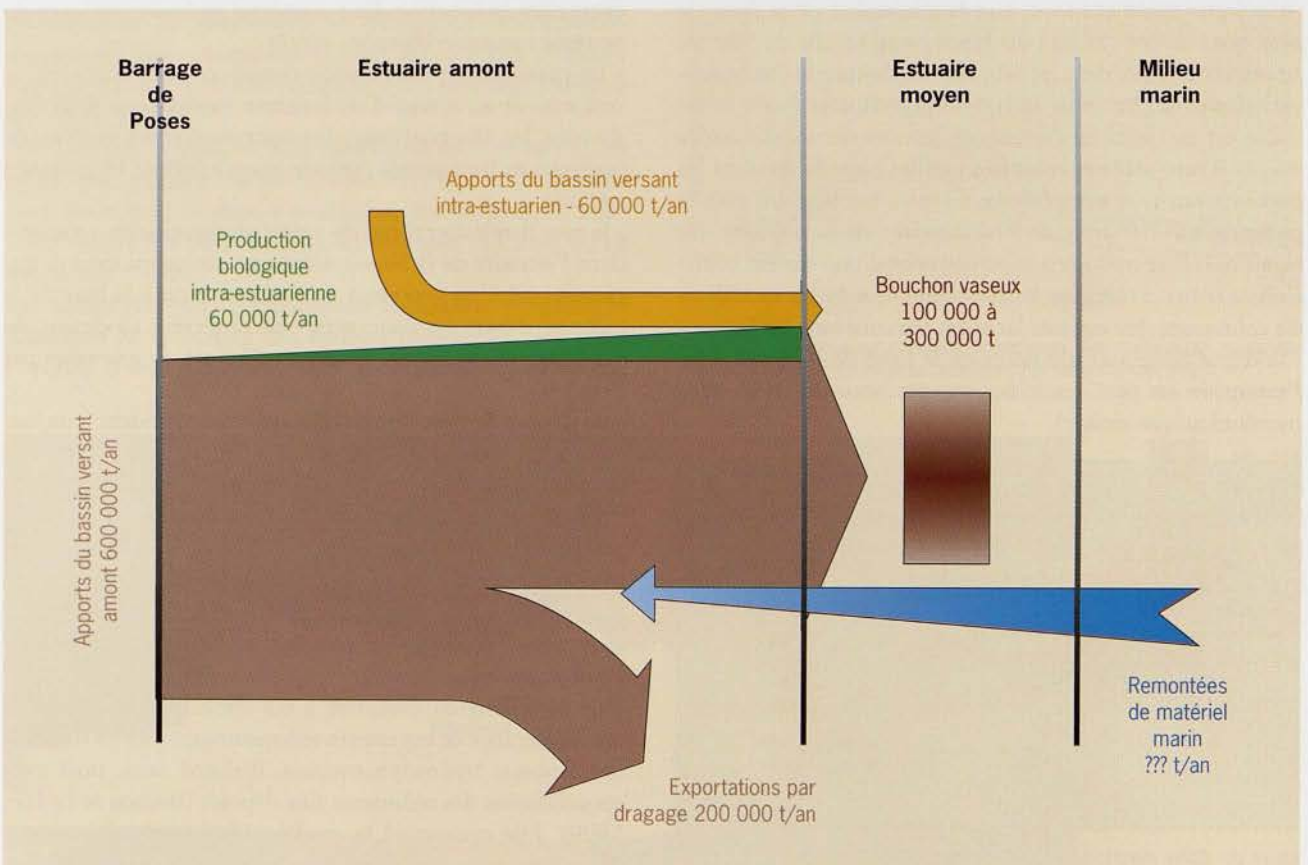


Figure 24 - Bilan quantitatif des échanges annuels entre estuaire amont et estuaire moyen (la représentation à l'échelle du stock de matériaux présents dans le bouchon vaseux est figurée pour aider à la compréhension des mécanismes discutés dans le chapitre suivant).

Chapitre IV

Dynamique des matières en suspension dans l'embouchure

Cadre hydrodynamique de l'estuaire moyen

L'estuaire moyen, qui se développe depuis Caudebec-en-Caux jusqu'au Havre, est le siège de l'intrusion saline et des fluctuations du bouchon vaseux principal (voir chapitre II). Son aménagement conditionne largement les processus hydrosédimentaires (Hamm & Viguier, 1997 ; Avoine *et al.*, 1981 ; voir les fascicules « Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau » et « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique »).

Dans la partie amont de ce secteur, la Seine est entièrement canalisée.

Dans la partie aval, correspondant à l'embouchure, le chenal de navigation de la Seine est canalisé par 2 digues submersibles (fig. 25) :

- la digue basse nord qui fixe la limite sud de la fosse de Flot nord et des vasières du Hode ; une brèche de 500 m, située en aval du pont de Normandie, assure la communication avec le chenal de navigation ; cette vaste zone inondable est en cours de colmatage par des sédiments sablo-vaseux à vaso-sableux colonisés par des halophytes dans les parties hautes ; ce remplissage récent a été accéléré avec la construction du pont de Normandie ; dans le cadre des mesures compensatoires, le creusement d'une vasière artificielle permet d'observer le rôle écologique et les modalités du colmatage des vasières latérales (Bessineton, 1997) ;
- la digue basse sud qui délimite la fosse de Flot sud dont l'extension est plus restreinte compte tenu du cadre géomorphologique naturel.

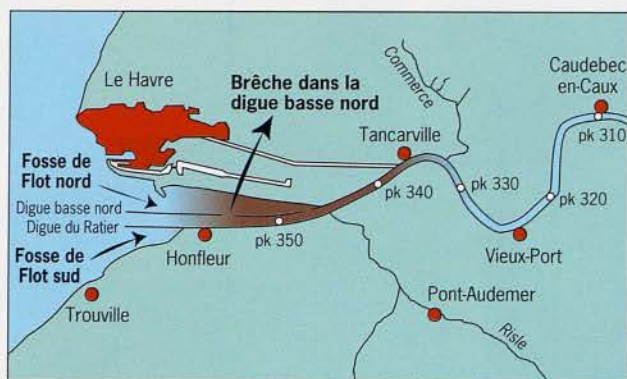


Figure 25 - Cadre morphologique de l'embouchure de la Seine.

Globalement, l'embouchure s'ouvre vers l'ouest face aux vents forts dominants de secteur W-SW qui joueront un rôle important dans le cycle du transfert des matériaux fins. Le colmatage actuel et récent des vasières latérales et, dans une moindre mesure, du chenal de navigation (canalisation

visant à renforcer l'évacuation des matériaux vers l'aval) est lié à deux stocks principaux de matériaux (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique ») :

- les matériaux sableux d'origine essentiellement marine (les apports sableux actuels du bassin versant continental sont négligeables) qui sont principalement transportés par saltation et charriage et, accessoirement, en suspension ;
- les matériaux fins majoritairement véhiculés en suspension.

Les processus de concentration des matériaux fins

Dans le cadre géomorphologique de l'estuaire moyen, les principaux stocks de matériaux fins se retrouvent au niveau de trois entités morphosédimentaires qui interagissent entre elles en fonction des paramètres hydrodynamiques du système estuarien (Brenon, 1997) :

- les **matières en suspension** dans la colonne d'eau qui se concentrent au niveau d'un bouchon vaseux dont nous étudierons les fluctuations ; les concentrations varient de quelques milligrammes par litre jusqu'à près de 10 grammes par litre ;
- la vase fluide ou **crème de vase** (encore appelée « **vapie** » dans l'estuaire de la Seine), située au-dessus du fond et qui correspond à un processus de concentration à la base de la colonne d'eau ; les concentrations observées au-dessus du fond peuvent atteindre quelques dizaines de grammes par litre ;
- les dépôts de **vase consolidée** qui correspondent à un tassement plus ou moins prononcé de vases fluides tant que celles-ci ne sont pas soumises à des processus de remise en suspension.

Les processus de décantation (liés à la vitesse de chute des matériaux) et de tassement assurent un continuum entre ces trois entités et les mécanismes de remise en suspension et alimentent les cycles de transfert et d'échange au sein de l'embouchure.

