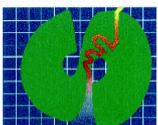


**Hydrodynamique et transport en suspension du
matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un
estuaire macrotidal :
l'exemple de l'estuaire de la Seine (France).**

Loïc Guézennec



AGENCE DE L'EAU
SEINE-NORMANDIE



Loïc Guézennec

**Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la
zone fluviale d'un estuaire macrotidal :
l'exemple de l'estuaire de la Seine (France).**

Mars 1999

Cette publication a fait l'objet d'une soutenance publique le 04 décembre 1998 par l'auteur, pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Rouen, Discipline : Géologie, Spécialité : hydrodynamique sédimentaire. Cette soutenance s'est déroulée devant la commission composée de :

Patrice CASTAING, Professeur, Université Bordeaux I	Rapporteur
Jean-Marie FRITSCH, Directeur de Recherche, ORSTOM Montpellier	Rapporteur
Jean-Paul DUPONT, Maître de conférences HDR, Université de Rouen	Directeur de Thèse
Michel MEYBECK, Directeur de Recherche, CNRS Université Pierre et Marie Curie	Examineur
Robert MEYER, Professeur, Université de Rouen	Examineur
Robert LAFITE, Maître de conférences, Université de Rouen	Examineur
Roland GOUJON, Ingénieur, Agence de l'Eau Seine-Normandie	Invité

Publication :
Agence de l'Eau Seine-Normandie
51, rue Salvador Allende
92027 Nanterre cedex (France)
mars 1999

Remerciements

Au terme de ces trois années de recherche, il m'est agréable de remercier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé et soutenu.

Ma gratitude va tout d'abord à messieurs Patrice Castaing et Jean-Marie Fritsch qui ont accepté de juger ce travail.

Je remercie monsieur Robert Meyer de m'avoir ouvert les portes du laboratoire de Géologie de l'Université de Rouen. Un grand merci à monsieur Jean-Paul Dupont mon directeur de Thèse et à monsieur Robert Lafite pour m'avoir soutenu et conseillé tout au long de ce travail. Que l'équipe tout entière du laboratoire de géologie soit remerciée : Benoît, Michel, Hua Qing, Valérie, Marie-Françoise, Jean-Paul, Alain, Dominique, Maria, Martine, Michèle, Mlle Cuvier, Irène, Florence, Bernadette. Merci aux chercheurs et étudiants qui, lors de leur séjour au laboratoire, m'ont apporté leur aide : Dirk, Jaco, Astrid, Gaëlle, Anne, Fany, Caroline, Isabelle.

Merci à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour son soutien financier durant ces trois années. Que tous les membres de la Direction de Secteur Seine-Aval soient remerciés pour leur accueil et plus particulièrement, monsieur Jean-Noël Brichard directeur régional, monsieur Jean-Pierre Decroix son successeur et monsieur Roland Goujon (mon chef).

Les fructueuses collaborations, avec les autres équipes de recherche intervenant dans le Programme de Recherche Seine-Aval, ont été essentielles à l'élaboration de cette thèse. Merci donc à tous les membres du groupe hydrosédimentaire : Jean-Marie Mouchel, Cathy O'Riordan, Pierre le Hir, Dominique Boust, Patrick Lesueur..., mais aussi aux membres des autres groupes et plus particulièrement à Natacha Brion, Gilles Billen, Fabienne Petit. Une petite pensée pour Jacques l'Haridon et Régis Hocde...

Merci au Port Autonome de Rouen et plus particulièrement à monsieur Antoine Delouis, chef du Service Environnement Maritime et Chenal et à monsieur Gilles Hervé pour m'avoir confié les clefs du parad.. Val-des-Leux.

Merci au SNS et plus particulièrement à monsieur André Ficht pour ses conseils, son aide, son soutien et pour bien d'autres choses encore.

Merci aux marins du « Côte d'Aquitaine » qui, pour la bonne cause, ont dû se faire marins d'eau douce durant quelques semaines...

Merci Nolwenn, pour ta présence et ta patience.

Merci Maman, tout ce travail est un peu le tien...

Pardon à ceux que j'ai oublié.

Sommaire

INTRODUCTION 1

PROBLEMATIQUE GENERALE	3
CONTEXTE DE L'ETUDE.....	6

CHAPITRE I : CADRE DE L'ÉTUDE 11

I.1 - LE BASSIN VERSANT DE LA SEINE.....	13
<i>I.1.1 - Cadre géomorphologique.....</i>	<i>13</i>
I.1.1.1 - Limites du bassin versant	13
I.1.1.2 - Géologie.....	13
<i>I.1.2 - Hydrologie fluviale, cycles crue/étiage</i>	<i>14</i>
<i>I.1.3 - Le matériel particulaire en suspension au barrage de Poses</i>	<i>16</i>
I.2 - L'ESTUAIRE DE LA SEINE.....	18
<i>I.2.1 - Cadre géomorphologique.....</i>	<i>18</i>
I.2.1.1 - Limites de l'estuaire	18
I.2.1.2 - Géologie.....	18
I.2.1.3 - La couverture sédimentaire superficielle.....	19
I.2.1.4 - Aménagements	20
I.2.1.4.1 - Estuaire moyen et estuaire aval	20
I.2.1.4.2 - L'estuaire amont	21
I.2.1.4.3 - Les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise	22
I.2.1.4.4 - L'amont de Rouen	22
I.2.1.5 - Morphologie.....	23
I.2.1.6 - Dragages	24
<i>I.2.2 - Hydrologie estuarienne.....</i>	<i>25</i>
I.2.2.1 - La marée dans l'estuaire de Seine.....	25
I.2.2.1.1 - Asymétrie de l'onde de marée	26
I.2.2.1.2 - Point caractéristique	28
I.2.2.1.3 - Marnages	29
I.2.2.1.4 - Ondes stationnaires.....	29
I.2.2.1.5 - Variations des sections mouillées.....	29
I.2.2.2 - Influence du débit du fleuve sur le régime des marées	30
<i>I.2.3 - Les sédiments fins</i>	<i>30</i>
I.2.3.1 - Les apports intra-estuariens	30
I.2.3.2 - Les remontées de l'estuaire aval et le bouchon vaseux	31
I.2.3.3 - Les connaissances hydrosédimentaires dans l'estuaire amont	32

II.1 - STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE.....	37
II.1.1 - Couverture sédimentaire.....	37
II.1.1.1 - Couverture sédimentaire immergée.....	37
II.1.1.2 - Suivi d'une radiale sur une zone exondable.....	38
II.1.2 - Mesures dans la colonne d'eau.....	40
II.1.2.1 - Mesures ponctuelles.....	40
II.1.2.2 - Mesures durant les cycles semi-diurnes de marée.....	40
II.1.2.3 - Mesures en continu.....	41
II.1.2.4 - Mesures des hétérogénéités spatiales et des flux sur les sections transversales.....	41
II.2 - TECHNIQUES D'ETUDE.....	44
II.2.1 - Quantification du matériel particulaire en suspension.....	44
II.2.1.1 - Détermination des concentrations pondérales de MES.....	44
II.2.1.2 - Mesures de la turbidité.....	44
II.2.1.2.1 - Points fixes.....	44
II.2.1.2.2 - Suivis en continu.....	45
II.2.1.2.3 - Profils verticaux au cours des campagnes réalisées sur les sections.....	45
II.2.1.3 - Relations MES/Turbidité.....	45
II.2.2 - Caractérisation des matériaux.....	47
II.2.2.1 - Analyse des sédiments.....	48
II.2.2.2 - Microgranulométries – Compteur de particules.....	48
II.2.2.3 - Microscope électronique à balayage (MEB).....	50
II.2.2.4 - Vitesses de chutes des microflocs.....	50
II.2.2.5 - Tailles et vitesses de chute des Macroflocs.....	51
II.2.3 - Mesures hydrologiques.....	51
II.2.3.1 - Mesures de débits.....	51
II.2.3.2 - Mesures des hauteurs d'eau.....	52
II.2.3.3 - Vitesses de courants et de frottements.....	52
II.2.3.3.1 - Rappels.....	52
II.2.3.3.2 - Vitesses de courants.....	53
II.2.3.3.3 - Vitesses de frottements: u^*	54
II.2.3.4 - Calcul des flux d'eau et de particules.....	54

**CHAPITRE III : EVOLUTIONS ANNUELLES DES CONCENTRATIONS DU
MATÉRIEL PARTICULAIRE FIN EN SUSPENSION**

III.1 - INTRODUCTION.....	59
III.2 - APPORTS AMONT.....	60
III.2.1 - Concentrations pondérales particulières.....	60
III.2.1.1 - Crues.....	61
III.2.1.2 - Étiage.....	63
III.2.1.3 - Comparaison MES calculées – MES mesurées.....	64
III.2.1.4 - Concentrations pondérales de MES en amont du barrage de Poses et dans l'estuaire amont.....	65
III.2.2 - Flux.....	66

III.3 - AUTRES APPORTS	68
III.3.1 - Apports intra-estuariens	68
III.3.2 - Remontées de matériel particulaire depuis l'estuaire moyen	69
III.4 - VARIATIONS INTRA-ESTUARIENNES DU MATERIEL PARTICULAIRE EN SUSPENSION	71
III.4.1 - Concentrations pondérales particulières	71
III.4.2 - Composition du matériel particulaire en suspension	73
III.5 - CONCLUSION	78

CHAPITRE IV : TRANSPORT DU MATÉRIEL PARTICULAIRE EN SUSPENSION EN ÉTIAGE

79

IV.1 - INTRODUCTION	81
IV.2 - PROPAGATION DE LA MAREE	83
IV.2.1 - Asymétrie de l'onde de marée	83
IV.2.2 - Progression de l'onde de marée	84
IV.2.3 - Point caractéristique	84
IV.2.4 - Volumes oscillants	85
IV.2.4.1 - Oscillations semi-diurnes	85
IV.2.4.2 - Oscillations semi-lunaires et lunaires	85
IV.2.4.2.1 - Calcul des volumes oscillants	87
IV.2.4.2.2 - Débits et vitesses résiduels	88
IV.2.4.2.3 - Temps de résidence	88
IV.2.5 - Marnages	88
IV.2.6 - Vitesses de courants	89
IV.2.6.1 - Vitesses mesurées	89
IV.2.6.1.1 - Mesures en un point de la colonne d'eau	89
IV.2.6.1.1.1 - Etale de basse mer - flot	89
IV.2.6.1.1.2 - flot	90
IV.2.6.1.1.3 - Etale de pleine mer	92
IV.2.6.1.1.4 - Jusant	92
IV.2.6.1.2 - Mesures dans la colonne d'eau	92
IV.2.6.1.3 - Vitesses de frottements	93
IV.2.6.2 - Distances lagrangiennes	95
IV.2.6.3 - Hétérogénéités spatiales des vitesses de courants	96
IV.3 - RELATIONS VITESSES – CONCENTRATIONS	98
IV.3.1 - Cycles semi-diurnes – Transferts verticaux – Remise en suspension	98
IV.3.2 - Cycles semi-diurnes – Transferts horizontaux	102
IV.3.3 - Modifications des phénomènes semi-diurnes durant les cycles semi-lunaires et lunaires	105
IV.3.4 - Evolutions du matériel particulaire au sein de la colonne d'eau	106
IV.3.5 - Distribution des concentrations de matériel particulaire en suspension sur une section transversale	108
IV.3.6 - Le problème des dépôts particuliers	110
IV.4 - DYNAMIQUE DES MATERIAUX	114
IV.4.1 - Microgranulométrie des particules de la colonne d'eau	115
IV.4.2 - Hétérogénéités transversales	118
IV.4.3 - La question de la floculation	120

IV.5 - PHENOMENES SEMI-LUNAIRES ET LUNAIRES - LATENCES	121
IV.6 - FLUX DE MATERIEL PARTICULAIRE EN SUSPENSION	124
IV.6.1 - Flux d'eau.....	125
IV.6.2 - Flux de particules	126
IV.6.2.1 - Répartition horizontale des flux particuliers dans les sections.....	127
IV.6.2.1.1 - Campagne du 18/04/96 au 25/04/96	129
IV.6.2.1.2 - Campagne de 01/10/96 au 03/10/96.....	129
IV.6.2.1.3 - Campagne de 13/02/97 au 15/02/97.....	130
IV.6.2.2 - Répartition verticale des flux particuliers dans les sections.....	130
IV.7 - SIGNIFICATION ET REPRESENTATIVITE DES MESURES.....	132
IV.7.1 - Les mesures ponctuelles.....	132
IV.7.2 - Les concentrations moyennes et les flux.....	134
IV.8 - CONCLUSION.....	136
IV.8.1 - Hydrologie.....	136
IV.8.2 - Cycles érosion/sédimentation.....	137
IV.8.3 - Transport en suspension.....	137
IV.8.4 - Dépôts de matériel particulaire fin et cycles vives-eaux/mortes-eaux	137
IV.8.5 - Microgranulométrie.....	138
IV.8.6 - Flux.....	138
IV.8.6.1 - Flux d'eau.....	138
IV.8.6.2 - Flux de particules	139
IV.8.7 - Représentativité	139

CHAPITRE V : TRANSPORT DU MATÉRIEL PARTICULAIRE EN SUSPENSION AU COURS DES CRUES

141

V.1 - INTRODUCTION.....	143
V.2 - HYDROLOGIE	144
V.2.1 - Lieux géométriques des basses mers et des pleines mers.....	144
V.2.2 - Marnages.....	144
V.2.3 - Asymétrie de l'onde de marée	145
V.2.4 - Volumes oscillants.....	146
V.2.5 - Vitesses de courants.....	147
V.3 - IMPACTS HYDROSEDIMENTAIRES DES CRUES ESTIVALES	149
V.4 - LES CRUES HIVERNALES	152
V.4.1 - Cycles semi-diurnes de marée.....	153
V.4.2 - Les crues.....	154
V.5 - DEVENIR DES FLUX DANS L'ESTUAIRE AMONT.....	156
V.5.1 - Première crue 96-97.....	157
V.5.2 - Deuxième crue 96-97.....	158
V.5.3 - Crue 97-98.....	159
V.5.3.1 - Premier pic, crue 97-98	159
V.5.3.2 - Deuxième pic, crue 97-98.....	160
V.5.3.3 - Troisième pic, crue 97-98	161
V.5.4 - Bilans	162
V.6 - SUIVI DU NIVEAU D'UNE VASIERE ET DE LA QUALITE DES SEDIMENTS DEPOSES	164

V.6.1 - Niveau de la vase.....	164
V.6.2 - Origine de la fraction particulaire déposée	165
V.6.3 - Texture des sédiments superficiels.....	166
V.7 - CONCLUSIONS	168
V.7.1 - Hydrologie.....	168
V.7.2 - Concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension	168
V.7.3 - Piégeage et restitution du matériel particulaire durant les crues.....	168
V.7.4 - Bilan quantitatif des transports particuliers en crue.....	169

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE ET DISCUSSION

171

VI.1 - REPRESENTATIVITÉ DE L'ECHANTILLONNAGE.....	173
VI.1.1 - Compartiment fluvial.....	173
VI.1.2 - Comportement estuarien.....	175
VI.1.3 - Optimisation des suivis intra-estuariens.....	176
VI.1.3.1 - Les unités de base	176
VI.1.3.2 - Les suivis à long terme.....	177
VI.1.3.3 - Les suivis inter-annuels.....	178
VI.1.3.4 - Conclusion.....	178
VI.2 - IDENTIFICATION DES PUIITS ET DES SOURCES DU MATERIEL PARTICULAIRE DANS L'ESTUAIRE AMONT	179
VI.2.1 - La source fluviale	179
VI.2.1.1 - Bilans annuels et taux d'érosion	179
VI.2.1.2 - Cycles saisonniers.....	180
VI.2.2 - Les sources et les zones de dépôt intra-estuariennes.....	182
VI.2.2.1 - Les affluents et l'activité humaine.....	182
VI.2.2.2 - Les zones de dépôts de matériel particulaire fin.....	183
VI.2.2.2.1 - Les vasières découvrantes en amont de Rouen	183
VI.2.2.2.2 - Les méandres.....	184
VI.2.2.2.3 - Les infrastructures portuaires rouennaises.....	185
VI.2.2.3 - Dépôts particuliers du fond	185
VI.2.2.4 - L'activité biologique.....	186
VI.2.3 - Conclusion	187
VI.3 - CARACTERISTIQUE ET COMPORTEMENT DU MATERIEL PARTICULAIRE	188
VI.3.1 - Caractéristiques physiques du matériel.....	188
VI.3.2 - application au cycle semi-diurne.....	189
VI.3.3 - La floculation	190
VI.3.4 - Conclusion	193
VI.4 - BILANS DES TRANSFERTS PARTICULAIRES	194
VI.4.1 - Bilan de crue	194
VI.4.2 - Le transfert particulaire durant l'étiage.....	196
VI.4.2.1 - Variation des volumes d'eau et des temps de renouvellement	196
VI.4.2.2 - Cycles semi-diurnes et transports horizontaux.....	197
VI.4.2.3 - Le transport particulaire en étiage	199
VI.4.2.4 - Quantification des bilans particuliers d'étiage	200
VI.4.3 - Conclusions.....	200

CONCLUSION GÉNÉRALE

203

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

209

ANNEXES

223

Introduction

Problématique générale

Le terme estuaire vient du latin *aestus* qui signifie marée. Sur le plan morphologique, l'estuaire est défini comme une vallée fluviale ouverte sur l'océan. Sur le plan écologique, l'estuaire est un écosystème qui constitue une interface d'échanges entre les domaines continentaux et marins. Il est caractérisé par une multitude de gradients interdépendants (Vincx and Meire, 1993, Dyer, 1994). En fonction des contextes géologiques, géomorphologiques et climatiques, les apports de matériaux du bassin versant sont plus ou moins importants (Figure 1 et Tableau 1).

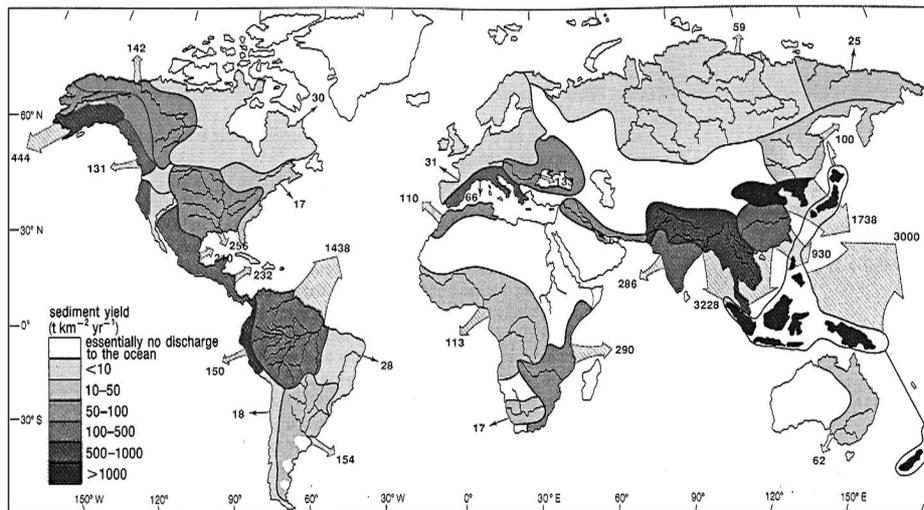


Figure 1 : Taux d'érosion et bilan des apports annuels moyens de matériel particulaire en suspension aux océans par grands bassins versants. En 10^6 t.an^{-1} (The Open University, 1989).

Selon Milliman, 1981, 75 % des apports particuliers aux océans se font en Asie (Figure 1), contre seulement 7 % pour les rivières européennes et nord-américaines.

Tableau 1 : Superficies des bassins versants, débits et flux particuliers annuels de quelques fleuves mondiaux et européens (d'après Degens et al., 1988, excepté ^A Castaing, 1981, et ^B Avoine, 1985).

Fleuve	Station	Superficies 10^6 km^2	Débits $\text{km}^3.\text{an}^{-1}$	Matériel particulaire 10^6 t.an^{-1}	Taux d'érosion $\text{t.km}^2.\text{an}^{-1}$
Amazone	Obidos	4,69	5 780,0	900,0	192
Mississippi	Bel Chase	3,22	410,0	296,0	92
St-Laurent	Québec	1,15	413,0	5,1	4
Zaire	Brazzaville	3,50	1 300,0	48,0	14
Huanghe		0,75	34,2	900,0	1200
Rhin	Lobith	0,22	69,4	3,4	15
Rhône	Tarascon	0,10	59,9	39,5	395
Loire	Nantes	0,12	27,0	7,8	65
Gironde ^A		0,07	19,5	5,0 à 2,0	28 à 71
Seine ^B	Poses	0,08	13,0	0,6 à 0,7	7,5 à 9

Les apports fluviaux aux estuaires sont majoritairement constitués de matériaux fins et ne sont généralement pas répartis sur l'ensemble de l'année. Les épisodes de crue sont considérés comme responsables du transport de la majeure partie des flux de matériaux.

La connaissance de la distribution dans l'année des flux de matériaux entrant dans l'estuaire constitue un préalable à toute étude des transferts sédimentaires au sein du système estuarien.

Ce matériel fluviatile fin contribue au développement de dépôts fins dans l'estuaire et sur la plateforme continentale interne.

Selon les disciplines, l'estuaire ne correspond pas à la même entité spatiale. Ainsi, pour Pritchard, 1967, l'estuaire est la zone dans laquelle les eaux d'origine marine sont diluées de manière mesurable par les eaux douces. Cette définition sert de base aux études hydrosédimentaires estuariennes qui ont été principalement focalisées sur les secteurs soumis à l'influence haline.

Selon Odum, 1988, et Schuchardt and Schrimmer, 1991, le développement des études écologiques en milieu estuarien requiert l'intervention de scientifiques de diverses disciplines et nécessite l'intégration de la zone soumise aux seuls effets de la marée dans la définition de l'estuaire. Toutefois, une certaine ambiguïté existe sur les termes employés pour définir et hiérarchiser les estuaires entre ces disciplines (Mc Lusky, 1993).

Fairbridge, 1980, en se basant sur les travaux de Dionne, 1963, propose une définition et un découpage de l'estuaire incluant la zone dulçaquicole à marée dynamique :

« Un estuaire est un bras de mer pénétrant une vallée fluviale jusqu'à la limite amont de propagation de la marée, habituellement divisible en 3 secteurs :

a - Un bas estuaire ou estuaire marin ;

b - Un estuaire moyen, sujet à d'importants mélanges entre eaux douces et eaux salées ;

c - Un haut estuaire ou estuaire fluvial, caractérisé par de l'eau douce mais sujet aux actions quotidiennes de la marée.

Les limites entre ces trois secteurs sont variables et sujettes aux constantes variations du débit fluvial. »

L'estuaire est donc défini comme la zone située à l'interface eaux marines/eaux douces. Dans de nombreux cas, il est difficile de fixer une limite géographique *stricto sensu* aux estuaires compte tenu de la variabilité spatio-temporelle des paramètres entrant dans leur définition (limite de mélange eaux douces/eaux marines, limite de propagation de la marée).

L'étendue de ces différents secteurs dépend, à la fois, du cadre géomorphologique et du rapport entre le débit du fleuve et l'importance des marées. L'estuaire de la Seine, avec une marée de type semi-diurne et des marnages de près de 8 mètres au Havre, se classe parmi les quelques estuaires macrotidaux mondiaux (Figure 2). Les zones soumises à forts marnages présentent généralement d'importantes variations de l'intensité des courants de marée et permettent le développement de zones intertidales (Davies, 1964).

Ces forts marnages ont aussi une conséquence sur le mélange estuarien entre eaux douces et eaux salées et sur le piégeage du matériel particulaire en suspension. L'estuaire de Seine est un estuaire mélangé, contrairement aux estuaires microtidaux qui présentent un coin salé (Avoine, 1981, Avoine, 1982). Dans ce dernier cas, la circulation de densité contrôle le piégeage du matériel particulaire en

suspension au niveau du point nodal situé à la limite de l'intrusion de salinité. Le maximum de turbidité ainsi formé devient sensible aux variations du débit fluvial (Nichols, 1977).

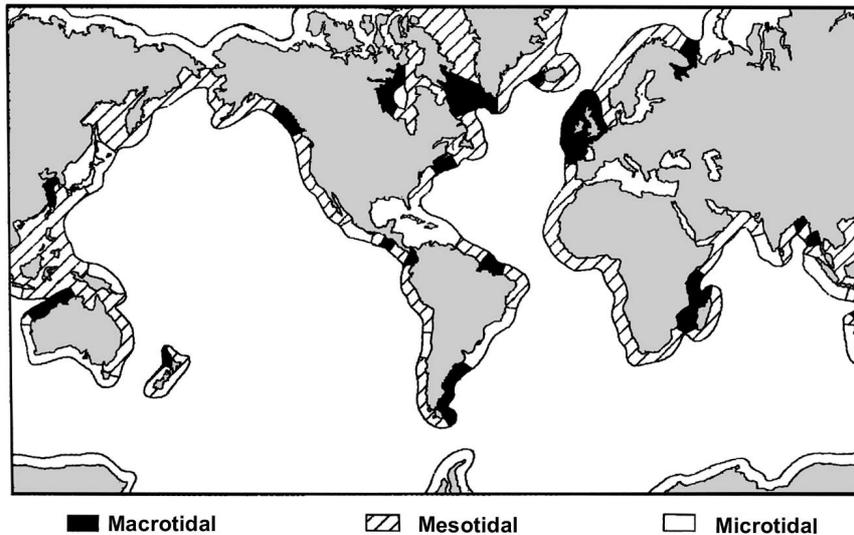


Figure 2 : Principaux types d'environnements tidaux dans le monde (Davies, 1964).

D'un point de vue sédimentologique, les études ont principalement concerné l'estuaire moyen et l'estuaire marin. Cet intérêt est justifié par le développement de vasières dans les embouchures et de dépôts fins dans les zones de plate-forme immédiatement adjacentes (Avoine, 1981, Lesueur, 1992). Parallèlement à ces dépôts, une zone de turbidité maximale (bouchon vaseux) se développe dans les masses d'eaux de l'estuaire moyen (Tableau 2) avec la réalisation de processus de crème de vase lorsque les conditions de concentration le permettent (Gallenne, 1974).

Tableau 2 : Exemples de concentrations de matériel particulaire en suspension rencontrées dans plusieurs estuaires mondiaux (Officer, 1981) et français^A Allen et al., 1974, ^B Avoine, 1981.

	<i>Saint Laurent</i>	<i>Rappahannock</i>	<i>Chesapeake bay</i>	<i>San Francisco bay</i>	<i>Tamise</i>	<i>Gironde^A</i>	<i>Seine^B</i>	<i>Demerara</i>
Concentrations pondérales de MES (mg.l⁻¹)	10 à 40	50 à 200	50 à 200	50 à 200	300 à 800	100 à 5 000	100 à 3 000	1 000 à 10 000

Dans ces secteurs, la contribution des apports marins est clairement identifiée (Avoine, 1981). La quantification des marqueurs particuliers (minéralogiques et/ou chimiques) permet de déterminer la contribution des pôles continentaux et marins aux structures sédimentaires estuariennes. Lorsque les sources naturelles de ces matériaux ne sont pas clairement identifiables, les contaminants chimiques liés aux activités humaines peuvent constituer de précieux auxiliaires pour établir des bilans sédimentaires.

Les processus sédimentaires dans le domaine fluvial soumis à la marée dynamique (encore appelé estuaire fluvial ou estuaire amont selon Fairbridge, 1980) sont moins connus. A l'exception des estuaires macrotidaux, ces domaines sont moins étendus, les turbidités enregistrées y sont généralement plus faibles et les processus naturels de dépôts sont le plus souvent affectés par de profonds aménagements.

Historiquement, les estuaires ont en effet été le siège du développement d'une forte activité économique centrée autour de la mise en place d'infrastructures portuaires. C'est le cas de nombreux estuaires européens dont l'estuaire de Seine.

En l'absence de données précises concernant ce compartiment estuarien de transition, les études sédimentologiques réalisées en aval ont généralement considéré que les flux particuliers du bassin versant étaient transférés sans modification notable du domaine fluvial à l'estuaire soumis à l'intrusion saline.

Le développement des activités humaines dans les basses plaines alluviales et les secteurs estuariens sont en outre à l'origine d'un flux de contaminants dans ces milieux naturels de transition. Le matériel particulaire en suspension est le vecteur de nombreux contaminants chimiques (Martin *et al.*, 1976, Meybeck and Idlafkih, 1995) et bactériologiques (Le Guyader, 1989, Pommepuy *et al.*, 1992).

La dynamique des contaminants provenant du bassin versant et leur devenir dans l'estuaire amont est donc directement inféodée à la taille et à la constitution des matières en suspension ainsi qu'aux processus mécaniques de transfert/érosion/sédimentation auxquels les particules supports sont soumises.

Le matériel particulaire fin, en suspension dans les eaux, constitue une des premières variables prises en considération et couramment analysées en matière de qualité des eaux. C'est également un paramètre dont la mesure en continu est fiable, ce qui permet de suivre les fluctuations des conditions du milieu et des apports particuliers. Les mesures ponctuelles peuvent ainsi être recalées au sein d'une chronique qui témoigne de la représentativité de chaque échantillon. Cette même chronique peut conduire à des calculs de bilan particulaire par intégration des flux des masses d'eau correspondantes.

L'objectif sédimentologique principal de ce travail est d'analyser les conséquences de la marée dans les modalités du transfert des flux de matériaux continentaux dans les masses d'eaux.

Contexte de l'étude

Dans le contexte de l'étude hydrosédimentaire d'un estuaire fluvial, le choix et l'intérêt de la Seine sont justifiés par les caractéristiques hydrodynamiques et par l'état des connaissances acquises et en cours d'acquisition sur l'estuaire et sur ses compartiments adjacents.

Du point de vue hydrodynamique, la Seine est caractérisée par un débit moyen qui n'est pas de nature à entraver totalement l'expression de l'influence des marées.

La limite estuarienne en amont est parfaitement définie par suite de l'existence d'un barrage (barrage de Poses - Figure 3). Ce site est le lieu de l'introduction des flux provenant du bassin versant amont. L'enregistrement quotidien des débits d'eau, allié à la quantification régulière des MES¹ (et d'autres paramètres) permet de disposer d'une assez bonne connaissance des flux liquides et solides pénétrants dans l'estuaire au niveau de ce site.

Cette connaissance des apports du bassin versant amont bénéficie, en outre, des acquis du Programme Piren-SEINE qui aborde tous les aspects du cycle de l'eau en ce qui concerne le fonctionnement hydrologique (ruissellement, érosion, influence des orages,...), l'impact des aménagements (endiguements, effets de régulation des barrages réservoirs,...) et des rejets liés aux activités humaines.

¹ MES : Matières En Suspension

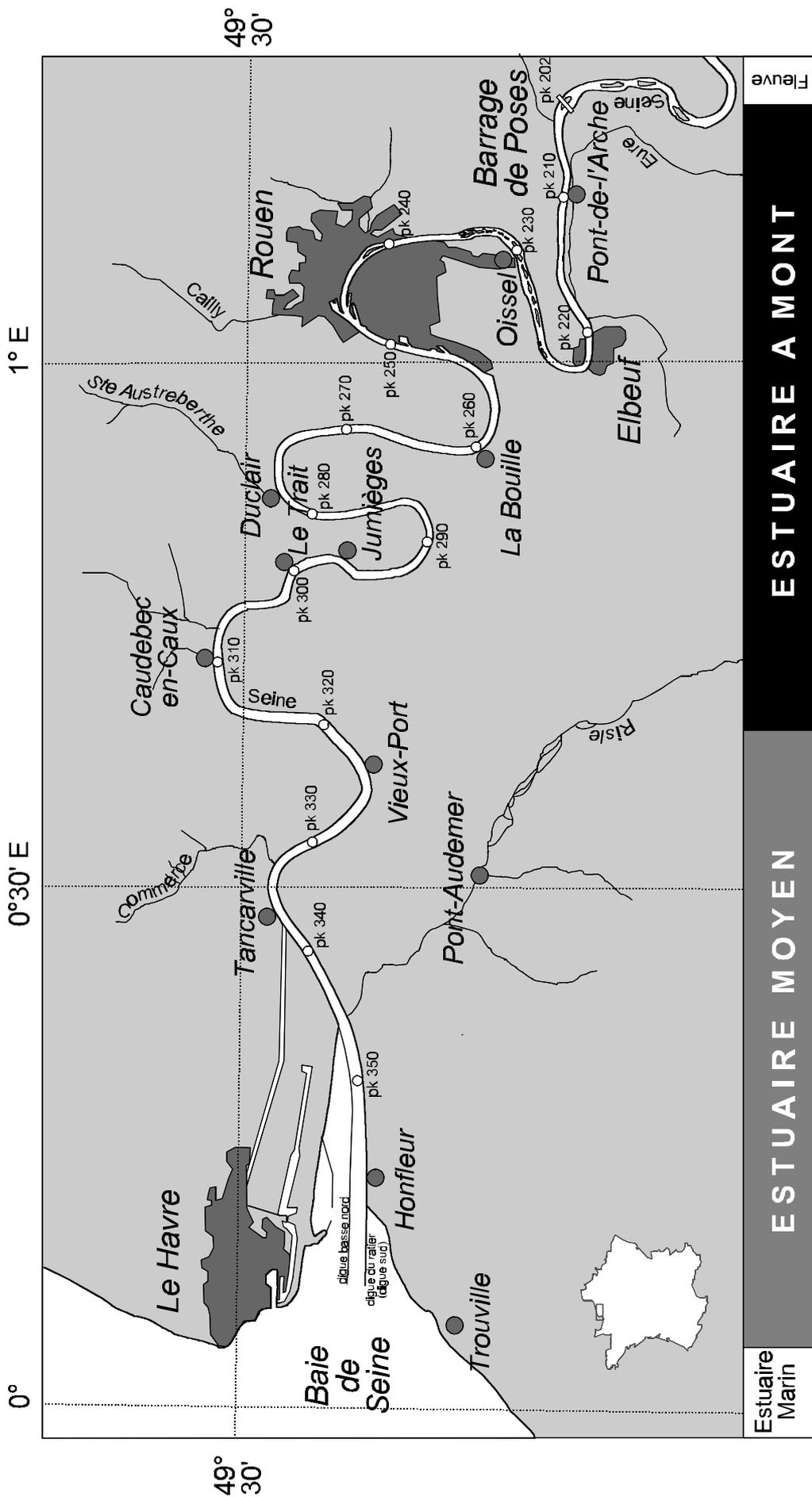


Figure 3 : L'estuaire de la Seine. Trois secteurs composent l'estuaire : (a) le bas estuaire ou estuaire marin, (b) l'estuaire moyen qui est la zone de mélange entre eaux douces et eaux salées et le siège du bouchon vaseux et (c) le haut estuaire ou estuaire fluvial composé d'eau douce mais soumis aux marées.

En aval, nous disposons d'une bonne connaissance de la couverture sédimentaire en baie de Seine (Larsonneur, 1971), réactualisée en baie de Seine orientale et dans l'embouchure par Avoine, 1981, et Boust, 1981. Les processus hydrosédimentaires de concentration des matériaux fins dans la colonne d'eau de l'estuaire soumis à l'intrusion saline sont à l'origine de la constitution d'un bouchon vaseux dont les fluctuations tidales ont été caractérisées par Avoine, 1981. Dans un cadre préliminaire, Dupont and David, 1980, ont abordé une démarche descriptive des matériaux en suspension (texturale et qualitative) ainsi mobilisés. Ce travail a été poursuivi dans l'estuaire (Dupont and Lafite, 1985, Lafite *et al.*, 1986), et en baie de Seine orientale (Lafite, 1990) afin de décrire le panache turbide lié à l'exportation des matériaux de l'estuaire dans le domaine marin.

Plus récemment, l'ensemble de ces données sédimentologiques (matières en suspension, dépôts dans l'embouchure et en baie de Seine orientale) a été repris, dans le cadre du Programme de recherche Seine-Aval, avec pour objectifs :

- a – D'acquérir une meilleure connaissance des processus du transport de matériaux fins.
- b – De permettre la calibration d'un modèle numérique de transport particulaire.

Dans le secteur de transition que constitue l'estuaire amont, les connaissances sont beaucoup plus sporadiques (suivis bimestriels de la qualité des eaux et des sédiments réalisés par la Cellule Antipollution du SNS, travaux des Services du dragage et de la Navigation du Port Autonome de Rouen, données recueillies au niveau des effluents des installations industrielles et études ponctuelles). Ce secteur amont est pourtant le lieu d'arrivée à l'estuaire d'un bassin versant qui drainent un secteur géographique où se concentrent 30 % de la population française et 40 % de l'activité économique du pays.

Les besoins environnementaux de connaissance des processus de transfert dans ce secteur estuarien de transition ont été pris en compte dans le cadre du Programme de recherche Seine-Aval. Les études sédimentologiques de terrain sont menées dans le cadre de la collaboration entre 3 Laboratoires, chargés :

- a – De dresser la couverture sédimentaire (Laboratoire de Géologie Marine de l'Université de Caen).
- b – D'étudier les processus hydrosédimentaires dans la colonne d'eau (Laboratoire de Géologie de l'université de Rouen).
- c – D'aborder les mécanismes à échelle réduite (interface surface/fond) et à hautes fréquences (CERGRENE).

Ce découpage est relativement formel et, compte tenu des relations entre les dépôts et la colonne d'eau, le travail présenté dans ce mémoire, principalement orienté sur la dynamique des matériaux en suspension, prendra en considération les avancements des deux autres équipes.

Dans ce cadre, l'objectif de ce travail est de décrire et de quantifier les mécanismes du transit sédimentaire dans le secteur fluvial soumis à la marée dynamique.

La mise en place d'une stratégie de mesure, comprenant un échantillonnage couplé à des chroniques d'enregistrements *in situ*, permet de traduire les fluctuations spatiales et temporelles du matériel particulaire en suspension dans ce compartiment estuarien.

La nécessité de connaître les processus mécaniques du transport du matériel particulaire en suspension a conduit à étudier le comportement mécanique de ce matériel dans la colonne d'eau ainsi qu'à le caractériser sur le plan textural et qualitatif.

L'ensemble des mesures ainsi réalisées a pour objectif complémentaire de permettre de calibrer les simulations numériques des modèles hydrosédimentaires développés par IFREMER.

Chapitre I

Cadre de l'étude

I.1 - Le bassin versant de la Seine

I.1.1 - Cadre géomorphologique

I.1.1.1 - Limites du bassin versant

A son embouchure (confluent de la Risle – pk² 346,00), la Seine draine un bassin versant de 78 650 km² (Figure 4). A l'entrée de l'estuaire amont (barrage de Poses – pk 202,00), la superficie de bassin versant drainée n'est que de 66 870 km².

La superficie du bassin versant intra-estuarien est donc de 11 780 km², c'est-à-dire près de 18 % de la superficie du bassin en amont du barrage de Poses et 15 % de la superficie du bassin versant dans son entier.

Selon Porcher, 1975, les pentes de la Seine sont de 0,10 ‰ en amont du barrage de Poses (pk 202,00), 17 ‰ entre le barrage de Poses et Martot (≈pk 216,00) et de 0,12 ‰ entre Rouen (≈pk 242,00) et La Bouille (≈pk 260,00).

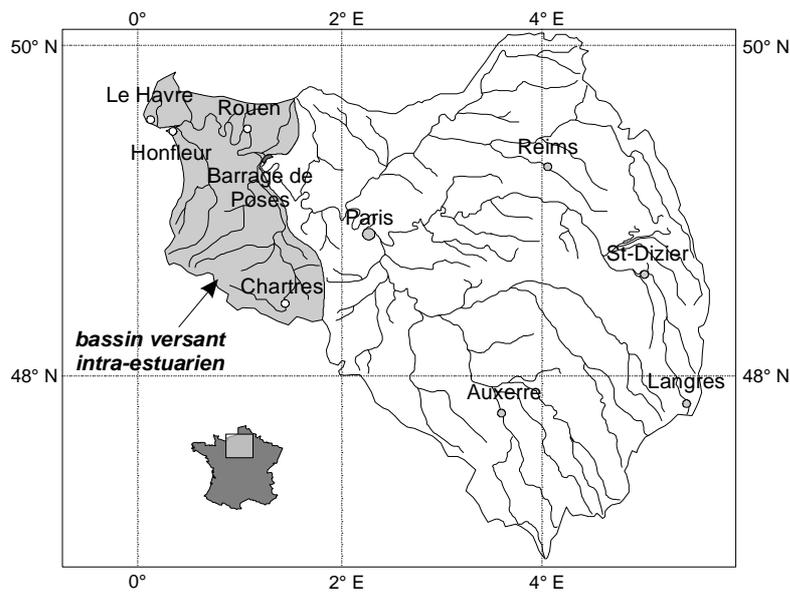


Figure 4 : Bassin versant de la Seine.

I.1.1.2 - Géologie

Le bassin versant continental de la Seine et de ses affluents draine une grande partie du bassin de Paris. En périphérie, les formations traversées correspondent aux assises calcaires et marneuses du Jurassique (Figure 5). Au centre du bassin les craies du Crétacé supérieur sont surmontées, par les assises du Tertiaire, constituées principalement d'alternances de formations détritiques et de calcaires.

² pk : point kilométrique, la référence des points kilométriques (pk 0,00) se situe au Pont Marie à Paris.

Les reliefs peu accusés et la part importante de substrats calcaires plus ou moins fissurés et karstifiés expliquent les faibles taux moyens d'érosion enregistrés à l'échelle du bassin (voisin de $7,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ selon Avoine, 1985).

Les flux de matériaux apportés ne sont toutefois pas négligeables du fait de la présence d'une couverture de matériaux fins provenant des apports éoliens (Limon des Plateaux) au cours des périodes froides du Quaternaire.

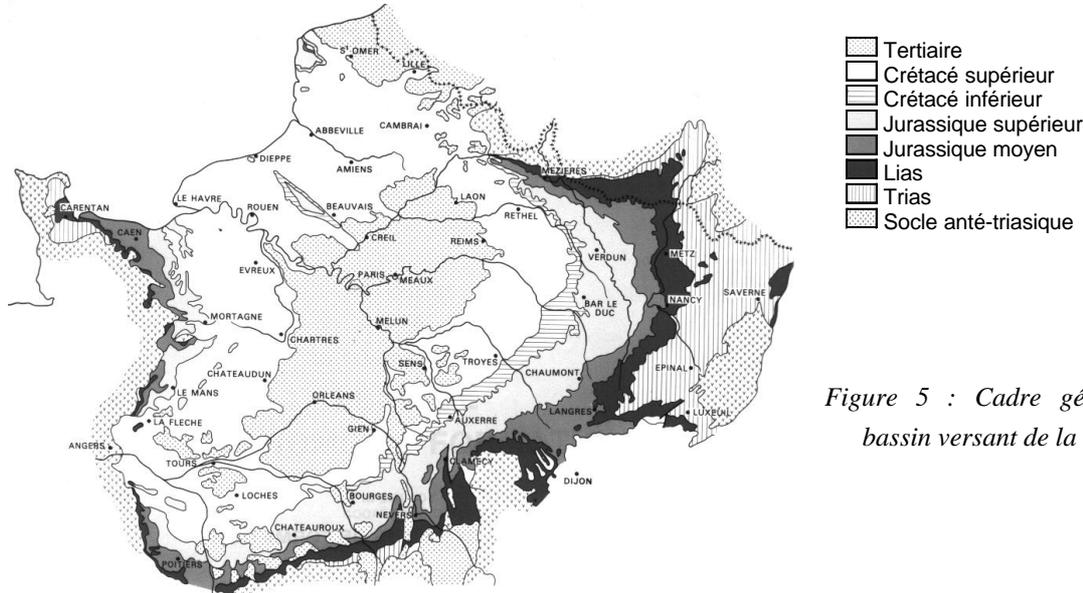


Figure 5 : Cadre géologique du bassin versant de la Seine.

Selon Lécalle, 1989, le réseau hydrographique se met en place au début du Quaternaire. Durant le Pléistocène moyen et le Pléistocène supérieur, les successions des périodes glaciaires et interglaciaires provoquent une érosion et un creusement du lit du fleuve durant les périodes froides et des dépôts sablo-graveleux durant les périodes tempérées. A cette époque, les méandres se dessinent. L'alternance des phases de dépôts et d'érosions au sein de ce tracé méandrique engendre la mise en place des terrasses alluviales de la vallée de la Seine.

1.1.2 - Hydrologie fluviale, cycles crue/étiage

Au cours de l'année, les débits des cours d'eau subissent des variations liées aux cycles crue/étiage. Sur les bassins petits à moyens, le régime hydrologique des cours d'eau est étroitement lié aux rythmes climatiques régionaux (Beckinsale, 1969). En fonction de l'allure des variations saisonnières des débits, plusieurs régimes fluviaux peuvent ainsi être identifiés (Pardé, 1943 in Réménérias, 1986) selon deux types de critères :

- 1 – La simplicité ou la complexité de la courbe chronologique annuelle des débits journaliers. Ces paramètres définissent :
 - a – les régimes simples caractérisés par un seul maximum et un seul minimum annuel, traduisant la prépondérance d'un seul mode d'alimentation.
 - b – les régimes mixtes présentant généralement deux maxima du fait de plusieurs modes d'alimentation.
 - c – les régimes complexes se rencontrent fréquemment sur les grands fleuves dont les affluents sont exposés à des influences différentes.

2 – La nature et l'origine des hautes eaux :

- a – le régime pluvial qui peut être divisé en régime pluvial continental et régime pluvial tropical, suivant l'époque des précipitations les plus importantes.
- b – le régime glaciaire, les débits sont très faibles en hivers et très forts en été, les débits sont conditionnés par les températures qui masquent les fluctuations des précipitations.
- c – le régime nival, qui présente les mêmes caractéristiques que le régime glaciaire mais sous une forme plus atténuée.
- d – les régimes mixtes, ils résultent de la superposition de plusieurs régimes simples et peuvent être subdivisés en de nombreuses catégories.

Jay and Flinchem, 1997, précisent, que des lâchers de barrage ou des événements météorologiques exceptionnels entraînent, des variations sporadiques du débit fluvial.

Contrairement aux crues, les étiages sont des phénomènes progressifs et ne peuvent survenir de façon catastrophique. Ils sont le résultat d'une longue évolution et peuvent cependant être interrompus brutalement par une crue (Guilcher, 1965).

Dans les petits bassins versants, les montées de crue sont très rapides, mais leur durée assez courte. Dans les grands bassins versant, en revanche, l'évolution des crues est plus lente et peut s'étendre sur plusieurs mois. Dans la majorité des cas, la phase de montée de crue est plus courte que celle de descente.

En fait, comme le soulignent Amoros and Petts, 1993, dans les grands bassins versants, intégrant de nombreux sous-bassins, le débit et la qualité de l'eau sont issus d'interactions complexes. Ils reflètent le mélange des eaux issues des différents sous-bassins ainsi que les conditions de l'écoulement et le stockage dans les chenaux, les plaines d'inondation et le sous-sol.

Le régime hydrologique de la Seine en amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00) est de type pluvial océanique avec un débit annuel moyen au barrage de Poses, calculé entre 1941 et 1990 de $410 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 6). Les crues se produisent au cours de la saison froide, lorsque les précipitations sont abondantes et les sols saturés (Guilcher, 1965).

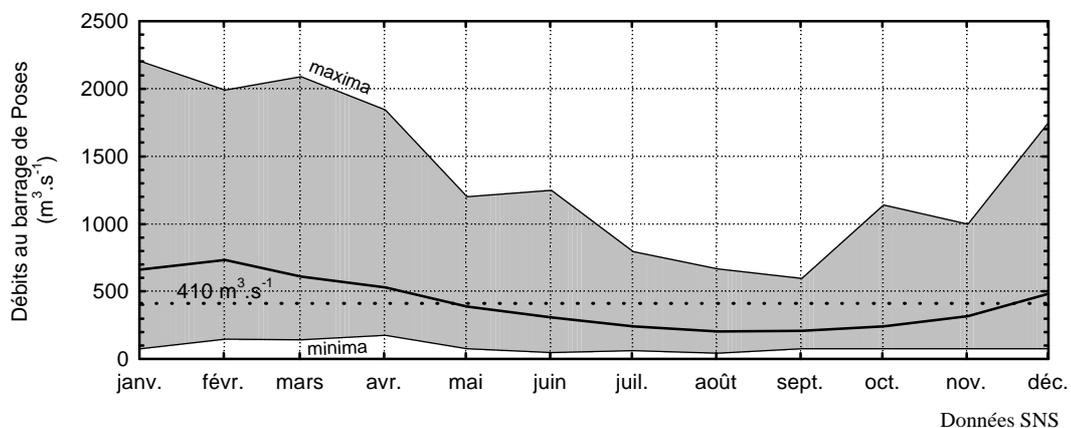


Figure 6 : Débits de la Seine au barrage de Poses (pk 202,00) entre 1941-1990 : (—) débits mensuels moyens, (.....) débit annuel moyen et courbes des débits minima et maxima.

Les débits de la Seine sont régulés par de nombreux barrages-réservoirs situés en amont du barrage de Poses. Cette régulation n'empêche pas des variations saisonnières et interannuelles marquées. Les débits moyens mensuels à Poses varient de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en août à $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en février. Ces valeurs masquent des situations de crue ($2\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et d'étiage ($40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) très marquées.

1.1.3 - Le matériel particulaire en suspension au barrage de Poses

Les études précédentes qui se sont intéressées aux flux particulaires en suspension dans l'estuaire de la Seine ont retenu le fleuve comme source majoritaire du matériel particulaire fin arrivant dans l'estuaire (Avoine, 1981). Ces travaux mettent en avant une dichotomie sur le plan quantitatif des apports particulaires entre crue et étiage (Avoine, 1982, Avoine, 1985, Meybeck and Idlafkih, 1995). 75% des apports annuels solides de la Seine dans l'estuaire se produisent en crue conformément aux mesures réalisées sur d'autres fleuves. C'est durant la phase ascendante des crues (20 jours par an) que 50% du matériel particulaire annuel pénètre dans l'estuaire. La moyenne annuelle du matériel particulaire en suspension arrivant dans l'estuaire est de 600 000 à 700 000 t (minimum 200 000 t, maximum 1 000 000 t) soit un taux d'érosion de $7,5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ (minimum 3, maximum 15) (Avoine, 1985).

Les débits quotidiens d'eau pénétrant dans l'estuaire sont calculés par le Service de Navigation de la Seine en fonction de la pente du plan d'eau entre le barrage de Poses (pk 202,00) et celui de Port Mort/Notre-Dame-de-la-Garenne (pk 161,30).

Après un suivi quotidien de deux ans des concentrations pondérales de MES et des débits au barrage de Poses (pk 202,00), Avoine, 1985, constate une importante variabilité des concentrations pondérales de MES. Celles-ci varient de quelques milligrammes par litre à des valeurs voisines de $40 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ en étiage vraisemblablement du fait de la production primaire, des resuspensions par la navigation, des rejets et des orages locaux (Cossa *et al.*, 1994). Lors des grandes crues, les concentrations pondérales en MES atteignent les $200 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

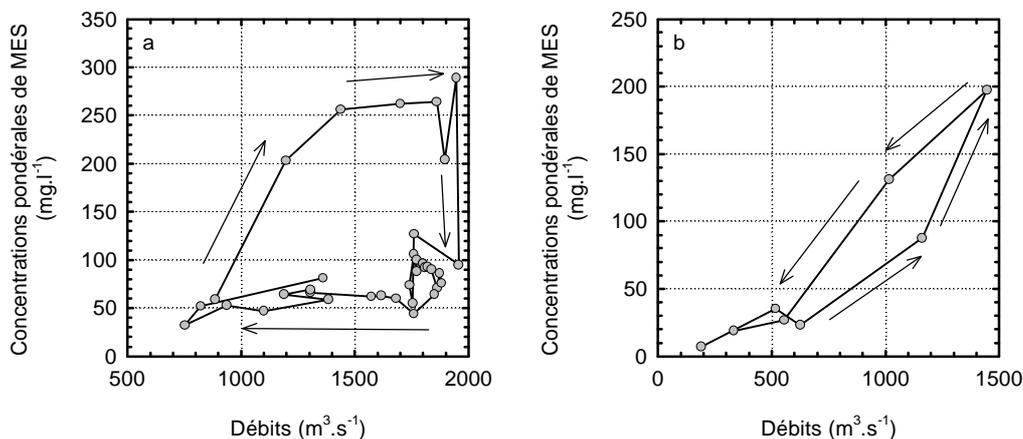


Figure 7 : Relation charge solide/débit liquide au barrage de Poses (pk 202,00) pour différentes crues. (a) Crue 1993-1994, en montée de crue, la charge solide est supérieure à celle de descente de crue pour un même débit (Meybeck and Idlafkih, 1995). (b) Crue de 1990, (Cossa *et al.*, 1994), en montée de crue, la charge solide est inférieure à celle de descente de crue pour un même débit.

Germaneau, 1969, tente d'établir, sans succès, une relation entre débits et turbidités au barrage de Poses (pk 202,00). Cet auteur précise toutefois que les valeurs maximales de turbidités correspondent toujours aux augmentations du débit fluvial et que les valeurs les plus faibles se rencontrent au cours de

l'étiage. Avoine, 1985, montre sur plusieurs crues l'existence d'une hystérésis entre concentrations pondérales de MES et débit fluvial. Lors de la phase de montée de crue, les concentrations pondérales de MES sont supérieures à celles de la phase de descente. Ces observations sont confirmées par les travaux de Meybeck and Idlafkih, 1995 (Figure 7-a). Ce schéma classique d'hystérésis ne se répète cependant pas lors de toutes les crues. Lors de la crue de 1990, Cossa *et al.*, 1994, montrent que l'hystérésis est inverse (Figure 7-b) et précisent qu'il est difficile de trouver une explication à ce phénomène dans la mesure où la Seine reçoit de nombreux affluents et où son bassin versant est hétérogène du point de vue de la lithologie.

Les travaux d'Avoine, 1985, ont permis d'établir une relation entre charge solide et débit liquide en montée de crue (Equation 1, Figure 8). Cette relation est encore utilisée à l'heure actuelle pour calculer les concentrations pondérales de MES arrivant dans l'estuaire en montée de crue et est complétée par une seconde relation linéaire s'appliquant en descente de crue et en étiage (Equation 2, Figure 8).

$$C_{MES} = 10^{-3} * Q^{1,66} \quad \text{Equation 1}$$

$$C_{MES} = 0,0344 * Q + 7,797 \quad \text{Equation 2}$$

Avec : C_{MES} = charge solide en mg.l^{-1} et Q = débit en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

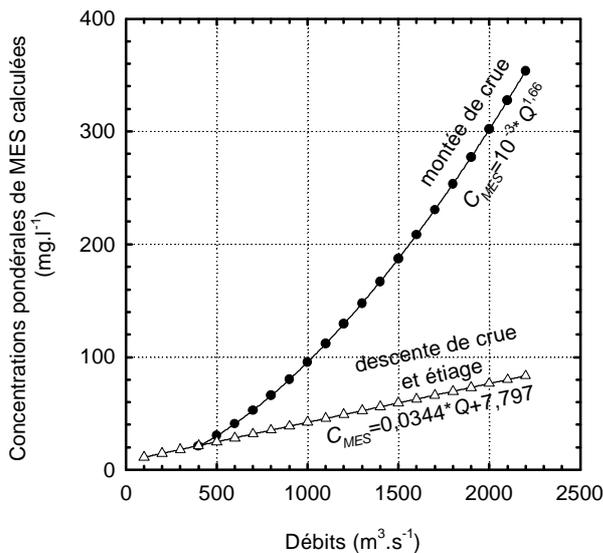


Figure 8 : Relations charge solide calculée - débit liquide en montée de crue (—●—), en descente de crue et en étiage (—△—).

Les flux quotidiens de matériel particulaire pénétrant dans l'estuaire amont sont estimés en multipliant le débit quotidien par la concentration pondérale de MES, elle-même calculée à partir des débits.

I.2 - L'estuaire de la Seine

I.2.1 - Cadre géomorphologique

I.2.1.1 - Limites de l'estuaire

Sur la base de la définition de Fairbridge, 1980, l'estuaire de Seine est hiérarchisé en trois secteurs (Figure 3) :

- a – Le bas estuaire ou estuaire marin. Il s'étend de la limite Est de la baie de Seine à l'aval de Honfleur (pk 364,77).
- b – L'estuaire moyen correspond à la zone de mélange entre eaux douces et eaux salées. Cette zone s'étend de l'aval de Honfleur (pk 364,75) aux environs de Vieux-Port (pk 234,00). Selon Avoine, 1981, les eaux sont toujours douces en surface en amont du pk 330,00 (feux de Saint-Léonard) et au fond en amont du pk 324,00 (Vieux-Port). Cette limite varie en fonction des conditions de marée (cycle semi-diurne, cycle lunaire) et des conditions hydrologiques (cycle crue/étiage). L'estuaire moyen est le siège du bouchon vaseux.
- c – Le haut estuaire (ou estuaire fluvial) est composé d'eau douce mais est soumis aux oscillations de marée. L'amont de ce secteur est matérialisé par le barrage de Poses (pk 202,00), limite artificielle à la propagation de la marée. A l'aval, ce secteur s'étend jusqu'à la limite amont de l'estuaire moyen, c'est à dire jusqu'à la limite l'intrusion saline (limite des eaux à 0,5 ‰ – voir paragraphe précédent).

I.2.1.2 - Géologie

Entre le barrage de Poses (pk 202,00) et le large du Havre, la Seine entaille des terrains datant du Crétacé et du Jurassique. D'amont en aval, le paléolith de la Seine est creusé dans des terrains de plus en plus anciens liés au pendage Nord-Est des couches (Lefebvre *et al.*, 1974).

A l'heure actuelle, le fleuve coule sur un prisme alluvial constitué de cailloutis de fond de vallée reposant sur le substratum crayeux, d'un remblai d'alluvions fines holocènes et d'intercalations grossières (Lefebvre *et al.*, 1974 et Huault, 1989). Ces remblais holocènes sont issus de l'alternance de dépôts saumâtres ou marins et de dépôts fluviaux. Ces derniers correspondent aux phases d'arrêt ou de recul de la transgression flandrienne (Huault and Lefebvre, 1974). La figure 9 présente une coupe type des dépôts holocènes dans le secteur de Rouen.

Les tufs datent selon Huault and Lefebvre, 1974, du Préboréal et sont issus de concrétions liées aux cyanophycées dans des eaux peu profondes. Au cours du Boréal, sous l'effet de la transgression, ces tufs sont remplacés par des sables coquilliers.

Les sables fins limoneux se rencontrent couramment sous forme de lentilles. Selon Porcher, 1975 ces sables fins ont une origine marine.

Les tourbes sont essentiellement composées de débris végétaux en cours de décomposition. Lorsque la tourbière s'est développée à l'abri du fleuve, les tourbes sont pures. En revanche lorsque celle-ci s'est développée dans une zone immergeable des intercalations de sables ou d'argile se rencontrent au sein des dépôts tourbeux.

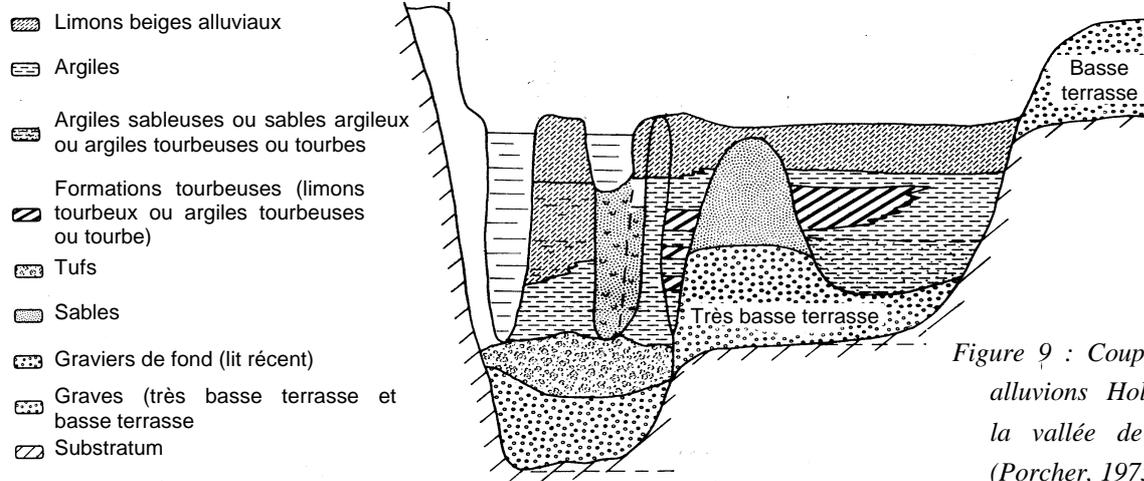


Figure 9 : Coupe type des alluvions Holocènes de la vallée de la Seine (Porcher, 1975, modifié).

Les argiles présentent plusieurs ensembles allant des argiles très plastiques jusqu'aux limons argileux. Ces argiles ont pour origine du matériel fin transporté par le fleuve lors des crues et déposé dans des zones abritées.

Les limons de crue sont les dépôts les plus récents. Ils se rencontrent sur l'ensemble de la plaine alluviale moderne et ont une origine fluviale.

En amont de Rouen, les îles sont en majorité constituées d'un ensemble argilo-limoneux ancré sur des tufs ou des sables. Elles possèdent un faciès particulier qui correspond à un ensemble lithologique épais regroupant le lit mineur du fleuve, les berges et les îles. Cet ensemble présente une continuité dans le temps avec une évolution verticale, sans composante latérale (Porcher, 1975). Ces îles sont pérennes et sont issues d'une accrétion verticale du lit mineur de la Seine.

I.2.1.3 - La couverture sédimentaire superficielle

Il n'existe pas de carte de nature des fonds dans l'estuaire amont de la Seine. Toutefois, les travaux de Germaneau, 1971, Porcher, 1975 et de Ragot, 1996, permettent de tracer les grandes lignes de la couverture sédimentaire dans cette partie de l'estuaire.

Dans son étude, Germaneau, 1971, souligne que les matériaux constitutifs actuels du fond de la Seine sont issus du remaniement des dépôts holocènes. Il divise la Seine en quatre parties en fonction de l'origine et du déplacement des sédiments :

- a – Seine fluviale en amont de Biessard (pk 251,00 environ).
- b – Seine fluvio-marine entre Biessard et Vieux Port (pk 324,00).
- c – Seine marine entre Vieux Port et le Havre.
- d – Baie de Seine au large du méridien du Havre.

Dans la partie fluviale (amont du pk 251,00) l'auteur considère que les alluvions sont, dans leur majorité, immobiles et qu'à l'heure actuelle le fleuve ne présente pas la compétence suffisante pour remobiliser les dépôts holocènes et seuls, quelques sédiments fins se déplaceraient dans ce secteur.

La Seine fluvio-marine constitue une zone de mélange entre particules d'origine marine et particules d'origine fluviale ; le gradient particules marines/particules fluviales s'accroît en faveur des particules marines à proximité de Vieux Port (pk 324,00). La fraction marine fine se déplacerait vers l'amont sous la forme de suspensions semi-permanentes. Cette migration vers l'amont dépasserait la limite de salinité des eaux. Dans l'estuaire amont le matériel marin fin se mêlerait à la « fraction très fine » en « suspension permanente » dont l'origine est essentiellement fluviale. Le mélange particules fluviales/particules marines se déposerait latéralement au long de l'estuaire amont.

Les travaux de Porcher, 1975, complétés par des données de vibroforages réalisées par le SNS en 1970 permettent de préciser la nature des fonds entre l'agglomération rouennaise et le pk 225,00. Dans ce secteur les fonds sont essentiellement constitués de sables grossiers coquilliers et de tufs. Des dépôts de sables vaseux et de vases compactes apparaissent sous forme de tâches en plusieurs sites.

Ragot, 1996, présente une étude sur les fonds de la Seine entre Villequier (pk 313,00) et Rouen (pk 245,00) basée sur des profils de résistivité à 1 mètre de profondeur, de sondages effectués pour le PAR en 1969 et 1970 ainsi que sur des données recueillies auprès des services de dragages du PAR. Dans ce secteur de l'estuaire, Lefebvre *et al.*, 1974, précise qu'il existe des intercalations de matériel grossier dans les dépôts fins holocènes. Entre Rouen (pk 245,00) et Mauny (pk 264,00), les profils de résistivité à 1 m indiquent des fonds à dominante plutôt argileuse. En aval de Mauny (pk 264,00), en revanche, la place des sables fins dans les dépôts s'accroît notablement. Les sondages permettent de préciser ces observations et montrent, qu'entre Rouen (pk 245,00) et Duclair (pk 276,00), les fonds présentent les mêmes caractéristiques qu'en amont de Rouen. A l'aval de Duclair, en revanche, les sables fins sont beaucoup plus présents dans les dépôts.

I.2.1.4 - Aménagements

Une grande partie des caractéristiques morphologiques estuariennes, méandres mis à part, est issue de l'histoire récente (moins de 150 ans) de l'aménagement de l'estuaire. Afin d'améliorer les conditions de navigation maritimes et fluviales, l'homme a remodelé le cours estuarien de la Seine depuis la moitié du XIX^{ème} siècle. Le récit qui en est fait ici est tiré des travaux de Vigarié, 1964, d'Avoine, 1981 et de communications personnelles de la part du Port Autonome de Rouen.

I.2.1.4.1 - Estuaire moyen et estuaire aval

Les premiers travaux d'endiguement datent du milieu du XIX^{ème} siècle. Entre 1848 et 1866, le chenal est endigué pour la première fois entre La Mailleraye (≈pk 303,00) et le confluent avec la Risle (pk 346,00). Durant cette première campagne de travaux, 37 km de digues sont construits en rive droite et 28 km en rive gauche. Les zones protégées des courants par ces digues se sont rapidement comblées sous l'effet de la sédimentation.

Entre 1866 et 1878, la consolidation et le rehaussement des digues déjà construites sont la priorité. Seule, la digue en rive gauche est prolongée jusqu'à Berville-sur-Mer (≈pk 348,00).

Entre 1896 et 1920, d'importants travaux sont réalisés dans l'estuaire moyen afin de tenter de stabiliser le chenal de navigation. Ces nouveaux aménagements ne donnent pas satisfaction et le chenal de

navigation n'est pas stabilisé. Durant ces soixante premières années de travaux, le mouillage a progressé de 4,50 m à Rouen.

En 1933, des travaux de dragage et de prolongement de la digue en rive gauche (nouvelle digue sud) au-delà de Honfleur commencent. Ils sont interrompus par la guerre et prennent fin en 1955. La nouvelle digue sud s'étend jusqu'au pk 255,60 et double l'ancienne digue Sud entre le pk 246,00 et le pk 243,30

En 1957, la construction de la digue du Ratier commence entre le pk 364,775 (= actuelle Balise A) et le pk 358,00. En 1958 et 1959, des dragages sont entrepris entre l'ancienne digue sud et la nouvelle digue sud. Fin 1959, l'ancienne digue sud est détruite. En août 1960, le nouveau chenal de navigation est ouvert à l'ensemble du trafic maritime. Entre 1961 et 1962, des travaux de dragage sont entrepris pour le calibrage et la stabilisation du nouveau chenal.

En 1970, la digue basse nord (submersible) est prolongée de 5 km jusqu'au pk 365,50. Des travaux de creusement des fonds et de rehaussement de la digue basse nord viennent compléter ces travaux. Ce rehaussement est arrêté avant terme en septembre 1975.

Entre janvier et juin 1978, une brèche de 1000 mètres est ouverte dans la digue basse Nord entre les pk 353,00 et 354,00. Entre juin 1978 et avril 1979, le prolongement et la surélévation de la digue basse Nord se font entre les pk 364,775 et pk 350,70. En septembre 1980, une petite brèche de 100 m est ouverte dans la digue du Ratier (≈pk 357,50).

En 1994, la construction du Pont de Normandie (pk 352,80) engendre l'atterrissement de certaines zones intertidales.

1.2.1.4.2 - L'estuaire amont

Dans l'estuaire amont les premiers aménagements ont été réalisés afin d'améliorer les chemins de halage et le régime hydraulique du chenal. De nombreuses îles, passes peu profondes, seuils et criques creusées dans les prairies alluvionnaires jalonnaient le cours du fleuve.

Les premiers travaux de dragages dans l'estuaire amont datent de 1861. Au cours de cette année le banc tourbeux situé à proximité des Meules (≈pk 305,00) est dragué afin de conforter l'effet des digues construites en aval.

A partir de 1866, plusieurs digues sont construites entre Rouen (≈pk 242,00) et la Mailleraye, notamment au niveau de Grand-Couronne (≈pk 254,00) et de Moulineaux (≈pk 258,00). Dans le secteur de Bardouville (≈pk 266,00), trois îles séparent le chenal en de multiples bras peu profonds. Entre 1882 et 1892, des barrages sont construits entre ces îles afin de forcer l'écoulement en un chenal unique. Des dragages complètent ces constructions. Entre 1888 et 1895 plusieurs campagnes de dragages sont menées afin de réduire des seuils dans le chenal navigable sur les sites de Moulineaux (≈pk 258,00), Grand-Couronne (≈pk 254,00), Bardouville (≈pk 266,00), au banc des Meules (≈pk 305,00) et au banc des Flacques (≈pk 322,00).

Entre 1898 et 1903, de nouvelles grandes campagnes de dragages sont menées sur les bancs des Flacques (≈pk 322,00) et des Meules (≈pk 305,00), sur les passes d'Yville (≈pk 285,5), Bardouville (≈pk 266,00), Moulineaux (≈pk 258,00), Grand-Couronne (≈pk 254,00) et Biessard (≈pk 251,00).

A partir de 1904, l'accès au port de Rouen n'est plus conditionné par les problèmes de seuils et de divagation du chenal dans l'estuaire aval mais par le seuil de Biessard (≈pk 251,00).

A partir de 1913, les travaux d'aménagement s'amplifient entre Rouen (≈pk 242,00) et Moulineaux (≈pk 258,00). En aval, entre La Bouille (≈pk 260,00) et Duclair (≈pk 278,00), les passes de Caumont-Mauny (≈pk 260,00), Bardouville (≈pk 266,00), St Georges (≈pk 270,50) et La Fontaine (≈pk 274,50) sont réaménagées.

A l'heure actuelle, la quasi-totalité de l'estuaire amont en aval de Rouen est endiguée. Seuls, quelques secteurs, comme l'aval de Bardouville (≈pk 266,00) en rive gauche ou la rive droite en aval du Trait (≈pk 300,00) restent non endigués.

1.2.1.4.3 - Les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise

Le développement du port de Rouen a été étroitement lié à l'évolution de son trafic maritime, lui-même dépendant de l'accès entre Rouen et la mer.

En 1908, le port de Rouen comprend deux bassins :

- a – Un bassin fluvial en amont, compris entre le pont Boieldieu (pk 242,00) et le pont aux Anglais (actuel viaduc d'Eauplet). L'île Lacroix, telle qu'elle est aujourd'hui, n'existe pas mais est composée de l'île Lacroix en aval et de l'île Brouilly, plus petite, en amont. Ces deux îles sont séparées par un bras d'une soixantaine de mètres de large. Des quais existent tout au long de ce secteur.
- b – En aval, se trouve le bassin maritime limité en amont par le pont Boieldieu (pk 242,00) et en aval par l'extrémité du bassin aux Pétroles (actuel bassin Rouen-Quévilly – pk 246,70). Le bassin aux Pétroles, ainsi que le bassin aux Bois, constituent les plans d'eau annexes du bassin maritime.

En 1920, le port maritime s'étend du pont Boieldieu (pk 242,00), au Val-de-la-Haye (pk 254,50). Le bassin Saint-Gervais (pk 245,60) est creusé à cette époque. La darse des Docks et le bassin aux hydrocarbures sont construits quelques années plus tard.

Aujourd'hui, le bassin maritime, dont la limite amont est le pont Jeanne d'Arc (pk 242,40), est limité dans les faits au pont Guillaume le Conquérant (pk 242,92) pour les grands navires. Sa limite aval se situe à La Bouille (pk 260,10). Le bassin St-Gervais (pk 245,60) constitue le seul plan d'eau annexe en rive droite. En rive gauche quatre plans d'eau annexes sont recensés : le bassin aux Bois (pk 245,00), le Bassin Rouen-Quévilly (pk 246,70), la Darse des Docks (pk 251,20) et le bassin aux hydrocarbures de Petit-Couronne (pk 253,00). Il existe trois zones d'évitage dans le bassin maritime. Elles sont localisées à la hauteur du bassin Rouen-Quévilly (pk 246,70), du bassin aux hydrocarbures (pk 253,00) et de Hautot-sur-Seine (pk 256,20).

1.2.1.4.4 - L'amont de Rouen

Jusqu'en 1860, année de la construction du barrage de Martot (pk 216,00), la limite de propagation de la marée est située aux environs de Pont de L'Arche (≈pk 208,00). A partir de 1918, des travaux d'amélioration des conditions de navigation entre le barrage de Martot (pk 216,00) et le port de Rouen furent entrepris. Ils consistèrent en d'importants travaux de dragages, d'arasements de plusieurs îles et de comblement de bras séparant les îles. En 1930, la suppression du barrage de Martot (pk 216,00) et le dragage du secteur compris entre ce dernier et le barrage de Poses (pk 202,00) sont décidés. Le barrage de Martot fut définitivement supprimé en 1943.

Dans les années 1970-1980 des travaux de recalibrage ont été effectués dans le secteur des îles. En 1976, l'île du bras St-Martin située à Oissel (pk 230,00) a été en partie draguée et a été rattachée à la rive en 1981.

I.2.1.5 - Morphologie

Le cours de la Seine dans sa partie estuarienne est caractérisé par la présence de six vastes méandres s'inscrivant dans le substrat crayeux : les méandres d'Elbeuf, Rouen, La Bouille, Duclair, Jumièges et Caudebec-en-Caux (Figure 3). L'enfoncement important de la vallée de la Seine au sein de ces massifs crayeux est masqué par la largeur de la plaine alluviale ; dans de nombreux secteurs, le dénivelé entre les plateaux et la plaine alluviale actuelle dépasse les 100 m. Entre les méandres de Jumièges et de Caudebec-en-Caux, le cours de la Seine subit une déviation (secteur du trait) qui rompt avec la succession continue des méandres amont.

De l'aval du barrage de Poses (pk 202,00) à la limite de pénétration de la salinité, la Seine reçoit 8 affluents : l'Andelle en rive droite (RD) au pk 203,00, l'Eure en rive gauche (RG) aux pk 208,00 et 220,00, l'Oison (RG, pk 220,00), l'Aubette (RD, pk 241,00), le Cailly (RD, bassin Saint-Gervais, pk 245,00), la Sainte Austreberthe (RD, pk 279,00), la Rançon (RD, pk 307,00) et la Sainte Gertrude (RD, pk 309,00).

Les caractères morphologiques du lit mineur de la Seine dans l'estuaire amont (Figure 3 et Figure 10) permettent une hiérarchisation de cette partie de l'estuaire en six zones :

- a – Une zone située entre le barrage de Poses (pk 202,00) et l'aval d'Elbeuf (pk 221,50) : la Seine présente un lit unique, les endiguements sont peu nombreux et les profondeurs comprises entre -1 et 1 m CMH³.
- b – Une zone située entre l'aval d'Elbeuf (pk 221,50) et l'amont d'Amfreville-la-mi-Voie (pk 235,50) : le fleuve présente un lit multiple, les endiguements sont peu nombreux et les profondeurs variables (-3 à 1 m CMH dans le chenal et -1 à 7 m CMH dans les bras latéraux).
- c – Une zone située entre l'amont d'Amfreville-la-mi-Voie (pk 235,50) et l'Ile Lacroix (pk 240,50) : la Seine coule dans un lit unique, les endiguements sont peu importants sauf dans la partie aval (de -0,5 m CMH en aval à -4 m CMH par endroits).
- d – Une petite zone comprise entre l'amont de l'Ile Lacroix (pk 240,5) et le pont Boieldieu (pk 242,00) : la Seine se sépare en deux bras à hauteur de l'Ile Lacroix (le bras du Pré au Loup à droite de l'île et le bras du Cours de la Reine à droite). Le pont Boieldieu (pk 242,00) se situe au niveau d'un seuil bathymétrique important ; en aval immédiat de ce pont les cotes sont de -4 à -6 m CMH alors qu'en amont, elles sont de -3 à -1 m CMH.
- e – Une zone située entre le pont Boieldieu (pk 242,00) et le pk 255,00, limite aval des infrastructures portuaires les plus importantes. Cette zone est dominée par une forte

³ CMH : Carte Marine du Havre ; le zéro des cartes marines du Havre est situé 4,38 mètres au-dessous du zéro IGN 69.

pression anthropique avec un endiguement total, la présence de nombreux bassins, de souilles et de zones d'évitage. Les cotes sont voisines de -4 à -6 m CMH.

f – La dernière zone, située entre le pk 255,00 et le pk 320,00 (limite aval de notre étude), est une zone fortement endiguée avec un lit unique à méandres. Les profils transversaux se rapprochent de ceux des canaux artificiels, les largeurs varient entre 200 m en amont et 350 m en aval, les profondeurs sont comprises entre -4 et -7 m CMH.

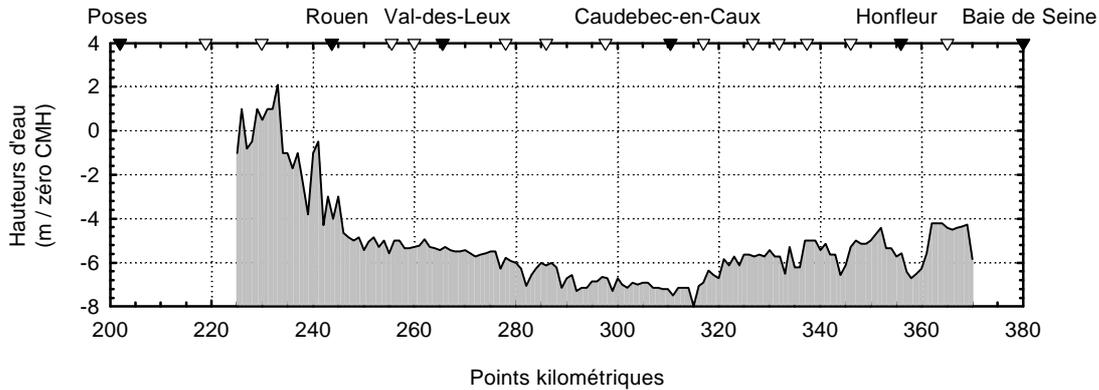


Figure 10 : Profil longitudinal des profondeurs minimales dans le chenal de navigation de l'estuaire de la Seine.

I.2.1.6 - Dragages

Outre les dragages entrepris dans le cadre de l'amélioration du chenal de navigation, le Port Autonome de Rouen procède à d'importantes campagnes de dragages d'entretien dans le chenal de navigation ainsi que dans le port lui-même (souilles, bassins et zones d'évitage).

Les volumes annuels dragués sur l'ensemble de l'estuaire sont de 5 à 6 10^6 m³ dont 80 à 90 % dans l'estuaire moyen et l'estuaire aval. L'essentiel du matériel dragué dans l'estuaire amont provient des infrastructures portuaires rouennaises (Tableau 3).

Dans le secteur amont, les dragages se répartissent en deux grandes campagnes annuelles : une campagne de post-cruée en fin d'hiver ou au début du printemps et une campagne de pré-cruée en fin d'été ou au début de l'hiver. La première campagne est rendue nécessaire par une diminution des profondeurs suite aux importants apports particuliers durant les crues hivernales. La seconde campagne est quant à elle destinée à entretenir les souilles. Ces dernières ont tendance à se colmater durant la période estivale sous l'effet de la sédimentation et du glissement des fonds.

Après dragages, le matériel est mis à terre dans des chambres de dépôts. Ce matériel dragué peut être utilisé pour stabiliser certains talus sous-marins ou pour réduire certaines sections trop importantes.

Les différents aménagements et dragages ont eu pour conséquence une amélioration des conditions d'accès des navires dans le port de Rouen. Ils ont aussi considérablement modifié les conditions hydrosédimentaires de l'estuaire avec notamment la disparition de nombreuses zones intertidales et l'accroissement du marnage dans l'ensemble de l'estuaire (Le Floch, 1961).

Tableau 3 : Zones de dépôts de matériels fins et estimation des volumes annuels dragués dans la partie amont de l'estuaire de Seine.

<i>Site</i>	<i>pk</i>	<i>Volumes annuels dragués (m³)</i>	<i>Sources</i>
<i>Vatteville-la-Rue</i>	313,00 RG*	100 000	PAR ⁴
<i>La Mailleraye-sur-Seine</i>	303,00 RD*		PAR
<i>Face à Le Trait</i>	301,00 RG		PAR
<i>Jumièges</i>	290,00 RD		PAR
<i>Ambourville</i>	274,00 RG		PAR
<i>Zone d'évitage de Grand-Couronne</i>	256,20	100 000	PAR
<i>Souilles - Quai Grand-Couronne</i>	254,00 à 255,00 RG	20 000	PAR
<i>Souilles - Bassin aux Hydrocarbures</i>	253,00	10 000	PAR
<i>Darse des docks</i>	251,50	pas de dragage car la darse est inutilisée	PAR
<i>Chantier de Normandie</i>	247,00	pas de dragage	PAR
<i>Bassin Rouen-Quévilly ZEBRQ</i>	246,00	450 000	PAR
<i>Bassin aux bois</i>	244,40	50 000	
<i>Amont de Rouen</i>		dragages mais très rares	PAR - SNS ⁵

* RG = Rive Gauche ; RD = Rive Droite Volume annuel dragué : 730 000 m³ dont plus de 600 000 m³ dans les installations portuaires du PAR

1.2.2 - Hydrologie estuarienne

Dans les régions du Nord de l'Europe, la marée est de type semi-diurne lunaire à irrégularité mensuelle. L'amplitude de la marée est modulée avec une périodicité de 14,5 jours correspondant à une demi-lunaison.

Les ondes de marée océaniques présentent une symétrie flot/jusant et peuvent être, dans de nombreux cas, assimilées à des sinusoïdes. Aux abords des côtes et à mesure que les fonds sont moins profonds ces ondes de marée subissent des déformations résumées sur la Figure 11 et expliquées par de nombreux auteurs (Le Blond, 1978, Dronkers, 1986, Aubrey and Speer, 1985, Speer and Aubrey, 1985 et Parker, 1991).

1.2.2.1 - La marée dans l'estuaire de Seine

A son arrivée à proximité de l'estuaire de Seine, l'onde de marée incidente est déjà modifiée par rapport à l'onde de marée océanique initiale. Cette onde initiale est issue de la réponse du Nord-Est de l'Océan Atlantique aux forces génératrices de la marée ; les interactions Lune/Soleil/Terre donnent à la

⁴ PAR : Port Autonome de Rouen

⁵ SNS : Services de Navigation de la Seine (Voies Navigables de France)

marée son caractère semi-diurne à irrégularité mensuelle. Les co-oscillations de la Manche et de la mer celtique amplifient l'onde Atlantique incidente et donnent à la marée une amplitude importante aux abords des côtes françaises (Salomon, 1981).

1.2.2.1.1 - Asymétrie de l'onde de marée

La diminution des profondeurs induit l'apparition d'une asymétrie dans l'onde de marée (Dyer, 1994). Dans les estuaires macrotidaux, cette asymétrie peut être très importante et se traduit par une propagation plus rapide du flot par rapport au jusant (Bonnetille, 1968). La partie montante de l'onde est raidie et la partie descendante devient plus plate. Dans les cas extrêmes, cette déformation conduit au déferlement du front montant de l'onde, ce phénomène est appelé mascaret ou barre. Dans la plupart des fleuves soumis à la marée ce stade ultime de distorsion n'est jamais atteint. En général, une légère accentuation de la pente du flot par rapport à celle du jusant est observée. Ce phénomène engendre un étale de basse mer plus long que l'étales de pleine mer.

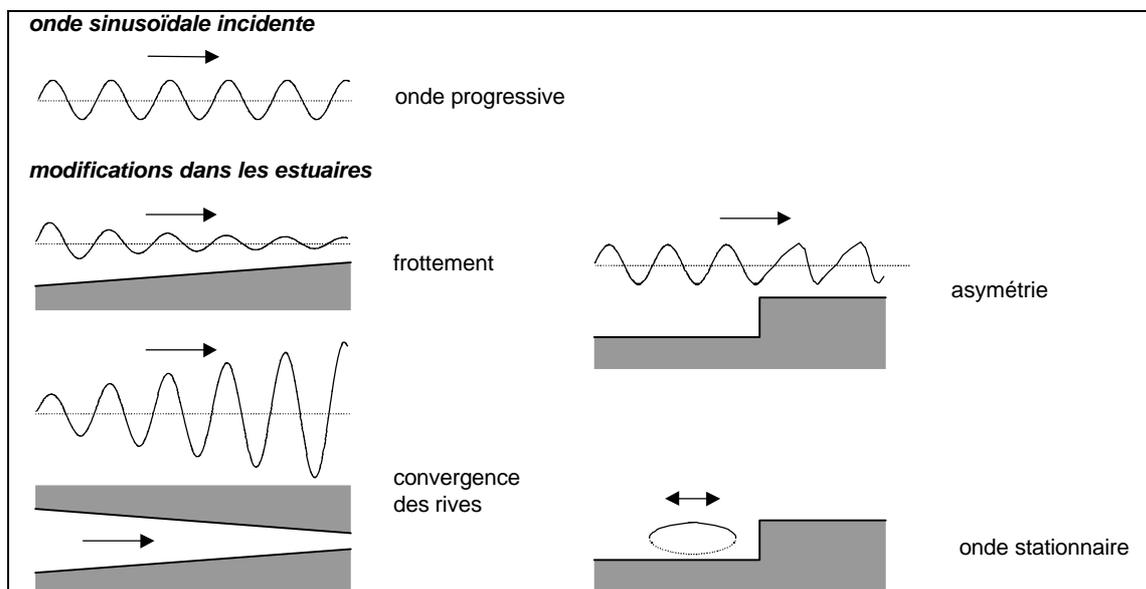


Figure 11 : Modifications de l'onde de marée dans les zones côtières (Salomon and Allen, 1983, modifié)

La déformation de l'onde sinusoïdale lunaire moyenne (M_2) dans des eaux peu profondes peut être interprétée comme la superposition à cette onde initiale d'harmoniques désignées par M_4 , M_6 , M_8 de périodicités un demi, un tiers et un quart par rapport à M_2 (Le Floch, 1961) (voir annexe I-a). La propagation simultanée des ondes M_2 et S_2 dans des faibles profondeurs entraîne la formation d'une onde composée quart-diurne (MS_4). Dans de nombreux cas, l'asymétrie de la marée peut être représentée par la combinaison de l'onde lunaire moyenne M_2 et de l'onde M_4 de période quart-diurne.

Au cours de sa pénétration dans l'estuaire de Seine l'onde de marée incidente subit une importante déformation par rapport à l'onde sinusoïdale initiale (Figure 12). La courbe de marée du Havre présente une asymétrie marquée entre un flot de courte durée (3 heures) et un jusant plus long (6h30). Une double pleine mer caractéristique de l'estuaire, due aux ondes supérieures, se met en place entre ces deux périodes. Au Havre, le marnage varie entre 3 mètres en mortes-eaux et 8 mètres en vives-eaux faisant de l'estuaire de Seine un estuaire macrotidal. Au fur et à mesure de sa propagation vers l'amont de l'estuaire, l'asymétrie flot/jusant est conservée, le front de l'onde devient escarpé, le marnage diminue et la double pleine mer disparaît. Sur certains sites, entre Caudebec-en-Caux (pk 310,50) et Rouen (pk 243,70), le

raidissement du front de l'onde peut atteindre le stade ultime de déferlement et provoquer un mascaret en période de très grandes vives-eaux et de faibles débits.

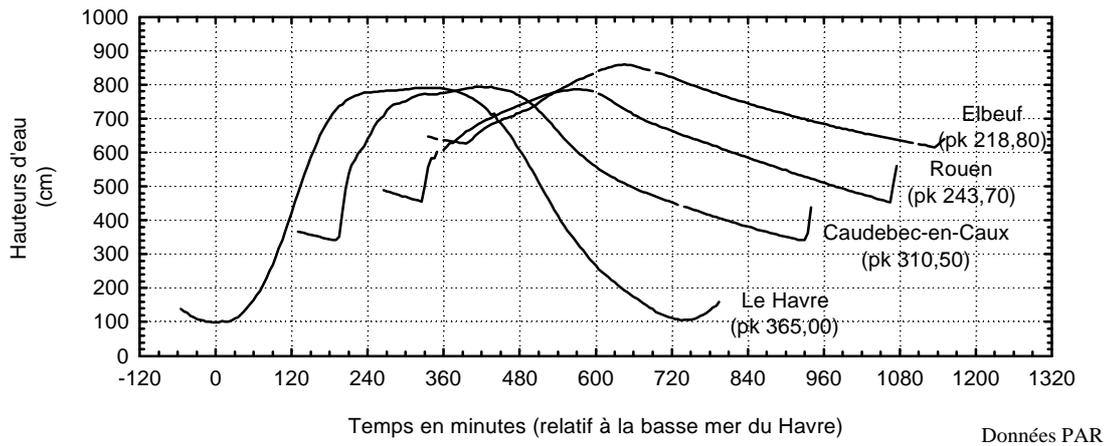


Figure 12 : Déformation de l'onde de marée au cours de sa progression dans l'estuaire amont de la Seine (le 5 mai 1996, coefficient 101, débit $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Le Floch, 1961, précise que la déformation de la marée en Seine s'explique par les ondes supérieures lunaires M_4 et M_6 et parfois M_8 alors que les ondes supérieures d'origines solaires (S_4 et autres) sont négligeables. L'influence des ondes composées se fait essentiellement sentir au travers de MS_4 .

Une conséquence importante de cette asymétrie de l'onde de marée dans l'estuaire amont de la Seine réside dans le renforcement des vitesses de courants de flot par rapport à celles de jusant (Figure 13).

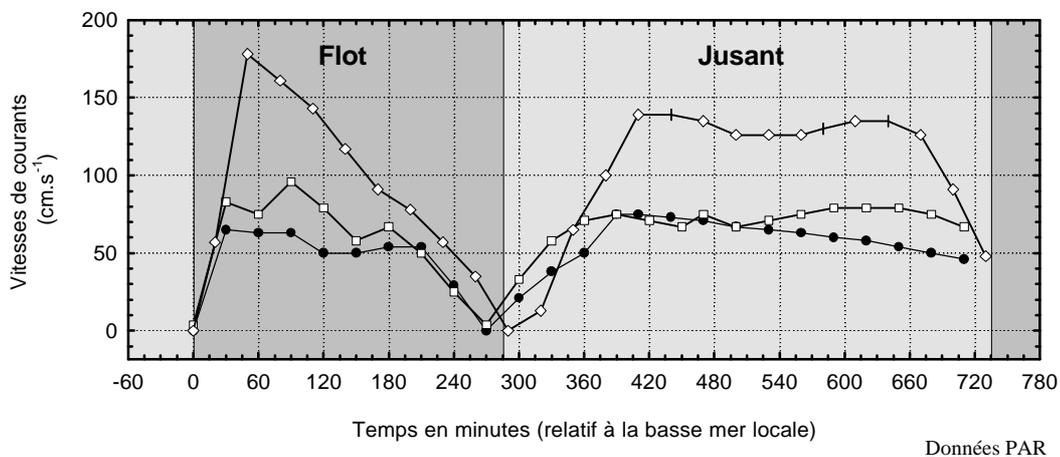


Figure 13 : Vitesses moyennes de courants pour un coefficient de marée de 70 au Havre en trois sites de l'estuaire de la Seine : \diamond Vatteville-la-Rue (pk 318,00), \square Val-des-Leux (pk 270,00) et \bullet Rouen (242,90) (d'après PAR, 1998, modifié).

Avoine *et al.*, 1981 présentent la distribution des vitesses maximales de courants de flot et de jusant, pour une marée moyenne et un débit moyen, calculée à l'aide d'un modèle hydrodynamique numérique (Figure 14). A l'entrée des digues, la réduction de la section mouillée du chenal entraîne l'amplification des vitesses de courants dans l'estuaire moyen. Dans l'estuaire amont les vitesses maximales de flot et de jusant sont amorties au fur et à mesure de la progression de l'onde de marée. Toutefois, d'après le modèle numérique utilisé, les vitesses maximales de flot restent supérieures à celles de jusant jusqu'au pk 260,00. Entre les pk 260,00 et 250,00 ces vitesses maximales sont égales. A l'amont du pk 250,00 les vitesses

maximales de jusant sont supérieures à celles de flot et l'inversion flot jusant disparaît en amont du pk 230,00 (Oissel).

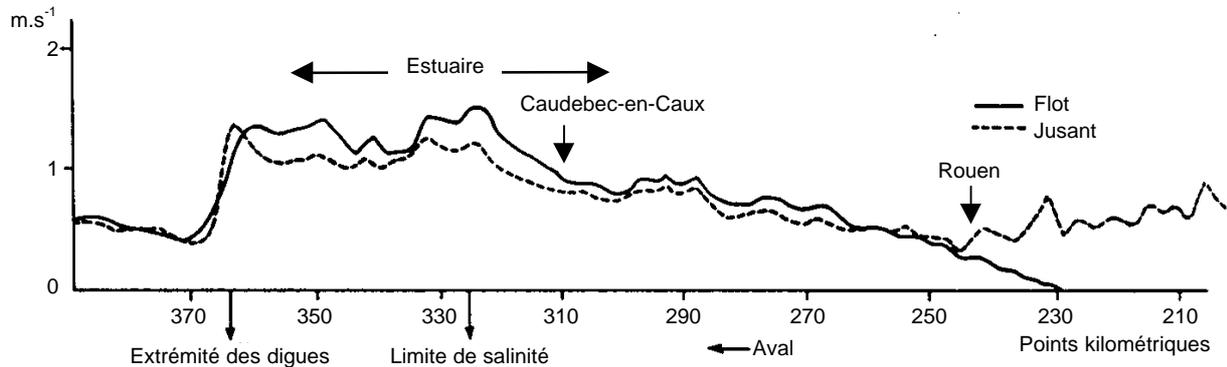


Figure 14 : Distribution des vitesses maximales de courants de flot et de jusant pour une marée moyenne et un débit moyen. Vitesses moyennes sur la profondeur et calculées d'après un modèle numérique (Avoine et al., 1981).

L'asymétrie de l'onde de marée n'existe cependant pas de manière aussi nette durant la totalité du cycle semi-lunaire. Elle est beaucoup plus importante en période de vives-eaux qu'en période de mortes-eaux, notamment dans l'estuaire moyen et dans le secteur aval de l'estuaire fluvial (Le Floch, 1961).

La présence d'ondes supérieures et composées dans la constitution de l'onde de marée rend délicate l'utilisation du coefficient de marée. Elles engendrent des relations non linéaires entre hauteur d'eau à pleine mer ou à basse mer (Le Floch, 1961). Le coefficient de marée reste toutefois un moyen commode pour l'expression des conditions de marées dans l'estuaire de Seine.

1.2.2.1.2 - Point caractéristique

A l'aval des longs estuaires, le niveau des basses mers est d'autant plus bas que la marée est forte, à l'amont, l'inverse se produit. Il existe ainsi un lieu géographique où les courbes de basses mers se coupent et où le niveau des basses mers est constant quel que soit le coefficient de marée. Ce lieu est appelé point caractéristique (Bonnetille, 1968). Guilcher, 1965, explique qu'en mortes-eaux, le niveau des basses mers est parallèle au lit du fleuve, ce qui correspond à un simple écoulement du débit fluvial, toute l'eau introduite par la marée ayant été évacuée au cours du jusant. En vives-eaux en revanche, le volume d'eau introduit par la marée est trop important pour être évacué durant le jusant, le niveau des basses mers s'élève donc vers l'amont.

L'accroissement du niveau des basses mers dans le secteur amont des estuaires en vives-eaux a notamment été observé sur l'estuaire de la Gironde (Allen et al., 1980, Castaing, 1981). Il se traduit par une augmentation du volume d'eau présent dans l'estuaire amont en période de revif et une diminution de ce volume en déchet. Allen et al., 1980, précisent que dans la Gironde le flux d'eau moyen pénétrant et sortant de l'estuaire à la faveur de ces variations de volume est de l'ordre de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, le débit fluvial étant lui de 100 à $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en étiage. Dans l'estuaire de la Severn, ce cycle engendrerait un courant résiduel pouvant atteindre $4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (Allen et al., 1980).

En Seine, Le Floch, 1961, rapporte qu'au début des années 50, le point caractéristique était localisé entre Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et Vatteville-la-Rue (pk 317,00) et qu'il était situé bien plus en l'aval

au XIX^{ème} siècle. Cette progression vers l'amont du point caractéristique est, selon cet auteur, à rapprocher des travaux d'aménagement réalisés depuis cette époque dans l'estuaire.

Salomon, 1988, montre, à l'aide d'un modèle numérique, qu'au cours des cycles semi-lunaires les phases de remplissage et de vidange des volumes d'eau stockés dans l'estuaire de Seine engendrent un flux d'eau spécifique supplémentaire de près de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

1.2.2.1.3 - Marnages

Lorsqu'une onde de marée océanique pénètre une zone dont les rives convergent, l'amplitude de l'onde initiale se trouve accrue. Inversement, lorsqu'une onde pénètre un secteur de frottements importants, l'onde de marée voit son amplitude décroître.

Dans les estuaires, la modification de l'amplitude de l'onde de marée est la résultante de ces deux phénomènes. Trois types d'estuaires peuvent être définis (Le Floch, 1961) :

- a – Convergence < frottement : l'amplitude de la marée décroît au cours de sa propagation dans l'estuaire ; celui-ci est dit hyposynchrone ;
- b – Convergence = frottement : l'amplitude de la marée est constante au cours d'une partie de sa propagation dans l'estuaire ; celui-ci est dit synchrone ;
- c – Convergence > frottement : l'amplitude de la marée croît au cours de sa propagation dans l'estuaire avant de décroître vers l'amont ; l'estuaire est dit hypersynchrone.

Au cours de sa progression dans l'estuaire amont de Seine l'onde de marée est amortie. Toutefois, Le Floch, 1961, précise que pour des marées de coefficients inférieurs à 45 un accroissement du marnage apparaît entre Mesnil-sous-Jumièges (pk 285,98) et Rouen (pk 243,70). Cet auteur montre, qu'entre 1850 et les années 1950, le marnage dans l'estuaire a considérablement augmenté du fait des aménagements.

Selon Germaneau, 1969, l'estuaire de Seine est synchrone, Salomon, 1988, précise qu'en fait l'estuaire est synchrone durant les mortes-eaux et hyposynchrone durant les vives-eaux.

1.2.2.1.4 - Ondes stationnaires

Si la réflexion de l'onde de marée sur les berges est importante, l'onde progressive peut se transformer en onde stationnaire et générer un accroissement local ou global du marnage (Salomon and Allen, 1983).

Pour Le Floch, 1961, la réflexion de l'onde de marée au niveau du barrage de Poses (pk 202,00) provoquerait une légère diminution de l'amplitude de l'onde de marée en aval de Rouen dans le secteur du Val-des-Leux (pk 265,55) en mortes-eaux et en étiage. Pour Salomon, 1988, le barrage de Poses (pk 202,00) provoque une réflexion de l'onde de marée qui contribue au maintien du marnage en aval immédiat du barrage.

1.2.2.1.5 - Variations des sections mouillées

Les variations du niveau des eaux avec la marée n'ont pas les mêmes conséquences suivant qu'elles se font sur des estrans très pentus ou peu pentus. L'augmentation des hauteurs d'eau sur les zones peu pentues provoque un accroissement non linéaire de la section mouillée. Cet accroissement se traduit par une diminution des vitesses de courants et un stockage d'eau important au niveau de ces zones.

I.2.2.2 - Influence du débit du fleuve sur le régime des marées

Selon Godin, 1985, le courant dans un cours d'eau ouvert sur l'océan est la somme d'une composante stable u_o générée par le débit fluvial et d'une composante dépendante du temps, liée à la marée $u_{(t)}$. Au sein des estuaires, trois régions peuvent ainsi être différenciées :

- a – La région la plus en aval, dans laquelle les courants sont alternatifs et où les courants de marée sont très supérieurs aux courants liés au débit fluvial $u_{(t)} \gg u_o$.
- b – La région la plus en amont, dans laquelle les courants ne sont plus alternatifs $u_o > u_{(t)}$.
- c – La région intermédiaire, dans laquelle les courants de marée $u_{(t)}$ et les courants liés aux débits fluviaux u_o ont la même puissance.

Avec l'augmentation des débits, la limite de propagation de la marée est déplacée vers l'aval. Dans la partie la plus en amont des estuaires fluviaux, le marnage est atténué, l'heure d'arrivée de la basse mer est avancée et l'heure d'arrivée de la pleine mer est retardée. Plus en aval, la basse mer est retardée et la pleine mer est avancée (Godin, 1985).

En Seine, durant les crues, le marnage subit un amortissement sur l'ensemble de l'estuaire. Toutefois, l'amont de Rouen apparaît plus sensible à ces variations de débits et pour des débits très importants l'inversion flot/jusant disparaît et les courants sont en permanence orientés vers l'aval. Laval, 1955, montre que lors d'une crue d'environ $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, les variations de hauteurs d'eau se font toujours sentir jusqu'à Rouen (pk 242,00). Toutefois, Cette variation de hauteurs d'eau ne s'accompagne pas d'une inversion des courants. Seule, une diminution de l'intensité des courants, toujours orientés vers l'aval, est mesurable lors de l'arrivée de l'onde de marée. Au cours de cette même étude, l'observation de la limite de renverse des courants montre une grande variabilité et paraît très dépendante du coefficient de marée. Ainsi, pour un coefficient de 92, la renverse des courants se situe 30 km en aval de Rouen ; pour un coefficient de marée plus faible et un débit quasi identique, elle ne se rencontre qu'à 67 km en aval de Rouen (Caudebec-en-Caux, pk 310,00).

Les variations de débits, même faibles ont des conséquences importantes sur les temps de résidence des masses d'eau dans l'estuaire. L'abaque en annexe II présente la durée moyenne de l'écoulement des masses d'eau dans l'estuaire amont en fonction du débit mesuré au barrage de Poses (pk 202,00), sans tenir compte des effets de marée. L'impact des variations des débits n'est pas linéaire sur tout l'estuaire et est beaucoup plus important en aval qu'en amont. Cette observation implique une diminution des temps de transit des masses d'eau et de la charge particulaire associée de l'amont de l'estuaire vers l'aval.

I.2.3 - Les sédiments fins

I.2.3.1 - Les apports intra-estuariens

Il n'existe aucun bilan des apports particuliers intra-estuarien, qu'ils soient anthropiques ou naturels. Ces apports sont cependant potentiellement importants. En rapportant le taux d'érosion annuel calculé au niveau du barrage de Poses, au bassin versant intra-estuarien, l'apport potentiel annuel est voisin de 100 000 t. Ces 100 000 t sont à comparer aux 600 000 à 700 000 t annuelles moyennes arrivant au niveau du barrage de Poses. Toutefois, les caractéristiques hydrologiques, hydrogéologiques et urbaines du bassin versant intra-estuarien sont différentes de celles du bassin amont de Poses.

Le trafic du Port Autonome de Rouen engendre un certain nombre d'apports de matériel particulaire à la Seine sans qu'il soit toutefois possible de les quantifier. Ainsi, le chargement et le déchargement des céréales entraînent le rejet dans l'atmosphère et dans l'eau d'importantes quantités de poussières. De même, le transfert et le stockage du charbon à terre génèrent des apports à la Seine.

I.2.3.2 - Les remontées de l'estuaire aval et le bouchon vaseux

Au cours de ses travaux sur le bouchon vaseux, localisé dans l'estuaire moyen, Avoine, 1981, ne retient pas les apports marins comme source significative du matériel composant le bouchon vaseux ; celui-ci serait majoritairement composé de matériel d'origine fluviale. Toutefois, Jeandel *et al.*, 1980, montrent la remontée de particules « marines » en suspension en amont de Tancarville (pk 338,00) à partir de la mesure de radio-isotopes artificiels. Dupont *et al.*, 1994, grâce à l'étude des populations de diatomées, soulignent une dominante des apports amont dans la constitution du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine mais confirment la remontée de particules d'origine marine jusqu'à la limite amont de l'intrusion saline.

Selon Dupont *et al.*, 1996, malgré les aménagements, la dynamique du bouchon vaseux est la même en 1995 qu'à la fin des années 1970. Avoine, 1981, situe le centre du bouchon vaseux aux environs du pk 360,00 à basse mer et 20 km en amont à pleine mer (pk 240,00) pour des périodes de vives-eaux et d'étiages. Avec l'accroissement des débits, le centre du bouchon vaseux est déplacé vers l'aval de l'estuaire et son extension est moins importante. L'existence de ce bouchon vaseux dont les concentrations moyennes sont de 1 g.l^{-1} (maximum de 10 g.l^{-1}) est liée à la dynamique de marée (Avoine, 1982) complétée par l'action des gradients de densité (Brenon, 1997).

En 1978, la quantité de matériel en suspension dans le bouchon vaseux variait au cours du cycle de marée entre 64 000 et 430 000 tonnes (Avoine, 1982). Ces 430 000 t peuvent être comparées aux 600 000 t à 700 000 t moyennes annuelles arrivant dans l'estuaire par le fleuve. Le renouvellement de la masse particulaire stockée dans le bouchon se fait à la faveur des crues et se déroule sur une très courte période (jusqu'à 200 000 tonnes en une dizaine de jours) (Avoine *et al.*, 1986).

Avoine *et al.*, 1996, montrent que certaines années, la limite amont du bouchon vaseux s'étend au-delà de la limite de salinité essentiellement du fait des faibles débits fluviaux. La Figure 15 présente la distribution des concentrations pondérales de MES moyennes à l'étales de basse mer et à mi-profondeur. Cette distribution permet de localiser le bouchon vaseux mais montre aussi que sa limite n'est pas nette en amont au regard des variations de concentrations pondérales de MES.

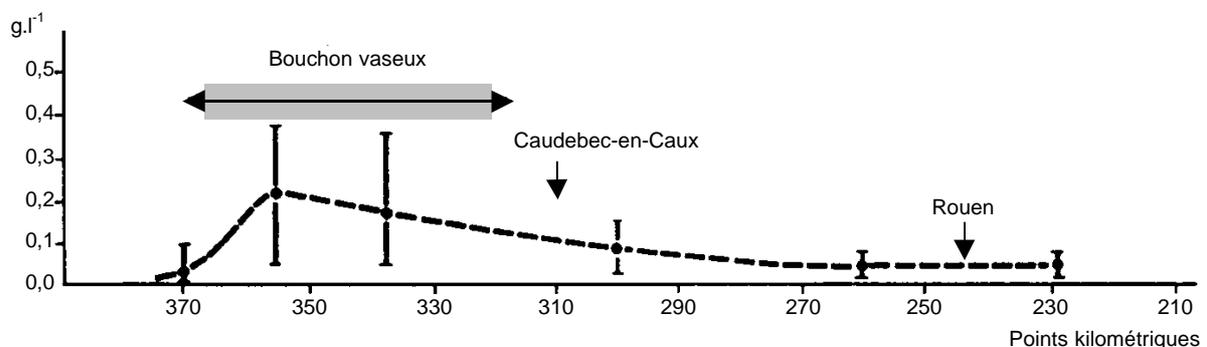


Figure 15 : Distribution des concentrations pondérales de MES moyennes à l'étales de basse mer et à mi-profondeur en 1976 et 1977 (Avoine *et al.*, 1981).

I.2.3.3 - Les connaissances hydrosédimentaires dans l'estuaire amont

Peu de travaux se sont attachés à déterminer les relations hydrodynamique/matériel particulaire en suspension dans l'estuaire amont de la Seine.

Germaneau, 1969, publie une étude sur les relations entre les turbidités, entendues au sens de concentrations pondérales de MES, les chlorinités et la marée en plusieurs sites de l'estuaire de Seine réalisée entre 1962 et 1963. Trois sites sont situés dans l'estuaire amont : le premier est localisé au pk 318,00 en aval de Caudebec-en-Caux, le second est localisé au niveau du marégraphe de Caudebec-en-Caux (pk 310,00), le troisième se situe à Rouen (pk 243,00).

Pour l'auteur, le pk 318,00 correspond à la limite au-delà de laquelle les eaux sont toujours douces, ce qui est confirmé par Avoine, 1981. Sur ce site l'auteur montre l'existence d'un gradient de turbidité surface/fond et des variations des turbidités avec la marée. Ces variations sont plus importantes en vives-eaux qu'en mortes-eaux. La comparaison des concentrations entre flot et jusant et vives-eaux et mortes-eaux suggère à Germaneau, 1969, que la nature des suspensions est différente entre mortes-eaux et vives-eaux et que « *le matériel le plus grossier se déplace vers l'amont alors que le plus fin, qui ne peut se déposer, se déplace vers l'aval* ».

Sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) les mêmes variations semi-diurnes des turbidités ont été observées. Sur ce site, un accroissement des turbidités avec les coefficients de marée a pu être montré en étiage. Pour des débits plus élevés, plusieurs cas de figures ont été rencontrés. En cas de faible variation de débit, les turbidités augmentent avec le débit et l'effet des variations de marée est conservé tout en étant moins net que durant l'étiage. Lors de brusques variations de débits les turbidités diminuent rapidement et les variations liées à la marée sont moins marquées.

Sur le site de Rouen (pk 243,00), aucune variation de la turbidité avec la marée n'a pu être décelée au cours de l'unique campagne menée par coefficients de 92-98 et débit fluvial de $225 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De cette observation, l'auteur conclut que la limite d'action du flot sur le fond se situe entre Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et Rouen (pk 243,00) et plus probablement entre Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et Heurteville (pk 297,65) ou Duclair (278,00).

Depuis 1956, le Service de Navigation de la Seine suit la qualité des eaux de l'estuaire au travers de 22 stations. Sur ces 22 stations, 17 sont situées dans l'estuaire amont. Les prélèvements ont lieu tous les 2 mois pour l'ensemble de ces stations et se déroulent sur 2 jours. La première journée consiste en une remontée de l'estuaire depuis Honfleur (pk 235,86) jusque Rouen (pk 243,00) en bateau. La campagne se déroule en vives-eaux et débute avant la basse mer pour finir à la pleine mer à Rouen. Elle se poursuit le lendemain entre Rouen (pk 243,00) et le barrage de Poses (pk 202,00). Une fois par mois, 5 des 22 stations sont échantillonnées, dont 3 dans l'estuaire amont.

Dupont, 1997, propose une analyse des mesures de matériel particulaire en suspension réalisées dans le cadre de ce suivi entre 1970 et 1995 (Figure 16).

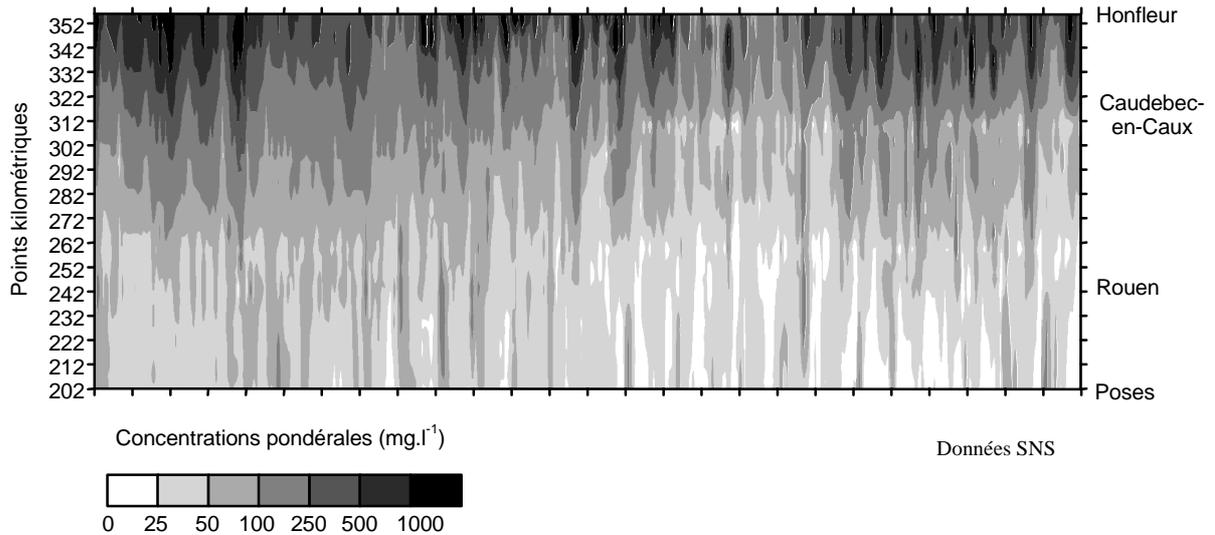


Figure 16 : Concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension dans l'estuaire de la Seine entre 1970 et 1995 (Dupont, 1997).

Selon Dupont, 1997, cette chronique illustre l'opposition entre les faibles concentrations pondérales de matériel en suspension dans l'estuaire fluvial et les concentrations élevées du secteur soumis à l'intrusion saline, siège du bouchon vaseux. Des fluctuations saisonnières de ces concentrations pondérales particulières apparaissent. Sur long terme, deux observations supplémentaires peuvent être faites :

- 1 – Il apparaît en outre une diminution générale des concentrations pondérales depuis la fin des années 70 qui pourrait être liée aux travaux de dragage du Port Autonome de Rouen (PAR), à une diminution des apports particuliers par suite des aménagements du bassin amont et d'une réduction des apports urbains ;
- 2 – Une fluctuation de l'importance du bouchon vaseux qui pourrait suivre les chroniques climatiques pluriannuelles.

Chapitre II

Stratégies d'étude

II.1 - Stratégie d'échantillonnage

Les travaux antérieurs, réalisés sur la Seine et sur son estuaire, laissent entrevoir une forte dépendance entre le transport et les flux de matériel particulaire et :

- a – Les cycles saisonniers crue/étiage (Avoine, 1985, Meybeck and Idlafkih, 1995, Cossa *et al.*, 1994).
- b – Les cycles de marée semi-diurnes, semi-lunaires et lunaires (Guézennec, 1994, Guézennec *et al.*, 1996).

Ces premières observations ont conduit à la définition d'une stratégie consistant à :

- a – Développer les enregistrements en continu de la turbidité de façon à replacer les campagnes d'échantillonnage ponctuel et sur les cycles de marée, dans une chronique à long terme.
- b – Déterminer la représentativité du point de mesure dans la colonne d'eau et au sein d'une section transversale du chenal de la Seine, afin de pouvoir dresser des bilans du transport particulaire à l'échelle de ces sections.

En complément de ces campagnes menées sur la colonne d'eau, des campagnes de prélèvements de sédiments ont été réalisées afin de dresser une cartographie de la couverture sédimentaire de l'estuaire amont de la Seine.

II.1.1 - Couverture sédimentaire

Des campagnes de reconnaissance de la couverture sédimentaire immergée ont été développées dans l'estuaire amont de la Seine en collaboration avec le Laboratoire de Géologie Marine de l'Université de Caen et l'IFREMER (DEL/EC-Brest). Ces campagnes permettent de décrire l'organisation des grandes structures sédimentaires dans l'estuaire amont et d'identifier les zones de dépôts de matériel particulaire fin susceptibles de fournir du matériel à la colonne d'eau.

Parallèlement à ces campagnes de reconnaissance de la couverture sédimentaire à l'échelle de l'estuaire, une vasière exondable située en amont de Rouen, a fait l'objet d'un suivi annuel afin d'en déterminer la dynamique sédimentaire saisonnière.

II.1.1.1 - Couverture sédimentaire immergée

Le département de géologie de l'université de Rouen a réalisé la couverture sédimentaire entre Rouen (pk 242,90) et le barrage de Poses (pk 202,00) en fin d'étiage (septembre 1996) et en période de post-crue (mai 1997). Les prélèvements de sédiments ont été réalisés à partir d'une embarcation du Service de Navigation de la Seine de Rouen à l'aide de deux bennes de prélèvement Ekman-Birge lestées (voir les résultats en annexe III-a).

Le département de géologie marine de l'université de Caen et l'IFREMER (DEL/EC-Brest) ont réalisé la couverture sédimentaire de l'estuaire en aval de Rouen. Ce travail a été mené à l'aide d'un sonar à balayage latéral entre le 02/12/96 et le 06/12/96 en mortes-eaux. Les enregistrements obtenus ont été calés à partir de prélèvements de sédiments superficiels (voir résultats en annexe III-b).

La couverture sédimentaire estuarienne ainsi réalisée met en évidence la rareté des faciès vaseux dans l'estuaire amont. Ceux-ci sont localisés essentiellement dans le secteur des îles en amont de Rouen (pk 221,50 – pk 235,50), dans la zone portuaire de l'agglomération rouennaise et dans quelques zones généralement peu étendues telles les hauts de berge, les rives convexes de méandres. Quelques vasières ont pu être identifiées en amont de Rouen dans le secteur des îles (pk 221,50 – pk 235,50) et en aval de Rouen au niveau du Trait (pk 300,00) et de Vieux-Port (pk 324,00) (annexe III-c). Une des vasières identifiées en amont de Rouen a été choisie comme site atelier pour le suivi de la dynamique saisonnière des dépôts fins sur ces sites.

II.1.1.2 - Suivi d'une radiale sur une zone exondable

Ce site atelier, facilement accessible à basse mer, permet de réaliser des prélèvements du matériel particulaire déposé au niveau de stations parfaitement identifiées.

La vasière intertidale étudiée est localisée en rive gauche, à Oissel (pk 229,50), en amont de Rouen, dans le secteur des îles. Sa superficie est d'environ 9 500 m². Elle repose sur une ancienne plage de tufs. Située dans une zone d'élargissement du chenal principal de la Seine, la formation de la vasière remonte aux années 1981-1982 à la suite de travaux d'aménagements réalisés juste en amont. La vasière est apparue dans une zone abritée des courants amont/aval (Figure 3 et Figure 17-a).

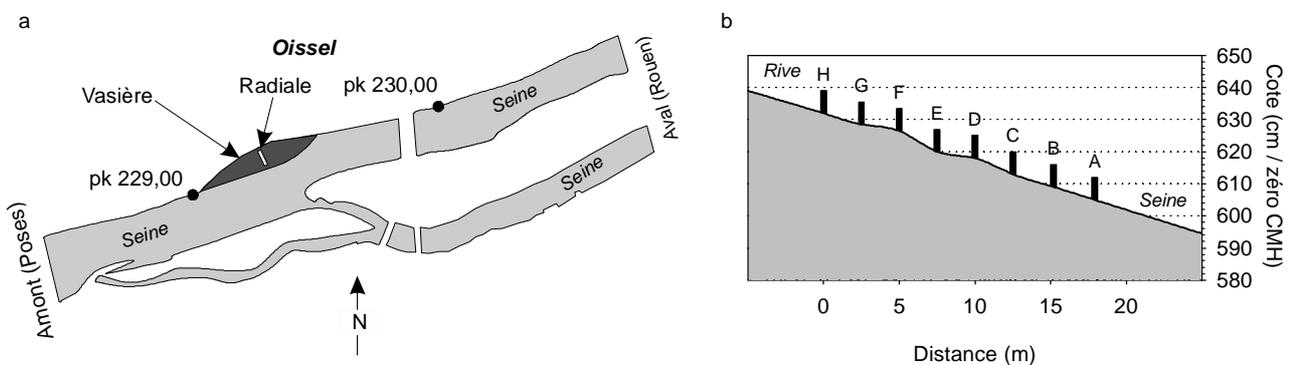


Figure 17 : (a) Localisation actuelle de la vasière de Oissel. (b) Localisation des stations de mesures et de prélèvements le long de la radiale.

Le suivi de la topographie de la vasière a couvert une année hydrologique complète. Il a débuté le 11/04/97, soit 40 jours après le maximum de débits de la seconde de crue de l'hiver 1996-1997 ; le dernier relevé a été effectué le 10/03/98 soit 47 jours après le maximum de la crue hivernale 1997-1998. Ce travail a été réalisé pour partie dans le cadre du stage de DEA d'Isabelle Grün (Grün, 1997). Le suivi topographique consiste à mesurer les côtes de la vasière au niveau de 8 stations espacées de 2,30 m et réparties suivant une radiale berge/chenal (Figure 17-b). La station A est la plus proche du chenal, la station H est la plus proche de la rive. Parallèlement à ces suivis topographiques, des prélèvements de sédiment superficiel ont été réalisés afin de suivre l'évolution de la texture de ces sédiments durant une année hydrologique. Des prélèvements complémentaires ont été effectués dans la colonne d'eau durant la crue afin d'examiner les échanges entre l'eau et les dépôts.

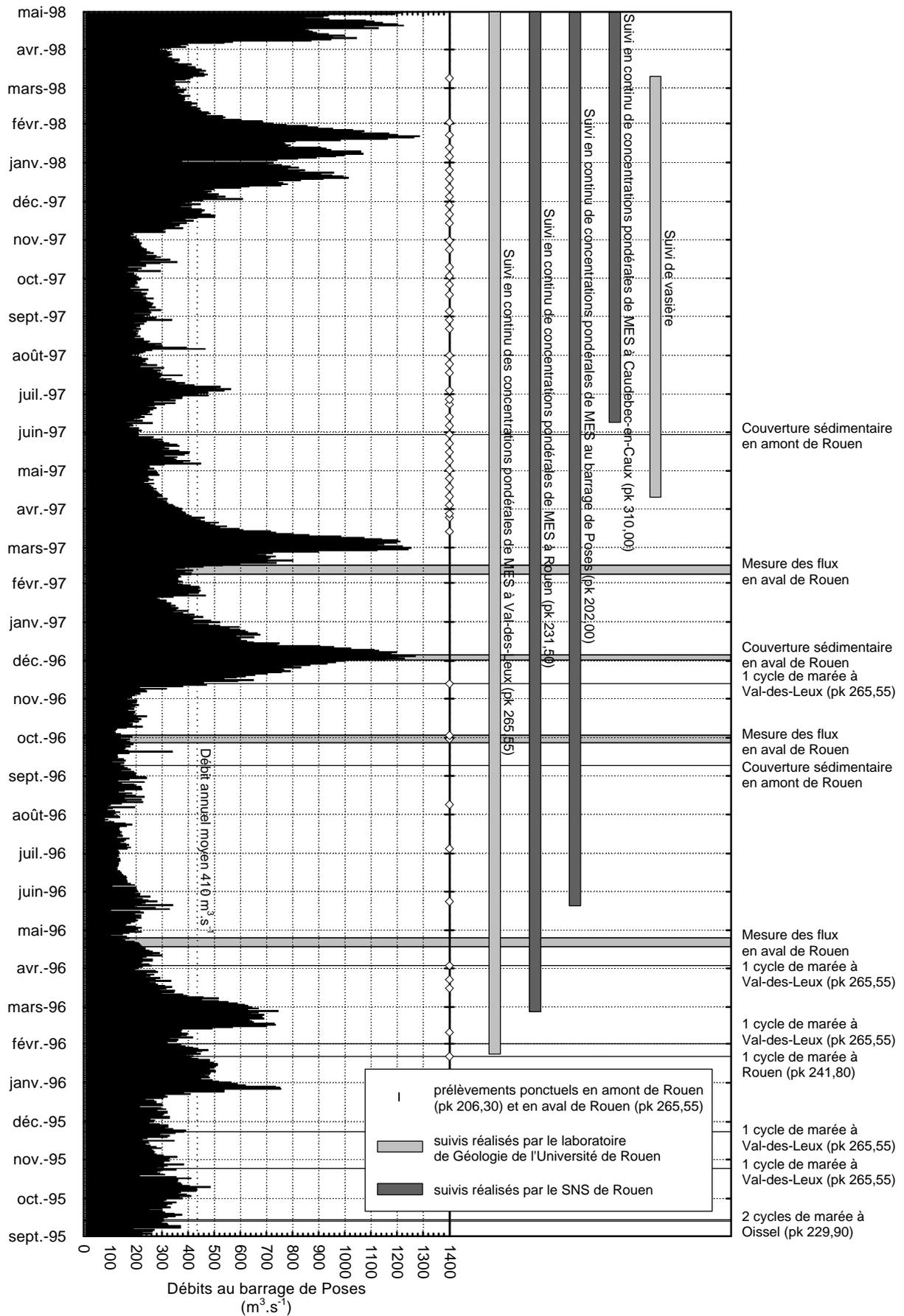


Figure 18 : Synoptique des campagnes de mesures et des débits journaliers de la Seine au barrage de Poses (pk 202,00) entre le 01/09/1995 et le 01/05/98.

II.1.2 - Mesures dans la colonne d'eau

La détermination de l'importance respective des débits fluviaux et des marées sur les transferts sédimentaires dans l'estuaire amont nécessite la mise en place d'une stratégie adaptée à la diversité des échelles temporelles de ces deux phénomènes.

D'autre part, l'étendue géographique de l'estuaire amont a nécessité de choisir des sites d'études capables de rendre compte des éventuels impacts de la morphologie estuarienne sur les transferts particuliers.

Les campagnes de mesures élaborées à partir de ces impératifs temporels et spatiaux et menées au cours de ces trois années d'études sont résumées sur la Figure 18.

II.1.2.1 - Mesures ponctuelles

Ces mesures sont réalisées durant toute l'année afin de pouvoir suivre les éventuelles différences dans les concentrations ou dans la nature du matériel particulaire fin en suspension entre l'aval immédiat du barrage de Poses et l'aval de l'agglomération rouennaise.

Les points de mesures ponctuelles sont au nombre de deux. Ils sont localisés :

- a – En aval du barrage de Poses (pk 206,30), en rive droite.
- b – En aval de Rouen (Val-des-Leux – pk 265,55), en rive gauche à partir du marégraphe du Port Autonome de Rouen.

Ces mesures ponctuelles ont été réalisées occasionnellement en 1995 et 1996 et à la fréquence moyenne d'un prélèvement tous les 10 jours entre le 14/03/97 et le 09/03/98. Les deux sites ont été prélevés le même jour. Le site du Val-des-Leux (pk 265,55) est prélevé en premier, le site en amont de Rouen (pk 206,30) est prélevé 60 minutes après. Ces prélèvements sont réalisés aléatoirement par rapport aux heures de marée.

Au laboratoire, ces échantillons sont analysés afin d'en déterminer la concentration pondérale en MES et la microgranulométrie. Une observation au microscope électronique à balayage vient compléter ces analyses. La vitesse de chute des populations particulières en suspension de certains de ces échantillons est mesurée.

II.1.2.2 - Mesures durant les cycles semi-diurnes de marée

Des campagnes de suivis des turbidités, des concentrations pondérales de MES et des vitesses de courants en point fixe, permettent de déterminer et d'interpréter les variations à petite échelle de temps (échelle semi-diurne) de ces différents paramètres.

Sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55), six campagnes de mesures en point fixe ont été menées, les 25/10/95, 23/11/95, 22/01/96, 03/04/96 et 13/11/96. Ces campagnes sont réalisées à une quinzaine de mètres de la rive gauche à partir d'un ponton supportant un marégraphe du Port Autonome de Rouen.

Une campagne supplémentaire s'est déroulée le 01/02/96 à l'Ile Lacroix (pk 241,80) à partir du ponton du SNS Rouen.

Les données recueillies au cours de ces campagnes sont :

- a – Les vitesses de courants mesurées à 1 m du fond à l'aide d'un courantomètre à hélice de marque Valeport.
- b – Des prélèvements d'eau à plusieurs profondeurs (1 m sous la surface, 5 cm, 30 cm et 100 cm au dessus du fond), réalisés par pompage. Au laboratoire ces prélèvements d'eau sont analysés afin d'en déterminer les concentrations pondérales de MES. La microgranulométrie du matériel en suspension est mesurée sur certains échantillons.
- c – La turbidité à 1 m ou à 30 cm au-dessus du fond afin de suivre les remises en suspensions.

II.1.2.3 - Mesures en continu

Les mesures en continu des concentrations pondérales de MES sont réalisées par l'intermédiaire de sondes de mesure de la turbidité à l'échelle de l'estuaire amont dans sa globalité. Elles permettent, après calage en concentrations pondérales de MES, un suivi sur le long terme des évolutions de ces concentrations pondérales. Les sites de mesure sont localisés :

- a – En amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00), c'est à dire en amont de l'extrémité du système estuarien. Ce site est équipé depuis le 21/05/96 et est suivi par le SNS de Rouen.
- b – Sur l'île Lacroix (pk 241,80), en aval de la zone des îles et en entrée de l'agglomération rouennaise. Ce site est équipé depuis le 27/02/96 et est suivi par le SNS de Rouen.
- c – Sur le ponton marégraphique du Val-des-Leux (pk 265,55), en aval de l'agglomération Rouennaise. Ce site est équipé depuis le 24/01/96 et est suivi par le Département de Géologie de l'Université de Rouen.
- d – A Caudebec-en-Caux (pk 310,00), c'est-à-dire à proximité de la limite aval de l'estuaire amont. Ce site est équipé depuis le 09/06/97 et est suivi par le SNS de Rouen.

II.1.2.4 - Mesures des hétérogénéités spatiales et des flux sur les sections transversales.

Afin de quantifier les hétérogénéités spatiales des concentrations pondérales de MES et des vitesses de courants et afin de pouvoir en déterminer les conséquences sur les flux de particules transitant au cours d'un cycle de marée au travers des sections de Seine, trois campagnes de mesures ont été réalisées sur des sections transversales de Seine.

Trois sites ont été choisis en raison de leur proximité et de leur représentativité morphologique de la partie endiguée de l'estuaire (positionnement en méandre pour la section de La Bouille et de Moulineaux et positionnement en segment rectiligne pour le Val-des-Leux).

Une première campagne s'est déroulée entre le 18 et le 25 avril 1996, une deuxième campagne s'est déroulée entre le 27 septembre et le 04 octobre 1996 et une troisième campagne entre le 08 et le 15 février 1997. Ces trois campagnes ont été réalisées en étiage au cours de marées de revif et de déchet.

Au cours de chacune de ces campagnes les trois sites étudiés sont :

- a – Le Val-des-Leux au niveau du pk 265,55.
- b – La Bouille au niveau du pk 260,00.
- c – Moulineaux au niveau du pk 258,50.

Sur chacun des sites les concentrations pondérales en MES ont été mesurées sur la colonne d'eau par prélèvements (1 m sous la surface, milieu, 1 m au-dessus du fond) et à l'aide de mesures de turbidités réalisées grâce à une CTD (1 mesure par seconde).

Parallèlement aux mesures de concentrations pondérales de MES, les vitesses de courants ont été mesurées sur la colonne d'eau à l'aide d'un courantomètre profileur à effet Doppler de marque Sontek (une mesure tous les 50 cm). Les spectres microgranulométriques de quelques échantillons ont été réalisés au laboratoire.

Ces mesures ont été réalisées en 4 stations le long d'une section transversale de Seine. Une section de Seine se trouve ainsi divisée en quatre boîtes, de largeur égale au quart de la section totale et de hauteur définie selon la côte moyenne du fond et selon la hauteur d'eau. Ce dernier paramètre est variable dans le temps. La Figure 19 présente les sections de Seine définies pour chacun des trois sites étudiés.

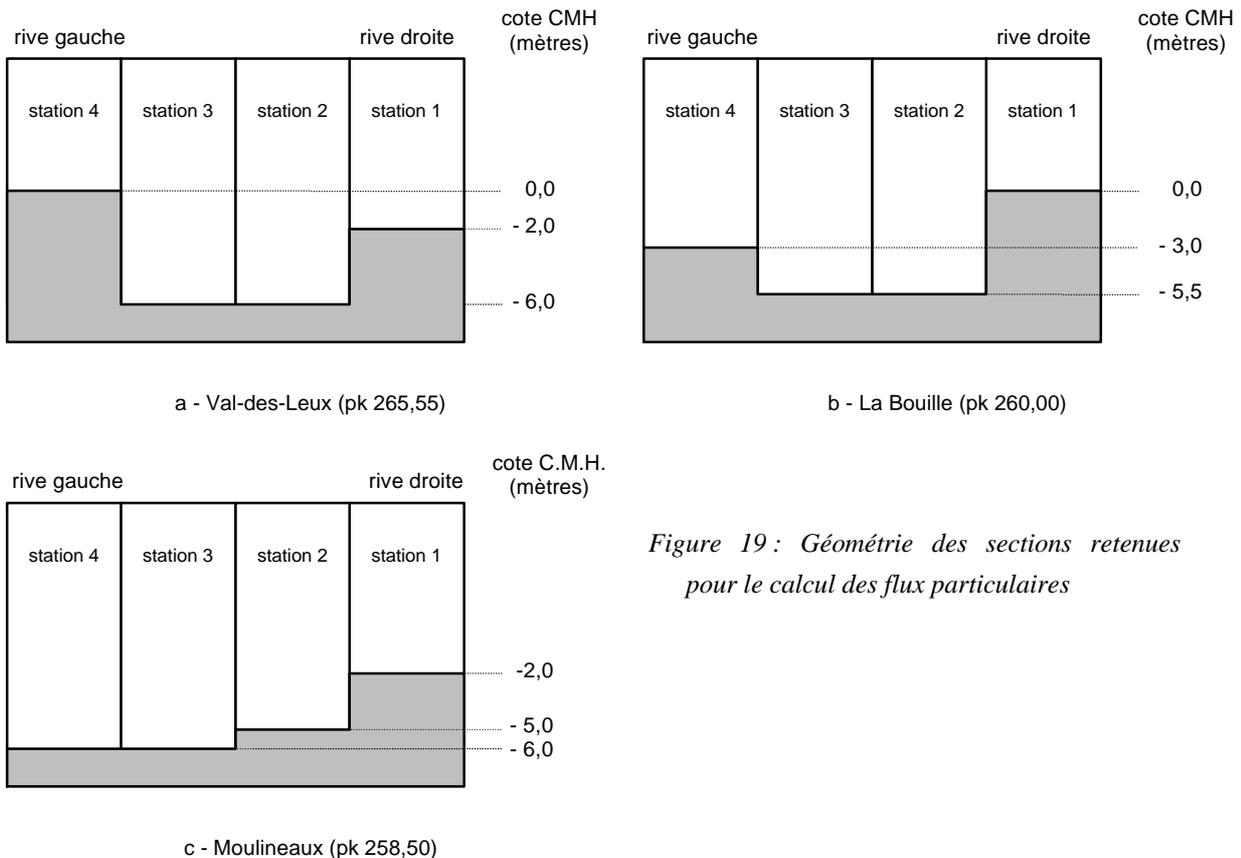


Figure 19 : Géométrie des sections retenues pour le calcul des flux particuliers

Ces quatre stations sont mesurées à 7 reprises au cours du cycle semi-diurne de marée à des moments clefs définis selon les variations de courants mesurées à partir des campagnes réalisées en point fixe.

L'impossibilité matérielle d'effectuer les mesures simultanément sur les 4 stations provoque un décalage de 5 à 10 minutes entre deux stations de la même section. Les horaires moyens de prélèvements, pour une section, exprimés en minutes par rapport à la basse mer locale, sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Horaires moyens, en minutes par rapport à la basse mer locale, des échantillonnages et des mesures de profils de vitesses de courants et de turbidité durant les radiales.

<i>jusant</i>	<i>flot</i>		<i>étale de pleine mer</i>	<i>jusant</i>		
-20	+60	+180	+360	+400	+530	+640

II.2 - Techniques d'étude

II.2.1 - Quantification du matériel particulaire en suspension

II.2.1.1 - Détermination des concentrations pondérales de MES

Les échantillons d'eau de Seine sont filtrés sur des filtres d'acétate de cellulose de diamètre de pores de 0,45 µm. Ces filtres sont prépesés et conservés au dessiccateur. Après filtration les filtres sont séchés à l'étuve durant 24 h à 45 °C. Avant d'être repesés, ils sont conservés dans un dessiccateur durant 30 minutes afin de retrouver la température ambiante sans subir de réhydratation.

Cette seconde pesée permet de déterminer le différentiel de masse entre le filtre sans MES et avec MES. Ce différentiel correspond à la masse de MES retenue sur le filtre. Cette masse est rapportée au volume d'eau filtré.

Les concentrations pondérales de MES sont exprimées en milligrammes de matériel particulaire en suspension par litre d'eau filtré (mg.l⁻¹).

II.2.1.2 - Mesures de la turbidité

II.2.1.2.1 - Points fixes

L'étude et la quantification des mécanismes d'érosion et de sédimentation des particules sont réalisées au travers du suivi des concentrations pondérales du matériel particulaire en suspension au cours d'un cycle semi-diurne de marée. Ce suivi est réalisé à l'aide de sonde de turbidité de type OBS et Endress-Hauser CUS-1. Le Tableau 5 présente les principales caractéristiques des sondes de mesures de turbidités utilisées au cours de ces trois ans de travail.

Tableau 5 : principales caractéristiques des sondes de mesure de turbidité d'après les données des constructeurs.

	<i>Gamme maximale</i>	<i>Principe optique</i>	<i>Longueur d'onde</i>	<i>Précision</i>
OBS-3	0,02-2 000 FTU	Rétrodiffusion	Infra-Rouge	0,2 %
Endress-Hauser CUS-1w	0-4 000 NTU	Diffusion 90 °	880 nm	1 %
YSI 6000	0-1 000 NTU	Diffusion 90 °	880 nm	+/- 5 % mesure ou 2 NTU (la plus grande des deux)
Sea Tech Light Scattering Sensor	0-3 g.l ⁻¹ MES	Rétrodiffusion	880 nm	
Transmissomètre		Transmission	visible	

II.2.1.2.2 - Suivis en continu

Les variations annuelles des conditions hydrologiques et leurs impacts sur les concentrations pondérales de MES sont suivis sur le long terme (plusieurs saisons).

Sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) les mesures sont réalisées à un mètre du fond à l'aide d'une sonde de turbidité CUS-1 de marque Endress-Hausser. La sonde est équipée d'un dispositif d'autonettoyage quotidien. Les mesures sont réalisées toutes les 5 minutes par intégration des variations de turbidité sur les 10 secondes précédentes.

Toutes les semaines, un nettoyage et une vérification de l'étalonnage sont réalisés *in situ*. L'échantillon d'eau de Seine ayant servi pour le contrôle de l'étalonnage est rapporté au laboratoire pour détermination de sa concentration pondérale en MES, pour observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et pour détermination de son spectre microgranulométrique.

La Cellule de Lutte contre la Pollution de la Seine (Service de Navigation de la Seine) a implanté sur 3 sites des sondes multiparamètres de mesure en continu (YSI 6000), équipées de turbidimètres munis d'un dispositif d'autonettoyage quotidien.

Ces trois sondes mesurent la turbidité instantanée toutes les 15 minutes. Un entretien et une vérification de leur étalonnage sont réalisés par le SNS, au laboratoire, tous les 15 jours environs.

II.2.1.2.3 - Profils verticaux au cours des campagnes réalisées sur les sections

Les profils verticaux de turbidité durant les campagnes de mesure sur les sections ont été réalisés à l'aide d'une sonde CTD de type Seabird équipée d'un transmissomètre durant la campagne d'avril 1996 et à l'aide d'une sonde CTD de marque Ocean System équipé d'un turbidimètre de marque Seapoint.

Les profils de turbidités ont été réalisés à la fréquence d'une mesure par seconde. Ces profils s'arrêtent à 50 cm du fond.

II.2.1.3 - Relations MES/Turbidité

La mesure de la turbidité et la prise synchrone d'échantillon d'eau, permettent la réalisation d'un calage entre concentrations pondérales de MES et turbidité. La Figure 20 présente deux exemples de calage MES/turbidité.

Le premier exemple (Figure 20-a) est un calage réalisé pour la sonde Endress-Hausser utilisée pour le suivi en continu de la turbidité sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55). La relation MES/turbidité obtenue est de bonne qualité et s'explique par le fait que les échantillons d'eau de Seine utilisés pour la détermination *in situ* de la turbidité, sont les mêmes que ceux rapportés au laboratoire en vue de la détermination de la concentration pondérale de MES.

Le second exemple (Figure 20-b) est un calage réalisé pour le turbidimètre de la CTD au cours des campagnes de mesures de l'hétérogénéité spatiale des concentrations en février 1997. La relation MES/turbidité obtenue est de moins bonne qualité. Les échantillons d'eau de Seine utilisés pour la détermination *in situ* de la turbidité sont prélevés avec un retard de quelques minutes par rapport à la mesure de turbidité effectuée par la sonde et ne correspondent donc pas exactement avec ces mesures.

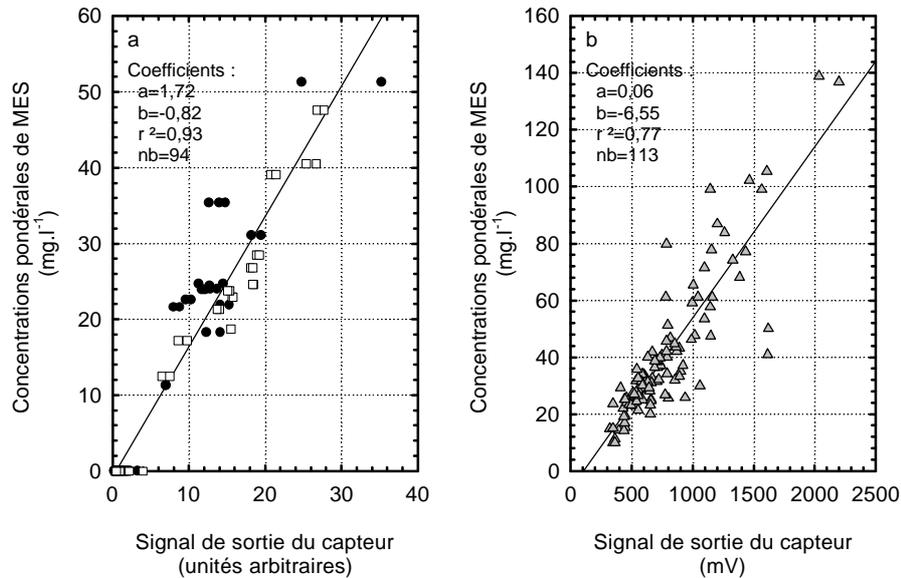


Figure 20 : Relations concentrations pondérales de MES/Turbidités. (a) Durant le suivi en continu des turbidités sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) entre le 28/03/97 et le 03/10/97 avec ● échantillons présentant d'importantes quantités de diatomées en suspension et □ échantillons présentant de faibles quantités de diatomées en suspension (voir page 73). (b) Au cours de la campagne de mesure des flux de février 1997.

Le calage MES/turbidité dépend, à la fois, du type d'appareil de mesure de la turbidité utilisé ainsi que de la nature et de la taille des particules en suspension. Les travaux de Guézennec, 1994, portant sur l'étude de trois sondes de turbidité montrent, en effet, que suivant leurs principes optiques, des sondes de turbidité calibrées avec une même solution de formazine (Figure 21) ne donnent pas une valeur de turbidité identique pour une même suspension de matériel particulaire (Figure 21-b).

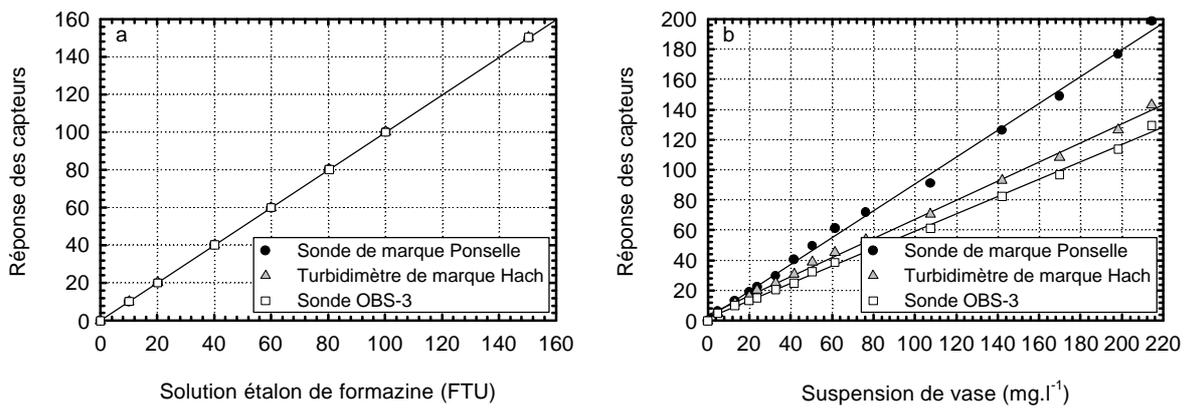


Figure 21 : (a) Calibration de trois turbidimètres à l'aide d'une solution de formazine (FTU = Formazine Turbidity Unit). (b) Réponse des trois turbidimètres ainsi calibrés à une suspension de vases de Seine (échantillon du 21/10/92) (Guézennec, 1994, modifié).

Dans le cadre d'un suivi des concentrations pondérales de MES en milieu naturel à l'aide de sondes de mesures de turbidité présentant des principes optiques différents une inter-calibration des sondes par l'intermédiaire de la formazine s'avère donc inutile. Dans ce document, les mesures réalisées à l'aide des

sondes de turbidité seront systématiquement exprimées en concentrations pondérales de MES correspondantes.

Durant l'année, la nature du matériel particulaire en suspension varie (voir page 73) avec notamment la présence en suspension de quantités importantes de diatomées. Cette présence de matériel planctonique en suspension est de nature à modifier sensiblement le rapport MES/turbidité. Sur la Figure 20-a sont représentés les échantillons d'eau présentant d'importantes quantités de diatomées en suspension (•) et ceux n'en présentant que de faibles quantités (□).

Si pour des concentrations pondérales de MES mesurées comprises entre 20 et 30 mg.l⁻¹, la réponse du capteur de turbidité apparaît amplifiée par la présence d'une plus grande proportion de matériel planctonique en suspension, pour les autres valeurs de concentrations pondérales de MES, la tendance n'est pas claire. Le nombre insuffisant de prélèvements présentant un grand nombre de diatomées pour des concentrations pondérales différentes de 20 à 30 mg.l⁻¹ ne permet pas de conclure définitivement quant à l'influence du phytoplancton sur la mesure de la turbidité des eaux dans l'estuaire avec le capteur utilisé.

Sur le site du barrage de Poses (pk 202,00) le problème de l'influence planctonique se pose de manière plus aiguë. Des variations diurnes du signal de turbidité apparaissent suite à des migrations planctoniques verticale (voir page 63).

Ces variations diurnes du signal de turbidité sont-elles dues à un simple phénomène optique, lié à la modification qualitative d'une faible partie du matériel particulaire en suspension sans modification notable de la masse de matériel particulaire en suspension, ou traduisent-elles une réelle modification de la charge du matériel particulaire en suspension dans la masse d'eau mesurée ?

Les investigations que nous avons menées sur la sonde de marque Endress-Hauser, utilisées dans l'estuaire amont sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55), ne nous permettent pas de trancher. Il a en effet été impossible de mettre en évidence une nette différence de réponse du capteur lors de développements importants de diatomées dans la masse d'eau.

Cette conclusion ne peut être transposée à la sonde de type YSI 6000 située en amont du barrage de Poses (pk 202,00), les principes optiques de ces deux appareils étant différents et les populations de diatomées ou de tout autre organisme planctonique se développant en amont du barrage de Poses sont potentiellement différentes de celles se développant dans l'estuaire amont.

Une étude spécifique de ce phénomène de migration diurne doit être menée afin d'en vérifier l'impact sur la mesure de turbidité et sur le calcul des concentrations pondérales de MES. Parallèlement aux mesures en continu de turbidité, une campagne de prélèvements d'échantillons d'eau durant 24 heures doit être envisagée afin de mesurer l'évolution des quantités de matériel particulaire en suspension et d'identifier les populations planctoniques impliquées dans ces migrations. Une reproduction de ces campagnes en plusieurs périodes au cours de l'étiage doit être envisagée afin d'intégrer les successions saisonnières de populations planctoniques.

II.2.2 - Caractérisation des matériaux

La quantification du matériel particulaire en suspension, réalisée à l'aide des méthodes présentées dans le paragraphe précédent, permet une approche globale des concentrations de MES. La caractérisation des matériaux permet d'aborder les critères de taille, de forme et de nature du matériel particulaire en suspension.

II.2.2.1 - Analyse des sédiments

La fraction fine a été séparée par lavage sur tamis de maille réelle de 40 μm . Elle a ensuite été analysée au compteur de particules de type Coulter pour pouvoir être comparée aux mesures réalisées sur les matières en suspension. Les résultats sont exprimés en % du volume particulaire total (voir II.2.2.2).

Cette application est confortée par la bonne correspondance entre la coupure granulométrique imposée par le tamisage et les résultats obtenus par le compteur de particules sur la fraction inférieure à la maille choisie (ici 40 μm) (Figure 22).

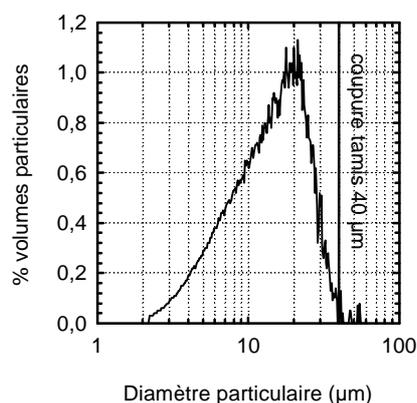


Figure 22 : Exemple de spectre microgranulométrique obtenu sur la fraction inférieure à 40 μm des sédiments déposés sur la vase de Oissel (station C, le 11 avril 1997).

Les fractions sableuses ont été traitées sur une colonne de tamis (toile métallique de maille carrée) de norme AFNOR et les fractions de taille supérieure à 2 mm ont été séparées sur passoirs (tôle perforée par des trous circulaires).

Les données granulométriques obtenues sont exprimées soit en pourcentages des 6 principales classes de taille (Tableau 6), soit sous forme de courbes des pourcentages cumulés depuis les fractions grossières jusqu'aux fractions fines intégrant les données de microgranulométries acquises sur la fraction fine avec les données de tamisage des fractions grossières.

Tableau 6 : Principales classes de taille retenues dans la classification des sédiments superficiels en estuaire de Seine.

<i>Qualification des classes de taille</i>	<i>Définition granulométrique des classes de taille</i>
<i>silts</i>	$< 50 \mu\text{m}$
<i>sables fins</i>	$50 < x < 200 \mu\text{m}$
<i>sables moyens</i>	$200 < x < 500 \mu\text{m}$
<i>sables grossiers</i>	$500 \mu\text{m} < x < 2 \text{ mm}$
<i>graviers</i>	$2 \text{ mm} < x < 2 \text{ cm}$
<i>cailloutis</i>	$> 2 \text{ cm}$

II.2.2.2 - Microgranulométries – Compteur de particules

Après homogénéisation, les échantillons d'eau de Seine sont préalablement filtrés sur un tamis de maille 100 μm . Ne sont ainsi analysés que les flocons d'ordre 1 (Krone, 1963, in Eisma, 1986). Les flocons d'ordres supérieurs, instables du fait des turbulences mais aussi de l'échantillonnage, ainsi que les autres gros éléments flottants ou en suspension ne peuvent être mesurés par cette technique. La salinité du filtrat est ajustée à 5 ‰ afin de rendre ces échantillons conducteurs.

Les spectres granulométriques des échantillons ainsi traités sont mesurés à l'aide d'un Coulter Counter 256 canaux et équipé d'une sonde de 100 μm . Ceci permet la mesure des particules ayant un diamètre équivalent sphérique compris entre 1,93 et 61,89 μm . Le découpage de cet intervalle en 256 canaux est réalisé de façon logarithmique, ce qui implique une discrimination plus importante dans les petites tailles que dans les grandes.

Chaque comptage est réalisé durant 200 s.

Les résultats de ces comptages (=spectres microgranulométriques) peuvent prendre plusieurs formes suivant les informations recherchées.

Dans le cadre d'une étude qualitative et quantitative du matériel particulaire en suspension, les résultats, sont exprimés sous forme d'une concentration volumique ; le volume total des particules d'une classe de taille donnée est exprimé par rapport au volume total de l'échantillon (eau + particules). Cette concentration volumique s'exprime en $\mu\text{m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$ (Figure 23-a).

La différence entre deux spectres microgranulométriques exprimés en concentrations volumiques permet l'établissement d'un spectre microgranulométrique différentiel exprimant les différences quantitatives et qualitatives de matériel particulaire entre les deux échantillons (Figure 23-b). Ces spectres microgranulométriques différentiels s'expriment en $\mu\text{m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$.

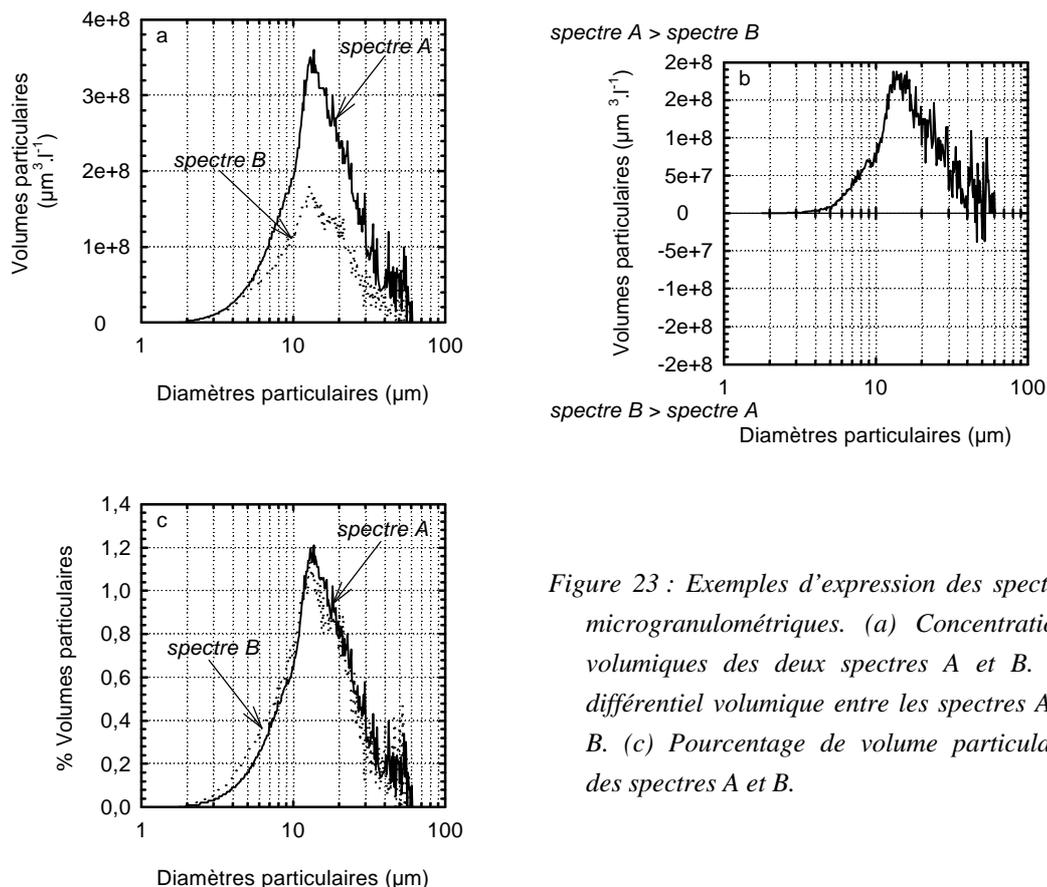


Figure 23 : Exemples d'expression des spectres microgranulométriques. (a) Concentrations volumiques des deux spectres A et B. (b) différentiel volumique entre les spectres A et B. (c) Pourcentage de volume particulaire des spectres A et B.

Dans le cas d'échantillons réalisés dans des conditions hydrodynamiques différentes, l'approche quantitative est biaisée par l'absence de cohérence entre les prélèvements. La comparaison quantitative de deux échantillons perd son intérêt, en revanche l'étude qualitative des échantillons peut se révéler riche en enseignements. Cette étude qualitative est abordée en exprimant les spectres microgranulométriques obtenus en pourcentage de volume particulaire d'une classe donnée par rapport au volume total des

particules de l'échantillon. Ces spectres s'expriment en % du volume particulaire (pour une classe de taille) par rapport au volume particulaire total (de l'échantillon) (Figure 23-c).

II.2.2.3 - Microscope électronique à balayage (MEB)

L'observation au MEB des échantillons permet de déterminer la nature des particules présentes en suspension.

Une petite quantité d'eau de chaque échantillon, dépendante de la charge particulaire (Annexe IV-a), est filtrée sur filtre en polycarbonate de diamètre de pore de 0,45 µm.

A l'aide d'un système de cibles, calibrées en fonction du grandissement choisi (Annexe IV-b), la taille des particules présentes sur le filtre étudié au MEB peut être déterminée.

Un recouplement entre les tailles ainsi obtenues et les données obtenues à l'aide du compteur de particule permet de déterminer les correspondances entre classes granulométriques et type de particules. Ce type de recouplement permet notamment de mettre en évidence des populations de tailles ou de nature bien identifiées et qui n'apparaissent pas de manière isolées sur les spectres microgranulométriques du fait de la superposition possible de plusieurs populations.

Le couplage MEB et spectres microgranulométriques permet d'aborder les particules en tant que traceur de certains mécanismes hydrosédimentaires.

II.2.2.4 - Vitesses de chutes des microflocs

Des mesures de vitesses de chute des particules (w_s) au laboratoire sont réalisées sur certains échantillons d'eau de Seine selon la méthodologie établie par Dupont *et al.*, 1995.

Cette technique permet de déterminer les vitesses de chutes de différentes classes granulométriques à l'aide du compteur de particules. Elle aboutit à la définition d'une loi associant diamètre (D) des particules et vitesses de chutes (Equation 3).

$$w_s = 10^b \times D^a \quad \text{Equation 3}$$

Les diamètres (D) des particules sont exprimées en micromètres (µm), les vitesses de chute (w_s) sont exprimées en millimètres par secondes (mm.s⁻¹). a et b sont des coefficients qui décrivent la loi de chute.

Les échantillons d'eau de Seine sont préalablement homogénéisés puis filtrés sur un tamis de 100 µm. La salinité de l'échantillon est ajustée à 5 ‰ afin de rendre possible la mesure. L'orifice de la sonde de mesure (sonde de 100 µm) est positionné 1,5 ou 4 cm sous la surface libre de l'échantillon. Les particules sont maintenues en suspension par agitation. Le comptage de l'échantillon se fait durant 200 secondes.

Suite à ce premier comptage, la solution est laissée au repos durant 15 minutes, la sonde est ensuite repositionnée à 1,5 ou 4 cm sous la surface et la mesure est réalisée durant 200 secondes sans agitation. Cette étape est reproduite 30 minutes, 1 heure, 2 heures et 24 heures après la première mesure.

Les volumes particuliers décantés sont ensuite représentés en fonction du temps. La vitesse de chute de plusieurs classes de particule est déterminée lorsque 90 % des particules de la classe particulaire considérée ont disparu.

Les résultats sont exprimés sous la forme d'un graphique présentant la relation entre tailles des particules et vitesses de chute (Figure 24).

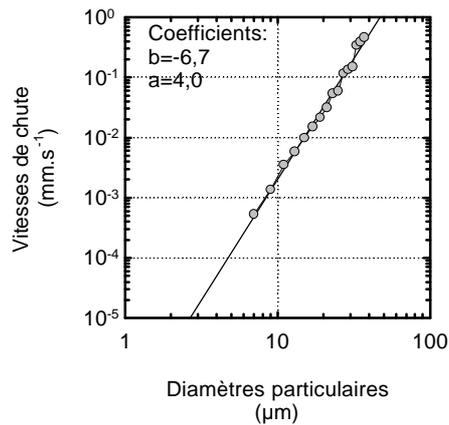


Figure 24 : Exemple de relation entre vitesses de chute (w_s en mm.s^{-1}) et diamètres particuliers (D en μm). Les coefficients a et b , déterminés à partir de la droite ajustée aux résultats, permettent de recalculer la vitesse de chute d'une classe de particules à partir de la relation $w_s = 10^b \times D^a$.

II.2.2.5 - Tailles et vitesses de chute des Macroflocs

Eisma, 1993, et Van Leussen, 1994, montrent que dans la partie saline des estuaires, le matériel particulaire en suspension est composé de microflocs et de macroflocs. Dans l'estuaire moyen de Seine, Dupont, 1997, précise que les macroflocs représentent au plus 40 % de la masse totale du matériel en suspension. Les vitesses de chute de ces macroflocs sont plus importantes que celles de microflocs (Van Leussen, 1994, Lafite *et al.*, 1997).

Afin de vérifier l'existence de macroflocs dans l'estuaire amont de la Seine et d'en déterminer les caractéristiques le cas échéant une étude à été menée en 1997. Ce travail a essentiellement été réalisé dans le cadre du stage d'Astrid Blum (Blum, 1997).

L'étude de ces macroflocs est réalisée à l'aide du dispositif VIL (Vidéo In Lab), développé au Département de Géologie de l'Université de Rouen par Defosse, 1996.

Les eaux de surface sont prélevées dans une cuve en plexiglas. Une fois sortie de l'eau, cette cuve est placée devant une camera CCD reliée à un dispositif d'enregistrement et à un moniteur. Les images recueillies selon ce principe sont analysées afin de déterminer la taille des particules en suspension et, par comparaison de plusieurs images successives, la vitesse de chute de ces particules.

Cette technique ne permet pas d'étudier les particules de diamètre inférieur à 100 μm .

Les tailles des macroflocs sont exprimées en μm ou en mm. Les vitesses de chute sont exprimées en mm.s^{-1} .

II.2.3 - Mesures hydrologiques

II.2.3.1 - Mesures de débits

Les débits d'eau pénétrant dans l'estuaire de Seine sont mesurés au barrage de Poses (pk 202,00) par le SNS à raison d'une mesure par jour à 8h00.

Avant 1995, les débits étaient calculés en fonction de la pente du plan d'eau entre le barrage de Poses et celui de Port Mort. Cette technique basée sur l'utilisation de deux courbes de tarage (une pour l'étiage

et une pour la crue) induisait un biais pour les débits voisins de 900 à 1 000 m³.s⁻¹ du fait d'un mauvais recouvrement de ces courbes de tarage (Meybeck and Idlafkih, 1995, SNS communication personnelle).

Depuis 1995, la mesure du débit est assurée au barrage de Poses (pk 202,00) par une sonde automatique ; le problème de sous représentation des débits voisins de 900 à 1 000 m³.s⁻¹ a disparu. En revanche, durant l'étiage 1996, les débits inférieurs à 200 m³.s⁻¹ étaient sous-estimés. Ces débits ont été recalculés par le SNS à partir des débits de la Seine et de ses affluents en amont du barrage de Poses (pk 202,00).

II.2.3.2 - Mesures des hauteurs d'eau

Les mesures de hauteurs d'eau sont fournies par le Port Autonome de Rouen. Ces mesures sont réalisées à partir de 18 marégraphes répartis tout au long de l'estuaire de Seine. Les dénominations et localisations de ces marégraphes sont présentées en annexe I-b.

Le niveau du plan d'eau (exprimé en cm CMH) est mesuré toutes les 5 minutes.

Sur les figures de ce document, la localisation géographique de ces marégraphes est matérialisée par les symboles ▽ et ▼.

En connaissant la longueur des tronçons séparant chaque marégraphe et l'évolution de leurs sections avec les hauteurs d'eau, il est possible de connaître, toutes les 5 minutes, les volumes d'eau présents dans chacun de ces tronçons et, en les sommant, dans la totalité de l'estuaire amont.

La division des volumes d'eau ainsi calculés par le débit fluvial arrivant au barrage de Poses (pk 202,00) permet de déterminer un temps de renouvellement des masses d'eau présentes dans les tronçons.

II.2.3.3 - Vitesses de courants et de frottements

II.2.3.3.1 - Rappels

L'asymétrie de l'onde de marée provoque un renforcement des vitesses de courants de flot par rapport aux vitesses de courants de jusant. La capacité érosive des courants de flot se trouve renforcée par rapport à ceux de jusant (Postma, 1967). En outre Dronkers, 1986, explique que pour les marées présentant une asymétrie flot/jusant, la hauteur d'eau est plus importante durant le flot que durant le jusant et qu'en conséquence, un écoulement résiduel dans la direction de la propagation de l'onde peut exister à moins que les courants de flot ne soient moins forts que les courants de jusant. Ce même auteur précise que lorsque les hauteurs d'eau sont faibles, c'est-à-dire lors du jusant, les phénomènes de friction sont plus importants ce qui induit des vitesses de jusant inférieures aux vitesses de flot.

En fonction de la différence de phase entre l'onde lunaire moyenne M₂ et de l'onde M₄ plusieurs types d'asymétries existent et en conséquence, des courants de marée associés d'intensités diverses. Si la phase entre ces deux ondes est comprise entre 0 et 180°, la durée du jusant est plus importante que celle du flot, les courants de flot sont alors plus forts que les courants de jusant (Boon and Byrne, 1981, Friedrichs and Aubrey, 1988).

Les vitesses de courants associées aux ondes de marées subissent des variations d'intensités comparables aux variations d'amplitudes (Salomon, 1981). Uncles, 1981, montre que la durée et

l'amplitude de ces courants de marée changent au long de l'estuaire avec la variation de frottement liée au changement de profondeur.

II.2.3.3.2 - Vitesses de courants

Courantomètre à hélice

Au cours des campagnes de mesure en point fixe, les mesures de vitesses de courants ont été réalisées à 1 m au-dessus du fond l'aide d'un courantomètre à hélice de marque Valeport.

Ce courantomètre ne permet pas de connaître l'orientation des courants mais mesure simplement leur intensité.

Ces vitesses sont exprimées en cm.s^{-1} .

Courantomètre profileur doppler

Durant les campagnes de mesures de l'hétérogénéité spatiale et des flux, les vitesses de courants ont été mesurées à l'aide d'un courantomètre profileur doppler (Acoustic Doppler Profiler – ADP) de marque Sontek.

Durant toutes les campagnes, la taille des cellules de mesure a été fixée à 50 cm et la profondeur maximale à 15 m.

La durée d'intégration est d'une minute pour chaque profil. La fréquence d'acquisition des profils est d'un profil par minute.

Compte tenu des technologies mises en jeu, nous ne disposons pas de mesures de courants dans le premier mètre sous la surface (60 cm d'immersion de l'appareil + 40 cm de distance aveugle) et dans les 50 cm à proximité du fond (Figure 25). En revanche, la direction des courants est parfaitement connue. Dans les secteurs présentant de fortes pentes, la divergence entre les faisceaux engendre des erreurs de mesure du fait de la détection différentielle du fond entre les différents faisceaux.

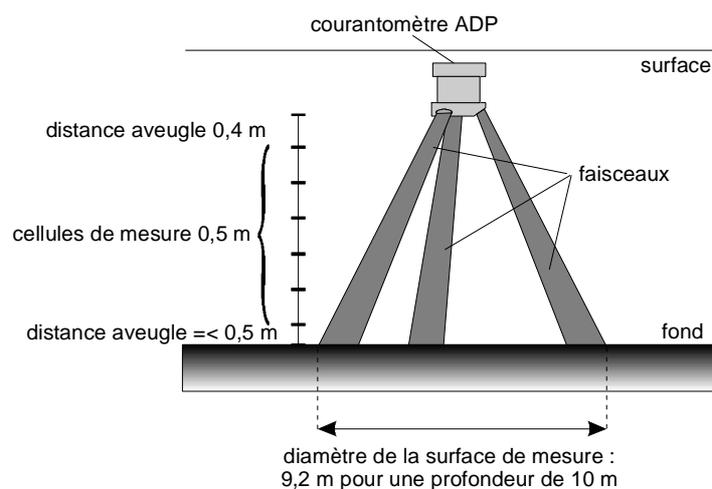


Figure 25 : Schéma de configuration de l'ADP dans l'estuaire amont de la Seine.

Les vitesses mesurées sont des vitesses horizontales et sont exprimées en cm.s^{-1} . Les vitesses négatives sont orientées d'amont en aval (vitesses de jusant et écoulement du fleuve), les vitesses positives sont orientées d'aval en amont (vitesses de flot).

Avec une telle configuration l'incertitude sur la mesure est de $\pm 0,5 \text{ cm.s}^{-1}$.

II.2.3.3.3 - Vitesses de frottements : u^*

Les frottements turbulents peuvent être évalués à partir des profils verticaux de vitesse lorsque ceux-ci sont conformes à la loi logarithmique. Cette conformité apparaît essentiellement dans des canaux à fond plat, en présence d'un écoulement homogène latéralement et longitudinalement. Dans ce cas idéal, il est possible de relier le profil vertical de vitesse et l'intensité du frottement.

Le frottement ainsi déterminé peut être qualifié de moyen à une échelle de l'ordre de la dizaine de mètres (ordre de grandeur de la profondeur de la colonne d'eau et champ d'investigation du courantomètre à effet Doppler). Sa valeur réelle est éventuellement perturbée par les effets latéraux (berges en particulier).

Les mesures de profils de vitesse, effectuées avec le courantomètre profileur à effet Doppler, ont été utilisées pour ajuster des profils logarithmiques et tenter d'estimer ainsi l'intensité du frottement.

Les vitesses de frottements, estimées grâce à l'ADP, ont été établies à partir des données recueillies entre 0,75 et 3 mètres au-dessus du fond. Dans la partie supérieure de l'écoulement, on observe fréquemment des dérives notables par rapport au profil logarithmique

Pour l'ensemble des profils, à chaque distance z du fond ($z > 50$ cm) correspond une valeur moyenne de courant horizontal $u(z)$ intégrée sur 1 minute. Cinq profils consécutifs de vitesses horizontales sont ensuite moyennés afin d'obtenir une vitesse moyenne $\bar{u}(z)$ pour chaque profondeur.

Le calcul des vitesses de frottements est basé sur le traitement de ces profils moyens.

La distribution universelle des vitesses pour un écoulement turbulent lisse peut s'écrire :

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + C \quad \text{Equation 4}$$

k est la constante de Von Karman (0,41 pour l'eau claire).

C est une constante numérique généralement égale à 5,3.

u^+ est la vitesse adimensionnelle telle que :

$$u^+ = \frac{\bar{u}(z)}{u_*} \quad \text{Equation 5}$$

z^+ est la distance adimensionnelle au fond telle que :

$$z^+ = \frac{z u_*}{\nu} \quad \text{Equation 6}$$

ν est la viscosité cinématique (0,1).

Les vitesses de frottements ainsi obtenues sont exprimées en cm.s^{-1} .

II.2.3.4 - Calcul des flux d'eau et de particules

Les flux d'eau sont calculés, sur chaque station de la section (Figure 19), par intégration sur le cycle de marée des vitesses de courants mesurées à l'aide du courantomètre ADP. Le résultat des quatre boîtes est ensuite sommé.

Les flux d'eau sont exprimés en m³ par unité de temps considérée.

Les flux de particules sont calculés en effectuant le produit de la vitesse mesurée par le courantomètre ADP par la concentration pondérale particulaire mesurée parallèlement à l'aide de la sonde CTD-turbidités. Sur chaque station, ce flux instantané est sommé sur la totalité du cycle de marée et sur la section.

Les flux de particules sont exprimés en tonnes par unité de temps considérée.

Les flux négatifs sont orientés d'amont en aval, c'est à dire dans le sens général de l'écoulement, les flux positifs sont orientés de l'aval vers l'amont, c'est à dire dans le sens opposé à l'évacuation des eaux de l'estuaire.

Les résultats obtenus permettent de comprendre la dynamique des particules en suspension dans le secteur étudié, en fonction de l'amplitude de la marée.

Les conclusions récentes sur les méthodes de calcul des flux (Jay *et al.*, 1997) montrent que les résultats obtenus par les techniques couplées ADP-CTD doivent être interprétés avec précaution. En effet, ces techniques ne permettent pas d'obtenir une mesure simultanée de tous les points de la section étudiée. De plus, ADP et CTD possèdent une zone aveugle à proximité du fond qui ne permet pas de déterminer précisément les flux transportés dans les cinquante premiers centimètres au-dessus du fond.

Contrairement à ce qui se passe dans des zones estuariennes plus larges, dans notre secteur d'étude, il n'a pas été mis en évidence de circulations latérales. Cette absence de circulation latérale rend plus crédible le calcul des flux. Il est de plus intéressant de constater que les flux résiduels d'eau calculés sur les sites de Moulineaux (258,50), La Bouille (pk 260,00) et Val-des-Leux (pk 265,55) et ceux mesurés au barrage de Poses (pk 202,00) sont comparables. Les différences constatées entre débits calculés et mesurés trouvent une cohérence dans le contexte de remplissage et de vidange de l'estuaire à la faveur des cycles vives-eaux/mortes-eaux (voir chapitre IV).

Chapitre III

Evolutions annuelles des concentrations du matériel particulaire fin en suspension

III.1 - Introduction

Avant d'étudier la dynamique du matériel particulaire fin dans l'estuaire amont, une étude préalable des origines et des flux de matériel particulaire fin arrivant dans l'estuaire amont s'avère nécessaire.

Ce chapitre a pour objectif de préciser l'origine du matériel particulaire fin pénétrant dans l'estuaire amont au cours de l'année.

Une hiérarchisation quantitative de ces sources est proposée et une vérification des bilans d'entrée du matériel particulaire fin en suspension est réalisée.

Afin d'établir une première hiérarchisation des mécanismes hydrosédimentaires intra-estuariens, une approche globale des variations de concentrations pondérales de MES, de leur composition microgranulométrique et de leur vitesse de chute, est proposée.

III.2 - Apports amont

III.2.1 - Concentrations pondérales particulières

Les travaux d'Avoine, 1985, de Cossa *et al.*, 1994 et de Meybeck and Idlafkih, 1995, montrent une forte dépendance entre variations du débit fluvial et concentrations pondérales de MES à l'entrée amont de l'estuaire (barrage de Poses - pk 202,00). Les travaux d'Avoine, 1985 ont notamment permis d'élaborer deux relations concentration pondérale de MES/débit fluvial, utilisées actuellement pour calculer les concentrations pondérales quotidiennes de MES au barrage de Poses (pk 202,00) à partir des débits journaliers mesurés sur ce site (voir page 16).

Ces relations permettent de disposer, par calcul à partir des mesures quotidiennes de débits (Figure 26-a), d'une chronique des concentrations quotidiennes de matériel particulaire en suspension (Figure 26-b). Le flux quotidien de matériel particulaire en suspension pénétrant dans l'estuaire est déduit de ces deux paramètres (Figure 26-c). Ce flux de matériel particulaire calculé est donc strictement dépendant du débit fluvial.

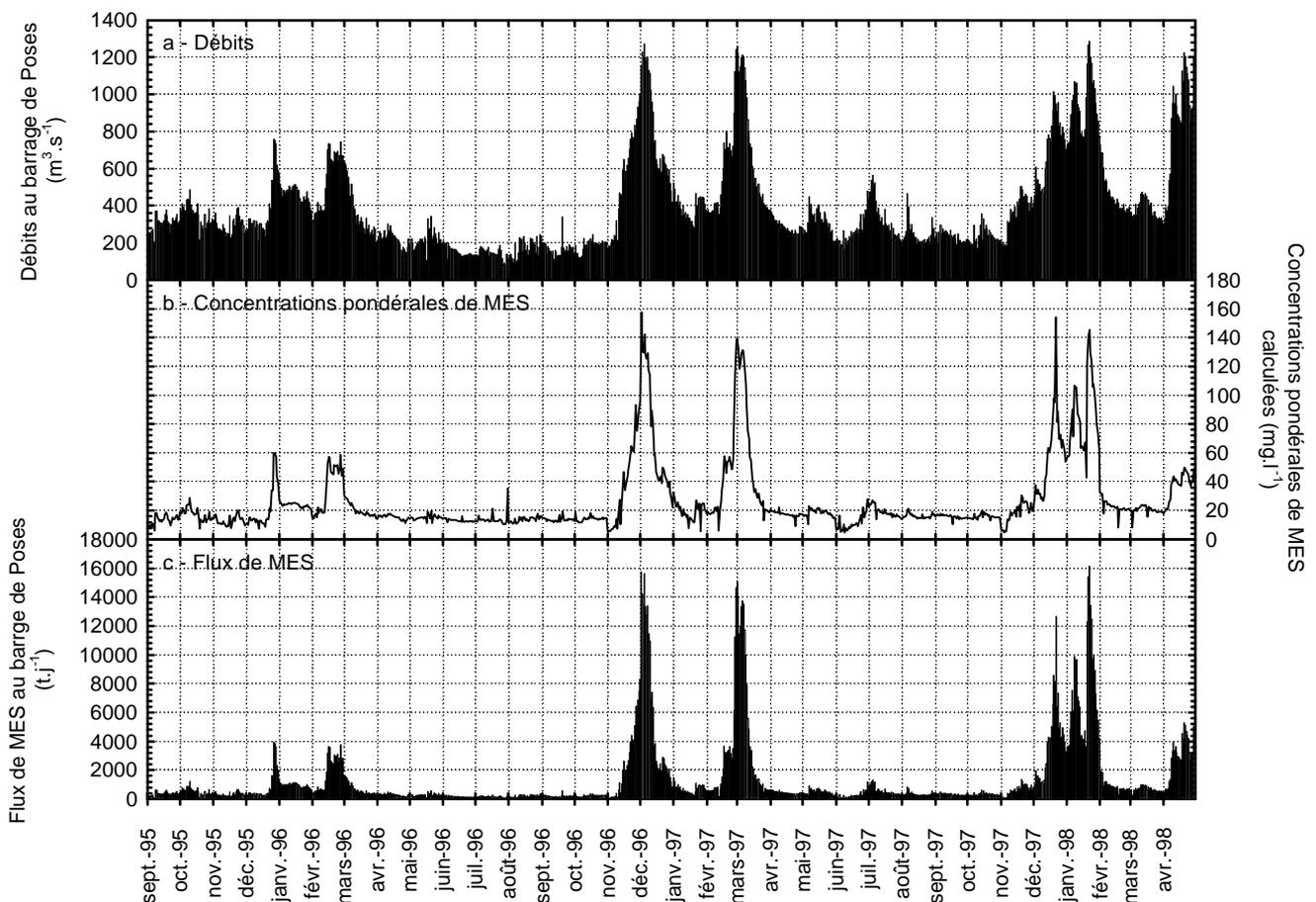


Figure 26 : Evolution quotidienne (a) des débits fluviaux, (b) des concentrations pondérales de MES calculées et (c) des flux de MES au barrage de Poses (pk 202,00) entre le 01/09/95 et le 30/04/98

L'utilisation de ces relations reproduit des hystérésis rétrogrades lors des crues. En aucun cas, l'hystérésis orthograde observé par Cossa *et al.*, 1994 sur la crue de 1991 n'est reproduit (voir page 16).

III.2.1.1 - Crues

Au cours de notre étude, plusieurs épisodes de crue ont affecté la Seine (Figure 26-a). Les débits les plus forts se rencontrent durant les hivers 1996-1997 et 1997-1998, avec des maxima voisins de $1\,400\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. L'hiver 1995-1996 n'a connu que deux petites crues ne dépassant pas $800\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Les débits les plus faibles se rencontrent durant le printemps, l'été et l'automne avec des minima voisins de $100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Durant les hivers 1996-1997 et 1997-1998 des enregistrements des concentrations de matériel particulaire en suspension à 1 mètre sous la surface ont été réalisés toutes les 15 minutes par le SNS en amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00). La moyenne quotidienne des concentrations pondérales de MES est calculée à partir de ces enregistrements en continu. La comparaison de ces concentrations quotidiennes et des débits permet de préciser les relations charge solide/débit liquide et confirme l'existence d'hystérésis de plusieurs types entre ces deux paramètres.

Pour la première crue de 1996-1997, il n'existe aucune hystérésis ; les concentrations, en montée de crue, sont égales à celles de fin de crue (Figure 27-a). Pour la seconde crue, en revanche, la charge solide est inférieure en montée de crue à celle de descente de crue pour un même débit (Figure 27-b).

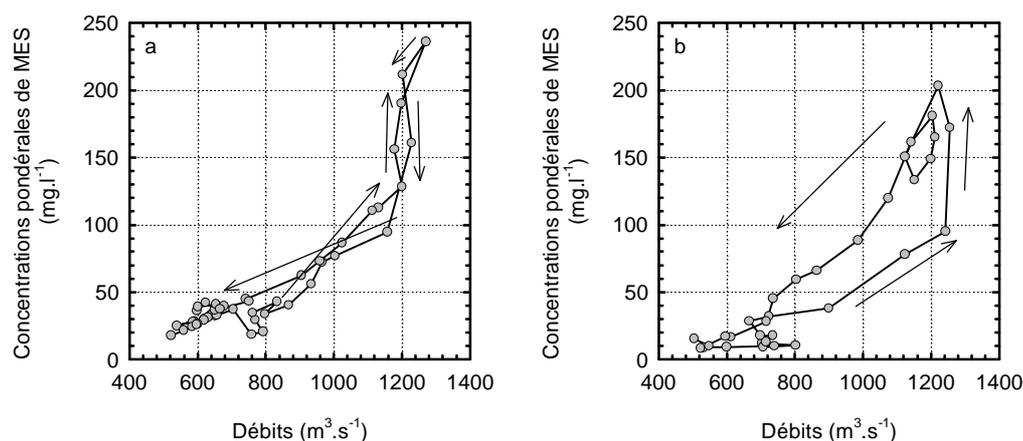


Figure 27 : Relation charge solide/débit liquide au barrage de Poses – pk 202,00, pour (a) la 1^{ère} crue de 1996-1997 et (b) la 2^{ème} crue de 1996-1997.

Durant l'hiver 1997-1998, la crue est composée de 3 montées successives de débits. La première montée de débits ne présente aucune hystérésis concentrations pondérales de MES/débits (Figure 28-a). Les deux montées de crue suivantes présentent des hystérésis orthogrades (Figure 28-b et c).

Ces différentes relations entre charge solide et débit liquide visualisent les déphasages qui existent entre la propagation des ondes de crue (eau) et des ondes de matériel particulaire en suspension associées.

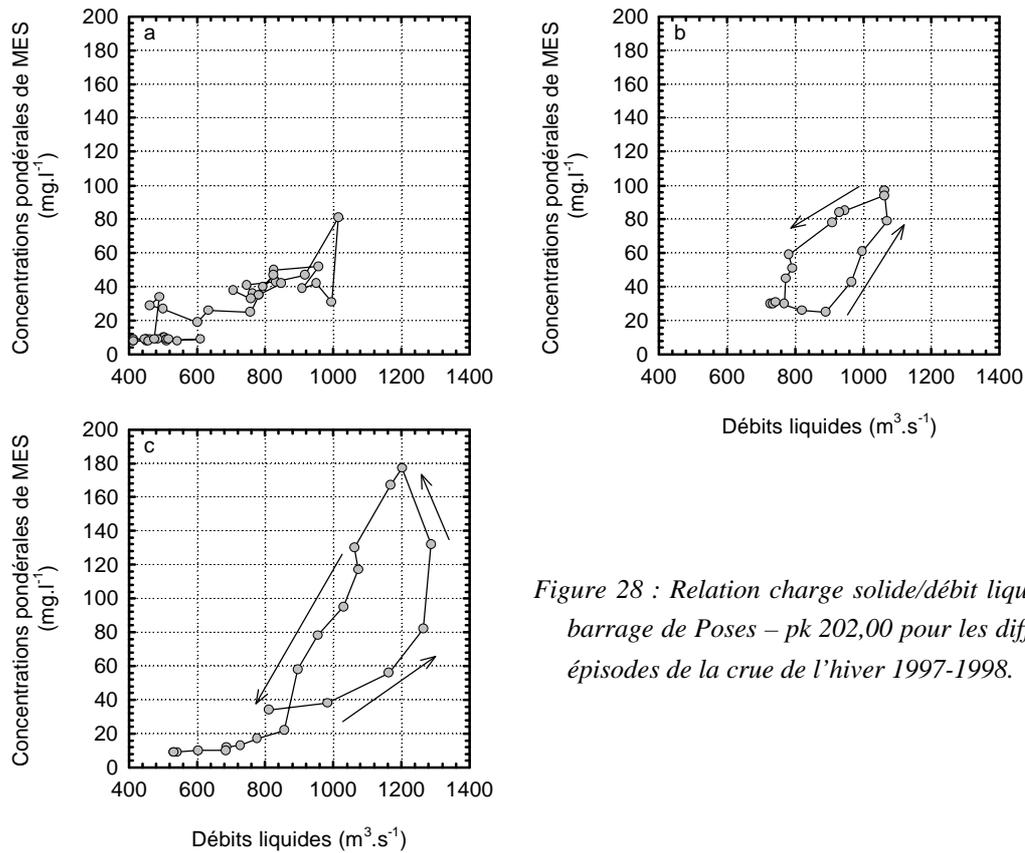


Figure 28 : Relation charge solide/débit liquide au barrage de Poses – pk 202,00 pour les différents épisodes de la crue de l'hiver 1997-1998.