Une modélisation évolutive a été choisie pour simuler le comportement de ces entités sédimentologiques en fonction des facteurs hydrodynamiques, d'abord sans, puis avec consolidation des sédiments fins déposés (Brenon & Le Hir, 1999). Elle comprend le modèle 1DH bien adapté pour l'estuaire amont fortement canalisé et se poursuit par l'utilisation d'un modèle 2DH (voir fascicule « Les modèles : outils de connaissance et de gestion »). Le développement d'un modèle tridimensionnel SAM-3D permet enfin d'intégrer convenablement le rôle de la bathymétrie (pour rendre compte du piégeage latéral des matériaux fins) et l'influence du gradient de salinité.

Le bouchon vaseux d'embouchure

Conformément à Avoine (1981, 1985), Dupont (1997) et Brenon (1997), les processus de concentrations turbides dans l'estuaire de la Seine répondent au contexte hydrodynamique (voir chapitre II) et s'expriment comme suit :

- le bouchon vaseux est principalement lié à la circulation résiduelle et sa position moyenne dans l'estuaire est directement dépendante du point nodal hydrodynamique; la simulation 2DH, ne prenant pas en compte le gradient de salinité lié à l'intrusion saline, reproduit convenablement les fluctuations du bouchon vaseux sans toutefois restituer des concentrations suffisantes;

- l'asymétrie de l'onde de marée maintient le bouchon vaseux à l'intérieur de l'estuaire endigué, excepté en période de crue durant laquelle il est susceptible d'être partiellement expulsé par la poussée fluviale;

- l'influence des gradients de densité tend à concentrer le bouchon vaseux; le développement de la modélisation 3D, prenant en compte l'intrusion saline, permet en effet d'obtenir des concentrations plus réalistes du bouchon vaseux par rapport aux données antérieures du modèle 2DH (fig. 26);

- les fluctuations du bouchon vaseux se réalisent avec des phénomènes de gonflement et de dégonflement semi-diurnes liés directement aux vitesses des courants de marée comme cela est le cas des estuaires à fort marnage (Allen *et al.*, 1974, 1980);

- le bouchon vaseux est plus développé en vive-eau qu'en morte-eau, période où les vitesses maximales de courant sont moindres; la zone d'oscillation amont-aval du bouchon vaseux est plus étendue en vive-eau (18 km) qu'en morte-eau (10 km).

Les aménagements (chenalisation croissante, dragages et réduction de la surface des vasières inondables) ont été à l'origine d'une migration vers l'aval du bouchon vaseux

vers le début des années quatre-vingt (voir p.9 « Suivi des MES dans l'estuaire »). La comparaison des résultats obtenus au cours des études du Saum estuaire de Seine (1978-1980) et du programme Seine-Aval ne révèle pas de modification significative récente du comportement du bouchon vaseux, si ce n'est un renforcement des tendances acquises au cours des années soixante-dix (voir p.9 « Suivi des MES dans l'estuaire »).

Globalement, le stock de matériaux du bouchon vaseux, compris dans la partie endiguée du chenal de navigation de l'estuaire moyen, varie entre 100 000 et 300 000 tonnes. Résultat des facteurs hydrodynamiques, les matériaux du bouchon vaseux correspondent à un tri granulométrique qui se traduit par des distributions semi-logarithmiques dont le mode principal apparent est nettement centré autour de 10 μm avec une asymétrie vers les particules grossières. Cette courbe contraste avec celles obtenues dans les eaux en amont et en aval qui sont plus étalées, de caractère plurimodal (fig. 27).

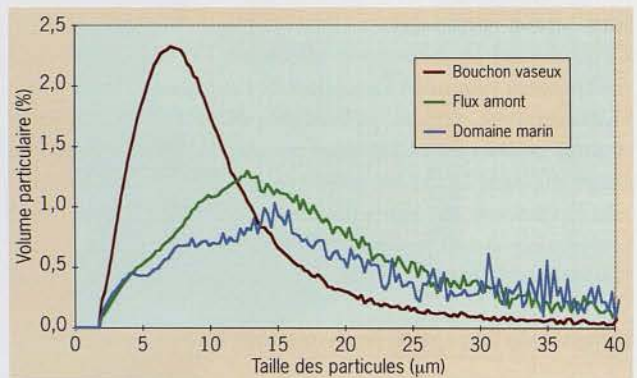


Figure 27 - Distributions microgranulométriques des matières en suspension dans le gradient longitudinal de l'estuaire de la Seine (16 mai 1994).

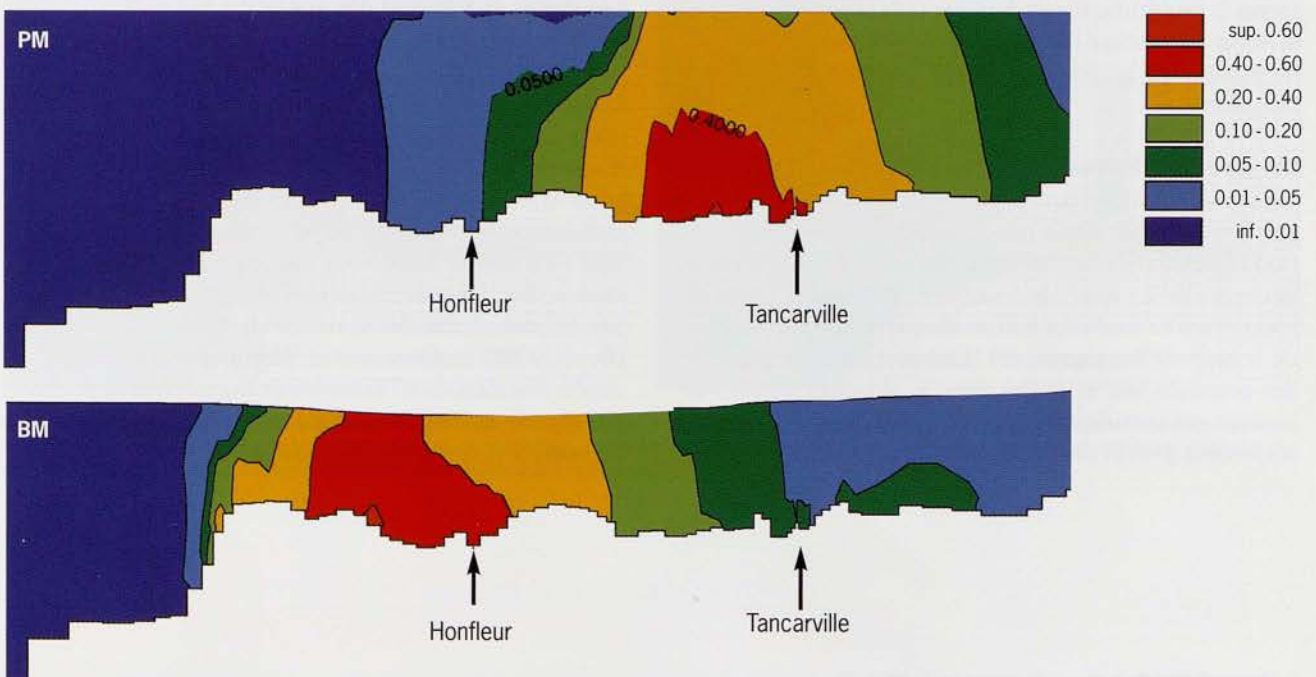


Figure 26 - Coupe longitudinale dans le chenal de navigation de la simulation 3D du bouchon vaseux de la Seine dans les situations de pleine mer (PM) et de basse mer (BM) pour des conditions de marées de vive-eau et un débit moyen de la Seine ($400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Les observations de crème de vase (vapie) dans le chenal de navigation

Dans le chenal de navigation, la vapie est principalement observée en deux endroits.

- À proximité de la brèche de la digue basse nord (pk 345 à 354) Ces concentrations très turbides de fond y apparaissent plutôt en morte-eau par débit faible à moyen. Elles correspondraient à la formation classique de crème de vase par décantation du bouchon vaseux en morte-eau, comme cela a été décrit pour la Loire (Gallenne, 1974) ou pour la Gironde (Allen, 1973). En Seine, ce mécanisme est nettement moins prononcé du fait des concentrations relativement faibles du bouchon vaseux.

- Au niveau de l'engainement du chenal de navigation (pk 357 à 367)

La vapie y apparaît plutôt par fort débit en marée moyenne ou en vive-eau. Elle résulterait plutôt du dépôt transitoire des produits de l'érosion générée par les vagues et les vents forts locaux (sud-ouest).