Les hystérésis rétrogrades, comme ceux de la seconde crue de 1996-1997 et des deux montées de débits de 1997-1998, traduisent une arrivée du pic de MES en avance sur celle du pic de débit. Inversement, les hystérésis orthogrades, comme ceux présents pour les crues étudiées par Avoine, 1985 et Meybeck and Idlafkih, 1995, ainsi que pour la première crue de l'hiver 1994-1995 (Figure 29), traduisent une arrivée du pic de crue en avance sur le pic de MES. Les crues ne présentant aucune hystérésis, comme la première crue de 1996-1997 et la première montée de débit de 1997-1998, sont des crues pour lesquelles il n'existe aucun le déphasage entre le pic de débit et le pic de MES.

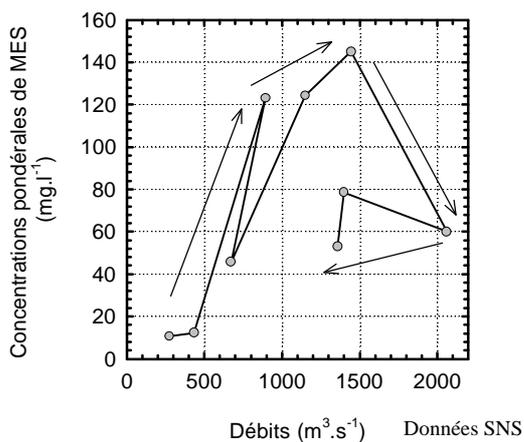


Figure 29 : Relation charge solide/débit liquide au barrage de Poses – pk 202,00 pour la première montée de la crue de l'hiver 1994-1995.

A partir des observations précédentes, une classification dans l'apparition des hystérésis entre charge solide/débit liquide au barrage peut être réalisées (Figure 30)

Pour les crues les plus fortes ($\geq 1\ 800\ \text{m}^3.\text{s}^{-1}$) comme celles étudiées par Avoine, 1985 et Meybeck and Idlafkih, 1995 (voir page 16), les hystérésis sont rétrogrades (Figure 30-a). Dans le cas de crues de

débites plus faibles, la première crue faisant suite à un long étiage ne présente pas d'hystérésis (Figure 30-b). Les crues ou les augmentations de débits, qui font immédiatement suite à ces premières crues, présentent des hystérésis orthogrades (Figure 30-c).

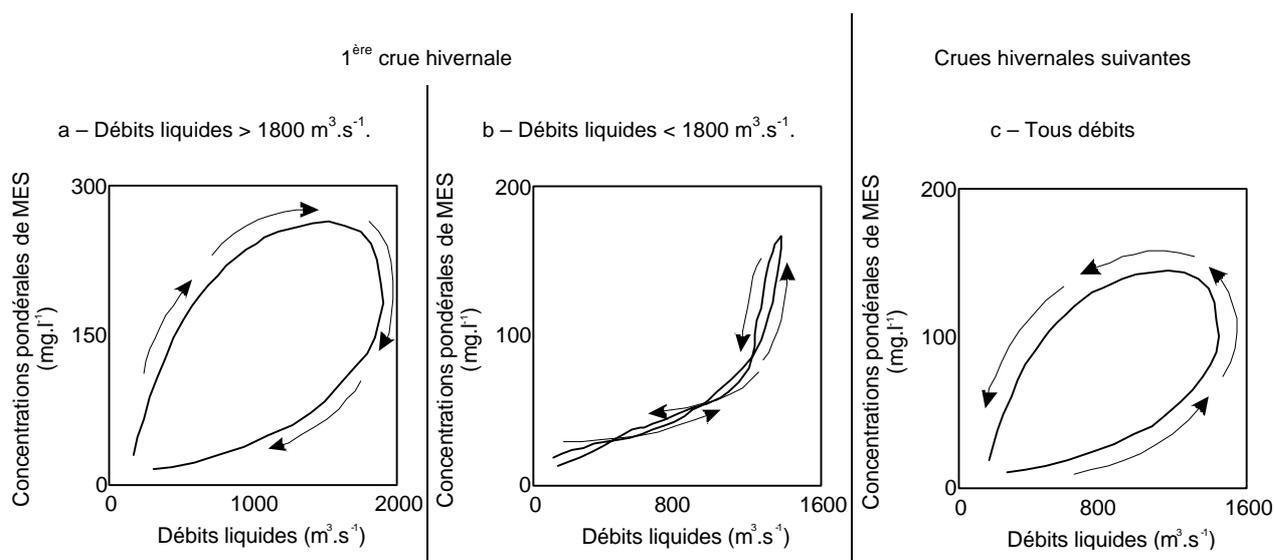


Figure 30 : Relation charge solide/débit liquide au barrage de Poses (pk 202,00) en fonction du type de crue considérée.

III.2.1.2 - Etiage

Durant l'étiage, des variations diurnes de concentrations pondérales de MES apparaissent sur les enregistrements réalisés à 1 m sous la surface en amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00) (Figure 31). Ces variations de concentrations pondérales de MES peuvent atteindre un facteur 2. Deux explications, basées sur les migrations verticales du plancton, peuvent être avancées :

- a – Ces variations sont liées à d'importants déplacements verticaux du plancton, susceptibles de modifier la masse de matériel particulaire en suspension au niveau du capteur. Ces phénomènes sont habituellement observés dans les milieux aquatiques non circulants, ce qui est le cas de la retenue d'eau en amont du barrage de Poses. Cette dernière, bien que peu importante, permet une diminution de la vitesse de l'écoulement et rend possibles ces phénomènes de migration verticale.
- b – Cette augmentation de la turbidité n'est qu'une simple réponse optique du capteur à la modification de la nature du matériel particulaire en suspension suite aux migrations planctoniques verticales ; ces migrations restent quantitativement négligeables.

Nous ne disposons pas pour l'heure de données suffisantes pour conclure quant à l'importance de ce phénomène sur la mesure de turbidité. Une étude spécifique de la réponse du capteur à la présence de diatomées devra être envisagée ainsi qu'une étude de plancton lui-même car, selon le phototropisme des espèces, la migration se fait, le jour, du fond vers la surface ou de la surface vers le fond et inversement la nuit (Whickstead, 1976).

Quoiqu'il en soit, ces variations diurnes, en amont barrage de Poses, posent le problème de la signification des mesures de turbidité réalisées dans de telles conditions.

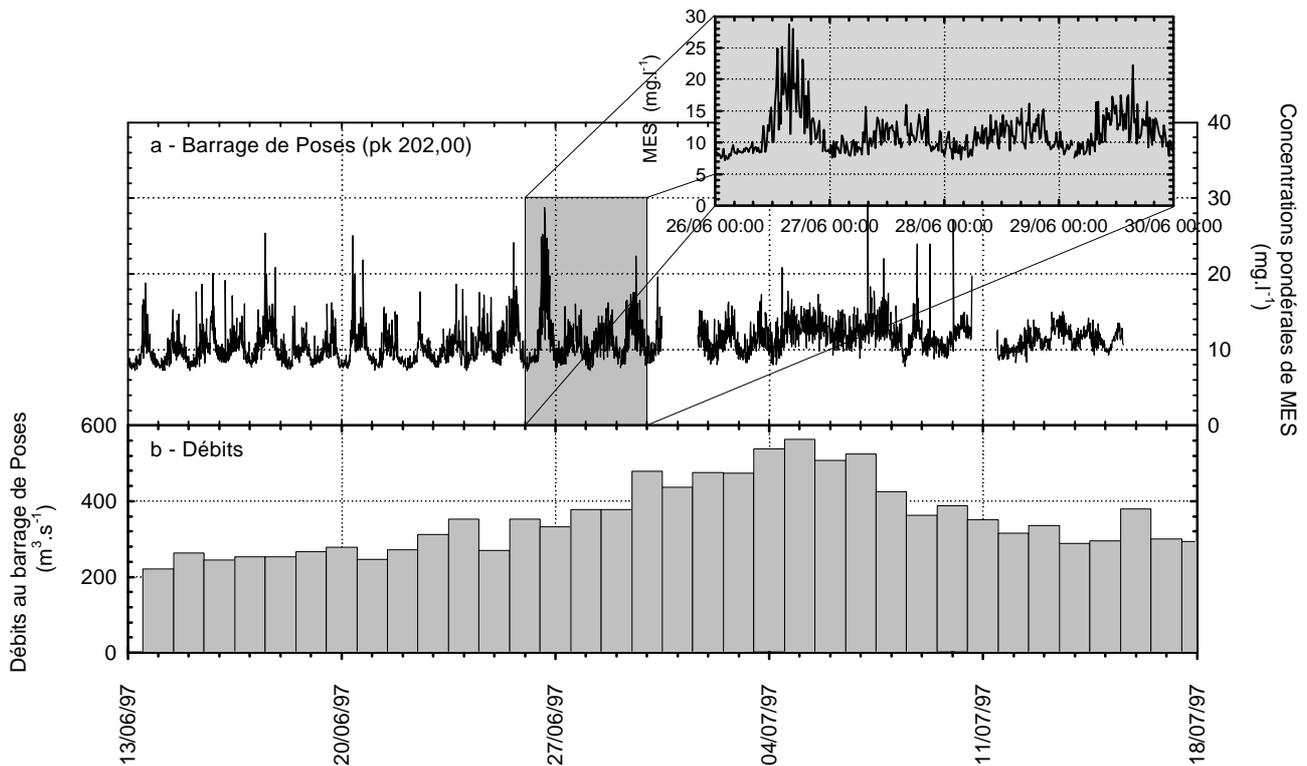


Figure 31 : (a) Concentrations pondérales de MES en amont immédiat du barrage de Poses – pk 202,00. (b) Débits au barrage de Poses – pk 202,00. La mesure est réalisée toutes les 15 minutes à l'aide d'une sonde YSI 6000 située en rive gauche à 1 mètre sous la surface.

D'autre part, les petites variations du débit fluvial, comme c'est le cas autour du 04/07/97, n'ont qu'une faible influence sur les concentrations pondérales de MES. Cette influence se traduit essentiellement par une disparition des variations diurnes de concentrations pondérales de MES, sans provoquer d'accroissement notable des concentrations de matériel particulaire en suspension (Figure 31).

III.2.1.3 - Comparaison MES calculées – MES mesurées

Les moyennes journalières des concentrations pondérales de MES mesurées au barrage de Poses (pk 202,00), entre le 21/05/96 et le 10/03/98 (659 jours), peuvent être comparées aux concentrations pondérales calculées à l'aide des formules établies par Avoine, 1985. Les impératifs de maintenance et les problèmes techniques ne permettent, en fait, d'effectuer cette comparaison que sur 472 jours (Figure 32-a). Sur ces 472 jours, 277 jours présentent des débits inférieurs à 400 m³.s⁻¹ (59 %) et 195 jours des débits supérieurs ou égaux à 400 m³.s⁻¹ (41 %).

Pour des concentrations pondérales de MES calculées comprises entre 40 mg.l⁻¹ et 100 mg.l⁻¹, c'est-à-dire pour des débits compris entre 600 m³.s⁻¹ et 1000 m³.s⁻¹ (Figure 32-b), les concentrations pondérales calculées sont supérieures aux concentrations pondérales mesurées et présentent une forte dispersion.

Pour des débits fluviaux supérieurs à 1000 m³.s⁻¹, la tendance s'inverse et les concentrations pondérales de MES calculées sont inférieures à celles mesurées.

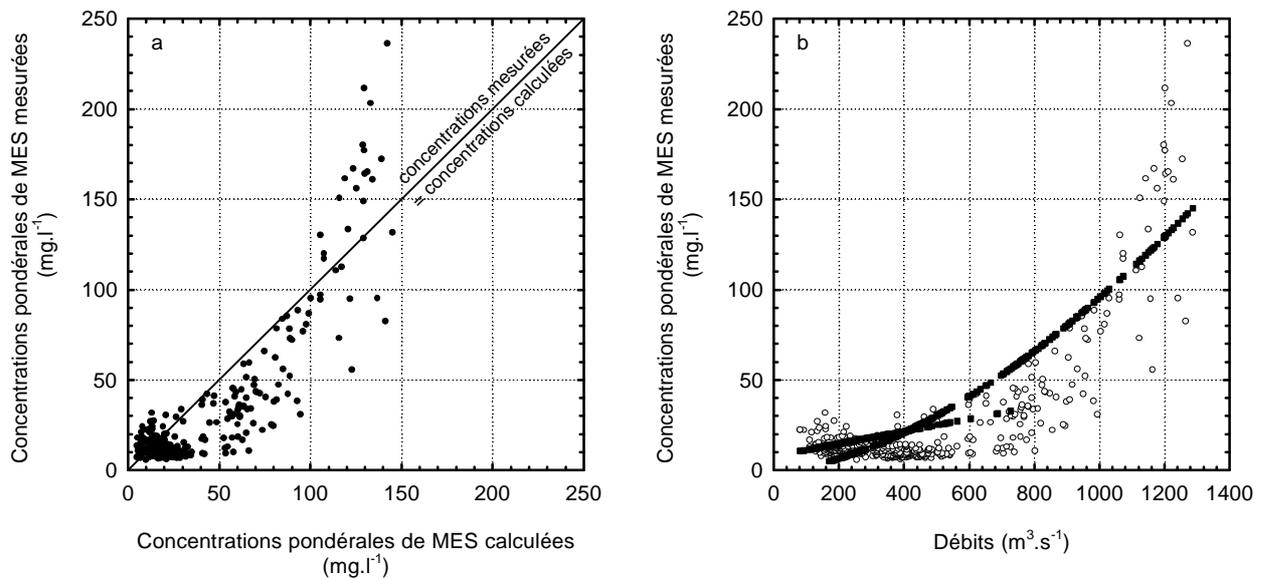


Figure 32 : (a) Comparaison des concentrations pondérales de MES calculées et mesurées à l'aide d'une sonde de turbidité au barrage de Poses – pk 202,00. (b) Relations entre concentrations pondérales de MES calculées (▪) et mesurées (°) et débit fluvial au barrage de Poses – pk 202,00.

Ces deux observations ne retracent que de grandes tendances à partir desquelles il est difficile de tirer des relations simples entre concentrations pondérales de MES mesurées et débits (Figure 32-b). La dispersion des données est trop importante du fait des hystérésis de différentes natures lors des crues et des variations diurnes durant l'été.

III.2.1.4 - Concentrations pondérales de MES en amont du barrage de Poses et dans l'estuaire amont.

Afin de vérifier l'influence de barrage de Poses sur les concentrations pondérales de MES, une comparaison des concentrations pondérales de MES, mesurées à des dates identiques par le SNS de Rouen en amont (pk 202,00) et en aval immédiat du barrage de Poses (pk 202,50) est réalisée sur 203 mesures entre le 11/05/82 et 27/12/95 (Figure 33).

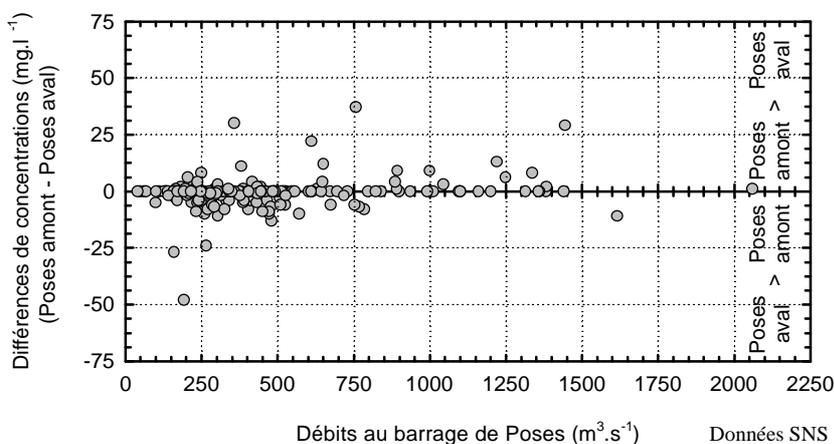


Figure 33 : Différences de concentrations entre les concentrations pondérales de MES mesurées en amont (pk 202,00) et en aval immédiat du barrage de Poses (pk 202,50) entre le 11/05/82 et le 27/12/95 (203 mesures).

Les différences entre concentrations pondérales mesurées en amont et en aval du barrage sont proches de zéro pour la quasi-totalité des mesures. Aucune explication globale n'a pu être avancée pour justifier les forts écarts de concentrations qui ont parfois été rencontrés.

Le matériel particulaire en suspension arrivant au barrage de Poses pénètre donc dans l'estuaire sans subir d'importante modification quantitative. Toutefois, malgré cette homogénéité entre concentrations pondérales de MES en domaine fluvial et en tout début d'estuaire, les évolutions des concentrations pondérales de MES observées au barrage de Poses, ne sauraient être transposées dans l'estuaire amont.

En effet, les mesures bimensuelles des concentrations pondérales de MES, réalisées par le SNS entre le 14/01/1970 et le 13/09/1995 (159 mesures) en amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00) et à Rouen (pk 239,00), mettent en évidence des différences saisonnières entre la partie fluviale et les zones estuariennes plus en aval (Figure 34).

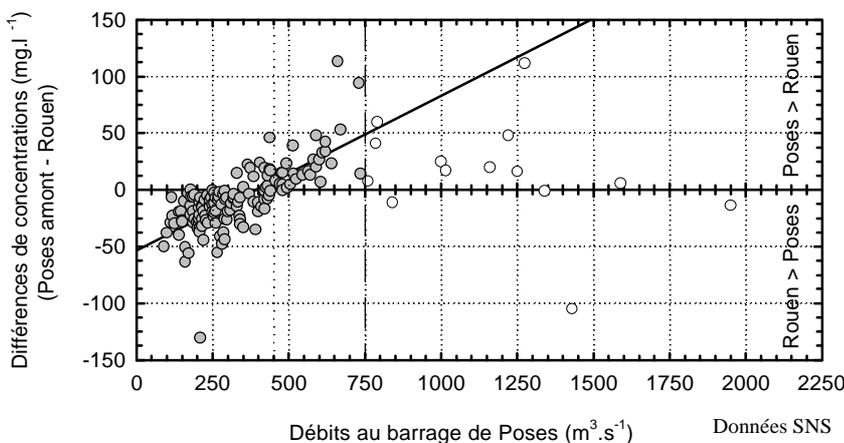


Figure 34 : Différences de concentrations entre les mesures bimensuelles réalisées en amont du barrage de Poses (pk 202,00) et sur le site de Rouen (pk 239,80) entre le 14/01/1970 et le 13/09/1995 (159 mesures). ○ mesures réalisées par débits < 750 m³.s⁻¹, ○ mesures réalisées par débits > 750 m³.s⁻¹. — tendance des concentrations pour des débits < 750 m³.s⁻¹.

Pour des débits inférieurs à 400 m³.s⁻¹, les concentrations pondérales de MES sont supérieures dans la partie estuarienne par rapport à la partie fluviale. Inversement, pour des débits supérieurs à 400 m³.s⁻¹, les concentrations pondérales de MES sont supérieures dans la partie fluviale. Cette limite de 400 m³.s⁻¹ a été déterminée à l'aide de la droite de tendance ajustée aux concentrations mesurées pour des débits inférieurs à 750 m³.s⁻¹. Le nombre de mesures réalisées lors de périodes de débits supérieurs à 750 m³.s⁻¹ est faible (14 mesures) et présente une forte dispersion qui rend peu robuste la droite de tendance.

A partir de cette observation, une dichotomie entre période de débits inférieurs à 400 m³.s⁻¹ (étiage) et débits supérieurs ou égaux à 400 m³.s⁻¹ (crue) peut être réalisée.

III.2.2 - Flux

Les différences entre concentrations pondérales de MES calculées et mesurées se traduisent par des divergences dans le calcul des bilans annuels du flux de matériaux apportés par le bassin versant amont et dans sa répartition sur l'année. Sur la base des 472 mesures quotidiennes de concentrations pondérales de MES calculées et mesurées (voir page 64), les flux quotidiens de matériel particulaire arrivant au barrage de Poses ont été comparés (Tableau 7).

Sur l'ensemble des 472 mesures, la différence de flux entre concentrations pondérales de MES calculées et mesurées est de 179 110 tonnes, c'est à dire 19 % du flux déterminé à partir des concentrations calculées ou 24 % du flux déterminé à partir des concentrations mesurées.

Pour les deux modes de calcul utilisés, les flux en période d'étiage ($Q < 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) représentent 10 % du flux total contre 90 % en crue. En étiage, la différence entre flux calculés d'après les concentrations pondérales de MES calculées et mesurées est de 24 079 tonnes, c'est-à-dire 25 % du flux déterminé à partir des concentrations calculées ou 33 % du flux déterminé à partir des concentrations mesurées. En crue, la différence entre flux calculés d'après les concentrations pondérales de MES calculées et mesurées est de 155 031 tonnes, ce qui représente 19 % du flux déterminé à partir des concentrations calculées ou 23 % du flux déterminé à partir des concentrations mesurées.

Tableau 7 : Estimations des flux particulaires arrivant au barrage de Poses (pk 202,00) sur la base de 472 mesures quotidiennes moyennes des concentrations et de 472 valeurs calculées des concentrations pondérales de MES entre le 21/05/96 et 10/03/96.

Flux	Total période	Etiage ($< 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Crue ($\geq 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
d'après les concentrations calculées (1)	928 350 t	96 316 t (10 %)	832 034 t (90 %)
d'après les concentrations mesurées (2)	749 240 t	72 237 t (10 %)	677 003 t (90 %)
Différentiel (1) – (2)	179 110 t	24 079 t	155 031 t
Pourcentage/(1)	19%	25%	19%
Pourcentage/(2)	24%	33%	23%

Les différences entre concentrations pondérales de MES mesurées et calculées et leurs conséquences sur les bilans particulaires arrivant au barrage de Poses (pk 202,00) nécessitent une révision de l'actuelle méthode de calcul des concentrations pondérales de MES.

La solution de mesure en continu de la turbidité, développée par le SNS, constitue une alternative à cette technique de calcul et est susceptible d'offrir une précieuse source d'information pour de nombreuses disciplines scientifiques. Toutefois, compte tenu de la retenue d'eau en amont du barrage de Poses, un travail préalable visant à déterminer la représentativité des mesures est nécessaire, notamment en étiage.

III.3 - Autres apports

III.3.1 - Apports intra-estuariens

Les travaux d'Avoine, 1981, montrent que le matériel particulaire transitant dans l'estuaire amont et arrivant au bouchon vaseux a pour source principale le fleuve. Sur la base du taux érosion calculé par Avoine, 1985, et compte tenu de la superficie du bassin versant, les apports potentiels de matériel particulaire intra-estuarien sont d'environ 100 000 t.an⁻¹ soit 17 % des apports annuels arrivant au barrage de Poses. Afin de vérifier ce chiffre, les flux de matériel particulaire arrivant à l'estuaire par ses affluents et au travers des rejets urbains et industriels du bassin amont ont été estimés.

Le calcul des flux de matériel particulaire arrivant dans l'estuaire amont par ses affluents est réalisé à partir des mesures ponctuelles des concentrations pondérales de MES et des débits fournis à l'Agence de l'eau Seine-Normandie par le Service d'Etude des Milieux Aquatiques de la Direction Régionale de L'Environnement de Haute-Normandie entre 1982 et 1995. Les données issues de ce suivi sont peu nombreuses et disparates, leur représentativité par rapport au régime annuel des cours d'eau est difficile à estimer. Ces données sont disponibles pour les 8 affluents de l'estuaire amont : l'Andelle, l'Eure, l'Oison, l'Aubette, le Cailly, l'Austreberthe, la Rançon et la Sainte-Gertrude.

Les rejets urbains sont extraits des travaux de Gouy, 1996, et de mesures réalisées par le SNS de Rouen.

Les rejets industriels ont été estimés à partir des mesures de concentrations et de débits publiées par la Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement pour les années 1993, 1994, 1995. Ces mesures sont issues de l'autocontrôle de la part des industriels ou de contrôles de l'administration.

Faute de données, un certain nombre de sources potentielles n'ont pu être prise en considération dans ce bilan : productions biologiques endogènes, apports atmosphériques, activités portuaires, apports souterrains.

A partir de ces données très disparates, le bilan des principales sources intra-estuariennes de matériel particulaire entre le barrage de Poses (pk 202,00) et l'aval de Caudebec-en-Caux (pk 315,00) donne un flux annuel intra-estuarien compris entre 30 000 et 35 000 tonnes (Tableau 8).

L'importante différence entre cette estimation et les 100 000 t annuelles calculées précédemment s'explique par le contexte hydrologique du bassin versant intra-estuarien. Le bassin versant intra-estuarien est localisé sur un des formations géologiques crayeuses (voir page 13), propice à la karstification et aux écoulements souterrains. Le réseau hydrographique est moins bien développé que dans le bassin versant à l'amont de l'estuaire. Le taux annuel d'érosion calculé à partir des données précédentes, additionné des 10 000 tonnes annuelles de matériel particulaire arrivant dans l'estuaire moyen par l'intermédiaire de la Risle (pk 346,40) est de 4,3 à 4,8 t.km².an⁻¹ soit près de 2 fois moins que celui du bassin versant amont.

Tableau 8 : Flux de matériel particulaire fin arrivant dans l'estuaire amont de la Seine par source entre le barrage de Poses (pk 202,00) et l'aval de Caudebec-en-Caux (pk 315,00).

	<i>Flux annuels moyens de MES arrivant en Seine (tonnes)</i>	<i>% flux total</i>	<i>Source des données</i>
<i>Seine</i>	600 000 à 700 000	93,7 à 93,8%	Avoine, 1985
<i>Affluents</i>	30 000 à 35 000	4,7 %	Agence de l'Eau Seine-Normandie, communication personnelle
<i>Rejets Urbains</i>	3 500 à 4 000	0,5 %	SNS, Gouy, 1996
<i>Rejets Industriels</i>	7 000 à 7 500	1,0 à 1,1 %	DRIRE, 1995
<i>Total</i>	740 500 à 746 500	100 %	

III.3.2 - Remontées de matériel particulaire depuis l'estuaire moyen

Outre les sources amont et intra-estuariennes, des recherches ont été menées afin de vérifier l'existence d'éventuelles remontées de matériel particulaire depuis l'estuaire moyen (depuis le bouchon vaseux, voir page 31) jusque dans l'estuaire amont.

Ces travaux ont été réalisés par l'Institut de Protection et Sûreté Nucléaire dans le cadre des études du Groupe Hydrosédimentaire du Programme de Recherche Scientifique Seine-Aval à l'aide de deux marqueur radioactifs le cobalt 60 (^{60}Co) et le césium 137 (^{137}Cs) (Boust, 1996, Boust, 1997, Guézennec *et al.*, 1998). Les concentrations respectives de ces deux radionucléides, dans chacun des pôles de mélange, marin et fluvial, offrent la possibilité d'étude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire.

Le ^{60}Co et le ^{137}Cs sont deux radionucléides artificiels de période radioactive respective de 5,27 ans et 30,15 ans. En Seine, la source amont de ^{137}Cs est constituée des retombées des essais atmosphériques des armes nucléaires ; la source amont de ^{60}Co provient de la centrale nucléaire de Nogent. Les sources aval de ces deux radionucléides sont l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague et la centrale électronucléaire de Winfrith.

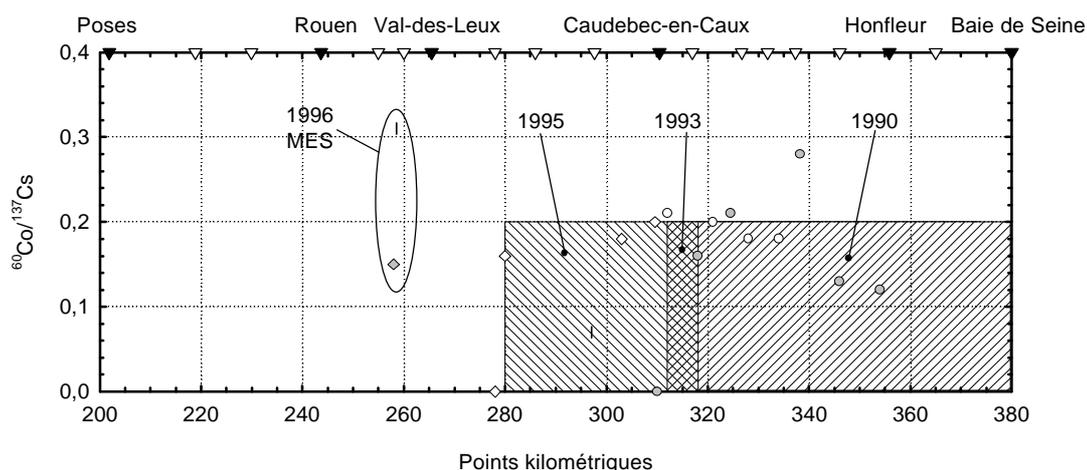


Figure 35 : Localisation d'un stock sédimentaire déposé de particules marines en 1990, 1993 et 1995 dans l'estuaire de Seine d'après leur rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ et mesure du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans le matériel particulaire fin en suspension en 1996 (◇). ○ échantillons de 1990, ○ échantillons de 1993, ◇ échantillons de 1995.

Les mesures de ^{60}Co et de ^{137}Cs 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 (Figure 35).

Cinq ans ont été nécessaires pour que le stock sédimentaire présent entre les pk 318,00 et 354,00 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 suspensions, en fin d'étiage, au niveau de La Bouille (pk 260,00), montrent la présence de particules en suspension d'origine marine dans ce secteur et confirment la possibilité d'une remontée du matériel particulaire ayant été en contact avec le milieu marin dans l'estuaire amont.

III.4 - Variations intra-estuariennes du matériel particulaire en suspension

III.4.1 - Concentrations pondérales particulières

L'évolution des moyennes journalières de concentrations pondérales des MES et de leur écart type au sein de l'estuaire (site du Val-des-Leux – pk 265,55) durant une année est présentée sur la Figure 36. Une dichotomie apparaît entre les concentrations pondérales de MES mesurées en période de débits fluviaux voisins ou supérieurs à $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (crues) et en période de débits inférieurs à $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (étiage).

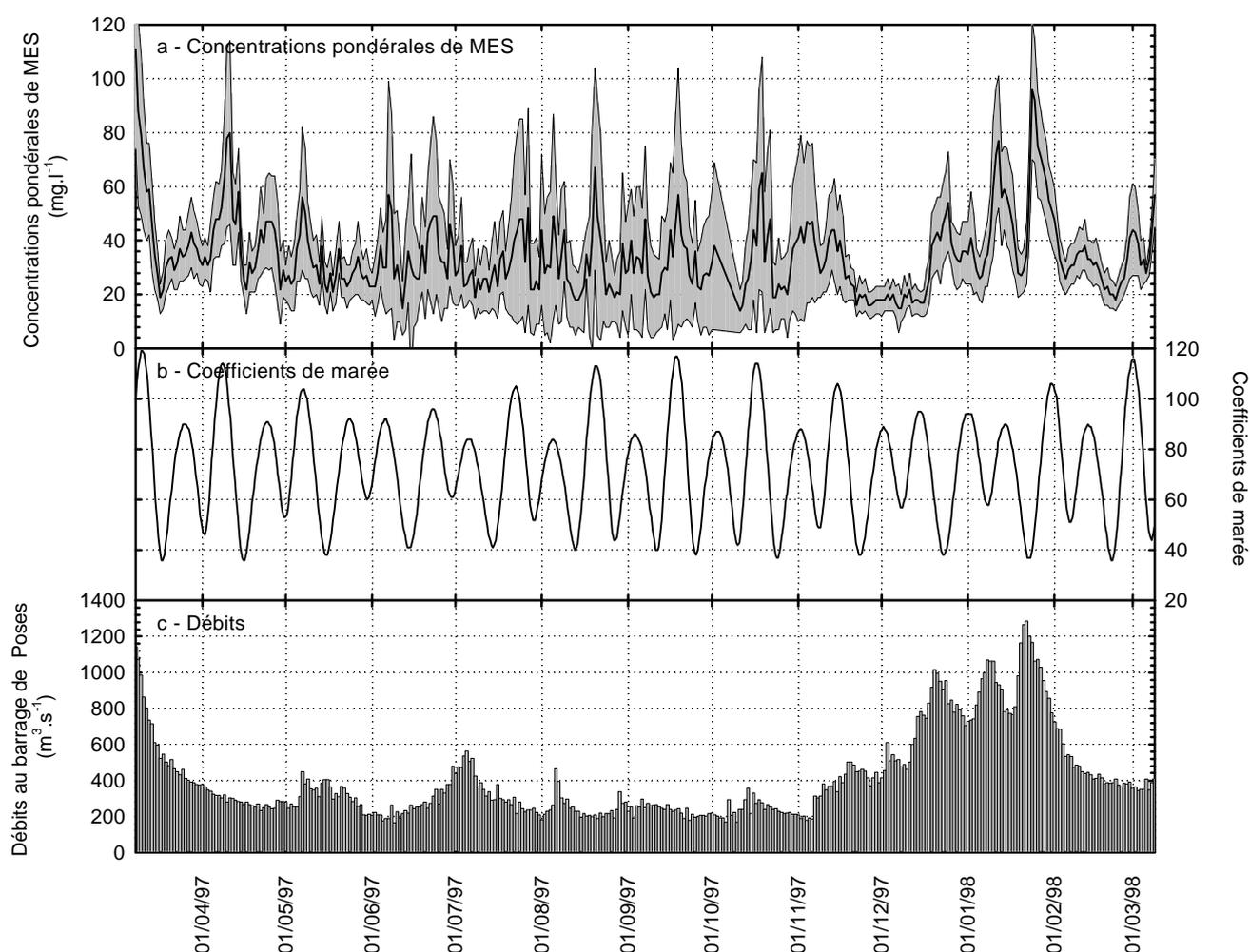


Figure 36 : (a) concentrations pondérales quotidiennes de MES (—) et de leur écart type (■) sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) durant une année (du 08/03/97 au 09/03/98). (b) Coefficients de marée. (c) Débits au barrage de Poses (pk 202,00).

Durant l'étiage, les concentrations moyennes journalières de MES présentent des variations comparables à celles des cycles semi-lunaires et lunaires de marée. En crue, ces cycles sont amortis et les variations de concentrations pondérales de MES sont proches de celles du débit fluvial.

La comparaison des débits avec les moyennes journalières des concentrations pondérales de MES (Figure 37-a) et leurs écarts types (Figure 37-b) présente une séparation des mesures en 2 pôles dépendants de la situation hydrologique.

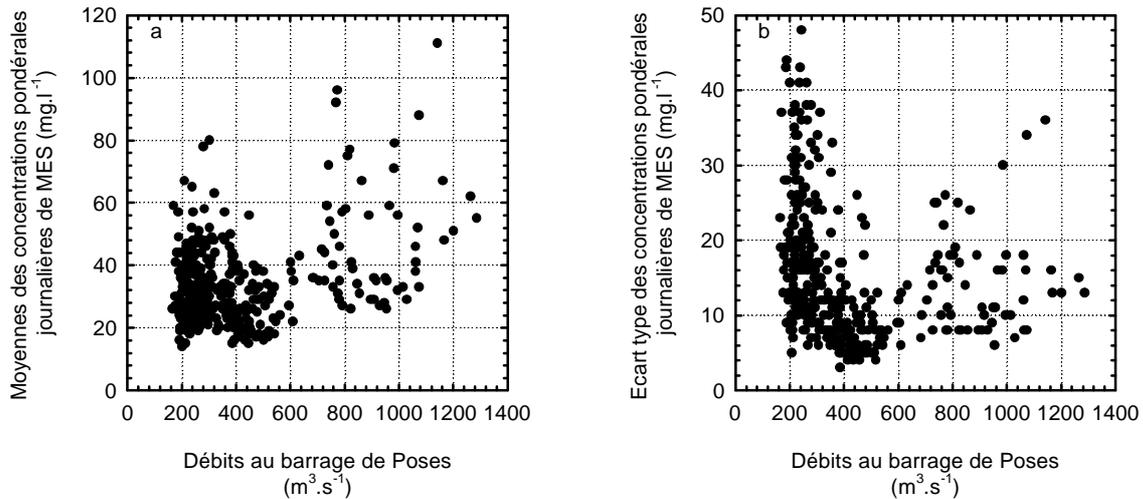


Figure 37 : Comparaison des débits quotidiens au barrage de Poses (pk 202,00), (a) des moyennes quotidiennes et (b) des écarts types quotidiens des concentrations pondérales de MES sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) entre le 08/03/97 et le 09/03/98.

Durant l'étiage la variabilité des concentrations pondérales de MES et de leurs écarts types pour des mêmes débits s'explique par la présence de cycles semi-diurnes et semi-lunaires d'érosion/sédimentation (Guézennec, 1994, Guézennec *et al.*, 1996) provoquant une fluctuation des concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension. Durant les crues, la variabilité des concentrations pondérales de MES et de leurs écarts types s'explique par les hystérésis entre charge solide et débit liquide (voir pages 16 et 61).

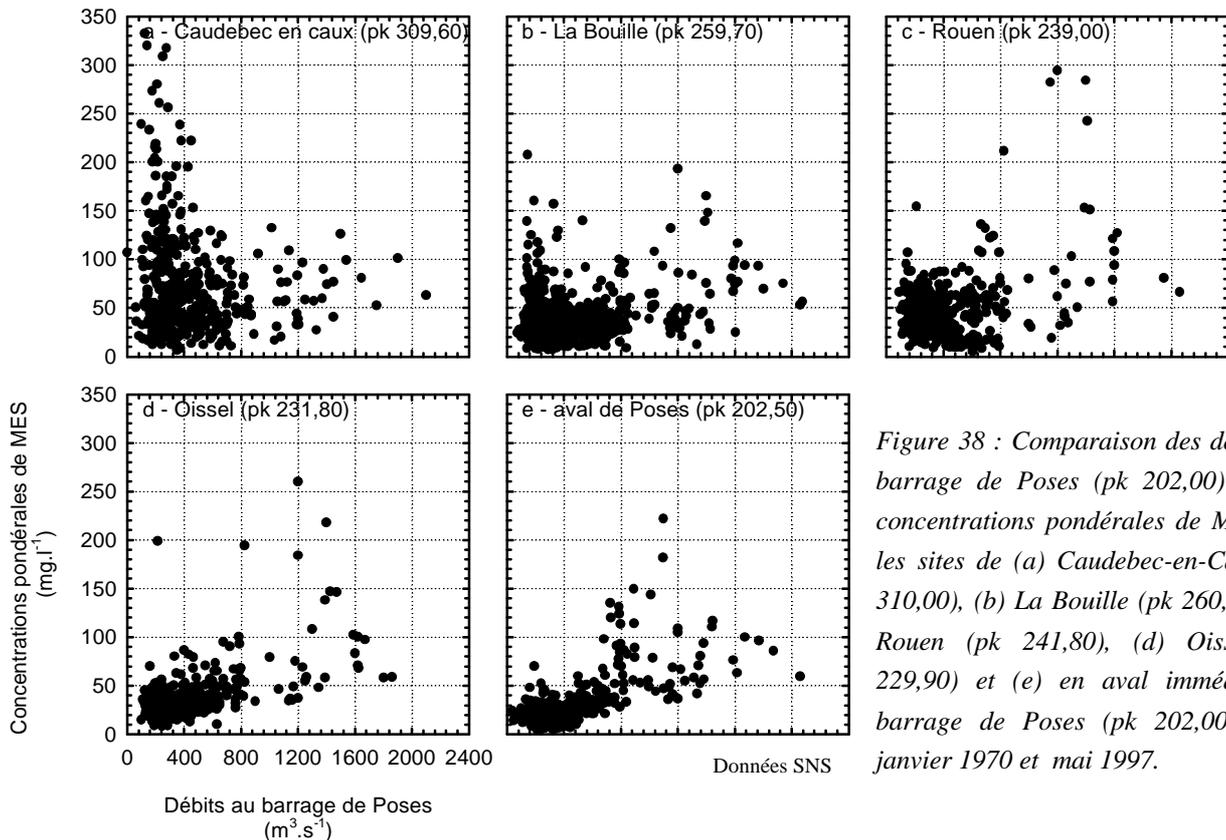


Figure 38 : Comparaison des débits au barrage de Poses (pk 202,00) et des concentrations pondérales de MES sur les sites de (a) Caudebec-en-Caux (pk 310,00), (b) La Bouille (pk 260,00), (c) Rouen (pk 241,80), (d) Oissel (pk 229,90) et (e) en aval immédiat du barrage de Poses (pk 202,00) entre janvier 1970 et mai 1997.

La comparaison des débits et des mesures bimensuelles de concentrations pondérales de MES réalisées par le SNS de Rouen entre janvier 1970 et mai 1997 en plusieurs sites de l'estuaire mettent en évidence des relations similaires à celles observées sur le site du Val-des-Leux – pk 265,55 (Figure 38).

Pour les débits de crue, une dispersion des concentrations pondérales de MES, liées aux hystérésis charge solide/débit liquide apparaît sur les 5 sites.

En étiage, en revanche, la dispersion des concentrations pondérales de MES liées au cycles de marées n'apparaît nettement que sur les sites situés les plus en aval (Caudebec-en-Caux – pk 309,60 et La Bouille – pk 259,70) (Figure 38-a et b) et s'atténuent sur les sites de Rouen (pk 239,00) et de Oissel (pk 231,80) (Figure 38-c et d) pour disparaître en aval immédiat du barrage de Poses (pk 202,50) (Figure 38-e). Cette atténuation, d'aval en amont, de la dispersion des concentrations pondérales durant l'étiage, est à rapprocher de l'amortissement des vitesses de courants entre l'aval et l'amont de l'estuaire (Avoine *et al.*, 1981, voir pages 26, 27 et 28).

III.4.2 - Composition du matériel particulaire en suspension

Durant l'année, la composition du matériel particulaire en suspension est modifiée par la succession des périodes de crue et d'étiage. Le suivi de la microgranulométrie du matériel particulaire en suspension en amont (pk 206,30) et en aval de Rouen (site du Val-des-Leux – pk 265,55) révèle que cette variation n'est pas seulement saisonnière mais est aussi spatiale (Figure 39). Le détail des spectres microgranulométriques repérés par un trait vertical sur la Figure 39 est présenté en annexe V.

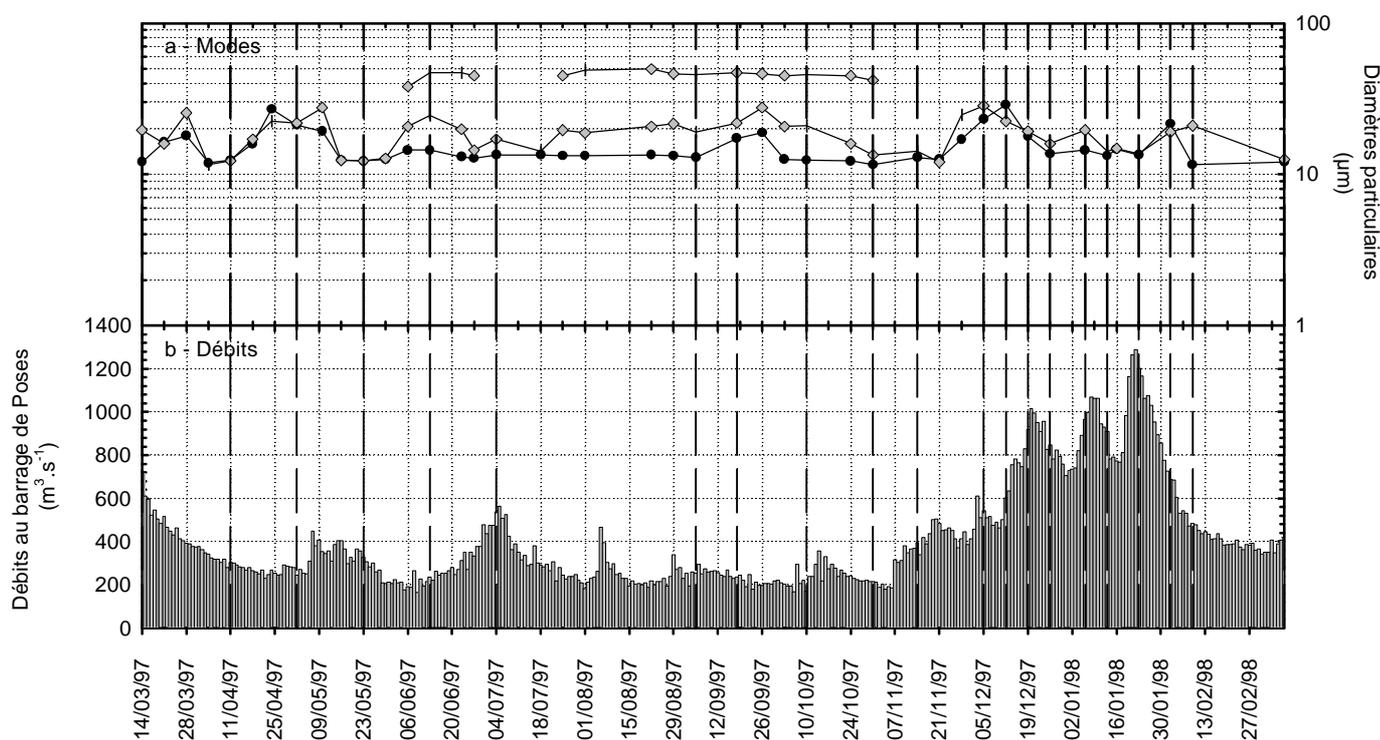


Figure 39 : Evolution des modes granulométriques des populations particulaires dominantes en suspension dans l'estuaire amont de la Seine en amont de Rouen (—●—, pk 206,30) et en aval de Rouen (—◇— Val-des-Leux, pk 265,55) durant une année (entre le 14/03/97 et le 10/03/98). Les traits discontinus verticaux repèrent les spectres microgranulométriques présentés en annexe V.

Ces variations spatiales et temporelles de la composition du matériel particulaire en suspension ont d'importantes conséquences sur les vitesses de chutes du matériel particulaire en suspension dans la colonne d'eau. Le Tableau 9 présente les vitesses de chute de particules de 12 µm et de 35 µm de diamètre au cours de l'année, en aval et en amont de Rouen. Ces vitesses ont été calculées à partir des relations diamètres particulaires/vitesses de chute établies à l'aide de la technique développée par Dupont *et al.*, 1995 (voir page 50). Les relations diamètres particulaires/vitesses de chute utilisées pour ce calcul sont présentées en annexes VI et VII.

Tableau 9 : Vitesses de chutes (mm.s^{-1}) du matériel particulaire de diamètre 12 µm et 35 µm en suspension en amont (pk 206,30) et en aval de Rouen (pk 265,55) entre le 07/03/97 et le 02/02/98.

		Amont de Rouen (pk 206,30)		Aval de Rouen (pk 265,55)	
		12 µm	35 µm	12 µm	35 µm
Étiage	10/05/97			$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
	23/05/97			$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
	05/09/97	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Crue	12/12/97	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
	06/01/98	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$
	13/01/98	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
	16/01/98	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$
	23/01/98	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
	02/02/98	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$

En début d'étiage, entre le 28/03/97 et le 06/06/97, les développements de diatomées se font sentir simultanément en aval en amont de Rouen. Ils modifient la composition du matériel particulaire dominant en suspension de manière identique en amont et en aval de Rouen. Ainsi, autour du 11/04/97 et du 23/05/97, un important développement de diatomées isolées de type *Stephanodiscus hantzschii*, se produit en aval et en amont de Rouen (Figure 39). La population particulaire dominante en suspension présente un diamètre voisin de 12-15 µm (Figure 40-a). Durant cet épisode de développement planctonique, en aval de Rouen, la présence en suspension d'agrégats de diamètres voisins de 30-35 µm provoque un épaulement dans la courbe microgranulométrique. Entre ces deux dates, le matériel particulaire en suspension présente un diamètre dominant de 25 µm (Figure 40-b) et est majoritairement composé d'agrégats et de *Stephanodiscus hantzschii* en chaîne

La présence en suspension de nombreuses diatomées isolées le 23/05/97, engendre une diminution des vitesses de chute pour les particules de 12 µm par rapport aux vitesses mesurées sur les particules de même diamètre le 10/05/97 ($4,2 \cdot 10^{-5} \text{ mm.s}^{-1}$ contre $4,7 \cdot 10^{-4} \text{ mm.s}^{-1}$). En revanche, ces différences de population particulaires dominantes ne modifient pas significativement les vitesses de chute des populations de diamètre de 35 µm (Tableau 9).

Durant l'étiage, les populations de matériel particulaire en suspension sont différentes en amont et en aval de Rouen mais sont constantes dans le temps sur chacun de ces sites. A l'amont de Rouen (pk 206,30), le matériel particulaire en suspension présente un mode aux environs de 13-17 µm et est majoritairement composé de diatomées (*Melosira granulata*) et d'agrégats. En aval de Rouen (pk 265,55), le matériel particulaire en suspension est composé de deux populations dominantes. Une population composée de diatomées de type *Actinocyclus normanii* avec un mode voisin de 45 à 50 µm. Une seconde population composée d'un mélange de diatomées de type *Cyclotella striata* et de petits agrégats organo-minéraux avec un mode voisin de 20 à 25 µm.

La population de diatomées de type *Actinocyclus normanii*, représente, durant l'étiage en aval de Rouen, entre 30 et 50 % des volumes du matériel particulaire en suspension mesurés à l'aide du compteur de particules. Il est difficile de traduire ce pourcentage volumique en terme de masse. Toutefois, l'absence de modification de la réponse optique de la sonde de turbidité en présence de ces fortes populations de diatomées (voir page 45 et 46) suggère que ces diatomées possèdent une densité proche de celle des autres populations particulaires en suspension.

Ce raisonnement implique une production endogène à l'estuaire en l'aval de Rouen d'une quantité importante de matériel particulaire (jusque 50 % de la masse en suspension). Selon (Verduin, 1956 in Dussart, 1966) la densité des diatomées est proche de 1, en conséquence l'importance de ces diatomées en terme de masse de matériel particulaire en suspension n'est vraisemblablement pas aussi élevée que calculée précédemment. Il serait intéressant de développer des investigations sur la dynamique de ces populations de diatomées dans l'estuaire amont afin d'en déterminer l'impact quantitatif et les conséquences sur le transit du matériel particulaire mais aussi sur celui des nutriments, des contaminants et sur l'oxygénation des eaux.

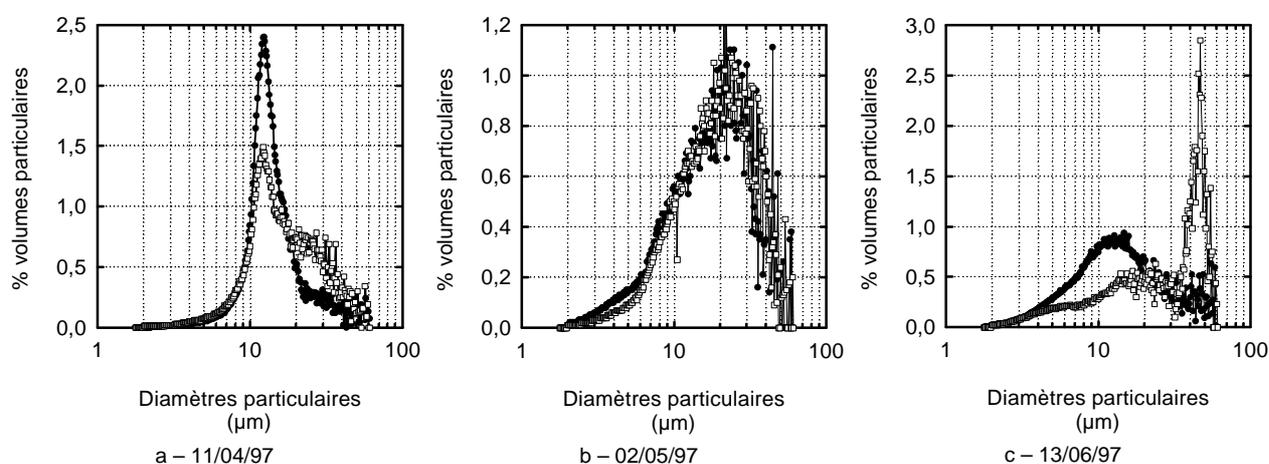


Figure 40 : Spectres microgranulométriques types des populations particulaires en suspension dans l'estuaire amont de la Seine durant l'étiage 1997. —●— amont de Rouen (pk 206,30), —□— aval de Rouen (pk 265,55).

La présence de ces nombreuses diatomées d'un diamètre de 45 à 50 µm dans la composition des populations particulaires en suspension tend à diminuer la vitesse de chute des particules de l'ensemble de l'échantillon comme c'était le cas en début d'étiage. Le 05/09/97, le matériel particulaire en suspension est très riche en diatomées (Figure 40-c) et les vitesses de chute des particules de diamètre 35 µm sont 100 fois plus faibles que les vitesses de chute mesurées en amont à la même date ($3,8 \cdot 10^{-4} \text{ mm.s}^{-1}$ en aval contre $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ mm.s}^{-1}$ en amont). Les vitesses de chute des particules de diamètre de 12 µm ne présentent pas de différence significative entre l'aval et l'amont.

L'accroissement des débits, en début de crue (14/11/97) et durant les petites crues estivales (04/07/97), gomme l'hétérogénéité amont/aval d'étiage. Les populations de matériel particulaire en aval et en amont de Rouen s'homogénéisent et sont essentiellement composées d'agrégats et de diatomées (Figure 41-a).

Parallèlement à l'augmentation des débits lors de la première montée de crue, un accroissement du mode dominant se produit pour atteindre un maximum entre le 05/12/97 et le 12/12/97, soit plusieurs jours avant le maximum de débits (Figure 41-b). Le matériel particulaire en suspension est composé majoritairement d'agrégats, de débris divers et de radicules. L'accroissement du mode dominant est lié à

l'accroissement de la taille des agrégats. Ce mode dominant, toujours composés d'agrégats, diminue ensuite pour atteindre un minimum en aval et en amont de Rouen en fin de descente du premier pic de crue (Figure 41-c).

Les deuxièmes et troisièmes montées de débits ne provoquent quasiment aucune variation du mode dominant et de la composition des populations particulaires en suspension. Seule, une augmentation du mode dominant, composé d'agrégats, se produit le 06/01/98 en aval de Rouen, sans qu'il ait été possible de trouver d'explication à cette augmentation.

En descente de crue (02/02/98), en aval de Rouen, le mode dominant, composé d'agrégats, augmente (Figure 41-d). En fin de crue, le 09/02/98, une différence marquée apparaît dans les populations dominantes entre l'amont et l'aval de Rouen (Figure 41-e). En amont, la population dominante, voisine de 10 à 13 μm , est composée de petits agrégats. En aval de Rouen, la population dominante, voisine de 20 μm , est composée de deux sous populations composées d'agrégats. Pour la première sous population, les tailles de ces agrégats sont comprises entre 13 et 17 μm et entre 17 et 21 μm pour la seconde.

Après la crue, le 10/03/98, les populations de matériel particulaire en suspension en amont et en aval de Rouen sont identiques avec un mode voisin de 10 à 13 μm . Cette population dominante est composée de diatomées de type *Stephanodiscus hantzschii* tout comme le 11/04/97. En aval de Rouen, sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55), la présence de nombreux agrégats de diamètres voisins de 30-35 μm provoque, dans la courbe microgranulométrique, un épaulement identique à celui observé le 11/04/97.

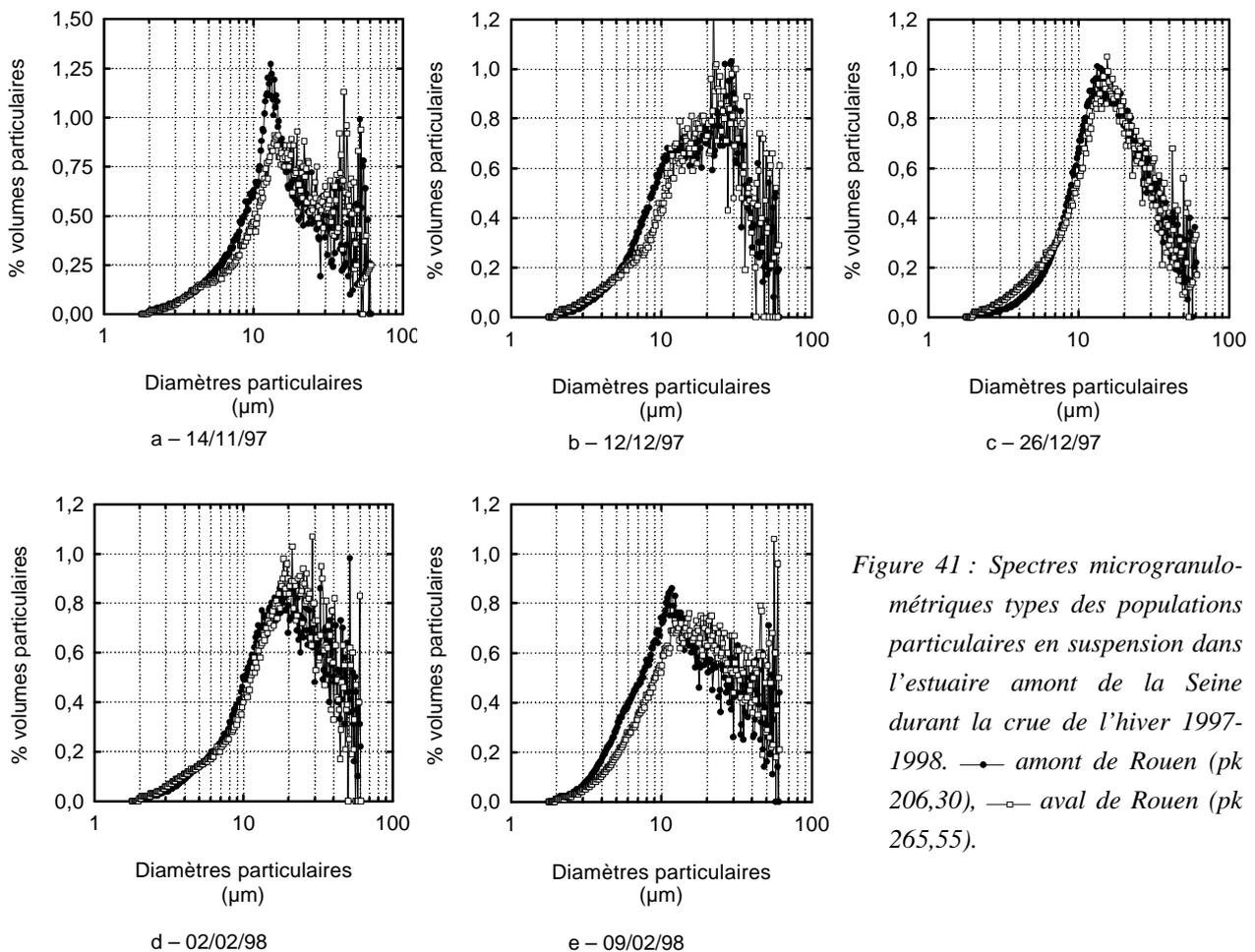


Figure 41 : Spectres microgranulométriques types des populations particulaires en suspension dans l'estuaire amont de la Seine durant la crue de l'hiver 1997-1998. —●— amont de Rouen (pk 206,30), —□— aval de Rouen (pk 265,55).

En fin de crue, les populations de matériel particulaire en suspension sont différentes entre l'aval et l'amont de Rouen. En amont de Rouen (pk 206,30) une population composée d'agrégats domine avec un mode voisin de 10 à 13 μm . En aval de Rouen (pk 265,55) deux sous-populations voisines et essentiellement composées d'agrégats dominent. La première sous-population est composée d'agrégats de 13 à 17 μm ; la seconde sous population est composée d'agrégats de 17 à 21 μm .

Durant cette crue, le matériel particulaire en suspension présente des vitesses de chute très supérieures à celles mesurées durant l'étiage (jusqu'à 100 fois plus importantes). Les vitesses de chute du matériel particulaire en suspension, de 12 μm comme de 35 μm , sont plus faibles en aval de Rouen (Tableau 9). Seuls, les échantillons de première montée crue (12/12/97) et du 06/01/98 se démarquent de cette observation du fait de leur composition différente de celle des autres échantillons.

III.5 - Conclusion

L'étude des flux annuels de matériel particulaire en suspension arrivant dans l'estuaire de Seine confirme que le fleuve constitue la source essentielle de ce matériel particulaire (94 % des apports). Toutefois, l'utilisation de radiotraceurs montre la remontée de matériel particulaire ayant été en contact avec le milieu marin dans l'estuaire amont. Ces remontées n'ont, pour l'heure, pas été quantifiées.

La mesure en continue des concentrations pondérales de MES au barrage de Poses (pk 202,00) permet de compléter les résultats des travaux effectués précédemment par Avoine, 1985, et Meybeck and Idlafkih, 1995, sur la quantification du matériel particulaire d'origine fluvial arrivant à l'estuaire. Les techniques de calcul des concentrations pondérales de MES utilisées à l'heure actuelle donnent des flux particuliers arrivant dans l'estuaire environ 20 % supérieurs à ceux déterminés grâce aux sondes de mesure en continu. En revanche la répartition des flux entre crue et étiage est identique selon les deux modes de calcul (respectivement 90 % et 10 %).

Durant les crues, la présence d'une hystérésis entre concentrations pondérales de MES et débits n'est pas systématique mais peut induire de fortes différences entre concentrations pondérales calculées et mesurées.

L'analyse des concentrations pondérales de MES intra-estuariennes montre une dichotomie entre crue et étiage. En étiage, les concentrations pondérales intra-estuariennes présentent des variations analogues aux cycles semi-lunaires et lunaires de marée. En crue, en revanche, les variations intra-estuariennes des concentrations pondérales de MES suivent les variations du débit fluvial, les variations semi-lunaires et lunaires n'étant plus perceptibles.

D'autre part, durant l'étiage, les concentrations intra-estuariennes sont supérieures à celles arrivant au barrage de Poses (pk 202,00). Inversement, en crue, les concentrations pondérales de MES sont plus importantes au barrage de Poses (pk 202,00) que dans l'estuaire.

Les microgranulométries et les vitesses de chute du matériel particulaire en suspension présentent des variations annuelles, avec elles aussi, une différence crue/étiage. En outre, en étiage et en fin de crue, des différences intra-estuariennes dans ces microgranulométries et ces vitesses de chute apparaissent principalement du fait du développement de diatomées en aval de Rouen.

L'ensemble de ces observations révèle un comportement différent du matériel particulaire en suspension entre étiage et crue. Cette différence de comportement permet une première hiérarchisation des processus hydrosédimentaires au sein de l'estuaire amont entre :

- a – Transport et sédimentation du matériel particulaire en suspension en étiage.
- b – Transport et sédimentation du matériel particulaire en suspension en crue.

Chapitre IV

Transport du matériel particulaire en suspension en étiage

IV.1 - Introduction

Les enregistrements en continu réalisés en plusieurs sites de l'estuaire amont (Rouen – pk 241,80, Val-des-Leux – pk 265,55, Caudebec-en-Caux – pk 310,00) montrent l'existence de variations des concentrations pondérales du matériel particulaire en suspension (Figure 42).

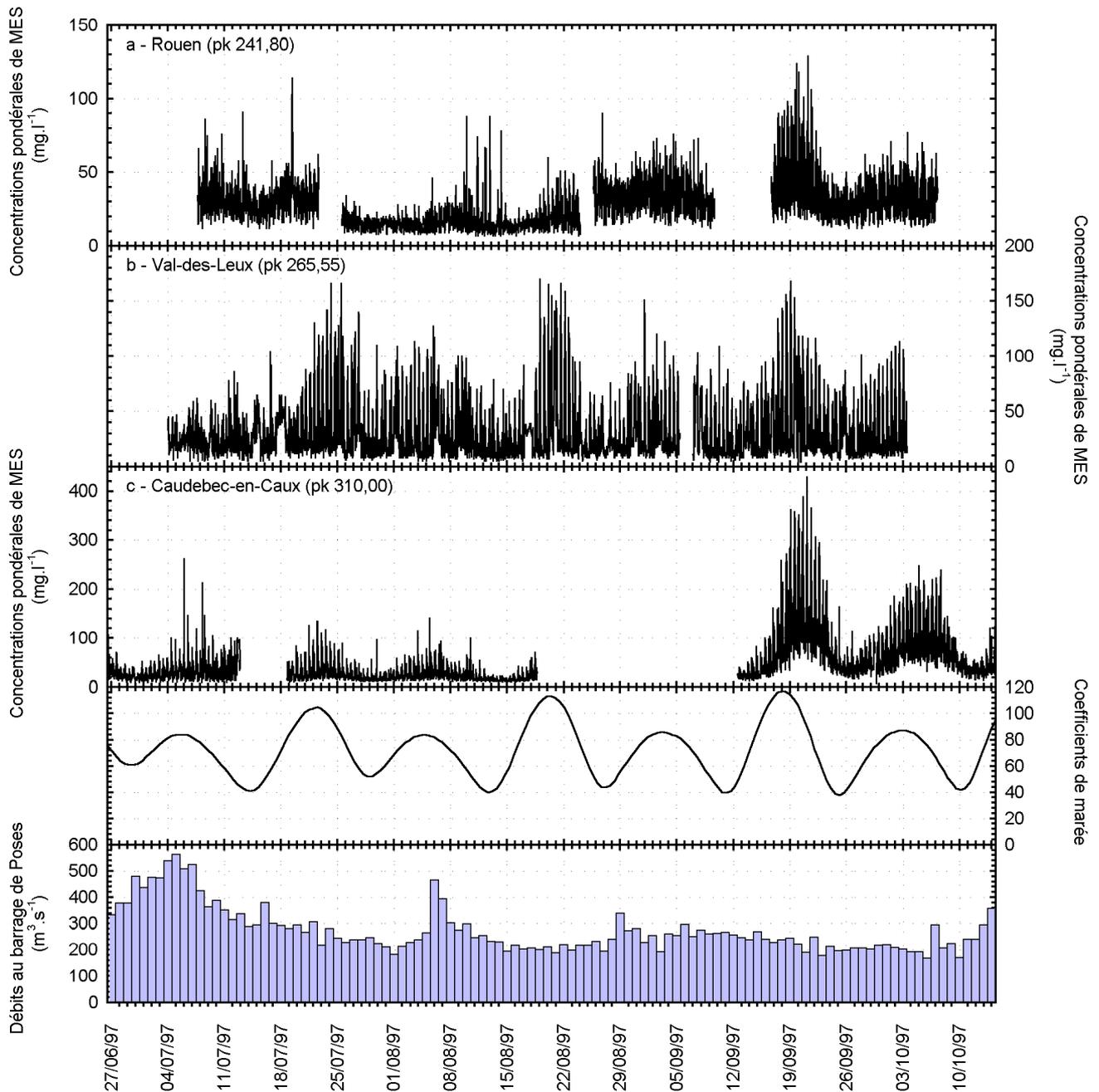


Figure 42 : Evolution des concentrations pondérales de MES et des coefficients de marée sur trois sites de l'estuaire amont de la Seine au cours de la période d'étiage 1997. (a) Rouen (pk 241,80), (b) Val-des-Leux (pk 265,55), (c) Caudebec-en-Caux (pk 310,00). Les échelles de concentrations sont différentes pour les trois sites.

Parmi les stations suivies, celle du Val-des-Leux (pk 265,55) présente une série ininterrompue de mesures sur plus de 5 mois entre le 28/03/97 et le 02/09/97 à la fréquence d'une mesure toutes les 5 minutes. Une analyse spectrale réalisée sur cette chronique confirme les relations étroites qui existent dans l'estuaire amont de la Seine entre concentrations pondérales particulières et marée en étiage (Figure 43). Les fréquences dominantes présentent des valeurs concordantes avec celles rencontrées dans les cycles liés aux marées et aux courants de marée.

Les fréquences les plus élevées mettent en évidence des cycles courts générés par l'alternance des courants de marée au cours du cycle semi-diurne de marée et montrés par Guézennec, 1994, et Guézennec *et al.*, 1996. Les fréquences plus faibles mettent en évidence des cycles sédimentaires longs, liés aux cycles vives-eaux/mortes-eaux.

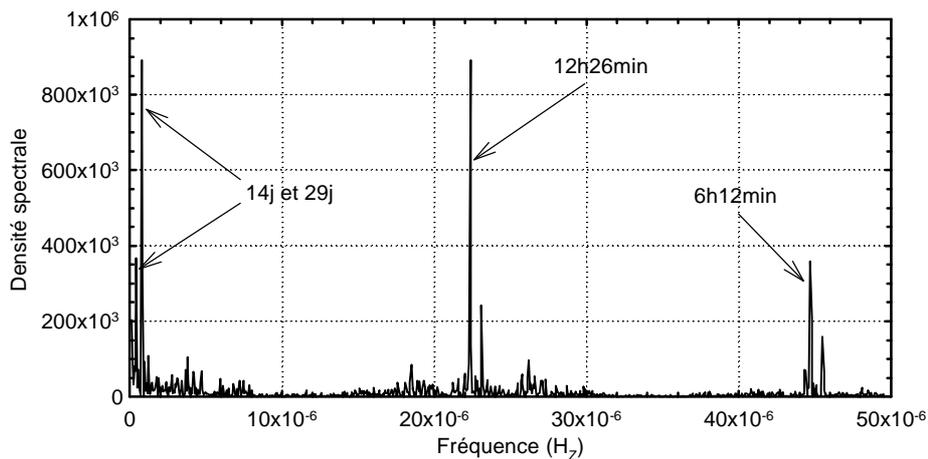


Figure 43 : Analyse spectrale de l'enregistrement des teneurs pondérales en MES mesurées sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) entre le 28/03/97 et le 02/09/97 (fréquence de mesure : 5 minutes).

La connaissance des caractéristiques hydrologiques de l'estuaire en étiage est un préalable nécessaire à la connaissance du transport particulaire en suspension. Dans l'estuaire de la Seine, les études réalisées dans les années 50 montrent une forte dépendance entre morphologie estuarienne et marée. Les nombreux aménagements réalisés depuis cette date nécessitent une actualisation des connaissances concernant les caractéristiques de la marée dans l'estuaire amont.

Les conséquences de ces caractéristiques de marée sur les concentrations pondérales de MES seront analysées afin de comprendre les relations qui existent entre les courants de marée et le matériel particulaire en suspension dans l'estuaire amont.

Ces interactions marées/concentrations pondérales de MES seront ensuite interprétées en terme de flux résiduels de particules à l'échelle des cycles de marée semi-diurnes, semi-lunaires et lunaires.

IV.2 - Propagation de la marée

Les courants constituent le facteur principal du transport particulaire en milieu fluvial et estuarien. Une connaissance préalable des caractéristiques de la marée dans l'estuaire amont de la Seine s'avère donc nécessaire avant d'aborder les questions de transport particulaire en suspension.

Depuis les travaux de Le Floch, 1961, et de Laval, 1955, aucune analyse n'a été menée sur la marée dans l'estuaire amont de la Seine. Les récents aménagements de l'estuaire laissent prévoir des modifications dans les caractéristiques de la marée depuis les années 50, date de ces dernières études.

IV.2.1 - Asymétrie de l'onde de marée

Au cours de sa pénétration dans l'estuaire de Seine l'onde de marée incidente subit une importante déformation qui se traduit par l'apparition d'une asymétrie flot/jusant (Figure 44).

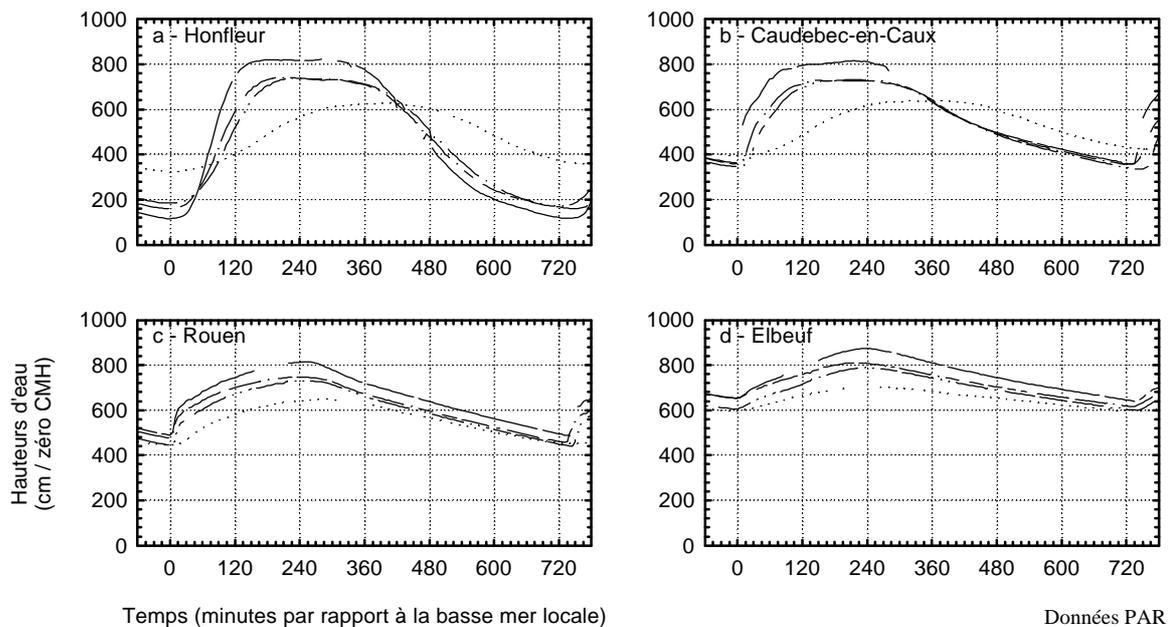


Figure 44 : Evolution de l'asymétrie de l'onde de marée dans l'estuaire de la Seine sur quatre sites : (a) Honfleur (pk 355,85), (b) Caudebec-en-Caux (pk 310,50), (c) Rouen (pk 243,70), (d) Elbeuf (pk 218,80), pour des débits fluviaux au barrage de Poses constants ($250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et différentes conditions de marée : — vives-eaux (le 20/03/96), - - - déchet (le 24/03/96), mortes-eaux (le 18/03/96), — · — revif (le 02/04/96).

Cette asymétrie de l'onde de marée n'existe cependant pas durant la totalité du cycle semi-lunaire. Elle est plus importante en période de vives-eaux, notamment dans l'estuaire moyen et dans le secteur aval de l'estuaire fluvial (Figure 44-a et b).

Dans ce secteur aval, l'asymétrie et la double pleine mer disparaissent totalement en mortes-eaux et sont atténuées en marées moyennes de déchet et de revif. Dans le secteur amont de l'estuaire fluvial

(Figure 44-c et d), la perte d'asymétrie est moins nette, en revanche le front de l'onde en montée de flot est amorti en mortes-eaux. Cette perte d'asymétrie se traduit par une diminution de la durée du jusant et un rallongement de la durée du flot.

IV.2.2 - Progression de l'onde de marée

La Figure 45 présente l'évolution du plan d'eau de l'estuaire de la Seine heure par heure durant une marée semi-diurne moyenne d'étiage. Le front de l'onde de marée met environ 4 heures pour parcourir les 110 kilomètres qui séparent Honfleur (pk 355,85) de Rouen (pk 243,70) soit la durée approximative du flot.

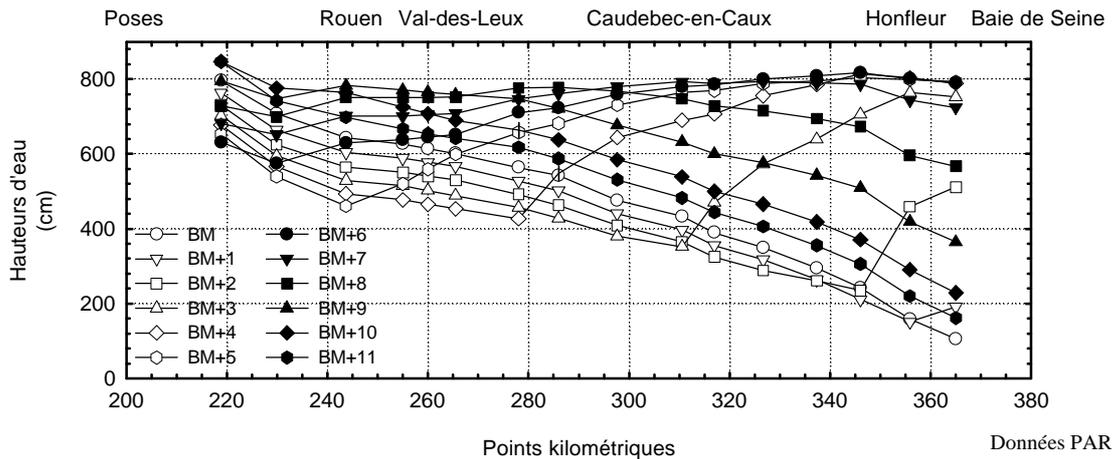


Figure 45 : Etat du plan d'eau de l'estuaire de la Seine au cours d'une marée semi-diurne. Les chiffres indiquent les heures par rapport à basse mer du Havre.

IV.2.3 - Point caractéristique

La Figure 46 présente les niveaux de basse mer et de pleine mer pour une marée de très fortes vives-eaux et une marée de mortes-eaux. Le niveau des basses mers croît de manière importante de l'aval vers l'amont, le niveau des pleines mers reste quant à lui quasiment constant.

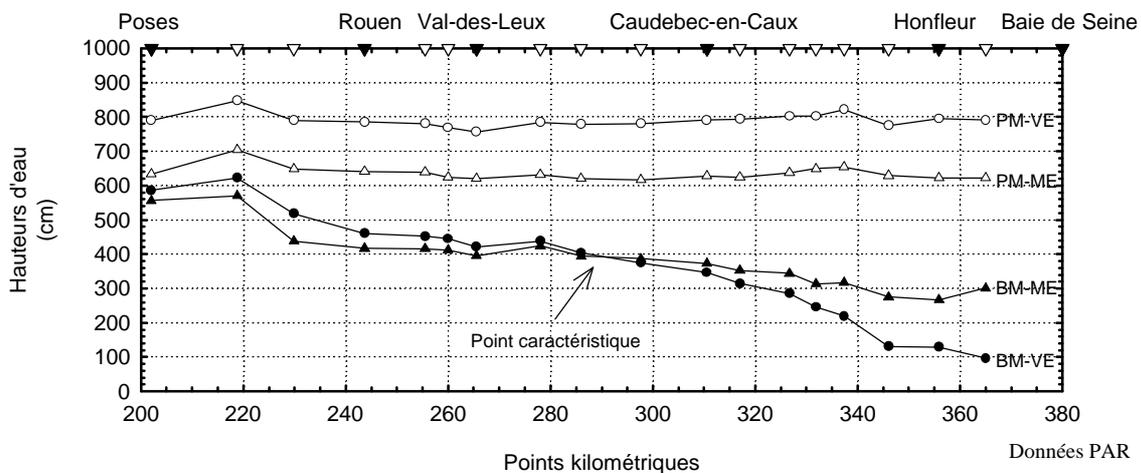


Figure 46 : Niveaux de pleine mer et de basse mer en vives-eaux (—○— pleine mer, —●— basse mer) et en mortes-eaux (—△— pleine mer, —▲— basse mer) dans l'estuaire de Seine pour un débit d'étiage (coefficients 113 et 46 pour un débit du fleuve au barrage de Poses de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Les niveaux de pleines mers sont d'autant plus élevés que les marées sont fortes dans l'ensemble de l'estuaire. Les niveaux de basse mer sont plus élevés dans la partie amont en vives-eaux et plus élevés dans la partie aval en mortes-eaux. L'intersection des niveaux de basses mers permet de situer le point caractéristique entre Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et Heurteauville (pk 297,65).

IV.2.4 - Volumes oscillants

Les cycles de marée semi-diurnes et semi-lunaires entraînent des variations du niveau des basses mers et des pleines mers dans l'estuaire. Ces variations cycliques de niveaux se traduisent par une oscillation des volumes d'eau dans l'estuaire amont.

IV.2.4.1 - Oscillations semi-diurnes

Durant un cycle de marée semi-diurne, les volumes oscillants sont plus faibles en amont qu'en aval de l'estuaire et sont plus importants en vives-eaux qu'en mortes-eaux (Figure 47).

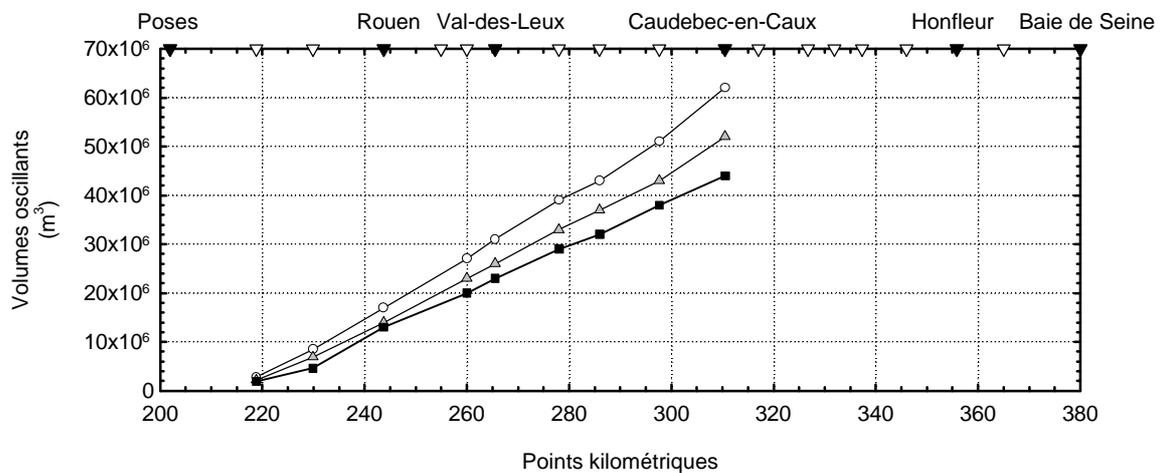


Figure 47 : Volumes oscillants pour une marée de vives-eaux (—○—), une marée moyenne (—△—) et une marée de mortes-eaux (—■—), amont de différents sites de l'estuaire fluvial de la Seine.

Sur le site d'Elbeuf (pk 218,80), le volume oscillant reste voisin de 2.10^6 à 3.10^6 m³ quelles que soient les conditions de marée. A Caudebec-en-Caux (pk 310,50), en revanche, il varie de 62.10^6 m³.s⁻¹ en vives-eaux à 44.10^6 m³ en mortes-eaux.

IV.2.4.2 - Oscillations semi-lunaires et lunaires

Les volumes totaux d'eau, présents par cycle semi-diurne de marée dans l'estuaire, subissent des variations parallèles à celles des cycles semi-lunaires et lunaires de marée (Figure 48). Le calcul de ces volumes d'eau est réalisé, pour chaque cycle semi-diurne, lors de la basse mer.

Lors des mortes-eaux, les volumes d'eau présents dans l'estuaire amont sont minimums, lors des vives-eaux ces volumes sont maximums. En revif, il y a donc augmentation des volumes d'eau présents dans l'estuaire amont (*i.e.* stockage d'eau) alors qu'en déchet ces volumes diminuent (*i.e.* évacuation d'eau).

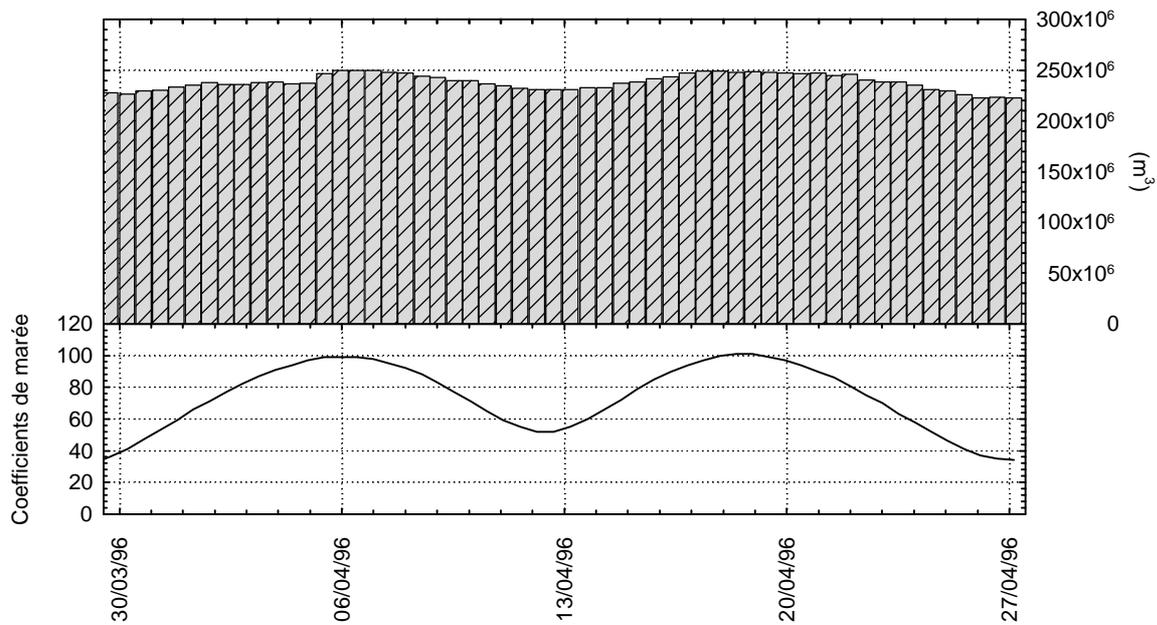


Figure 48 : Volumes totaux d'eau présents par cycle semi-diurne de marée dans l'estuaire amont (▨) en amont d'Heurteauville (pk 297,65) au cours de deux cycles vives-eaux/mortes-eaux (—). Le calcul est réalisé par rapport au niveau des basses mers.

Cette augmentation des volumes d'eau ne présente pas la même importance selon le site considéré. Les volumes d'eau stockés, rapportés par kilomètre de tronçon, sont plus importants dans les tronçons situés les plus en aval (Figure 49-a). La comparaison de ces volumes stockés et des volumes de mortes-eaux dans chacun des tronçons montre une diminution des volumes stockés entre Heurteauville (pk 297,65) et Oissel (pk 229,90) et révèle l'importance de ce stockage en amont d'Oissel (pk 229,90) (Figure 49-b).

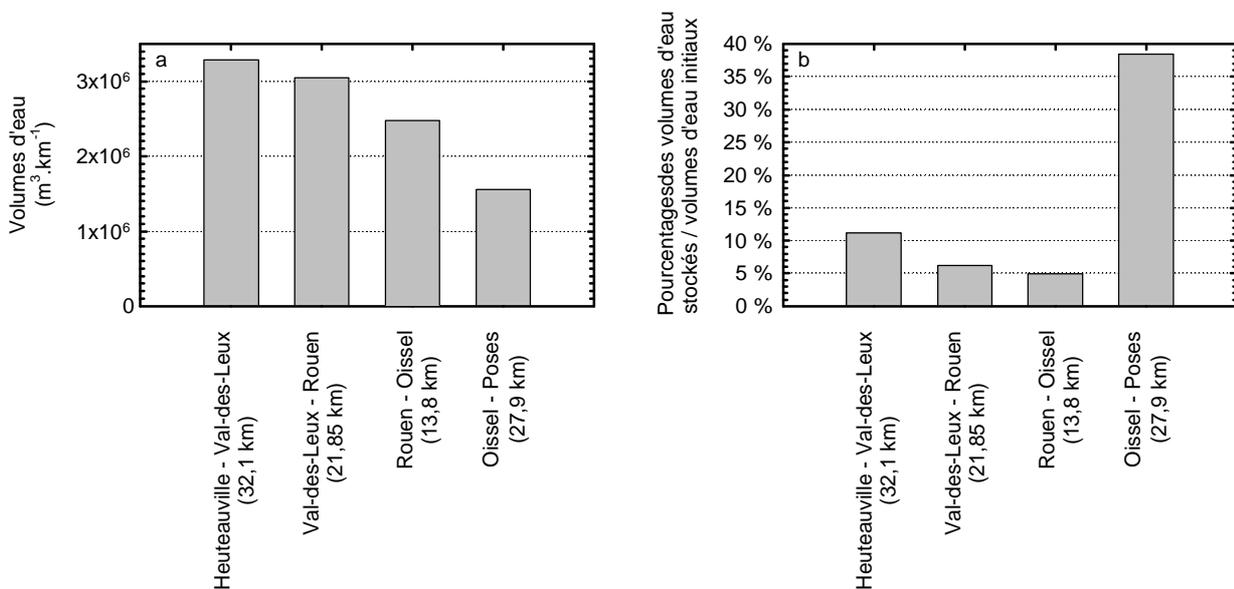


Figure 49 : (a) Volumes d'eau stockés entre mortes-eaux et vives-eaux par kilomètre dans différents tronçons de l'estuaire amont de la Seine. (b) Pourcentages des volumes d'eau stockés entre mortes-eaux et vives-eaux dans différents tronçons de l'estuaire amont de la Seine par rapport aux volumes d'eau initiaux présents dans ces mêmes tronçons en mortes-eaux à basse mer.

Entre Heurteauville (pk 297,65) et le Val-des-Leux (pk 265,50), le stockage d'eau entre mortes-eaux et vives-eaux représente un peu plus de 11 % du volume initial de mortes-eaux. Entre le site du Val-des-Leux (pk 265,55) et Rouen (pk 243,70), ce stockage ne représente que 6 % du volume initial. Entre Rouen (pk 243,70) et Oissel (pk 229,90), il ne représente plus que 5 % du volume initial alors qu'entre Oissel (pk 229,90) et barrage de Poses (pk 202,00), il représente plus de 38 % du volume initial de mortes-eaux.

Bien que les volumes stockés soient moins importants dans le tronçon de Seine situé le plus en amont, celui-ci apparaît plus sensible aux variations de volumes d'eau entre vives-eaux et mortes-eaux.

IV.2.4.2.1 - Calcul des volumes oscillants

Soit V_a le volume d'eau présent initialement dans l'estuaire en mortes-eaux. Au cours du cycle semi-lunaire, le volume d'eau stocké, en " excès " (V_x) s'ajoute à ce volume initial. Le volume total présent dans l'estuaire à un instant donné est donc $V_a + V_x$.

Le calcul du volume d'eau en excès, V_x , dans l'estuaire en amont du point caractéristique (Heurteauville – pk 297,65) est réalisé en période d'étiage sur deux cycles vives-eaux/mortes eaux entre le 29/03/96 (référence : $V_x = 0$) et le 27/04/96.

Les résultats de ce calcul (Figure 50) donnent les valeurs de V_x lors des oscillations du cycle lunaire de marée.

Entre le 29/03/96 et le 05/04/96, le volume d'eau en excès dans l'estuaire en amont du pk 297,65 (Heurteauville) est de $V_x = 22.10^6 \text{ m}^3$ soit près de 10 % du volume d'eau V_a . Ces 22.10^6 m^3 restent cependant inférieurs au volume d'eau introduit dans l'estuaire par le fleuve durant la même période : $186.10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

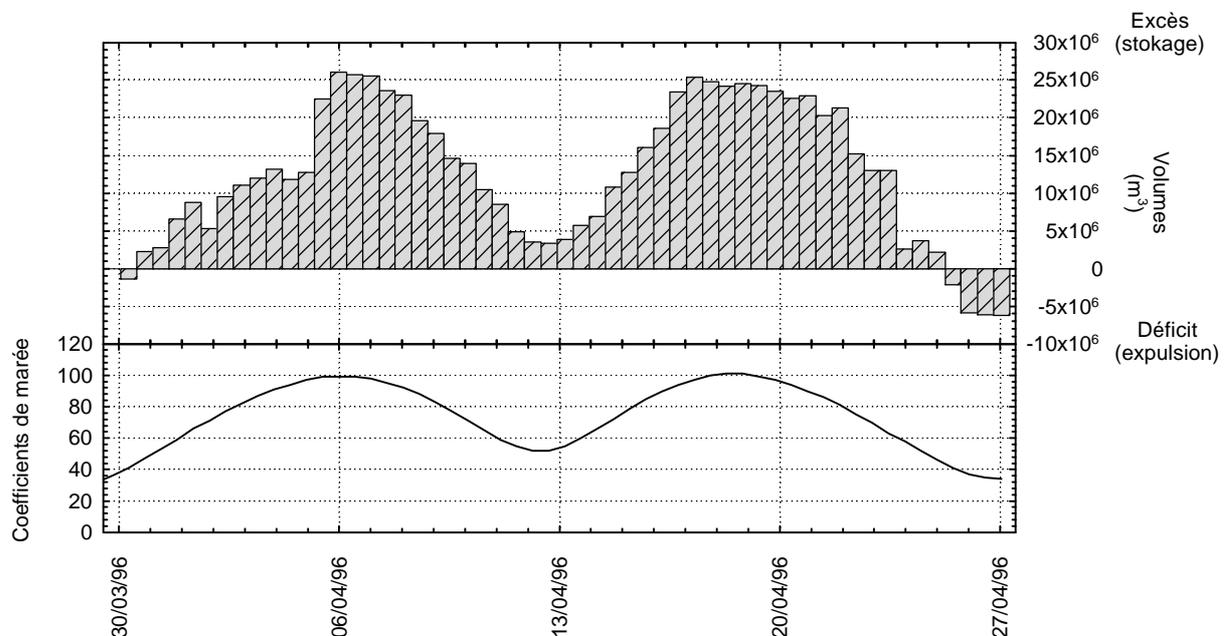


Figure 50 : Volumes d'eau cumulés (en excès ou en déficit) par cycle semi-diurne de marée dans l'estuaire amont (▨) en amont d'Heurteauville (pk 297,65) sous l'effet de la variation du niveau des basses mer au cours de deux cycles vives-eaux/mortes-eaux (—). Les volumes sont calculés à la basse mer et exprimés par rapport au volume de référence du 29/03/96, date de la plus faible marée.