Cette remise en suspension affecterait (1) soit les niveaux fraîchement déposés à l'occasion de l'expulsion du bouchon vaseux en crue, (2) soit les vasières peu profondes ou découvantes telles que celles décrites aux abords de l'embouchure ou dans la vasière nord (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique »), voire les vasières fossiles situées devant la côte du Calvados.

L'impact du forçage hydrodynamique lié aux tempêtes

L'observation des processus hydrosédimentaires au cours d'une forte tempête et le suivi morphosédimentaire (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique ») de la vasière nord permettent de préciser l'importance de l'énergie dissipée par les vagues dans le cycle du transfert des matériaux fins dans l'embouchure.

Les processus hydrosédimentaires

Les mesures réalisées dans la partie découvante de la vasière nord¹ au cours de fortes tempêtes (février 1997) révèlent : (1) l'apparition de surcotes pouvant atteindre 0,60 m (avec des vents de 25 m.s⁻¹ de secteur W-NW), (2) l'accroissement des vitesses du courant au-dessus du fond en fonction de la hauteur des vagues, (3) l'augmentation, en parallèle, des pressions interstitielles dans le sédiment et (4) l'accroissement considérable des concentrations de matières en suspension dans la colonne d'eau.

Les fonds constitués de vase ne sont pas rigides et les oscillations de pression dues aux vagues engendrent des modifications rhéologiques qui peuvent conduire à une liquéfaction totale ou partielle de la couche superficielle. La liquéfaction correspond à l'affaiblissement, voire à l'anéantissement total de la structure sédimentaire (rupture des liaisons interparticulaires).

Les vents et les vagues génèrent des courants suffisamment forts pour mélanger dans la colonne d'eau les sédiments provenant de cette couche superficielle. Ces courants perdurent durant l'étalement de pleine mer et empêchent ainsi la décantation classiquement observée pendant cette période de la marée semi-diurne dans les vasières latérales.

L'importance de l'érosion liée aux tempêtes dans les bilans de transfert des matériaux

Les fortes charges particulières ainsi entraînées vers l'amont et, latéralement, vers le chenal de navigation ainsi que les 20 cm d'érosion constatés localement démontrent que le vent constitue un forçage du transit des matériaux fins qui avait été sous-estimé avant ces travaux. Les mesures *in situ* fournissent des éléments de calibration de la modélisation en cours de l'interaction houle-vase qui, seule, permettra d'établir le bilan de l'influence de ce forçage lié aux vents au niveau des transits de matériaux fins à l'échelle de l'embouchure.

En attendant l'aboutissement de telles simulations sur de longues périodes, les relevés morphosédimentaires réalisés dans la vasière nord, avant et après une période de forte tempête, ont révélé que les flux alors érodés en domaine estuarien peuvent atteindre 100 000 à 200 000 tonnes. C'est l'équivalent du flux de matière originaire du bassin versant amont qui transite vers l'embouchure à l'occasion d'une crue (60 000 à 200 000 tonnes).

Les cycles de transfert des matériaux fins dans l'embouchure

Les « marqueurs particuliers » permettent de préciser le cycle des sédiments fins dans l'embouchure. En utilisant les diatomées comme marqueurs des apports particuliers continentaux et marins, Dupont *et al.* (1994) ont montré la prédominance des matériaux fins d'origine continentale dans le bouchon vaseux mais aussi une part accrue des apports marins dans les vasières latérales. Les informations fournies par les radionucléides émanant de l'usine de La Hague (Boust, 1998) confirment cette contribution marine dans les dépôts fins mais aussi l'existence de fluctuations importantes des apports marins dans les sédiments fins superficiels dans les vasières et sur les bords du chenal.

1. Voir localisation de la station de mesure sur la figure 28.

Les observations et les mesures évoquées dans les paragraphes précédents révèlent que ces fluctuations sont le résultat de processus qui se succèdent ou se superposent au cours d'une année :

- L'expulsion du bouchon vaseux en crue (fig. 28 et 29)

Lors des grandes crues hivernales, les forts débits repoussent vers l'aval le point nodal hydrodynamique et, par conséquent, le bouchon vaseux principal. Au jusant (et plus particulièrement en vive-eau), le bouchon vaseux est partiellement expulsé hors des limites du chenal canalisé par les digues submersibles.

Par temps relativement calme, les fractions les plus décantables des matériaux ainsi expulsés sédimentent à proximité immédiate et alimentent les dépôts vaseux subtidiaux d'embouchure (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique »). Une autre partie des matériaux est entraînée vers le large en baie de Seine orientale. Inversement, la renverse au flot,

permettra le retour d'une faible proportion des matériaux dans les vasières latérales et, dans une moindre mesure, dans le chenal principal.

Outre l'enrichissement des dépôts vaseux externes, ces processus d'expulsion du bouchon vaseux se traduisent par un appauvrissement du stock de matériaux contenus dans le bouchon vaseux bien que le flux de matériaux provenant de l'amont soit maximal en cette période de crue.

- L'érosion en période de mer agitée de secteur ouest (fig. 30)

Les tempêtes et vents forts provoquent une érosion et une remise en suspension des dépôts fins subtidiaux et des vasières internes à l'embouchure. Les produits sont entraînés vers l'extrémité amont des fosses de Flot où une faible partie peut être piégée mais le plus gros des apports aboutit au chenal de navigation et sera intégré ensuite au stock particulaire du bouchon vaseux.

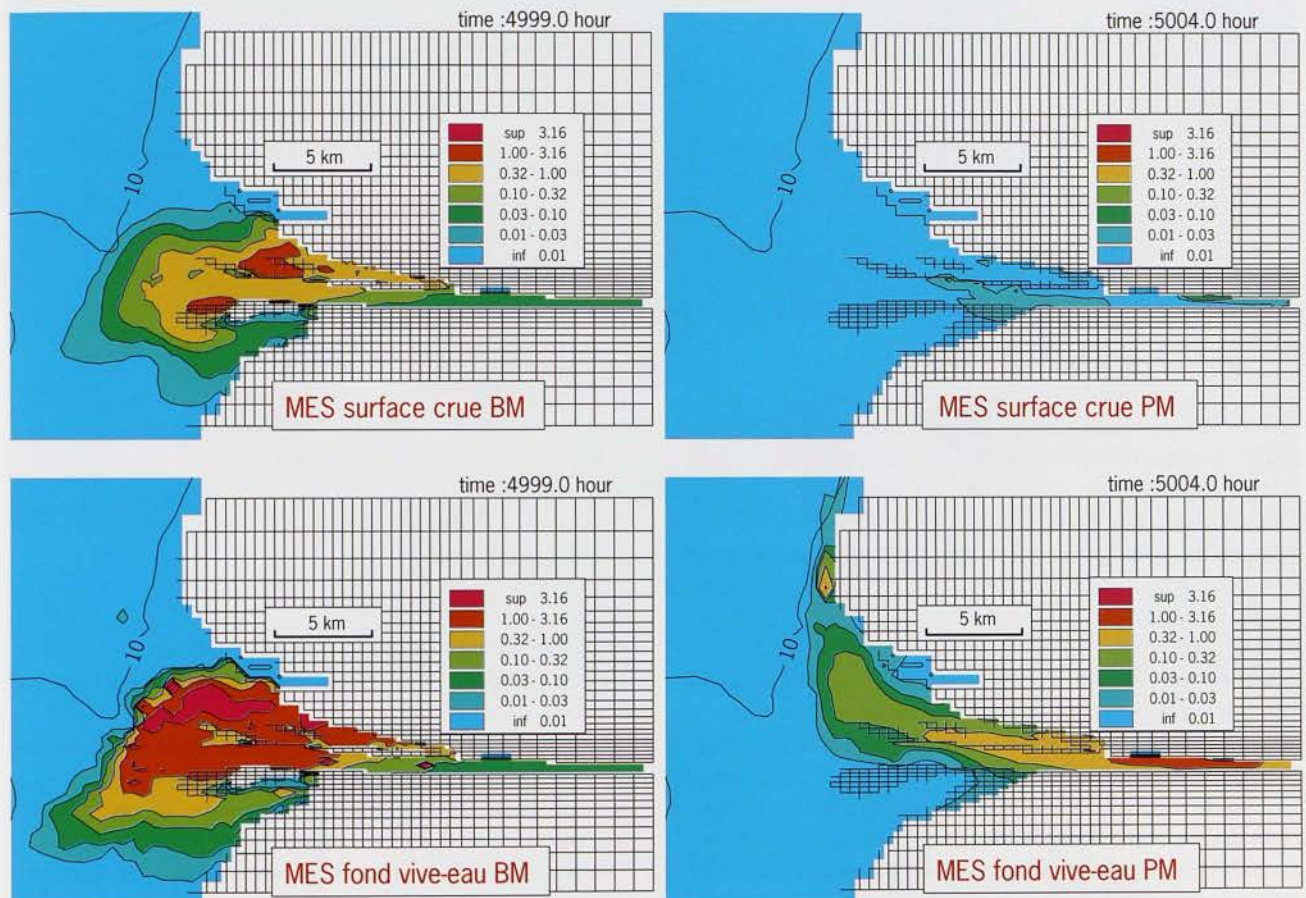


Figure 28 - Aspects à basse mer (BM) et en pleine mer (PM) de la simulation 3D du panache turbide dans l'embouchure de la Seine pour une période de crue : répartition des matières en suspension dans les eaux de surface et, en profondeur, à proximité du fond ; les teneurs en matières en suspension sont plus fortes au-dessus des vasières latérales que dans le chenal de navigation, siège de l'expulsion hydraulique.