IV.2.4.2.2 - Débits et vitesses résiduels

Ces oscillations du volume d'eau génèrent un débit résiduel d'eau par marée orienté vers l'amont en période de revif et vers l'aval en période de déchet qui se superpose à l'écoulement général amont/aval lié à l'écoulement des eaux fluviales. Sur le site d'Heurteauville (pk 297,65), le débit résiduel est en moyenne de $57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui correspond à des vitesses de l'ordre de $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ environ. Sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) ce débit résiduel est en moyenne de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui correspond à des vitesses voisines de $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

IV.2.4.2.3 - Temps de résidence

Ces variations semi-lunaires et lunaires du volume d'eau estuarien ont, pour autre conséquence, une modification du temps de résidence des masses d'eau au sein de l'estuaire. Ce calcul du temps de résidence est purement théorique. Pour les débits les plus faibles les temps de résidence calculés pour les vives-eaux et les mortes-eaux sont supérieures à la durée du cycle vives-eaux/mortes-eaux lui-même et ont, par conséquent, peu de signification. En revanche, la différence de temps de résidence entre mortes-eaux et vives-eaux permet de bien montrer l'impact de ces variations de ces volumes sur le transit des masses d'eau dans l'estuaire amont.

Dans le secteur aval de l'estuaire fluvial, par faibles débits ($100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), les temps de résidence entre vives-eaux et mortes-eaux peuvent être accrus d'une dizaine de jours (Figure 51-a). Pour des débits voisins de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la différence de temps de résidence entre vives-eaux et mortes-eaux n'est plus que de deux jours.

Plus en amont, ces différences de temps de résidence, entre vives-eaux et mortes-eaux, sont plus faibles mais peuvent atteindre 5 jours lors des faibles débits (Figure 51-b).

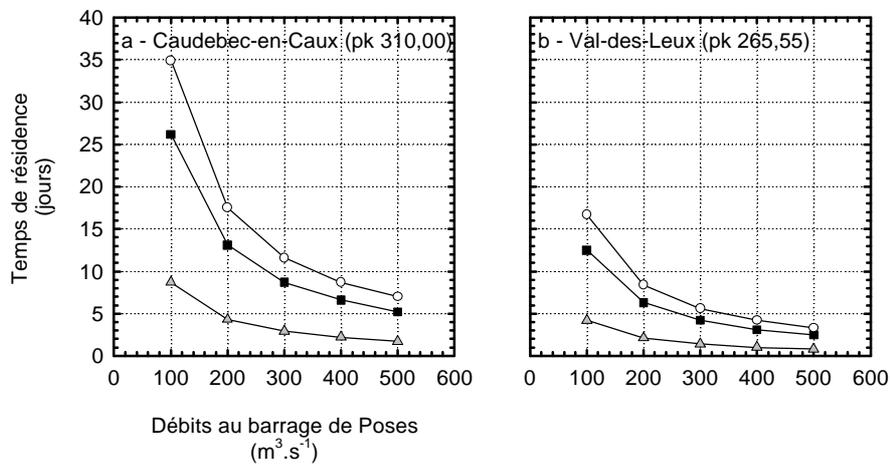


Figure 51 : Temps de résidence des eaux sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) et de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) en marée de vives-eaux (—○—) et de mortes-eaux (—■—), (—△—) différentiel mortes-eaux/vives-eaux.

IV.2.5 - Marnages

L'évolution des marnages pour une marée de vives-eaux et une marée de mortes-eaux et des débits au barrage de Poses (pk 202,00) voisins de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est présentée Figure 52.

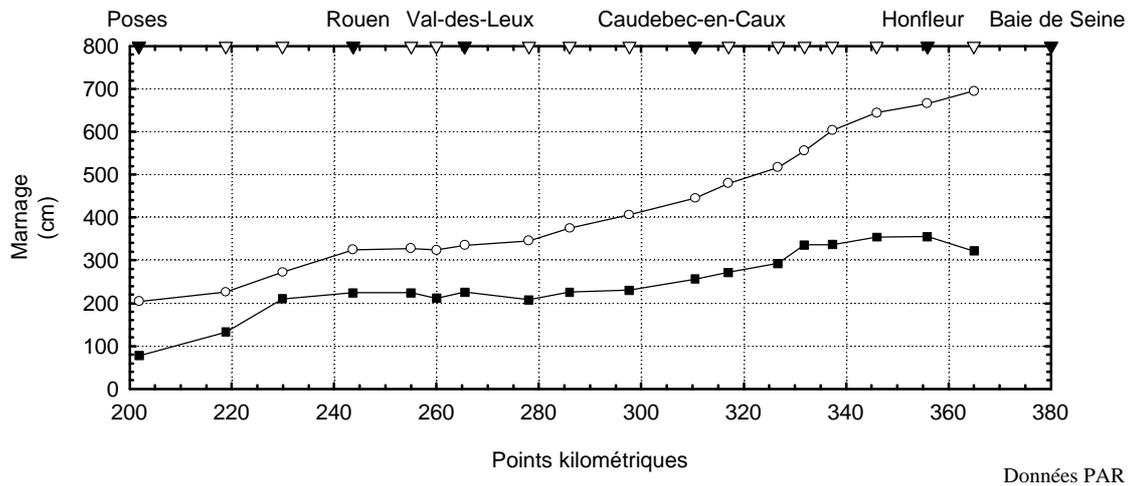


Figure 52 : Marnages dans l'estuaire de la Seine en vives-eaux (—○—) et en mortes-eaux (—■—) pour des débits fluviaux au barrage de Poses de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

En vives-eaux, l'estuaire dans sa globalité présente une hyposynchronie. Toutefois, entre Duclair (pk 278,00) et Rouen (pk 243,70), l'estuaire amont présente une synchronie.

En mortes-eaux, l'estuaire est faiblement hypersynchrone dans sa partie aval (entre la balise A – pk 364,77 et Courval (pk 326,68), le marnage diminue ensuite jusqu'à Duclair (pk 278,00). Entre Duclair (pk 278,00) et Rouen (pk 243,70), l'estuaire amont est synchrone à faiblement hypersynchrone.

Le site de Rouen constitue un point clef de l'estuaire. C'est en effet à partir de ce site que les marnages décroissent rapidement quelles que soient les conditions de marée, traduisant une importante diminution des effets de la marée en amont du site.

IV.2.6 - Vitesses de courants

Les variations de volumes d'eau dans l'estuaire durant les cycles semi-diurnes et les cycles lunaires et semi-lunaires entraînent des variations des vitesses de courants à chacune de ces échelles de temps. Durant ces cycles, les modifications des caractéristiques des ondes de marées (diminution du marnage, perte de l'asymétrie, diminution de l'escarpement du front de l'onde) laissent prévoir des conséquences sur les vitesses de courants.

IV.2.6.1 - Vitesses mesurées

Les enregistrements de vitesses de courants sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) en 1994 montrent d'importantes différences dans l'occurrence et l'intensité de ces courants pendant les cycles semi-diurnes et semi-lunaires.

IV.2.6.1.1 - Mesures en un point de la colonne d'eau

IV.2.6.1.1.1 - Etale de basse mer - flot

En vives-eaux, l'arrivée du front de l'onde de marée, très raidi, entraîne une brusque inversion des courants et un fort accroissement de leur intensité. Les courants passent quasi instantanément de $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ avec une orientation amont/aval, avant la basse mer, à près de $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ à l'arrivée du flot, avec une inversion du sens de l'écoulement (Figure 53). Les fortes vitesses de courants de ce tout début de flot sont

toutefois de très courte durée (de l'ordre de la minute). Après ce pic de vitesse, les courants diminuent et les vitesses en début de flot s'établissent rapidement autour de 60 à 70 cm.s^{-1} , 2 à 3 minutes après la basse mer.

La courte durée de ce « coup de flot » explique, qu'à la fréquence de mesure de 1 minute, le pic de vitesse de flot ne soit pas toujours mesuré. Ainsi, en tout début de flot, entre -1 et 0 minutes après la basse mer, le pic de vitesse n'est pas mesuré alors qu'en début de flot suivant, entre 742 et 743 minutes après la basse mer, le coup de flot apparaît nettement (Figure 53).

Durant les vives-eaux, il n'y a pas d'étale de courants à la basse mer, seule une légère diminution des vitesses de courants durant une très courte période (1 à 2 minutes) est perceptible.

Pour des coefficients plus faibles, la diminution de l'asymétrie et du raidissement du front de l'onde se traduit par une transition plus douce entre jusant et flot (Figure 54). En fin de jusant, juste avant l'arrivée du flot, les vitesses de courants diminuent et s'annulent. Cet arrêt de l'écoulement est cependant de courte durée car l'arrivée de l'onde de marée toujours très raidi, entraîne une renverse rapide et une accélération des courants ; ceux-ci passent de 20 cm.s^{-1} avec une orientation amont/aval à 50 cm.s^{-1} avec une orientation aval/amont en une quinzaine de minutes. La renverse est cependant moins forte et moins brusque que lors des vives-eaux. En mortes-eaux, la renverse et l'accélération des courants au flot sont beaucoup plus lentes. Un véritable étale de basse mer de plusieurs minutes se met en place (Figure 55).

IV.2.6.1.1.2 - flot

En vives-eaux, un premier maximum de vitesses de courants est atteint immédiatement après la renverse des courants avec des vitesses voisines de 75 cm.s^{-1} (Figure 53).

Après une diminution de ces courants, qui atteignent un minimum 30 minutes environ après la basse mer locale, une nouvelle accélération se produit. Les courants atteignent des valeurs de 75 cm.s^{-1} , 45 minutes après la basse mer.

Les vitesses de courants passent par un nouveau minimum 70 minutes environ après la basse mer, puis une nouvelle accélération des courants se produit, les vitesses ne dépassant pas 65 à 70 cm.s^{-1} . A partir de 100 minutes après la basse mer, les courants diminuent de manière plus marquée en présentant des maxima secondaires vers 130 et 190 minutes après la basse mer. Les vitesses de courants s'annulent à l'étale de pleine mer qui commence 240 minutes après la basse mer.

Pour des marées moyennes (Figure 54), le pic de vitesse associé à l'arrivée de l'onde en vives-eaux n'existe pas. Le premier maximum de courants se produit 5 à 10 minutes après la basse mer locale et atteint 50 cm.s^{-1} . Après l'accélération des vitesses durant ces 5 à 10 premières minutes de flot, l'augmentation des vitesses se poursuit mais de manière moins marquée. Le maximum des vitesses de courants de flot est atteint 60 minutes après la basse mer et atteint 65 à 70 cm.s^{-1} .

Une diminution des vitesses de courants se produit alors durant une quinzaine de minutes ; les courants passent par un minimum voisin de 35 cm.s^{-1} puis accélèrent pour atteindre un nouveau maximum de 65 cm.s^{-1} , 90 minutes après la basse mer. Les vitesses diminuent ensuite en passant par un maximum secondaire 130 minutes après la basse mer. L'étale de pleine mer intervient 240 minutes après la basse mer.

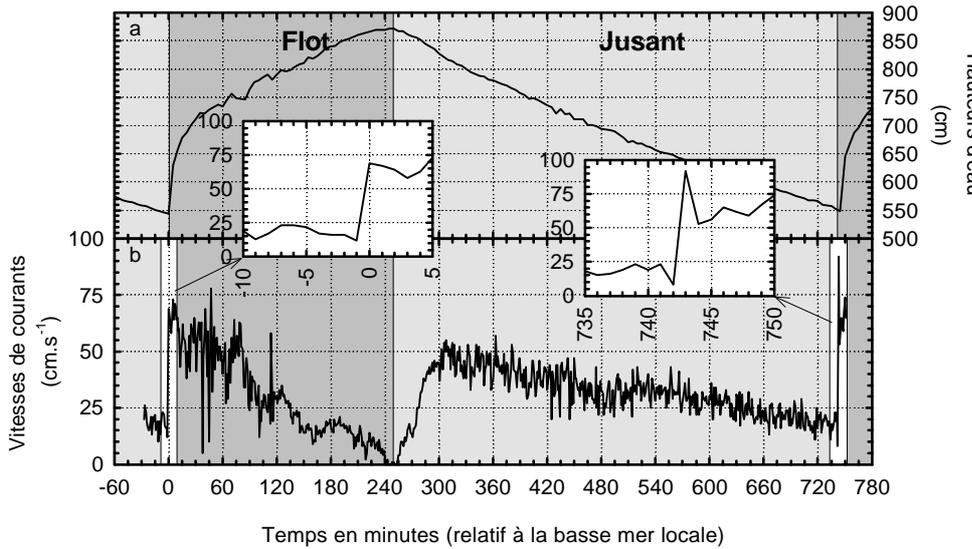


Figure 53 : Hauteurs d'eau (a) et vitesses de courants à 1 m du fond – 1 mesure par minute (b) durant un cycle semi-diurne de marée de vives-eaux sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) (Les 27 et 28 avril 1994, **coefficient 113**, débit fluvial au barrage de Poses 694 $m^3.s^{-1}$).

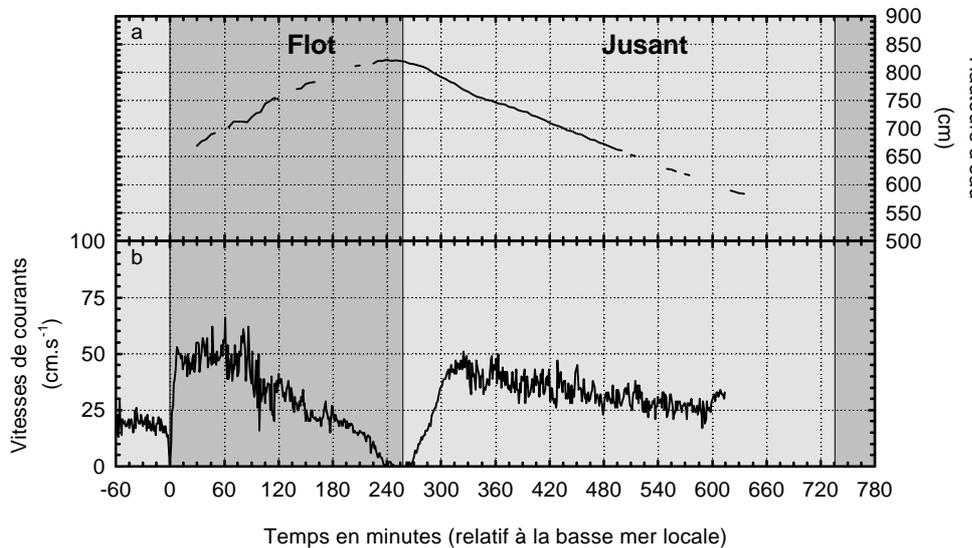


Figure 54 : Hauteurs d'eau (a) et vitesses de courants à 1 m du fond – 1 mesure par minute (b) durant un cycle semi-diurne de marée moyenne sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) (le 12 mai 1994, **coefficient 79**, débit fluvial au barrage de Poses 455 $m^3.s^{-1}$).

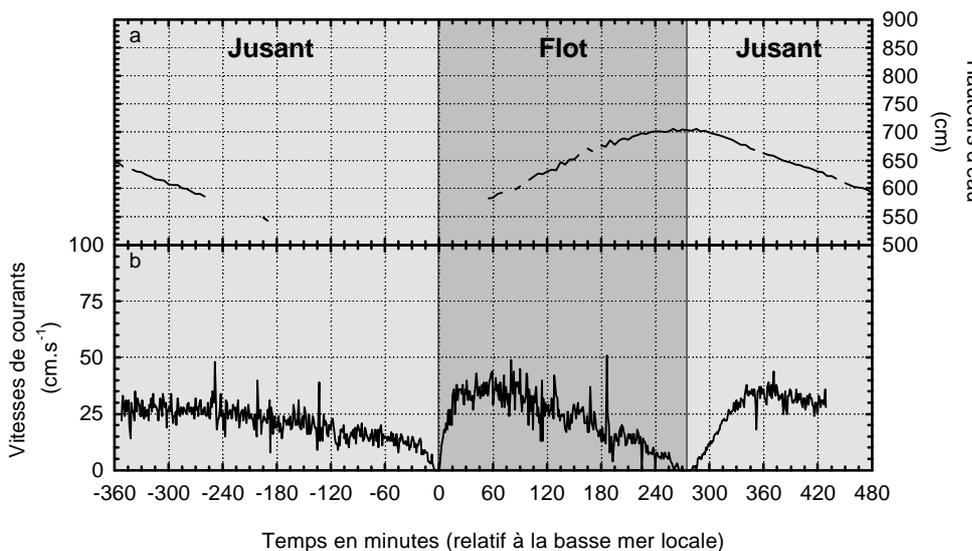


Figure 55 : Hauteurs d'eau (a) et vitesses de courants à 1 m du fond – 1 mesure par minute (b) durant un cycle semi-diurne de mortes-eaux sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) (le 18 mai 1994, **coefficient 51**, débit fluvial au barrage de Poses 482 $m^3.s^{-1}$).

Pour des marées plus faibles (Figure 55), le maximum de vitesse de courants est atteint 60 minutes après la basse mer locale avec des vitesses de 40 à 45 $cm.s^{-1}$. La phase d'accélération des vitesses de

courants en début de flot peut être décomposée en deux périodes. Une première période de 30 minutes durant laquelle les vitesses subissent une accélération marquée suivie d'une seconde période durant laquelle cette accélération est fortement amortie. Après le maximum de vitesses, 60 minutes après la basse mer, les vitesses subissent une décélération suivie d'une nouvelle accélération engendrant un maximum de vitesses vers 90 minutes après la basse mer. 100 minutes après la basse mer, les vitesses de courants diminuent pour s'annuler à l'étale de pleine mer (260 minutes après la basse mer). Durant cette phase de diminution, plusieurs maxima secondaires apparaissent à 130, 160 et 210 minutes après la basse mer.

IV.2.6.1.1.3 - Etale de pleine mer

La durée de l'étale de pleine mer est d'autant plus longue que le coefficient de marée est faible ; cet étale dure ainsi moins de 15 minutes en vives-eaux contre plus de 20 minutes en mortes-eaux et survient d'autant plus tôt que la marée est forte.

IV.2.6.1.1.4 - Jusant

La renverse des courants en début de jusant s'accompagne d'une accélération des vitesses de courants. Cette accélération se fait progressivement durant environ 60 à 70 minutes quel que soit le cycle de marée considéré. Le maximum des courants de jusant est atteint au bout de ces 60 à 70 minutes. Ce maximum de courants est d'autant plus fort que la marée est forte. Il est de 60 cm.s^{-1} pour les vives-eaux, de 50 cm.s^{-1} pour la marée moyenne et de 40 à 45 cm.s^{-1} pour les mortes-eaux. Les vitesses sont inférieures aux vitesses maximales de flot pour la marée de vives-eaux et la marée moyenne. Pour la marée de mortes-eaux en revanche, cette vitesse maximale de jusant est voisine de celle de flot.

Les vitesses maximales de jusant se maintiennent durant environ 60 minutes jusque 360-380 minutes après la basse mer, puis diminuent pour atteindre des valeurs minimales à l'étale de basse mer, quand ce dernier existe ou en fin de jusant pour les marées les plus fortes. Lorsqu'un étale de basse mer existe, les vitesses de courants de jusant décroissent dans les 15 minutes précédant la renverse.

Ces inversions semi-diurnes de courants se font sentir jusqu'en amont d'Elbeuf (pk 218,80) avec des intensités variables selon les conditions de débits au barrage de Poses (pk 202,00) et du coefficient de marée.

IV.2.6.1.2 - Mesures dans la colonne d'eau

L'utilisation du courantomètre profileur à effet Doppler permet de préciser les variations de vitesses de courants dans la colonne d'eau (Figure 56, Figure 57 et annexe VIII). Les enregistrements de courants réalisés les 21 et 22 avril 1996 sur le site de Moulineaux (pk 258,50) (≈ 10 m du bord en rive gauche) et les 12 et 13 février 1997 sur le site de Rouen (pk 243,25) (≈ 6 m du bord en rive droite) montrent la structure spatio-temporelle des courants.

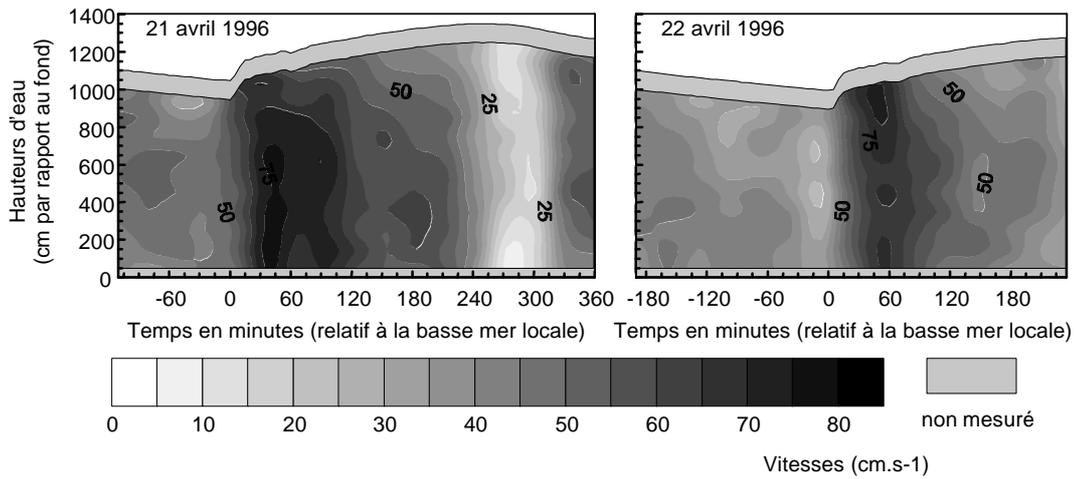


Figure 56 : Vitesses de courants dans la tranche d'eau au cours du temps sur le site de Moulineaux (pk 258,50) (les 21 et 22 avril 1996, coefficients : 86 et 75, débits fluviaux au barrage de Poses : 236 et 237 $m^3.s^{-1}$).

Ces enregistrements montrent les mêmes variations temporelles des vitesses que celles présentées dans le paragraphe précédent et permettent de préciser que ces variations de courants affectent l'ensemble de la colonne d'eau.

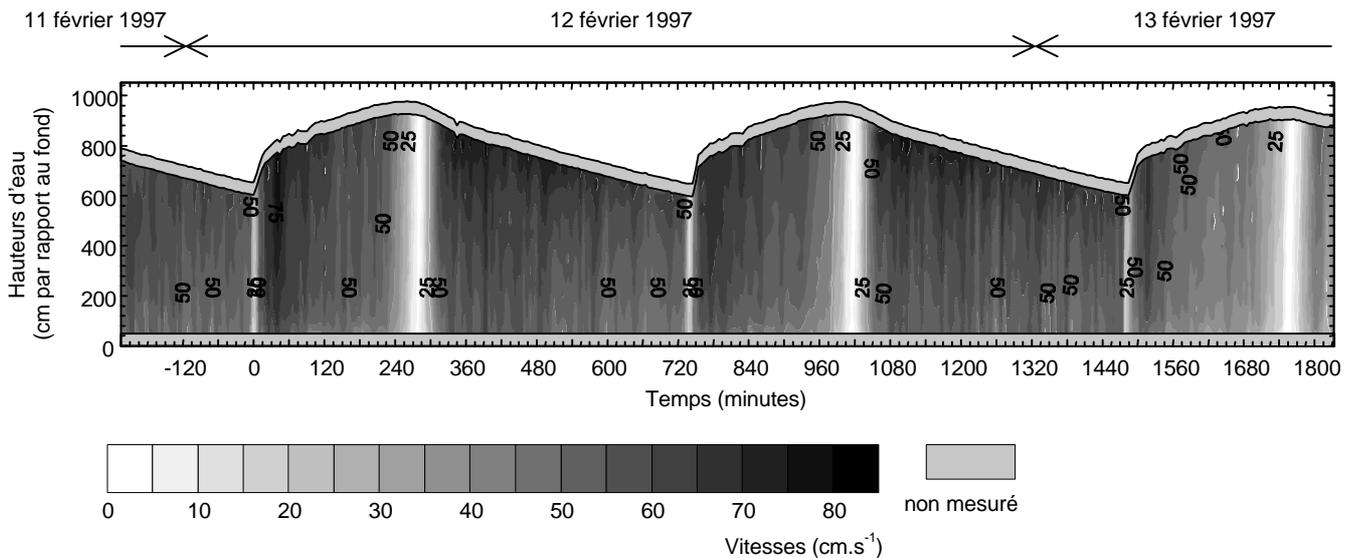


Figure 57 : Vitesses de courants dans la tranche d'eau au cours du temps sur le site de Rouen (pk 243,25) (les 12 et 13 février 1997, coefficients 94, 86 et 78, débits fluviaux au barrage de Poses : 411 et 414 $m^3.s^{-1}$).

IV.2.6.1.3 - Vitesses de frottements

L'évolution des vitesses de frottements, u^* , calculées à partir des profils verticaux de vitesses (voir page 54) montre d'importantes variations au cours du cycle de marée (Figure 58 et Figure 59). Ces vitesses de frottements sont comprises entre 0,2 $cm.s^{-1}$ lors de l'étale de pleine mer et de 3,5 $cm.s^{-1}$ au début du flot.

Sur les 2 sites, les vitesses de frottements u^* présentent une grande stabilité au cours du jusant avec des valeurs voisines de $1,75 \text{ cm.s}^{-1}$ pour la campagne réalisée à Moulineaux (pk 258,50) et de $2,2 \text{ cm.s}^{-1}$ pour la campagne réalisée à Rouen. Une légère diminution de ces vitesses peut être constatée en fin jusant. Des variations importantes de ces vitesses de frottements apparaissent au cours du flot.

Entre 0 minute et 60 minutes après la basse mer locale les vitesses de frottements connaissent une importante augmentation, le maximum étant atteint 60 minutes après la basse mer locale.

Entre 60 et 240 minutes après la basse mer locale, les vitesses de frottements décroissent de façon quasi linéaire.

Vers 240 minutes après la basse mer locale alors que dans la colonne d'eau, les vitesses de courants sont très faibles, les vitesses de frottements u^* restent élevées.

Entre 240 et l'étalement de pleine mer, les vitesses de frottements diminuent rapidement et atteignent un minimum aux environs de 285 minutes après la basse mer.

L'accroissement des vitesses de frottements, au début du jusant (entre 285 et 350 minutes après la basse mer), n'est pas aussi marqué que celui du flot.

Le maximum des vitesses de frottements, au cours du flot, est toujours supérieur à celui du jusant. Ce maximum est atteint environ 60 minutes après la pleine mer et décroît très lentement durant le reste du jusant.

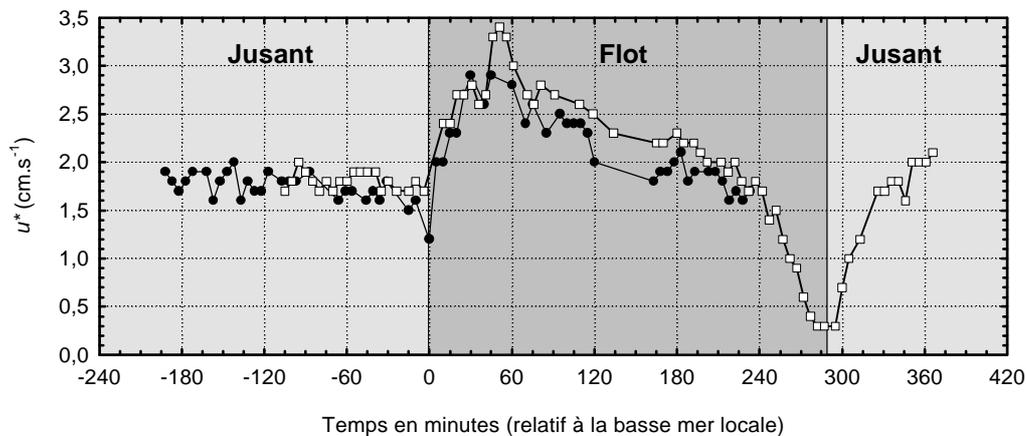
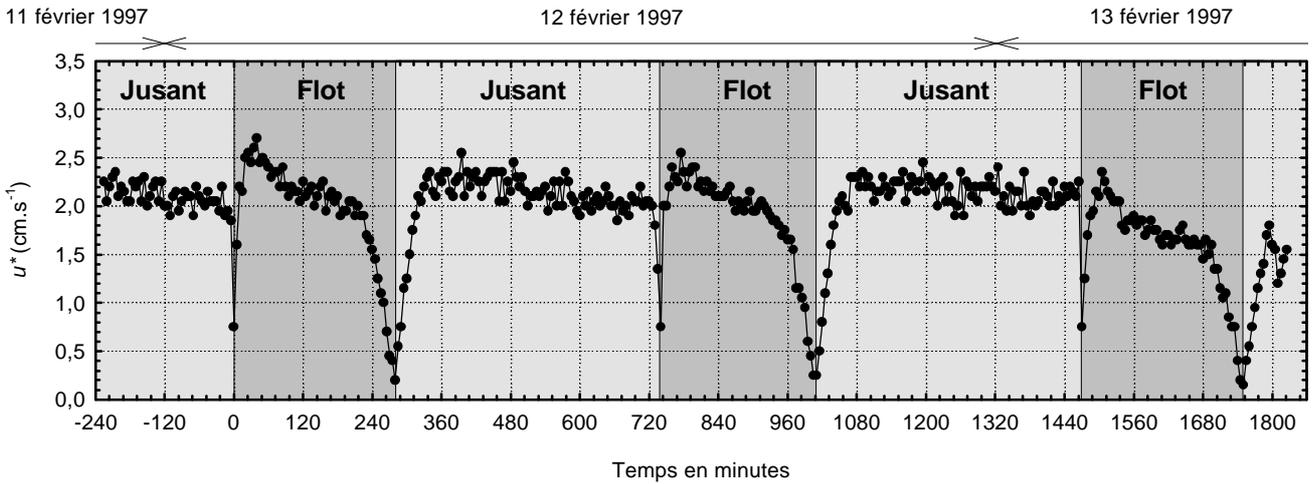


Figure 58 : Vitesses de frottements u^* calculées à partir des profils verticaux de vitesses de courants sur le site de Moulineaux (pk 258,50) les 21 (—□—) et 22 (—●—) avril 1996. Coefficients de marée : 86 et 75. Débits au barrage de Poses : 236 et $237 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

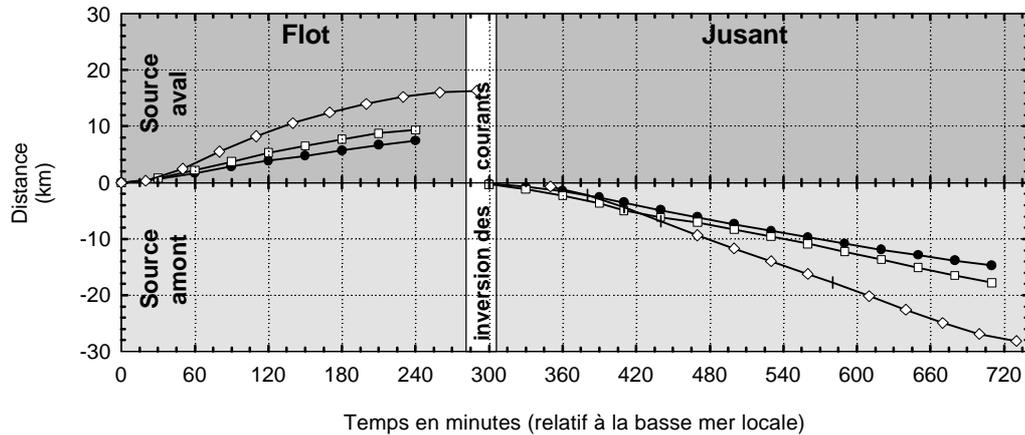
Avec la diminution de la force de la marée, les vitesses critiques d'érosion de flot et de jusant décroissent. Toutefois, cette diminution des vitesses de frottements se fait surtout sentir sur les périodes de flot (Figure 59). Pour des coefficients de marée inférieurs à 80, il n'y a plus de différence entre les vitesses maximales de frottements de flot et de jusant.



IV.2.6.2 - Distances lagrangiennes

Le calcul des distances lagrangiennes (*vitesses * temps*) permet de déterminer la distance parcourue, donc l'origine, d'une masse d'eau et des particules associées passant à hauteur d'un site d'observation.

Sur les trois sites de Rouen (pk 242,90), Val-des-Leux (pk 265,55) et Vatteville-la-Rue (pk 318,00), les distances lagrangiennes de flot sont plus courtes que celles de jusant, traduisant un transport résiduel d'eau sur le cycle semi-diurne de marée de l'amont vers l'aval (Figure 60). Ce transport résiduel est voisin de 10 km pour les sites amont et de 15 km pour les sites aval.



Les déplacements de particules associées à la masse d'eau se font donc sur une plus grande distance dans le secteur aval de l'estuaire fluvial. Durant le flot, une particule en suspension dans la partie aval de l'estuaire peut parcourir jusqu'à 15 kilomètres. Une particule en suspension dans le secteur de Rouen ne parcourra, elle, qu'une dizaine de kilomètres durant le flot. Au cours, du jusant, une particule en

suspension dans la partie aval de l'estuaire parcourt environ 30 kilomètres. Dans le secteur de Rouen, une particule en suspension, ne parcourra qu'une quinzaine de kilomètres.

IV.2.6.3 - Hétérogénéités spatiales des vitesses de courants

Dans les paragraphes précédents, des hétérogénéités dans les vitesses de courants sont apparues entre l'amont et l'aval de l'estuaire et entre vives-eaux et mortes-eaux. Elles sont essentiellement liées aux déformations de l'onde de marée et aux variations de la force des marées entre vives-eaux et mortes-eaux.

La Figure 61 présente les hétérogénéités spatiales des vitesses de courants en quatre stations d'une même section de Seine. Ces résultats ont été obtenus sur le site de Moulineaux (pk 258,50) et illustrent bien les hétérogénéités rencontrées sur les sections de Seine pour les autres sites étudiés (Moulineaux pk 258,50, La Bouille pk 260,00, Val-des-Leux pk 265,55 et Caudebec-en-Caux pk 310,00).

Le site de Moulineaux (pk 258,50) est situé dans un méandre en aval immédiat de l'agglomération rouennaise. La rive convexe du méandre, située en rive droite de la Seine présente des profondeurs plus faibles (-2 mètres CMH) que celles de la rive droite, concave (-6 mètres CMH).

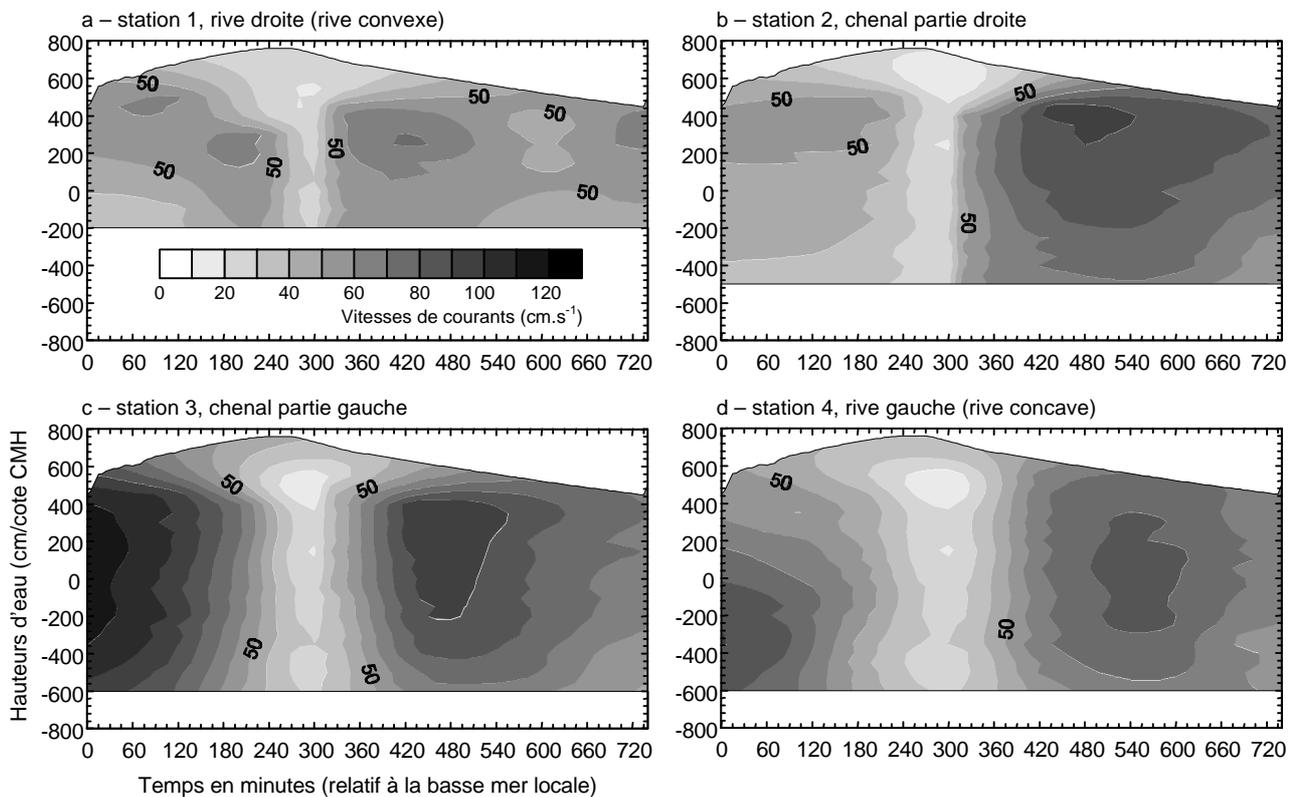


Figure 61 : Evolution spatio-temporelle des vitesses de courants en quatre sites d'une section transversale de Seine sur le site de Moulineaux (pk 258,50) le 20 avril 1996 au cours d'un cycle semi-diurne de marée (coefficient 94, débit fluvial au barrage de Poses $216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Le schéma de variation des vitesses de courants décrit dans les paragraphes précédents est conservé. Toutefois, d'importantes variations dans l'intensité des vitesses de courants apparaissent entre les différentes stations de la section. L'accroissement des courants de flot ne se produit pas avec la même intensité sur toute la section considérée. Sur la rive convexe du méandre (stations 1 et 2), les vitesses de courants atteignent un maximum de $60 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et sont inférieures d'un facteur 1,5 à celles mesurées sur les deux sites de mesures localisés en rive concave (stations 3 et 4) qui atteignent les $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Du fait de la

faible intensité des vitesses de courants de flot en rive convexe (stations 1 et 2), l'étale de pleine mer est plus long près de la rive convexe que près de la rive concave (station 3 et 4).

Durant le jusant, des différences importantes dans l'intensité des vitesses mesurées apparaissent entre rives convexes et concaves. Les vitesses de courants de jusant sont inférieures pour la station 1 située sur la rive convexe du méandre, les vitesses maximales sont de 70 cm.s^{-1} contre 100 cm.s^{-1} pour celles mesurées sur des stations proches de la rive concave. Contrairement à la situation de flot, la station 2 présente des vitesses de courants de jusant comparables à celles mesurées sur les stations 3 et 4 situées en rive concave.

L'existence de ces hétérogénéités spatiales de vitesses de courants n'est pas spécifique aux zones de méandre. Les mesures réalisées sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55), situé dans une portion de Seine quasi linéaire, montrent, elles aussi, des hétérogénéités de vitesses de courants (Figure 62).

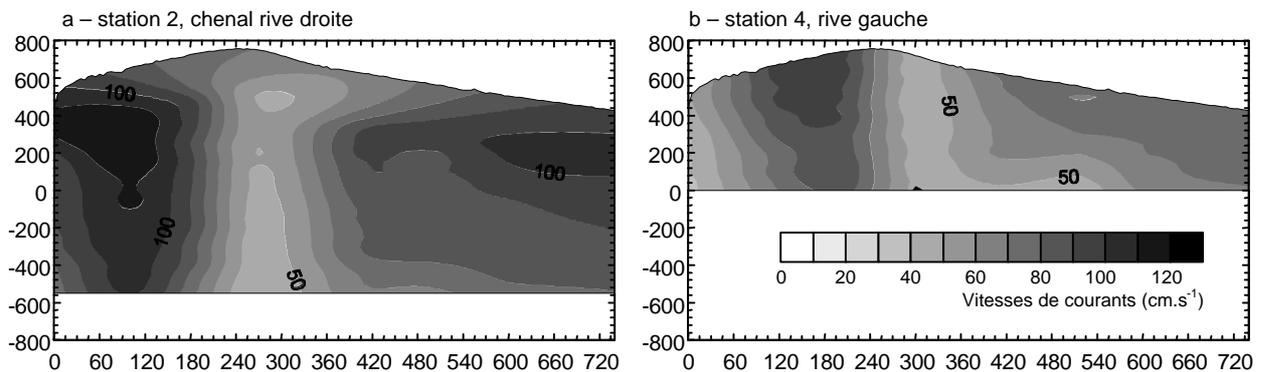


Figure 62 : Evolution spatio-temporelle des vitesses de courants en deux sites d'une section transversale de Seine sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55) le 18 avril 1996 au cours d'un cycle semi-diurne de marée. Coefficient 101, débit fluvial au barrage de Poses $226 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Ces hétérogénéités spatiales des vitesses de courants montrent la complexité des écoulements dans cette partie canalisée de l'estuaire qui ne peut être considérée comme un simple canal rectiligne et hydrauliquement stable.

IV.3 - Relations vitesses – concentrations

IV.3.1 - Cycles semi-diurnes – Transferts verticaux – Remise en suspension

Les travaux réalisés en 1994 sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55), en fin de crue (débits $694 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) mettent en évidence une étroite relation entre les concentrations pondérales de MES et les vitesses de courants en surface. Sur la base de ces observations Guézennec, 1994, et Guézennec *et al.*, 1996, proposent un découpage du cycle semi-diurne de marée selon cinq périodes (Figure 63) :

- 1 – Au début du flot, les courants s’orientent vers l’amont et augmentent fortement. Cette augmentation des vitesses de courants engendre un accroissement des concentrations pondérales en MES en Surface.
- 2 – 60 minutes environ après le début du flot, les vitesses de courants commencent à diminuer. Cette diminution des vitesses de courants n’est pas immédiatement suivie par celle des concentrations pondérales de MES qui commencent à décroître environ 120 minutes après l’heure de basse mer locale. Vitesses de courants et concentrations pondérales continuent ensuite de décroître jusqu’à l’étale de pleine mer.
- 3 – Durant cet étale de pleine mer, les vitesses de courants s’annulent pour s’orienter vers l’aval.
- 4 – Avec l’établissement du jusant, les vitesses de courants augmentent durant près d’une heure pour atteindre un maximum inférieur à celui du flot. Cette augmentation des vitesses de courants est accompagnée d’un accroissement des concentrations pondérales de MES inférieur à celui du flot. Ce maximum de vitesses de jusant se maintient durant une heure. Après cette période, les vitesses commencent à décroître alors que les concentrations restent à leur niveau maximum de flot durant une demi-heure après le début de cette décroissance. La forte augmentation des concentrations pondérales de MES aux environs de 420 minutes après la basse mer et dans une moindre mesure aux environs de 500 minutes est le fait du passage de bateaux de fort tonnage. Cet artefact apparaît révélateur de l’importance du trafic fluvial et maritime dans cette partie de l’estuaire sur le transport sédimentaire ;
- 5 – En fin de jusant, malgré la diminution des vitesses de courants qui atteignent leur minimum, une légère augmentation des concentrations pondérales de MES se fait sentir.

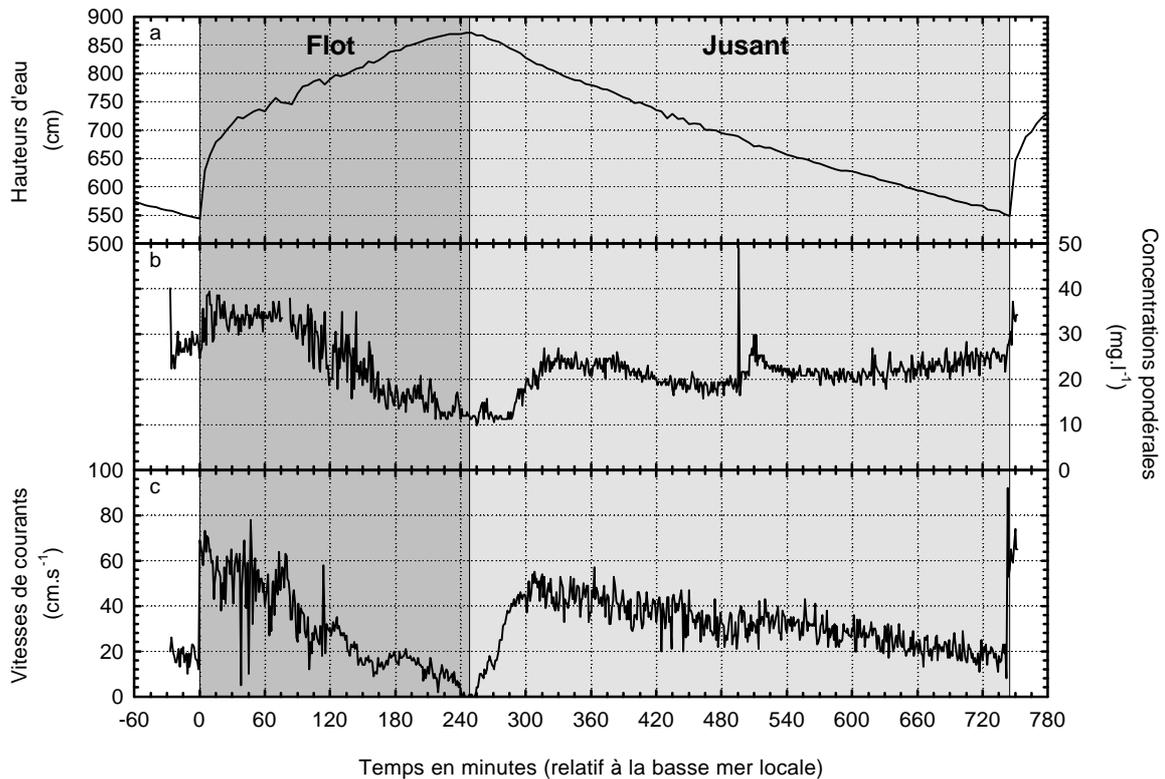


Figure 63 : Evolutions comparées (a) des hauteurs d'eau, (b) des concentrations pondérales de MES et (c) des vitesses de courants à un mètre du fond pour une marée de vives-eaux (coefficient 113) sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) le 27/04/94 pour un débit au barrage de Poses de 694 m³.s⁻¹ (Guézennec, 1994, modifié).

La comparaison des enregistrements de vitesses de courants et des mesures de concentrations pondérales de MES réalisés sur le site du Val-des-Leux, le 23/11/95 en étiage (Figure 64), montrent une évolution identique à celles décrite par Guézennec, 1994, et Guézennec *et al.*, 1996, en fin de crue.

Les accroissements de vitesses de courants se traduisent par des augmentations de concentrations pondérales en suspension, inversement, les diminutions de ces vitesses se traduisent par des diminutions de concentrations de matériel particulaire en suspension. L'importante augmentation des concentrations pondérales de MES, aux environs 420 minutes après la basse mer, est provoquée par le passage d'un bateau à hauteur du site de mesure.

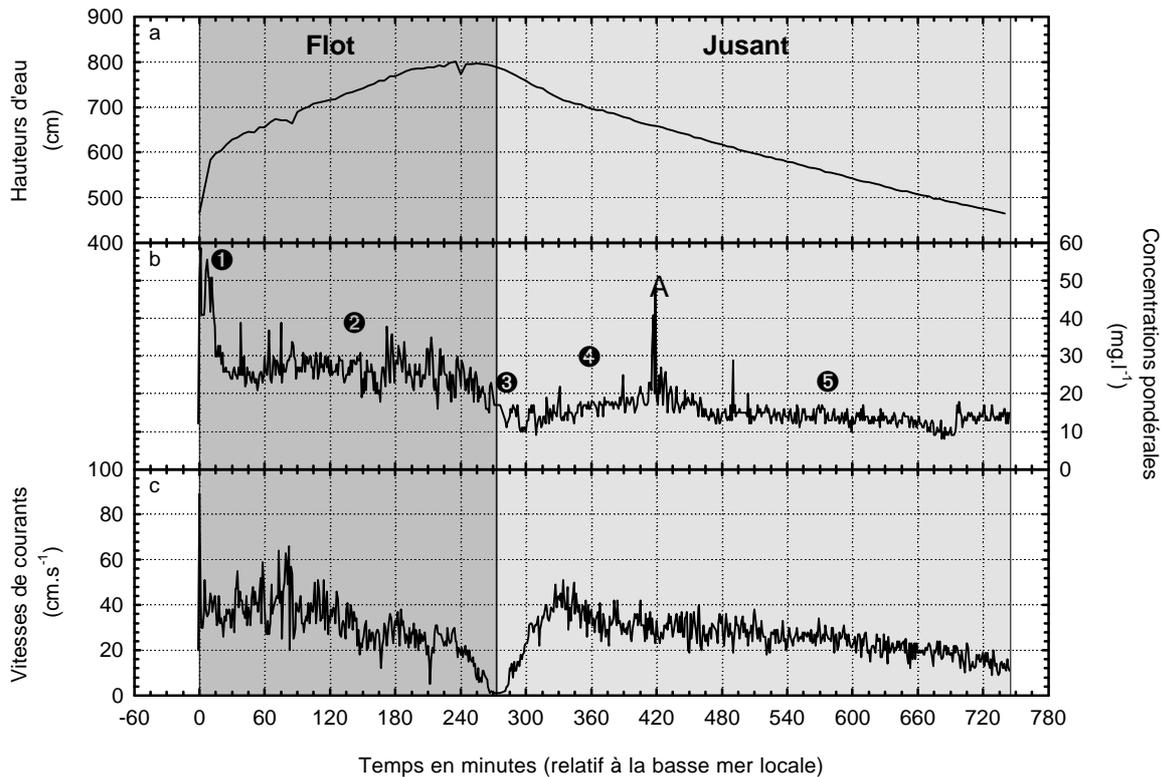


Figure 64 : Evolutions comparées (a) des hauteurs d'eau (fréquence : 5 minutes), (b) des concentrations pondérales de MES à 1 mètre du fond (fréquence 1 minute) et (c) des vitesses de courants à 50 cm du fond (fréquence 1 minutes) sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) le 23/11/95. Coefficient de marée : 104 – vives-eaux, débits au barrage de Poses (pk 202,00) : 380 $m^3.s^{-1}$.

La comparaison directe des vitesses instantanées de courants et des concentrations pondérales de MES mesurées toutes les minutes (Figure 65) révèle que cette évolution est complexe et que les relations vitesses de courants – concentrations pondérales de MES ne sont pas aussi simples que le laissent apparaître les travaux précédents (Guézennec, 1994 et Guézennec *et al.*, 1996). La forte variation de ces deux paramètres à petite échelle de temps et la superposition d'événements indépendants des variations de vitesses de courants de marée, tel le passage de bateaux, rendent difficile la mise en évidence de toute tendance dans ces évolutions.

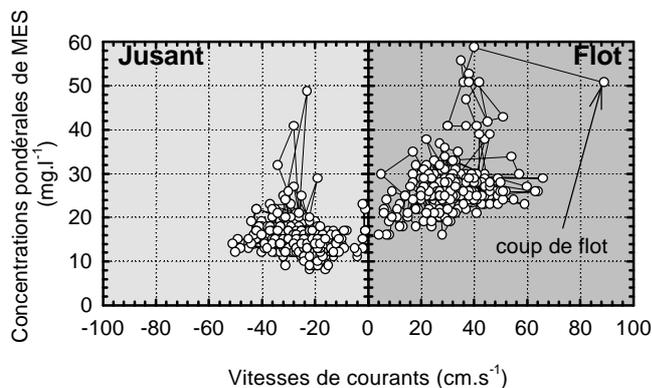


Figure 65 : Evolution des concentrations pondérales de MES en fonction des vitesses de courants sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) le 23/11/95. Mesures brutes toutes les minutes. Coefficient de marée : 104 – vives-eaux, débits au barrage de Poses (pk 202,00) : 380 $m^3.s^{-1}$. Les vitesses de courants de jusant sont notées négativement

Un lissage de ces enregistrements, à l'aide d'une moyenne mobile sur 5 minutes, permet de filtrer les variations de courte période et de mieux mettre en évidence les évolutions parallèles des mesures de

vitesses et de concentrations (Figure 66). Ce lissage a toutefois le désavantage de masquer le « coup de flot » bien visible sur la Figure 65.

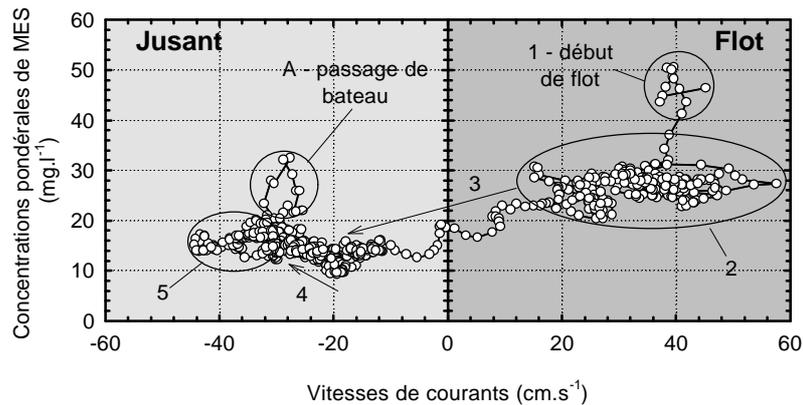


Figure 66 : Evolution des concentrations pondérales de MES en fonction des vitesses de courants sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) le 23/11/95. Moyennes mobiles sur 5 minutes. Coefficient de marée : 104 – vives-eaux, débits au barrage de Poses (pk 202,00) : 380 m³.s⁻¹. Les vitesses de jusant sont notées négativement

L'arrivée du pic de flot, provoque une importante érosion et une augmentation rapide des concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau se produit. Malgré la faible durée de ce pic de flot, les niveaux de concentrations atteints du fait du « coup de flot » se maintiennent pendant plusieurs minutes (phase 1 – Figure 64 et Figure 66). Parmi le matériel particulaire remis en suspension lors du « coup de flot », une fraction ne peut se maintenir durablement en suspension du fait de vitesses de courants de flot trop faibles. Ceci se traduit 20 à 25 minutes après le début du flot par une forte diminution des concentrations pondérales de MES alors que les vitesses de courants elles ont peu varié (transition phase 1 – phase 2). Une seconde fraction particulaire, avec des vitesses de chute plus faible se maintient en suspension durant une grande partie du flot et malgré une diminution des vitesses de courants (phase 2 – Figure 64 et Figure 66).

En fin de flot, alors que les vitesses décroissent et passent sous les 20 cm.s⁻¹, les concentrations pondérales de MES commencent à diminuer. Les vitesses de courants de flot s'annulent lors de l'étale de pleine mer et la décroissance des concentrations pondérales de MES se poursuit. Après l'étale de pleine mer, alors que les vitesses de courants de jusant augmentent, les concentrations pondérales de MES continuent à décroître du fait des phénomènes de « settling lag » et de « scour lag » (Postma, 1967) mais ne sont pas nulles (phase 3 – Figure 64 et Figure 66).

Les concentrations pondérales de MES augmentent en début de jusant alors que les vitesses de courants passent les 20 cm.s⁻¹ (phase 4 – Figure 64 et Figure 66), traduisant une remise en suspension du matériel particulaire déposé durant la phase 3.

Le passage d'un navire engendre une forte perturbation qui provoque une mise en suspension, de courte durée, de matériel particulaire (événement A).

Cet événement masque en partie la stabilisation des concentrations pondérales de MES après l'érosion de début de jusant et malgré l'accroissement des vitesses (phase 5 – Figure 64 et Figure 66).

Bien que les variations de concentrations pondérales de MES et les vitesses de courants apparaissent dépendantes, il est impossible de trouver une relation directe et robuste entre ces deux paramètres.

IV.3.2 - Cycles semi-diurnes – Transferts horizontaux

Outre les variations de concentrations pondérales de MES liées aux variations locales de vitesses, des augmentations de concentrations pondérales de MES se produisent dans la colonne d'eau, indépendamment des variations locales des vitesses de courants. Ces phénomènes sont surtout visibles en vives-eaux et sont très nets sur le site de Caudebec-en-Caux – pk 310,00 (Figure 67).

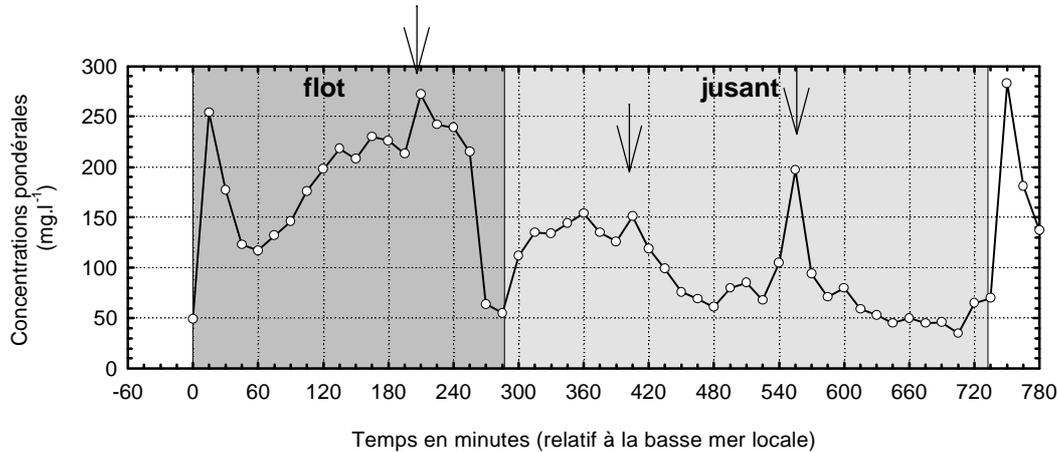


Figure 67 : Variations des concentrations pondérales de MES sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) le 18/09/97 pour une marée de vives-eaux (coefficient de marée 117, débit au barrage de Poses de $236 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les flèches matérialisent les pics de concentrations pondérales de MES retenus comme ayant pour source une zone de dépôt de matériel particulaire fin éloignée du site de mesure.

Durant le flot, un pic de concentration pondérale de MES se produit entre 195 et 240 minutes après la basse mer locale alors que les concentrations pondérales ont commencé à décroître du fait de la diminution des vitesses de courants. Durant l'étiage, 2 maxima de concentrations pondérales de MES se produisent entre de 380 et 420 minutes après la basse mer et entre 525 et 585 minutes après la basse mer.

Sur les sites de Rouen (pk 241,80) et de Val-des-Leux (pk 265,55) de tels phénomènes existent mais ne sont pas aussi nets que sur le site Caudebec-en-Caux. Sur le site de Rouen, des pics de concentrations peuvent être observés en vives-eaux, entre 225 et 255 minutes et entre 465 et 495 minutes après la basse mer (Figure 68).

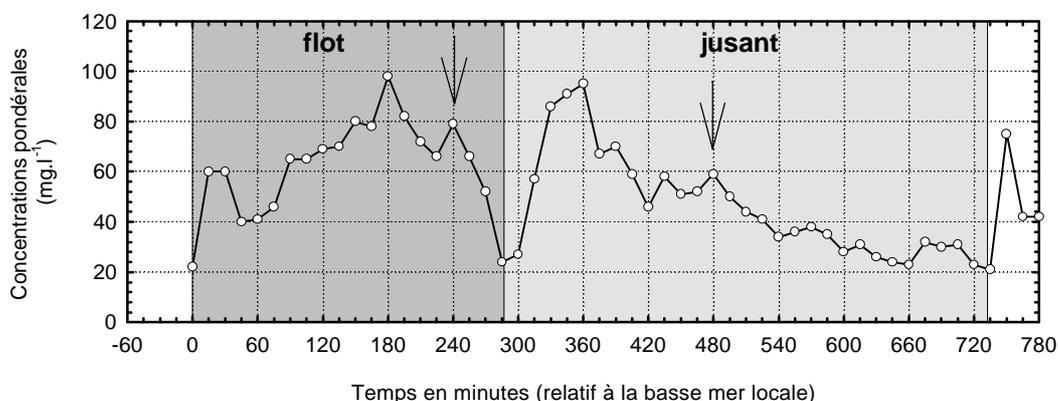


Figure 68 : Variations des concentrations pondérales de MES sur le site de Rouen (pk 241,80) le 18/09/97 pour une marée de vives-eaux (coefficient de marée 117, débit au barrage de Poses de

236 $m^3.s^{-1}$). Les flèches matérialisent les pics de concentrations pondérales de MES retenus comme ayant pour source une zone de dépôt de matériel particulaire fin éloignée du site de mesure.

Sur le site de Val-des-Leux, en vives-eaux, des pics de concentrations peuvent être observés entre 130 et 180 minutes après la basse mer locale, entre 510 et 540 minutes après la basse mer et entre 620 et 660 minutes après la basse mer. En certaines circonstances, une augmentation continue des concentrations pondérale se produit sur le site du Val-des-Leux à partir de 450 minutes après la basse mer (non visible sur la figure).

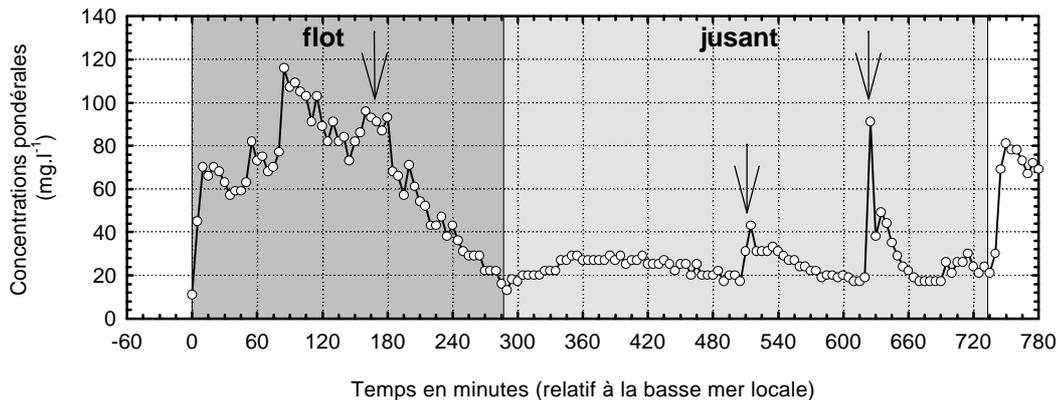


Figure 69 : Variations des concentrations pondérales de MES sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55) le 18/09/97 pour une marée de vives-eaux (coefficient de marée 117, débit au barrage de Poses de 236 $m^3.s^{-1}$). Les flèches matérialisent les pics de concentrations pondérales de MES retenus comme ayant pour source une zone de dépôt de matériel particulaire fin éloignée du site de mesure.

Ces variations de concentrations pondérales en suspension, indépendantes des vitesses locales de courants sont dues au transport en suspension de matériel particulaire depuis une source distante du site observé. Elles peuvent être en partie interprétées à l'aide des distances lagrangiennes (voir page 95) et des cartes de dépôt du matériel particulaire fin (annexe III-c).

Le Tableau 10 donne les distances lagrangiennes pour les pics de concentrations identifiées sur les sites de Caudebec-en-Caux (pk 310,00), de Val-des-Leux (pk 265,55) et de Rouen (pk 241,80).

La comparaison de ces distances lagrangiennes avec les cartes de la couverture sédimentaire du chenal de navigation en aval de Rouen, réalisées par le Laboratoire de Géologie Marine de l'Université de Caen (annexe III-c), permet de vérifier la correspondance entre les sources de matériel particulaire fin, déterminées par la technique des distances lagrangiennes et les dépôts de matériel particulaire fin identifiés sur le terrain.

Pour le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00), la première source, identifiée durant le flot, se situe entre les pk 324,00 et 325,50, c'est-à-dire à hauteur de la vasière localisée en rive convexe du méandre de Vieux-Port. Cette source est située à la limite entre l'estuaire amont et l'estuaire. Il est de surcroît possible que cette augmentation de concentrations pondérales de MES ne soit pas due uniquement à cette vasière mais qu'elle soit liée à une remontée de matériel particulaire depuis le bouchon vaseux.

Tableau 10 : Distances lagrangiennes et localisation des sources de matériel particulaire. Les valeurs positives de distances représentent des distances vers l'aval, les valeurs négatives représentent des distances vers l'amont.

	<i>Minutes par rapport à la basse mer</i>	<i>distance par rapport au site (m)</i>	<i>pk de la source</i>
Caudebec-en-Caux (pk310,00)	195 – 240	14 000 à 15 500	324,00 à 325,50
	380 – 420	-2 200 à -4 500	307,08 à 305,50
	525 – 585	-13 500 à -18 000	296,50 à 292,00
Val-des-Leux (pk265,55)	130 – 180	5 500 à 6 500	271,50 à 272,50
	510 – 540	-8 500 à -9 700	257,05 à 255,85
	620 – 660	-13 500 à -15 500	252,05 à 250,05
	Après 450	au moins -5 500	En amont du pk 260,55
Rouen (pk 241,80)	225 – 255	7 000 à 7 500	248,80 à 249,30
	465 – 495	-6 000 à -7 300	235,80 à 234,50

La deuxième source de matériel correspondrait à une zone de dépôts vaseux située entre les pk 307,08 et 305,50. Cependant, aucun dépôt de matériel particulaire fin n'a été localisé dans ce secteur. La zone de dépôt la plus proche se situe dans le secteur du Trait et de La Mailleraye au niveau du pk 300,00.

La troisième source est localisée entre les pk 292,00 et 296,50 et ne correspond à aucun dépôt de vase répertorié lors des campagnes d'identification de la couverture sédimentaire.

Pour le site du Val-des-Leux (pk 265,55), la source du matériel particulaire, identifiée durant le flot, se situe entre les pk 271,50 et 272,05 dans le méandre de Duclair. Cependant, aucun dépôt de matériel particulaire fin n'a été localisé dans ce secteur.

La première source de matériel particulaire identifiée durant le jusant (450 minutes après la basse mer locale), se situe à proximité du pk 260,55 c'est-à-dire sur la zone de dépôts vaseux identifiée en rive convexe (rive droite) du méandre de La Bouille.

La deuxième source est localisée entre les pk 257,05 et 255,85, dans le méandre de la Bouille où des dépôts de matériel particulaire fin ont été identifiés en rive droite du méandre.

La troisième source est localisée entre les pk 252,05 et 250,05, c'est-à-dire dans une zone présentant de nombreux sites de dépôts de vase (bassins, souilles, zones d'évitages).

Pour le site de Rouen, les sources potentielles de matériel particulaire fin sont probablement nombreuses compte tenu de sa situation par rapport aux infrastructures portuaires. Toutefois, le calcul des distances lagrangiennes de la source identifiée durant le flot situe une source de matériel particulaire entre 7,0 et 7,5 km en aval du site de mesure, c'est à dire entre le pk 249,30 et 248,80, à 2 ou 3 km de la seconde source de matériel particulaire identifiée au Val-des-Leux.

La seconde source de matériel particulaire identifiée pour le site de Rouen se situe entre les pk 235,80 et 234,50 c'est-à-dire à l'extrémité aval du secteur des îles dans lequel de nombreuses zones de dépôts de matériel fin ont été identifiées.

IV.3.3 - Modifications des phénomènes semi-diurnes durant les cycles semi-lunaires et lunaires

Comme le souligne Castaing, 1981, les impacts des cycles lunaires sur les mécanismes sédimentaires estuariens ont pour conséquences une modification des phénomènes semi-diurnes et l'apparition de mécanismes spécifiques aux cycles lunaires.

Dans le paragraphe précédent les relations de base entre variations locales des courants de marée et concentrations pondérales de MES ont été établies sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55).

Au cours des cycles semi-lunaires et lunaires, les différences d'intensité des courants de marée entre les périodes de fortes marées et de faibles marées (voir page 89) engendrent des variations de concentrations pondérales en suspension comme en témoignent les enregistrements en continu (Figure 70).

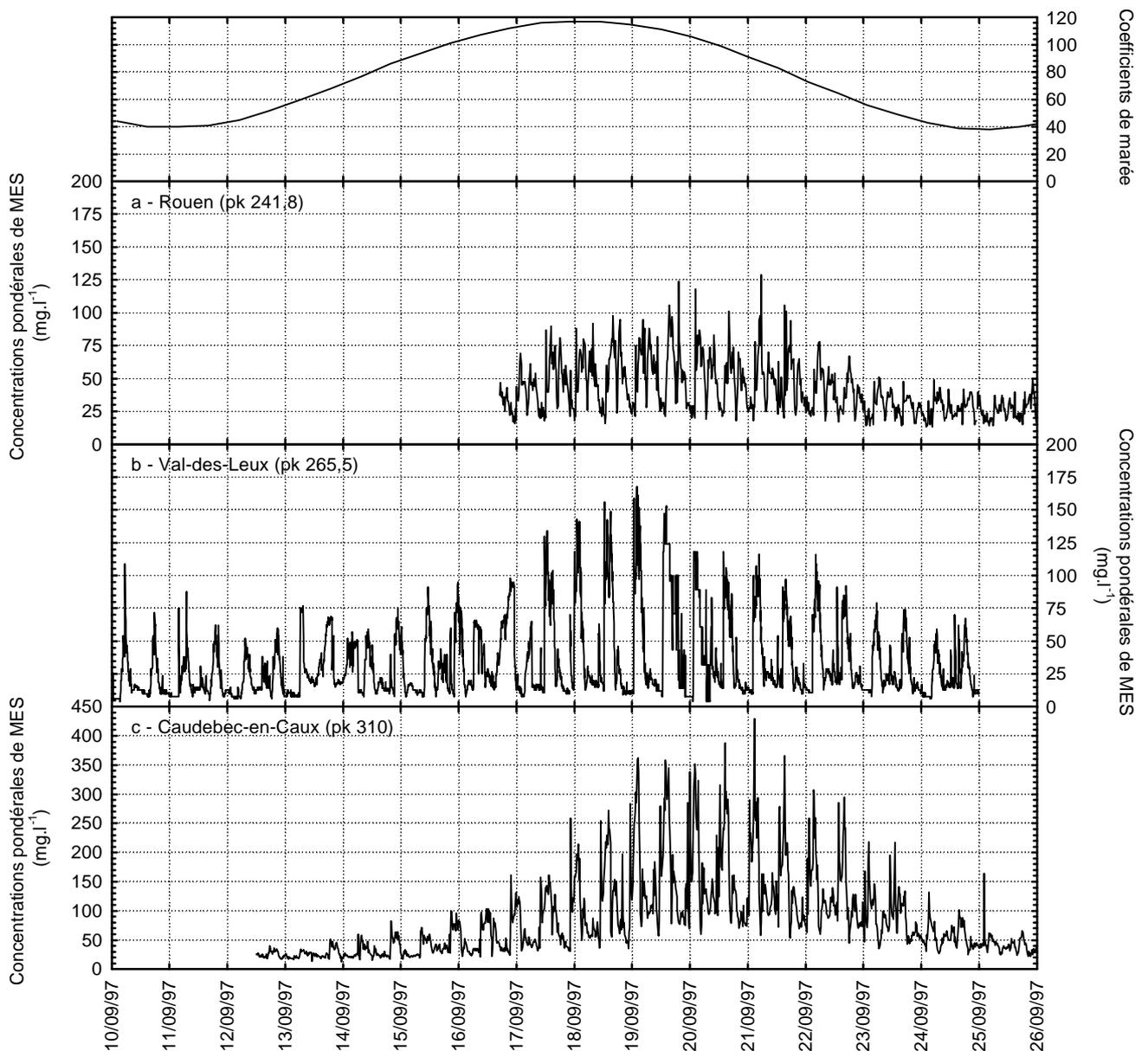


Figure 70 : Evolution des concentrations pondérales de MES et des coefficients de marée sur trois sites de l'estuaire amont de la Seine au cours d'un cycle semi-lunaire de marée. (a) Rouen (pk 241,80), (b) Val-des-Leux (pk 265,55), (c) Caudebec-en-Caux (pk 310,00).

L'augmentation des vitesses de courants entre mortes-eaux et vives-eaux se traduit par un accroissement des concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension, en flot comme en jusant. De même, entre vives-eaux et mortes-eaux, la diminution des vitesses de courants engendre une diminution des concentrations pondérales de matériel en suspension durant le flot et durant le jusant.

En mortes-eaux, le « coup de flot » tend à disparaître (voir page 89) et la forte remise en suspension qui l'accompagne ne se rencontre plus. Cette observation n'est cependant pas systématique et, sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) notamment, il est courant de voir un pic de concentration en tout début de flot même durant les mortes-eaux. Durant les mortes-eaux, sur les sites de Rouen (pk 241,80) et de Val-des-Leux (pk 265,55) l'arrivée du flot provoque parfois aussi un pic de concentration pondérale de MES.

IV.3.4 - Evolutions du matériel particulaire au sein de la colonne d'eau

La Figure 71 présente l'évolution des concentrations pondérales particulières dans la colonne d'eau sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) pour quatre cycles de marée semi-diurnes. Ces concentrations pondérales particulières peuvent être comparées aux profils verticaux de vitesses de courants et aux vitesses de frottements mesurées sur le site de Moulineaux (pk 258,50) les 21 et 22 avril 1996 et de Rouen (pk 241,80) les 12 et 13 février 1997 (voir pages 93 et 94).

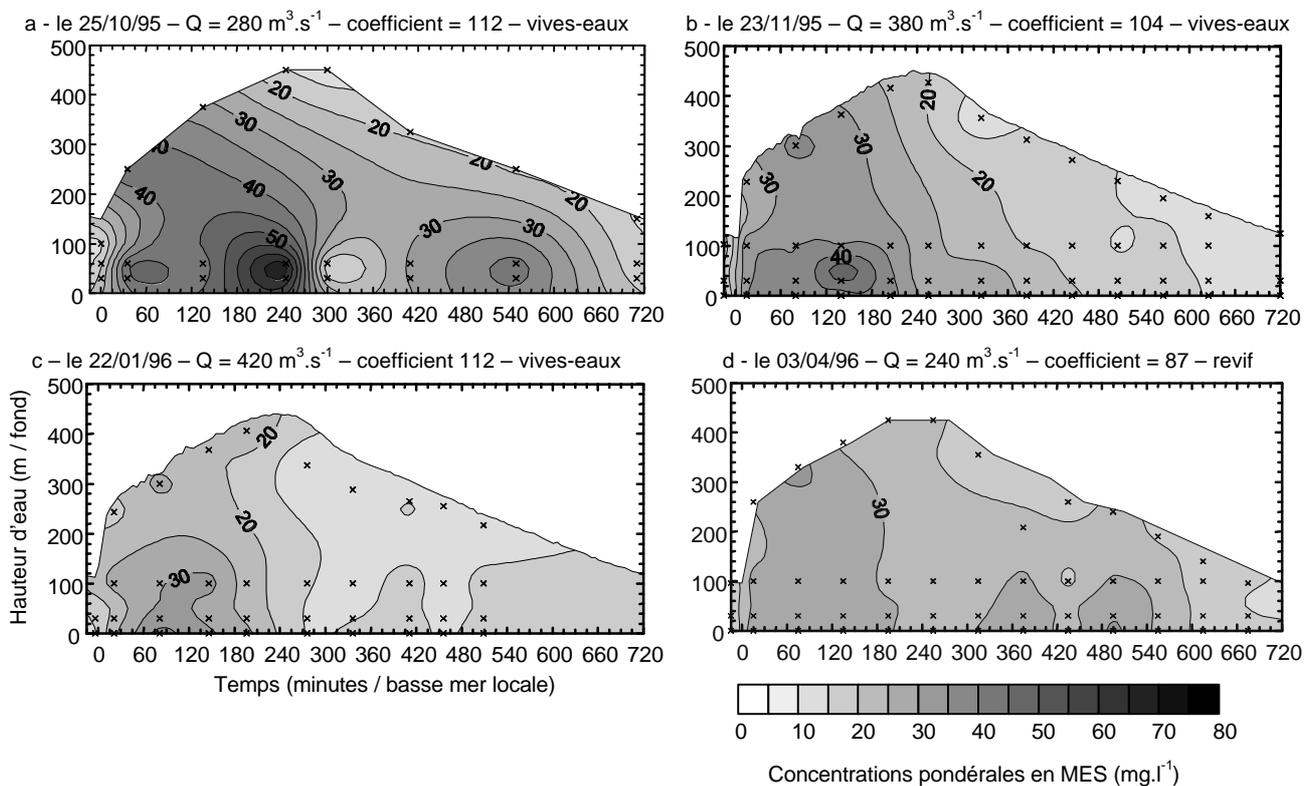


Figure 71 : Concentrations pondérales en MES dans la colonne d'eau au cours de 4 cycles semi-diurnes de marée sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55). Les croix représentent les prélèvements.

Les concentrations absolues de matériel particulaire en suspension sont très différentes entre les différents cycles. Ces différences ne trouvent pas d'explication dans la comparaison directe des conditions de marée et de débits mais s'expliquent en regard du positionnement temporel du cycle étudié dans la chronique hydrologique. Les deux cycles de marée présentant les concentrations pondérales de MES les plus faibles (le 22/01/96 et le 03/04/96 - Figure 71 c et d) font suite à deux crues hivernales qui ont modifié la disponibilité en matériel particulaire susceptible d'être remis en suspension. En revanche,

les cycles du 25/10/95 et 23/11/95 qui se situent en fin d'étiage présentent des concentrations de matériel particulaire en suspension supérieures à celles des deux cycles précédents, même pour des marées moins fortes.

Toutefois, quel que soit le cycle de marée considéré, les évolutions des teneurs particulières dans la colonne d'eau suivent le même schéma type (Figure 72).

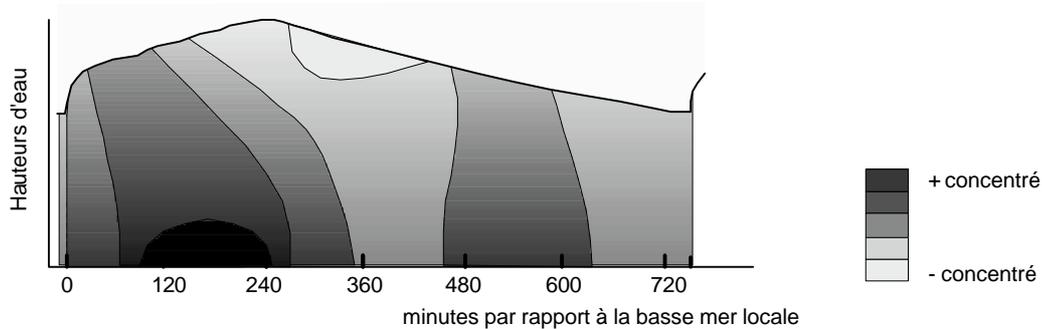


Figure 72 : Schéma d'évolution des concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension dans la tranche d'eau au cours d'un cycle semi-diurne de marée sur le site du Val-des-Leux (pk 366,55).

L'augmentation des concentrations pondérales particulières dans l'ensemble de la colonne d'eau entre 0 minute et 60 minutes après la basse mer est liée à l'augmentation des vitesses de frottements u^* et des vitesses de courants dans l'ensemble de la tranche d'eau. Un gradient surface/fond de concentrations pondérales de MES se développe.

Le maximum d'érosion et de vitesses de courants est atteint 60 minutes après la basse mer. La vitesse de frottement devient maximale et explique les accroissements importants de concentrations pondérales de MES observés au fond.

Entre 60 et 240 minutes après la basse mer locale, les vitesses de frottements décroissent. Les vitesses de courants dans la colonne d'eau, quant à elles, restent élevées entre 60 et 90 minutes après la basse mer et n'amorcent une décélération marquée qu'aux environs de 120 minutes après la basse mer. Cette décélération des vitesses permet la sédimentation des particules de la colonne d'eau et leur concentration au-dessus du fond.

Les maxima observés à proximité du fond vers 240 minutes après la basse mer locale s'expliquent par les faibles vitesses de courants dans la colonne d'eau qui permettent une sédimentation du matériel particulaire alors qu'à proximité du fond, les vitesses de frottements u^* restent suffisantes pour éviter le dépôt des particules en cours de sédimentation. A noter que ces maxima ne se développent que lorsque les concentrations pondérales en suspension sont fortes comme les 25/10/95, 23/11/95 et dans une moindre mesure le 22/01/96 mais pas le 03/04/96.

Cette chute des vitesses de frottements vers 240 minutes après la basse mer, permet le dépôt des particules préalablement concentrées à proximité du fond.

Durant le jusant, les courants sont orientés vers l'aval. Les concentrations pondérales de MES augmentent entre 300 et 360 minutes après la basse mer locale en surface et au fond, parallèlement à l'augmentation des vitesses de frottements et des vitesses de courants dans la colonne d'eau. Le maximum des vitesses de frottements, inférieur à celui du flot, est atteint rapidement et reste constant, expliquant la

faible augmentation des concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau. Cette augmentation, plus visible à proximité du fond, traduit l'érosion du matériel particulaire déposé à la faveur de la renverse des courants autour de l'étalement de pleine mer.

En fin de jusant, la diminution progressive des vitesses de courants dans la colonne d'eau, des vitesses de frottements et des hauteurs d'eau permet la sédimentation d'une partie du matériel particulaire en suspension.

Les accroissements de concentrations pondérales particulières durant le cycle du 25/10/95 aux environs de 540 minutes après la basse mer et sur le cycle du 03/04/96 vers 500 minutes après la basse mer (Figure 71-d) sont engendrés par des passages de navires. Le cycle du 22/01/96 (Figure 71-c) présente un accroissement des concentrations pondérales particulières en fin de jusant non lié aux variations locales de vitesses de frottements et de courants (voir page 107).

IV.3.5 - Distribution des concentrations de matériel particulaire en suspension sur une section transversale

La morphologie de l'estuaire en amont de Rouen, avec la présence de bras secondaires, laisse présumer de l'existence d'hétérogénéités hydrodynamiques entre les différents chenaux. Les connaissances sur les écoulements dans ce secteur de l'estuaire sont, à notre connaissance, inexistantes. Nos observations de terrain ont mis en évidence de complexes jeux de remplissage entre les différents bras. L'onde de marée se propage plus rapidement dans le chenal principal, ce qui a pour conséquence, au tout début de flot, le remplissage d'un bras par ses ouvertures amont et aval. Lors de l'établissement du jusant, aucun phénomène particulier ne semble affecter les bras secondaires par rapport au chenal principal. Seuls, de forts courants ont été observés dans de petits chenaux joignant le chenal principal et les bras secondaires mais ils n'ont pas été mesurés.

Dans de telles conditions, les cycles d'érosion/sédimentation dans ces bras secondaires, s'ils existent, ne répondent pas aux mêmes contraintes que celles décrites en aval de Rouen dans la section canalisée. Compte tenu de la complexité d'un tel système, l'étude des phénomènes hydrodynamiques dans ces bras secondaires n'a volontairement pas été réalisée durant ce travail de thèse. La contribution de ces phénomènes nous semblant marginale et peu significative par rapport au modèle global de transport particulaire de l'estuaire amont.

Dans la partie chenalisée, en aval de Rouen, un décalage temporel existe entre les rives et le chenal de navigation pour l'établissement des courants de flot, de jusant et de l'étalement de pleine mer. Les courants de flot, l'étalement de pleine mer ainsi que les courants de jusant s'établissent en premier lieu le long des rives. Ces décalages de temps sont difficiles à mesurer et sont variables suivant les sites et les conditions hydrologiques.

Des hétérogénéités de vitesses de courants ont été montrées entre les différents points d'une section transversale (voir page 96). Les conséquences de ces hétérogénéités de vitesses de courants sur le transport particulaire fin sont illustrées par la Figure 73 qui présente les variations spatio-temporelles des concentrations pondérales de MES pour les quatre stations étudiées précédemment du point de vue des courants (voir page 96).

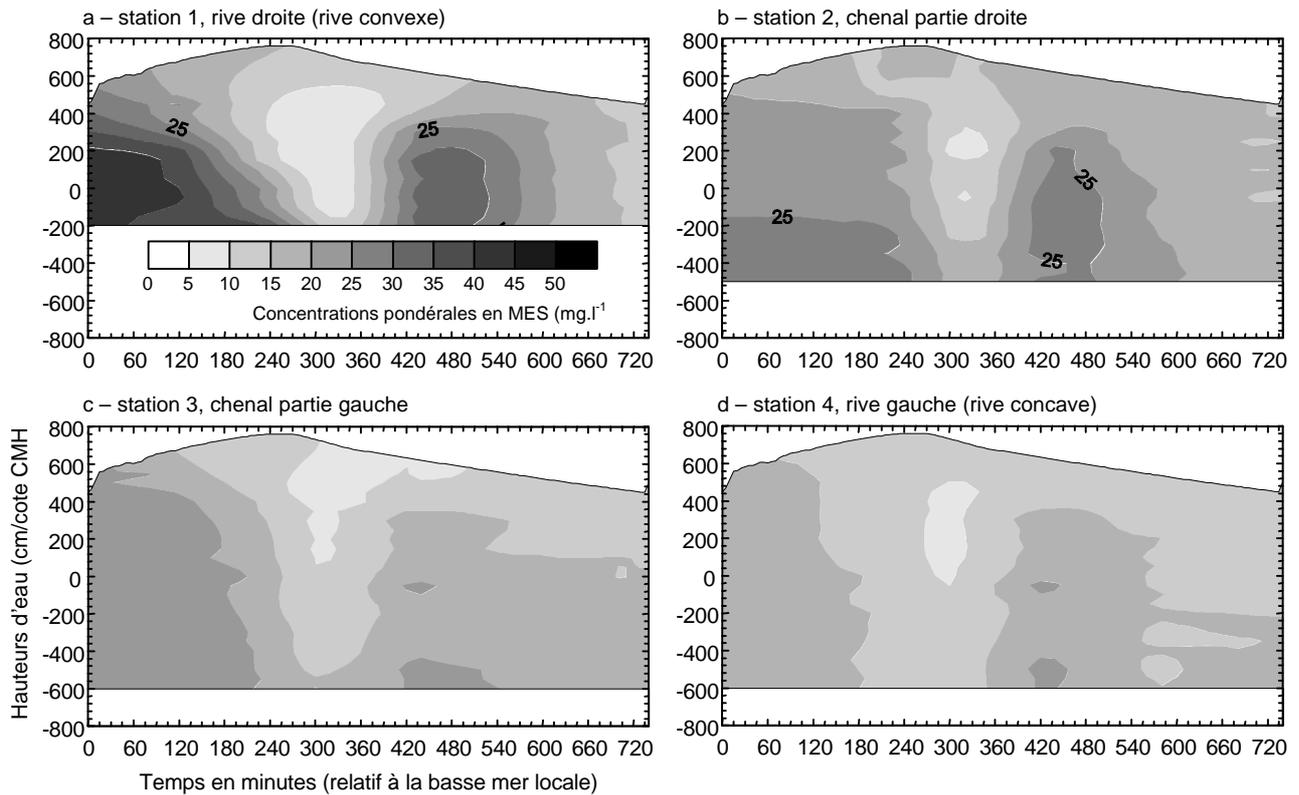


Figure 73 : Evolution spatio-temporelle des concentrations pondérales de MES en quatre stations d'une section transversale de Seine sur le site de Moulinaux (pk 258,50) le 20 avril 1996 au cours d'un cycle semi-diurne de marée (coefficient 94, débit fluvial à Poses $216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Comme dans le cas des vitesses de courants, d'importantes hétérogénéités dans les concentrations pondérales de MES existent entre les quatre stations étudiées. En début de flot, les concentrations pondérales de MES sont plus importantes pour les stations 1 et 2 situées en rive convexe de méandre. Les concentrations de la station 1 peuvent atteindre $40 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ alors qu'elles ne dépassent pas $25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ pour les stations 3 et 4. Pour la station 1 (rive convexe), les concentrations pondérales de MES diminuent rapidement en surface après le début du flot, elles atteignent un minimum à l'étape de pleine mer (300 minutes après la basse mer locale) sur les quatre stations. Ce minimum est de $6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ en surface sur les quatre stations. Au fond, pour les stations 1 et 4 le minimum est de l'ordre de $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ alors que pour les stations 2 et 3, il se situe aux environs de 15 à $20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Durant le jusant, un accroissement des concentrations pondérales de MES se fait sentir sur les quatre stations entre 420 et 480 minutes après la basse mer locale. Cet accroissement des concentrations est plus marqué pour les stations 1 et 2 que pour les stations 3 et 4. En fin de jusant, les concentrations sont du même ordre de grandeur quelle que soit la station considérée.

La comparaison des évolutions spatio-temporelles des vitesses de courants et des concentrations pondérales particulaires, permet de retrouver le schéma érosion/sédimentation induit par les courants de marée (voir paragraphes précédents). Cependant la comparaison entre stations de ces schémas érosion/sédimentation met en avant un paradoxe : les maxima de concentrations pondérales particulaires se rencontrent en rive convexe, c'est-à-dire sur le site présentant les vitesses de courants les plus faibles. Inversement, les stations situées en rive concave présentent les vitesses de courants, que ce soit au cours du flot ou du jusant, les plus fortes mais les concentrations pondérales particulaires les plus faibles. Ce paradoxe s'explique aisément par la plus forte disponibilité de matériel particulaire en rive convexe.

Sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) qui se situe dans un secteur de Seine plus rectiligne, l'accroissement des vitesses de courants au flot engendre une augmentation des concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension (Figure 74).

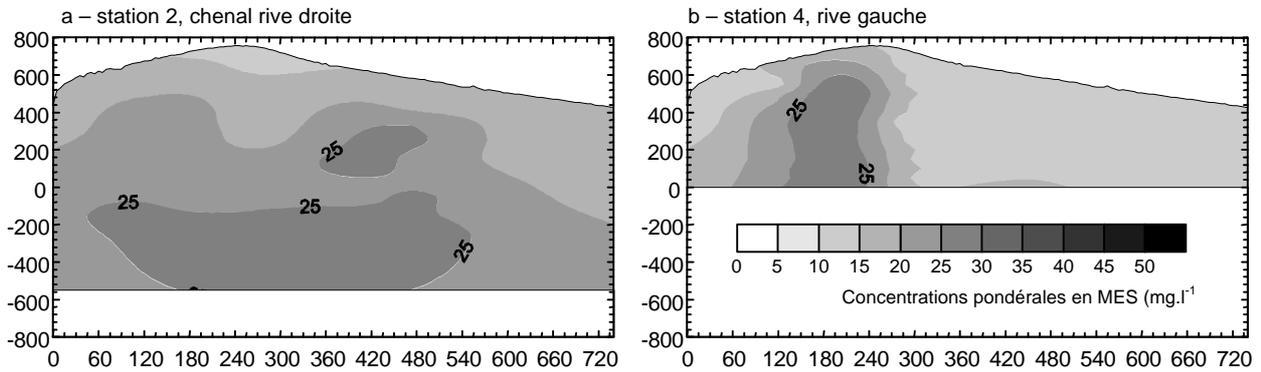


Figure 74 : Evolution spatio-temporelle des concentrations pondérales de MES en deux stations d'une section transversale de Seine sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55) le 18 avril 1996 au cours d'un cycle semi-diurne de marée (coefficient 101, débit fluvial au barrage Poses $226 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Durant l'étape de pleine mer, les courants présentent des intensités comparables sur la rive gauche (station 4) et dans le chenal (station 2), en revanche, les concentrations pondérales particulières sont différentes. Sur les trois à quatre premiers mètres sous la surface, une diminution de ces concentrations pondérales se produit suite à la diminution des vitesses de courants. En rive gauche (station 4), conformément aux observations faites précédemment, le matériel sédimenté depuis ces premiers mètres sous la surface se dépose au fond, compte tenu de la faible profondeur. Pour la station 2, en revanche, la durée de l'étape de pleine mer et la plus grande profondeur ne permettent pas un dépôt total des particules sédimentées depuis les premiers mètres sous la surface. Ces particules se concentrent en profondeur, expliquant les plus fortes concentrations rencontrées dans les quatre à cinq mètres au-dessus du fond. Avec l'accroissement des vitesses durant le jusant, ces particules concentrées mais non déposées dans les derniers mètres au-dessus du fond, sont facilement remises en suspension alors que les particules déposées dans les faibles profondeurs près des rives sont plus difficilement érodées. Ceci explique les plus fortes concentrations pondérales particulières mesurées en jusant au centre du chenal.