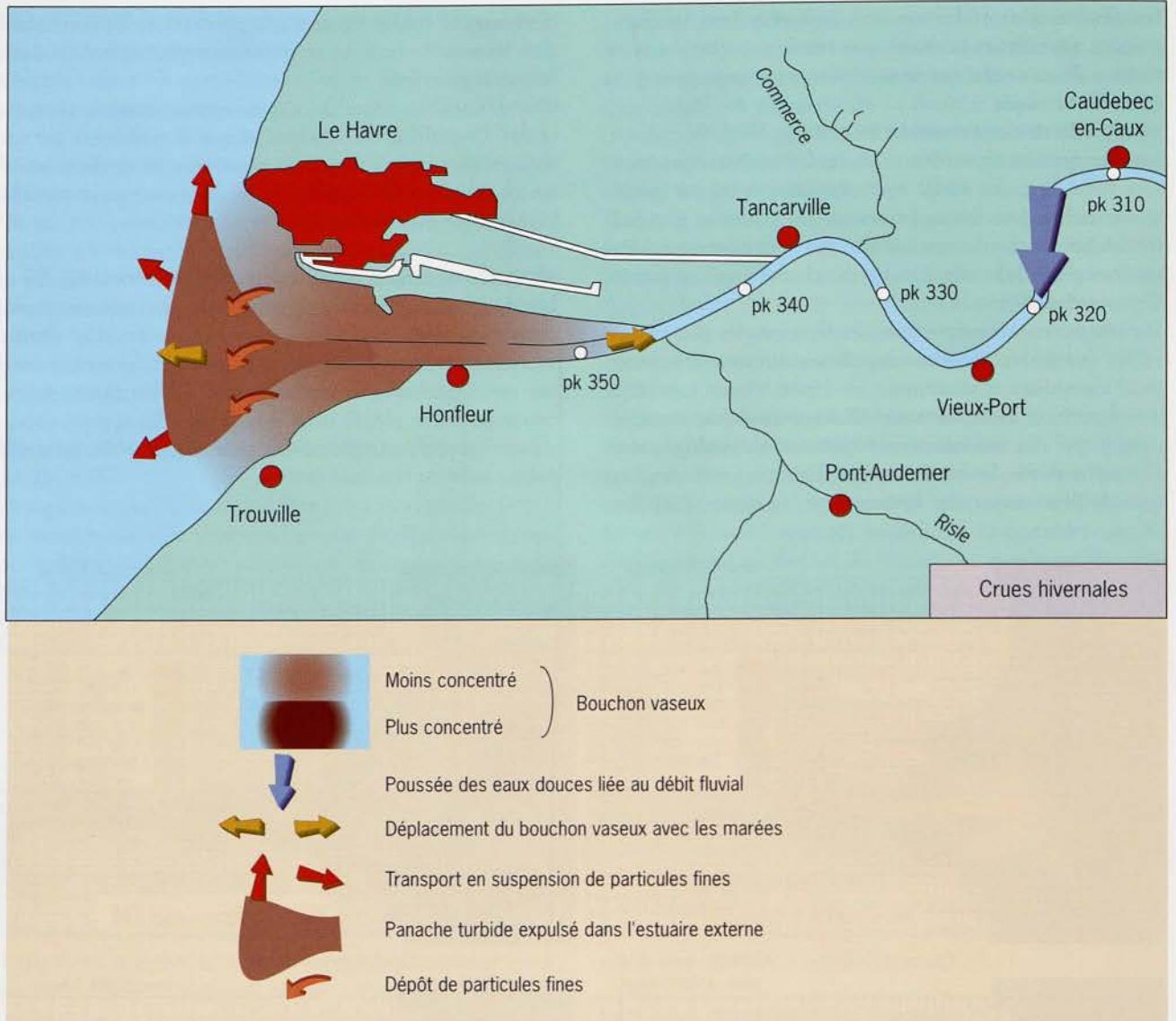


Figure 29 - Schéma de synthèse des processus hydrosédimentaires et de dépôt en période de crue de la Seine.

- Le « renforcement » du bouchon vaseux à l'étiage (fig. 31)
Lors des périodes d'étiage, la diminution du débit fluvial conduit à une remontée du point nodal hydrodynamique et les « excursions » tidales du bouchon vaseux restent cantonnées dans le chenal endigué.
Le taux de matériaux exportés vers la baie de Seine orientale reste donc extrêmement faible. En dépit d'un flux relativement limité provenant de l'amont, les matériaux s'accumulent au niveau du bouchon vaseux qui, après un à plusieurs mois d'étiage, présente des concentrations élevées et représente un stock pouvant atteindre 300 000 tonnes de matériaux fins.

- Les interactions pseudocycliques
Dans le cycle annuel, ces trois phases de processus n'ont pas la même signification :
- l'opposition crue-étiage correspond au cycle hydrologique qui, en domaine tempéré à influence océanique, témoigne de la « saisonnalité » des principales périodes de précipitation (essentiellement autour de l'hiver) et du développement du couvert végétal : en « période de végétation », l'évapotranspiration du couvert végétal mobilise une fraction importante des pluies et le ruissellement ne se déclenche qu'à partir d'un seuil élevé du taux de précipitation ;
- l'apparition aléatoire des périodes météorologiques de dépression présente une fréquence plus importante de l'au-

tomne au printemps (hiver compris); ces aléas météorologiques produisent à la fois des périodes de mer agitée provoquant érosion et remise en suspension et des pluies sur le bassin versant qui sont susceptibles de déclencher des crues différées, notamment lorsqu'elles interviennent sur des sols (en particulier sols cultivés) dont le couvert végétal est faible. Au cours du cycle hydrologique annuel, les processus hydrosédimentaires sont donc imbriqués en une chaîne interactive complexe non totalement cyclique.

Les premières grosses tempêtes automnales provoquent l'érosion des dépôts fins de la baie de Seine orientale et de l'embouchure et le transfert des produits fins qui alimentent ensuite le bouchon vaseux.

Les pluies associées à ces dépressions engendrent à terme une montée de débit qui apporte de nouveaux stocks conséquents de matériaux du bassin versant mais provoque aussi leur exportation vers les domaines estuariens externes.

Cette période des crues hivernales reste sujette au passage de dépressions à caractère érosif et le stock de matériaux

présents dans le bouchon vaseux est la résultante du taux des expulsions tidales des matériaux du bouchon vaseux et des apports liés aux aléas érosifs dans l'embouchure, voire en baie de Seine orientale.

Au cours de la décrue et de l'étiage, l'exportation des matériaux en baie de Seine décroît jusqu'à devenir inférieure aux apports du bassin versant amont. Le bouchon vaseux est alors le siège d'une concentration accrue de matériaux. En dépit des faibles flux particuliers du bassin versant amont, l'apport de matériaux dans l'estuaire moyen n'est pas négligeable puisque renforcé par la remobilisation des dépôts de crue de l'estuaire amont (voir chapitre précédent). Cette période n'est, en outre, pas exempte d'épisodes de mer agitée. Les produits de ces aléas érosifs marins viennent renforcer le stock des matériaux du bouchon vaseux. Celui-ci peut alors atteindre des concentrations maximales et l'excès ainsi piégé dans l'estuaire moyen alimente les vasières intertidales.