IV.3.6 - Le problème des dépôts particuliers

Les variations de concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau à l'échelle des cycles semi-diurnes mais aussi semi-lunaires sont pour partie liées à la remise en suspension locale de matériel particulaire depuis le fond de la Seine et pour partie liées au transport en suspension de matériel particulaire fin issu de la remise en suspension depuis des « sources » distantes (voir page 102).

La remise en suspension locale implique l'existence de dépôts sur le site étudié, l'état de consolidation et la forme de ces dépôts restent pour l'heure inconnus. Les techniques de mesures utilisées (CTD, prélèvements d'échantillons) ne permettent pas de connaître les concentrations pondérales de MES dans ces derniers centimètres au-dessus du fond. Le matériel fin sédimenté se retrouve-t-il, à un moment du cycle semi-diurne ou du cycle lunaire sous la forme de dépôts susceptibles d'être consolidés ou sous la forme d'une couche fluide (néphéloïde de fond) ?

En intégrant les concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau durant les cycles de marée semi-diurnes et semi-lunaires et en émettant l'hypothèse de conservation de la masse de matériel en

suspension et déposé, il est possible de déterminer les quantités respectives de matériel particulaire déposé et de matériel en suspension. L'hypothèse de conservation de la masse implique que les contraintes suivantes soient réalisées :

- a – Les variations de concentrations pondérales observées dans la colonne d'eau au niveau d'un site sont uniquement liées aux remises en suspension locales du matériel présent au fond de la Seine
- b – Il n'existe sur ce site aucune zone importante de dépôts de matériel fin .
- c – Lors des vives-eaux, il existe un moment du cycle de marée ou tout le stock particulaire déposé est érodé et se retrouve en suspension.

Pour ce calcul, le site du Val-des-Leux (pk 265,55) est le plus adapté. Il ne présente en effet, aucune zone de dépôt de matériel fin et ce site est peu touché par les transports particuliers issus de sources distantes, l'hypothèse de conservation de la masse peut donc être considérée comme vérifiée.

Les calculs ont été effectués pour le 18/04/96 (marée de vives-eaux, coefficient de marée 101) et le 25/04/96 (marée de mortes-eaux, coefficient de marée 46) sur une colonne d'eau de 1 m² au fond (Figure 75). Compte tenu des techniques d'investigations, le matériel considéré comme déposé est en fait le matériel présent au fond et dans les 50 cm au-dessus du fond.

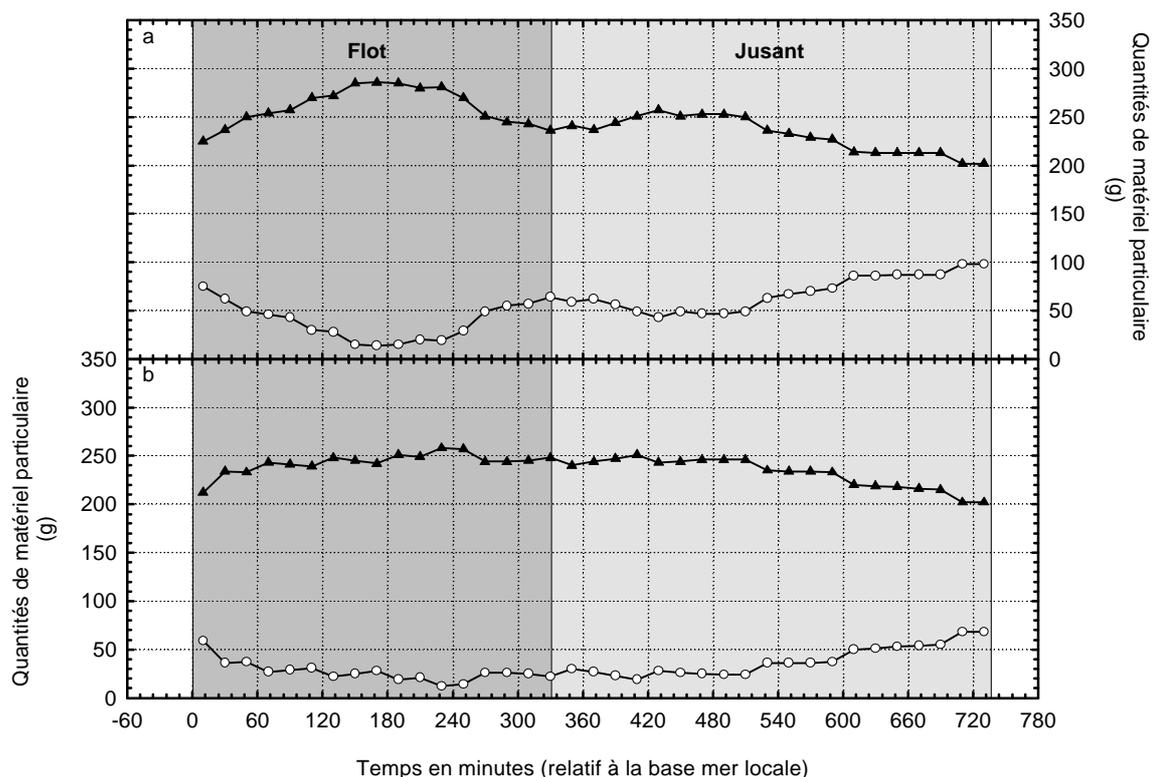


Figure 75 : Evolution des stocks particulaires en suspension (—▲—) et présent dans les 50 cm au-dessus du fond(—○—) dans une colonne d'eau de 1 m² au cours du cycle de marée sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) (a) le 18/04/96 (marée de vives-eaux, coefficient de marée 101) et (b) le 25/04/96 (marée de mortes-eaux, coefficient de marée 46).

Lorsque dans la colonne d'eau, la quantité de matériel particulaire en suspension est maximale, la colonne d'eau et les 50 cm au-dessus du fond présentent des concentrations homogènes de 27 mg.l⁻¹ en vives-eaux et de 25 mg.l⁻¹ en mortes-eaux. Ces concentrations représentent pour une colonne d'eau de 1 m² des stocks de matériel particulaire de 286 g en vives-eaux et de 270 g en mortes-eaux et pour la couche de 50 cm au-dessus du fond des stocks particuliers de 14 g en vives-eaux et de 12 g en mortes-eaux.

La quantité maximale de matériel particulaire en suspension dans la colonne d'eau de 1 m² et dans les 50 cm au-dessus du fond est de 286 + 14 = 300 g en vives-eaux contre 270 + 12 = 282 g. Entre vives-eaux et en mortes-eaux, ce sont donc 18 g de matériel particulaire (4 % du matériel particulaire présent en suspension en vives-eaux) qui se sont déposés pour une surface de 1 m² et qui ne peuvent être remis en suspension par les faibles courants de jusant.

Au cours de la marée, des échanges se produisent entre stocks particuliers présents dans les 50 cm au-dessus du fond et en suspension. Ces échanges sont plus marqués en vives-eaux qu'en mortes-eaux du fait des plus fortes vitesses de courants. Les quantités maximales de matériel particulaire dans les 50 cm au-dessus du fond se rencontrent en fin de jusant, en vives-eaux comme en mortes-eaux, avec respectivement 98 g et 68 g de matériel particulaire déposé.

En étendant l'hypothèse de conservation de la masse à l'échelle du cycle semi-lunaire, les 18 g de matériel particulaire entre vives-eaux et mortes-eaux, peuvent donc être considérés comme du matériel particulaire ayant sédimenté et ayant atteint un degré de consolidation suffisant pour ne pouvoir être remis en suspension par les courants de mortes-eaux.

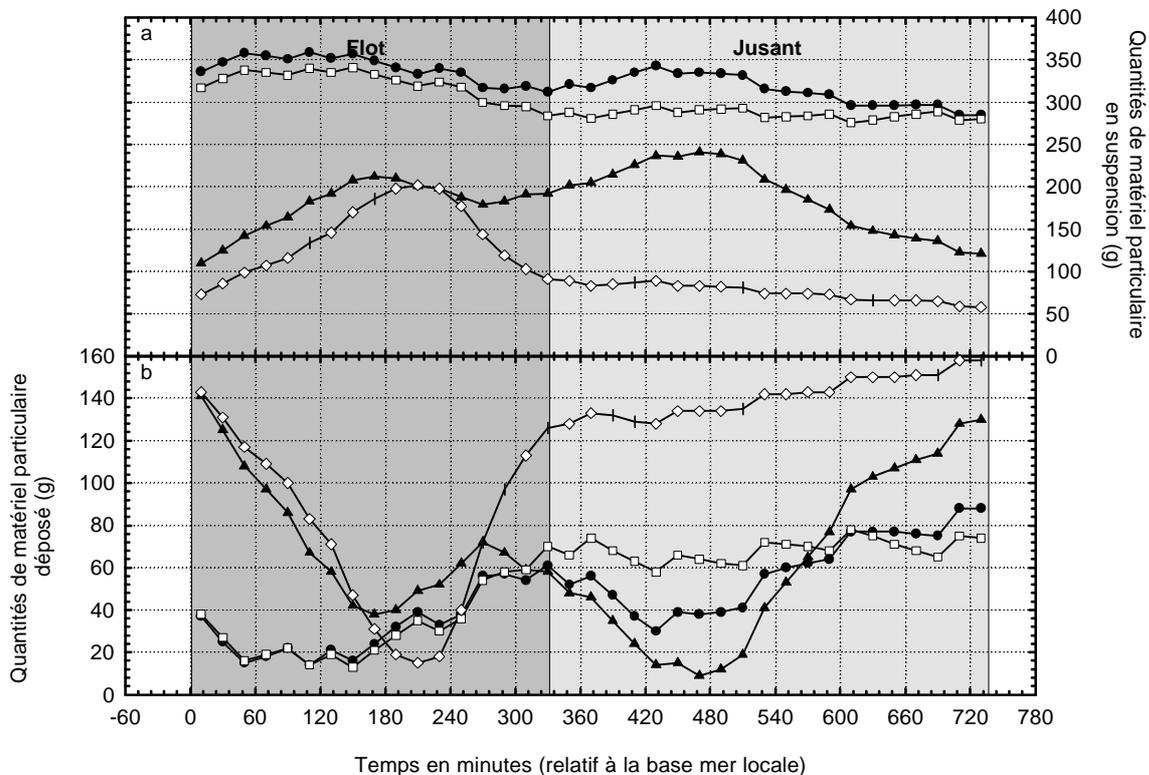


Figure 76 : Evolution des stocks particuliers (a) en suspension et (b) présents dans les 50 cm au-dessus du fond dans une colonne d'eau de 1 m² au cours du cycle de marée sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) le 18/04/96 (marée de vives-eaux, coefficient de marée 101) (—▲—) station 1 – rive droite, (—●—) station 2 – milieu rive droite, (—□—) station 3 – milieu rive gauche et (—◇—) station 4 – rive gauche. Coefficient de marée 101, débit au barrage de Poses 251 m³.s⁻¹.

Une observation de ces bilans, sur les quatre stations d'une section de Seine, révèle que certaines stations jouent un rôle plus important que les autres dans ces échanges (Figure 76). Ainsi sur le site du Val-des-Leux, en vives-eaux les dépôts les plus importants se produisent en rive gauche (station 4 et dans une moindre mesure station 3) de manière continue durant le jusant alors que sur les autres stations les dépôts suivent la dynamique érosion/sédimentation de flot et de jusant décrite précédemment (page 50).

Cette observation suggère que les dépôts et la consolidation du matériel particulaire entre vives-eaux et mortes-eaux ne se produisent pas de manière homogène sur la section mais au niveau de sites particuliers qui n'ont pas forcément été répertoriés comme des zones de dépôts de matériel particulaire fin lors des reconnaissances sédimentaires.

IV.4 - Dynamique des matériaux

La population des particules en suspension dans l'estuaire de Seine est dominée pondéralement par des particules fines de diamètre inférieur à $63 \mu\text{m}$ (Figure 77 et Figure 78). Le pourcentage de matériel particulaire fin en suspension est toujours supérieur à 80 % au cours du suivi réalisé à l'Ile Lacroix (pk 241,80) et toujours supérieur à 90 % pour le suivi réalisé sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55).

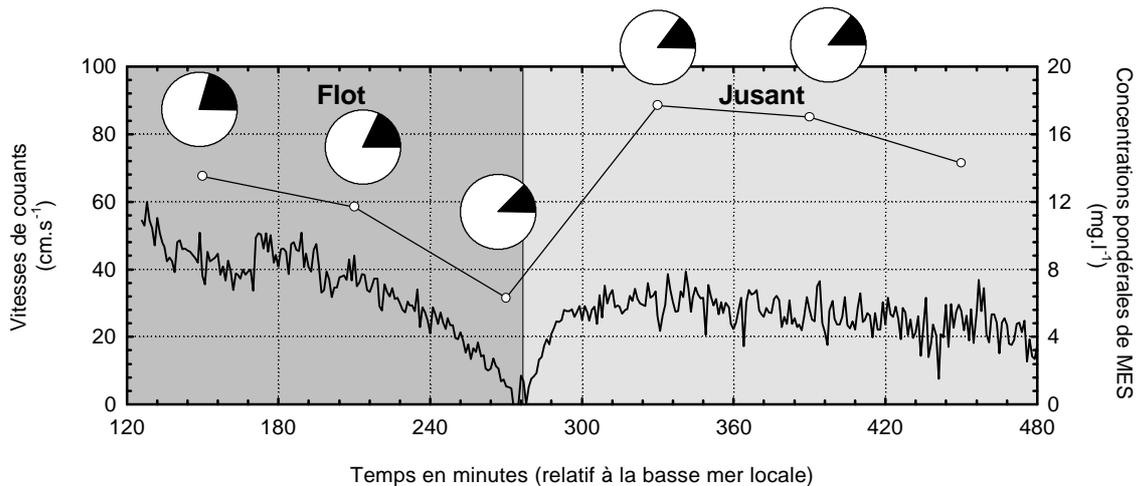


Figure 77 : Evolution des vitesses de courants (—), des concentrations pondérales de MES (—○—) et des pourcentages de la fraction particulaire $>63 \mu\text{m}$ (■) et $<63 \mu\text{m}$ (□) à 30 cm du fond au cours d'un cycle de marée semi-diurne sur le site de l'Ile Lacroix (pk 241,80) le 01/02/96. $Q = 323 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, coefficient de marée : 52 – revif.

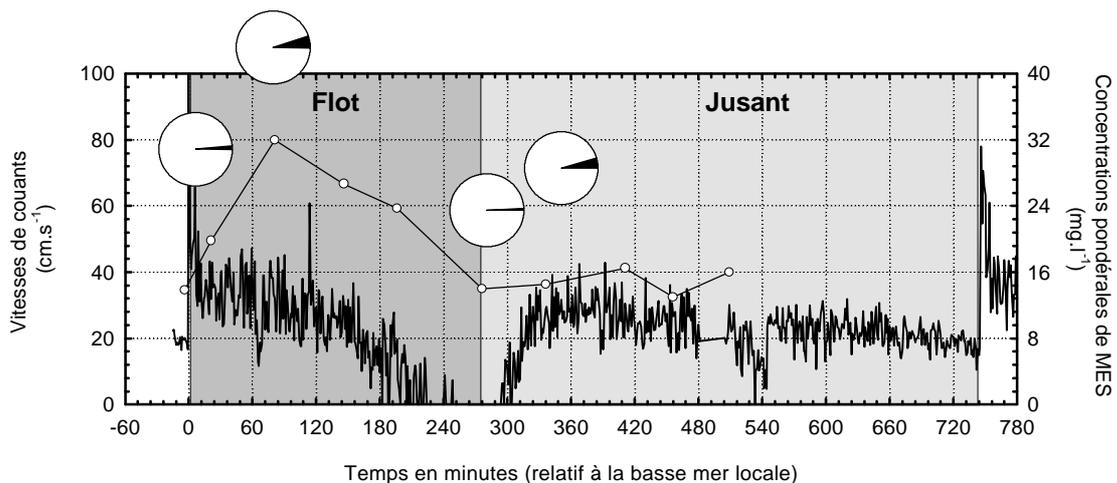


Figure 78 : Evolution des vitesses de courants (—), des concentrations pondérales de MES (—○—) et des pourcentages de la fraction particulaire $>63 \mu\text{m}$ (■) et $<63 \mu\text{m}$ (□) à 30 cm du fond au cours d'un cycle de marée semi-diurne sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) le 22/01/96. $Q = 420 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, coefficient de marée : 112 – vives-eaux.

Ces pourcentages ne sont cependant pas constants au cours du cycle de marée. Le pourcentage de particules de diamètre supérieur à 63 μm est plus important lors des périodes de plus forts courants. L'accroissement de ce pourcentage n'est cependant pas spectaculaire ce qui tend à prouver :

- 1 - Qu'il existe peu de matériel particulaire de diamètre supérieur à 63 μm susceptible d'être mis en suspension par les courants de marée.
- 2 - Qu'il existe en suspension dans l'estuaire de la Seine un stock de particules de diamètre supérieur à 63 μm mais de faible densité, qui sédimente peu lors des périodes de courants faibles ou nuls.

IV.4.1 - Microgranulométrie des particules de la colonne d'eau

La population dominante de matériel particulaire fin en suspension est constituée de particules de diamètres de 12 à 15 μm (Figure 79).

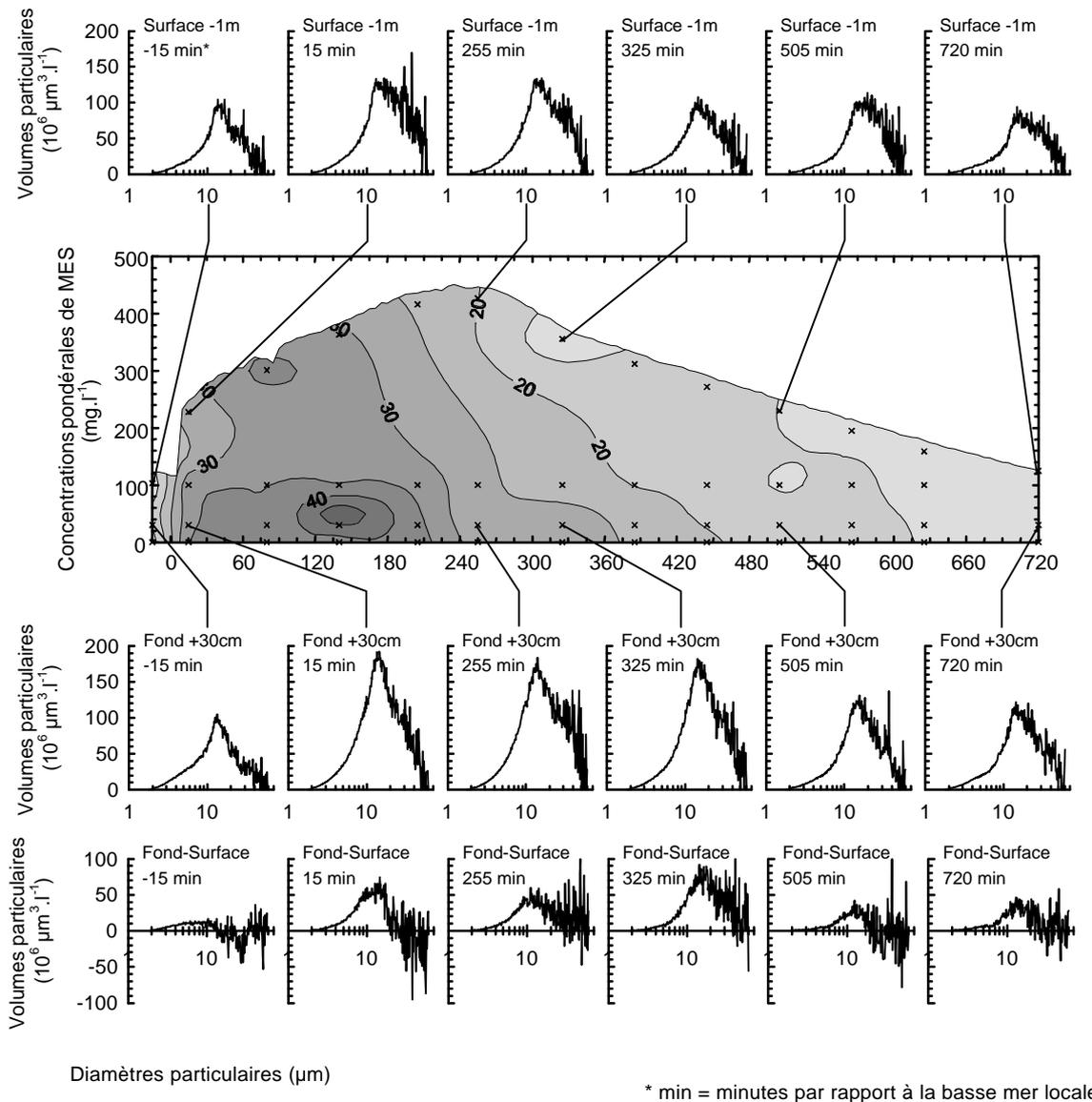


Figure 79 : Evolution des volumes particulaires de la fraction particulaire fine mesurée à 1 m sous la surface (Surface -1m) et à 30 cm au dessus du fond (Fond +30cm). Site du Val-des-Leux (pk 265,55) au cours d'un cycle de marée (le 23/11/95, coefficient 104 – vives-eaux, débits $380 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Cette population reste dominante à 1 mètre sous la surface comme à 30 cm du fond quel que soit l'instant du cycle de marée considéré. Toutefois, en certaines périodes du cycle de marée, une population secondaire constituée de particules de diamètres supérieurs à 20 μm , avec un mode situé aux environs de 30 à 40 μm , apparaît.

L'observation au MEB de plusieurs prélèvements montre que la population de 12 à 15 μm est composée de petits agrégats et de diatomées libres, la population de 30 à 40 μm est quant à elle composée d'agrégats de taille supérieure (Photo 1).

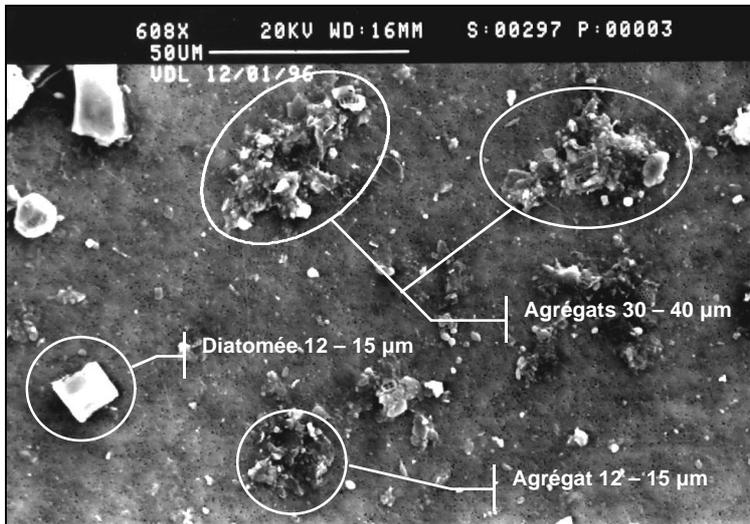


Photo 1 : Vue au MEB de la composition du matériel particulaire en suspension (le 12/01/96).

L'évolution des spectres granulométriques différentiels en surface au cours du temps est représentée sur la Figure 80. Lors de l'établissement du flot (entre -15 et + 15 minutes après la basse mer), l'ensemble des fractions granulométrique voit un renforcement de leurs populations traduisant un apport de particules depuis le fond vers la surface. Près du fond (Figure 81) cet apport de particules est plus marqué qu'en surface, notamment pour les classes de 12-15 μm et traduit une érosion du matériel particulaire fin du fond. En effet, la structure microgranulométrique des dépôts fins du fond de la Seine (Figure 82) est composé des deux mêmes sous populations de mode 12-15 μm et 30-40 μm , que celles que l'on rencontre dans le matériel fin en suspension.

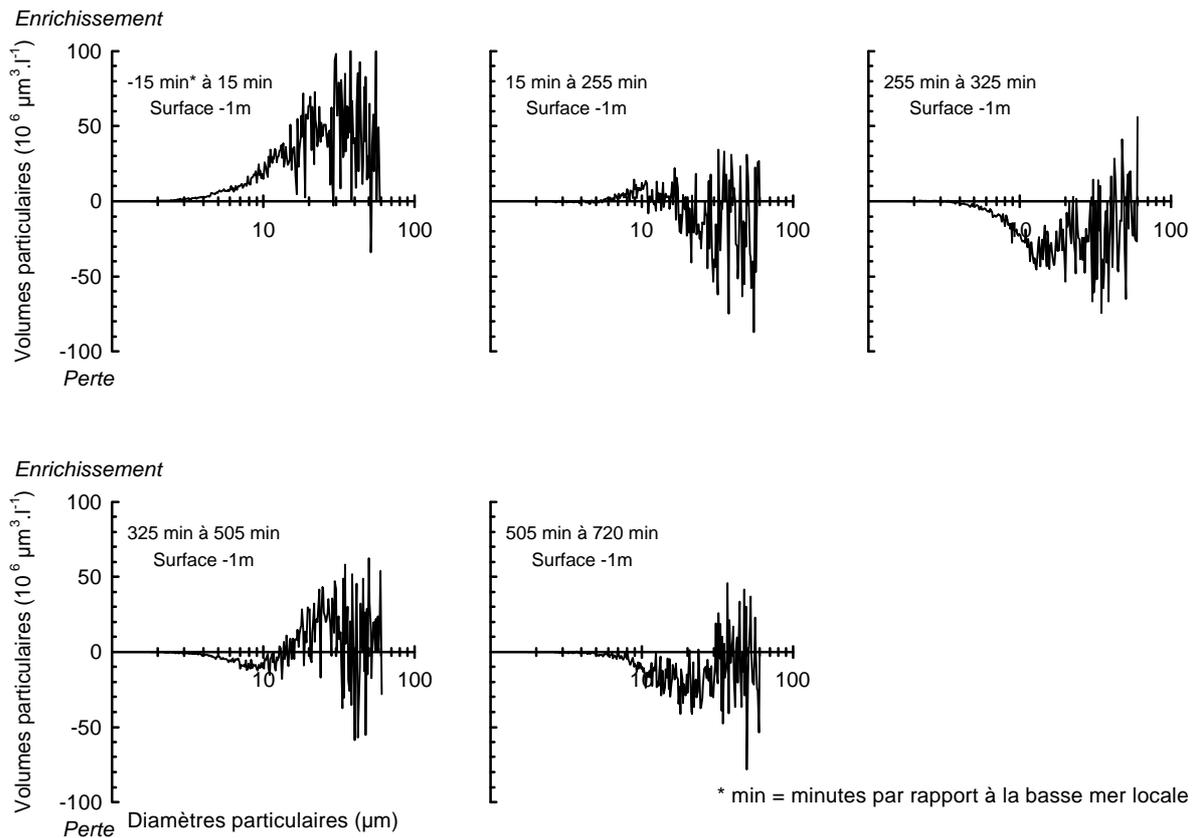


Figure 80 : Evolutions différentielles des volumes particulaires de la fraction particulaire fine entre les échantillons prélevés au temps t et ceux prélevés au temps précédent (t_1) pour les échantillons de surface sur le site du Val-des-Leux au cours d'un cycle semi-diurne de marée (le 23/11/95, coefficient 104 – vives-eaux, débits $380 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Entre 15 minutes et 255 minutes après la basse mer locale, une diminution des particules des classes voisine de 30 à 40 μm survient en surface (Figure 80) du fait de la plus fortes vitesse de chute de ces particule de grande taille (voir page 73) et de la diminution des vitesses de courants (voir paragraphes précédents). Cette chute plus rapide des particules de diamètre voisin de 30-40 μm se traduit par un renforcement de la présence de ces particules à proximité du fond (Figure 81).

Entre 225 et 325 minutes après la basse mer, en surface comme au fond, une diminution de l'ensemble des populations se produit traduisant la sédimentation du matériel particulaire en suspension (Figure 80 et Figure 81).

Entre 325 et 505 minutes après la basse mer, en surface, les populations de diamètres inférieurs à 12-15 μm varient peu alors que la population de diamètres supérieurs 30-40 μm augmente. A proximité du fond, l'ensemble des classes granulométriques voit leur population décroître. Cette décroissance est plus marquée pour les classes voisines de 12-15 μm .

Entre 505 et 720 minutes après la basse mer, la population de diamètre voisin de 12-15 μm diminue en surface comme au fond alors que celle de diamètre voisin de 30-40 μm reste relativement constante au fond et en surface.

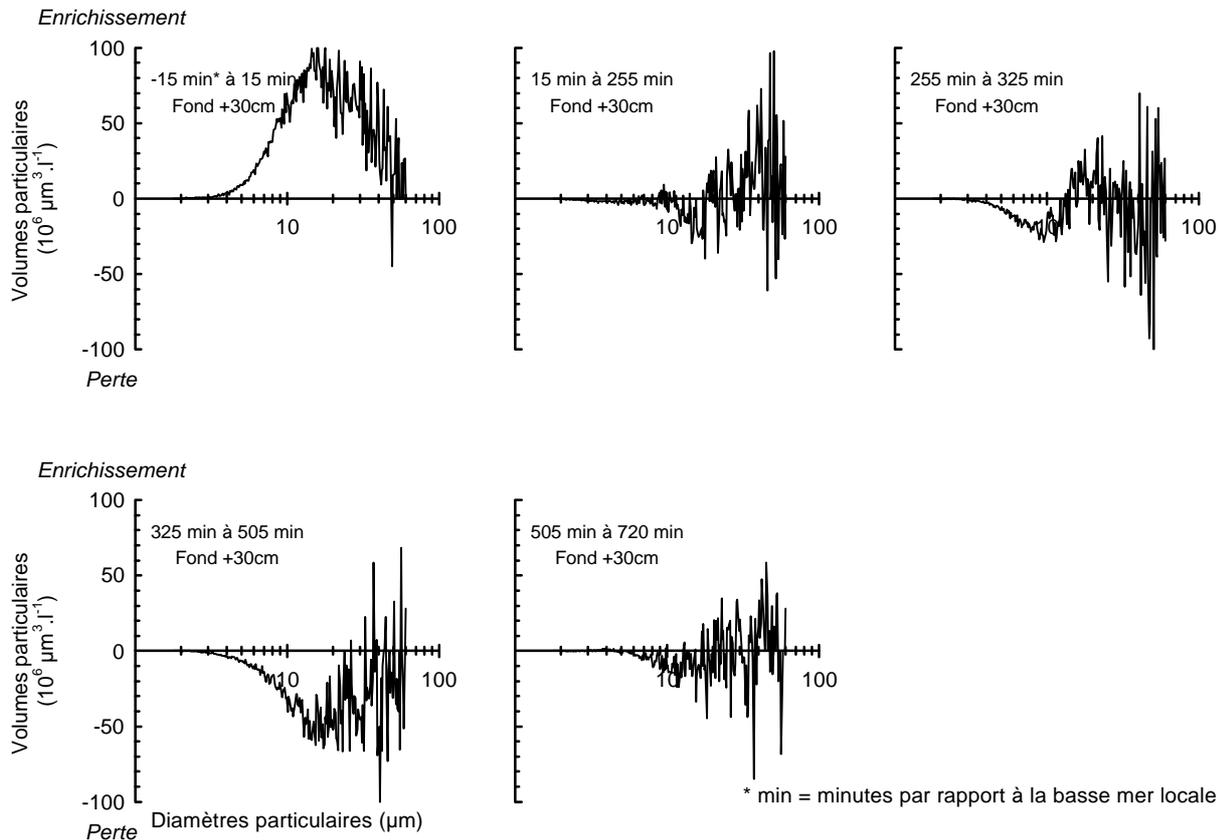


Figure 81 : Evolution différentielle des volumes particulaires de la fraction particulaire fine entre les échantillons prélevés au temps t et ceux prélevés au temps précédent (t_1) pour les échantillons de fond +30cm sur le site du Val-des-Leux au cours d'un cycle semi-diurne de marée (le 23/11/95, coefficient 104 – vives-eaux, débits $380 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

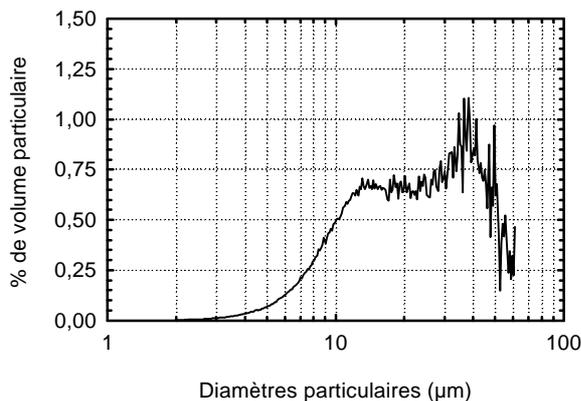


Figure 82 : Spectre microgranulométrique du matériel constitutif du fond sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55), prélèvement effectué à l'étape de pleine mer. (le 23/11/95, coefficient 104 – vives-eaux, débits $380 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

IV.4.2 - Hétérogénéités transversales

L'étude des évolutions des populations microgranulométriques sur un même site au cours d'un cycle semi-diurne de marée a montré qu'il n'existait quasiment aucune différence entre les populations présentes en suspension en surface ou au fond, durant le flot, le jusant ou l'étape de pleine mer. Compte tenu de l'importance du stock de matériel particulaire déposé localement sur les concentrations pondérales particulaires en suspension, il convient de s'interroger sur le rôle que jouent ces stocks sur la granulométrie des particules en suspension.

La Figure 83-a et b présente les spectres microgranulométriques exprimés en pourcentage de volume particulaire par classe de taille granulométrique pour les stations 1 (rive droite) et 4 (rive gauche), en surface et au fond sur les sites de La Bouille (pk 260,00) et de Moulineaux (pk 258,50) au flot (210 minutes environ après la basse mer locale).

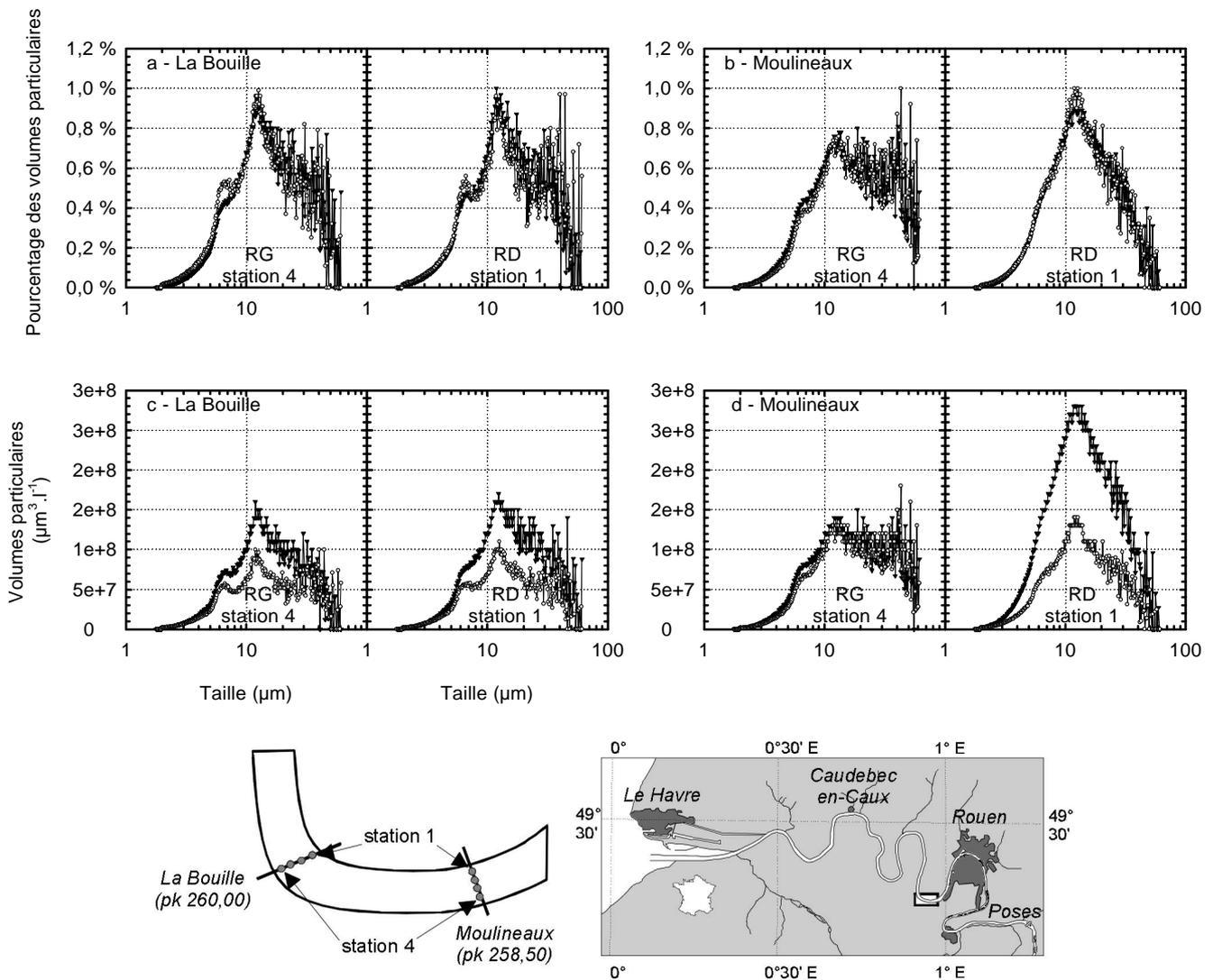


Figure 83 : Spectre microgranulométriques en surface (—○—) et au fond (---△---) sur les station 1 (rive droite - RD) et 4 (rive gauche - RG) pour les sites de La Bouille (pk 260,00) le 09 février 1997 (coefficient 116) et de Moulineaux (pk 258,50) le 10 février 1997 (coefficient 111).

Sur le site de La bouille, les spectres microgranulométriques exprimés en pourcentages de particules par classe de taille présentent la même répartition aux deux stations et aux deux profondeurs considérées (Figure 83-a). Seules les concentrations particulières par classes de tailles sont variables et sont plus concentrées en surface qu'au fond pour les deux stations et sont quasiment identiques d'une rive à l'autre (Figure 83-c). Trois populations apparaissent sur ces spectres microgranulométriques :

- 1 – Une population avec un mode voisin de 7 μm , qui après examen au microscope électronique à balayage se révèle être composée essentiellement de plancton.
- 2 – La population dominante dont le mode se situe aux environs de 12-15 μm et essentiellement composée de petits agrégats et grains isolés.

- 3 – Une population plus grossière dont le mode est voisin de 30-40 μm et qui est composée d'agrégats.

Sur le site de Moulineaux (pk 258,50), en revanche, des différences de populations particulaires en suspension existent entre les 2 stations (Figure 83-b et d). Les spectres micro-granulométriques de la station 4 (rive gauche, concave) présentent les mêmes caractéristiques que celles des populations observées sur le site de La Bouille (Figure 83-a).

En rive convexe (station 1, rive droite), les spectres micro-granulométriques, en surface et au fond, sont différents. La répartition des populations ne montre, cette fois, qu'un seul mode dominant voisin de 12-15 μm . Toutefois, l'observation au MEB de ces échantillons de MES montre que les populations identifiées sur le site de La Bouille et de la station 4, sont présentes mais qu'elles sont noyées dans la population de 12-15 μm . Le spectre micro-granulométrique mesuré en surface sur cette station 4 (Figure 83-d) montre la présence de la population de plancton (mode voisin de 7 μm).

IV.4.3 - La question de la floculation

Parallèlement aux mesures de courants et de concentrations pondérales de MES réalisées durant la campagne de septembre/octobre 1996, une étude *in situ* du matériel particulaire floculé en suspension à un mètre sous la surface a été menée (Blum, 1997) suivant la technique mise au point par Defossez, 1996.

Cette étude montre que dans l'estuaire amont de la Seine, une partie du matériel particulaire en suspension est composée de floccs. Une relation étroite existe entre la taille de ces floccs et les concentrations pondérales de MES. Plus les concentrations de matériel particulaire en suspension sont élevées et plus la taille des floccs est importante. Cette taille peut atteindre 400 μm mais se situe le plus souvent entre 200 et 300 μm .

Malgré les importantes vitesses de courants mesurées à certaines périodes du cycle de marée, aucune diminution de la taille des floccs n'a pu être observée durant ces événements malgré la turbulence induite. Selon Blum, 1997, la forte teneur en matière organique de ces floccs permet leur stabilité durant les périodes de forts courants. La présence de nombreuses diatomées benthiques et planctoniques dans les floccs contribuerait grandement à leur stabilité du fait de la production de polysaccharides qui favorisent l'agrégation des particules.

Les vitesses de chutes du matériel floculé, de taille comprise entre 125 μm et 400 μm , présente des vitesses de chute indépendantes de la taille et voisines de 1,0 et 2,5 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces vitesses de chute sont très supérieures à celles des particules fines (microfloccs) mesurées à l'aide du compteur de particule (Figure 84). Contrairement aux observations faites sur le matériel floculé, les vitesses de chute des particules fines sont dépendantes de la taille des particules (voir page 73).

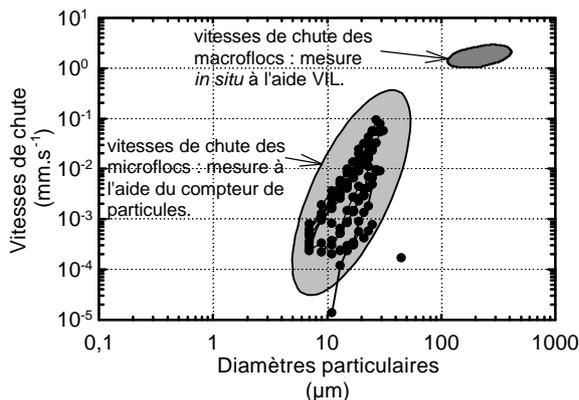


Figure 84 : Vitesses de chute du matériel particulaire en suspension dans l'estuaire amont de la Seine en aval de Rouen (pk 265,55).

IV.5 - Phénomènes semi-lunaires et lunaires - latences

Les cycles de marée semi-lunaires et lunaires apparaissent nettement sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et du Val-des-Leux (265,55) avec des maxima de concentrations pondérales de MES qui augmentent lors des périodes de revif mais avec une plus forte intensité pour le cycle le plus fort du cycle lunaire (voir Figure 42, page 81). Ces phénomènes sont moins perceptibles sur le site de Rouen (pk 241,80), si ce n'est lors des très fortes vives-eaux.

Alors que les maxima de concentrations pondérales en suspension dépendent des conditions de marée, il est intéressant de noter que les minima ne présentent pas de variations notables sur les sites de Rouen (pk 241,80) et de Val-des-Leux (pk 265,55) alors que sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) les minima suivent l'accroissement des concentrations pondérales de MES maximales (Figure 70).

L'accroissement de l'énergie de la marée entre mortes-eaux et vives-eaux engendre un accroissement des vitesses de courants au cours des cycles semi-diurnes. Cette augmentation des vitesses de courants permet une érosion plus importante du matériel particulaire déposé. Ceci se traduit par un accroissement des concentrations pondérales du matériel particulaire en suspension, illustré sur la Figure 85 qui présente l'évolution des concentrations pondérales de MES lissées à l'aide d'une moyenne mobile sur 12h30 afin d'éliminer les variations de concentrations pondérales de MES liées aux cycles semi-diurnes.

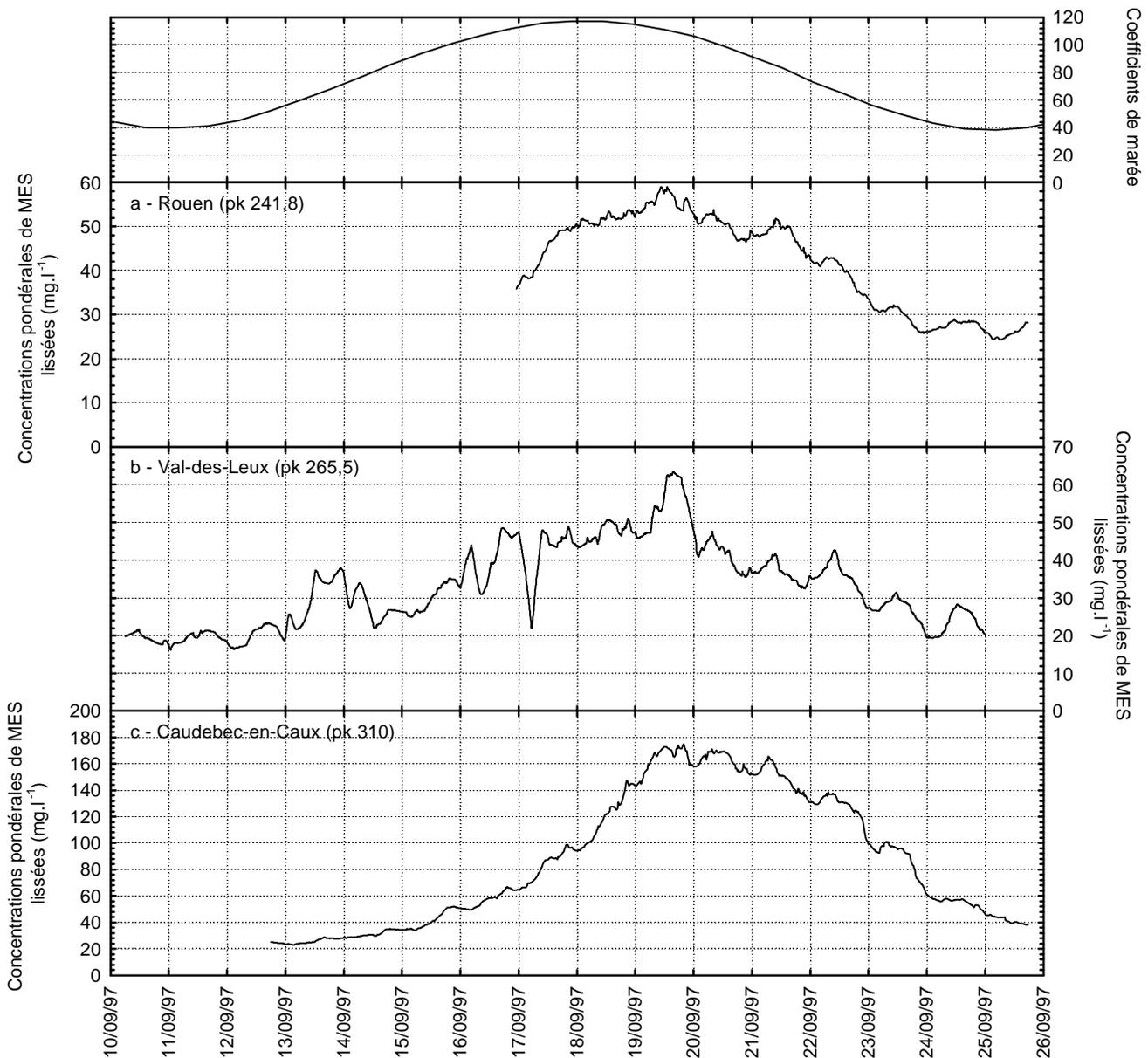


Figure 85 : Concentrations pondérales de MES lissées sur une marée (moyenne mobile sur 12h30) et des coefficients de marée en trois sites de l'estuaire amont durant un cycle semi-lunaire de marée. (a) Rouen (pk 241,80), (b) Val-des-Leux (pk 265,55), (c) Caudebec-en-Caux (pk 310,00).

Une observation plus détaillée des évolutions respectives des coefficients de marée et des concentrations pondérales de MES fait apparaître que les maxima de concentrations pondérales de MES se produisent avec quelques cycles semi-diurnes de marée de retard sur les coefficients les plus forts (Figure 85). Ce décalage entre maxima de concentrations pondérales de MES et coefficient de marée apparaît d'autant plus nettement que les vives-eaux sont importantes et est systématiquement plus marqué pour la station de Caudebec-en-Caux (pk 310,00). Ce phénomène de décalage a été décrit par Grabemann *et al.*, 1997 dans les estuaires de la Weser et de la Tamar.

La latence entre les dates d'apparition des maxima de concentrations pondérales de MES et de coefficients de marée apparaît plus nettement en traçant la relation entre concentration pondérale maximale pour un cycle donné et coefficient de marée (Figure 86-a) ; elle se traduit par une hystérésis orthograde entre les deux grandeurs.

La relation concentrations pondérales minimales de MES/coefficient de marée apparaît différente selon le site considéré (Figure 86-b). Sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00), l'hystérésis orthograde observée entre concentrations pondérales maximales et coefficients de marée se retrouve pour ces concentrations minimales. Sur les sites de Rouen (pk 241,80) et de Val-des-Leux (pk 265,55), en revanche, cette relation est moins marquée et les concentrations minimales restent voisines de 10 mg.l^{-1} sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55) et de 15 mg.l^{-1} sur celui de Rouen (pk 241,80).

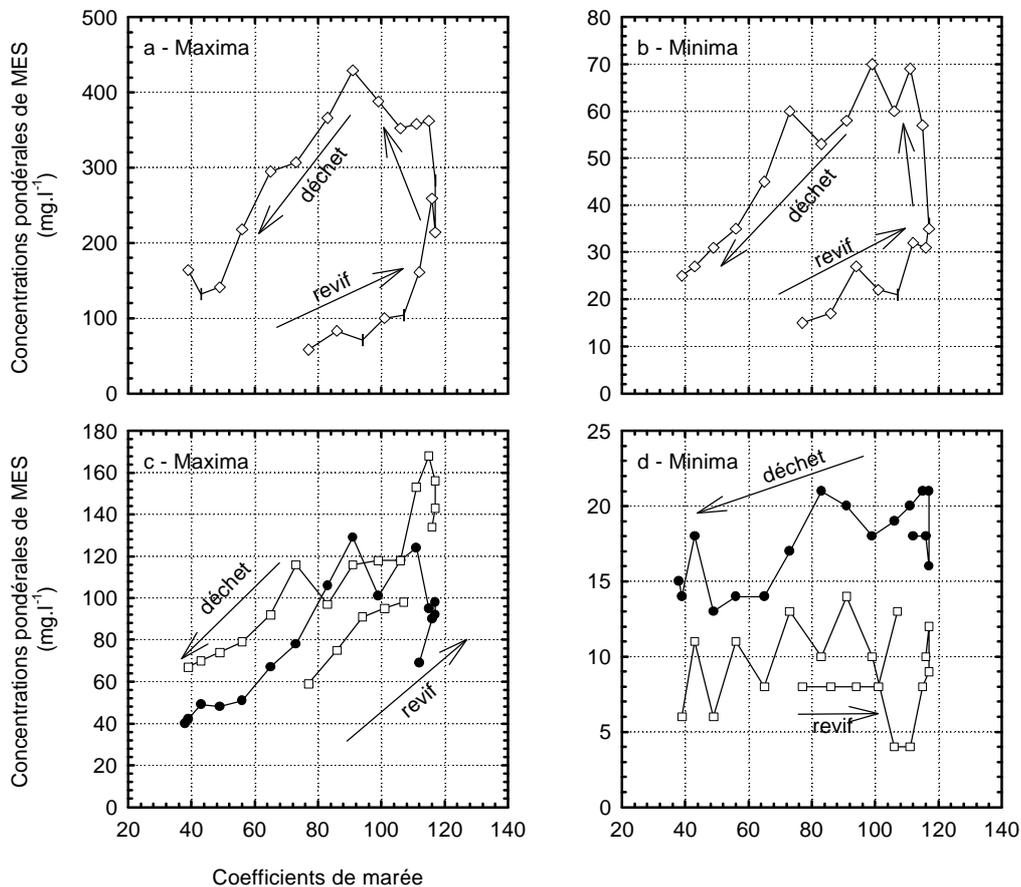


Figure 86 : Relations entre les concentrations pondérales de MES, (a), (c) maximales et (b), (d) minimales mesurées au cours des cycles semi-diurnes et les coefficients de marée au cours d'un cycle semi-lunaire mortes-eaux, vives-eaux, mortes-eaux pour les sites de \diamond Caudebec-en-Caux (pk 310,00), \square Val-des-Leux (pk 265,55), \bullet Rouen (pk 241,80).

Ce décalage entre concentrations pondérales de MES et coefficient de marée, plus marqué en aval qu'en amont de l'estuaire, s'explique par les phénomènes de remplissage et de vidange de l'estuaire au cours du cycle semi-lunaire de marée (voir page 85) ainsi que par des remises en suspension de matériel particulaire fin déposé et consolidé lors des périodes de déchet Grabemann *et al.*, 1997. En revif, l'estuaire se remplit, parallèlement les forts courants permettent une remise en suspension importante de matériel particulaire. En déchet, l'estuaire se vide. Cette vidange provoque l'expulsion, depuis l'amont, vers l'aval, des volumes d'eau introduits durant le revif et du matériel particulaire remis en suspension concomitamment. Ces quantités de matériel particulaire, expulsées de l'amont en début de déchet, continuent de se déplacer vers l'aval durant une grande partie de la période de déchet et « passent » sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) avec un retard de quelques cycles de marée par rapport à leur « passage » sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55).

IV.6 - Flux de matériel particulaire en suspension

Les interactions entre courants de marée et concentrations pondérales de MES dans l'estuaire amont sont complexes. Le calcul des flux particuliers à l'échelle semi-diurne et semi-lunaire permet de mieux comprendre la résultante de ces interactions en termes de déplacement des stocks particuliers en suspension.

Un premier calcul du flux particulaire traversant une surface de 1 m^2 à 1 m au-dessus du fond sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) en période d'étiage et de fort coefficient montre, dans certaines circonstances, la possibilité d'un transport particulaire résiduel aval/amont malgré un flux résiduel d'eau orienté vers l'aval (Tableau 11).

Tableau 11 : Flux de MES et flux d'eau résiduels traversant une surface de 1 m^2 à 1 m au-dessus du fond sur le site du Val-des-Leux au cours de trois cycles semi-diurnes de marée de vives-eaux. Les valeurs positives indiquent des flux orientés vers l'amont, les valeurs négatives indiquent des flux résiduels orientés vers l'aval.

<i>Campagne</i>	<i>Flux de MES (kg)</i>	<i>Flux d'eau (m^3)</i>
<i>Le 23/11/95 - coef 104 - $Q = 380 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$</i>	29	-2 249
<i>Le 22/01/96 - coef 112 - $Q = 420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$</i>	-65	-2 578
<i>Le 03/04/96 - coef 87 - $Q = 240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$</i>	-127	-2 661

L'extension de ces résultats à une section transversale de Seine nous oblige à nous interroger sur l'impact des hétérogénéités spatiales de vitesses de courants (voir page 96) sur les concentrations pondérales de MES. Plusieurs campagnes de mesures de vitesses de courants et de concentrations pondérales de MES ont été menées sur des sections transversales de Seine, en divers sites, afin de tenter de répondre à cette interrogation.

Les hétérogénéités spatiales de vitesses de courant et de concentrations pondérales de MES rendent l'estimation du transport horizontal des particules complexe. L'intégration dans l'espace et le temps des vitesses de courants et des concentrations pondérales particulières permet d'effectuer des bilans des masses d'eau et des masses particulières traversant une section de Seine au cours d'un cycle de marée. Par suite de contraintes matérielles, ces campagnes ne se sont déroulées que durant les périodes de vives-eaux et de déchets. Le Tableau 12 résume les résultats de ces bilans.

Tableau 12 : Flux résiduels d'eau et de particules calculés d'après les mesures de courants et de concentrations pondérales de MES réalisées sur des sections de Seine en quatre sites de l'estuaire amont de la Seine. Les flux positifs sont orientés vers l'amont, les flux négatifs sont orientés vers l'aval.

Site	Date	Coefficient de marée	Flux résiduels d'eau en m ³ sur le cycle de marée	Débit résiduel par cycle de marée (m ³ .s ⁻¹)	Flux résiduels de MES en tonnes sur le cycle de marée
<i>Val-des-Leux</i>	18/04/96	101	-9 006 110	-203	-197
<i>La Bouille</i>	19/04/96	99	-9 306 677	-210	64
<i>Moulineaux</i>	20/04/96	90	-10 954 201	-247	-59
<i>Moulineaux</i>	23/04/96	70	-12 960 988	-292	-326
<i>La Bouille</i>	24/04/96	58	-12 724 093	-287	-298
<i>Val-des-Leux</i>	25/04/96	46	-12 545 322	-283	-309
<i>Moulineaux</i>	01/10/96	93	-10 301 594	-232	677
<i>La Bouille</i>	02/10/96	79	-12 668 367	-285	96
<i>Val-des-Leux</i>	03/10/96	64	-10 878 982	-245	-842
<i>Val-des-Leux</i>	13/02/97	78	-16 440 759	-370	-444
<i>La Bouille</i>	14/02/97	61	-25 601 189	-577	-597
<i>Moulineaux</i>	15/02/97	47	-34 160 034	-769	-974

IV.6.1 - Flux d'eau

Quel que soit le site étudié et le coefficient de marée considéré, les flux d'eau sont orientés vers l'aval. Ils traduisent ainsi l'écoulement général dans l'estuaire amont de la Seine qui est celui de l'évacuation des eaux fluviale vers la baie de Seine et la Manche. Les flux de particules en revanche présentent, suivant les sites et les coefficients de marée, des flux orientés vers l'aval ou vers l'amont, c'est à dire en sens inverse de l'écoulement résiduel.

Bien que le nombre de cycles semi-diurnes étudiés soit insuffisant pour tirer toute conclusion définitive, la comparaison des débits résiduels calculés par la méthode d'intégration et des débits mesurés à Poses, corrigés de leur temps de séjour (Figure 87-a), montre que pour des débits fluviaux inférieurs à 350 m³.s⁻¹, il n'existe pas de relation simple entre ces deux paramètres. En revanche, au-delà de ces 350 m³.s⁻¹, les débits calculés par intégrations s'accroissent à mesure que les débits fluviaux augmentent. Les quatre points situés au-delà de 350 m³.s⁻¹ ont été mesurés en déchet et début de crue, alors que les débits à Poses étaient en augmentation constante.

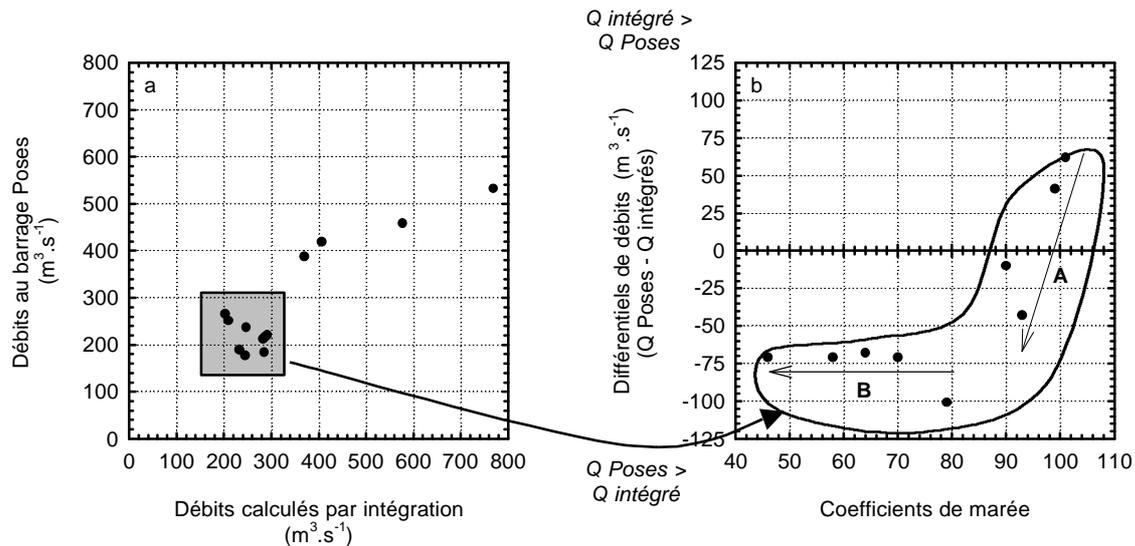


Figure 87 : (a) Comparaison des débits calculés par intégration et des débits à Poses. (b) Comparaison de la différence : débits à Poses - débits calculés par intégration (hors débits supérieurs à $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et des coefficients de marée.

La comparaison des coefficients de marée et des débits calculés (hors débits supérieurs à $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Figure 87-b) présente une évolution conforme au phénomène de vidange de l'estuaire en déchet (voir page 85). Pour les plus fortes vives-eaux, les débits de Poses sont supérieurs à ceux mesurés par intégration, confirmant la tendance au remplissage de l'estuaire durant cette période. A mesure que les coefficients de marée diminuent, les débits calculés par intégration deviennent supérieurs aux débits mesurés au barrage de Poses (pk 202,00) traduisant l'évacuation de l'estuaire d'une quantité d'eau supérieure à celle arrivant au barrage de Poses (flèche A Figure 87-b). Pour des coefficients de marée de déchets, la vidange de l'estuaire reste constante, avec des débits différentiels voisins de $-75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (flèche B Figure 87-b).

L'observation de ces résultats montre que les phénomènes de vidange et de remplissage de l'estuaire amont mis en évidence précédemment (voir page 85) se ressentent sur les flux d'eau mesurés par intégration. Les variations de débits fluviaux ont des conséquences importantes sur les écoulements résiduels à l'échelle du cycle de marée dans la mesure où, toute variation du niveau des basses mers en un endroit de l'estuaire entraîne un écoulement résiduel du niveau le plus haut vers le niveau le plus bas. Ainsi, une hausse du débit fluvial entraîne dans un premier temps un accroissement des basses mers en aval immédiat du barrage de Poses. Ceci a pour conséquence une forte augmentation de l'écoulement résiduel semi-diurne aval/amont.

IV.6.2 - Flux de particules

Les calculs des flux résiduels particuliers à l'échelle du cycle semi-diurne de marée montrent que ces flux ne sont pas toujours orientés dans le sens amont/aval de l'écoulement résiduel des eaux (Tableau 12) mais qu'ils peuvent être orientés aval/amont. La comparaison de ces flux calculés et des coefficients de marée montre une tendance selon laquelle ces transferts aval/amont se produisent essentiellement durant certaines vives-eaux (Figure 88-a).

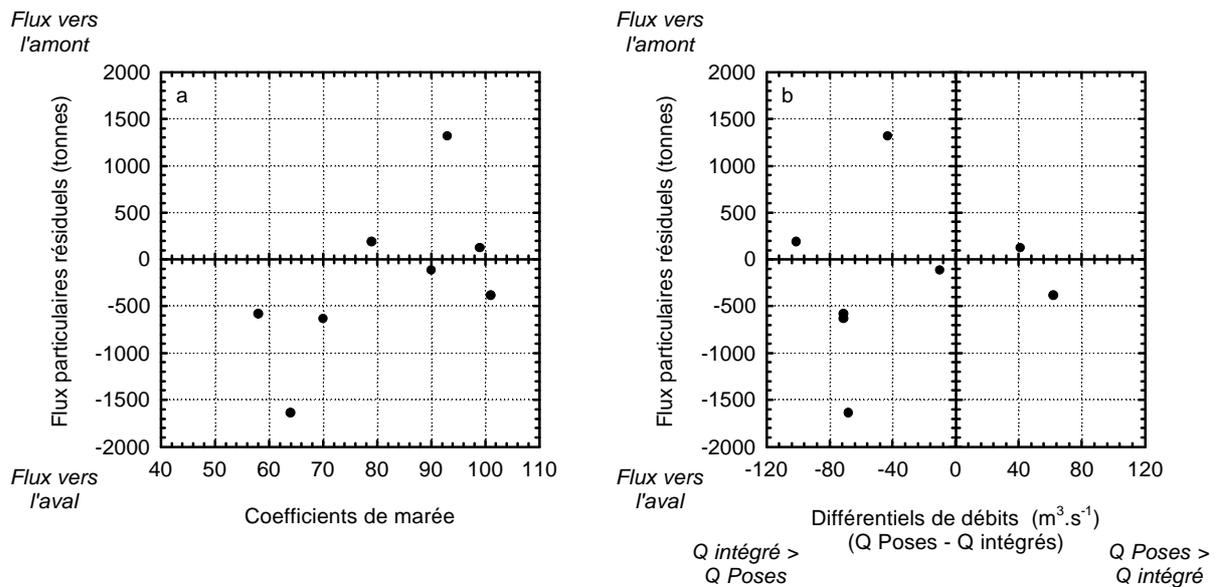


Figure 88 : (a) Comparaison des coefficients de marée et des flux particulaires résiduels calculés à l'échelle du cycle de marée sur les quatre sites d'étude. (b) Comparaison de la différence : débits à Poses - débits calculés par intégration (hors débits supérieurs à $350 m^3.s^{-1}$) et des flux particulaires résiduels calculés à l'échelle du cycle de marée sur les quatre sites d'étude.

Afin de vérifier s'il existe un lien entre ces remontées de matériel particulaire mesurées sur certaines sections et les phénomènes de remplissage/vidange de l'estuaire, une comparaison entre flux particulaires calculés et les différentiels entre débits à Poses et débits calculés par intégration a été réalisée (Figure 88-b). Aucune relation n'a pu être mise en évidence entre ces deux paramètres ce qui tend à prouver que les deux phénomènes sont indépendants.

IV.6.2.1 - Répartition horizontale des flux particulaires dans les sections

Une analyse plus précise de la répartition horizontale des flux calculés sur des sections pour chacune des campagnes étudiées permet de mieux comprendre le rôle des hétérogénéités dans ces processus de flux aval/amont. La Figure 89 présente les flux horizontaux pour chaque station des sections étudiées et pour chaque campagne ; les flèches présentent la contribution de chacune des stations au flux résiduel ; ces contributions sont regroupées dans le Tableau 13.

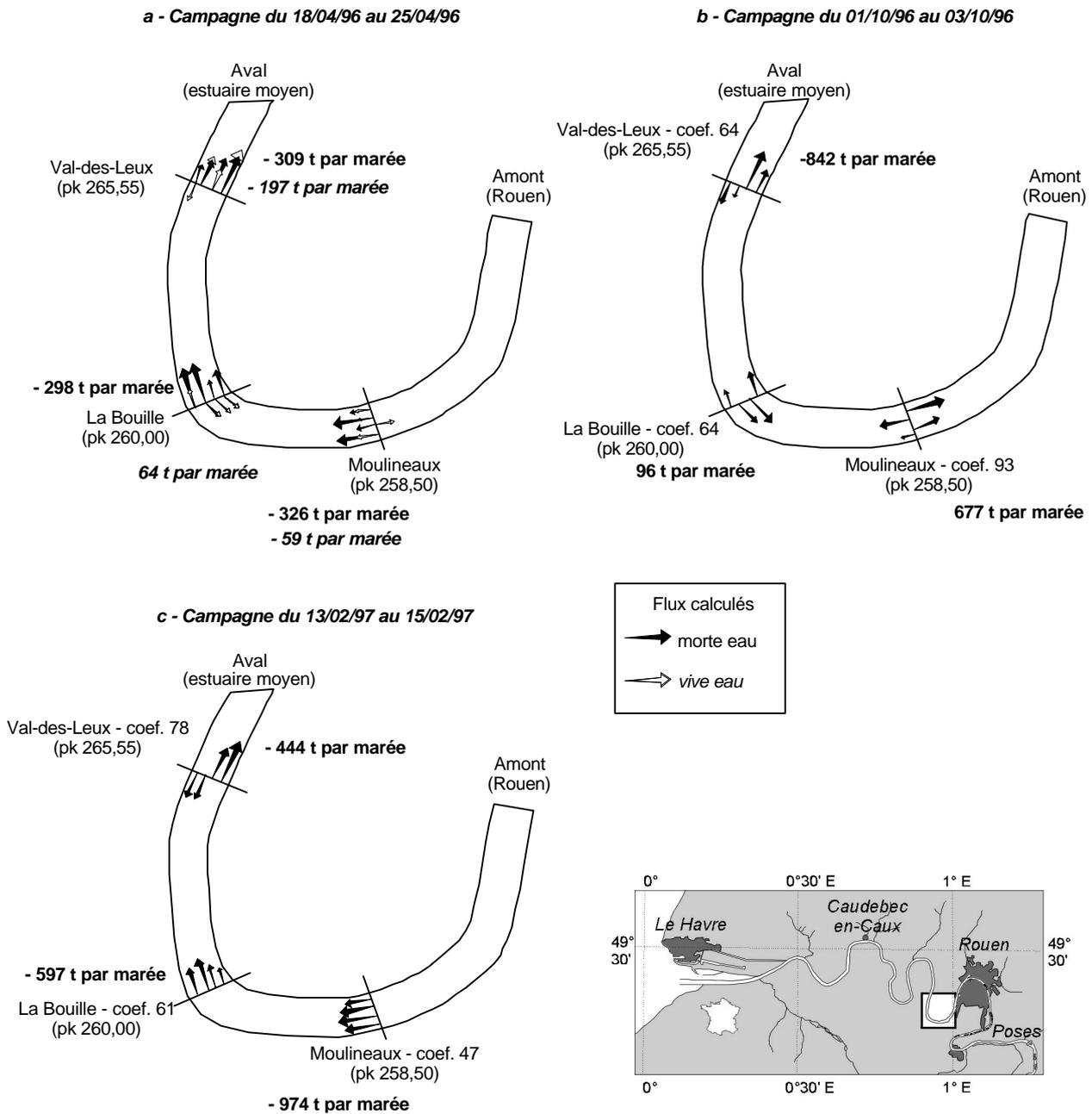


Figure 89 : Flux particuliers résiduels horizontaux replacés dans leur contexte géographique pour les trois campagnes d'étude des flux. Les flèches présentent la contribution de chacune des stations de la section au flux résiduel particulier semi-diurne. Les flux positifs sont orientés vers l'amont, les flux négatifs sont orientés vers l'aval.

Tableau 13 : Contribution des quatre stations d'une section de Seine au flux particulaire résiduel total sur un cycle semi-diurne de marée. Les résultats sont exprimés en tonne de matériel particulaire par cycle de marée. Les flux positifs sont orientés vers l'amont, les flux négatifs sont orientés vers l'aval.

<i>Site</i>	<i>Date</i>	<i>Coefficient de marée</i>	<i>Station 1 rive droite</i>	<i>Station 2 chenal, partie droite</i>	<i>Station 3 chenal, partie gauche</i>	<i>Station 4 rive gauche</i>	<i>Total (tonnes/marée)</i>
<i>Val-des-Leux</i>	18/04/96	101	-134	-15	-91	43	-197
<i>La Bouille</i>	19/04/96	99	13	47	26	-23	64
<i>Moulineaux</i>	20/04/96	90	-5	-13	18	-59	-59
<i>Moulineaux</i>	23/04/96	70	-53	-109	-45	-119	-326
<i>La Bouille</i>	24/04/96	58	-59	-23	-109	-108	-298
<i>Val-des-Leux</i>	25/04/96	46	-25	-83	-92	-109	-309
<i>Moulineaux</i>	01/10/96	93	766	-630	567	-26	677
<i>La Bouille</i>	02/10/96	79	-12	42	175	-109	96
<i>Val-des-Leux</i>	03/10/96	64	-482	-979	147	472	-842
<i>Val-des-Leux</i>	13/02/97	78	-461	-273	147	144	-444
<i>La Bouille</i>	14/02/97	61	-166	-214	-136	-82	-597
<i>Moulineaux</i>	15/02/97	47	-248	-277	-249	-199	-974

IV.6.2.1.1 - Campagne du 18/04/96 au 25/04/96

Cette campagne s'est déroulée en fin de vives-eaux et durant une partie de la période de déchet suivante. Les débits avaient atteint des valeurs d'étiage environ 1 mois avant le début de la campagne.

Lors des marées de mortes-eaux, sur les trois sites considérés, les flux pondéraux particuliers sont homogènes et orientés vers l'aval de l'estuaire. Ces flux sont de : 309 tonnes/marée au Val-des-leux (pk 265,55), 298 tonnes/marée à la Bouille (pk 260,00) et 326 tonnes/marée à Moulineaux (pk 258,50) (Figure 89-a).

En période de vives eaux, la situation est hétérogène tant à l'échelle de la section qu'à l'échelle de la station d'intégration considérée. Sur les sites du Val-des-Leux (pk 265,55) et de Moulineaux (pk 258,50) les flux particuliers sont orientés vers l'aval mais sont très différents (respectivement -197 et -59 tonnes/marée). Ils sont beaucoup plus faibles qu'en période de mortes-eaux (respectivement -309 et -326 tonnes/marée). Sur le site de La Bouille (pk 260,00) le flux particulaire résiduel est orienté vers l'amont (64 tonnes/marée).

IV.6.2.1.2 - Campagne de 01/10/96 au 03/10/96

Cette campagne s'est déroulée en fin de période estivale après une longue période d'étiage, suite à un problème matériel, seuls, les résultats obtenus au cours du déchet ont pu être exploités (Figure 89-b). Au cours de cette campagne une forte activité de dragage avait lieu dans les infrastructures portuaires, en amont de nos sites de mesures. Le dépôt à terre des matériaux était réalisé environ 250 m en aval du site d'étude de Moulineaux (pk 258,50) dans une chambre de dépôt située en rive gauche.

Durant cette campagne ont été mesurées les plus fortes concentrations pondérales de MES rencontrées dans l'estuaire amont. Les concentrations pondérales particulières ont atteint des valeurs de 450 mg.l⁻¹ par

mesure pondérale sur des prélèvements d'eau et ont dépassé 1 g.l^{-1} à partir des mesures du turbidimètre de la CTD. Ces fortes concentrations maximales ont été mesurées sur le site de Moulineaux (pk 258,50) en rive gauche et à proximité du fond.

A l'échelle de la section, ces remontées ont lieu sur les deux sites les plus en amont. Le site de Moulineaux (pk 258,50) est le plus soumis à ces remontées, avec 677 tonnes de matériel transférées d'aval vers l'amont au cours d'une marée. Le site de La Bouille (pk 260,00) étudié une marée plus tard présente plus un flux résiduel vers l'amont de 96 tonnes.

Le site du Val-des-Leux (pk 265,55), étudié deux cycles de marée plus tard, présente un flux particulaire vers l'aval très important, essentiellement dû au transport en rive droite.

IV.6.2.1.3 - Campagne de 13/02/97 au 15/02/97

Cette campagne s'est déroulée en déchet, quelques semaines après une crue et alors que les débits d'étiages n'étaient pas encore établis. Suite à un problème de courantomètre ADP seuls les flux de déchets ont pu être estimés.

Le premier cycle étudié sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) présente un flux résiduel de particules orienté vers l'aval malgré des remontées de matériel particulaire le long de la rive gauche.

Sur les sites de La Bouille (pk 260,00) et de Moulineaux (pk 258,50) les flux particuliers résiduels sont très importants et sont orientés vers l'aval quelle que soit la station considérée.

Les deux derniers jours de campagnes (les 14 et 15/02/97), une amorce de crue s'est manifestée au barrage de Poses avec des accroissements quotidiens du débit de $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Ces accroissements de débits en amont ont eu pour conséquence un accroissement des volumes d'eau expulsés de l'estuaire. Comme la campagne s'est déroulée en période de déchet, les concentrations particulières en suspension restaient élevées du fait de l'hystérésis. La conjonction de ces deux événements explique les importantes quantités de matériel particulaire expulsées de l'estuaire amont.

IV.6.2.2 - Répartition verticale des flux particuliers dans les sections

La Figure 90 présente l'évolution des flux de particules (exprimés en tonnes/20 min) pour 4 stations d'une section de Seine sur le site de La Bouille (pk 260,00) le 19/04/96 et est représentative de la répartition spatio-temporelle des flux dans toutes les sections de Seine étudiées.

Pour cette campagne, les flux résiduels de particules sont vers l'amont pour les stations 1 à 3 et vers l'aval sur la station 4 (Tableau 13). Le flux particulaire résiduel total est de 64 tonnes et est orienté vers l'amont.

Durant le flot, les flux sont maxima entre 0 et 90 minutes après la basse mer pour les stations 1 et 2 et entre 0 et 180-200 minutes pour les stations 3 et 4. Ces flux de flots sont répartis sur toute la colonne d'eau et sont supérieurs pour les stations 1 et 2.

Après ces maxima, les flux diminuent pour les 4 stations et atteignent des valeurs proches de 0 au cours de la basse mer.

Durant le jusant, les flux de particules augmentent entre 360 et 420 minutes après la basse mer locale. Ils atteignent leurs maximums entre 540 et 600 minutes après la basse mer locale pour les stations 1 et 2.

Pour la station 2, les flux maximums présents 420 minutes après la basse mer se maintiennent jusque 660 minutes après la basse mer et augmentent de nouveau. Pour la station 1, les flux augmentent entre 360 et 420 minutes après la basse mer, cette croissance se poursuit jusque 540 minutes après la basse mer puis se stabilise jusqu'à la fin de jusan.

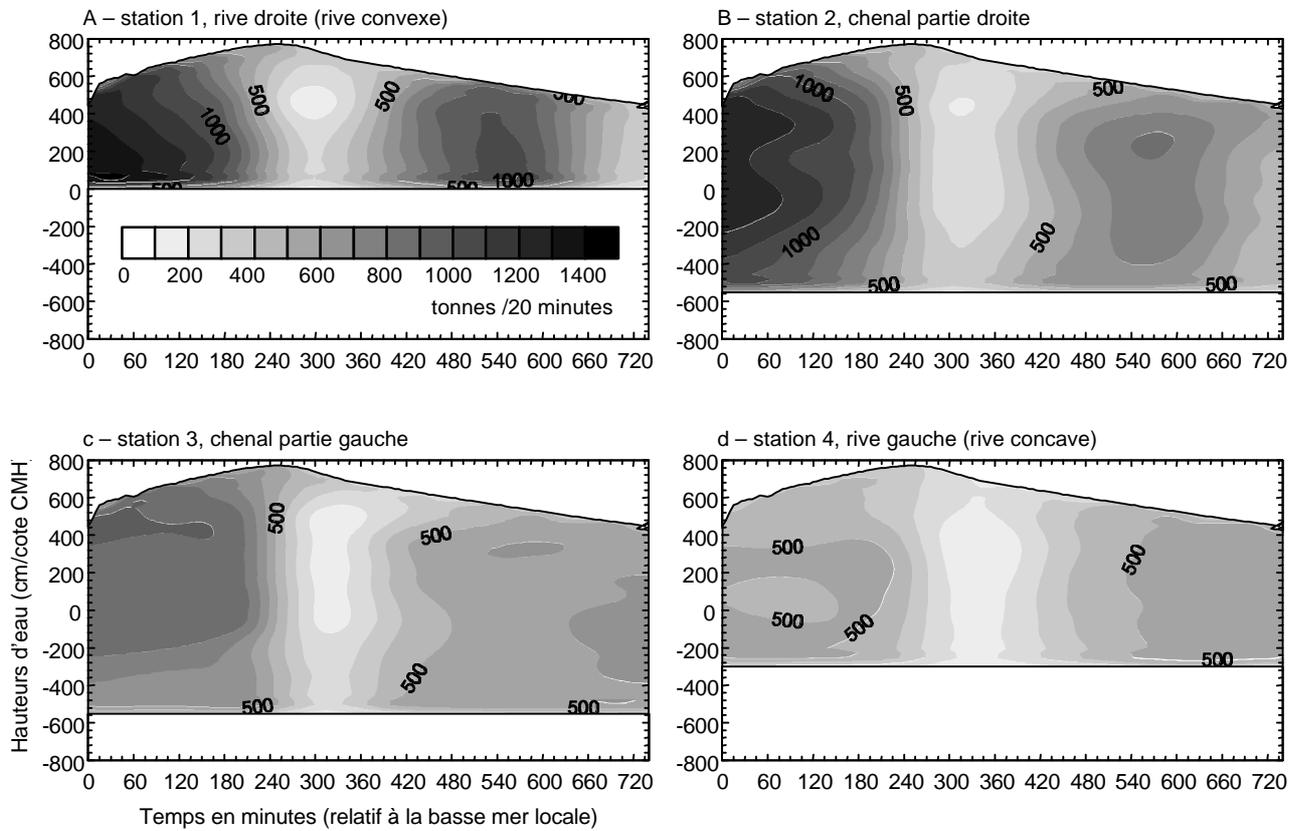


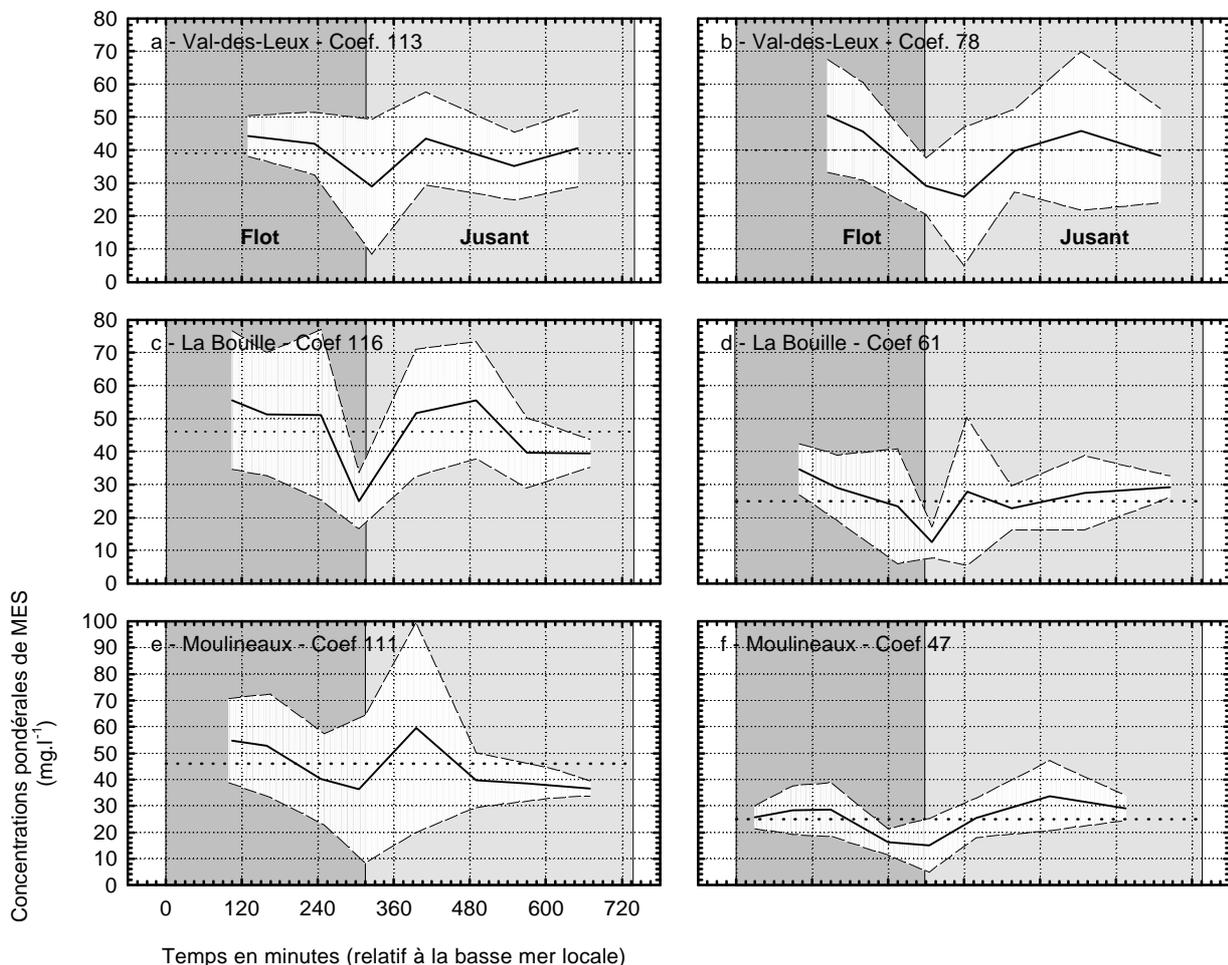
Figure 90 : Evolution spatio-temporelle des flux pondérales de MES en quatre stations d'une section transversale de Seine sur le site de La Bouille (pk 260) le 19 avril 1996 au cours d'un cycle semi-diurne de marée. Coefficient 99, débit fluvial au barrage de Poses $221 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

IV.7 - Signification et représentativité des mesures

Les variations spatiales au sein d'une section de Seine ainsi que les variations temporelles à l'échelle semi-diurne posent le problème de la signification des mesures et des échantillonnages ponctuels.

IV.7.1 - Les mesures ponctuelles

Les profils verticaux de vitesses de courants et de concentrations pondérales de MES réalisés en 4 stations d'une même section de Seine au cours des cycles semi-diurnes de marée durant la campagne de février 1997 permettent de déterminer la moyenne et l'écart type des concentrations par sections à différents moments du cycle de marée (Figure 91).



Sur les trois sites considérés et pour les deux conditions de marée, la moyenne des concentrations présente une évolution semblable à l'évolution des concentrations pondérales instantanées montrées dans les paragraphes précédents. A savoir, des concentrations plus élevées en début de flot et de jusant et des concentrations plus faibles autour des étales.

Les écarts types présentent eux, une variabilité qui ne peut être expliquée qu'une fois les caractéristiques hydrosédimentaires des sites étudiés connues.

Durant le flot et le jusant et par fortes marées, l'écart type des concentrations pondérales de MES est relativement faible sur le site de Val-des-Leux –pk 265,55 (Figure 91-a) comparées à ceux des sites de La Bouille - pk 260,00 (Figure 91-b) et de Moulineaux – pk 258,50 (Figure 91-c). Cette observation exprime une plus grande homogénéité des concentrations pondérales de matériel en suspension sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55) par rapport à celles mesurées sur les sites de La Bouille (pk 260,00) et de Moulineaux (pk 258,50) durant cette période.

En vives-eaux, la valeur plus élevée de l'écart type sur les sites de La Bouille (pk 260,00) et de Moulineaux (pk 258,50) s'explique par la présence en rive gauche de ces deux sites, situés en méandre, de dépôts de matériel particulaire fin. Les courants de flot permettent la remise en suspension de ce matériel particulaire ce qui provoque un accroissement local des concentrations pondérales de MES.

En période de déchet, l'écart type des concentrations pondérales de MES est beaucoup plus homogène entre les trois sites. Ceci s'explique par les faibles courants de flot qui ne provoquent pas ou peu de remise en suspension sur les zones de dépôts de La Bouille (pk 260,00) et de Moulineaux (pk 258,50).

Durant l'étales de pleine mer, les concentrations moyennes de MES diminuent quels que soient les conditions de marée et les sites considérés. En revanche, les écarts types de concentrations sont importants en vives-eaux sur les sites du Val-des-Leux (pk 265,55) et de Moulineaux (pk 258,50) du fait de fortes concentrations pondérales de MES dans le chenal à proximité du fond.

L'important écart type des concentrations pondérales de MES, constaté sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) durant le jusant en déchet, peut être expliqué par l'évacuation depuis l'amont de matériel particulaire retenu à la faveur des vives-eaux.

En fonction de la station et de la profondeur étudiée, les concentrations pondérales de MES obtenues à partir de mesures ponctuelles ne suivent pas forcément la même évolution que les concentrations moyennes. La comparaison des concentrations pondérales moyennes de MES avec les concentrations pondérales mesurées sur trois stations sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) montre qu'en rive gauche, en surface les concentrations pondérales mesurées suivent la même évolution que celle des concentrations moyennes mais les sous-estiment (Figure 92-a).

En rive droite, à 1 m sous la surface, les concentrations pondérales mesurées suivent les évolutions de la concentration moyenne mais les concentrations pondérales sont sous-estimées durant le flot et surestimées durant le jusant. A 1 m au-dessus du fond, en rive gauche, les concentrations pondérales de MES montrent une évolution opposée à celles des concentrations pondérales moyennes lors de l'étales de pleine mer du fait de la concentration à proximité du fond de matériel sédimenté depuis la surface. Du fait des particularités locales de chaque station, il est impossible d'obtenir une relation simple entre concentrations pondérales de MES mesurées et concentrations moyennes (Figure 92-b).

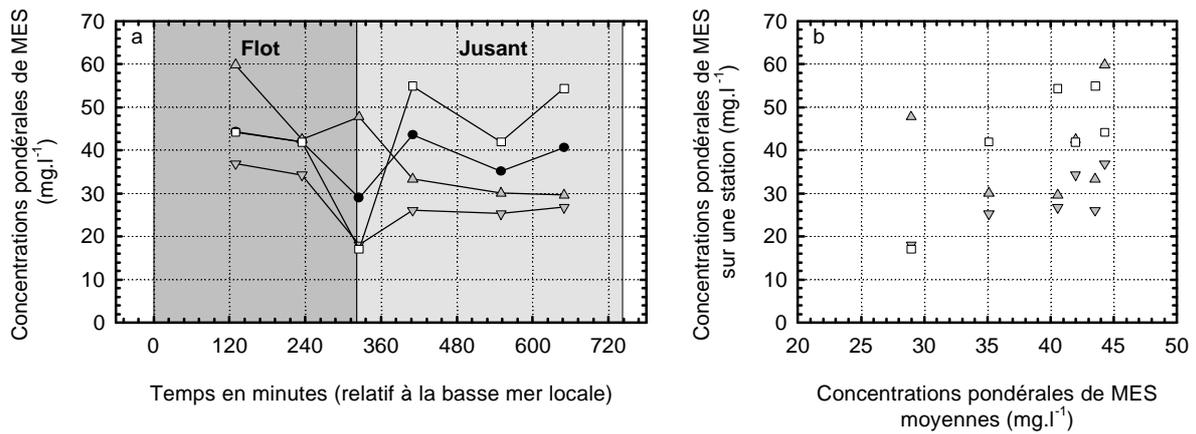


Figure 92 : (a) Evolution comparées au cours d'un cycle de marée (le 08/02/96 sur le site de Val-des-Leux) des concentrations moyennes sur la section (—●—), des concentrations pondérales de MES mesurées 1 m sous la surface en rive gauche (—▽—), 1 m sous la surface en rive droite (—□—) et à 1 m au-dessus du fond en rive gauche (—△—). (b) Relation entre concentrations moyennes sur la section et concentrations pondérales à 1 m sous la surface en rive droite, à 1 m sous la surface en rive gauche et à 1 m au-dessus du fond en rive gauche.

IV.7.2 - Les concentrations moyennes et les flux

Le calcul d'une concentration pondérale moyenne de MES sur un cycle de marée est intéressant dans la mesure où ce calcul simple et immédiat permet de mettre en évidence les variations de concentrations du matériel particulaire sur des périodes de temps supérieures à la marée. Sa signification pose toutefois des problèmes dans la mesure où son calcul n'intègre pas la dynamique des courants alternatifs. Ainsi, un même stock particulaire pourra être intégré deux fois dans le calcul de la moyenne, une fois au cours du flot et éventuellement une seconde fois au cours du jusant. Durant les périodes où les courants alternatifs sont très marqués, cette moyenne sur le cycle de marée ne peut donc être utilisée pour calculer un flux particulaire.

En divisant les flux de particules et d'eau calculés par intégration des vitesses de courants et des concentrations pondérales de MES sur une section de Seine au cours d'un cycle semi-diurne de marée, il est possible de calculer une concentration pondérale moyenne (Tableau 14).

Les concentrations pondérales moyennes obtenues par ce calcul sont en fait des concentrations résiduelles sur le cycle de marée. Suivant les conditions de marée considérées ces concentrations résiduelles peuvent être négatives du fait du transport résiduel vers l'amont.

Les concentrations pondérales ainsi calculées ne permettent pas de mettre en évidence les variations de concentrations dans la colonne d'eau avec les cycles de marée mais reflètent les conséquences des courants alternatifs et des hétérogénéités locales sur le transport particulaire résiduel au sein de l'estuaire.

Tableau 14 : Concentrations pondérales moyennes calculées sur un cycle de marée d'après les flux résiduels d'eau et de particules obtenus par intégration des mesures de courants et de concentrations pondérales de MES sur des sections de Seine.

<i>Site</i>	<i>Date</i>	<i>Coefficient de marée</i>	<i>Flux résiduels d'eau en m³ sur le cycle de marée</i>	<i>Flux résiduels de MES en tonnes sur le cycle de marée</i>	<i>Concentrations pondérales résiduelles (mg.l⁻¹)</i>
<i>Val-des-Leux</i>	18/04/96	101	-9 006 110	-197	21,9
<i>La Bouille</i>	19/04/96	99	-9 306 677	64	-6,9
<i>Moulineaux</i>	20/04/96	90	-10 954 201	-59	5,4
<i>Moulineaux</i>	23/04/96	70	-12 960 988	-326	25,2
<i>La Bouille</i>	24/04/96	58	-12 724 093	-298	23,4
<i>Val-des-Leux</i>	25/04/96	46	-12 545 322	-309	24,6
<i>Moulineaux</i>	01/10/96	93	-10 301 594	677	-65,7
<i>La Bouille</i>	02/10/96	79	-12 668 367	96	-7,6
<i>Val-des-Leux</i>	03/10/96	64	-10 878 982	-842	77,4
<i>Val-des-Leux</i>	13/02/97	78	-16 440 759	-444	27,0
<i>La Bouille</i>	14/02/97	61	-25 601 189	-597	23,3
<i>Moulineaux</i>	15/02/97	47	-34 160 034	-974	28,5

IV.8 - Conclusion

IV.8.1 - Hydrologie

L'onde de marée subit une déformation et un amortissement durant sa progression dans l'estuaire amont. L'asymétrie flot/jusant acquise dans l'estuaire moyen est conservée dans l'estuaire amont et est accompagnée d'un raidissement du front de l'onde.

L'asymétrie et le raidissement du front de l'onde sont plus prononcés en vives-eaux qu'en mortes-eaux et ont pour conséquences une quasi-disparition de l'étalement de basse mer et une plus courte durée du flot par rapport au jusant. En amont de Rouen, cette asymétrie et ce raidissement du front de l'onde tendent à disparaître

Comme le laissaient prévoir les études réalisées sur d'autres estuaires cette différence de durée entre flot et jusant entraîne des vitesses de flot supérieures à celles de jusant. Cette dominance des vitesses maximales de flot sur les vitesses de jusant s'exprime essentiellement en marée moyenne et en marée de vives-eaux.

Le raidissement du front de l'onde engendre une renverse quasi instantanée jusant/flot et un pic de courants en tout début de flot durant les vives-eaux (coup de flot). En dehors des marées de mortes-eaux et hors « coup de flot », les maxima de vitesses de courants dans la tranche d'eau et de vitesses critiques d'érosion sont atteints 60 minutes après la basse mer locale.

La comparaison des marnages actuels avec ceux mesurés par Le Floch, 1961 montre d'importantes différences. Depuis les années 50 les marnages ont subi un accroissement généralisé sur tout l'estuaire. Le renforcement des marnages en mortes-eaux entre Duclair et Rouen dans les années 50 se retrouve à l'époque actuelle. En revanche, la diminution des marnages d'aval en amont sur tout l'estuaire dans les années 50 ne se rencontre plus à l'heure actuelle. En effet, entre Duclair et Rouen, les marnages en vives-eaux sont constants voire légèrement amplifiés.

Cette modification du marnage entre les années 50 et aujourd'hui est expliquée par des aménagements réalisés sur l'estuaire depuis cette période. Ces aménagements ont en outre eu pour conséquence le déplacement vers l'amont du point caractéristique. Ce dernier était localisé dans les années 50 entre Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et Vatteville-la-Rue (pk 317,00), aujourd'hui il se situe entre Heurteville (pk 297,65) et Caudebec-en-Caux (pk 310,00).

L'oscillation des masses d'eau avec les cycles semi-lunaires et lunaires engendre une accumulation d'eau dans l'estuaire amont entre mortes-eaux et vives-eaux. La quantité d'eau dans l'estuaire est maximale lors des vives-eaux et minimale lors des mortes-eaux. Les périodes de revif et de déchet constituent respectivement des périodes de remplissage et de vidange de l'estuaire amont. Ces vidanges et remplissages de l'estuaire ont d'importantes conséquences sur le temps de transit des masses d'eau. En revif, le transit des masses d'eau, de l'aval vers l'amont de l'estuaire, se trouve ralenti par rapport à leur temps de transit en déchet.

Cette oscillation semi-lunaire des masses d'eau provoque l'apparition de courants qui se superposent aux courants de flot et de jusant. Ces courants sont en moyenne de 1 cm.s^{-1} en aval immédiat de Rouen (pk 265,55) et de 2 cm.s^{-1} dans le secteur aval de l'estuaire fluvial (Heurteauville - pk 297,65).

Malgré la forte chenalisation de l'estuaire en aval de Rouen, d'importantes hétérogénéités de vitesses de courants existent au sein d'une même section de Seine. Ces hétérogénéités s'expriment tant en méandres que dans des secteurs d'apparence rectiligne. Elles se traduisent essentiellement par des différences d'intensité entre vitesses de flot et de jusant d'un site à l'autre ainsi que par des différences de durée des étales.

Les différentes caractéristiques de la marée (marnage, asymétrie, front de l'onde, volumes oscillants) s'estompent rapidement entre l'aval et l'amont de Rouen. Cette rupture des caractères de la marée dans le secteur de Rouen peut être expliquée par des particularités morphologiques (voir page 23) et tend à confirmer que ce secteur constitue la limite de dominance des courants de flots sur les courants de jusants.

IV.8.2 - Cycles érosion/sédimentation

Des variations de concentrations pondérales de MES ont été mesurées dans l'estuaire amont durant la période d'étiage jusque Rouen (pk 241,80). Ces variations de concentrations sont plus marquées en aval (Caudebec-en-Caux – pk 310,00) qu'en amont de l'estuaire fluvial (pk 241,80).

À l'échelle de la marée semi-diurne, une partie de ces variations de concentrations s'explique par les évolutions locales des vitesses de courants de flot et de jusant qui engendrent des cycles érosion/sédimentation.

Ces cycles érosion/sédimentation sont plus marqués en vives-eaux et en déchet qu'en mortes-eaux et en revif. Ils se traduisent par un accroissement des concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau au début du flot suivi d'une diminution de ces concentrations à l'étales de pleine mer. En début de jusant, l'accélération des vitesses de courants provoque un accroissement des concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau. La diminution des vitesses de courant en fin de jusant entraîne une diminution des concentrations pondérales de MES. L'absence d'étales de basse mer, hors période de mortes-eaux, ne permet pas une diminution importante des concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau lors de la renverse jusant/flot.

IV.8.3 - Transport en suspension

Certaines variations des concentrations pondérales de MES durant les cycles semi-diurnes ne trouvent pas d'explication en regard des variations locales des vitesses de courants mais s'expliquent par le transport en suspension, depuis des zones de dépôts (zones sources), de matériel particulaire. Plusieurs de ces zones sources ont pu être mises en relation avec des structures sédimentaires à faciès vaseux identifiées lors des campagnes de couverture sédimentaires.

IV.8.4 - Dépôts de matériel particulaire fin et cycles vives-eaux/mortes-eaux

L'existence de cycles semi-diurnes érosion/sédimentation implique la présence de dépôts particuliers durant les plus faibles périodes de courants. C'est à dire durant l'étales de pleine mer et dans une moindre mesure durant l'étales de basse mer.

Les variations de concentrations, à l'échelle des cycles vives-eaux/mortes-eaux, impliquent, elles aussi l'existence de dépôts de matériel particulaire fin en période de mortes-eaux.

L'accroissement des vitesses de courants en revif permet l'érosion et la remise en suspension dans la colonne d'eau de ces dépôts particuliers. L'érosion de ce matériel est maximale en vives-eaux. Sous l'effet du phénomène de latence à la sédimentation, les concentrations maximales dans la colonne d'eau restent élevées en période de déchet.

Au fur et à mesure que les vitesses de courants diminuent avec l'énergie force de la marée, les dépôts de matériel particulaire de pleine mer ne peuvent être repris par les courants de la marée suivante et commencent à se consolider. Ce phénomène est amplifié en mortes-eaux par la diminution importante des vitesses de courants et l'apparition d'une étale de basse mer.

La localisation et le degré de consolidation de ces dépôts restent, pour l'heure, inconnus.

IV.8.5 - Microgranulométrie

Le matériel particulaire en suspension dans l'estuaire amont est constitué majoritairement de particules de diamètre inférieur à 63 μm (voir page 114).

Au regard de la seule évolution des spectres microgranulométriques, la distribution de la population particulaire fine en suspension est constante au cours d'un même cycle de marée, en surface et au fond. Cette observation est valable pour tous les cycles de marée que nous avons étudiés sur le plan de la microgranulométrie. Un prélèvement, réalisé à n'importe quel moment du cycle semi-diurne de marée, peut être considéré qualitativement comme représentatif des populations présentes en suspension pour le cycle de marée dans sa totalité.

Une observation plus précise de l'évolution de cette distribution montre l'existence de deux sous populations de modes 12-15 μm et 30-40 μm . La première de ces deux sous populations (12-15 μm), composée de petits agrégats et de diatomées, domine l'ensemble de la population particulaire totale en suspension. Elle est plus représentée à proximité du fond que la seconde population particulaire (30-40 μm), composée d'agrégats plus importants.

Les différences dans les populations particulières en suspension sur une section de Seine s'expliquent par la présence, sur ces sites, de zones de dépôts de matériel particulaire. L'érosion de ces zones de dépôt modifie la granulométrie du matériel particulaire en suspension.

IV.8.6 - Flux

Les hétérogénéités spatiales de vitesses de courants sur les sections de Seine (voir page 96) entraînent des hétérogénéités de concentrations pondérales de MES sur cette même section. Le calcul par intégration sur la section des vitesses de courants et des concentrations pondérales de MES durant le cycle semi-lunaire de marée, permet de déterminer les flux résiduels d'eau et de particules transportés au travers de cette section au cours d'une marée.

IV.8.6.1 - Flux d'eau

Les flux résiduels d'eau sont dépendants des coefficients de marée et présentent une évolution concordante avec les variations de volumes d'eau dans l'estuaire amont (voir page 85). Les flux résiduels d'eau en déchets sont supérieurs à ceux arrivant au barrage de Poses durant cette période.

Pour des débits au barrage de Poses $<350\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ il n'existe pas de relation entre ces débits à Poses et les débits calculés par intégration. En revanche, une augmentation des débits au barrage a pour conséquence une augmentation des débits résiduels calculés par intégration dans l'estuaire.

IV.8.6.2 - Flux de particules

Les flux résiduels particuliers présentent, lors des fortes marées, sur certains sites, une orientation aval/amont. L'observation dans le détail de ces remontées révèle qu'elles se produisent essentiellement sur des zones de dépôts de matériel particulaire fin (intérieur de méandre comme à La Bouille et à Moulineaux et le long des bords comme à Val-des-Leux).

IV.8.7 - Représentativité

La constante variation des conditions hydrologiques rend difficile l'interprétation des mesures ponctuelles et nécessite l'adoption de stratégies d'études adaptées afin de trouver une signification aux mesures réalisées dans l'estuaire amont.

L'implantation de stations de mesures en continu des concentrations donne une réponse adaptée à la signification d'une mesure ponctuelle dans une chronique sur le long terme. Toutefois, compte tenu des hétérogénéités spatiales observées, il est difficile de valider sur le plan quantitatif les mesures ainsi réalisées. Seules, de complexes études sur les sections peuvent apporter des réponses quant aux flux particuliers traversant les sections de Seine et des estuaires en général et cela, quelle que soit l'échelle de temps considérée.

Chapitre V

Transport du matériel particulaire en suspension au cours des crues

V.1 - Introduction

Durant les 9 à 10 mois d'étiage, une forte dépendance entre phénomènes de marées et transfert particulaire a pu être montrée. Toutefois, à l'échelle annuelle, les quantités de matériel particulaire arrivant dans l'estuaire amont par l'intermédiaire du fleuve en étiage sont très inférieures aux quantités de matériel transportées pendant la crue.

Il convient de s'interroger sur les conséquences de la hausse simultanée des débits fluviaux et des flux particuliers arrivant dans l'estuaire durant les crues.

Cette hausse des débits fluviaux est-elle susceptible d'effacer les effets de la marée, transformant ainsi l'estuaire amont en une extension du fleuve ?.

Les suivis en continu réalisés dans l'estuaire (voir Figure 36, page 71) semblent accréditer cette hypothèse. Toutefois, les observations entre concentrations pondérales de MES en amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00) et à Rouen (pk 239,80) semblent mettre en évidence une disparition de matériel entre les deux sites (voir Figure 34, page 66).

V.2 - Hydrologie

V.2.1 - Lieux géométriques des basses mers et des pleines mers

Les courbes de la Figure 93 montrent l'évolution des niveaux de pleine mer et de basse mer pour trois marées de coefficients 61-62 et de débits au barrage de Poses (pk 202,00) de $1\,163\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, de $641\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et de $294\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Un accroissement du débit a pour conséquence une augmentation du niveau des pleines mers et des basses mers sur l'ensemble de l'estuaire. Cette augmentation est plus marquée en amont de l'estuaire qu'en aval et traduit une mauvaise évacuation des eaux depuis l'amont de l'estuaire.

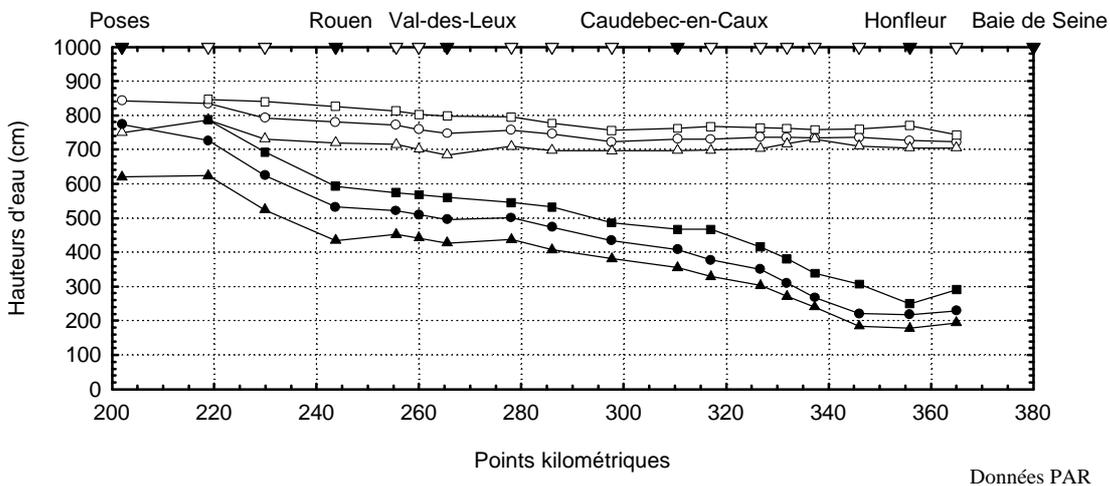


Figure 93 : Niveaux de pleine mer et de basse mer pour trois marées de coefficients 61-62 et de débits à Poses de $1\,163\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (—□— pleine mer, —■— basse mer) de $641\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (—○— pleine mer, —●— basse mer) et $294\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (—△— pleine mer, —▲— basse mer).

Durant les crues, les niveaux de basses mers sont soumis aux variations de la marée et des débits fluviaux. Il devient dès lors très difficile de déterminer une position pour le point caractéristique.

V.2.2 - Marnages

La Figure 94 montre l'évolution du marnage dans l'estuaire de Seine pour trois marées de coefficient 61 et 62 et de débits respectifs de $1\,163\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $641\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et $294\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

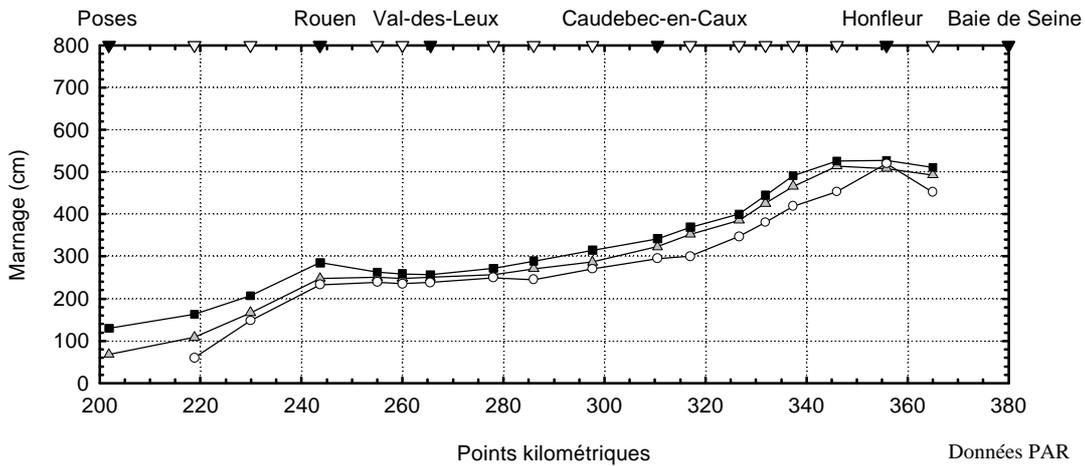


Figure 94 : Marnage pour trois marées de coefficients 61-62 et de débits de $1\,163\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—○—), de $641\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—△—) et de $294\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—■—). Le marnage est d'autant plus marqué sur tout l'estuaire que le débit du fleuve est faible.

En crue, le marnage subit un amortissement sur l'ensemble de l'estuaire. Cet amortissement est d'autant plus fort en amont de Rouen que les débits fluviaux au barrage de Poses (pk 202,00) sont importants. Le caractère synchrone à hypersynchrone de l'estuaire amont entre Duclair (pk 278,00) et Rouen (pk 243,70) est toujours observable en période de crue.

V.2.3 - Asymétrie de l'onde de marée

L'augmentation des débits fluviaux au barrage de Poses (pk 202,00) engendre une diminution de la durée du flot et un accroissement de la durée du jusant (Figure 95 a et c). L'escarpement du front de l'onde est peu sensible aux variations de débits, excepté en période de forts débits et de faible marée du fait de la diminution du marnage (Figure 95).

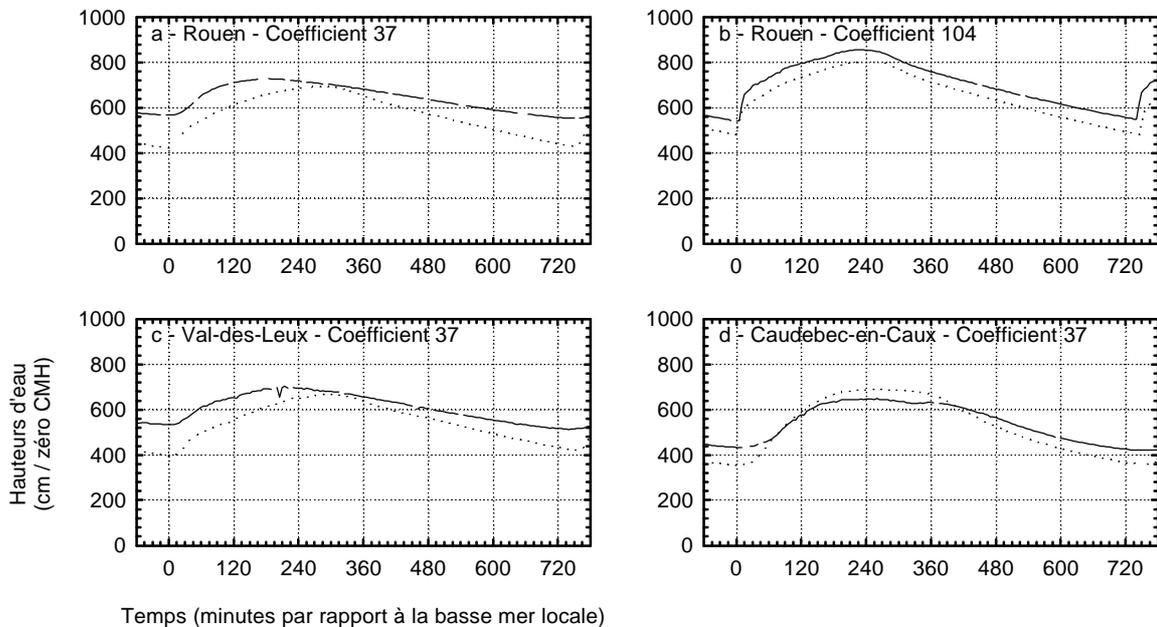


Figure 95 : Evolution de l'asymétrie de l'onde de marée dans l'estuaire de la Seine sur trois sites : (a) Rouen (pk243,70), coefficient 37, (b) Rouen (pk243,70), coefficient 104, (c) Val-des-Leux (pk 265,55), coefficient 37 (d) Caudebec-en-Caux (pk 310,50) coefficient 37, pour des débits fluviaux au barrage de Poses de $176\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (.....) et de $1\,284\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—), sauf (b) débits fluviaux au barrage de Poses de $295\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (.....) et de $995\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—),

V.2.4 - Volumes oscillants

Les oscillations des volumes d'eau en excès dans l'estuaire, du fait des variations semi-lunaires des basses mers, sont toujours visibles durant les crues (voir page 85). Toutefois, la réponse de ces volumes oscillants est complexe dans la mesure où aux variations de hauteurs d'eau liées à la marée s'ajoutent celles liées aux débits (Figure 96).

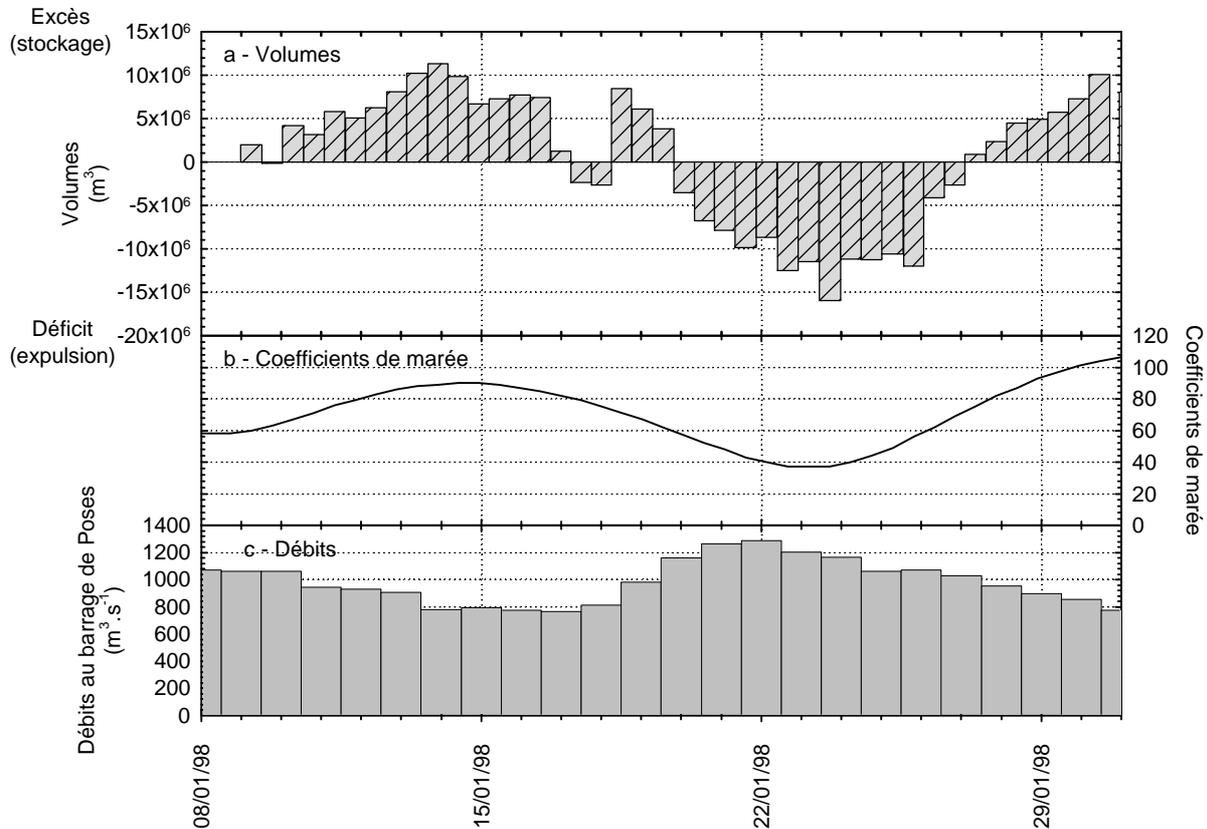


Figure 96 : (a) Volumes totaux d'eau en excès ou en déficit par cycle semi-diurne de marée dans l'estuaire amont (▨) en amont d'Heurteauville (pk 297,65). Le calcul est réalisé par rapport au niveau de basses mers, avec un volume de référence égal à 0 le 08/01/98. (b) Coefficients de marée. (c) Débits au barrage de Poses – pk 202,00.

Une diminution du débit fluvial a pour conséquence une diminution de la basse mer donc des volumes d'eau stockés dans l'estuaire. Si l'on se réfère à l'étiage, un accroissement du coefficient de marée a pour conséquence une augmentation du volume d'eau stocké dans l'estuaire. En crue, entre le 08/01/98 et le 15/01/98, la résultante de ces deux phénomènes est un accroissement des volumes d'eau en amont d'Heurteauville (pk 397,65).

La diminution des coefficients de marée après le 15/01/98, alors que les débits sont quasi constants, provoque une expulsion d'eau de l'estuaire. L'accroissement des débits à partir du 18/01/98 provoque un soudain accroissement des volumes d'eau présents dans l'estuaire bien que l'on soit toujours en déchet. Après cette date, les débits sont en constante augmentation jusqu'au 22/01/98 et les coefficients de marée sont en diminution. Le résultat de ces deux phénomènes, opposés en termes de stockage d'eau dans l'estuaire, se traduit par une expulsion d'eau. A partir du 24/01/98 les débits diminuent ce qui engendre une diminution du niveau des basses mers. Parallèlement à cette diminution de débits, les coefficients de marée augmentent, ce qui a pour conséquence une augmentation du niveau des basses mers. La résultante

de ces deux phénomènes est, à nouveau, un accroissement des volumes d'eau stockés dans l'estuaire une domination des effets de la marée sur la crue.

Les volumes oscillants en excès ou en déficit durant la crue sont du même ordre de grandeur que les volumes oscillants en excès ou en déficit durant l'étiage (voir page 85). Ils sont, cependant, faibles comparés aux volumes d'eau introduits dans l'estuaire au cours d'une crue. Entre le 08/01/98 et le 13/01/98, près de 520.10^6 m^3 d'eau ont été introduits dans l'estuaire par la crue. Durant cette même période, 11.10^6 m^3 d'eau ont été stockés dans l'estuaire sous l'influence des marées et des débits soit 2 % du volume d'eau introduit par la crue.

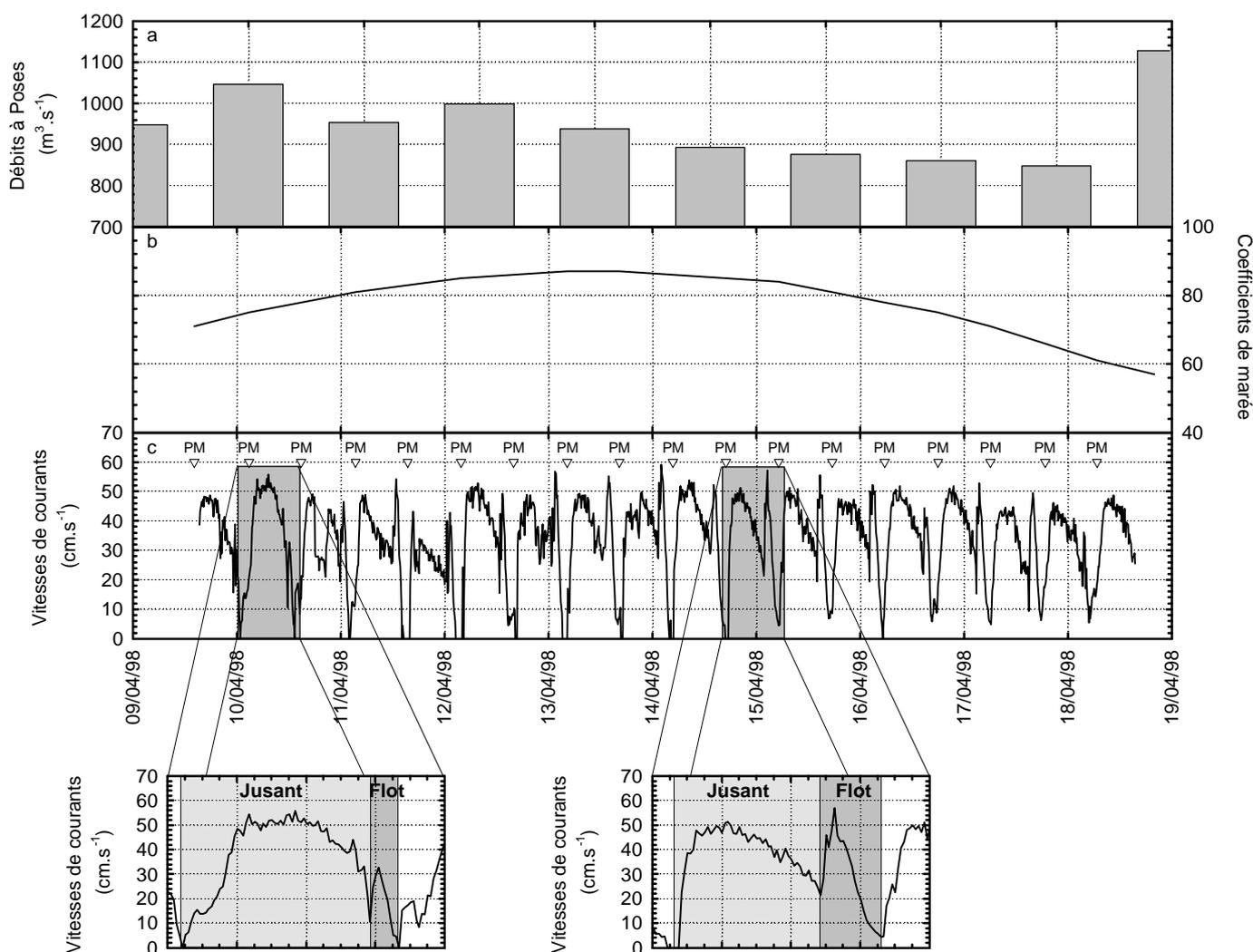


Figure 97 : (a) Débits au barrage de Poses. (b) Coefficients de marée. (c) Vitesses de courants sur le site de l'Île Lacroix au cours de la crue d'avril 1998. (Vitesses moyennes sur 10 minutes)

V.2.5 - Vitesses de courants

La Figure 97 présente les vitesses de courants enregistrées sur le site de Rouen en période de crue et de vives-eaux. Durant les périodes de plus forts débits et de plus faible marée comme le 10/04/98 et le 18/04/98, l'accélération des vitesses de courants en début de flot se trouve fortement atténuée et reste très inférieures à celles de jusant ; la durée du flot elle-même se trouve fortement réduite (environ 1 heure).

Avec l'accroissement des coefficients de marée et la diminution des débits du fleuve (entre le 11/04/98 et le 18/04/98) la durée du flot augmente mais reste toujours très inférieure à celle d'étiage (180 minutes dans le cas présent contre 240 à 300 minutes pour l'étiage). Parallèlement à cette augmentation de durée, les courants de flot sont renforcés et leurs maxima atteignent ceux du jusant.

V.3 - Impacts hydrosédimentaires des crues estivales

Durant la période d'étiage, suite à des précipitations importantes, les débits fluviaux augmentent au barrage de Poses, dépassant les $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant quelques jours. Ces petites crues ne présentent pas des débits suffisants pour mobiliser et transporter de grandes quantités de matériel en suspension. Dans la plupart des cas, les concentrations pondérales de MES au barrage de Poses ne varient pas avec ces hausses de débits (Figure 98).

Au cours de l'étiage 1997, deux épisodes de crues se sont produits, début mai et début juillet. Pour ces deux crues, l'accroissement des débits n'a pas provoqué de variation notable des concentrations pondérales particulières au barrage de Poses (pk 202,00). En revanche, dans l'estuaire amont de la Seine, les concentrations pondérales particulières ont été modifiées.

Pendant la crue et après la crue, les variations semi-diurnes des concentrations pondérales de MES sont toujours mesurées sur les trois sites estuariens de Rouen (pk 241,80), de Val-des-Leux (pk 265,55) et de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) (Figure 42, page 73).

En revanche, le passage de cette petite crue provoque une disparition temporaire des cycles semi-lunaires sur le site de Val-des-Leux (pk 265,55). Sur le site de Rouen (pk 241,80) les effets de cette petite crue sont moins nets, les cycles semi-lunaires semblent toujours présents mais sont atténués (Figure 98).

Ces disparitions et atténuations des variations de concentrations pondérales de MES avec les cycles semi-lunaires et lunaires de marée s'expliquent par une diminution des stocks locaux de matériel particulaire érodable. L'accroissement des débits entraîne une expulsion de l'amont de l'estuaire, d'une partie des stocks particuliers susceptibles d'être érodés à la faveur des cycles de marée lunaires et semi-lunaires. Cette expulsion est facilitée par la coïncidence de l'accroissement des débits au barrage de Poses (pk 202,00), et des vives-eaux dans l'estuaire. Ces dernières permettent la mise en suspension du matériel particulaire déposé lors des mortes-eaux.

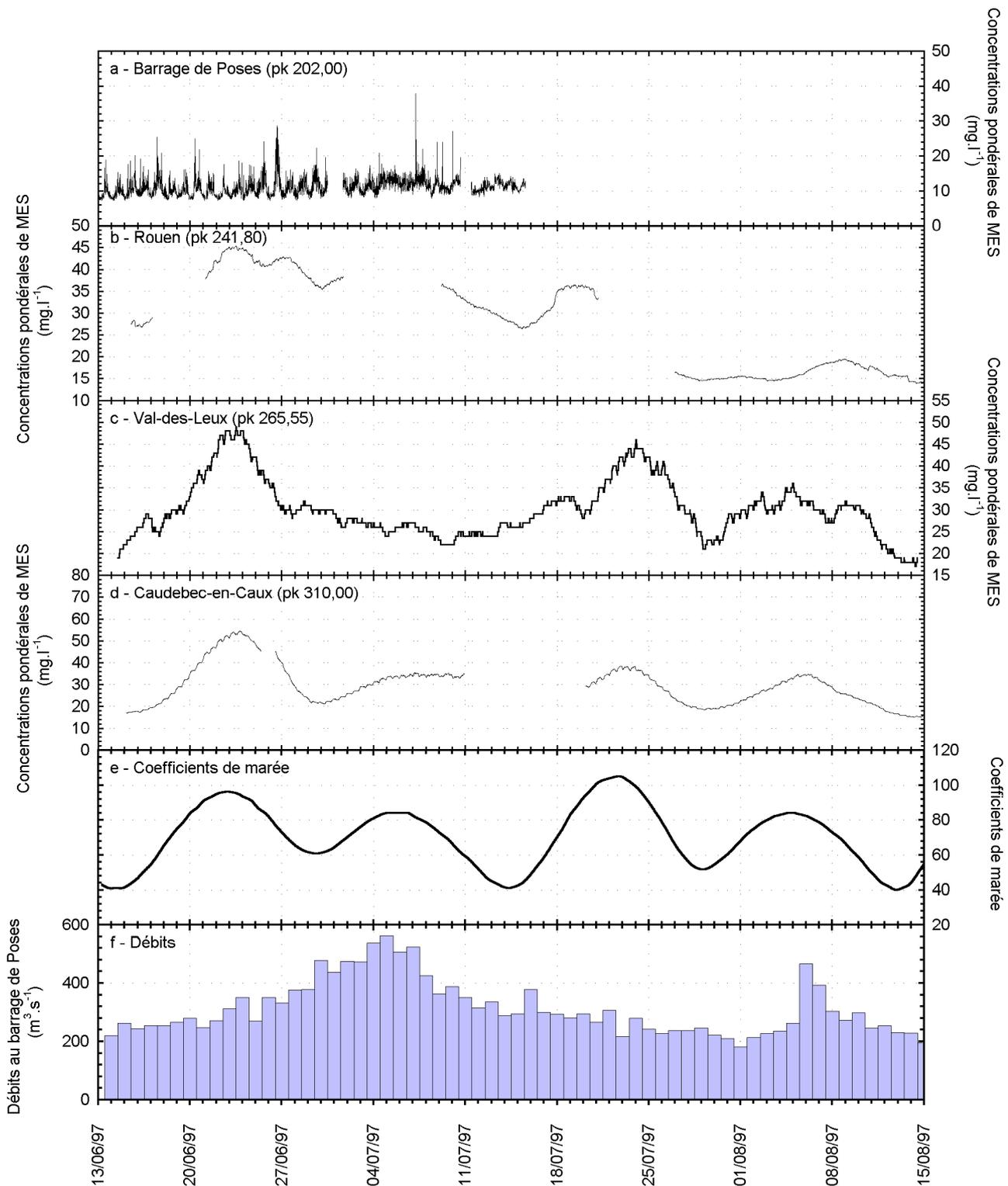


Figure 98 : Concentrations pondérales de MES (a) non lissées au barrage de Poses - pk 202,00, et avec lissage à l'aide d'une moyenne mobile sur trois jours afin de gommer les effets des cycles semi-diurnes de marée sur les sites de (b) Rouen – pk 341,25, (c) Val-des-Leux – pk 265,55 et (d) Caudebec-en-Caux – pk 310,00. (e) Coefficients de marée. (f) Débits au barrage de Poses.

L'analyse des spectres micro-granulométriques du matériel particulaire en suspension avant, pendant et après cette crue (Figure 99 et annexe V) sur les sites amont et aval de Rouen montre une modification des populations de particules fines en suspension durant la crue en aval de Rouen.

Avant la crue, le matériel particulaire en suspension en amont de Rouen (pk 206,30) est composé d'agrégats de diamètres voisins de 15 μm (Figure 99-a) et est différent du matériel en suspension en aval de Rouen. Celui-ci est composé d'agrégats et de diatomées (*Cyclotella striata*) de diamètres voisins de 20 μm et de diatomées de l'espèce *Actinocyclus normanii* qui forment le pic à 40-50 μm (Figure 99-b).

Durant le passage de la crue, la population d'*Actinocyclus normanii* a disparu en aval de Rouen et le matériel particulaire en suspension en amont et en aval de Rouen est homogène (Figure 99-c et d). Il est essentiellement composé d'agrégats organo-minéraux et traduit un renouvellement rapide des eaux et de leur charge particulaire durant cette courte montée de débit.

Après le passage de la crue, les populations particulières en suspension en aval et en amont de Rouen redeviennent différentes (Figure 99-e et f). A l'amont de Rouen, le matériel particulaire en suspension est composé essentiellement d'agrégats et de diatomées des espèces *Melosira granulata* et *Cyclotella striata*. A l'aval de Rouen, le matériel particulaire en suspension est composé d'agrégats et de plusieurs espèces de diatomées : *Cyclotella striata* entre 13 et 21 μm , *Coscinodiscus lacustris* entre 17 et 21 μm et *Actinocyclus normanii* entre 35 et 50 μm .

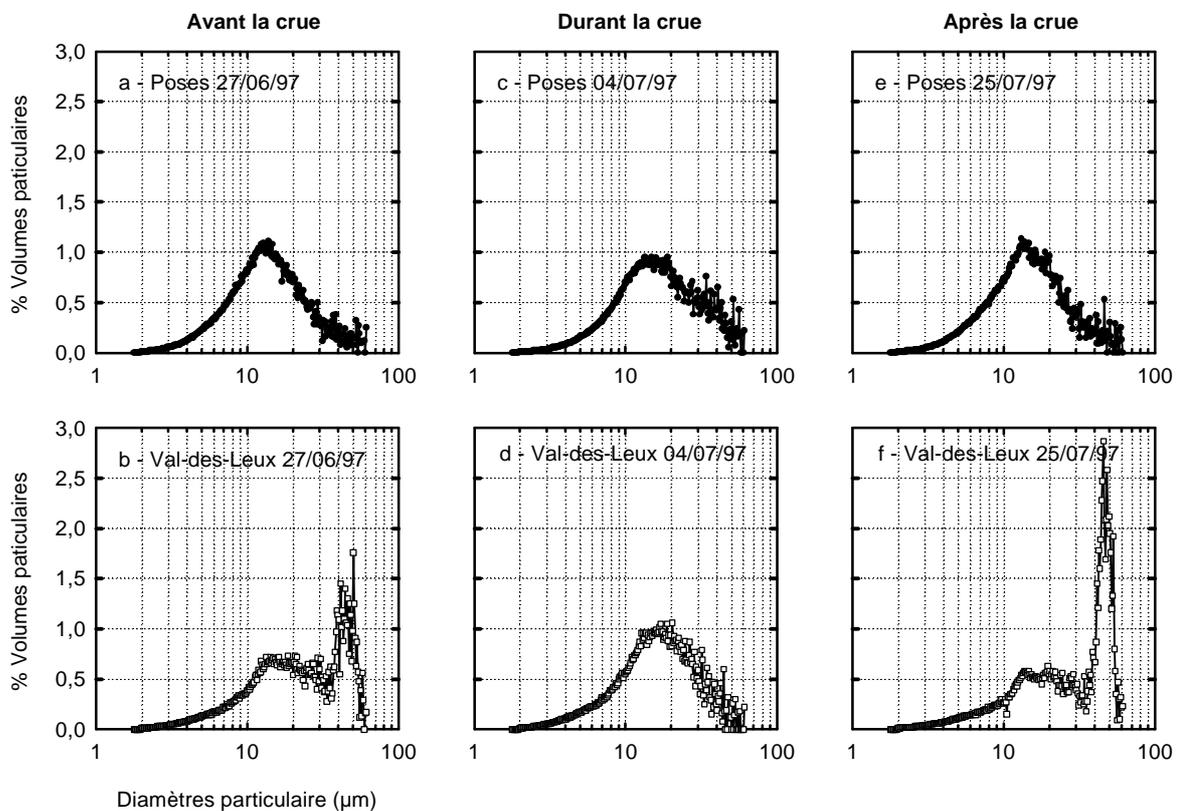


Figure 99 : Spectres micro-granulométriques du matériel particulaire fin en suspension en amont de Rouen – pk 206,30 (a), (b), (c) et en aval de Rouen sur le site du Val-des-Leux – pk 265,55 (d), (e), (f) durant un épisode de crue estivale.

Ces observations confirment que l'accroissement des débits au cours des petites crues estivales provoque une expulsion et une homogénéisation du matériel particulaire présent en suspension dans l'estuaire amont.

V.4 - Les crues hivernales

Les mesures en continu des concentrations pondérales particulières ont permis de suivre les variations de ces concentrations dans l'estuaire amont durant plusieurs crues.

En 1995-1996, les variations de concentrations pondérales de MES ont été enregistrées au cours de la crue de février/mars 1996 sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55).

Au cours de l'hiver 1996-1997, deux crues se sont succédé, séparées par 42 jours d'étiage. La première crue a duré 57 jours entre le 12 novembre 1996 et le 07 janvier 1996. La seconde crue a duré 33 jours entre le 14 février et le 27 mars 1997. Les mesures en continu des concentrations pondérales de MES ont été réalisées sur les sites du barrage de Poses (pk 202,00), de Rouen (pk 241,80) et de Val-des-Leux (pk 265,55).

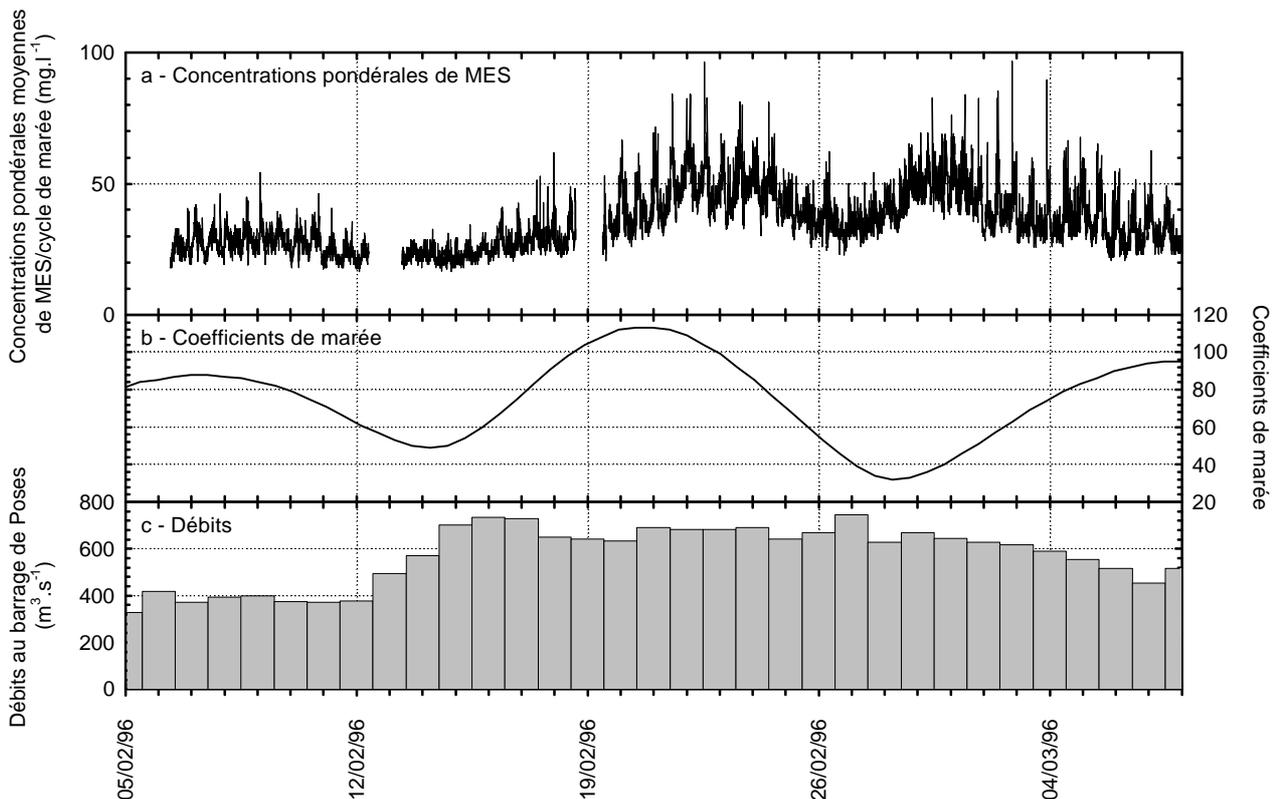


Figure 100 : (a) Concentrations pondérales de MES sur le site du Val-des-Leux – pk 265,55 au cours d'une crue (du 05/02/96 au 08/03/96). (b) Coefficients de marée. (c) Débits d'eau au barrage de Poses – pk 202,00.

Durant l'hiver 1997-1998, une première crue composée de trois montées de débits, non entrecoupées par des périodes d'étiage, est survenue à partir du 16 novembre 1997. Elle a duré 81 jours, entre le 16 novembre 1996 et le 18 février 1998. Une seconde crue est survenue tardivement en avril 1998 mais n'a pas été étudiée. Les mesures en continu des concentrations pondérales de MES ont été réalisées sur les

sites du barrage de Poses (pk 202,00), de Rouen (pk 241,80), de Val-des-Leux (pk 265,55) et de Caudebec-en-Caux (pk 310,00). En début de crue, les cycles semi-lunaires, lunaires et semi-diurnes de variations de concentrations pondérales de MES sont atténués (Figure 100).

V.4.1 - Cycles semi-diurnes de marée

L'influence de la marée à l'échelle semi-diurne sur les concentrations pondérales de MES reste perceptible durant les crues. Toutefois, l'accroissement des débits a pour conséquence une profonde modification de du schéma érosion/sédimentation observé en étiage (Figure 101).

Pour les sites de Caudebec-en-Caux (pk 310,00) et de Val-des-Leux (pk 265,55) situés le plus en aval, l'arrivée du flot provoque un accroissement des concentrations pondérales de MES dans la colonne d'eau. Cette observation, conforme au schéma érosion/sédimentation décrit au cours de l'étiage, traduit une remise en suspension de matériel particulaire fin.

En revanche, l'enregistrement des concentrations réalisé sur le site de Rouen montre une diminution des concentrations pondérales particulières à l'heure théorique d'arrivée du flot sur le site. Les forts débits entraînent la disparition de l'alternance des courants de flot et de jusant (Laval, 1955). L'écoulement des masses d'eau se fait, durant la totalité des cycles de marée, de l'amont vers l'aval. L'arrivée de l'onde de marée provoque une diminution de cet écoulement et permet au matériel particulaire en suspension de se déposer. Les concentrations pondérales de MES sont minimales 60 minutes après la basse mer, c'est à dire lors du maximum théorique de vitesses de flot mesuré en étiage. 120 minutes après la basse mer locale, les effets de l'arrivée de l'onde de marée ont disparu et les concentrations pondérales de MES retrouvent leur niveau d'avant flot. Durant le reste du cycle de marée l'accroissement des concentrations pondérales de MES est lié à une augmentation du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire au barrage de Poses (pk 202,00). La chute des concentrations pondérales de MES 600 minutes après la basse mer est un artefact et ne se rencontre pas au cours des autres cycles semi-diurnes.

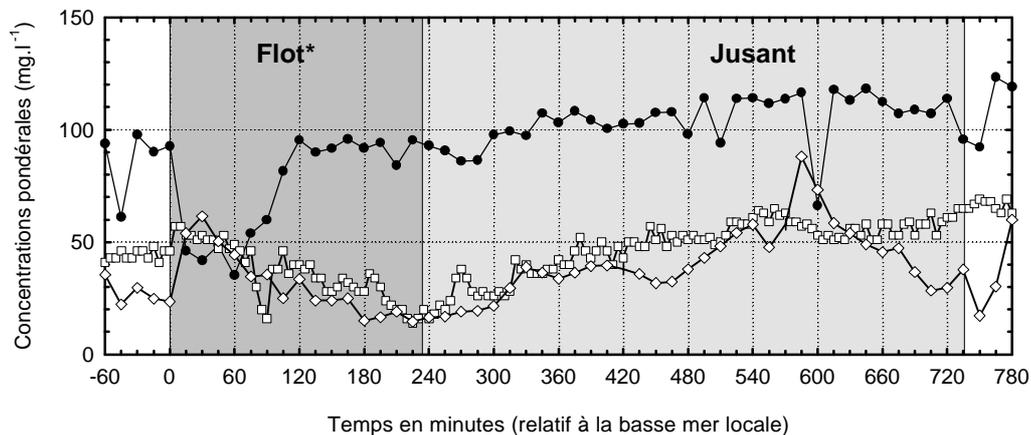


Figure 101 : Concentrations pondérales de MES au cours d'un cycle semi-diurne de marée de mortes-eaux (le 22/01/98 – coefficient de marée 37) et de débit fluvial au barrage de Poses de $1\,287\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ sur les sites de : Rouen – pk 241,80 (—●—), Val-des-Leux – pk 265,55 (—□—) et de Caudebec-en-Caux – pk 310,00 (—◇—). (* durée théorique du flot et du jusant).

Sur les deux sites situés plus en aval (Val-des-Leux – pk 265,55 et Caudebec-en-Caux – pk 310,00), les concentrations pondérales de MES diminuent en deuxième partie de flot pour atteindre le minimum autour de l'étale de pleine mer. Les concentrations pondérales de MES augmentent ensuite régulièrement

au cours du jusant indépendamment des vitesses de courants. Cet accroissement n'est pas dû à des remises en suspension locales mais au transfert en suspension depuis l'amont du matériel particulaire introduit dans l'estuaire à la faveur de la crue. Sur le site de Caudebec-en-Caux (pk 310,00), une importante augmentation des concentrations pondérales de MES se produit durant le jusant à partir de 555 minutes après la basse mer. Le maximum de concentrations de MES est atteint vers 600 minutes après la basse mer. Les concentrations pondérales particulières diminuent ensuite et atteignent un minimum en fin de jusant. Durant les crues, cet important accroissement des concentrations pondérales de MES en cours de jusant se produit pour tous les cycles semi-diurnes. A l'aide des distances advectives, il est possible de situer la source de ce pic de concentrations pondérales de MES aux environs du pk 290,00. Toutefois, compte tenu de l'accélération de l'écoulement de jusant en période de crue, cette distance advective est sous-estimée. La source de matériel se situerait donc en amont du pk 290,00.

L'accroissement des débits fluviaux avec les crues a pour conséquence une disparition des cycles érosion/sédimentation dans la partie la plus amont de l'estuaire. Plus globalement cette augmentation des débits provoque un amortissement des cycles érosion/sédimentation sur l'ensemble de l'estuaire. En crue, les concentrations pondérales de MES deviennent moins variables à l'échelle semi-diurne.

V.4.2 - Les crues

Les suivis en continu des concentrations (Figure 102 et Figure 103) montrent une évolution similaire à celle observée à partir des mesures ponctuelles sur le long terme. En période d'étiage, les concentrations dans la partie estuarienne sont supérieures à celles de la partie fluviale. En crue, les concentrations pondérales de MES au barrage de Poses – pk 202,00 sont supérieures à celles de Rouen – pk 241,80, elles-mêmes supérieures à celles mesurées en aval de Rouen.

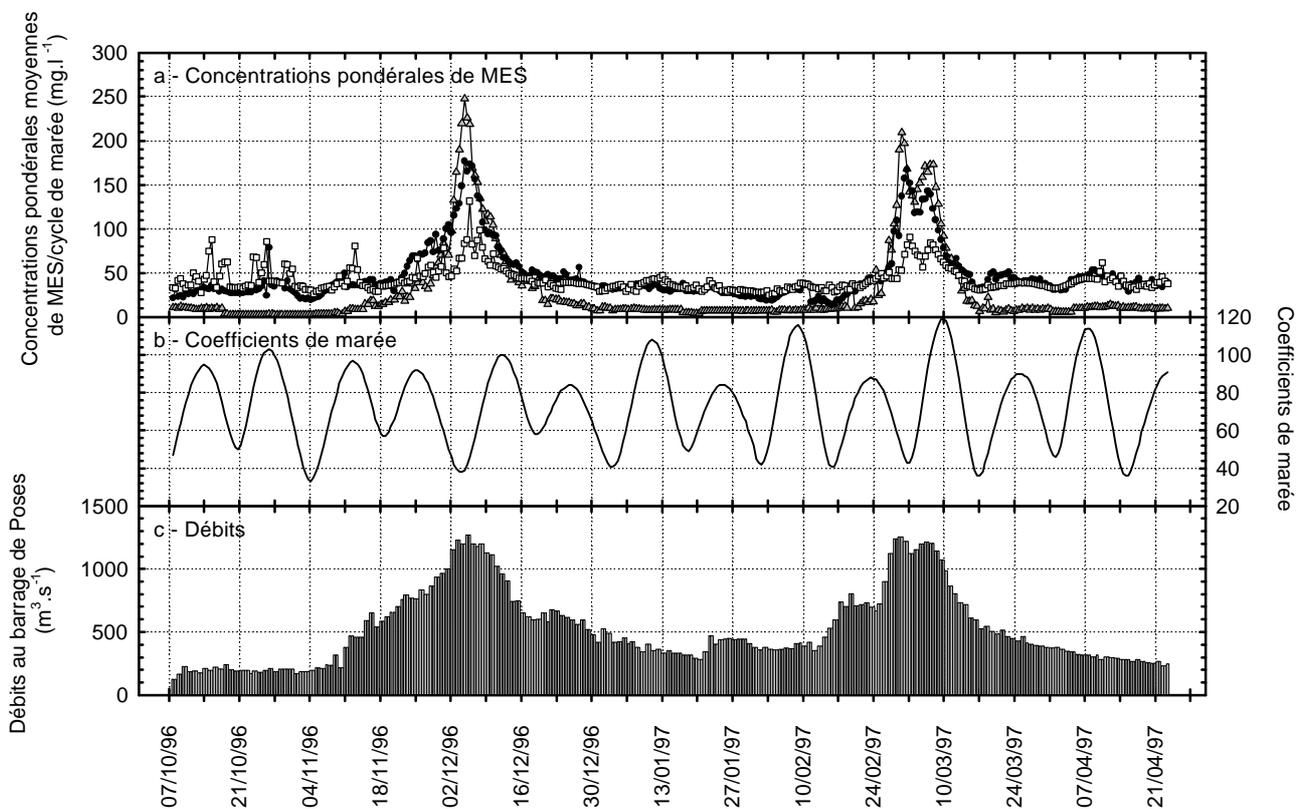


Figure 102 : (a) Concentrations pondérales moyennes de MES sur un cycle de marée au barrage de Poses – pk 202,00 (—△—), à Rouen – pk 241,80 (—●—) et au Val-des-Leux – pk 265,55 (—□—) au

cours de deux crues hivernales en 1996 et 1997. (b) Coefficients de marée. (c) Débits au barrage de Poses – pk 202,00.

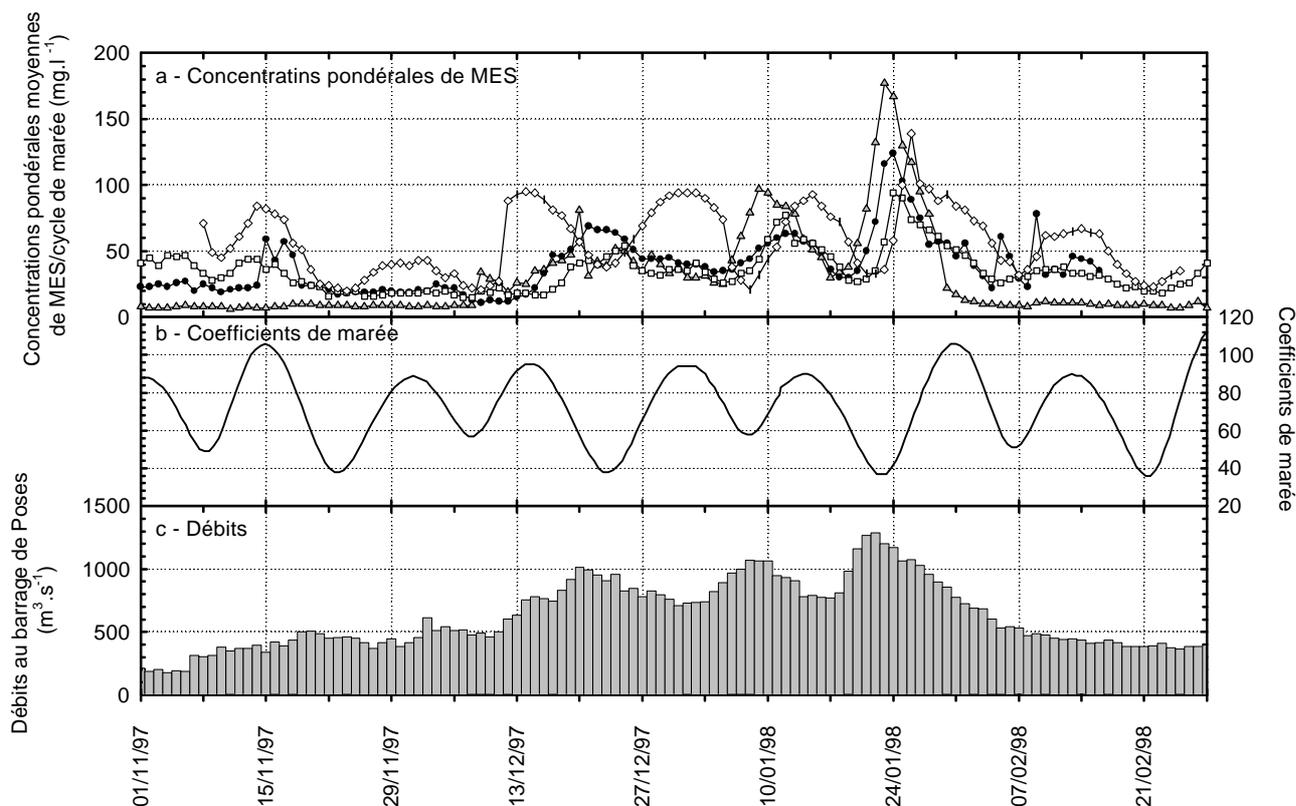


Figure 103 : (a) Concentrations pondérales moyennes de MES sur un cycle de marée au barrage de Poses – pk 202,00 (—▲—), à Rouen – pk 241,80 (—●—), au Val-des-Leux (—□—) – pk 265,55 et à Caudebec-en-Caux – pk 310,00 (—◇—) au cours des crues hivernales en 1997 et 1998. (b) Coefficients de marée. (c) Débits au barrage de Poses – pk 202,00.

Durant les crues hivernales, les cycles semi-lunaires et lunaires de marée ne sont perceptibles que sur le site le plus aval (Caudebec-en-Caux – pk 310,50).

Une analyse plus précise de ces courbes de concentrations montre qu'en tout début de crue, au barrage de Poses, alors que les débits et les concentrations augmentent faiblement, les concentrations dans le secteur estuarien s'accroissent de manière plus marquée. Ceci suggère que l'arrivée dans l'estuaire amont de l'onde de crue avec quelques jours d'avance sur le pic de MES associé joue un rôle de chasse, en évacuant de l'estuaire, une partie du matériel particulaire retenu ou déposé lors de l'étiage.

En fin de crue, alors qu'au barrage de Poses les concentrations et les débits sont revenus à des niveaux d'étiages, dans l'estuaire amont, les concentrations pondérales en MES restent supérieures à celles mesurées en étiage. Ceci suggère qu'une partie du matériel apporté dans l'estuaire par la crue est piégée en suspension dans l'estuaire amont et/ou soit transférée vers l'estuaire aval avec retard par rapport au plus gros de la crue.

V.5 - Devenir des flux dans l'estuaire amont

Compte tenu des résultats précédents, il convient de s'interroger sur l'impact quantitatif des différents phénomènes mis en évidence dans l'estuaire amont au cours des crues. Les flux massiques de MES transportés au cours des deux crues de l'hiver 1996-1997 ont été estimés à partir des mesures en continu de la concentration et des débits à Poses.

En étiage, les flux pondéraux de MES dans l'estuaire amont sont difficilement mesurables du fait de l'accroissement des concentrations pondérales dans l'estuaire amont suite aux effets des marées. Au-delà d'un débit fluvial de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, le fleuve passe d'une situation d'étiage à une situation de crue.

En faisant les hypothèses suivantes :

- a - Au-delà de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ les effets de la marée ne se font plus sentir et le débit fluvial engendre une circulation amont/aval dominante.
- b - En crue l'hétérogénéité latérale est réduite et une mesure en un point de la section est représentative de la section tout entière.

il est possible de calculer les flux particuliers transitant lors des crues pour les trois sites de mesure : Poses, Rouen et Val-des-Leux (Figure 104).

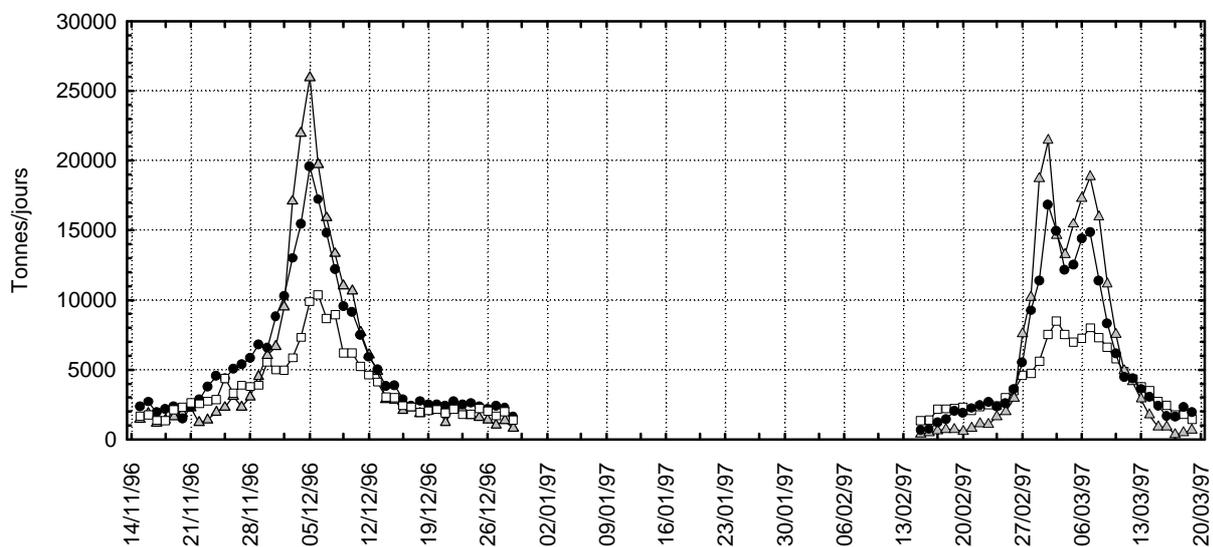


Figure 104 : Flux massiques quotidiens de particules à Poses – pk 202,00 (—□—), à Rouen – pk 241,80 (—△—) et au Val-des-Leux – pk 265,55 (—●—) au cours de deux crues hivernales en 1996-1997.

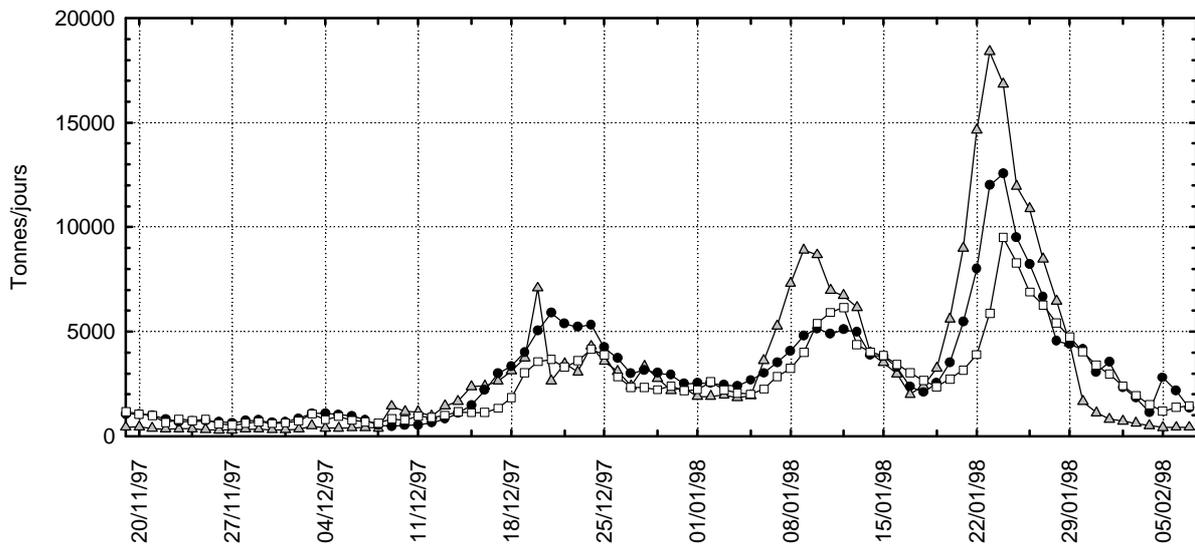


Figure 105 : Flux massiques quotidiens de particules à Poses – pk 202,00 (—□—), à Rouen – pk 241,80 (—△—) et au Val-des-Leux – pk 265,55 (—●—) au cours de deux crues hivernales en 1997-1998.

La première crue a duré 57 jours et s'est traduite par un apport de 244 100 tonnes de matériel particulaire en suspension dans l'estuaire. La seconde crue a duré 42 jours ; 204 900 tonnes de matériel en suspension sont arrivées dans l'estuaire durant cette période. Ce sont ainsi 449 000 tonnes de matériel particulaire en suspension qui sont arrivées dans l'estuaire amont à la faveur de ces deux crues. Ces 449 000 tonnes représentent 84 % des 536 000 tonnes d'apports annuels sur l'année hydrologique 96-97. Cette année hydrologique est définie entre la fin de la période de crue 95-96 et la fin de la période de crue 96-97.

En se basant sur les différentes séquences identifiées précédemment durant les crues, il est possible de préciser les contributions respectives des sections barrage de Poses - Amont de Rouen et Amont de Rouen - Aval de Rouen dans les transferts particulaires.

V.5.1 - Première crue 96-97

244 100 tonnes de matériel particulaire en suspension ont été apportées dans l'estuaire entre le 12/11/96 et 07/01/97 (57 jours). La période de montée de crue a duré 24 jours et 121 100 tonnes ont été transportées sur cette période (soit 50 % du flux total de crue). La descente de crue a duré 33 jours durant lesquels 123 000 tonnes de matériel particulaire en suspension sont arrivées dans l'estuaire (soit 50 % du flux total de crue).

Dans la section barrage de Poses - amont de Rouen, le bilan sur la crue montre un apport de matériel entre les deux sites ; 244 100 tonnes de matériel arrivent à Poses alors que 263 900 tonnes passent à Rouen (Figure 106). Ceci s'explique par une érosion très importante en début de crue qui, additionnée à l'érosion de fin de crue, est supérieure au piégeage. L'érosion de début de crue chasse de la zone les particules piégées ou déposées entre deux crues successives. En termes de bilan, ce stock particulaire piégé ou déposé est à considérer comme une source de particules intra-estuarienne vis à vis de la crue étudiée. Les tonnages considérés au cours de cette érosion de début de crue (28 100 tonnes) suggèrent que ce piégeage en amont de Rouen en période d'étiage représente 5 % de l'apport particulaire annuel total et 32 % de l'apport particulaire d'étiage.

L'érosion de fin de crue (17 200 tonnes) peut s'expliquer par la remobilisation d'une partie des 25 500 tonnes piégées au plus fort de la crue.

Dans la section amont de Rouen – aval de Rouen, le bilan montre une perte de matériel entre les deux sites. Alors que 263 900 tonnes passent à Rouen, uniquement 182 300 tonnes se retrouvent à Val-des-Leux (soit 75 % de l'apport initial à Poses). La perte de matériel se fait essentiellement dans les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise. Il est à noter qu'en fin de crue, aucun apport particulaire lié à l'érosion n'a pu être mis en évidence sur ce secteur.

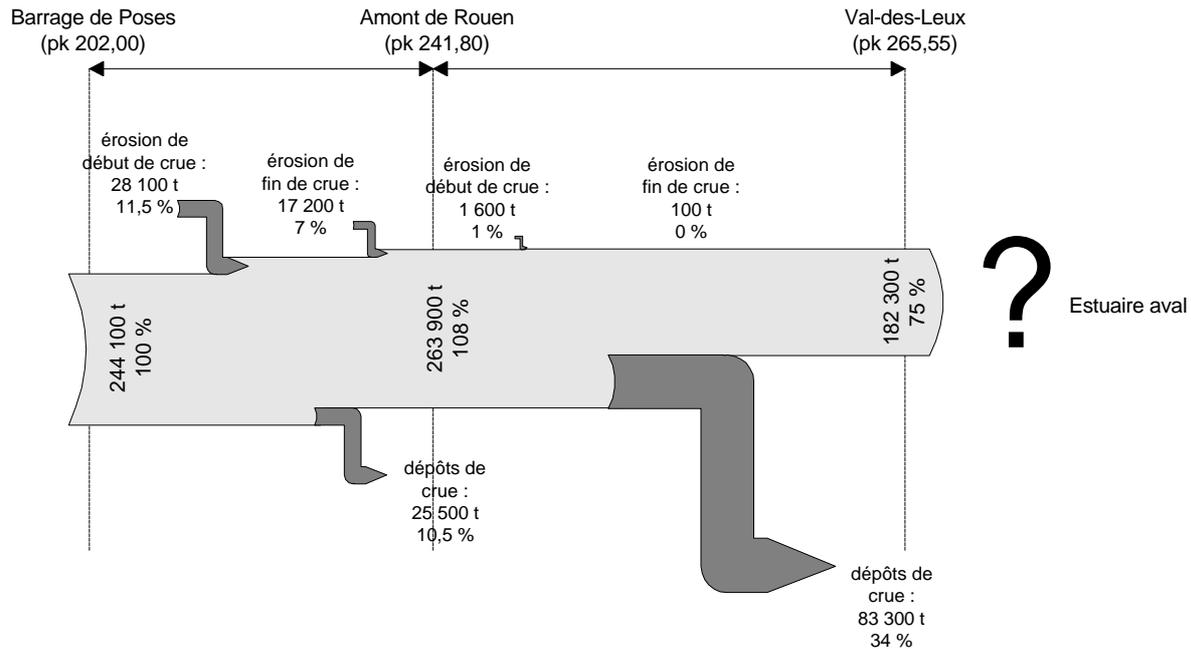


Figure 106 : Bilan en masse des transferts particulaires dans l'estuaire amont de la Seine au cours de la première crue 1996-1997 (du 12/11/96 au 07/01/97).

V.5.2 - Deuxième crue 96-97

Cette seconde crue, d'une durée de 42 jours, entre le 14/02/97 et le 27/03/97, a transporté 204 900 tonnes de matériel particulaire en suspension dans l'estuaire de la Seine. Sur les 16 jours de montée, 50 000 tonnes de matériel sont entrées dans l'estuaire, soit 24 % du flux de crue. Sur les 26 jours de descente, 154 900 tonnes de matériel sont arrivées dans l'estuaire amont, soit 76 % du flux de crue.

Dans la section barrage de Poses – amont de Rouen, une perte de matériel entre les deux sites se produit. 204 900 tonnes arrivent à Poses alors que 199 200 tonnes (97 %) de matériel particulaire passent à Rouen (Figure 107). Ceci s'explique par de faibles érosions de début de crue (11 300 tonnes) et de fin de crue (18 071 tonnes) comparées aux dépôts de crue (35 100 tonnes). Les 11 300 tonnes érodées en début de crue proviennent vraisemblablement du stock particulaire piégé dans ce secteur lors de la crue précédente (25 500 t).

Dans la section amont de Rouen – aval de Rouen, le bilan montre une importante perte de matériel entre les deux sites. 199 200 tonnes de matériel arrivent en amont de Rouen alors qu'en aval de Rouen ne

passent plus que 144 000 tonnes de matériel. Les érosions de début de crue (4 400 tonnes) et de fin de crue (2 300 tonnes) sont faibles par rapport aux de 61 900 tonnes piégées dans les infrastructures portuaires de Rouen.

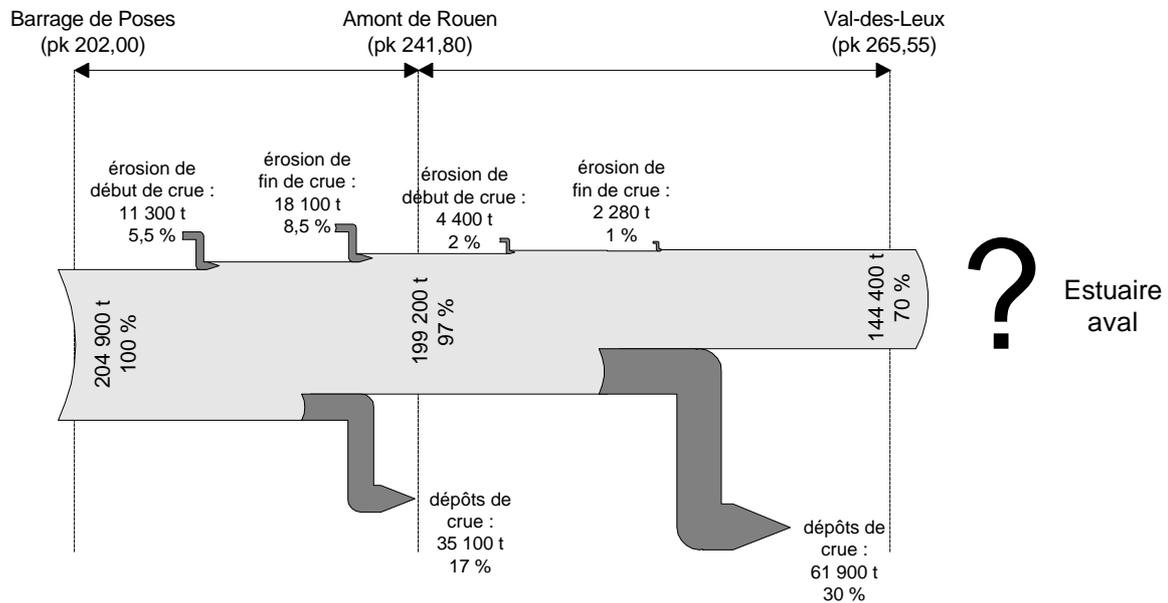


Figure 107 : Bilan en masse des transferts particulaires dans l'estuaire amont de la Seine au cours de la seconde crue 1996-1997 (du 14/02/97 au 27/03/97).

V.5.3 - Crue 97-98

La crue de l'hiver 97-98 a duré 95 jours, entre le 16/11/97 et le 18/02/98. Trois épisodes successifs de montée et de descente des débits se sont produits, entrecoupés par des périodes de débits plus faibles mais n'atteignant pas des valeurs d'étiage.

V.5.3.1 - Premier pic, crue 97-98

Durant ce premier pic de débit, d'une durée de 46 jours, entre le 16/11/97 et le 31/12/97, 70 300 tonnes de matériel particulaire sont arrivées dans l'estuaire au barrage de Poses (pk 202,00). La montée de crue a duré 35 jours et 37 200 tonnes sont arrivées durant cette période soit 53 % du flux total de ce premier pic. La descente de crue a duré 11 jours et 33 100 tonnes de matériel particulaire en suspension sont arrivées dans l'estuaire durant cette période, soit 47 % du flux particulaire total de ce premier pic.

Dans la section barrage de Poses - amont de Rouen, 70 300 tonnes de matériel particulaire en suspension arrivent à Poses alors que 89 100 tonnes passent à Rouen (Figure 108). Cette différence s'explique par des érosions de début (14 400 tonnes) et de fin de crue (11 500 tonnes) qui sont supérieures au piégeage (7 100 tonnes). L'érosion de début de crue remobilise un stock particulaire vraisemblablement constitué durant l'étiage. Ce stock particulaire piégé constitue une source intra-estuarienne de matériel particulaire. L'érosion de fin de crue (11 500 tonnes), supérieure au piégeage de milieu de crue (7 100 tonnes) ne s'explique que par l'apport d'une source intra-estuarienne de matériel particulaire. Cette source intra-estuarienne est vraisemblablement le stock particulaire constitué durant

l'étiage et non entièrement exporté lors de la phase de montée de crue. Sur la base de cette hypothèse, ce stock particulaire d'étiage représenterait 18 800 tonnes soit 4 % de l'apport annuel total et 11 % de l'apport d'étiage.

Dans la section amont de Rouen – aval de Rouen, aucune érosion n'est mesurée, seul, un important piégeage de 21 700 tonnes se produit (soit 31 % du matériel transporté au cours de cette crue). Ces dépôts se produisent majoritairement dans les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise.

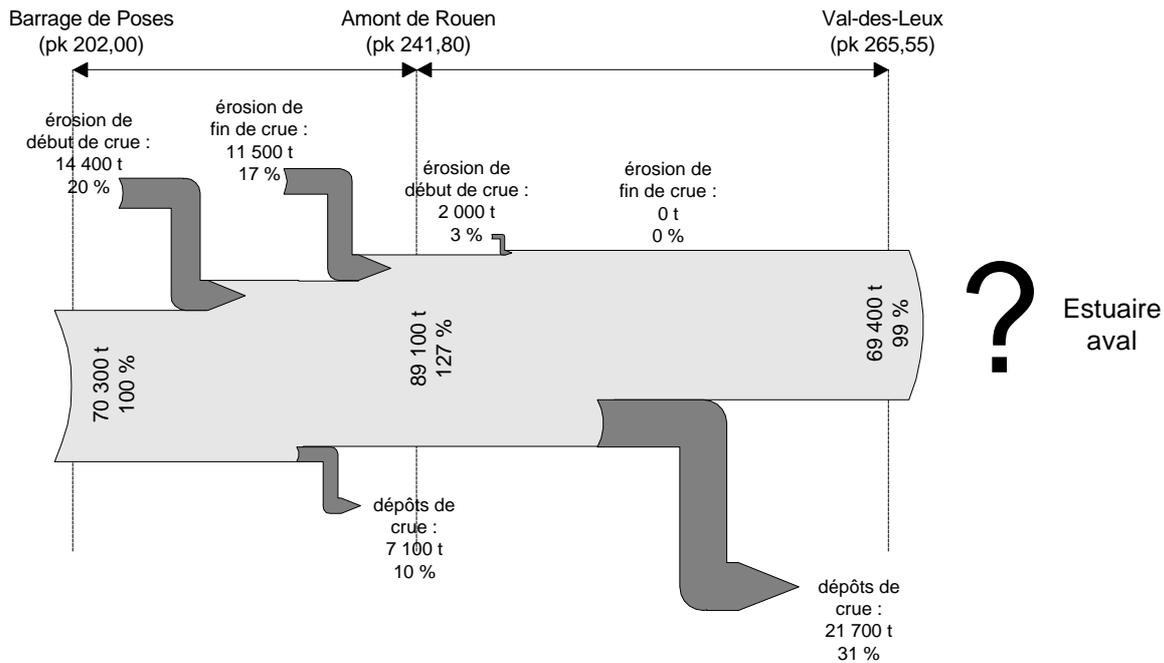


Figure 108 : Bilan en masse des transferts particuliers dans l'estuaire amont de la Seine au cours du premier pic de crue 1997-1998 (du 16/11/97 au 31/12/97).

V.5.3.2 - Deuxième pic, crue 97-98

Ce second pic de crue a apporté dans l'estuaire 75 600 tonnes en 17 jours entre le 01/01/98 et le 17/01/98. 25 700 tonnes sont arrivées dans l'estuaire au cours des 8 jours de montée (34 % du flux total pour ce pic) contre 49 890 tonnes sur les 9 jours de descente (66 % du flux total pour ce pic).

Dans la section barrage de Poses – amont de Rouen, les érosions de début et de fin de crue sont très faibles (respectivement 3 000 et 1 000 tonnes), les dépôts de crue, en revanche sont importants de 18 200 tonnes soit 24 % de l'apport total durant cet épisode de crue (Figure 109).

Dans la section amont de Rouen – aval de Rouen, l'érosion de début de crue est nulle alors que les piégeages dans les infrastructures portuaires et l'érosion de fin de crue sont du même ordre de grandeur (respectivement 5 200 tonnes et 3 500 tonnes).

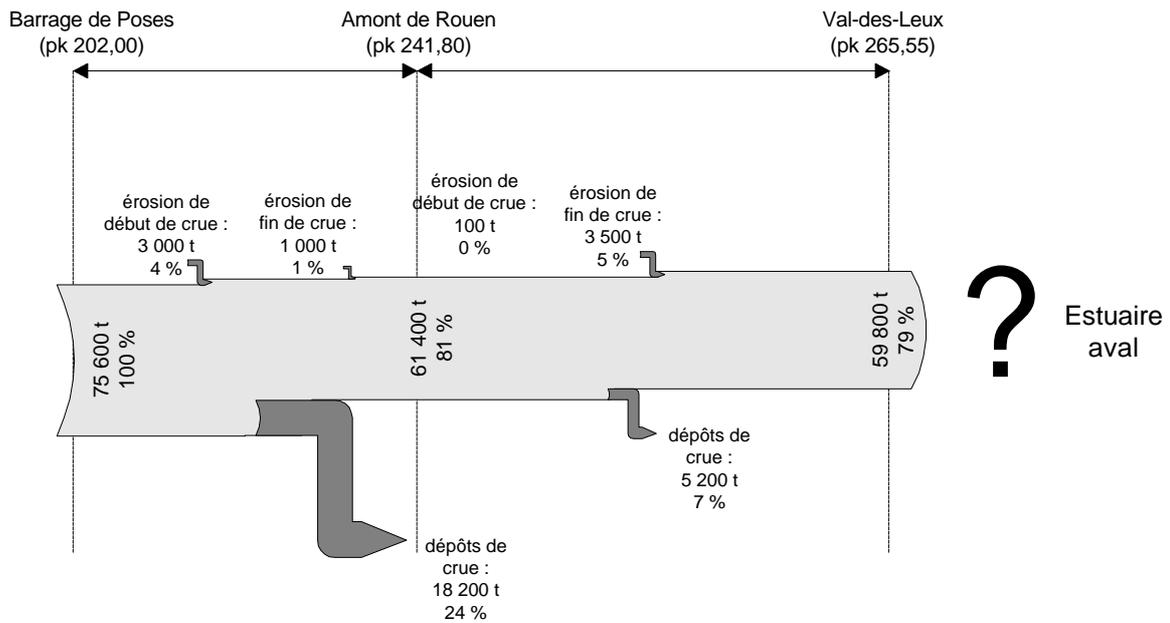


Figure 109 : Bilan en masse des transferts particulaires dans l'estuaire amont de la Seine au cours du second pic de crue 1997-1998 (du 01/01/98 au 17/01/98).

V.5.3.3 - Troisième pic, crue 97-98

123 300 tonnes de matériel particulaire en suspension sont arrivées dans l'estuaire par le barrage de Poses (pk 202,00) au cours des 32 jours de cette dernière crue (entre le 18/01/98 et le 18/02/98). 34 900 tonnes sont arrivées durant les 5 cinq jours de montée (soit 28 % du flux total de cet épisode) contre 88 400 tonnes durant les 27 jours de descente (soit 72 % du flux total de cet épisode).

Dans la section barrage de Poses - amont de Rouen, l'érosion de début de crue est nulle. Le piégeage est très important (32 900 tonnes) puisqu'il représente 27 % de l'apport particulaire au barrage de Poses (Figure 110). L'érosion de fin de crue est, elle aussi, très importante avec 28 200 tonnes (23 % de l'apport particulaire). Le bilan de ces deux phénomènes est un piégeage en amont de Rouen. 118 600 tonnes soit 96 % des 123 300 tonnes de matériel particulaire en suspension arrivant au barrage de Poses, arrivent à Rouen.

Dans la section amont de Rouen – aval de Rouen, l'érosion de début de crue est nulle, le piégeage est, en revanche, important avec 25 500 tonnes (soit 21 % de la masse particulaire arrivant au barrage de Poses au cours de cet épisode). L'érosion de fin de crue est faible : 3 100 tonnes.

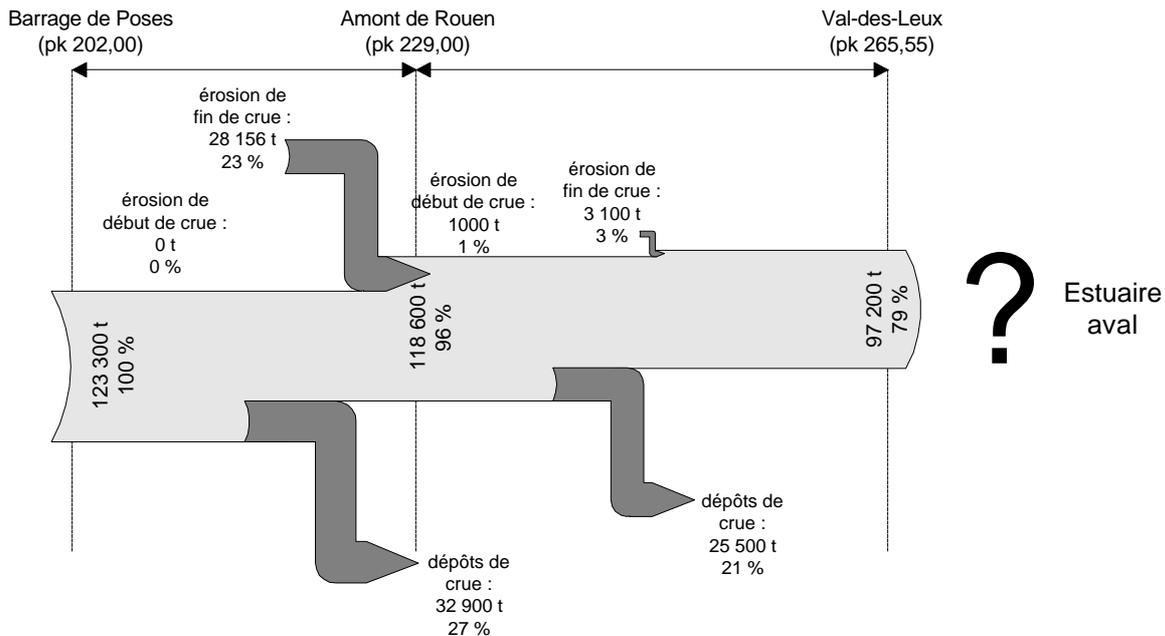


Figure 110 : Bilan en masse des transferts particulaires dans l'estuaire amont de la Seine au cours du troisième pic de crue 1997-1998 (du 18/01/98 au 18/02/98).

V.5.4 - Bilans

La comparaison des bilans des deux crues de l'hiver 1996-1997 (Tableau 16), montre une perte de matériel entre le barrage de Poses et l'aval de Rouen. Cette perte de matériel s'explique essentiellement par des dépôts dans les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise.

La période d'érosion de début de crue est importante au cours de la première crue, entre le barrage de Poses et l'amont de Rouen. Cette érosion de début de crue chasse de la zone considérée les particules piégées ou déposées au cours de la période d'étiage. Le matériel particulaire érodé au début de la seconde crue provient quant à lui de particules de la première crue. Ces particules ont été piégées soit dans les zones latérales de dépôts, soit au fond du chenal entre les éléments grossiers.

Tableau 16 : Bilans des tonnages de matériel particulaire mis en jeu au cours des deux crues de l'hiver 1996-1997.

	Barrage de Poses pk 202,00	Erosion de début de crue	Piégeage de crue	Erosion de fin de crue	Amont de Rouen pk 241,80	Erosion de début de crue	Piégeage de crue	Erosion de fin de crue	Aval de Rouen pk 265,55
Crue 1 (12/11/96 au 07/01/97)	244 100 (100 %)	28 100 (11,5 %)	25 500 (10,5 %)	17 200 (7 %)	263 900 (108 %)	1 600 (1 %)	83 300 (34 %)	100 (0 %)	182 300 (75 %)
Crue 2 (14/02/97 au 27/03/97)	204 900 (100 %)	11 300 (5,5 %)	35 100 (17 %)	18 100 (8,5 %)	199 200 (97 %)	4 400 (2 %)	61 900 (30 %)	2 300 (1 %)	144 400 (70 %)
Total	449 000 (100 %)	39 400 (8,5 %)	60 600 (13,5 %)	35 300 (8 %)	463 100 (103 %)	6 000 (1 %)	145 200 (32 %)	2 400 (1 %)	326 700 (73 %)

A l'aval de l'agglomération rouennaise, les effets de l'érosion de début de crue sont très peu perceptibles. Il est toutefois difficile de conclure en l'absence d'un stock particulaire piégé entre l'amont et l'aval de Rouen dans la mesure où une partie du matériel érodé en amont de Rouen, en début de crue, peut se déposer dans les infrastructures portuaires et être « remplacé » dans le bilan en aval de Rouen par le matériel érodé en début de crue entre l'amont et l'aval de l'agglomération.

En fin de crue l'érosion est surtout importante dans le tronçon barrage de Poses – amont de Rouen. Le retour des phénomènes de marée en fin de crue ne permet pas de poursuivre l'estimation des apports de cette érosion au cours de la période d'étiage par le calcul des flux.

Durant la crue de l'hiver 1997-1998, les résultats sont comparables à ceux observés durant la crue 1996-1997 (Tableau 17). Entre le barrage de Poses (pk 202,00) et l'aval de Rouen (pk 265,55), du matériel particulaire en suspension reste piégé dans les infrastructures portuaires.

Durant la première montée de crue, une quantité plus importante de matériel particulaire en suspension arrive à Rouen par rapport au matériel particulaire arrivé au barrage Poses (pk 202,00) durant la même période. Ce phénomène s'explique par une exportation durant cette première montée de crue du matériel particulaire présent dans ce secteur durant l'étiage.

L'érosion de fin de crue est se retrouve surtout au cours du troisième pic de débit. Pour ce pic la durée de la phase de descente des débits est plus longue qu'au cours des autres pics de débits.

Tableau 17 : Bilans des tonnages de matériel particulaire mis en jeu au cours des deux crues de l'hiver 1997-1998.