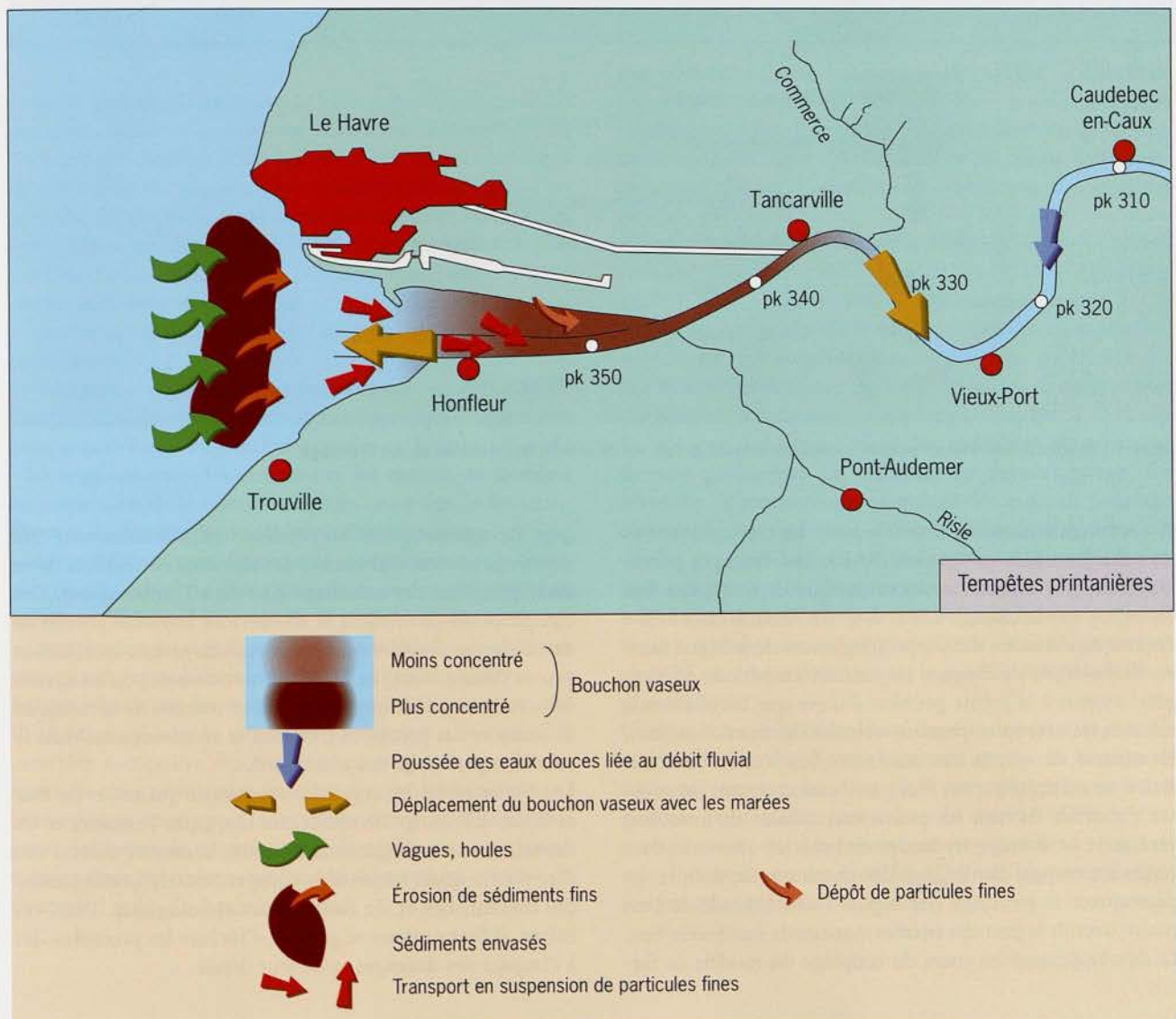


Figure 30 - Schéma de synthèse des processus hydrosédimentaires de l'estuaire de la Seine en période de mer agitée.

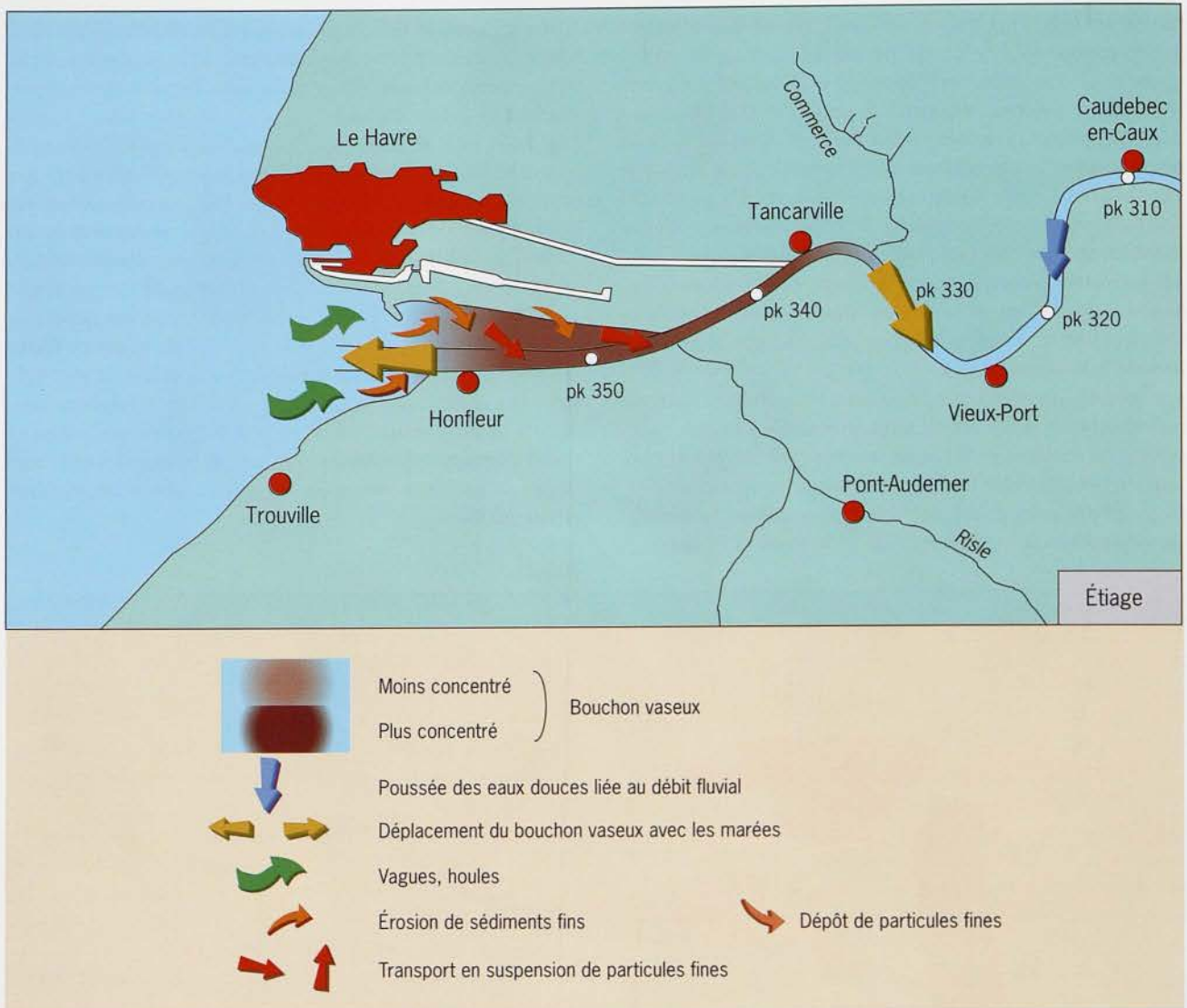


Figure 31 - Schéma de synthèse des processus hydrosédimentaires de l'estuaire de la Seine en période de décrue et d'étiage.