	Barrage de Poses pk 202,00	Erosion de début de crue	Piégeage de crue	Erosion de fin de crue	Amont de Rouen pk 241,80	Erosion de début de crue	Piégeage de crue	Erosion de fin de crue	Aval de Rouen pk 265,55
Pic 1 (16/11/97 au 31/12/97)	70 300 (100 %)	14 400 (20 %)	7 100 (10 %)	11 500 (17 %)	89 100 (127 %)	2 000 (3 %)	21 700 (31 %)	0 (0 %)	69 400 (99 %)
Pic 2 (01/01/98 au 17/01/98)	75 600 (100 %)	3 000 (4 %)	18 200 (24 %)	1 000 (1 %)	61 400 (81 %)	100 (0 %)	5 200 (7 %)	3 500 (5 %)	59 800 (79 %)
Pic 3 (18/01/98 au 18/02/98)	123 300 (100 %)	0 (0 %)	32 900 (27 %)	28 200 (23 %)	118 600 (96 %)	1000 (1 %)	25 500 (21 %)	3 100 (3 %)	97 200 (79 %)
Total	269 200 (100 %)	17 400 (6,5 %)	58 200 (21,5 %)	40 700 (15 %)	269 100 (100 %)	3 100 (1 %)	52 400 (19 %)	6 600 (2 %)	226 400 (84 %)

En aval de l'agglomération rouennaise, l'érosion de début de crue est très faible. Comme précédemment, il est impossible de conclure en l'absence d'un stock de matériel particulaire piégé dans ce secteur dans la mesure où l'exportation de ce stock vers l'aval a pu être masquée dans le bilan par la grande quantité de matériel particulaire fin déposé dans les infrastructures portuaires.

Dans ce secteur aval de Rouen, l'érosion de fin de crue est très faible comparée à celle du secteur amont.

V.6 - Suivi du niveau d'une vasière et de la qualité des sédiments déposés

La mise en évidence d'un déficit de transport entre le barrage de Poses (pk 202,00) et Rouen (pk 241,80) nous a amenés à nous interroger sur l'existence de dépôts entre ces deux sites. Les reconnaissances de la couverture sédimentaire immergée n'ayant montré aucune trace tangible de tels dépôts dans le chenal, l'hypothèse de la contribution des vasières découvrantes à ces dépôts a alors été émise. Afin de vérifier cette hypothèse, un suivi du niveau topographique et de la qualité des sédiments déposés sur une vasière intertidale en amont de Rouen a été réalisé entre le 11 avril 1997 et le 10 mars 1998 (voir page 38).

V.6.1 - Niveau de la vasière

Compte tenu de la faible fréquence et de l'irrégularité des mesures réalisées sur ce site, seuls les événements d'échelle temporelle importante ont pu être identifiés. L'événement majeur est l'enrichissement en sédiments fins de la vasière en période de crue suivi d'un largage progressif de ces sédiments sur plusieurs semaines après la crue (Figure 111).

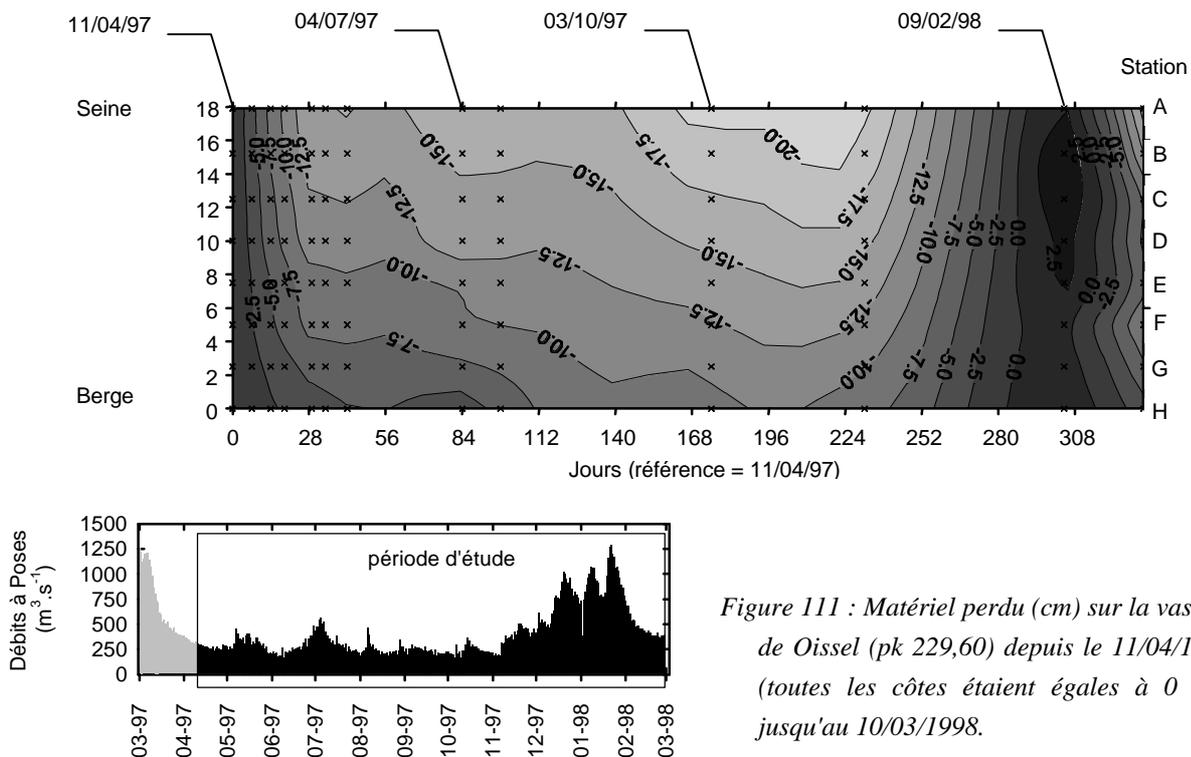


Figure 111 : Matériel perdu (cm) sur la vasière de Oissel (pk 229,60) depuis le 11/04/1997 (toutes les côtes étaient égales à 0 cm) jusqu'au 10/03/1998.

En crue l'accroissement du niveau des eaux permet l'immersion totale durant plusieurs semaines de cette vasière (Figure 112). Une partie du matériel particulaire transporté par la crue peut ainsi se déposer au niveau de ces zones hydrodynamiquement protégées.

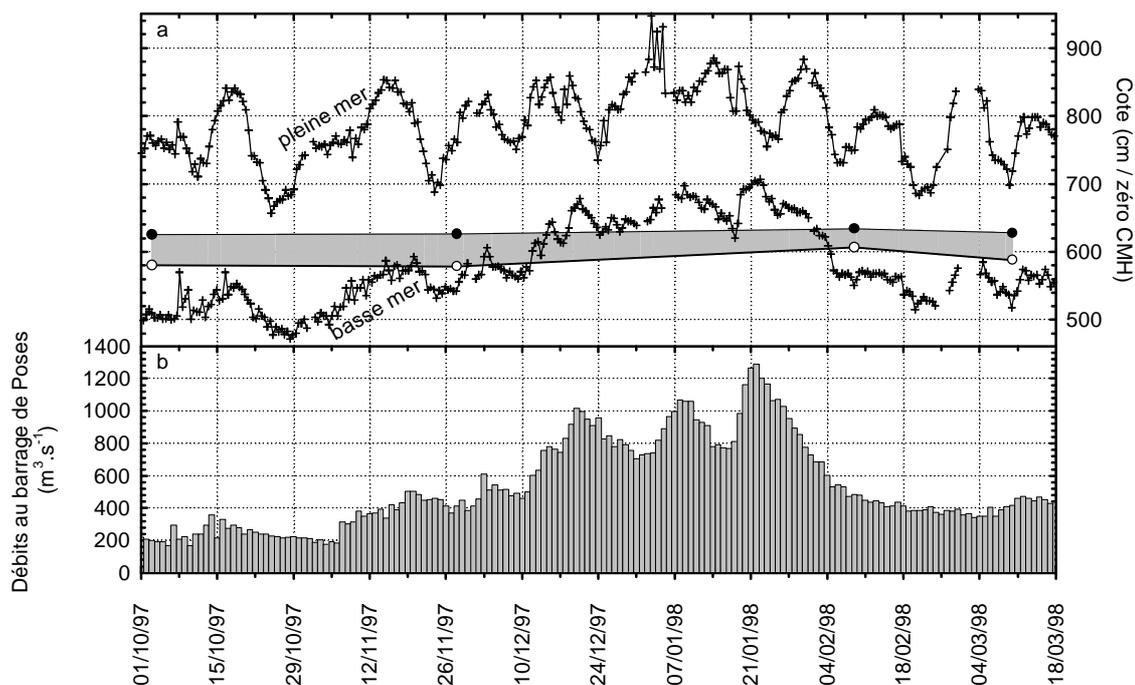


Figure 112 : (a) Niveaux des pleines mers et des basses mers sur le site de Oissel - pk 229,90 (—+—) et de la cote CMH des points A (—○—) et H (—●—) de la radiale sur la vasière de Oissel (pk 229,60) durant la crue du mois de janvier 1998 (b).

Après le passage de la crue, le niveau des eaux baisse et les vasières sont soumises au régime immersion/émersion suivant les marées. Les suivis de la topographie de la vasière montrent qu'une érosion régressive depuis le chenal vers le haut de la vasière. Cette érosion très marquée en fin de crue se poursuit durant l'étiage mais de manière moins marquée (Figure 111).

Les travaux réalisés en 1997 par le CERGRENE après une crue sur la vasière de Oissel (pk 229,60) montrent que l'érosion sur la vasière est surtout importante en début de flot alors qu'en jusant les courants mesurés au-dessus de la vasière sont quasiment nuls et qu'aucune érosion notable n'a pu être montrée. Il est à noter que le passage d'un navire en tout début de flot, alors que le niveau des eaux sur la vasière était faible, a provoqué une forte érosion.

Ces observations montrent qu'une partie du matériel arrivant en suspension au barrage de Poses n'atteint pas l'agglomération rouennaise au cours de la crue et dépose entre l'aval du barrage et l'amont de l'agglomération. Plusieurs sites de dépôt de matériel particulaire fin sont identifiés en période de crue tout au long de l'estuaire amont : bassins et souilles des infrastructures portuaires rouennaises, partie convexe des méandres, élargissement du chenal aux environs de la ville du Trait (pk 300,00). Ces observations et mesures mettent en évidence que, lors des crues, les structures sédimentaires à faciès particuliers fins de l'estuaire sont d'importants lieux de dépôts d'une partie du matériel particulaire fin arrivant dans l'estuaire en crue.

V.6.2 - Origine de la fraction particulaire déposée

Des prélèvements ont été réalisés le 26/01/98 en période de crue dans le courant, 1 200 mètres en amont de la vasière et dans les eaux stagnantes au-dessus de la vasière. L'analyse microgranulométrique de ces deux échantillons (Figure 113-a) montre une nette différence dans les populations de particules en suspension. Le prélèvement réalisé dans le courant en amont de la vasière présente une population

granulométrique quantitativement plus importante dont le mode se situe aux environs de 12 μm avec une fraction grossière marquée. L'échantillon prélevé au-dessus de la vasière présente un mode se situant aux environs de 9 μm et une fraction grossière moins marquée que celle du spectre précédent. Par soustraction de ces deux spectres microgranulométriques, il est possible de déterminer la population particulaire ayant disparu du matériel particulaire en suspension au-dessus de la vasière. Cette population présente un mode voisin de 23 μm . Une comparaison qualitative entre ce spectre différentiel et le spectre microgranulométrique réalisé sur du matériel déposé sur la vasière et prélevé en fin de crue (le 09/02/98) montre une bonne adéquation entre les deux spectres (Figure 113-b). Ces observations confirment que le matériel particulaire déposé sur les vasières lors des crues a bien pour origine le matériel transporté en suspension par la crue.

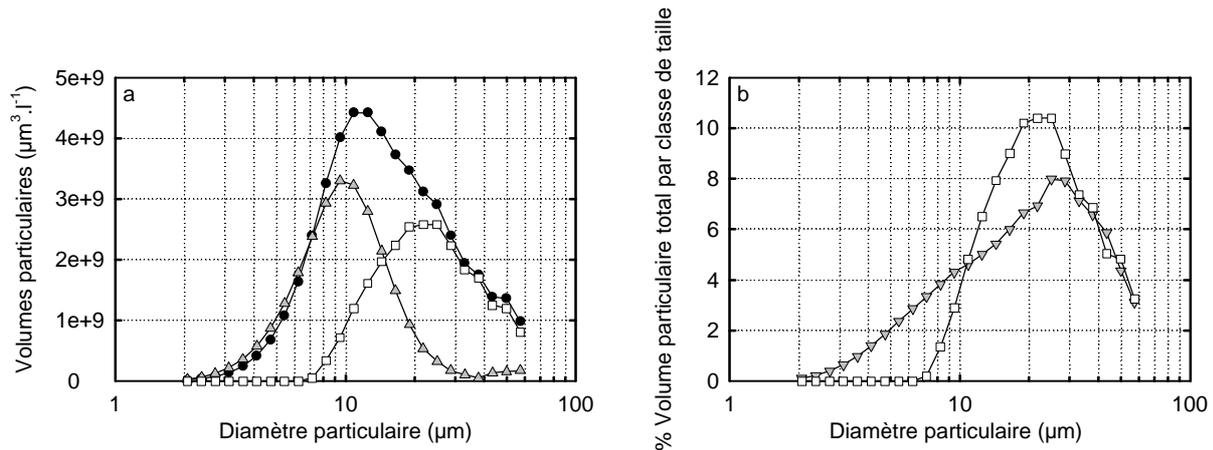


Figure 113 : (a) Spectres microgranulométriques lissés des particules en suspension en amont de la vasière de Oissel (—●—) et au dessus de la vasière (—▲—) durant la crue le 26/01/98 ; le spectre différentiel entre les deux spectres précédents (—□—) montre la fraction particulaire décantée. (b) Comparaison entre le spectre différentiel donnant la fraction décantée le 26/01/98 (—□—) et le spectre microgranulométrique du matériel particulaire fin déposé sur la vasière en fin de crue le 09/02/98 (—▼—).

V.6.3 - Texture des sédiments superficiels

Le suivi de la texture des sédiments superficiels en post-crue permet de mettre en évidence les processus mécaniques de mobilisation des matériaux durant cette période (Figure 114).

En début de suivi (le 11/04/97), les sédiments superficiels présentent un gradient décroissant de l'importance des fractions fines, depuis le chenal (A) vers la rive (H). Après le départ d'une partie des matériaux lors de l'érosion (15/05/98), le gradient de matériel particulaire fin tend à disparaître. L'entraînement préférentiel de ces matériaux fins à partir du bas du profil jusqu'au sommet globalement moins érodé provoque une homogénéisation progressive des dépôts tout au long du profil (Figure 114).

Cette évolution de la texture des sédiments superficiels est également bien visible sur les modifications des fuseaux des courbes granulométriques cumulatives. La morphologie de ces courbes révèle en outre le caractère composite de la distribution granulométrique des matériaux. Ceux-ci sont composés :

- a – D'une fraction peu importante de sables moyens à grossiers et de petits graviers comportant une large part de débris carbonatés de tufs.

b – D’une fraction de sables fins avec un mode situé autour de 125 μm ,

c – Une fraction fine avec un mode principal voisin de 20 μm , comparable à celui observé dans les matières en suspension de la Seine et qui correspond à la part des dépôts liés à la décantation (par opposition aux fractions précédentes qui correspondent principalement à un transport par charriage et saltation).

Le mélange, en proportions variables, de ces deux dernières populations particulières constitue la plus large part des matériaux de ces berges exondables à faible pente.

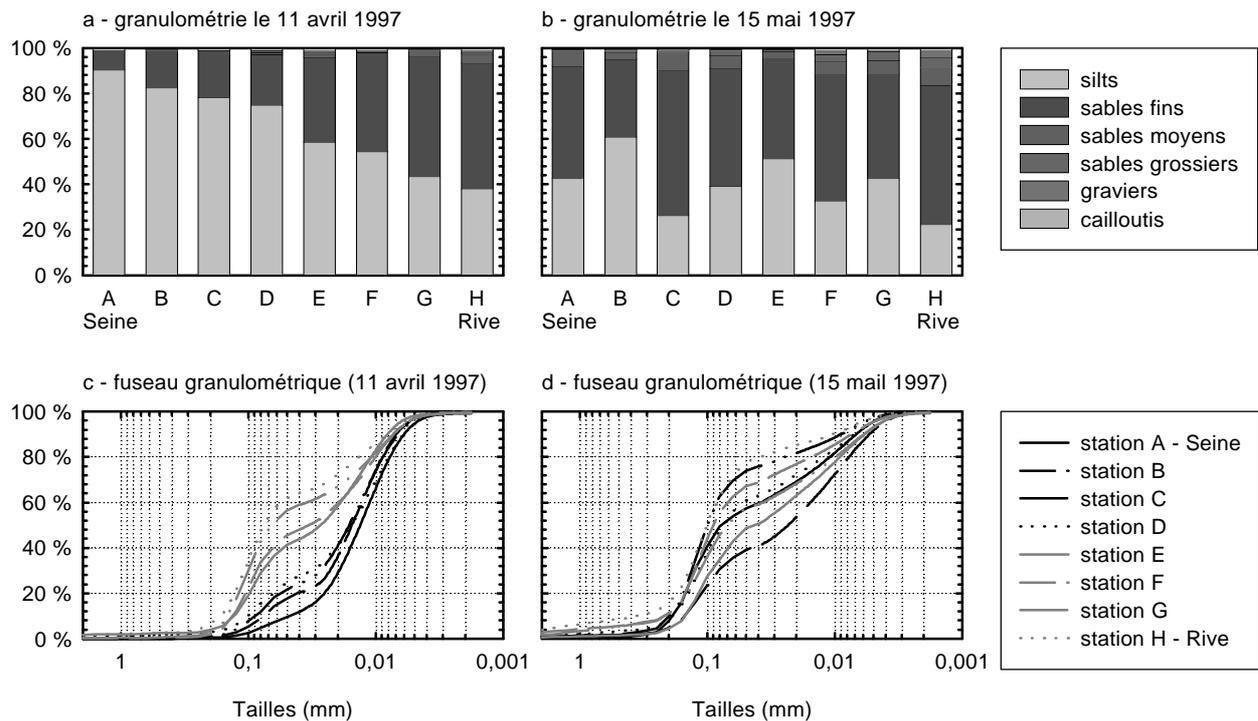


Figure 114 : Résultats granulométriques obtenus tout au long du profil étudié lors des relevés des 11 avril et 15 mai 1997.

V.7 - Conclusions

V.7.1 - Hydrologie

Les augmentations des débits en crue modifient l'hydrologie estuarienne par rapport à l'étiage, sans toutefois supprimer les effets semi-diurnes et semi-lunaires de marée. Ces accroissements des débits fluviaux se traduisent par une augmentation du niveau des basses mers et des pleines ainsi que par une diminution du marnage.

L'importance de l'oscillation des volumes estuariens à l'échelle semi-lunaire disparaît face aux importantes quantités d'eau introduites dans l'estuaire par la crue.

Les vitesses des courants et la durée du flot sont amorties par les augmentations de débits. Selon la force respective des débits et des marées, la renverse des courants ne se produit plus. L'écoulement des masses d'eau se fait alors uniquement vers l'aval, confirmant les observations de Laval, 1955. Cette situation se produit d'autant plus en aval de l'estuaire que les débits sont forts et les marées faibles.

V.7.2 - Concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension

En début de montée des crues hivernales et lors des petites crues estivales, l'augmentation des débits au-dessus de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ provoque une chasse, une expulsion du matériel particulaire présent en suspension dans l'estuaire.

Cette expulsion du matériel particulaire en suspension provoque un appauvrissement de l'estuaire amont en matériel particulaire ce qui entraîne une quasi-disparition des cycles érosion/sédimentation.

L'arrivée de matériel particulaire en suspension avec la crue permet le rétablissement des cycles érosion/sédimentation tant en l'échelle semi-diurne qu'à l'échelle semi-lunaire. Toutefois, lors des forts débits, ces cycles érosion/sédimentation disparaissent en amont de l'estuaire fluvial du fait de l'atténuation de la marée et non plus par disparition de matériel particulaire mobilisable. Ils sont remplacés par une période de sédimentation du matériel particulaire lors de l'arrivée de l'onde de marée sur le site.

Durant la crue, les concentrations pondérales de MES mesurées au barrage de Poses (pk 202,00) sont supérieures à celles mesurées dans l'estuaire. En fin de crue, alors qu'au barrage de Poses les concentrations et les débits sont revenus à des niveaux d'étiages, dans l'estuaire amont, les concentrations pondérales en MES restent supérieures à celles mesurées en étiage.

V.7.3 - Piégeage et restitution du matériel particulaire durant les crues

L'augmentation du niveau des eaux dans l'estuaire amont provoque l'immersion complète durant la crue de zones intertidales. Ces zones deviennent alors des sites de dépôts pour une partie du matériel particulaire transporté lors de la crue. Ces zones de dépôts ont été identifiées en amont de Rouen, dans le secteur des îles et en aval de Rouen ou dans le secteur du Trait (pk 300,00).

Les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise constituent un autre piège pour le matériel particulaire arrivant dans l'estuaire avec les crues.

En fin de crue, la diminution du niveau des eaux et le renforcement des effets de la marée permettent le retour sur les zones de dépôts intertidales des phases et d'immersion et d'émersion liée à la marée. La fraction granulométrique fine déposée sur ces sites durant la crue est remobilisée et remise en circulation dans le système estuarien.

Le matériel particulaire déposé dans les infrastructures portuaires rouennaises est, quant à lui, en grande partie exporté hors du système estuarien par dragage.

V.7.4 - Bilan quantitatif des transports particuliers en crue

Au cours de la première crue hivernale après l'étiage, une mobilisation et une expulsion des particules piégées ou déposées au cours de la période d'étiage entre le barrage de Poses et l'amont de Rouen se produisent. Cette remobilisation concerne entre 10 et 30 % du matériel particulaire en suspension arrivé dans l'estuaire durant l'étiage.

En aval de l'agglomération rouennaise, cette érosion de début de crue est peu visible. Toutefois, l'absence d'un stock particulaire piégé entre l'amont et l'aval de Rouen en étiage ne peut être affirmée. En effet, tout ou partie du matériel particulaire érodé en amont de Rouen, en début de crue peut se déposer dans les infrastructures portuaires et être « remplacé » dans le bilan sédimentaire en aval de Rouen par du matériel érodé entre l'amont et l'aval de l'agglomération en début de crue.

Durant les autres crues hivernales de tels phénomènes de remobilisation de matériel particulaire en début de crue peuvent aussi être observés. Le matériel érodé est alors issu des dépôts des crues précédentes.

Après cette première partie de montée de crue, d'importantes quantités de matériel particulaire en suspension arrivent dans l'estuaire. Entre 15 et 20 % de ce matériel sont piégés en amont de l'agglomération rouennaise par les vasières et entre 20 et 35 % sont piégés dans les infrastructures de l'agglomération rouennaise.

En fin de crue l'érosion est surtout importante dans le tronçon barrage de Poses – amont de Rouen du fait de la présence des vasières qui ont joué le rôle de piège durant la crue et qui constituent les sources pour cette érosion de fin de crue. Dans le secteur amont de Rouen – aval de Rouen, le matériel particulaire déposé durant les crues dans les bassins et les souilles ne peut être efficacement remobilisé par les seuls courants de marée et n'est donc que peu ou pas remis en circulation dans le système estuarien.

Sur la durée de crue, entre le barrage de Poses (pk 202,00) et l'aval de Rouen (pk 265,55), le bilan de ces phénomènes d'érosions et de piégeages est une rétention de 15 à 30 % du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire amont en crue. La majorité de ce piégeage s'effectuant dans les infrastructures portuaires de l'agglomération rouennaise.

Il est à noter qu'en aval de l'agglomération rouennaise une zone de dépôt de matériel particulaire de crue a été identifiée (pk 300,00) ; cette zone de dépôt disparaît durant l'étiage. Les conséquences de cette zone de dépôt sur le bilan sédimentaire entre estuaire amont et estuaire aval n'ont, pour l'heure, pas été chiffrées. Toutefois compte tenu de son caractère éphémère à l'échelle annuelle son impact sur un bilan annuel doit être nul, contrairement aux piégeages des infrastructures de l'agglomération rouennaise.

Chapitre VI

Synthèse et Discussion

VI.1 - Représentativité de l'échantillonnage

Les différentes campagnes de mesures et de prélèvements, réalisées au cours de cette étude, montrent d'importantes variations spatiales et temporelles des concentrations pondérales de MES et des vitesses de courant. Ces variations spatio-temporelles posent la question de la représentativité et de la signification de tout prélèvement ponctuel dans l'estuaire amont.

Les mesures réalisées dans la partie fluviale de la Seine et dans le secteur estuarien présentent des variations spatiales comparables à l'échelle des méandres, des bras secondaires et des sections (Tableau 17). En revanche, dans le secteur estuarien, la variabilité temporelle est plus forte du fait de l'impact de la marée.

Tableau 17 : Comparaison des facteurs de l'hétérogénéité spatiale et temporelle en milieu fluvial et en milieu estuarien.

	<i>Fleuve</i>	<i>Estuaire amont</i>
Spatiale	Méandres	Méandres
	Bras	Bras
	Sections	Sections
Temporelle	Circadien	Circadien
	Crue/étiage	Cycle semi-diurne de marée
		Cycles semi-lunaires et lunaires
		Crue/étiage

Le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire amont peut être divisé selon deux composantes : une composante fluviale, qui se traduit par une forte variabilité spatiale et une composante estuarienne liée à la dynamique de marée.

VI.1.1 - Compartiment fluvial

En amont immédiat du barrage de Poses (pk 202,00), le problème de l'hétérogénéité spatiale des mesures de turbidité s'exprime de façon d'autant plus aiguë que la Seine se divise en deux bras. Un premier bras permet l'accès à une écluse et un second bras donne accès au barrage lui-même. Dans le secteur intra-estuarien des îles (pk 221,50 au pk 235,50) et au niveau de l'île Lacroix (pk 241,00) la Seine se divise en plusieurs bras. Compte tenu de la stabilité des îles, ce secteur intra-estuarien correspondrait au secteur fonctionnel dit anastomosé en milieu fluvial. Les études menées en milieu strictement fluvial, sur de tels secteurs montrent des hétérogénéités d'écoulements entre les différents bras d'un même cours d'eau (Bravard and Gilvear, 1993). Dans l'estuaire amont, comme en amont du barrage de Poses, aucune étude n'a été menée afin de déterminer l'importance de ces hétérogénéités sur l'écoulement et sur le transport particulaire.

Outre ces problèmes de division du fleuve en plusieurs bras, des hétérogénéités spatiales existent au sein d'une même section (Gilvear and Bravard, 1993). Les vitesses les plus fortes se rencontrent en milieu

de chenal (Figure 115) ; en méandre, ces hétérogénéités sont accrues et les maxima de vitesses se déplacent vers la rive concave (Figure 116). De telles hétérogénéités ont été bien mises en évidence dans l'estuaire amont (voir page 96) mais n'ont, pour l'heure, pas été étudiées au niveau du barrage de Poses. Ces hétérogénéités spatiales de vitesses de courant sont accompagnées d'hétérogénéités de concentrations pondérales de MES (voir page 108).

En amont du barrage de Poses, des mesures de vitesses de courants et de concentrations pondérales de MES en plusieurs points de la colonne d'eau sur les sections de Seine et dans les deux bras doivent être envisagées afin de déterminer la signification des mesures ponctuelles et des enregistrements en continu actuellement réalisés. Ces campagnes permettront de vérifier la validité des formules actuellement utilisées pour déterminer les flux de matériel particulaire pénétrant dans l'estuaire amont. Ces campagnes devront être reproduites en étiage et en crue.

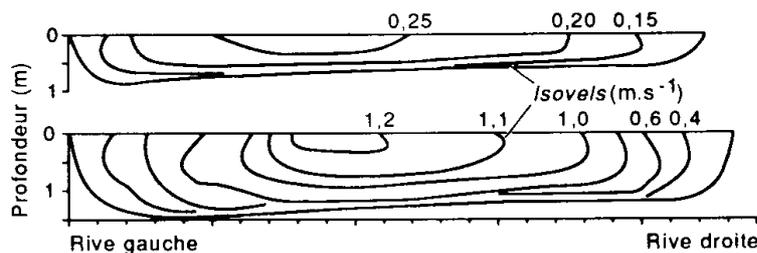


Figure 115 : Vitesses de courants en étiage et en crue dans une section transversale de la rivière Swale (Angleterre) (Bathurst, 1979 in Amoros and Petts, 1993).

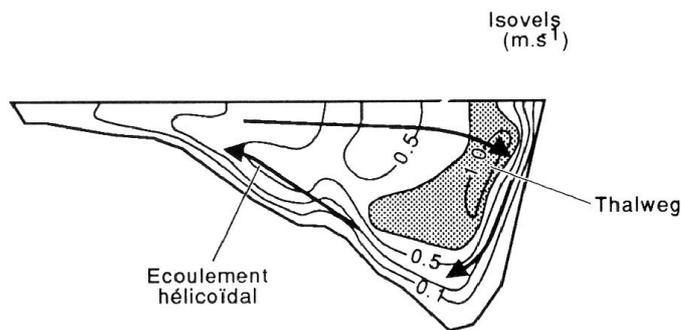


Figure 116 : Vitesses de courants dans une section transversale de méandre (Gilvear and Bravard, 1993).

Les hétérogénéités spatiales en milieu fluvial sont considérées constantes en régime établi. Seules, les variations saisonnières des conditions de l'écoulement modifient ces hétérogénéités (Figure 115). Cette stabilité est toutefois à remettre en question pour l'amont du barrage de Poses (pk 202,00) du fait de l'observation de variations journalières des turbidités dont les causes sont à rechercher dans les migrations verticales du plancton. Ces migrations provoquent une variation quotidienne d'un facteur 2 dans les mesures de concentrations pondérales de MES (voir Figure 31, page 64).

Une étude spécifique de ce phénomène de migration diurne doit être menée afin d'en vérifier l'impact sur la mesure de turbidité et sur le calcul des concentrations pondérales de MES. Parallèlement aux mesures en continu de turbidité, une campagne de prélèvements d'échantillons d'eau durant 24 heures doit être envisagée afin de mesurer l'évolution des quantités de matériel particulaire en suspension et d'identifier les populations planctoniques impliquées dans ces migrations. Une reproduction de ces campagnes, en plusieurs périodes au cours de l'étiage, doit être envisagée afin d'intégrer les successions saisonnières de populations planctoniques.

Entre fleuve et estuaire, les conditions de l'écoulement et plus précisément les échelles de temps auxquelles ces variations se produisent, sont très différentes (Tableau 17) et les questions d'hétérogénéités spatiales prennent une autre dimension.

VI.1.2 - Comportement estuarien

L'existence dans l'estuaire amont de la Seine de courants alternatifs semi-diurnes rend plus complexe la notion d'hétérogénéité spatiale qu'en milieu fluvial.

Dans la partie fluviale les hétérogénéités spatiales sont liées aux caractéristiques morphologiques locales et amont du site étudié du fait du caractère unidirectionnel de l'écoulement. Ces hétérogénéités spatiales sont influencées par les variations saisonnières de l'écoulement (crue/étiage).

Dans l'estuaire amont les hétérogénéités spatiales sont liées aux caractéristiques morphologiques amont, aval et locale du site du fait des écoulements bidirectionnels et s'expriment à des échelles de temps plus petites (Tableau 17).

A l'échelle du cycle de marée, les variations temporelles des concentrations pondérales de MES sont très marquées et dépendent à la fois du site considéré et du moment du cycle semi-lunaire étudié. Le Tableau 18 donne des valeurs de concentrations pondérales moyennes, minimales et maximales en vives-eaux et en mortes-eaux en plusieurs sites de l'estuaire amont et en entrée amont de l'estuaire (barrage de Poses).

Tableau 18 : Valeurs moyennes, minimales et maximales des concentrations pondérales de MES en plusieurs sites de l'estuaire amont durant l'étiage en vives-eaux et en mortes-eaux. * en amont du barrage de Poses (pk 202,00) les cycles vives-eaux/mortes-eaux n'existent pas.

<i>Concentration pondérale de MES (mg.l⁻¹)</i>		<i>Amont du barrage de Poses (pk 202,00)*</i>	<i>Rouen (pk 241,80)</i>	<i>Val-des-Leux (pk 265,55)</i>	<i>Caudebec-en-Caux (pk 310,00)</i>
<i>vives-eaux</i>	<i>Moyenne</i>	10	55	55	160
	<i>Minimale</i>	5	20	15	70
	<i>Maximale</i>	20	100	170	350
<i>mortes-eaux</i>	<i>Moyenne</i>	10	25	20	20
	<i>Minimale</i>	5	10	5	15
	<i>Maximale</i>	20	40	50	50

Compte tenu d'une telle variabilité temporelle, un prélèvement ponctuel n'apporte aucune information sur le comportement d'un paramètre sur le court terme (*i.e.* sur les cycles de marée semi-diurnes et semi-lunaires).

La stratégie d'échantillonnage et notamment la fréquence de cet échantillonnage doit être adaptée aux objectifs des études. Par exemple, dans le cadre d'un suivi de la qualité des eaux, comme le réalise le SNS, la multiplication de prélèvements ponctuels au même moment de la marée et par des marées d'amplitudes comparables constitue une base information sur l'évolution à long terme d'un paramètre donné. La stratégie d'échantillonnage permet en effet de s'affranchir des variations de marée. Cependant, la comparaison entre des sites de mesures s'avère difficile du fait que les prélèvements ne sont pas réalisés aux mêmes heures de la marée sur tous les sites. Seules, les variations de mesure de plusieurs ordres de grandeur peuvent être considérées comme significatives pour de telles comparaisons.

L'étude de la répartition spatiale des concentrations sur la verticale (*i.e.* sur la colonne d'eau) et sur l'horizontale (*i.e.* sur la section), montre que le choix du site et de la profondeur de prélèvement contribuent à accroître les variabilités temporelles de concentrations sur le cycle semi-diurne de marée.

En certaines périodes du cycle de marée des gradients particuliers surface/fond peuvent se développer et peuvent induire un facteur 2 à 3 entre les concentrations mesurées en surface et celles mesurées au fond. Dans les zones convexes de méandre le facteur de concentration entre surface et fond peut être supérieur à 5, suite à des remises en suspension locales de matériel particulaire fin déposé. Ces mêmes remises en suspension provoquent un gradient latéral de concentrations pondérales de MES entre la rive concave et la rive convexe présentant des concentrations pondérales de MES entre 2 et 5 fois plus importantes que celles de la rive concave.

VI.1.3 - Optimisation des suivis intra-estuariens

Les observations précédentes permettent de proposer une optimisation des stratégies de prélèvement pour les suivis réalisés dans l'estuaire amont de la Seine.

VI.1.3.1 - Les unités de base

Dans l'estuaire, tout prélèvement ou mesure ponctuel doit impérativement être interprété dans l'unité temporelle de base que constitue le cycle de marée et dans l'unité spatiale de base que constitue la section de Seine.

Dans chacune de ces unités de base, une discrétisation spatiale et temporelle des mesures doit être déterminée. L'idéal est de disposer de mesures et de prélèvements à fréquences élevées couvrant une section entière. Toutefois, les contraintes matérielles et financières ne permettent pas toujours de disposer de ce genre de mesures.

Sur la base de nos différents travaux deux stratégies de prélèvement peuvent être proposées.

- a – La première stratégie, facilement applicable mais limitée quant à l'interprétation des résultats obtenus, consiste en une série de prélèvements à plusieurs instants clefs du cycle semi-diurne de marée (Figure 117). Durant ce type de campagne, une mesure parallèle du paramètre considéré et des vitesses de courant permet une optimisation des prélèvements et permet de faciliter leur interprétation. Ce type de stratégie a été développé dans le cadre des études menées en collaboration avec des bactériologistes au sein du programme scientifique Seine-Aval et permet de suivre l'évolution des populations bactériennes associées au matériel en suspension durant le cycle de marée.
- b – La seconde stratégie plus complète, inclue la précédente et permet de dresser de véritables bilans des transferts particuliers. Elle consiste en une extension spatiale sur la section de Seine et sur la colonne d'eau des mesures. Au cours d'une telle étude, le découpage de la section, en un minimum de 4 stations, permet de bien isoler les deux berges des sections centrales et de voir si des phénomènes observés sur les berges sont susceptibles de s'étendre sur une largeur importante (station de berge + station centrale). La discrimination verticale est plus délicate dans la mesure où à certains moments du cycle de marée des gradients surface fonds importants peuvent

exister. Cependant, 3 mesures (surface -1 m, milieu, fond + 1 m) constituent un minimum, sachant que la mesure, à 1 m du fond, est difficilement réalisable.

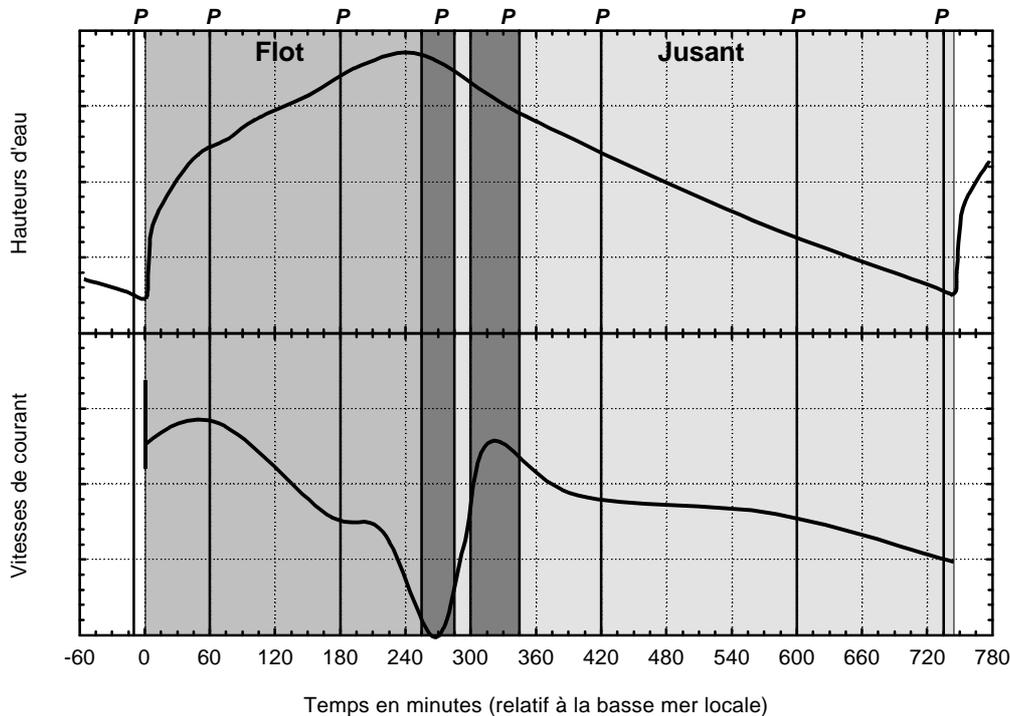


Figure 117 : Plan de prélèvement proposé pour l'échantillonnage durant un cycle semi-diurne de marée dans l'estuaire de Seine en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses de courant. Les lignes verticales notées d'un P visualisent les instants préconisés pour ces prélèvements.

Une fois ces unités de base étudiées, les résultats doivent être replacés dans une chronique historique. Idéalement dans une chronique historique de la mesure considérée ou à défaut, dans la chronique hydrologique fluviale et estuarienne (débits, coefficients de marée).

Le recalage par rapport à des chroniques de mesures du même paramètre peut-être envisagé par rapport aux mesures réalisées depuis plusieurs années par le SNS ou par rapport à des enregistrements en continu comme ceux obtenus à l'aide des sondes de mesures en continu.

VI.1.3.2 - Les suivis à long terme

Les enregistrements obtenus grâce aux sondes de mesures en continu constituent une précieuse source d'information du fait de la possibilité, pour ces instruments, d'acquérir des informations à des fréquences importantes (comparativement aux classiques campagnes de prélèvements) et sur de longues périodes.

En revanche, leur mise en place (tant sur le plan technique que du point de vue de la représentativité), leur entretien, leur étalonnage et la masse de données recueillies, constituent des barrières majeures à leur utilisation.

Les contraintes techniques, liées aux infrastructures et pratiques liées à l'entretien, nécessitent, le plus souvent la mise en place de ce matériel à proximité des berges. Se pose alors la question de la représentativité de la mesure par rapport à une évolution moyenne du paramètre mesuré sur la section. La

mise en place d'une telle station de mesure en continu passe donc par une étude préalable de la représentativité du site d'implantation par rapport à la mesure moyenne sur la section.

D'autre part, le choix de la fréquence d'acquisition conditionne la quantité de données collectées mais aussi les phénomènes susceptibles d'être discriminés. Il est clair qu'une étude voulant prendre en compte les phénomènes engendrés par le « coup de flot » devra reposer sur des mesures instantanées à très hautes fréquences (très inférieures à la minute) alors qu'une simple étude de suivi pourra se contenter de mesures moyennes (sur 1 à 2 minutes), toutes les 15 minutes. Les mesures à des fréquences intermédiaires permettent d'aborder des phénomènes de durée plus courtes tels les passages de bateaux, éventuellement les phénomènes de « scour lag » et de « settling lag » et permettent un recalage plus précis par rapport au cycle de marée.

VI.1.3.3 - Les suivis inter-annuels

Les suivis intra-estuariens de la qualité des eaux, menés par le SNS, ne sont pas réalisés tout au long de l'estuaire durant la même période de marée. En revanche, pour un site donné, ils sont réalisés au même instant de la marée d'un suivi sur l'autre. Les chroniques recueillies permettent de déterminer les tendances pluriannuelles de l'évolution des paramètres étudiés et constituent, en cela, de précieux indicateurs pour le positionnement de mesures actuelles.

VI.1.3.4 - Conclusion

Les mesures en continu à haute fréquence et l'échantillonnage très serré dans les sections permettent de proposer une stratégie d'échantillonnage minimale dans l'estuaire amont, dépendante de l'échelle de temps des phénomènes observés (Tableau 19).

Tableau 19 : Fréquences minimales d'échantillonnage en fonction de l'échelle de temps des événements étudiés.

<i>Echelle des événements à comparer</i>	<i>Echantillonnage minimal conseillé</i>
<i>Événement (coup de flot, passage de bateau...)</i>	Fréquence inférieure à la minute
<i>Cycles semi-diurnes</i>	Unité de base temporelle
<i>Cycles semi-lunaires et lunaires</i>	Unité de base temporelle
<i>Etiage</i>	Prélèvements réalisés au même moment du cycle de marée
<i>Crue</i>	Pas de problème de cycles semi-diurnes si la crue est importante
<i>Cycles annuels</i>	Prélèvements réalisés au même moment du cycle de marée
<i>Cycles inter-annuels</i>	Prélèvements réalisés au même moment du cycle de marée

Dans tous les cas, le prélèvement ponctuel aléatoire est à exclure.

Quelle que soit la stratégie de prélèvement choisie, les résultats obtenus doivent être interprétés par rapport à une chronique du paramètre étudié ou, à défaut, par rapport à un des cycles hydrologiques.

La question du positionnement spatial des prélèvements est plus complexe. La signification de toute mesure, quelle que soit sa fréquence d'acquisition, que ce soit à l'échelle de la section ou de l'estuaire amont dans sa globalité nécessite une étude spécifique dépendante des conditions locales.

VI.2 - Identification des puits et des sources du matériel particulaire dans l'estuaire amont

Au terme de ce travail, plusieurs sources et plusieurs puits de matériel particulaire en suspension ont pu être identifiés dans l'estuaire amont. Sous le terme de puits, sont regroupées toutes les causes de disparitions de matériel particulaire de la colonne d'eau. Ces sources et puits sont représentés sur la Figure 118 extraite des travaux d'Eisma, 1993, et adaptée à l'estuaire amont de la Seine.

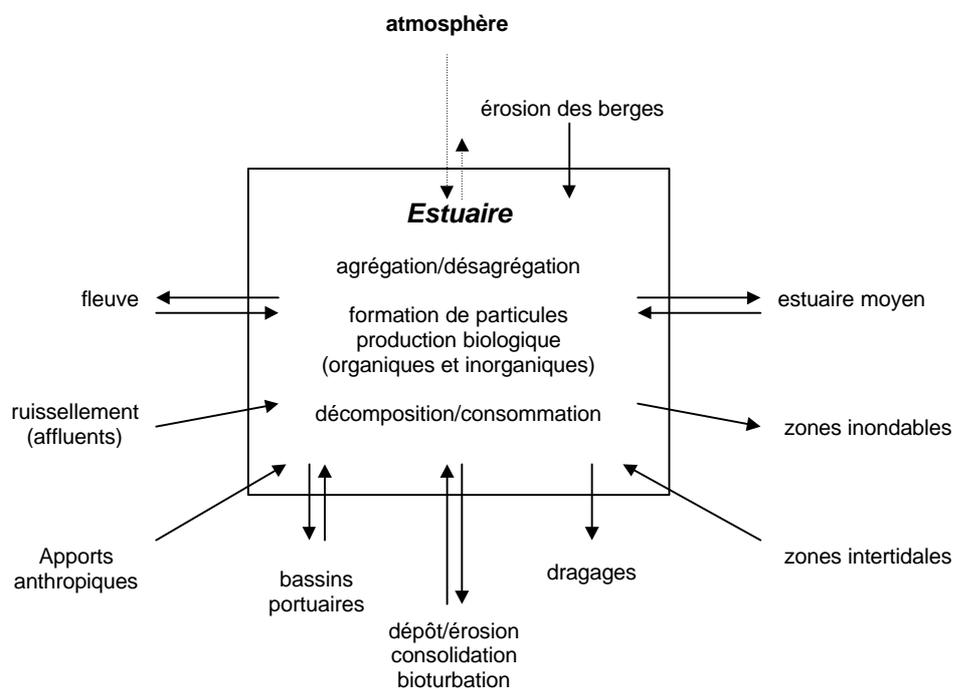


Figure 118 : Origine et devenir des particules en suspension dans l'estuaire amont de la Seine (Eisma, 1993, modifié).

VI.2.1 - La source fluviale

VI.2.1.1 - Bilans annuels et taux d'érosion

La localisation de l'estuaire de Seine dans un contexte géologique crayeux, peu favorable à la mise en place d'un réseau hydrographique de surface dense, explique la faiblesse du taux d'érosion annuel et des flux particuliers dans le bassin versant intra-estuarien (Tableau 20). Le fleuve constitue la source essentielle du matériel particulaire en suspension arrivant dans l'estuaire amont.

Tableau 20 : Superficie et taux d'érosion des bassins versants intra-estuarien, amont et du bassin versant total de la Seine, y compris la Risle.

	<i>Superficie (km²)</i>	<i>% superficie du bassin versant total</i>	<i>Flux annuel moyen de matériel particulaire (t)</i>	<i>% flux annuel total</i>	<i>Taux d'érosion (t.km².an⁻¹)</i>
<i>Bassin versant total</i>	78 650	100 %	640 500 à 746 500	100 %	8,3 à 9,6
<i>Bassin versant amont</i>	66 870	85 %	600 000 à 700 000	92,2 à 92,5 %	9,0 à 10,5
<i>Bassin versant intra-estuarien</i>	11 780	15 %	40 500 à 46 500	7,8 à 7,5 %	4,3 à 4,8

VI.2.1.2 - Cycles saisonniers

Les variations annuelles et occasionnelles des débits du fleuve ont des conséquences importantes sur les transferts de matériel particulaire en suspension au sein de l'estuaire amont de la Seine.

En deçà d'un débit seuil, voisin de 400 m³.s⁻¹, les mécanismes liés à la marée dominent le transport sédimentaire. Au-delà de ce seuil, les mécanismes de marée sont fortement modifiés par les débits fluviaux élevés.

Les techniques actuelles de calcul du flux de matériel particulaire en suspension pénétrant dans l'estuaire de Seine au barrage de Poses (pk 202,00) ne fournissent pas une estimation temporelle et quantitative rigoureuse de ces flux en entrée d'estuaire. Le calcul des concentrations pondérales de MES au barrage de Poses se révèle notamment incapable de reproduire les différentes hystérésis entre charge solide et débits liquides.

Les suivis des concentrations pondérales de MES en amont immédiat du barrage de Poses, à l'aide de sonde de mesure en continu de la turbidité, confirment que l'essentiel du matériel particulaire pénètre dans l'estuaire durant les crues, conformément aux observations d'Avoine, 1985 et de Meybeck and Idlafkih, 1995, mais que des déphasages de plusieurs types existent entre onde de crue et onde de matériel particulaire en suspension.

Les sédiments fins transportés en suspension durant les crues sont considérés comme issus de l'érosion et du lessivage des sols bien que peu d'études aient réussi à en faire la preuve. L'accident de Tchernobyl en 1986 a permis de mettre en avant ce type de lien (Walling *et al.*, 1989). Toutefois, comme le soulignent Reid and Frostick, 1994, les lits graveleux offrent des interstices entre les grains qui permettent au sédiment fin de se déposer lors des périodes de plus faibles courants. En crue, les courants sont plus importants et le remaniement des éléments du fond engendre une remise en suspension des particules fines. On trouve alors en suspension des particules issues de l'érosion du bassin versant et du fond du fleuve. Sur les rives de la Severn, les taux de particules issues de l'érosion des berges vont de 17 % à l'échelle de l'année (Couperthwaite *et al.*, 1996) mais peuvent atteindre 64 % en période de crue (Bull, 1997a).

Sur la Niobrara River (USA) Colby and Hembree, 1955, (*in* Reid and Frostick, 1994) montrent que l'augmentation des débits est accompagnée d'une diminution du diamètre médian des particules en suspension. Cette observation s'explique par l'arrivée dans le fleuve d'argiles originaires du bassin

versant. Sur d'autres cours d'eau telle que la River Clyde (Ecosse), aucune variation dans la composition des particules n'a pu être mise en évidence au cours des crues (Fleming *et al.*, 1970).

La complexité du réseau hydrographique dans le bassin versant en amont du barrage de Poses (pk 202,00) rend difficile toute conclusion quant aux origines des différentes relations charge solide/débits liquides observées. Toutefois, compte tenu des observations réalisées sur d'autres cours d'eau, plusieurs précisions peuvent être apportées sur les crues arrivant à l'estuaire.

A l'entrée amont de l'estuaire de Seine, les fortes crues présentant des débits supérieurs ou égaux à $1\ 800\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ comme celles étudiées par Avoine, 1985 et Meybeck and Idlafkih, 1995 présentent des hystérésis rétrogrades (Figure 119-a) Ce type d'hystérésis traduit l'arrivée du pic de concentration pondérales en MES avec de l'avance sur le pic de débits. Sur des petits bassins versants, Walling, 1974, explique cette hystérésis rétrograde par la plus grande disponibilité de sédiment en début de crue aux niveaux de sites de stockage locaux (lit, banquettes, zones ripariennes), alors qu'en fin de crue la disponibilité de sédiment est plus faible et devient le facteur limitant.

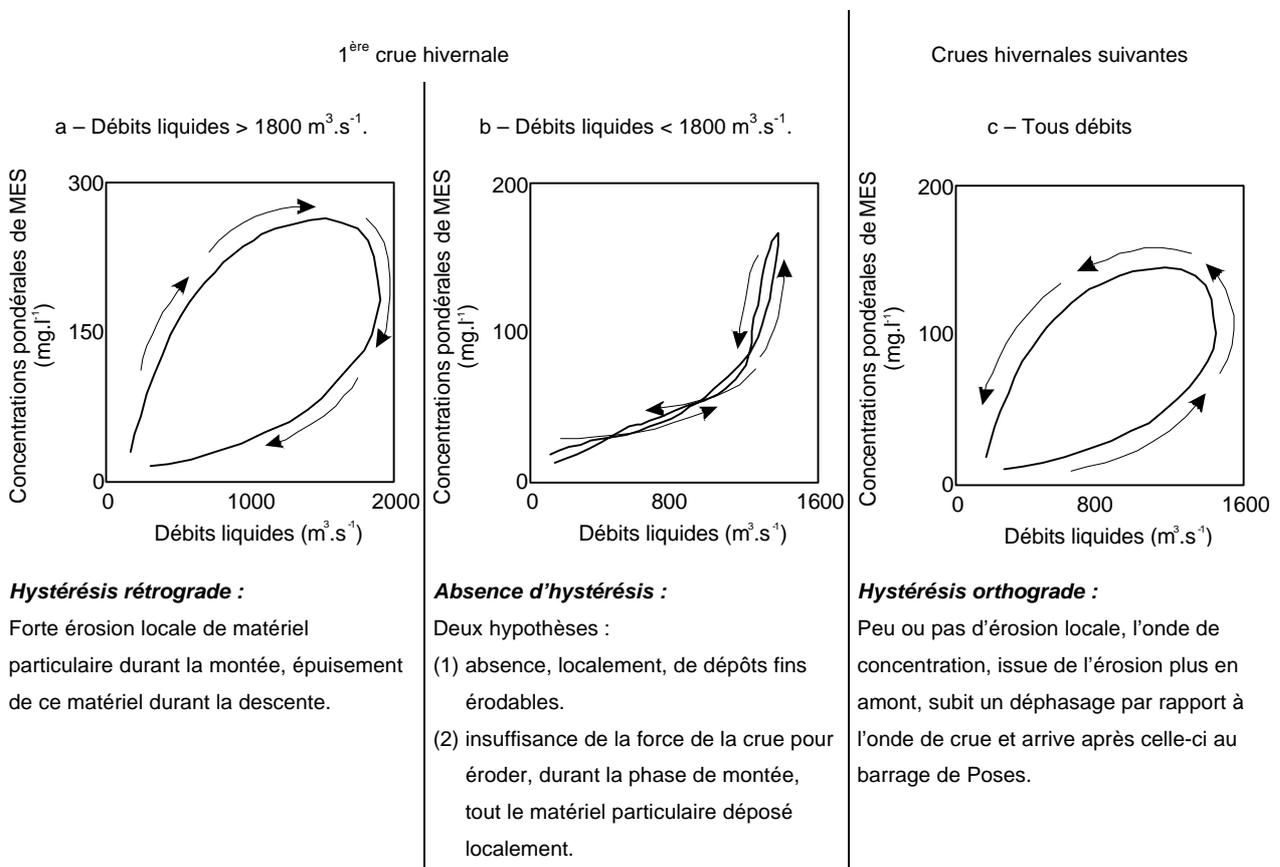


Figure 119 : Interprétation des relations entre charge solide/débit liquide au barrage de Poses (pk 202,00).

Petts *et al.*, 1985, précisent, au travers de suivis réalisés sur des lâchers d'eau à partir de réservoirs, qu'en fait, deux pics de sédiments sont associés aux ondes de crues :

- a – Un premier pic de concentration est associé à l'initiation de la turbulence générée par l'arrivée du début de l'onde (érosion locale).
- b – Un second pic de concentration est associé au pic de crue lui-même (transport de matériel). Selon Bull, 1997b, la plupart des études qui se sont attachées à étudier la

propagation des crues et des ondes de sédiments associées ont suggéré que la vitesse de propagation de l'onde de crue est supérieure à l'onde de matière en suspension. En fait, Heidel, 1956, montre que, sur un fleuve drainant un large bassin versant, un déphasage apparaît entre l'onde de crue et cette onde de matériel particulaire qui est retardée. Il explique ce phénomène par le fait que l'onde de crue se déplace à une vitesse supérieure à celles des courants qui lui sont associés et qui sont les vecteurs du transport particulaire en suspension.

Les crues à hystérésis rétrogrades sont donc des crues qui, du fait de leur forte amplitude ou de l'importante disponibilité locale en matériel particulaire, remettent en suspension de grandes quantités de particules lors de leur arrivée sur le site. Cette remise en suspension locale est suffisamment importante pour masquer le deuxième pic de MES associé au pic de crue. En fin de crue, la source locale de matériel particulaire est tarie et les remises en suspension sont plus faibles.

Au barrage de Poses, lorsque la première crue annuelle est faible ($< 1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), aucune hystérésis n'apparaît (Figure 119-b). Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène :

- a – Il n'existe pas de dépôts fins susceptibles d'être érodés et la distance parcourue par la crue est insuffisante pour qu'un déphasage apparaisse entre ondes de crue et de matériel particulaire.
- b – La force de la crue est insuffisante pour épuiser les stocks particuliers déposés.

Les crues ou les augmentations de débits, faisant immédiatement suite aux premières crues annuelles, présentent des hystérésis orthogrades (Figure 119-c). Ces relations charge solide/débit liquide s'expliquent par un déphasage entre l'onde de crue et l'onde de concentration pondérales de MES qui se propage moins rapidement, ainsi que par l'absence d'une érosion locale de début de crue.

Compte tenu de ces relations variables entre charge solide et débit liquide et des hétérogénéités spatiales au sein d'une même section qui rendent incertaine la signification d'un échantillon, une révision du mode de calcul des flux arrivant dans l'estuaire par le barrage de Poses doit être envisagée.

L'adoption définitive de mesures en continu des concentrations pondérales de MES, en amont du barrage de Poses, et un calage de ces mesures par rapport à la section (voir page 174) permettra de mieux maîtriser les flux particuliers arrivant à l'estuaire par le fleuve.

VI.2.2 - Les sources et les zones de dépôt intra-estuariennes

VI.2.2.1 - Les affluents et l'activité humaine

Du fait du faible taux d'érosion du bassin intra-estuarien, l'importance des apports particuliers liés aux affluents est négligeable à l'échelle de l'estuaire amont dans son ensemble (30 000 à 35 000 $\text{t} \cdot \text{an}^{-1}$ contre 600 000 à 700 000 $\text{t} \cdot \text{an}^{-1}$ pour la Seine).

Les apports de matériel particulaire liés à l'activité humaine ne représentent quant à eux 10 500 à 11 500 $\text{t} \cdot \text{an}^{-1}$ et sont eux aussi faibles à l'échelle de l'estuaire. Ils sont cependant majoritairement localisés aux environs de l'agglomération rouennaise.

VI.2.2.2 - Les zones de dépôts de matériel particulaire fin

Durant les campagnes de reconnaissance de la couverture sédimentaire, plusieurs zones de dépôts de matériel particulaire fin ont pu être identifiées. Elles peuvent être regroupées en trois grandes familles :

- a – Les vasières découvrantes ou zones intertidales, essentiellement localisées dans le secteur des îles en amont de l’agglomération Rouennaise.
- b – Les rives convexes de méandre.
- c – Les infrastructures portuaires de l’agglomération, constituées de bassins et de souilles.

VI.2.2.2.1 - Les vasières découvrantes en amont de Rouen

Les vasières découvrantes, identifiées en amont de Rouen dans le secteur des îles, se développent essentiellement dans les zones abritées des courants amont/aval (courants de jusant et courants de crue). Leur localisation répond à des critères morphologiques et hydrauliques proches de ceux responsables de la mise en place des bancs sableux sur la Colorado River (Cluer, 1995) (Figure 120) bien que les matériaux en jeux soient différents.

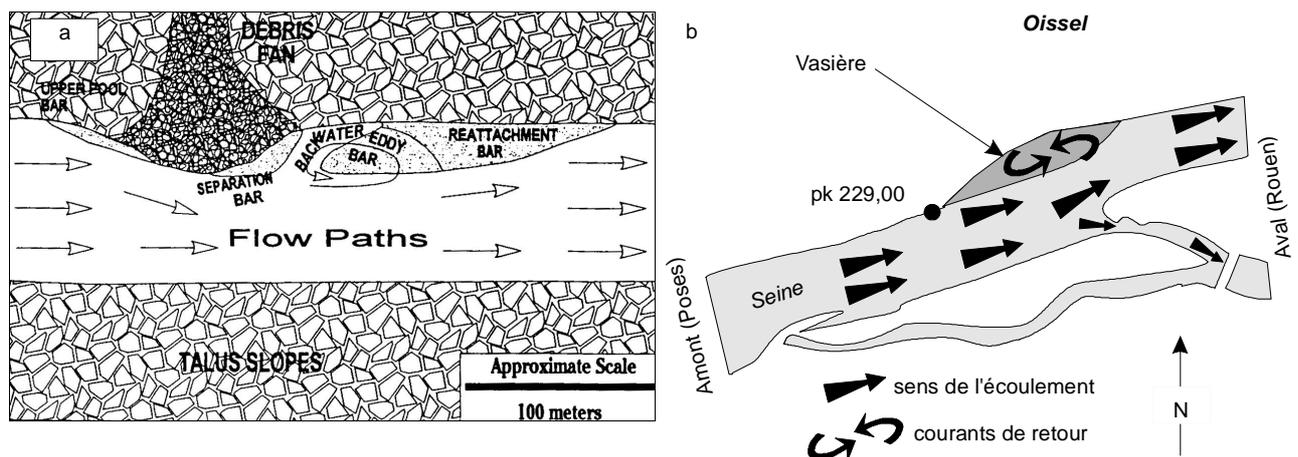


Figure 120 : Comparaison (a) du schéma type de la localisation des dépôts sableux sur la Colorado River (Cluer, 1995) avec la (b) localisation de la vasière de Oissel dans l’estuaire amont de la Seine (pk 229,60).

Ces zones, abritées des courants amont/aval, constituent des sites privilégiés de dépôts d’une partie du matériel particulaire fin arrivant dans l’estuaire durant les crues. Ces dépôts sont constitués de matériel particulaire de mode voisin de $23 \mu\text{m}$ et dont les vitesses de chute en crue sont comprises entre $2 \cdot 10^{-2}$ et $8 \cdot 10^{-2} \text{ mm.s}^{-1}$.

En fin de crue, une diminution du niveau du matériel particulaire déposé sur ces vasières durant la crue se produit et traduit l’exportation, depuis la vasière, vers la colonne d’eau, de matériel particulaire. Cette exportation est liée au retour sur la vasière, après la diminution des débits, des courants alternatifs de flot et de jusants. La situation morphologique des vasières les expose à l’arrivée directe du flot qui apparaît le facteur dominant de l’érosion régressive constatée lors de ces exportations (Figure 121).

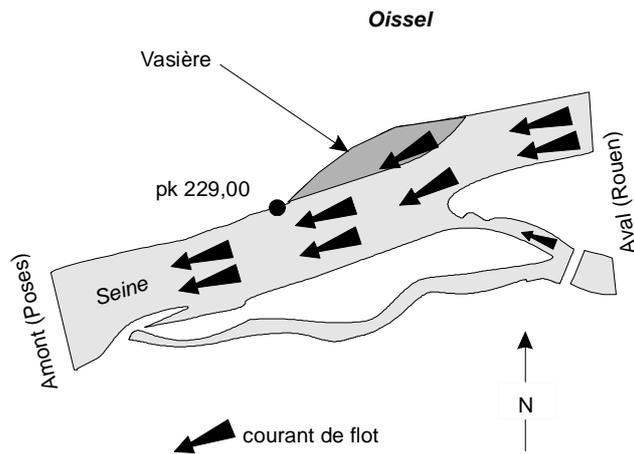


Figure 121 : Localisation de la vasière de Oissel (pk 229,60) par rapport à l'écoulement général de flot.

Le suivi de la topographie de la vasière n'a pas permis de mettre en évidence de variations avec les cycles semi-diurnes et semi-lunaires. La technique de mesure de la topographie de la vasière, réalisée à pied, est perturbatrice (tassement lié au piétinement) et ne permet en conséquence pas un suivi fréquent et compatible avec les cycles de marées.

VI.2.2.2.2 - Les méandres

Dans les secteurs courbes des chenaux, une circulation hélicoïdale se met en place sous l'effet de la force centrifuge (Gilvear and Bravard, 1993). La pression de l'eau est plus importante sur la rive concave que sur la rive convexe, ce qui provoque une dénivellation entre les deux rives et engendre la circulation hélicoïdale secondaire (Figure 116). La zone de maximum de courants se trouve déplacée vers la rive concave du méandre.

Les dépôts de matériel particulaire fin, identifiés dans les rives convexes des méandres, se développent en présence de ces courants secondaires (Figure 122).

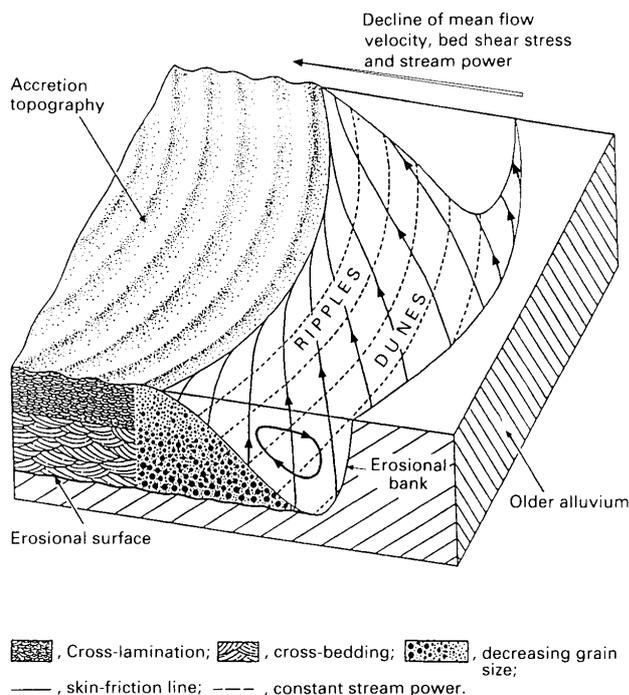


Figure 122 : Schéma simplifié des écoulements et des structures sédimentaires en méandre (Reid and Frostick, 1994).

Aucun suivi de la sédimentation dans les méandres de l'estuaire de Seine n'a été réalisé et leur rôle durant les crues n'est pas connu. La nécessité de dragages, sur l'ensemble des méandres en aval de

Rouen, témoigne néanmoins de leur participation à la dynamique sédimentaire de l'estuaire. En outre, les travaux réalisés dans le secteur de la Bouille-Moulineaux (pk 260,00 et 258,50) montrent que les dépôts en rive convexe de méandre jouent un rôle important dans le transport particulaire et constituent une source de matériel particulaire fin en étiage.

L'utilisation de la technique des distances lagrangiennes qui a permis, sur la Severn (Grande-Bretagne), de définir des sites préférentiels d'entraînement de matériel particulaire (HRS, 1981 *in* Dyer, 1994) montre, dans l'estuaire amont de la Seine, deux sites de dépôts de matériel particulaire fin, non répertoriés lors des campagnes de couverture sédimentaire. Ces deux sites sont localisés en méandres (dans le méandre de Duclair, entre le pk 271,50 et le pk 272,50 ainsi que dans le méandre de Caudebec-en-Caux entre les pk 307,08 et 305,50).

Cette observation permet de penser que l'ensemble des méandres de l'estuaire amont de la Seine constitue des sources et des zones temporaires de dépôt de matériel particulaire fin.

Au cours des différentes campagnes de terrain, d'autres sites de dépôts, essentiellement localisés en amont de Rouen, ont été observés mais n'ont pas été étudiés. Il s'agit des dépôts qui se développent en aval immédiat de certaines îles, dans certains bras morts et au niveau de petits chenaux drainant latéraux. A ces zones de dépôts s'ajoutent les simples dépôts de berges que l'on retrouve tout au long de l'estuaire amont mais qui sont difficilement quantifiables.

VI.2.2.2.3 - Les infrastructures portuaires rouennaises

Les travaux du Port Autonome de Rouen, 1992, réalisés essentiellement à partir de données de sondage entre les pk 245,00 et 250,00, montrent que les dépôts de matériel particulaire se font essentiellement dans les infrastructures (souilles et bassins) situées dans les zones convexes des courbures, en partie du fait des courants hélicoïdaux. Les taux maxima de sédimentations (de 1 à 4 m.an⁻¹) ne se rencontrent le plus souvent pas dans les bassins eux-mêmes mais en entrée de bassin où des zones tourbillonnaires se développent.

Les taux de sédimentations sont d'autant plus élevés dans les souilles qu'elles font l'objet d'un surcreusement qui constitue un piège. Aux simples décantations de matériel particulaire se rajoutent des glissements de vases vers les zones les plus profondes des souilles.

VI.2.2.3 - Dépôts particuliers du fond

Au cours des cycles semi-diurnes de marée des échanges entre la colonne d'eau et le fond de la Seine ont été montrés, de même entre les périodes de vives-eaux et de mortes-eaux un dépôt de matériel particulaire se produit.

Compte tenu des valeurs estimées de ces dépôts (de l'ordre de 18 g.m² au cours du cycle semi-lunaire), le stock sédimentaire est de faible épaisseur (>1 mm pour un dépôt de concentrations proche de ceux de la crème de vase : 50 à 400 mg.l⁻¹ (Gallenne, 1974)) et est difficilement mesurable par les techniques classiques de prélèvement. L'état de consolidation de ce matériel particulaire décanté n'est pas connu mais doit rester négligeable compte tenu des faibles épaisseurs de matériel déposé :

a – Constitue-t-il, une sorte de néphéloïde à proximité du fond ?

b - Se dépose-t-il complètement et commence-t-il à se consolider ?

c - Se dépose-t-il simplement entre les cailloutis, graviers et sables du fond qui le protège de la remise en suspension lors des faibles courants ?

Il est probable que ces trois phénomènes se produisent mais à des échelles de temps différentes. Ainsi, durant le cycle de marée, lors de phases de sédimentation le matériel particulaire se concentre à proximité du fond formant un néphéloïde, une partie du matériel de ce néphéloïde peut être piégé entre les cailloutis, graviers et sables du fond de la Seine (Diplas and Parker, 1992). En période de forts courants, tout ou partie de ce matériel (néphéloïde et matériel piégé) est remis en suspension. Lors des périodes de courants plus faibles (étales de pleine mer et de basse mer et mortes-eaux), seul le matériel du néphéloïde pourra être érodé, le matériel piégé ne pouvant être érodé. Ce dernier pourra alors commencer à se consolider par perte d'eau (Partheniades, 1965, Postma, 1967) et/ou par l'intermédiaire de facteurs biologiques (Black, 1997, Paterson, 1997).

Il est probable que, dans de nombreux secteurs, ce dépôt particulaire de mortes-eaux n'existe pas de manière durable à l'échelle du cycle de marée, du fait des conditions hydrodynamiques locales et de la navigation. Ces dépôts se font alors préférentiellement dans certains sites (puits) tels les rives convexes de méandres ou certaines parties du chenal, comme sur le site du Val-des-Leux (pk 265,55) où du matériel particulaire sédimente préférentiellement en rive gauche durant le jusant.

VI.2.2.4 - L'activité biologique

Le suivi annuel de la nature du matériel particulaire en suspension montre une succession de développements de diatomées dans l'estuaire amont en étiage et des développements de populations de diatomées différentes entre l'amont de Rouen (pk 206,30) et l'aval de Rouen (pk 265,55).

Ces observations ne font que traduire des fluctuations saisonnières connues en milieu continental (Dussart, 1966) comme en milieu marin (Whickstead, 1976) des populations de plancton.

Dans l'estuaire de Seine, les travaux de Garnier *et al.*, 1997, et d'Akopian *et al.*, 1998 sur la dynamique du phytoplancton et du zooplancton durant l'étiage 1997, permettent de préciser ces variations spatiales et temporelles et donnent une estimation de la biomasse.

Les biomasses zooplanctoniques sont maximales en fin d'étiage (septembre). Elles sont faibles en amont de Rouen (de 50 à 100 $\mu\text{g.l}^{-1}$) et atteignent un maximum en aval immédiat de Rouen entre les pk 252,00 et 260,00 (300 à 500 $\mu\text{g.l}^{-1}$). En aval de ce maximum, les biomasses sont voisines de 150 à 200 $\mu\text{g.l}^{-1}$ jusque Caudebec-en-Caux (pk 310,00).

Les biomasses phytoplanctoniques augmentent depuis le barrage de Poses (pk 202,00) pour atteindre un maximum de 7 mg de carbone par litre, aux environs du pk 278,00 (Duclair) en septembre 1997. Sur la base d'organismes dont 50 % de la matière organique sèche sont constitués de carbone (Dussart, 1966), la biomasse phytoplanctonique pourrait atteindre 14 mg.l^{-1} en étiage en aval immédiat de Rouen.

La comparaison de ces 14 mg.l^{-1} , aux concentrations pondérales de MES mesurées en étiage en aval de Rouen (Tableau 18) montre que cette biomasse phytoplanctonique, est proche des valeurs de concentrations pondérales minimales de MES (15-20 mg.l^{-1}) mesurées durant les périodes d'étales de courant et représente 10 % des concentrations maximales mesurées au flot, en vives-eaux.

En considérant que la densité du phytoplancton est proche de celle de l'eau (Verduin, 1956 *in* Dussart, 1966) et que les vitesses de chute du phytoplancton sont parmi les plus faibles (voir pages 73 et 74) il est

vraisemblable que ce matériel phytoplanctonique constitue une part importante du matériel particulaire restant en suspension durant les étales de courants.

VI.2.3 - Conclusion

Les résultats de cette étude confirment que le fleuve constitue la source principale du matériel particulaire fin arrivant dans l'estuaire amont de la Seine. L'essentiel de ces apports se produit durant les crues. Le développement de phytoplancton semble pouvoir jouer un rôle important, notamment en étiage, en termes de quantité et de qualité du matériel particulaire en suspension.

Dans l'estuaire amont, malgré la chenalisation très importante, de nombreuses zones sont susceptibles de jouer alternativement le rôle de piège ou de source du matériel particulaire fin en fonction des conditions hydrologiques. Ces observations remettent en cause la vision faisant de l'estuaire amont un simple tuyau servant de raccordement entre le fleuve et l'estuaire moyen.

VI.3 - Caractéristique et comportement du matériel particulaire

VI.3.1 - Caractéristiques physiques du matériel

Le matériel particulaire en suspension dans l'estuaire amont de la Seine est très hétérogène. Pour une taille donnée, plusieurs matériaux peuvent être identifiés (Figure 123).

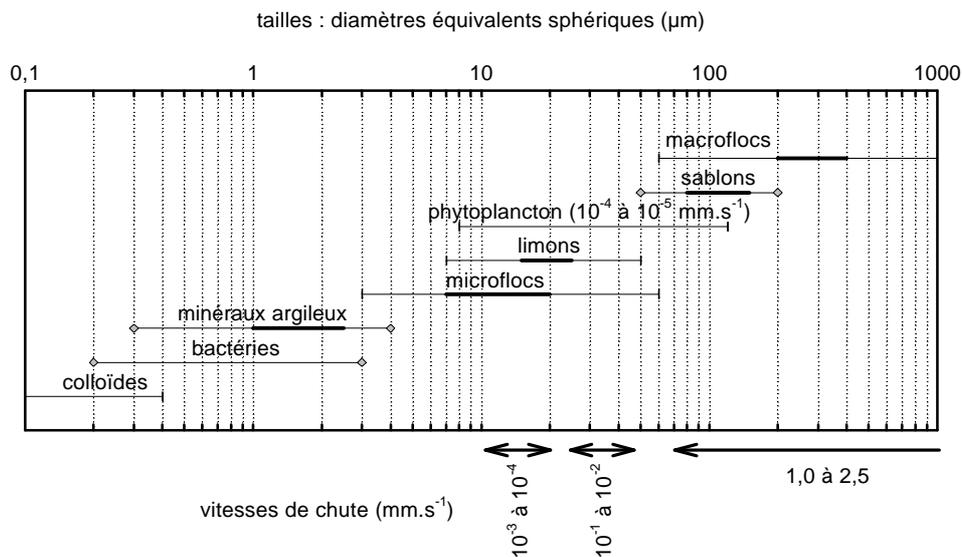


Figure 123 : Matériel particulaire en suspension coexistant dans les eaux de l'estuaire amont (Dupont and Lesueur, 1998, modifié). Les traits gras représentent les tailles dominantes pour chaque type de matériel particulaire. Les traits fins représentent les tailles extrêmes pour chaque type de matériel particulaire.

De fait, les vitesses de chutes mesurées pour une classe granulométrique donnée sont la résultante des vitesses de chute de plusieurs types de matériel particulaire. Dans certaines circonstances, la dominance d'un type de particules, pour une classe granulométrique donnée, peut modifier considérablement ces vitesses de chute. Ainsi, la forte présence de phytoplancton peut engendrer la diminution des vitesses de chute d'un facteur 10 à 100 pour une classe granulométrique donnée.

Cette hétérogénéité se retrouve aussi à l'échelle l'annuelle et le suivi de la nature du matériel particulaire en suspension montre deux grandes tendances :

- a – Une modification en quantité et en qualité de la source particulaire amont avec notamment, durant les crues, un accroissement des vitesses de chute du matériel particulaire en suspension et une tendance à la disparition du matériel biologique de ces suspensions et durant l'étiage une diminution des vitesses de chute et un renforcement du matériel biologique en suspension.

- b – Un développement de matériel particulaire biologique au sein de l'estuaire, susceptible de fortement réduire les vitesses de chute du matériel particulaire en suspension et notamment les fractions qui durant les crues chutent rapidement (fraction comprise entre 30 et 60 μm).

Dans les deux cas, la résultante est une augmentation des vitesses de chute du matériel particulaire en suspension en crue par rapport aux vitesses de chute d'étiage, donc une potentialité de dépôts plus importante durant les crues dans les zones de faibles courants.

VI.3.2 - application au cycle semi-diurne

A partir des observations de variations des vitesses de courants, des concentrations pondérales de MES et des microgranulométries, un schéma de l'évolution du matériel particulaire en suspension au cours d'un cycle semi-diurne de marée type peut être dressé.

Ce schéma type part de l'hypothèse que le matériel particulaire en suspension est composé de trois populations A, B, C. Les répartitions respectives de ces trois populations à différents moments du cycle sont estimées sur la base des concentrations mesurées.

- 1 – La population A est constituée de particules dont les vitesses de chutes et les vitesses critiques d'érosion sont fortes. Elle pourrait correspondre à la catégorie des macroflocs et des sablons (vitesses de chutes voisines de 1,0 à 2,5 mm.s^{-1}).
- 2 – La population B est constituée de particules présentant des vitesses de chute plus faibles et pourrait correspondre à des particules de diamètres voisins de 30 à 50 μm .
- 3 – La population C est constituée de particules dont les vitesses de chute sont très faibles (particules de diamètres inférieurs à 20 μm et/ou phytoplancton).

L'arrivée du flot provoque la mise en suspension des stocks particuliers A et B, initialement présents au fond de la Seine (Figure 124). En surface, comme au fond, le matériel particulaire est composé des trois populations A, B, C.

Les importantes vitesses de chute du matériel particulaire A ainsi que les vitesses de courants de flot insuffisantes engendrent une diminution rapide et quasi totale de la surface de cette population de matériel particulaire. La population A sédimente et se concentre à proximité du fond du fait de vitesses de frottements encore élevées.

Les populations B et C, de vitesse de chute plus faible, se maintiennent en suspension en surface comme au fond.

En fin de flot, la diminution des vitesses de courant dans la colonne d'eau et des vitesses de frottements permet la sédimentation du reste de la population A et de la population B en surface comme au fond. A proximité du fond, une augmentation des concentrations se produit peu de temps avant l'étalement de pleine mer du fait de la concentration de matériel sédimenté depuis la surface. En surface, seule la population C reste présente.

Les concentrations pondérales de MES sont minimales quelque temps après les vitesses de courants du fait des phénomènes de « settling lag » et de « scour lag ».

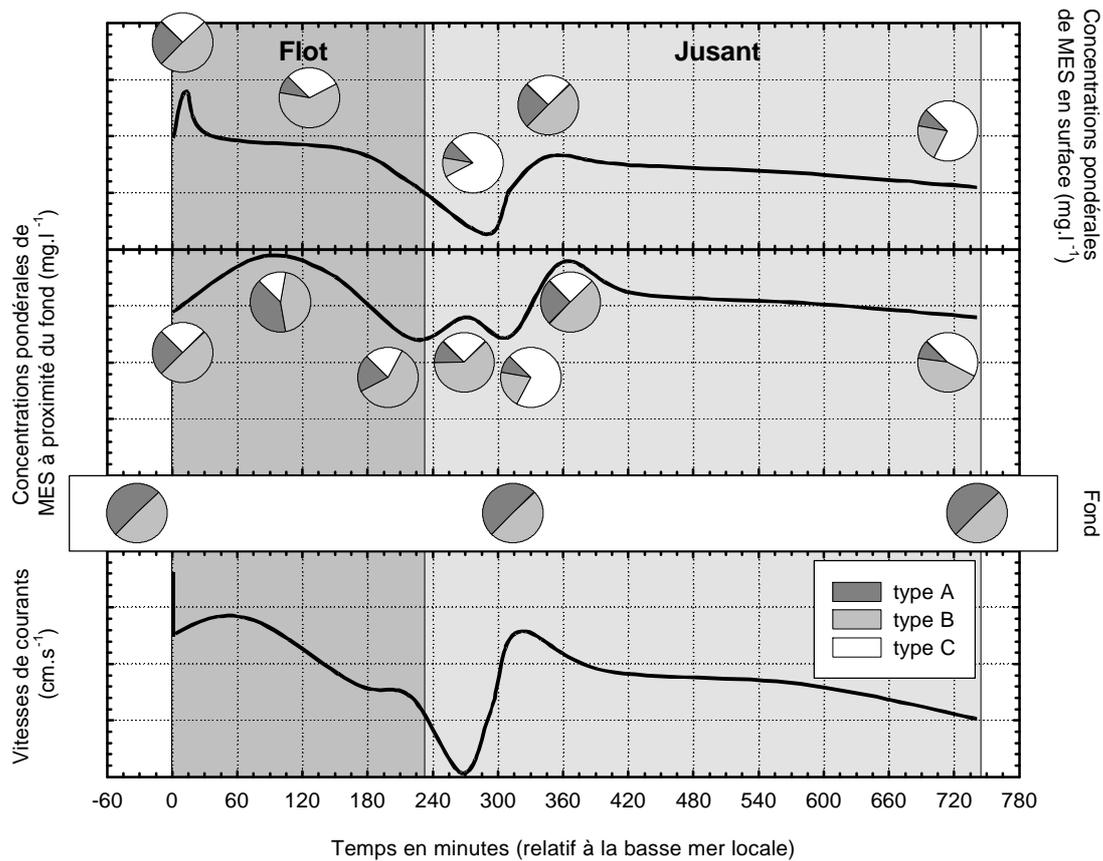


Figure 124 : Schéma de l'évolution des concentrations pondérales de MES dans une colonne d'eau basé sur l'hypothèse de l'existence de trois populations particulières et évolution des répartitions relatives de ces de trois types de populations particulières au cours d'un cycle semi-diurne de marée.

L'accroissement des vitesses de courant, en début de jusant, est plus progressif que lors de l'arrivée du flot. Cette augmentation progressive des vitesses de courant permet la remise en suspension dans la colonne d'eau du matériel particulaire B mais, les vitesses ne permettent la remise en suspension que d'une faible quantité de matériel particulaire de type A. Le matériel particulaire en suspension est donc composé essentiellement de particules de type B et C.

La diminution des vitesses de courants, en cours de jusant, permet une sédimentation du matériel particulaire A et B, en surface comme au fond.

VI.3.3 - La floculation

Bien que le travail réalisé au cours de ces trois années ait très peu abordé les questions de floculation, une réflexion sur l'importance et les conséquences de ce phénomène dans l'estuaire amont est nécessaire. d'autant que le concept de trois stocks de matériel particulaire en suspension est proche des observations réalisées par Eisma, 1986, dans les eaux estuariennes. Cet auteur a observé trois types de particules :

- a – Des macroflocs dont les tailles peuvent dépasser les 4 mm ; ils sont extrêmement fragiles et très difficiles à échantillonner. Ces macroflocs ont été observés dans l'estuaire amont de la Seine cependant, leur taille ne dépasse pas les 400 µm.

- b – Des microflocs, dont les tailles sont inférieures à 100 μm . Ils sont constitués de matériaux cohésifs et sont plus résistants que les macroflocs. Ce sont les éléments de base de la construction des macroflocs. Ces microflocs ont été observés dans l'estuaire amont de la Seine.
- c – Des particules minérales isolées.

Les macroflocs et microflocs sont la somme de différents constituants de nature et d'origine diverses. Malgré cette hétérogénéité de constitution, les agrégats présentent une structure ordonnée. Krone, 1963 (*in* Eisma, 1986) propose une classification des flocs basée sur leur ordre d'agrégation (Figure 125) voisine de celle proposées par Bourcart and Francis-Boeuf, 1942.

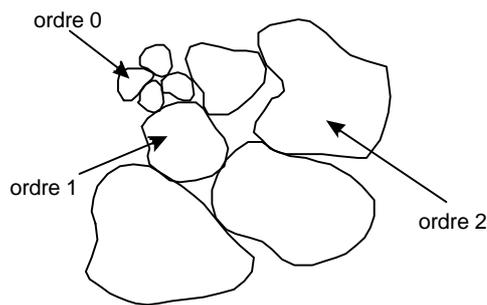


Figure 125 : Représentation bi-dimensionnelle d'agrégats de différents ordres (Krone, 1963, *in* Eisma, 1986, modifié).

Dans l'estuaire amont de la Seine, les flocs de plus grande taille apparaissent en surface lors des maxima de vitesses de courant, c'est à dire après des périodes de sédimentation et de concentration du matériel particulaire à proximité du fond.

Van Leussen, 1994, précise que pour que des agrégats se forment, les particules doivent avoir des propriétés cohésives et rentrer en collision. Pour cet auteur, les principaux phénomènes d'agrégation sont engendrés par trois processus majeurs qui peuvent être décrits par des lois physiques :

- a – Le mouvement Brownien des particules.
- b – La décantation différentielle des particules (*i.e.* la concentration), que l'on rencontre effectivement dans l'estuaire amont de la Seine durant une grande partie du jusant et durant l'étale de pleine mer.
- c – Les gradients de vitesses au sein du liquide et la turbulence (*i.e.* les contraintes de cisaillement). Ce qui se produit dans l'estuaire amont lors de l'accélération des vitesses de courant en début de flot et de jusant.

La floculation liée au sel en milieu estuarien est un phénomène qui suscite actuellement une discussion au sein de la communauté scientifique. Plusieurs études montrent des résultats opposés quant aux conséquences de la salinité sur la floculation (Van Leussen, 1994, Defossez, 1996). Dans l'estuaire amont, malgré l'absence de sel, des microflocs et des macroflocs ont été observés, ce qui tend à montrer que la salinité n'est pas un facteur nécessaire à la floculation.

Ces observations confirment celles réalisées plus en amont sur la Seine et qui montrent l'existence de macroflocs et de microflocs en amont et en aval de l'agglomération parisienne (Meybeck *et al.*, 1998). Cette étude montre qu'en milieu fluvial anthropisé, les stations d'épuration des eaux usées constituent une source importante de macroflocs de grande taille. Compte tenu de la distance séparant la station d'épuration d'Achères (\approx pk 30,00), principale usine d'épuration des eaux de l'agglomération parisienne,

du barrage de Poses (pk 202,00) et de la présence entre ces deux sites de barrages et d'écluses, peu de macroflocs issus de cette source arrivent dans l'estuaire amont. Cependant, plusieurs stations d'épurations des eaux usées existent au sein même de l'estuaire et constituent, par conséquent, d'importantes sources de microflocs et de macroflocs.

La biotransformation du matériel particulaire en suspension constitue un autre phénomène capable d'induire des phénomènes de floculation. Riley, 1963, *in* Van Leussen, 1994, définit les agrégats organiques comme des matrices comprenant des inclusions de bactéries de silts et parfois de phytoplanctons qui s'apparentent aux films bactériens se développant au niveau des surfaces immergées. Les observations au microscope électronique à balayage du matériel particulaire en suspension montrent couramment ce genre d'association, laissant penser que ce phénomène de floculation biologique est commun dans l'estuaire amont. Il est à noter que ces observations vont dans le sens de l'hypothèse de la consolidation du matériel particulaire déposé par des facteurs biologiques (voir page 186).

Dupont and Lafite, 1985, Van Leussen, 1994, montrent que l'ensemble des organismes nectoniques, planctoniques et benthiques filtrent les eaux et rejettent des pelotes fécales de forte densité et de cohésion importante. Les effets de filtration de ces organismes se font essentiellement sentir dans les zones de forte densité de population. Cette activité est faible en période hivernale et n'a pour l'heure pas été identifiée dans l'estuaire amont de la Seine.

La présence, dans l'estuaire de Seine, d'une population de moule zèbre (*Dreissena polymorpha*) (Garnier *et al.*, 1997, Akopian *et al.*, 1998), pose le problème de l'influence de cet organisme filtreur sur la nature et la concentration du matériel particulaire en suspension. La production de fèces et de pseudofèces par la moule zèbre augmente le taux de sédimentation (vitesses de chutes) du matériel particulaire Noordhuis *et al.*, 1992.

Selon Sprung and Rose, 1988, *Dreissena polymorpha* est capable de filtrer des particules de diamètre supérieur à 0,7 μm et sélectionne des particules de taille comprise entre 15 et 40 μm , rejetant les particules plus grosses par production de pseudofèces.

Dans certains milieux aquatiques, les populations de moules sont si importantes que des volumes considérables d'eau sont filtrés chaque jour (Noordhuis *et al.*, 1992). Ainsi, selon Roditi *et al.*, 1996, dans l'estuaire amont de l'Hudson River, compte tenu de la population de *Dreissena polymorpha* et du taux de filtration mesuré au laboratoire (115 ml.moule⁻¹.h⁻¹), les eaux douces de l'estuaire sont entièrement filtrées en 2 jours.

En fait, les taux de filtration de *Dreissena polymorpha* varient de 2 à 287 ml.moule⁻¹.h⁻¹ en fonction de la température, de la composition et des concentrations du matériel particulaire en suspension, de l'âge des individus ainsi qu'avec le stress généré par les conditions des expérimentations (Noordhuis *et al.*, 1992).

Une étude réalisée dans de petits lacs hollandais par Noordhuis *et al.*, 1992, montre qu'avec l'accroissement des concentrations pondérales de matériel particulaire en suspension, le taux de filtration diminue et la production de pseudofèces augmente (Figure 126).

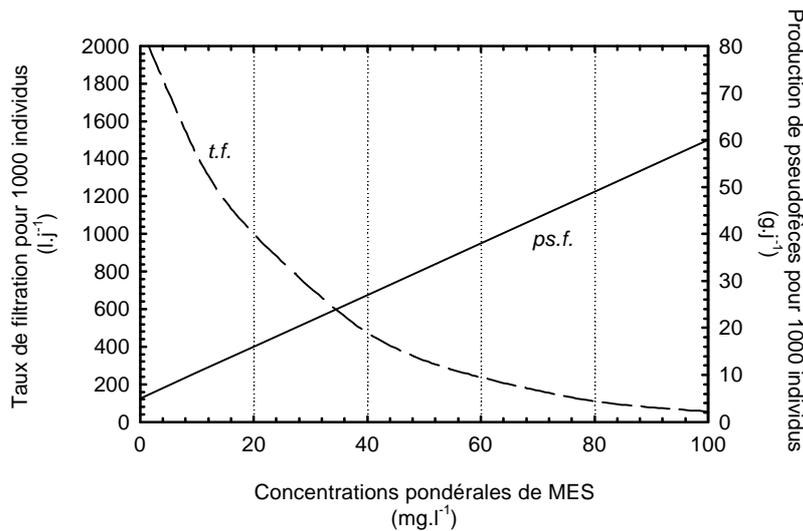


Figure 126 : Taux de filtration (t.f.) et production de pseudofèces (ps.f.) pour 1000 individus d'une population de *Dreissena polymorpha* (Noordhuis et al., 1992, modifié).

Dans l'estuaire de Seine, des études sont en cours pour déterminer la localisation et l'abondance des populations de *Dreissena polymorpha*. Pour l'heure, il est difficile d'estimer les impacts quantitatifs et qualitatifs des populations de moules sur le transport sédimentaire intra-estuarien.

VI.3.4 - Conclusion

Le matériel particulaire présent en suspension dans l'estuaire amont est hétérogène. Cette hétérogénéité a des conséquences sur la répartition du matériel particulaire dans la colonne d'eau durant les cycles semi-diurnes de marée. A l'échelle annuelle, la composition de l'ensemble du matériel particulaire en suspension est, elle aussi, variable. Une partie de ce matériel particulaire est constituée de microflocs et de macroflocs dont la composition est hétérogène.

Cette variation de la composition du matériel particulaire en suspension peut être interprétée par les variations des contributions des trois sources génératrices de microflocs et de macroflocs que sont les processus hydrologiques (courants, turbulence,...), les processus biologiques (production primaire, biotransformation des particules et sécrétion de matière organique...) et les processus anthropiques (essentiellement les stations d'épuration).

VI.4 - Bilans des transferts particuliers

L'extrême variabilité spatiale et temporelle des mécanismes hydrosédimentaires a été développée dans la partie représentative de ce chapitre. Elle rend difficile l'établissement de bilans sédimentaires à l'échelle de l'estuaire.

En étiage, les courants alternatifs semi-diurnes et les variations semi-lunaires de leurs intensités rendent difficile toute estimation du transfert du flux particulaire à l'échelle de l'estuaire. Seuls, des bilans locaux ont pu être réalisés et montrent la possibilité de transferts aval/amont qui rendent peu crédible l'utilisation de la formulation classique de calcul de flux : $Flux = C_{MES} \times Débit$.