À ces facteurs naturels, il faut ajouter les travaux d'entretien du chenal de navigation (PAR). Les dragages provoquent en effet une remise en suspension de matériaux fins de même que le clapage sur la zone du Kannik (localisée à l'entrée de l'estuaire dans le prolongement de la digue basse nord). Le dépôt de dragage est ensuite, en période de tempête, soumis à la même pression érosive que les sédiments naturels (remise en suspension sélective des matériaux fins). En résumé, le « cycle des matériaux fins » dans l'embouchure est contrôlé par les flux particuliers amont, la poussée du débit fluvial, les pulsations tidales du bouchon vaseux et le forçage hydrodynamique lié aux tempêtes (voire les travaux de dragage des chenaux). Ce dernier, en provoquant le recyclage des dépôts fins à l'entrée de l'estuaire, accroît la part des entrées marines de matériaux fins. Le développement en cours du couplage du modèle de for-

çage lié aux tempêtes au modèle hydrosédimentaire 3D devrait permettre d'aboutir à des simulations réalistes de ce cycle complexe des matériaux fins dans l'embouchure. Des compléments de mesures *in situ* devront toutefois permettre de valider les données du modèle tant au niveau du bouchon vaseux (bouée Marel de Honfleur notamment) qu'au niveau de la vaseière nord (enregistrements en continu de la turbidité des eaux et des processus d'érosion et sédimentation dans la couche superficielle des sédiments).

La mise en place de cet outil permettra de quantifier les flux et bilans d'échange de matériaux fins entre l'estuaire et les domaines marins adjacents. En effet, la mesure directe des flux s'avère quasi impossible compte tenu de la complexité des mécanismes et du cadre géomorphologique. Dans ces bilans, il faut également prévoir d'inclure les processus liés à l'impact des dragages et de leur dépôt.

Conclusions

Le bassin versant de la Seine est caractérisé par son faible taux d'érosion qui produit principalement des matériaux fins limoneux généralement associés à une fraction organique particulièrement importante provenant à la fois du lessivage des sols agricoles, d'une production biologique non négligeable et des eaux résiduelles d'une considérable concentration urbaine.

À l'aval du barrage de Poses, dans l'estuaire, ces produits organominéraux, qui constituent des supports privilégiés de nombreux contaminants, sont soumis à l'influence de fortes marées qui s'exercent dans un système fortement canalisé. Le degré d'aménagement du cours de la rivière est à l'origine d'une zonation qui se traduit par l'influence relative du potentiel de décantation des matériaux en suspension par rapport à la capacité d'exportation des débits liquides et solides vers l'embouchure et les domaines marins de la baie de Seine orientale.

Les acquis et les interrogations dans l'estuaire amont

Jusqu'à présent, la zone estuarienne amont, uniquement soumise à la marée dynamique, était considérée comme un simple conduit du transit des matériaux depuis le bassin de Paris jusqu'à l'embouchure. Les simulations biogéochimiques, développées en système fluvial et appliquées à la compréhension du déficit estival d'oxygène dissous des eaux de l'estuaire amont en aval de Rouen, ont révélé la nécessité d'intégrer les processus hydrosédimentaires dans les mécanismes de transfert de la microflore en suspension notamment.

La réalisation d'enregistrements en continu de turbidité et l'acquisition des paramètres hydrodynamiques locaux ont permis de définir l'influence des marées sur le transit fluvial :

- les relations entre les courants et les teneurs de matières en suspension de la colonne d'eau au cours des cycles semi-diurnes de décantation et de remise en suspension ;
- les fluctuations semi-lunaires de concentration et le caractère impulsif du flux particulaire amont qui provoque un transit maximal au cours de la période de déchet ;
- l'écrêtement du signal de crue lié aux dépôts de crue qui sont ensuite remobilisés et soumis à un transit différé.

La caractérisation des matières en suspension au cours des fluctuations tidales et des cycles saisonniers a démontré le caractère composite des matières en suspension et l'existence de trois principales fractions qui se différencient par leurs vitesses de chute et leurs comportements différents au cours des cycles de décantation et de remise en suspension :

- macroflocs et sables facilement décantables (vitesse de chute de l'ordre de 1 mm/s et plus) ;

- microflocs et matériaux fins divers moyennement décantables (vitesse de chute de 10^{-1} à 10^{-3} mm/s) ;
- fraction planctonique, petits éléments et voiles organiques difficilement décantables (vitesse de chute de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} mm/s) et porteurs d'une microflore bactérienne spécifique (voir fascicule « Contaminations bactérienne et virale »).

Ces fluctuations cycliques dans la colonne d'eau et l'hétérogénéité des écoulements observée dans les profils transversaux conduisent à discuter de la représentativité de l'échantillonnage ponctuel (fluctuations de concentration de MES pouvant dépasser un facteur 10 selon le site de prélèvement dans la section transversale) et de son utilisation dans le cadre des analyses concernant la qualité des eaux.

La remontée de matériaux marins, loin en amont de l'intrusion saline, a été démontrée par des mesures de flux particulaire et l'utilisation de radionucléides artificiels provenant de La Hague en tant que traceurs. Ce pompage tidal favorisé, en vive-eau, par le cours méandrique, s'exerce notamment avec les maxima de courant de l'onde de flot et concernerait plus particulièrement les fractions décantables. Quantitativement, la contribution de ce processus original reste à préciser dans les bilans hydrosédimentaires. D'autres questions restent encore sans réponses satisfaisantes :

- la qualité des estimations des débits et de leurs concentrations particulières moyennes qui conditionnent pourtant les flux particuliers et dissous des contaminants ;
- l'évaluation précise de la quantité globale des matériaux déposés en crue dans les zones de piégeage du secteur des îles et dans les installations du port de Rouen et de la part des matériaux soustraits au transit par dragage.

Le volume des dépôts dans les chambres de stockage devrait permettre de résoudre ce dernier point. En revanche, la morphologie complexe des zones de piégeage des matériaux fins rend difficile la mesure directe des dépôts de crue. L'approche indirecte par la modélisation peut être envisagée. Dans ce cadre, la mise en place de cellules latérales dans la simulation des processus de piégeage et de remobilisation est encourageante : les concentrations de MES en décrue fournies par le modèle deviennent alors plus réalistes.

Compte tenu de la complexité des écoulements, la signification des données d'enregistrement *in situ* des concentrations par rapport aux flux réels reste une préoccupation majeure pour calibrer au mieux le modèle 1DH de l'estuaire amont ; or, il paraît encore trop lourd (en temps de calcul) d'appliquer des modèles 3D à maillage serré dans ce secteur très canalisé.

L'évolution des connaissances dans l'estuaire soumis à l'intrusion saline

Dans l'embouchure, le niveau des connaissances acquises antérieurement était plus important avec, notamment, les études réalisées dans le cadre du programme Saum-estuaire de Seine.

La première question était de savoir si les aménagements réalisés depuis vingt ans et les dragages d'entretien du chenal de navigation avaient modifié les déplacements du bouchon vaseux. Les mesures réalisées semblent démontrer qu'il n'y a pas d'évolution significative de son fonctionnement. Indépendamment, l'évolution géomorphologique révèle un colmatage croissant des vasières latérales (voir fascicule « Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique »). Cet atterrissement a pour conséquences :

- la réduction des surfaces inondables et la diminution du potentiel de piège de matériaux fins que constituent ces zones latérales ;
- l'augmentation du taux d'exportation de matériaux fins vers la baie de Seine et l'enrichissement des dépôts vaseux subtidiaux de l'embouchure.

Parallèlement aux mesures, le développement de la modélisation des processus hydrosédimentaires a permis d'enregistrer une progression déterminante dans la compréhension des mécanismes de fonctionnement du bouchon vaseux.

L'origine principalement hydrodynamique des processus de concentration turbide du bouchon vaseux a été confirmée par les simulations hydrosédimentaires du modèle SAM-2D qui reproduit également la position des zones de dépôt observées. En revanche, le gradient de densité lié à l'intrusion saline apparaît surtout responsable du niveau des concentrations observées, comme le souligne la modélisation tridimensionnelle (SAM-3D).

Les observations et mesures réalisées dans les sédiments et les masses d'eaux des domaines externes, du chenal de navigation et de la fosse de Flot nord témoignent d'une influence déterminante des processus de dépôt et d'érosion dans les échanges de matériaux fins entre ces divers compartiments de l'embouchure. Aux aspects hydrodynamiques, plus ou moins cycliques, liés au débit et à la marée, se superposent les processus générés par les houles de secteur ouest et les vents forts locaux liés aux aléas météorologiques.

Dans ce cadre, l'analyse théorique des mécanismes intégrés à une modélisation des processus à l'interface sédiment vaseux-eau a été confortée par des campagnes de mesures en période de forte tempête (données nouvelles sur le site mais aussi par rapport au contexte des connaissances acquises dans des milieux analogues) et des enregistrements en continu (bouées Marel).

À la faveur de ces événements météorologiques, les processus d'érosion affectent à la fois les dépôts subtidiaux proches de l'embouchure et les vasières exondables. Dans ces dernières, les stocks de matériaux ainsi recyclés dans les masses d'eaux peuvent être considérables puisqu'ils peuvent atteindre 50 000 à 200 000 t, dont une part peut être expulsée mais qui, en majorité, alimentent le bouchon vaseux.

La complexité géomorphologique de l'embouchure rend donc extrêmement difficile la mesure directe des flux exportés et l'établissement des bilans des échanges de matériaux entre l'estuaire et les domaines externes. La quantification doit être abordée par le développement d'un modèle tridimensionnel intégrant à la fois la chronique déjà complexe des flux particulières et liquides amont, les cycles hydrodynamiques de la marée et la chronique météorologique qui influent sur les remobilisations des zones de dépôt des matériaux fins. Ce dernier paramètre est très inféodé à la morphologie des fonds qui, elle-même, est conditionnée par les transports de sables qui constituent la plus grande part du prisme sédimentaire de colmatage de l'embouchure. C'est un aspect complémentaire qui s'avère nécessaire pour la mise au point d'un modèle prédictif de l'impact sédimentologique des aménagements.

Enfin, dans le bouchon vaseux, l'estimation des parts relatives du flux particulière provenant de l'estuaire amont et des matériaux remobilisés est fondamentale pour analyser les données concernant les contaminants associés ou non aux matières en suspension. Les données géochimiques (voir fascicule « Fer et manganèse : réactivités et recyclages ») nous apprennent en effet que les sédiments déposés ont généralement des teneurs accrues de contaminants dont l'état physicochimique est, de plus, modifié par un confinement plus ou moins prolongé. Les matériaux fins des vasières, voire des dépôts de dragage, constituent donc une source secondaire de contaminants dont l'injection aléatoire peut altérer la qualité des eaux de l'estuaire.

Références bibliographiques

- Allen G.P., 1973. Un modèle représentatif de la lentille de crème de vase en milieu estuarien. C.R. Acad. Sci. Paris, 276, 3277-3280.
- Allen G.P., Castaing P., Klingebiel A., 1974. Suspended sediment transport and deposition in the Gironde estuary and adjacent shelf. Mém. Inst. Géol. Bassin Aquitaine, 7, 27-36.
- Allen G.P., Salomon J.P., Bassoulet P., Du Penhoat Y., Grandpré C., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. Sedimentol. Geol., 26, 69-90.
- Avoine J., 1981. L'estuaire de la Seine : Sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3^e cycle, université de Caen, 236 p.
- Avoine J., 1985. Sediment dynamics and sedimentation in the Seine estuary, a macrotidal environment in France. Symposium on modern and ancient classic tidal deposits, Utrecht, 27-30 (abstr.).
- Avoine J., Allen G.P., Nichols M., Salomon J.C., Larsonneur C., 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary, France. Effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. Mar. Geol., 40, 119-137.
- Bessineton C., 1997. La création de vasières artificielles dans l'estuaire de la Seine. In: Les estuaires français. Évolution naturelle et artificielle. Auger C. & Verrel J.L. (éds). Éd. Ifremer, Actes Colloq., 22, 111-121.
- Brenon I., 1997. Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, université de Bretagne occidentale, 204 p.
- Brenon I., Le Hir P., 1999. Simulation du bouchon vaseux dans l'estuaire de Seine. Capacité et limites d'un modèle bidimensionnel horizontal. C.R. Acad. Sci. Paris, 328, 327-332.
- Boust D., 1998. Étude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire de Seine par l'analyse des radionucléides naturels et artificiels. Program. Sci. Seine-Aval, 1997/FIN-1 « thème hydrodynamique et transports sédimentaires », 158-168.
- Dupont J.P., Lafite R., Huault M.F., Hommeril P., Meyer R., 1994. Continental-marine ratio changes in suspended and settled matter accross a macrotidal estuary (the Seine estuary, northwestern France). Mar. Geol., 120(1-2), 27-40.
- Dupont J.P., Wang H.Q., Lafite R., Meyer R., Texier H., 1995. Granulométrie et vitesse de chute des matières en suspension en estuaire de Seine. C.R. Acad. Sci. Paris, 320(II a), 961-968.
- Dupont J.P., 1997. Transferts particulaires du domaine continental au domaine marin épicontinental soumis à de fortes marées. Méthodologie et approche des bilans d'échanges. Thèse d'habilitation à diriger les recherches, université de Rouen, 142 p.
- Gallenne B., 1974. Les accumulations turbides de l'estuaire de Loire. Étude de la « crème de vase ». Thèse de l'université de Nantes, 323 p.
- Guézennec L., 1994. Mesure en continu de la turbidité en Seine-Aval (métrologie, suivi, interprétation). Mémoire de DEA, université Pierre et Marie Curie, agence de l'Eau Seine-Normandie.
- Guézennec L., Dupont J.P., Lafite R., Meyer R., Goujon R., 1996. Comportement hydrodynamique des suspensions dans la partie amont de l'estuaire de Seine. J. Rech. Océanogr., 21(1-2), 53-58.
- Hamm L., Viguier J., 1997. Les aménagements modifiant le fonctionnement des estuaires. In: Les estuaires français. Évolution naturelle et artificielle. Auger C. & Verrel J.L. (éds). Éd. Ifremer, Actes Colloq., 22, 20-28.
- Lacroix M., Rodet J., Wang H.Q., Dupont J.P., 2000. Origine des matières en suspension dans un système aquifère karstique : apports de la microgranulométrie. C.R. Acad. Sci. Paris, 330, 347-354.
- Le Guyader F., 1989. Colonisation bactérienne et implantation de *E. coli* dans le sédiment d'origine littorale. Thèse de l'université de Rennes 1, 106 p.
- Martin J.M., Meybeck M., Salvadori F., Thomas A., 1976. Pollution chimique des estuaires : état actuel des connaissances. CNEXO, Rapp. Sci. Tech., 22, 286 p.
- Meybeck M., Marsily G. (de), Fustec E., 1998. La Seine en son bassin : fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier, Paris, 749 p.
- Mouchel J.M., 1999. Dynamique des matières en suspension sur la vasière de la zone des îles. Program. Sci. Seine-Aval, 1998/FIN-0, « thème hydrodynamique et transports sédimentaires », 29-31.
- Pommepuy M., Guillaud J.F., Dupray E., Derrien A., Le Guyader F., Cormier M., 1992. Enteric bacteria survival factors. Water Sci. Technol., 15(12), 93-103.
- Puls W., Kuehl H., Heymann K., 1988. Settling velocity of mud flocs : results from field measurements in the Elbe and Weser estuaries. In: Physical processes in estuaries. Dronjkers & Van Leussen (eds). Springer-Verlag, 404-424.
- Van Leussen W., 1994. Estuarine macroflocs and their role in fine grained sediment transport. Thèse de l'université d'Utrecht, 477 p.

Glossaire

Agrégats et agrégation : assemblages cohérents de particules fines entre elles et/ou adhésion de particules fines sur des éléments de taille plus importante pour constituer des éléments plus gros ; les matières organiques constituent souvent le liant (ou « ciment ») de ces structures.

Alluvions : dépôt sédimentaire caillouteux à limoneux laissé par la rivière dans le fond des vallées.

Biseau salé : en l'absence d'un mélange homogène dans la colonne d'eau estuarienne, les eaux salées pénètrent vers l'amont sur le fond, du fait d'une plus grande densité que les eaux douces.

Bloom phytoplanktonique : période de développement de certaines espèces du phytoplancton.

Bouchon vaseux : zone de concentration maximum des matières en suspension dans l'eau des estuaires.

Carbone minéral : carbone non inclus dans les matières organiques dissoutes et particulaires ; dans les régions calcaires, les carbonates constituent la plus grande part du carbone minéral des eaux.

Carbone organique dissous (COD) : quantification du carbone non minéral dans la fraction dissoute* (DOC en langue anglaise).

Carbone organique particulaire (COP) : quantification du carbone non minéral dans la fraction particulaire (POC en langue anglaise).

Carbone organique total (COT) : quantification de l'ensemble du carbone organique dans les fractions particulaires et dissoutes des eaux (TOC en langue anglaise).

Charge dissoute : correspond à la concentration de l'ensemble des éléments dissous (cations + anions) dans les eaux et provient principalement des mécanismes de dissolution au sein du bassin versant.

Charge particulaire : correspond à la masse de matières en suspension véhiculée dans les masses d'eaux et provient principalement de l'érosion mécanique dans le bassin versant ; les termes de charge ou de débit solide sont parfois utilisés.

Charge particulaire/charge dissoute : rapport qui exprime l'importance relative des mécanismes d'érosion et de dissolution dans le contexte d'un bassin versant.

Courant résiduel : vecteur vitesse qui est calculé au niveau d'une station ou d'une section de tranche d'eau et correspond à la résultante en direction et en intensité sur la durée d'un cycle de marée (durée de près de 12 heures).

Crue : augmentation importante du débit des cours d'eau qui, sous nos climats, intervient le plus souvent en hiver.

Débit résiduel : résultante des débits au cours d'un cycle de marée ; elle s'applique aux flux alternatifs d'eaux (débits liquides) et de matières en suspension (débit solide) dans un système soumis à la marée.

Déchet : période de diminution de l'importance des marées entre une vive-eau et une morte-eau.

Diatomées : algues microscopiques munies de 2 valves siliceuses ornementées, vivant dans l'eau (planctoniques) ou sur le fond (benthiques) dans des milieux d'eaux douces, saumâtres (salinités intermédiaires) ou marins.

Étiage : période de l'année où le débit des cours d'eau est le plus faible (fin de l'été au début de l'automne sous nos climats).

Flocs et floculation : assemblages organominéraux plus ou moins souples et robustes de particules fines entre elles et/ou d'éléments de taille plus importante pour constituer des particules plus grosses.

Flot : marée montante.

Fluorimétrie : analyse de la fluorescence qui est ici appliquée aux propriétés fluorescentes des pigments photosynthétiques pour quantifier la production primaire dans les eaux.

Fraction colloïdale : comprend les éléments non dissous (minéraux et organiques) d'une taille inférieure à 0,45 µm ; les tailles s'expriment alors en dalton (multiple de la taille de l'atome de carbone).

Fraction dissoute : comprend à la fois les éléments réellement dissous dans l'eau (minéraux et organiques) et les éléments d'une taille inférieure à 0,45 µm (fraction colloïdale).

Géomorphologie : étude des formes et du relief des paysages.

Hydrodynamique : cet adjectif composite de caractère néologique s'applique à la dynamique des masses d'eaux. Il inclut les données courantologiques et leurs fluctuations dans le temps, qu'elles soient cycliques ou aléatoires.

Hydrologique : relatif à l'hydrologie, science qui étudie les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des eaux continentales et marines.

Hydrosédimentaire : cet adjectif composite inclut l'ensemble des processus de transport de matériaux associés aux déplacements des masses d'eaux.

Hystérésis : apparition d'un retard dans l'évolution d'un phénomène physique par rapport à un autre ; dans le cas des crues, il s'agit des flux d'eaux et des flux de matières en suspension.

Jusant : marée descendante.

Karst et karstification : l'infiltration des eaux et la circulation des eaux souterraines dans les substrats carbonatés (dont crayeux) sont à l'origine de processus de dissolution qui ménagent des vides ou conduits karstiques.

Limons (matériaux) : éléments fins essentiellement quartzeux qui ont été saupoudrés à la surface des sols de la moitié nord de la France par les vents forts qui ont caractérisé le climat de notre région au cours des périodes froides du Quaternaire*.

Limons (texture en pédologie) : particules sédimentaires dont le volume correspond à des éléments d'un diamètre équivalent sphérique compris entre 2 et 40 micromètres.

Macroflocs : floccs d'un volume supérieur à des particules d'un diamètre de 100 μm , certains peuvent atteindre des tailles de l'ordre du millimètre, voire plus.

Macrotidal : s'applique à des zones soumises à des marées de forte amplitude (marnage > 4 m).

Marnage : dénivellation entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer.

Microflocs : floccs d'un volume inférieur à des particules d'un diamètre de 100 μm ; en Seine, nous rencontrons le plus souvent des microflocs de 10 à 30 micromètres.

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

Particulaire : adjectif utilisé pour désigner les matières en suspension dans l'eau, ou MES, dont les éléments selon les normes Afnor ont une taille supérieure à 0,45 micromètre.

Phytoplancton : algues microscopiques se développant dans la colonne d'eau.

Pigments photosynthétiques : substances (ex. chlorophylle) incluses dans les cellules végétales (dont algues) qui permettent la fabrication de substances organiques (glucides) à l'aide de l'énergie lumineuse solaire (photons).

pk : point kilométrique permettant un positionnement le long du cours de la Seine depuis la référence amont pk 0 située à l'ancienne écluse de la Monnaie à Paris.

Plaine alluviale : zone basse occupée par le lit du fleuve et les alluvions.

Production primaire : quantité de matière organique produite à partir de matière inorganique grâce à une source d'énergie extérieure (lumière pour la production végétale).

Quaternaire : ère géologique la plus récente, ayant débuté il y a environ 3 millions d'années.

Revif : période d'augmentation de l'importance des marées entre une morte-eau et une vive-eau.

Semi-diurne : se dit du cycle de marée qui, sur nos côtes, est proche de 12 h, soit 2 cycles par jour.

Silts (en sédimentologie) : particules sédimentaires dont le volume correspond à celui des éléments d'un diamètre équivalent sphérique compris entre 2 et 50 micromètres.

SNS : service de la navigation de la Seine.

Tufs : concrétionnements calcaires poreux et friables provenant de la précipitation du carbonate de calcium.

Turbidité : trouble lié à la présence de particules fines en suspension dans l'eau.

Vive-eau : marée d'amplitude maximale correspondant aux périodes de pleine et nouvelle lune.

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 2-84433-055-X / Dépôt légal 3^e trimestre 2001

© 2001, Ifremer. Tous droits de reproduction, même partielle,
par quelque procédé que ce soit, sont réservés pour tous pays.

Crédits photos :

MEB, Laboratoire de géologie, université de Rouen - Seine-Aval.
I. Zimmerlin, couverture : détail d'un floc organominéral sur les berges de l'île Lacroix (échelle 1µm/cm).
Diatomée cylindrique partiellement visible dans le coin supérieur droit du cliché.
Paillettes minérales d'argiles apparentes sur la partie gauche du cliché.



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^e 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'écophysiologie**
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



4 ► Matériaux fins

Le cheminement des particules en suspension

Le comportement des éléments fins dans l'estuaire de Seine est contrôlé par la contribution organique importante, la morphologie des écoulements liée aux aménagements, les processus érosion/dépôt et les paramètres hydrodynamiques qui intègrent la cyclicité des marées et les aléas météorologiques. Les flux particuliers du bassin versant sont concentrés sur les périodes de crue. Une fraction de ces produits est transférée à l'embouchure puis partiellement expulsée vers la baie de Seine. L'autre fraction se dépose dans les annexes hydrauliques de l'estuaire fluvial et son transfert vers l'embouchure est différé, ou exclu par dragage. L'embouchure est le siège d'une zone de concentration de matériaux fins, le bouchon vaseux qui évolue selon les fluctuations hydrodynamiques. Les enregistrements de turbidité et des paramètres hydrodynamiques ont permis de fournir les éléments pertinents pour le développement d'une modélisation hydrosédimentaire de l'estuaire.

The behavior of suspended matter in the Seine estuary is due to the high organic content, the morphology of the dyked channel flow, the erosion/settlement processes and hydrodynamical parameters which come from tidal cycles and meteorological events. SPM discharge from the catchment area are focused during flood stages. One part of these materials moves to the mouth estuary and then are exported in the outer estuarine zone of Baie de Seine. The other part settles on banks and hydrological extends and then is transferred to the mouth estuary or exported by dredging. The turbidity maximum zone of the mouth estuary changes according to hydrodynamical effects. Turbidity and hydrodynamical recordings give us fundamental data for the development of hydrosedimentological models of the estuary.

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 Édouard 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 2-84433-055-X
6,86 € - 45 F



9 782844 330550