Durant les crues et moyennant des hypothèses simplificatrices d'homogénéité des concentrations et de sens de l'écoulement, les bilans du transport particulaire au sein de l'estuaire amont montrent un transfert indirect et incomplet du matériel particulaire entre le barrage de Poses et l'aval de Rouen.

VI.4.1 - Bilan de crue

Durant les 2 à 3 mois de crue, une répartition type des quantités de matériel particulaire arrivant à l'estuaire entre phases de montée et de descente est impossible dans la mesure où elle dépend de la nature de l'hystérésis charge solide/débit liquide au barrage de Poses (pk 202,00).

Dans l'estuaire amont, les épisodes de crue peuvent être décomposés en plusieurs séquences en fonction de leurs impacts sur le transfert particulaire (Figure 127).

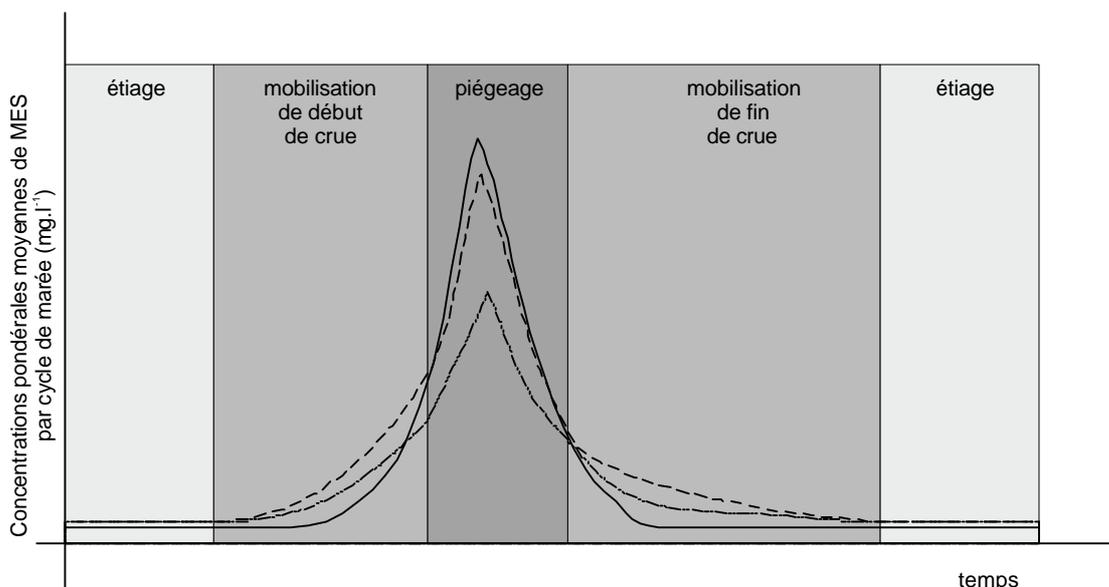


Figure 127 : Schéma conceptuel de l'évolution des concentrations particulaires dans l'estuaire amont au cours d'une crue au niveau de trois sites : l'amont du barrage de Poses (—, pk 202), l'amont immédiat de Rouen (---, Ile Lacroix, pk 241,8) et l'aval de Rouen (- · -, Val-des-Leux, pk 265,5).

En début de crue les flux de matériel particulaire en suspension arrivant à Rouen sont supérieurs à ceux arrivant au barrage. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette observation :

- a – L'augmentation des débits fluviaux a pour conséquence un renouvellement des masses d'eau dans l'estuaire amont, accompagné d'une expulsion d'une partie du matériel particulaire en suspension. Ce phénomène a pu être observé lors des petites crues d'étiage et se reproduirait en début de crue hivernale.
- b – Les turbulences générées par la montées de crue (Petts *et al.*, 1985), provoquent la mobilisation, du matériel particulaire fin déposé voire piégé entre les sables et cailloutis du fond de la Seine (Kurashige, 1996).
- c – L'accroissement des vitesses de courants du fait de l'augmentation des débits permet la mobilisation de matériel particulaire depuis une des sources identifiées en amont de Rouen (vasières, ou intérieur de méandre).

Au plus fort de la crue, une partie du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire amont avec l'onde de crue n'atteint pas l'estuaire aval avec cette onde. Ce matériel se dépose à l'amont de Rouen, dans le secteur des îles (entre le pk 221,50 et le pk 235,50) sur des vasières latérales qui se comportent en zones inondables, ainsi que dans les infrastructures portuaires du Port Autonome de Rouen.

Entre le barrage de Poses et l'aval de l'agglomération rouennaise (pk 265,55) ce piégeage représente 20 à 30 % du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire durant la crue, soit pour une crue moyenne, entre 105 000 t et 158 000 t. Sur la durée totale de la crue ces 20 à 30 % peuvent s'expliquer par le seul piégeage dans les infrastructures portuaires rouennaises.

Il est pour l'heure impossible de déterminer l'importance des piégeages entre l'aval de Rouen et Caudebec-en-Caux faute de suivi des sites potentiels (méandres) ou identifiés de dépôts (vasière du Trait).

En aval de Rouen, le département de Géologie marine de l'Université de Caen a identifié une vasière dans le secteur du Trait-La Mailleraye (pk 300,00 environ), dont le comportement, durant les crues serait semblable à celui observé sur les vasières en amont de Rouen. Une étude est en cours par le département de Géologie Marine de l'Université de Caen afin de suivre la dynamique annuelle de cette vasière.

La contribution des méandres au piégeage d'une partie du matériel particulaire en suspension reste une hypothèse faute de suivi. Il est toutefois fort probable que ces sites constituent, au même titre que les vasières en amont de Rouen, des zones de dépôts de matériel particulaire fin durant la crue.

Seule, une très faible fraction de ces 20 à 30 % de matériel piégé en amont de Rouen est restituée au système estuarien de transport en suspension en fin de crue (1 à 3 % du matériel arrivant à Poses en crue). Le reste du matériel est soit restitué durant l'étiage, soit exporté hors du système estuarien par dragage, soit immobilisé au niveau de sites de dépôts difficilement mobilisables (bras morts, bassins).

Les quantités de matériel immobilisées dans ces sites de dépôts définitifs sont difficilement estimables. En fait, aucun site de ce type n'a réellement pu être identifié dans l'estuaire amont de la Seine, excepté celui de la Darse des Docks dans les infrastructures portuaires rouennaises qui est quasiment inutilisé et ne subit aucun entretien.

Sur les 600 000 m³ de matériel particulaire exportées hors du système estuarien par dragage, 80 % de ce volume est constitué de particules fines (Duval, 1994) ce qui représentent 480 000 m³. A partir de ce

volume de matériel particulaire dragué dans les infrastructures portuaires rouennaises une estimation du matériel particulaire fin exporté par dragage peut être réalisée. La densité en place du matériel dragué est comprise entre 1,1 et 1,2, ce qui correspond, compte tenu de la présence de gaz dans les échantillons (12,5 %) à des teneurs en sédiments secs comprises entre 280 g.l⁻¹ à 460 g.l⁻¹ (Port Autonome de Rouen, 1992). Les 480 000 m³ annuels de matériel dragués représentent donc entre 134 400 t et 220 800 t de matériel particulaire.

La valeur basse de cette estimation (134 400 t) est proche de la valeur haute de la quantité de matériel particulaire piégé durant les crues (158 000 t). En dehors des incertitudes planant sur ces deux estimations cette similarité des valeurs impliquerait l'exportation hors du système Seine, par dragage, de la totalité du matériel particulaire piégé durant la crue.

La comparaison de la marge haute des volumes dragués avec les volumes piégés implique l'intervention dans le bilan d'une source importante de matériel particulaire (115 800 t à 63 300 t) afin d'expliquer la quantité de matériel dragué. En l'état de nos connaissances la seule source de matériel particulaire susceptible de disposer d'une telle quantité de matériel particulaire est le bouchon vaseux (400 000 t au maximum -Avoine, 1981).

Si ce bilan s'avérait exact, les dépôts de matériel particulaire fin dans le port de Rouen, issus de remontées depuis le bouchon durant l'étiage, représenteraient entre 50 % et 100 % de la masse de matériel particulaire piégé durant les crues dans les infrastructures portuaires.

Les relargages de fin de crue (1 à 3 % du matériel arrivant en crue) ne représentent que 5 250 t à 15 750 t sur l'année. Ces relargages se poursuivent en fin de crue comme en témoigne la diminution des niveaux de matériel particulaire déposé sur la vasière de Oissel.

VI.4.2 - Le transfert particulaire durant l'étiage

Le flux de matériel particulaire arrivant dans l'estuaire amont durant l'étiage est difficile à estimer du fait de la présence de courants alternatifs, des hétérogénéités spatiales, de la méconnaissance partielle de la production biologique intra-estuarienne et de l'impossibilité de quantifier directement les remontées particulières depuis l'estuaire aval. Toutefois, les grandes lignes de ce transfert particulaire peuvent être dressées.

VI.4.2.1 - Variation des volumes d'eau et des temps de renouvellement

L'accroissement du niveau des basses mers en période de vives-eaux engendre, en amont du point caractéristique, une augmentation du volume total d'eau dans l'estuaire par rapport au volume d'eau présent au cours des mortes-eaux ; l'estuaire amont se remplit.

Cette augmentation du volume d'eau en vives-eaux entraîne un accroissement du temps de résidence des masses d'eaux dans l'estuaire amont durant cette période. La masse d'eau fluviale pénétrant dans l'estuaire amont au cours des transitions vives-eaux/mortes-eaux se trouve donc temporairement ralentie et en partie stockée.

Les particules en suspension au cours de cette période subissent, elles aussi ces effets de ralentissement du transit, leur temps de résidence dans l'estuaire amont s'en trouve accru.

VI.4.2.2 - Cycles semi-diurnes et transports horizontaux

Les suivis en continu des concentrations à poste fixe, montrent des transports horizontaux bidirectionnels de matériel particulaire en suspension, au cours des marées, dont l'origine se situe au niveau des sources intra-estuariennes de matériel particulaire déposé. Ces sources peuvent être éloignées de plusieurs kilomètres du site de mesure. Ce transport en suspension témoigne de la possibilité de migration sur de longues distances (>10 km) dans l'estuaire amont, de matériel fin en suspension.

Les mesures de radioéléments ^{60}Co et ^{137}Cs montrent que les transports horizontaux de matériel particulaire ne se cantonnent pas à des migrations au sein de l'estuaire amont mais que des échanges avec l'estuaire moyen se produisent. Des remontées de matériel particulaire ayant été en contact avec le milieu marin peuvent se produire dans l'estuaire amont.

Sur la rivière Demerara (Guyana), des remontées de matériel particulaire en suspension ont été montrées sur une vingtaine de kilomètres à l'amont de la limite de salinité des eaux (Demerara Coastal Investigation, 1962 *in* Postma, 1967). Ces remontées sont expliquées par la « diffusion » du matériel particulaire fin depuis la zone saline du maximum de turbidité vers la partie fluviale de l'estuaire. Cette diffusion, influencée par la marée, se fait contre le courant résiduel. Postma, 1967, émet l'hypothèse que du matériel particulaire est transporté vers l'amont par les courants de flot et sédimente temporairement durant le jusant puis est de nouveau transporté vers l'amont par le flot suivant. La limite de ce phénomène étant la limite d'inversion des marées.

Le phénomène observé sur la rivière Demerara est à rapprocher des observations effectuées sur l'estuaire de la Tamar (Grande Bretagne) par Uncles and Stephens, 1993. Dans cet estuaire, long d'une trentaine de kilomètres, des remontées et des dépôts de matériel particulaire en suspension sont observés 1 à 3 km à l'amont de la limite de salinité. Ces remontées se produisent après une longue période d'étiage et plus particulièrement durant les vives-eaux. Le matériel transporté vers l'amont est issu du maximum de turbidité (associé au gradient de salinité). L'accélération des vitesses au cours du jusant provoque l'érosion de ces dépôts et génère un second maximum de turbidité. Ces remontées sont expliquées par la conjonction de l'asymétrie de la marée et des phénomènes de latence qui engendrent le phénomène de pompage tidal (« tidal pumping »).

Dans l'estuaire de la Gironde (France), durant l'étiage, plus que de simples remontées de matériel particulaire en suspension, c'est une remontée du bouchon vaseux, jusque 40 km en amont de la limite d'intrusion saline, qui est observée (Castaing, 1981). L'hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène se base la théorie du point nodal de marée dynamique.

A partir des mécanismes d'hypersynchronie et d'asymétrie de la marée Allen *et al.*, 1980, émettent l'hypothèse de l'existence du point nodal de marée dynamique. Dans les estuaires, ne présentant pas de stratification saline importante, il existe un lieu à partir duquel les vitesses de flot deviennent inférieures aux vitesses de jusant suite à l'atténuation de l'onde de marée. En amont de ce point, le transport particulaire net, sous dominante fluviale est dirigé vers l'aval. En aval de ce point le transport particulaire, sous la domination de la marée est orienté vers l'amont (Figure 128). Ce lieu, appelé point nodal de marée dynamique, constituerait un site de piégeage du sédiment et serait généralement situé en amont du point nodal de salinité ; sa localisation dépendant fortement du débit fluvial.

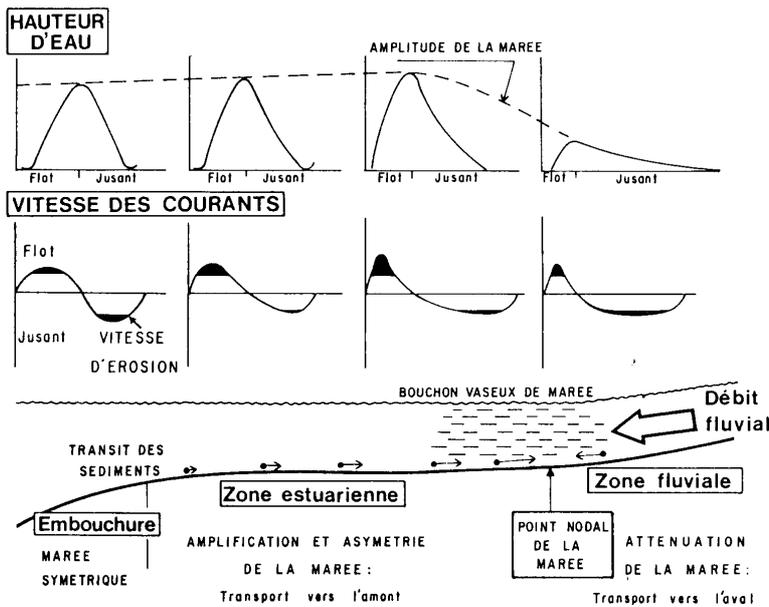


Figure 128 : Schéma théorique du transport des sédiments fins en suspension sous l'effet de la marée et piégeage de ce matériel particulaire dans un estuaire macrotidal à marée asymétrique et à faible gradient de salinité (Allen et al., 1980, modifié).

Cette théorie du point nodal de marée permet à Allen *et al.*, 1980, d'expliquer l'extension du bouchon vaseux de la Gironde en période d'étiage jusqu'à 40 km à l'amont de la limite de salinité. Ce point nodal de marée constitue la limite théorique du pompage tidal.

Salomon and Allen, 1983, reproduisent par simulation numérique l'hypothèse de piégeage de matériel particulaire au niveau du point nodal de marée sur des estuaires théoriques hyposynchrones et hypersynchrones mais précisent que ce schéma de transport ne reste qu'une hypothèse.

En aval immédiat de l'agglomération rouennaise, entre Duclair et Rouen, une hypersynchronie se développe. Selon Avoine *et al.*, 1981, c'est dans ce secteur, entre les pk 250,00 et 260,00, que les vitesses maximales de flot deviennent égales aux vitesses maximales de jusant. Cette partie de l'estuaire amont correspond donc théoriquement à la zone d'apparition d'un point nodal de marée dynamique.

Les mesures de flux particulières, durant des cycles de marées semi-diurnes de vives-eaux dans ce secteur, montrent un transport de particules de l'aval vers l'amont, ce qui correspond au résultat attendu dans la théorie du point nodal de marée. Durant le déchet ce transport aval/amont disparaît, laissant place à un transport de particules de l'amont vers l'aval de l'estuaire. Bien que l'hypersynchronie soit toujours présente durant la transition vives-eaux/mortes-eaux, l'asymétrie flot/jusant s'estompe et les vitesses de courants de flot deviennent inférieures à celles de jusant ce qui permet l'expulsion du matériel particulaire vers l'aval.

Dans l'estuaire amont de la Seine, les remontées particulières sont le résultat de la conjonction du « pompage tidal » local et de piégeage des particules dans des zones transitoires de dépôts (intérieur des méandres, zones temporaires de dépôt le long des rives). De petites quantités de matériel particulaire d'origine marine en suspension remontent l'estuaire en période d'étiage à la faveur des vives-eaux par une série de « bonds » successifs entre les zones de dépôts

Outre ces remontées de particules constatées à l'échelle locale, ce « pompage tidal » a pour conséquence, à l'échelle de la section de Seine, un arrêt du transport des particules en suspension vers l'aval en période de vives-eaux sur certains sites, ce qui, en théorie, engendrerait une augmentation des concentrations pondérales de MES dans le secteur concerné. Faute de campagne de mesure de flux durant

le revif et les mortes-eaux il est difficile de déterminer à partir de quelles conditions hydrologiques d'étiage ce phénomène de transport aval/amont et cet arrêt du transport particulaire se développent et, par conséquent, d'en déterminer la durée. Il est de même difficile de dire si cet arrêt du transport particulaire à l'échelle du cycle de marée touche l'ensemble de l'estuaire amont ou s'il se localise uniquement dans le secteur de La Bouille (pk 260,00).

La présence dans les suspensions sur le site de La Bouille (pk 260,00) de matériel particulaire d'origine marine montre que des remontées de particule de l'estuaire aval jusqu'aux environs du Port de Rouen sont possibles.

VI.4.2.3 - Le transport particulaire en étiage

A partir des résultats précédents un schéma du transport particulaire résiduel entre l'estuaire amont et l'estuaire moyen à l'échelle semi-lunaire peut-être proposé (Figure 129).

Au cours des périodes de vives-eaux, l'écoulement des masses d'eau fluviales et le transport des particules en suspension vers l'estuaire moyen est ralenti du fait de l'accroissement du volume d'eau présent dans l'estuaire.

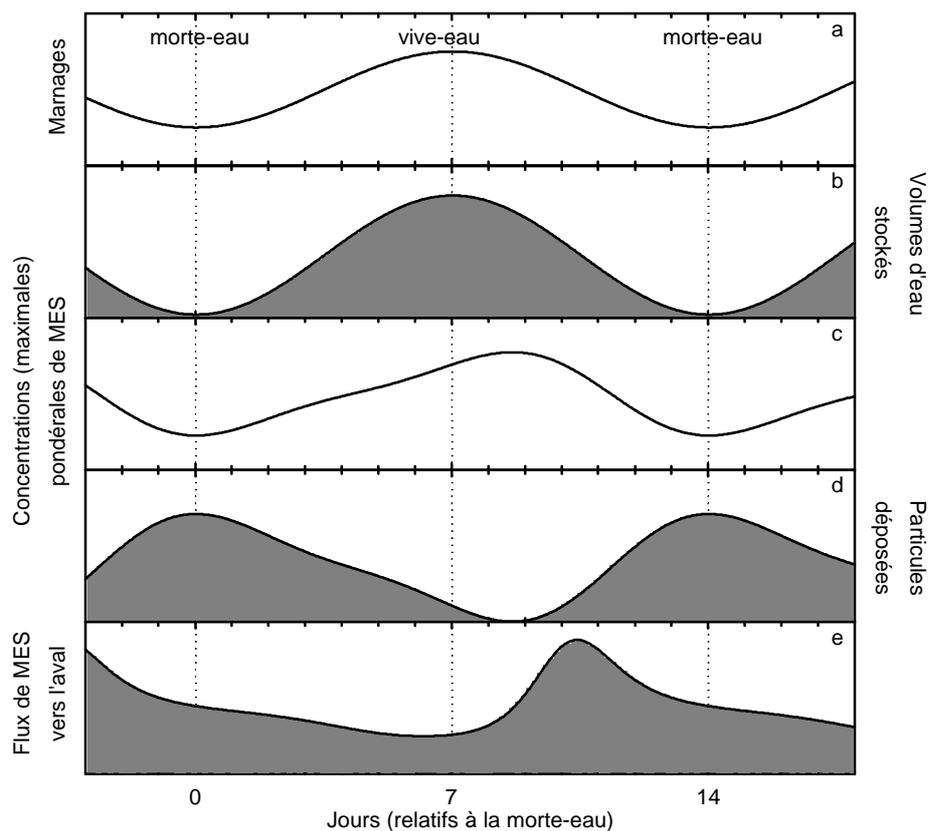


Figure 129 : Schéma conceptuel du transfert particulaire en étiage, à l'échelle des cycles vives-eaux/mortes-eaux dans l'estuaire amont à l'aval de Rouen.

Parallèlement à ce phénomène, les forts courants de marée engendrent un accroissement des concentrations pondérales particulaires en suspension. Le phénomène de « pompage tidal » stoppe localement le transit des particules en suspension vers l'aval.

En fin de vives-eaux, alors que les concentrations particulières en suspension sont au plus fort et que le niveau des basses mers diminue, le transport du matériel particulaire en suspension vers l'estuaire moyen est à son maximum. Cette période de transport maximal est de courte durée du fait que lors des mortes-eaux, une partie des particules en suspension se dépose. Les particules ainsi déposées ne peuvent être transportées vers la zone du maximum de turbidité que lors des vives eaux suivantes.

VI.4.2.4 - Quantification des bilans particuliers d'étiage

Sur la base de la répartition annuelle des arrivées du matériel particulaire au barrage de Poses (25 % de l'apport annuel) et en se basant sur les expulsions de matériel particulaire de l'estuaire amont en tout début de crue, une évaluation des conséquences des mécanismes hydrosédimentaires d'étiage sur le bilan de transfert estuaire amont/estuaire aval peut être tentée.

En début de première crue annuelle, il passe une quantité plus importante de matériel particulaire en suspension au niveau du site de Rouen, qu'il n'en arrive au barrage Poses (pk 202,00). Ce matériel est issu de l'expulsion du tronçon, barrage de Poses-Rouen, du matériel particulaire retenu en amont de Rouen par les mécanismes hydrosédimentaires d'étiage. Il est difficile d'estimer le pourcentage de ce matériel par rapport au matériel arrivant au barrage de Poses (pk 202,00) durant la même période dans la mesure où ces deux quantités de matériel sont indépendantes. La quantité de matériel arrivant au barrage de Poses en début de crue est fonction de l'hystérésis de crue et la quantité de matériel présent dans le tronçon barrage de Poses-Rouen est, elle, fonction de l'historique hydrosédimentaire de l'étiage.

Toutefois, sur la base des calculs réalisés sur les premières crues 1996-1997 (12/11/96 au 07/01/97) et 1997-1998 (16/11/97 au 31/12/97), ces expulsions représentent respectivement 28 100 t et 14 400 t à comparer aux 449 000 t des périodes de crue de 1996-1997 et aux 269 200 t de celles de 1997-1998. C'est à dire environ 5 % du matériel arrivant durant la totalité des crues. Pour une crue moyenne de 575 000 t ces 5 % représentent 26 250 t.

A partir de cette estimation, une évaluation de la quantité de matériel particulaire retenue dans l'estuaire amont peut être tentée. Durant l'étiage, entre le barrage de Poses et Rouen (soit sur 40 km environs) 26 250 t de matériel particulaire étaient présentes en extrapolant cette valeur au tronçon entre Rouen et Caudebec-en-Caux (soit 70 km environ) il est possible d'approcher la quantité de matériel particulaire présent dans l'estuaire amont en étiage. Cette quantité est d'environ 72 200 tonnes, c'est à dire environ 40 % du flux particulaire d'étiage.

Cette estimation grossière montre que 40 % du flux particulaire d'étiage (10 % du flux particulaire annuel) n'atteint pas l'estuaire aval durant les 9 à 10 mois d'étiage. Ce n'est que lors des premiers jours de la crue que ce matériel particulaire atteint le bouchon vaseux.

Les autres 60 % du flux particulaire d'étiage (15 % du flux annuel) atteindrait l'estuaire aval durant les 9 à 10 mois d'étiage avec des oscillations liées aux cycles vives-eaux/mortes-eaux.

VI.4.3 - Conclusions

Les mécanismes de transfert particulaire, en crue comme en étiage, remettent en question le concept selon lequel l'ensemble du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire par le fleuve est transporté intégralement et rapidement jusqu'au bouchon vaseux. Selon ce concept, sur l'année, la répartition des flux arrivant au barrage de Poses (pk 202,00) est de 75 % durant le 2 à 3 mois de crue contre 25 % en

étiage (Figure 130-a). Ce qui représente sur la base de 700 000 tonnes annuelles de matériel particulaire arrivant au barrage de Poses (pk 202,00), 525 000 t pour la crue et 175 000 t pour l'étiage.

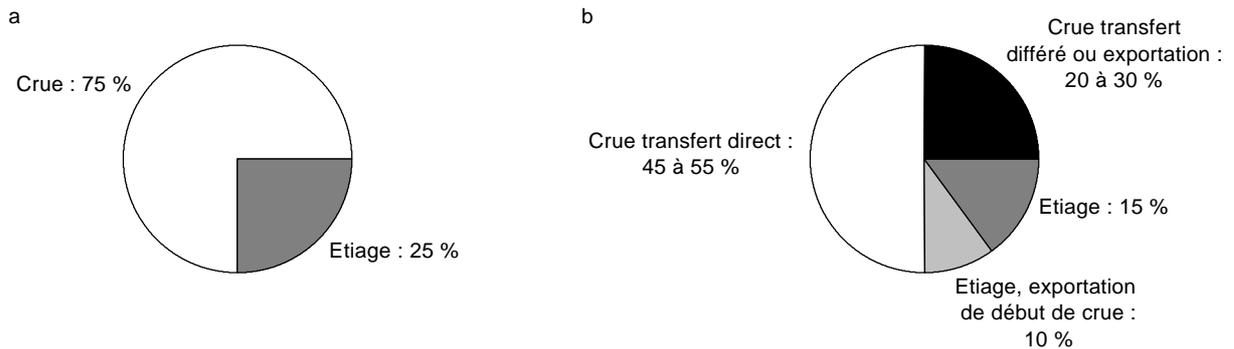


Figure 130 : Répartition annuelle des flux de matériel particulaire arrivant au bouchon vaseux (a) ancien bilan, (b) nouveau bilan.

A partir des données recueillies durant cette étude une recomposition de ce bilan annuel peut être proposée. Ce bilan est incomplet du fait de la méconnaissance de l'importance d'un certain nombre de phénomènes et notamment des remontées de matériel particulaire depuis l'estuaire et l'aval et de la production biologique intra-estuarienne durant l'étiage (Figure 130-b).

Un schéma des évolutions des concentrations pondérales de MES en entrée d'estuaire et dans l'estuaire permet de visualiser les différences de concentrations induites par les variations annuelles les différents mécanismes hydrosédimentaires intra-estuarien (Figure 131).

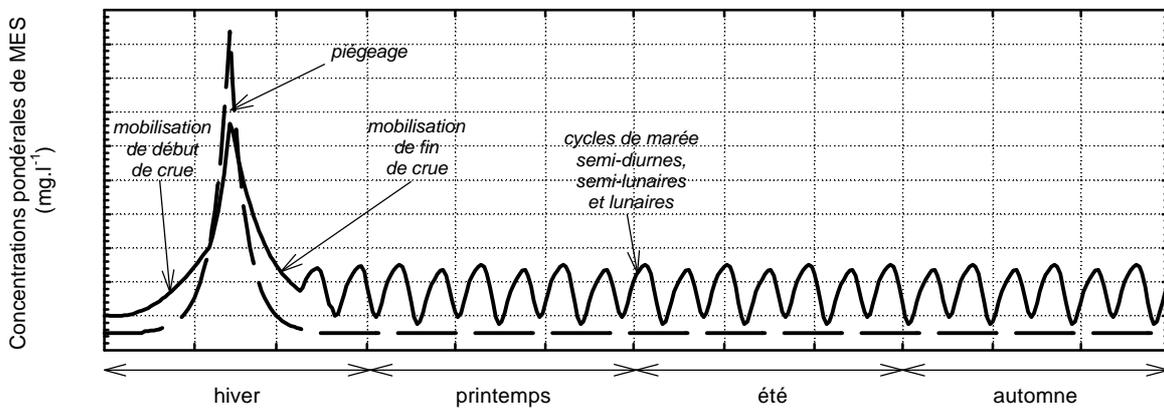


Figure 131 : Schéma comparatif de l'évolution annuelle des concentrations pondérales de MES dans la partie continentale (—) et dans l'estuaire amont d'un fleuve (— -).

La traduction de ce schéma de variation de concentrations pondérales de MES en schéma de transfert des flux particuliers à l'échelle annuelles (Figure 132) est délicat. Les transferts de matériel particulaire au sein de l'estuaire durant l'étiage n'ont pu être quantifiés et les mécanismes proposés pour ce transfert reposent sur l'hypothèse d'un transport amont aval par impulsions sans prendre en compte la possibilité de remontées de matériel particulaire depuis l'aval.

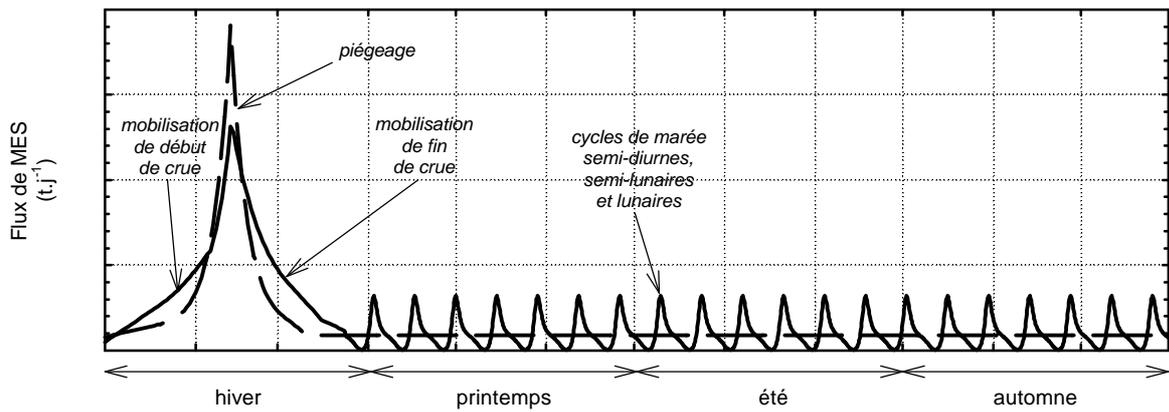


Figure 132 : Schéma comparatif de l'évolution annuelle des flux de matériel particulaire dans la partie continentale (—) et dans l'estuaire amont d'un fleuve (— -).

Ce schéma constitue donc une base de réflexion sur les différences de transfert particulaire entre le fleuve et l'estuaire amont mais ne rend pas compte des transferts particuliers entre l'estuaire amont et l'estuaire moyen qui restent, faute de quantification, inconnus.

Conclusion générale

Les estuaires sont des interfaces complexes et des lieux d'échanges privilégiés entre milieux marin et continental. Dans ce contexte, les études sont nombreuses mais se sont peu intéressées à la zone estuarienne soumise uniquement à l'incursion de la marée, sans intrusion saline. Dans ce secteur estuarien, le transfert en suspension du matériel particulaire est considéré comme étant généralement dominé par le régime fluvial.

L'objectif principal des travaux, entrepris durant ces 3 années, est d'analyser l'impact réel des marées sur le transfert fluvial dans ces zones estuariennes amont. La Seine constitue, à ce titre, un site atelier de choix du fait de son faible débit et du caractère macrotidal de son estuaire. Le secteur amont de son estuaire, long de 120 km, présente plusieurs méandres et est fortement aménagé. L'estuaire est limité à l'amont par un barrage qui fixe la frontière avec le domaine strictement fluvial. Dans ce système estuarien, l'analyse du transfert du matériel particulaire fin en suspension prend en compte les problèmes morphologiques et leurs fluctuations temporelles aux différentes échelles des cycles hydrologiques.

La présence de courants de marée alternatifs dans l'estuaire amont de la Seine engendre une forte variabilité des paramètres hydrosédimentaires tant d'un point de vue spatial que d'un point de vue temporel. Les variations semi-diurnes mais aussi semi-lunaires et lunaires des courants rendent complexe l'interprétation des mesures ponctuelles réalisées dans un tel contexte.

Ces mesures ne trouvent de signification qu'au travers de chroniques s'appuyant sur les unités de base temporelles que sont les cycles semi-diurnes de marée et spatiales que sont les sections transversales de Seine.

La difficulté technique de la prise en compte des hétérogénéités spatiales et leur dépendance vis-à-vis des variations temporelles nous amène à recommander en premier lieu d'axer toute stratégie d'étude dans les estuaires amont sur le cycle de marée. Les résultats de ces études sur le cycle de marée doivent être interprétés en regard de l'historique des conditions hydrologiques et plus particulièrement en regard de la position du cycle étudié dans le cycle de marée semi-lunaire et dans le cycle saisonnier crue/étiage.

Pour la mise en place d'un suivi sur le long terme d'un paramètre, la solution idéale est l'utilisation d'un système de mesure en continu permettant d'appréhender les différentes échelles temporelles de variations de ce paramètre. Toutefois, les contraintes techniques, engendrées par une telle solution ou simplement l'absence d'instruments de mesure adaptés, peuvent nécessiter un suivi plus classique, basé sur des échantillonnages ponctuels. Dans un tel cas, le plan d'échantillonnage doit être réalisé de sorte que les prélèvements aient lieu, pour un site donné, toujours dans les mêmes conditions de marée.

L'approche des hétérogénéités spatiales nécessite la mise en œuvre de moyens plus importants mais est la seule susceptible de fournir une information sur le sens et les quantités de matériel particulaire transportées dans les zones amont des estuaires macrotidaux.

Pour le cas de la Seine, la division d'une section transversale en un minimum de 4 mailles apparaît à nos yeux comme la meilleure solution pour appréhender les phénomènes spécifiques rencontrés au niveau des berges (mesures sur les deux mailles latérales). Ce système à 4 mailles permet d'étendre l'influence des phénomènes se développant près des berges, plus à l'intérieur du chenal de navigation (2 mailles centrales). Ce découpage est d'autant plus nécessaire que de nombreuses sections présentent des hétérogénéités spatiales très marquées (méandres).

Cette division de la Seine en 4 boîtes afin de prendre en compte les hétérogénéités spatiales et de leurs conséquences sur le transfert particulaire, nous paraît être nécessaire dans le cadre d'une modélisation des transferts particuliers au sein de l'estuaire amont.

L'existence d'hétérogénéités spatiales et d'hétérogénéités temporelles nécessite la multiplication des mesures de flux sur la section transversale afin d'établir des bilans d'échanges entre le domaine continental et le domaine marin. Les mesures de terrain ne peuvent suffire à l'établissement de ces bilans.

Seul, un modèle numérique, susceptible de bien reproduire les conditions hydrologiques et morphologiques (bassins et souilles, les méandres, berges et zones intertidales) de l'estuaire amont, permettra de dresser de tels bilans.

Modification des transferts particuliers

Le régime macrotidal de l'estuaire de Seine a des conséquences importantes sur le transfert particulaire dans l'estuaire fluvial au cours de la période d'étiage. Les comportements des particules en suspension sont proches de ceux observés dans la zone de mélange des estuaires macrotidaux avec des cycles de marée semi-diurnes et bimensuels qui entraînent l'apparition de cycles d'érosion/sédimentation. Ces cycles ont des conséquences sur les temps de résidence des particules en suspension dans la zone amont de l'estuaire. Différents mécanismes se combinent pour modifier le transport particulaire dans ce secteur estuarien par rapport au domaine fluvial :

- a – En période de vives-eaux, l'accroissement du niveau des basses mers dans l'estuaire amont provoque un remplissage de ce dernier. Ceci a pour conséquence une augmentation du temps de résidence des masses d'eaux et des particules dans ce secteur estuarien.
- b – Les cycles d'érosion/dépôt au cours des périodes de vives-eaux/mortes-eaux démontrent l'existence d'un dépôt de particules dans l'estuaire amont au cours des périodes de mortes-eaux. Durant ces périodes de dépôt, l'évacuation des particules de l'estuaire amont se trouve interrompue. Le temps de résidence des particules est donc accru. La durée de ce dépôt, inférieure au demi-cycle lunaire bimensuel, ne permet probablement pas sa consolidation dans de nombreux secteurs du fait des courants semi-diurnes de marée et de la forte pression de la navigation.
- c – Les fortes vives-eaux permettent la remise en suspension d'une partie des particules sédimentées au niveau des quelques zones de dépôts consolidés de l'estuaire amont et les rendent ainsi disponibles pour un transport vers l'aval. Durant ces périodes de fortes vives-eaux, la population particulaire en suspension (particules jamais déposées et particules issues du dépôt temporaire de mortes-eaux) s'enrichit de particules dont les propriétés physiques, chimiques et biologiques sont probablement modifiées du fait de leur phase de dépôt et de consolidation.

En fin de vives-eaux, lorsque les concentrations particulières en suspension sont à leur maximum et que l'estuaire se vide de son « excès » d'eau accumulé lors des vives-eaux, le transport des particules en suspension vers l'estuaire moyen est à son maximum. Durant la période d'étiage, l'estuaire moyen reçoit donc des flux particuliers de l'estuaire amont sous la forme d'impulsions dont la périodicité est celle des cycles vives-eaux/mortes-eaux.

La valeur de débit fluvial de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ apparaît comme une valeur charnière dans le système estuarien amont de la Seine. En deçà de cette valeur, les processus hydrosédimentaires liés à la marée se mettent en place. Au-delà de cette valeur, bien que les effets de marée soient toujours présents, les phénomènes fluviaux dominent le transfert particulaire dans l'estuaire amont.

Durant les crues, une partie importante du matériel particulaire arrivant dans l'estuaire n'atteint pas immédiatement l'estuaire aval mais se trouve immobilisée temporairement ou définitivement au sein de l'estuaire amont.

L'accroissement des débits provoque une augmentation des hauteurs d'eau et une diminution de l'intensité et de la durée des courants de flot qui peuvent disparaître lors des très forts débits ou des faibles coefficients.

En tout début de crue, tout comme durant les petites crues estivales, ces augmentations du débit fluvial provoquent une chasse de l'estuaire amont vers l'estuaire aval du matériel particulaire qui s'y trouvait retenu par les phénomènes hydrodynamiques d'étiage.

L'augmentation des hauteurs d'eau, doublée de la diminution voire la disparition des courants bidirectionnels de marée, permet aux zones intertidales localisées en amont de Rouen de se transformer en zones inondables propices au dépôt d'une partie du matériel particulaire transporté en suspension par la crue. En aval de Rouen, une observation semblable a été réalisée sur une vasière à proximité du Trait (pk 300,00). Toutefois, compte tenu de l'important endiguement en aval de Rouen, le nombre de zones susceptibles de jouer le rôle de zone de dépôts de matériel particulaire de crue est réduit. Dans ce secteur, seules les rives convexes des méandres constituent des sites de dépôts de matériel particulaire de crue.

Impact de la morphologie sur la dynamique sédimentaire

Les mécanismes hydrosédimentaires de crue et d'étiage montrent l'importance des facteurs hydrologiques dans le transfert particulaire au sein de l'estuaire amont. Toutefois, en crue, comme en étiage, cette importance est fortement conditionnée par la morphologie du chenal.

En étiage, les rives convexes de méandres, certaines berges et une partie des aménagements portuaires, jouent le rôle de piège et permettent au matériel particulaire fin en suspension de sédimenter durant les périodes de faible compétence des courants (étale de pleine mer, mortes-eaux).

Ces dépôts sont susceptibles d'être érodés et remis en suspension dans la masse d'eau lors des périodes de plus forts courants (renverses de courants, vives-eaux). Durant ces périodes l'augmentation des vitesses de courants engendre un pompage tidal local dont le résultat est un transport de matériel particulaire vers l'amont de l'estuaire.

En crue, la compétence des courants de marée de flot se trouve diminuée. L'augmentation des niveaux de basse mer et de pleine mer permet l'immersion durant plusieurs jours de zones intertidales qui deviennent d'importantes zones de dépôts d'une partie du matériel fin transporté par la crue. Les zones de dépôts de matériel particulaire fin, identifiées durant l'étiage, jouent, elles aussi, un rôle de piégeage d'une partie de ce matériel fin bien que seule la contribution des infrastructures portuaires rouennaises ait été clairement identifiée. Il est probable que durant ces crues, les méandres constituent eux aussi d'importantes zones de dépôts de matériel particulaire fin, bien qu'ils n'aient pour l'heure pas été étudiés.

La diminution du débit fluvial permet le rétablissement de courants alternatifs de marée et la remise en circulation dans le système estuarien d'une partie de ces dépôts de crue.

L'estuaire amont de Seine, par son caractère macrotidal, possède des particularités hydrologiques qui se traduisent notamment par un retard du transfert particulaire entre le fleuve et l'estuaire aval.

Ces retards s'expriment, à l'échelle semi-lunaire, par des stockages d'eau et de matériel particulaire durant les périodes de revif et par leur expulsion vers l'estuaire moyen durant le déchet. Ils se manifestent également, à l'échelle des cycles semi-diurnes, par l'apparition de flux résiduels aval/amont, issus essentiellement de l'action des courants alternatifs dans les méandres. Il apparaît ainsi que la présence de méandres est susceptible de renforcer les remontées, au sein de l'estuaire amont, de matériel particulaire provenant dans l'estuaire moyen.

D'autre part, la morphologie de certaines berges inondables et l'existence de bassins et de souilles présentant des capacités de stockages temporaires ou définitifs, sont également des facteurs déterminant du transfert retardé des matériaux durant les périodes de crue.

Dans ces transferts particuliers, les travaux de dragage ont une double influence. Ils sont responsables d'une diminution des flux particuliers arrivant à l'estuaire moyen, du fait du stockage à terre du matériel dragué dans les infrastructures portuaires. De plus, les dragages d'entretien de la profondeur du chenal de navigation permettent un maintien des conditions particulières de marée et participent ainsi à la continuité des remontées particulières précédemment évoquées.

Les études, menées dans le cadre du Programme Scientifique Seine-Aval, montrent que certains éléments ont de très fortes affinités pour le matériel particulaire en suspension : contaminants métalliques (Cd), organiques (PCB), micro-organismes (bactéries nitrifiantes). Les facteurs du transit particulaire, précédemment énoncés, s'appliquent au transfert de ces contaminants depuis leur entrée en amont de l'estuaire jusqu'à la zone du bouchon vaseux.

Au-delà des mécanismes généraux du transfert particulaire, évoqués précédemment, notre étude montre également l'existence de fluctuations qualitatives du matériel en suspension. Cette fluctuation s'exprime à l'échelle semi-diurne par la ségrégation des particules dans la colonne d'eau en fonction de leur capacité de décantation. Elle se traduit, à l'échelle des cycles crue/étiage par la présence de matériel particulaire en suspension de nature et de vitesses de chute moyennes différentes. Or, les études géochimiques et microbiologiques réalisées, tant en estuaire de Seine que dans d'autres types de milieux continentaux ou marins, montrent une affinité différente des contaminants en fonction de la nature du vecteur particulaire.

Par conséquent, afin de modéliser le transfert des flux de contaminants entre le fleuve et le bouchon vaseux, il sera nécessaire d'associer les mécanismes globaux générant des retards de transfert particulaire tant en crue qu'en étiage et les notions de fluctuation de la nature des matériaux en suspension à ces mêmes échelles de temps.

Références Bibliographiques

A

- Akopian, M., Garnier, J., Pourriot, R., Phillippon, X. & Ficht, A. (1998) Dynamique du zooplancton dans l'estuaire. Impact sur le phytoplancton et conséquences dans le bilan d'oxygénation. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 97 - Edifice biologique, Vol. I* (Ed. by S. Seine-Aval), pp. 18-30. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).
- Allen, G. P., Castaing, P. & Klingebiel, A. (1974) Suspended sediment transport and deposition in the Gironde estuary and adjacent shelf. *Mémoires de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine*, **7**, 27-36.
- Allen, G. P., Salomon, J. P., Bassoulet, P., Du Penhoat, Y. & Granpré, C. (1980) Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentological Geology*, **26**, 69-90.
- Amoros, C. & Petts, G. E. (1993) *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, Paris, 300 pp.
- Aubrey, D. G. & Speer, P. E. (1985) A study of Non-linear Tidal Propagation in Shallow inlet/Estuarine Systems Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **21**, 185-205.
- Avoine, J. (1981) L'estuaire de la Seine : Sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Caen.
- Avoine, J. (1982) Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. *Mémoire de la Société Géologique de France*, **144**, 17-25.
- Avoine, J. (1985) Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. In: *La Baie de Seine - Fonctionnement, conséquences en matière d'environnement et d'utilisation de la mer, Vol. 2* (Ed. by GRECO Manche), pp. 61-68. CNRS, Université de Caen.
- Avoine, J., Allen, G. P., Nichols, M., Salomon, J. C. & Larssonneur, C. (1981) Suspended Sediment Transport in the Seine Estuary, France - Effect of Man-Made Modifications on Estuary-Shelf Sedimentology. *Marine Geology*, **40**, 119-137.
- Avoine, J., Boust, D. & Guillaud, J. F. (1986) Flux et comportements des contaminants dissous et particuliers de la Seine. *Rapp. P.-v. Réunion. Cons. int. Explor. MER*, **186**, 392-411.
- Avoine, J., Lesueur, P. & Rouault, T. (1996) Evolution morphologique et couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine - Actualisation et fluctuations. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 95 - Thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire, Vol. 2-20*. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).

B

- Bathurst, J. C. (1979) Distribution of boundary shear stress in rivers. In: *Adjustements of the fluvial system* (Ed. by D. D. Rhodes and G. P. William), pp. 95-116. Kendal Hunt Publishing Co, Dubuque.
- Beckinsale, R. P. (1969) River Regimes. In: *Water, Earth and Man* (Ed. by R. J. Chorley), pp. 455-472. Methuen, London.
- Black, K. S. (1997) Microbiological factors contributing the erosion resistance in natural cohesive sediments. In: *Cohesive Sediments* (Ed. by N. Burt, R. Parker and J. Watts), pp. 231-244. John Wiley & Sons Ltd, London.
- Blum, A. (1997) The distribution of macroflocs during a tidal cycle in the freshwater zone of the Seine estuary, France. Rapport. Christian-Albrechts-Universität, Kiel (Germany), Kiel.
- Bonnefille, R. (1968) *Cours d'hydraulique maritime*. Masson, Paris, 159 pp.
- Boon, J. D. & Byrne, R. J. (1981) On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, **40**(1/2), 27-48.
- Bourcart, J. & Francis-Boeuf, C. (1942) *La Vase*. Hermann & Cie, Paris, 67 pp.
- Boust, D. (1981) Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Caen.
- Boust, D. (1996) Utilisation des radionucléides naturels et artificiels pour l'étude et la quantification de processus hydrosédimentaires dans l'estuaire de la Seine. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 95 - Thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire* (Ed. by S. Seine-Aval), pp. 65-77. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).
- Boust, D. (1997) Etude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire de la Seine par l'analyse des radionucléides naturels et artificiels. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 96 - Thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire* (Ed. by S. Seine-Aval), pp. 158-178. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).
- Bravard, J. P. & Gilvear, D. J. (1993) Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes. In: *Hydrosystèmes fluviaux* (Ed. by C. Amoros and G. E. Petts), pp. 83-103. Masson, Paris.
- Brenon, I. (1997) Modélisation de la Dynamique des Sédiments Fins dans l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- Bull, L. J. (1997a) Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the river Severn, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**, 1109-1123.
- Bull, L. J. (1997b) Relative velocities of discharge and sediment waves for the River Severn, UK. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques*, **42**(5), 649-660.

C

- Castaing, P. (1981) Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes - Cas de la Gironde. Thèse de doctorat d'état ès Sciences, Université de Bordeaux I.
- Cluer, B. L. (1995) Cyclic Fluvial Processes and Bias in Environmental Monitoring, Colorado River in Grand Canyon. *The Journal of Geology*, **103**, 411-421.
- Colby, B. R. & Hembree, C. H. (1955) Computations of total sediment discharge, Niobrara River near Cody, Nebraska. *U.S. Geol. Surv. Wat. Supp. Pap.*, **1357**.
- Cossa, D., Meybeck, M., Idlafkih, Z. & Bombled, B. (1994) Etude pilote des apports en contaminants par la Seine. Rapport. Agence de l'Eau Seine Normandie, Ifremer, Ministère de l'Environnement.
- Couperthwaite, J. S., Bull, L. J., Lawler, D. M. & Harris, N. M. (1996) Downstream change in channel hydraulics and river bank erosion rates in the Upper Severn, UK. In: *Hydrologie dans les pays Celtiques* (Ed. by P. Merot and A. Jigurel). INRA, Paris.

D

- Davies, J. L. (1964) A morphogenic approach to world shorelines. *Zeit. Geomorph.*, **1**, 127-142.
- Defossez, J. P. (1996) Dynamique des macroflocs au cours de cycles tidaux (mise au point d'un système d'observation : VIL Video In Lab). Mémoire de DEA. Université de Lille, Lille.
- Degens, E. T., Kempe, S. & Richey, J. E. (1988) Summary: Biogeochemistry of Major World Rivers. In: *Biochemistry of Major World Rivers - SCOPE 42* (Ed. by E. T. Degens, S. Kempe and J. E. Richey), pp. 323-347. John Wiley & Sons Inc, New-York.
- Demerara Coastal Investigation. (1962) Report on siltation of Demerara Bar Channel and coastal erosion in British Guiana. Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands.
- Dionne, J. C. (1963) Vers une Définition plus adéquate de l'estuaire du Saint-Laurent. *Zeitschr. f. Geomorph.*, **7**(1), 36-44.
- Diplas, P. & Parker, G. (1992) Deposition and Removal of Fines in Gravel-Bed Streams. In: *Dynamics of gravel-bed Rivers* (Ed. by P. Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne and P. Tacconi), pp. 313-329. John Wiley & Sons Ltd, London.
- DRIRE. (1995) L'industrie et l'environnement en Haute-Normandie - Bilan 95. Rapport. Drire de Haute-Normandie, Rouen.
- Dronkers, J. (1986) Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, **20**(2-3), 117-131.

- Dupont, J. P. & David, F. (1980) Microgranulométrie des suspensions du bouchon vaseux. SAUM estuaire de la Seine, Rapport A - Eau et sédiments. SAUM.
- Dupont, J. P. & Lafite, R. (1985) Importance et rôle du matériel organique vivant et inerte dans les suspensions de la Baie de Seine. In: *La Baie de Seine - Fonctionnement, conséquences en matière d'environnement et d'utilisation de la mer, Vol. 2* (Ed. by GRECO Manche). CNRS, GRECO "Manche".
- Dupont, J. P. & Lesueur, P. (1998) Thème hydrodynamique et hydrosédimentaire. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 97 - Rapport final de synthèse par thème* (Ed. by S. Seine-Aval). Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).
- Dupont, J. P. (1997) Transferts particuliers 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.
- Dupont, J. P., Guézennec, L., Lafite, R., Dethleff, D., Huault, M. F., Wang, H. Q., Lacroix, M. & Meyer, R. (1996) Processus hydrosédimentaires de l'estuaire. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 95 - Thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire* (Ed. by P. S. Seine-Aval), pp. 33-64. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).
- Dupont, J. P., Lafite, R., Huault, M. F., Hommeril, P. & Meyer, R. (1994) Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (the Seine estuary, northwestern France). *Marine Geology*, **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. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **320**(II a), 961-968.
- Dussart, B. (1966) *Limnologie - L'étude des eaux continentales*. Gauthier-Villars, Paris, 622 pp.
- Duval, S. (1994) Les métaux lourds dans les produits de dragage du Port Autonome de Rouen - Caractéristiques et valorisation. Mémoire de DESS. Université de Rouen - Port Autonome de Rouen.
- Dyer, K. R. (1994) Estuarine sediment transport and deposition. In: *Sediment transport and depositional processes* (Ed. by P. K.), pp. 193-218. Blackwell Scientific publications, Oxford.

E

- Eisma, D. (1986) Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research*, **20**(2-3), 183-199.
- Eisma, D. (1993) *Suspended matter in the aquatic environment*. Springer-Verlag, Berlin, 315 pp.

F

- Fairbridge, R. W. (1980) The estuary : its definition and chemical role. In: *Chemistry and biochemistry of estuaries* (Ed. by E. O. I. Cato), pp. 1-35. John Willey and Sons, Chichester.
- Fleming, G., Asce, A. M. & Poodle, T. (1970) Particle size in river sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, 431-439.
- Friedrichs, G. T. & Aubrey, D. G. (1988) Non-linear tidal distorsion in shallow well-mixed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **27**, 521-546.

G

- Gallenne, B. (1974) Les accumulations turbides de l'estuaire de Loire. Etude de la "crème de vase". Thèse, Université de Nantes.
- Garnier, J., Leporcq, B., Akopian, M. & Ficht, A. (1997) Le phytoplancton et ses facteurs de contrôle dans l'estuaire de la Seine. Importance quantitative dans le bilan d'oxygénation. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 97 - Fonctionnement microbiologique et contrôle de l'oxygénation* (Ed. by S. Seine-Aval), pp. 45-74. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).
- Germaneau, J. (1969) Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Deuxième partie. Origine, déplacement et dépôt des suspensions. Travaux du Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques.
- Germaneau, J. (1971) Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Troisième partie. Origine des cortèges minéralogiques. Travaux du Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques.
- Gilvear, D. J. & Bravard, J. P. (1993) Dynamique fluviale. In: *Hydrosystèmes fluviaux* (Ed. by C. Amoros and G. E. Petts), pp. 59-82. Masson, Paris.
- Godin, G. (1985) Modification of River Tides by the Discharge. *Journal of Waterway, port, Coastal and Ocean Enginnering*, **111**(2), 257-274.
- Gouy, S. (1996) Bilan et impact des rejets urbains en Seine de l'agglomération rouennaise. Mémoire de DESS Environnement. Université de Caen - Université de Rouen.
- Grabemann, I., Uncles, R. J., Krause, G. & Stephens, J. A. (1997) Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **45**, 235-246.
- Grün, I. (1997) Etude de la couverture sédimentaire et des vasières entre Poses et Duclair. Mémoire de DEA. DEA 3GS Université de Lille, Lille.
- 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., Boust, D., Le Hir, P., Mouchel, J. M. & Olivier, C. (1998) Transferts saisonniers amont/aval et bilan des flux particuliers de MES au sein de l'estuaire amont de la Seine. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 97 - Thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire* (Ed. by S. Seine-Aval). Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).

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. *Journal de la Recherche Océanographique*, **21**(1-2), 53-58.

Guilcher, A. (1965) *Précis d'Hydrologie - Marine et continentale*. Masson, Paris, 389 pp.

H

Heidel, S. G. (1956) The Progressive Lag of Sediment Concentration with Flood Waves. *Transactions, American Geophysical Union*, **37**(1), 56-66.

HRS. (1981) The Severn estuary, silt monitoring April 1980-march 1981. Rapport. Hydraulics Research Station, Wallingford, England.

Huault, M. F. & Lefebvre, D. (1974) IV. Le Post-Würm - Le Postglaciaire de la Basse-Seine : Sédiments et chronostratigraphie. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **3-4**, 253-256.

Huault, M. F. (1989) Les diatomées holocènes de l'estuaire de la Seine au Havre (Seine-Maritime). Essai de reconstitution de l'évolution du milieu durant le subboréal et le subatlantique. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **1989**(1), 39-43.

J

Jay, D. A. & Flinchem, E. P. (1997) Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide: A demonstration of wavelet tidal analysis methods. *Journal of Geophysical Research*, **102**(C3), 5705-5720.

Jay, D. A., Geyer, W. R., Uncles, R. J., Vallino, J., Largier, J. & Boyton, W. R. (1997) A Review of Recent Developments in Estuarine Scalar Flux Estimation. *Estuaries*, **20**(2), 262-280.

Jeandel, C., Martin, J. M. & Thomas, A. J. (1980) Origine et comportements des isotopes du plutonium et du Césium 137 dans l'estuaire de Seine. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **291**, 125-128.

K

Krone, R. B. (1963) A study of rheologic properties of estuarial sediments. *Technical bulletin 7, Hydraulic engineering Laboratory and Sanitary*, 91.

Kurashige, Y. (1996) Process-based model of grain lifting from river bed to estimate suspended-sediment concentration in a small headwater basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 1163-1173.

L

Lafite, R. (1990) Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine marin macrotidal influencé par un estuaire : l'exemple de la baie de Seine orientale (France). Thèse de doctorat, Université de Rouen.

Lafite, R., Dupont, J. P. & Lamboy, M. (1986) Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en baie de Seine. In: *La Baie de Seine - Fonctionnement, conséquences en matière d'environnement et d'utilisation de la mer* (Ed. by GRECO Manche). CNRS, Université de Caen.

Lafite, R., Dupont, J. P., Desfossez, J. P., Guézennec, L. & Meyer, R. (1997) La floculation en Seine d'amont en aval. In: *Programme Scientifique Seine-Aval - Exercice 96 - Thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire* (Ed. by S. Seine-Aval), pp. 76-81. Secrétariat Seine-Aval, Mont-Saint-Aignan (France).

Larsonneur, C. (1971) Manche centrale et Baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse, Université de Caen.

Laval, D. (1955) Mesures de débit faites en Seine Maritime au cours de la crue de janvier 1955, combinaison de la crue et de la marée. *Mémoire et travaux de la société Hydrotechnique de France*, **I**, 57-63.

Le Blond, P. H. (1978) On tidal propagation in shallow rivers. *Journal of Geophysical Research*, **83**(C9), 4717-4721.

Le Floch, J. F. (1961) Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine Maritime. Thèse, Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques.

Le Guyader, F. (1989) Colonisation bactérienne et implantation de *E. coli* dans le sédiment d'origine littorale. Thèse de doctorat, Université de Rennes.

Lécolle, F. (1989) Le cours moyen de la Seine au Pleistocène moyen et supérieur - Géologie et préhistoire, pp. 549. Groupe Seine - CNRS, Caen.

Lefebvre, D., Huault, M. F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C. (1974) Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine : Synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **39**, 27-36.

Lesueur, P. (1992) Les vasières de la plate-forme Ouest-Gironde (France) : Modèle faciologique et archive sédimentaire des flux côtiers. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.

M

- Martin, J. M., Meybeck, M., Salvadori, F. & Thomas, A. (1976) Pollution chimique des estuaires : état actuel des connaissances. Centre National pour l'Exploitation des Océans, Rapports scientifiques et techniques N°22, 286 pp.
- Mc Lusky, D. (1993) Marine and Estuarine Gradients - An Overview. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, **27**(2-4), 489-493.
- Meybeck, M. & Idlafkih, Z. (1995) Etude des Flux polluants lors des crues de la Seine. Rapport. Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- Meybeck, M., Mouchel, J. M., Idlafkih, Z., Andreassian, V. & Thibert, S. (1998) Transferts d'eau, de matières dissoutes et particulaires dans le réseau fluvial. In: *La Seine en son bassin - Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé* (Ed. by M. Meybeck, G. De Marsily and E. Fustec), pp. 345-389. Elsevier, Paris.
- Milliman, J. D. (1981) Transfert of river-borne particule material to the oceans. In: *River Inputs to Ocean Systems* (Ed. by U. Nations), pp. 5-12. United Nations, New-York.

N

- Nichols, M. N. (1977) Response and recovery of an estuary following a river flood. *Journal of Sedimentary Petrologie*, **47**(3), 19-25.
- Noordhuis, R., Reeders, H. & Bij de Vaate, A. (1992) Filtration Rate and Pseudofaeces Production in Zebra Mussels and their Application in Water Quality Management. In: *The Zebra Mussel Dreissena polymorpha - Ecology, Biological Monitoring and First Applications in the Water Quality Management* (Ed. by D. Neumann and H. A. Jenner), pp. 101-114. Gustav Fischer, Stuttgart.

O

- Odum, W. E. (1988) Comparative ecology of tidal freshwater and salt marshes. *Annual Revue of Ecology and Systematics*, **19**, 147-176.
- Officer, C. B. (1981) Physical dynamics of estuarine suspended sediments. *Marine Geology*, **40**, 1-14.

P

- Pardé. (1943) Cours de potamologie - Ecole des Ingénieurs Hydrauliciens. , **1-2**.
- Parker, B. B. (1991) *Tidal Hydrodynamics*. John Wiley & Sons Inc, New York, 872 pp.

- Partheniades, E. (1965) Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Proceedings*, **91**(HY1), 105-139.
- Paterson, D. M. (1997) Biological mediation of sediment erodibility: ecology and physical dynamics. In: *Cohesive Sediments* (Ed. by N. Burt, R. Parker and J. Watts), pp. 215-229. John Wiley & Sons Ltd, London.
- Petts, G. E., Foulger, T. R., Gilvear, D. J., Pratts, J. D. & Thoms, M. C. (1985) Wave-movement and water-quality variations during a controlled release from Kielder Reservoir, North Tyne River, U.K. *Journal of Hydrology*, **80**, 371-389.
- Pommepeuy, M., Guillaud, J. F., Dupray, E., Derrien, A., Le Guyader, F. & Cormier, M. (1992) Enteric Bacteria Survival Factors. *Water Science and Technologie*, **15**(12), 93-103.
- Porcher, M. (1975) Lithostratigraphie et caractéristiques géotechniques des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. Rapport pour le diplôme d'ingénieur CNAM.
- Port Autonome de Rouen. (1992) Etude de l'envasement des souilles des quais céréaliers de la presqu'île Elie. Rapport. Port Autonome de Rouen, Rouen.
- Postma, H. (1967) Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: *Estuaries* (Ed. by G. H. Lauff), pp. 158-179. American Association for the Advancement of Science Publications, Washington D.C.
- Pritchard, D. W. (1967) What is an Estuary: Physical Viewpoint. In: *Estuaries, Vol. 83* (Ed. by G. H. Lauff), pp. 3-5. American association for Advancement of Science, Washington.

R

- Ragot, M. (1996) Etude des fonds de la Seine entre Villequier et Rouen. Mémoire de maîtrise. Université de Caen, Caen.
- Reid, I. & Frostick, L. E. (1994) Fluvial sediment transport and deposition. In: *Sediment Transport and Depositional Processes* (Ed. by K. Pye), pp. 89-155. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Réménérias, G. (1986) *Hydrologie de l'ingénieur*. Eyrolles, Paris, 460 pp.
- Riley, G. A. (1963) Organic aggregates in seawater and the dynamics of their formation and utilization. *Limnol Oceanogr*, **8**, 372-381.
- Roditi, H. A., Caraco, N. F., Cole, J. J. & Strayer, D. L. (1996) Filtration of Hudson River Water by the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*). *Estuaries*, **19**(4), 824-832.

S

- Salomon, J. C. & Allen, G. P. (1983) Rôle sédimentologique de la marée dans les estuaires à fort marnage. *Notes et mémoires de la Compagnie Française des Pétroles*, **18**, 35-44.
- Salomon, J. C. (1981) Modeling turbidity in the Seine estuary. In: *Echohydrodynamics. Proceedings of the 12th International Liege Colloquium in Ocean Hydrodynamics*, pp. 285-317, Liege.
- Salomon, J. C. (1988) Oceanographic Characteristics of the Seine Estuary. In: *Hydrodynamics of Estuaries, Vol. II - Estuarine Case Studies* (Ed. by B. Kjerfve), pp. 79-88. CRC Press inc., Boca Raton.
- Schuchardt, B. & Schrimmer, M. (1991) Phytoplankton Maxima in the Tidal Freshwater Reaches of Two Coastal Plain Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **32**, 187-206.
- Speer, P. E. & Aubrey, D. G. (1985) A study of Non-linear Tidal Propagation in Shallow inlet/Estuarine Systems Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **21**, 207-224.
- Sprung, M. & Rose, U. (1988) Influence of food size and food quantity on the feeding of the mussel *Dreissena polymorpha*. *Oecologica*, **77**, 556-532.

T

- The Open University. (1989) *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. Pergamon Press, 187 pp.

U

- Uncles, R. J. & Stephens, J. A. (1993) The Freshwater-Saltwater interface and its relationship to the turbidity maximum in the Tamar Estuary, United Kingdom. *Estuaries*, **16**, 126-141.
- Uncles, R. J. (1981) A Note on Tidal Asymmetry in the Severn Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **13**, 419-432.

V

- Van Leussen, W. (1994) Estuarine macroflocs and their role in fine grained sediment transport. Thèse, Université d'Utrecht.
- Verduin, J. (1956) Primary production in lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **1**(2), 445-473.
- Vigarié, A. (1964) Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine. Doctorat d'état - Thèse complémentaire, Université de Paris.

Vincx, M. & Meire, P. (1993) Marine and Estuarine Gradients (ECSA 21). In: *21th Symposium of the Estuarine and Coastal Sciences Association, Vol. 27* (Ed. by N. J. o. A. Ecology), pp. 496. Netherland Journal of Aquatic Ecology.

W

Walling, D. E. (1974) Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. In: *Fluvial processes in instrumented watershed, Vol. 6* (Ed. by K. J. Gregory and D. E. Walling), pp. 169-192. Institute British Geographers Special Publication.

Walling, D. E., Rowan, J. S. & Bradley, S. B. (1989) Sediment-associated transport and redistribution of Chernobyl fallout radionuclides. In: *Sediment and the Environment, Vol. 184* (Ed. by IAHS), pp. 37-45. IAHS, Baltimore.

Whickstead, J. H. (1976) *Marine Zooplankton*. Edward Arnold, London, 59 pp.

Annexes

a – Principales ondes composant l’onde de marée (d’après Bonnefille, 1968, modifié)

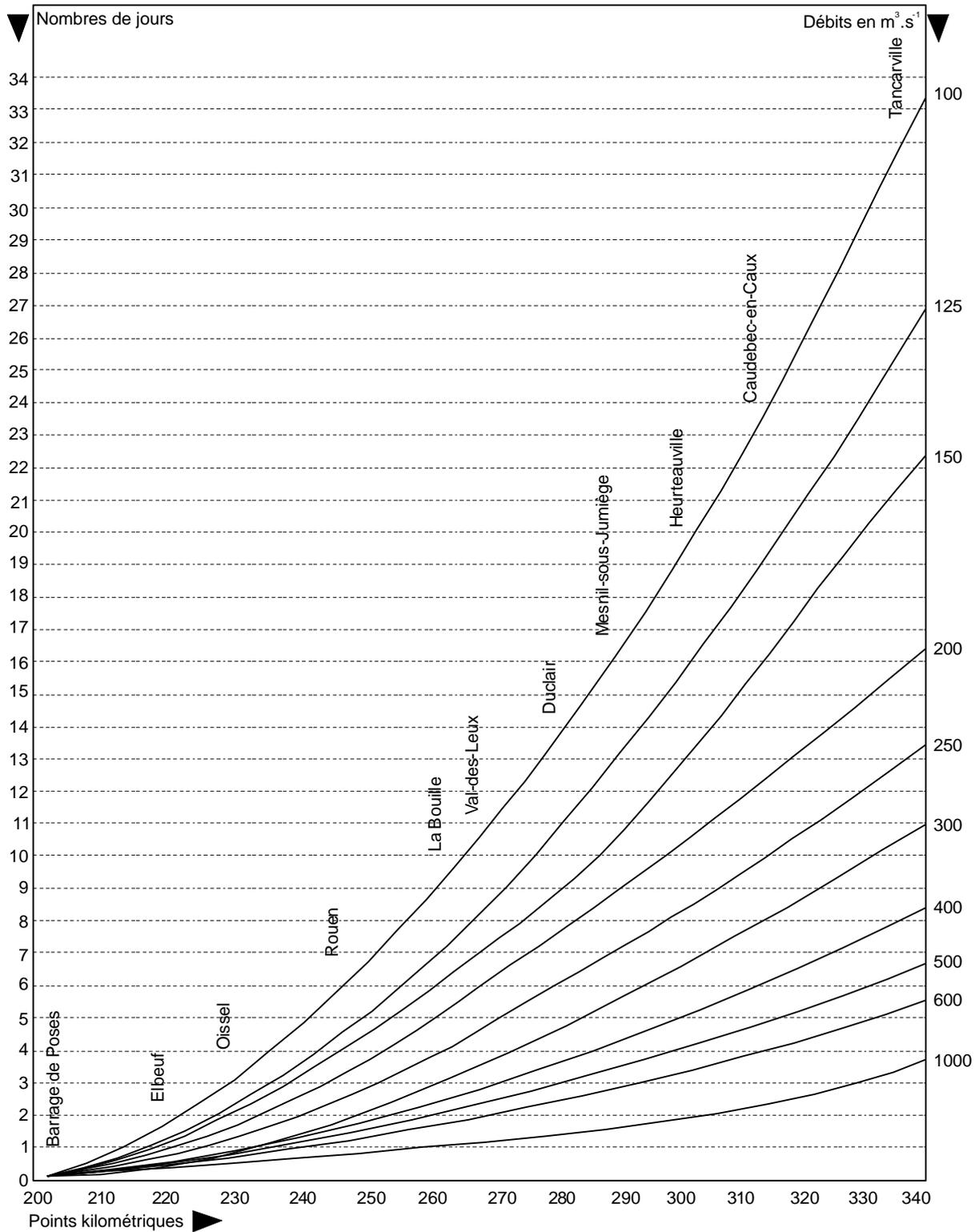
<i>Onde</i>	<i>Nature de l’onde</i>	<i>Période</i>
M_2	lunaire moyenne	12 h 420
N_2	elliptique majeure (lunaire)	12 h 658
S_2	solaire moyenne	12 h 000
T_2	elliptique majeure (solaire)	12 h 016
O_1	lunaire principale	25 h 819
P_1	solaire principale	24 h 065
K_1	déclinationnelle	23 h 934
M_b	bi-mensuelle	18 j 77
M_m	mensuelle	27 j 55

b – Dénomination et localisation des marégraphes du Port Autonome de Rouen

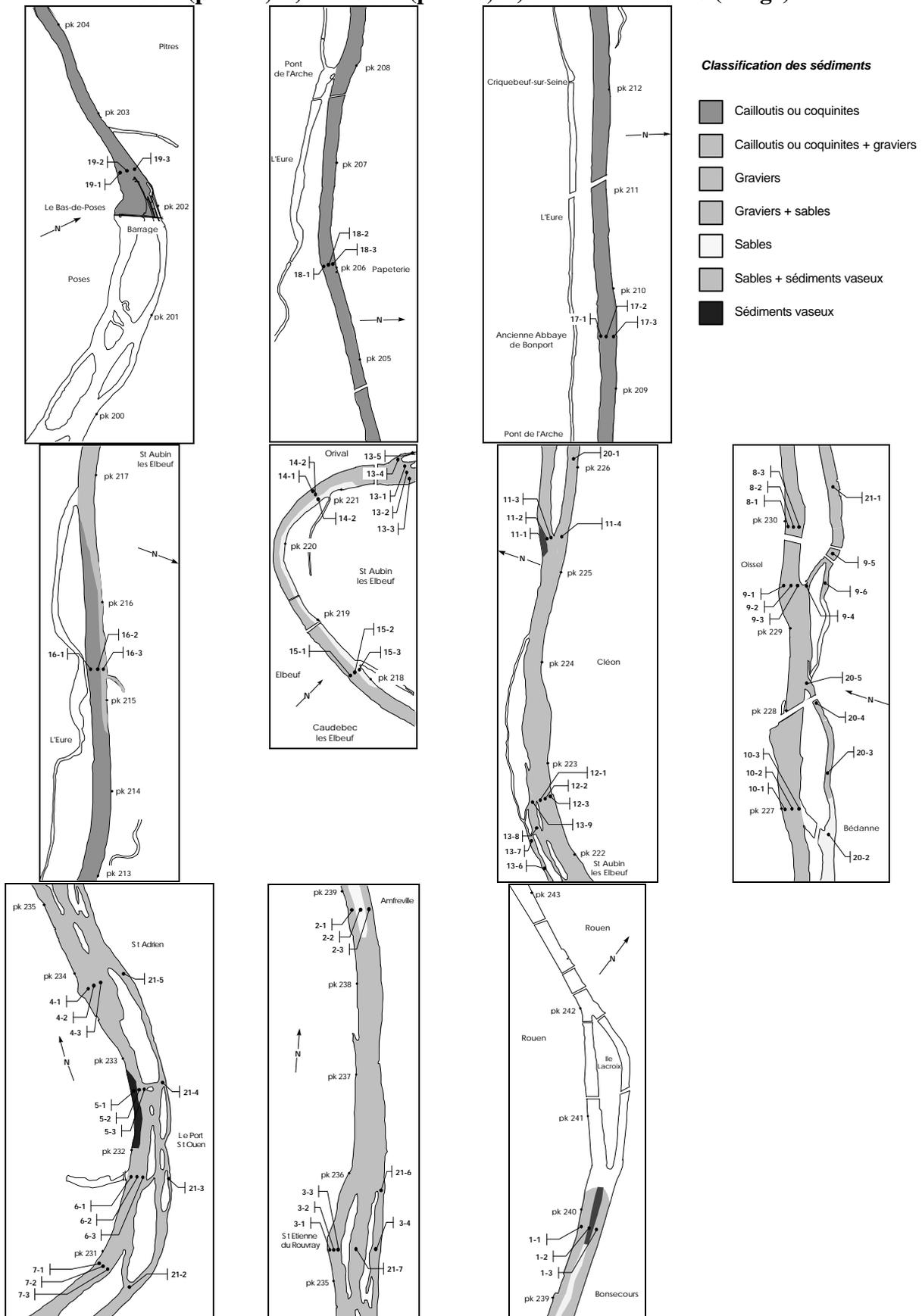
<i>Nom de station</i>	<i>pk</i>
<i>Elbeuf</i>	218,80
<i>Petit-Couronne</i>	225,50
<i>Oissel</i>	229,90
<i>Rouen</i>	243,70
<i>La Bouille</i>	260,00
<i>Val-des-Leux</i>	265,50
<i>Duclair</i>	278,00
<i>Mesnil-sous-Jumièges</i>	285,98
<i>Heurteauville</i>	297,65
<i>Caudebec-en-Caux</i>	310,50
<i>Vatteville</i>	317,00
<i>Courval (Aizier)</i>	326,68
<i>Quillebeuf (St Léonard)</i>	331,85
<i>Tancarville</i>	337,36
<i>La Risle (Fatouville)</i>	346,40
<i>Honfleur</i>	355,85
<i>Balise A</i>	364,75
<i>Le Havre</i>	365,00

Durée de l'écoulement moyen du débit de Seine à partir du barrage de Poses (pk 202,00)

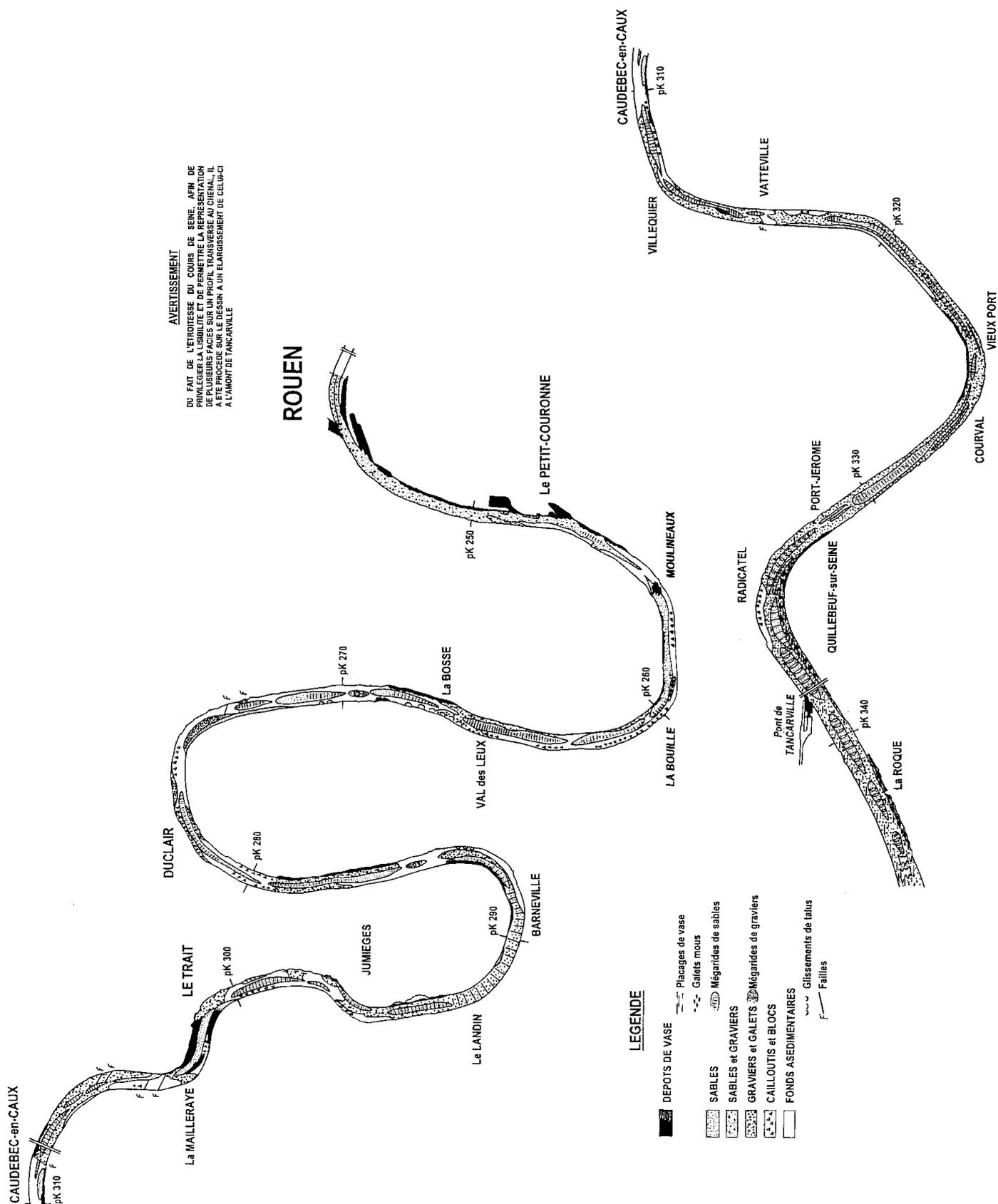
Source SNS



a – Cartographie des faciès sédimentaires superficiels échantillonnés entre le barrage de Poses (pk 202,00) et Rouen (pk 240,00) en automne 1996 (étiage).

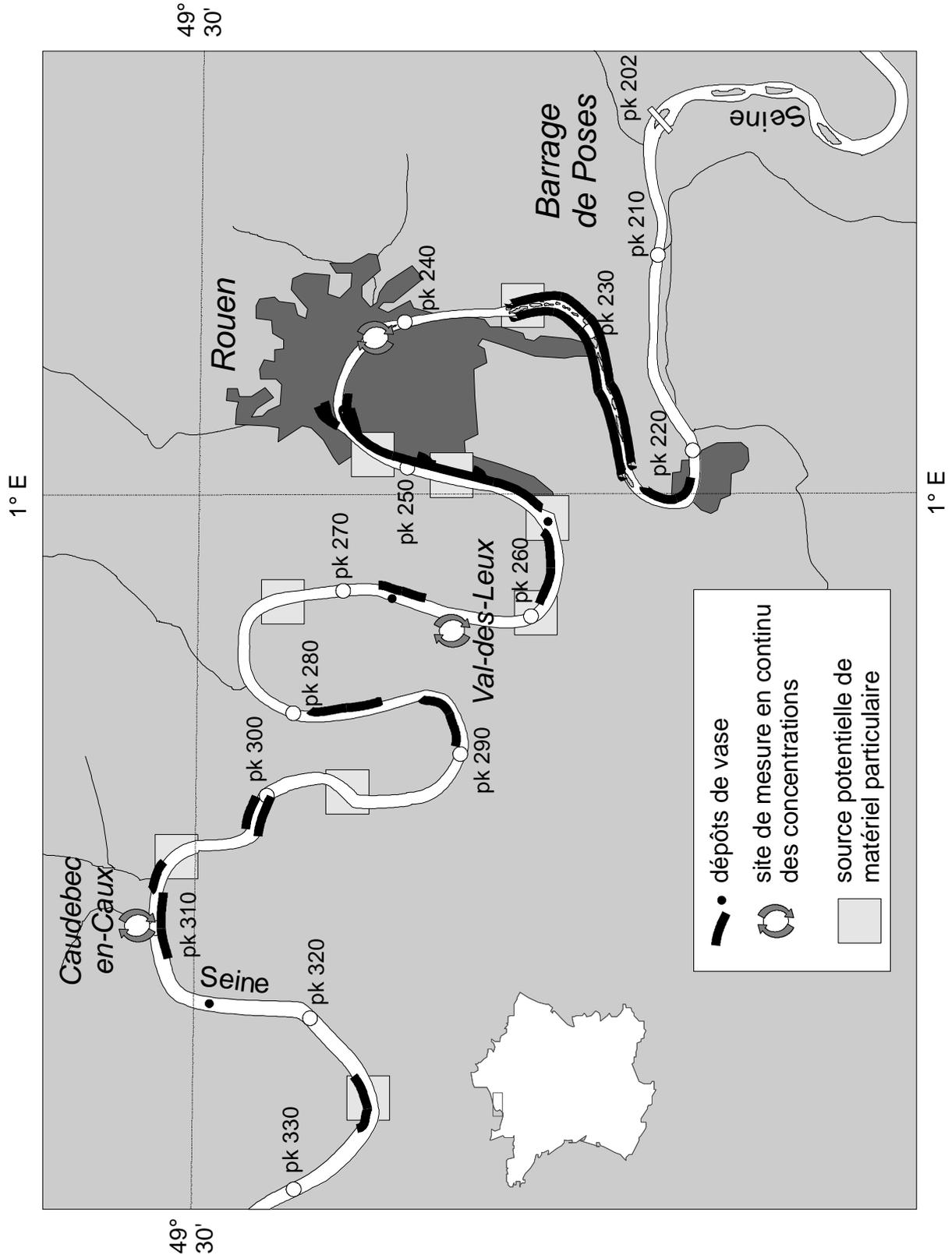


b – Carte morphosédimentaire de l'estuaire amont de la Seine dressée d'après les campagnes au sonar latéral réalisées en décembre 1996 par le Département de Géologie marine de l'Université de Caen et l'IFREMER EC, Brest.

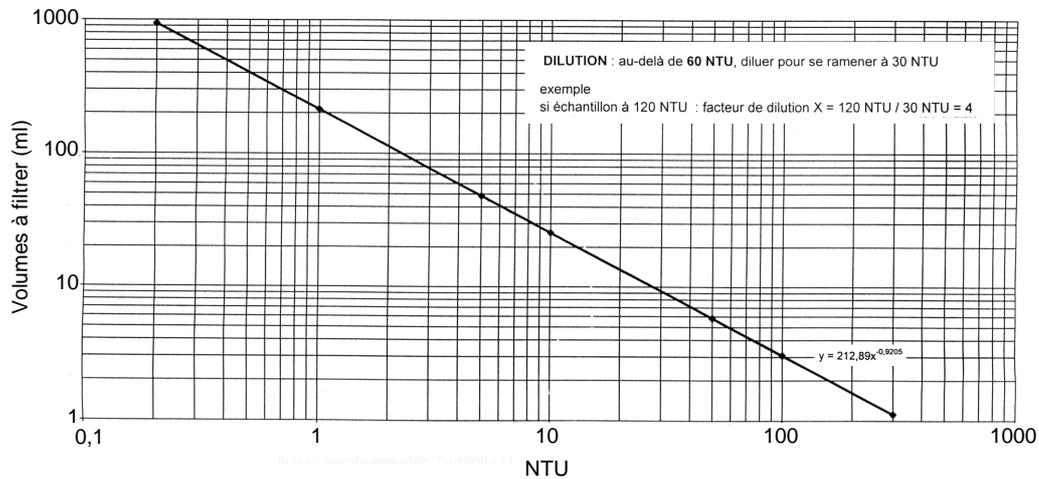


c – Zones de dépôts des sédiments fins dans l'estuaire amont de la Seine et localisation des sources potentielles de matériel en suspension

A l'aval du pk 240,00, les zones de dépôts de vases ont été identifiées par le Département de Géologie Marine de l'Université de Caen et l'IFREMER EC, Brest. A l'amont du pk 240,00, les zones de dépôts de vases ont été identifiées par le Département de Géologie de l'Université de Rouen

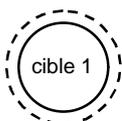


a – Volumes d'échantillons à filtrer en fonction de leur turbidité pour l'observation au microscope électronique à balayage.

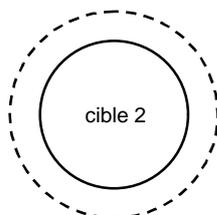
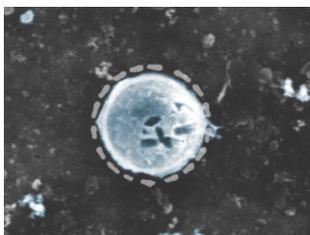


b – Trois cibles sont utilisées en fonction de la structure volumique des particules observées, elles permettent de déterminer un diamètre équivalent sphérique dépendant du grandissement choisi.

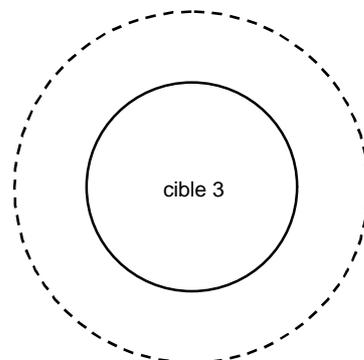
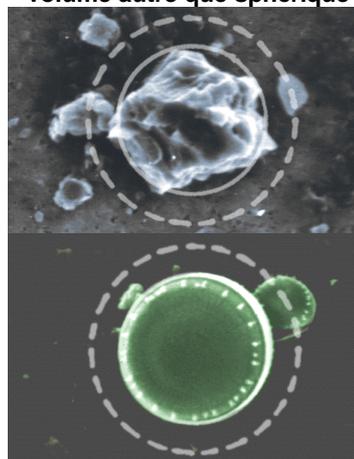
Grandissement au MEB	Diamètre équivalent sphérique des particules observées
X 350	34 < > 43 μm
X 500	27 < > 34 μm
X 750	17 < > 21 μm
X 1 000	13 < > 17 μm
X 1 500	10 < > 13 μm
X 2 000	6 < > 8 μm
X 3 500	3 < > 4 μm



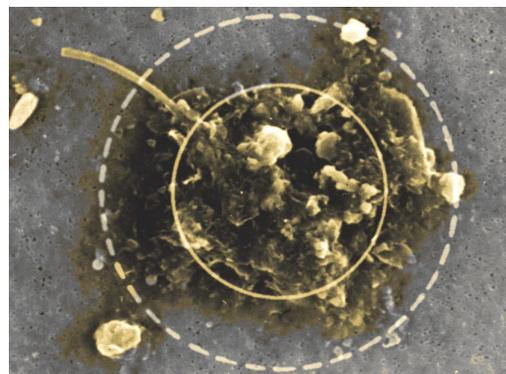
Particules ou agrégats sphériques



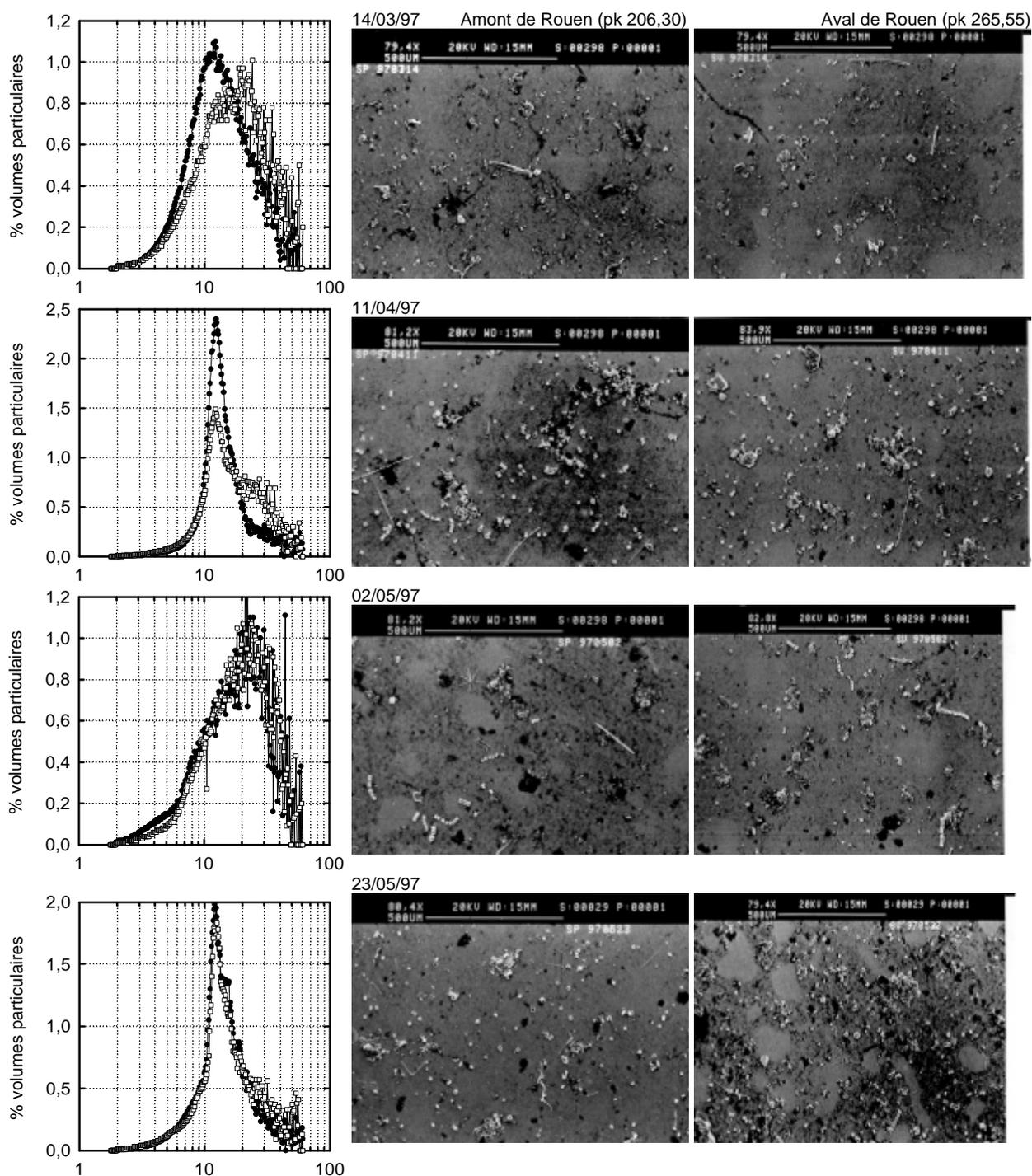
Particules ou agrégats cylindriques ou présentant un volume autre que sphérique

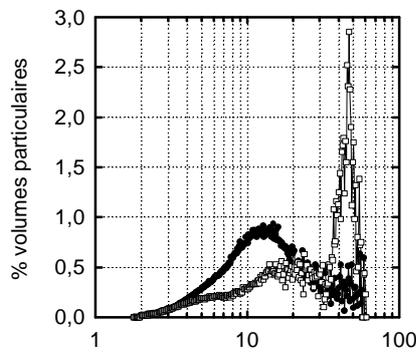


Particules ou agrégats plats, ne présentant pas de volume

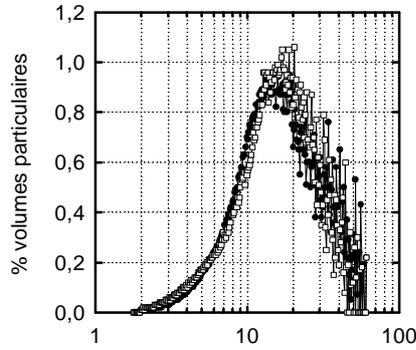
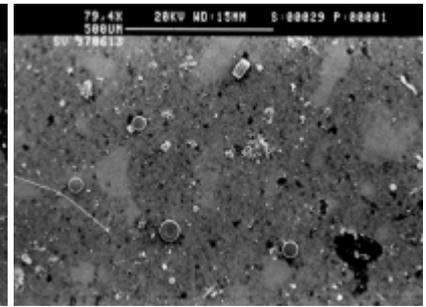
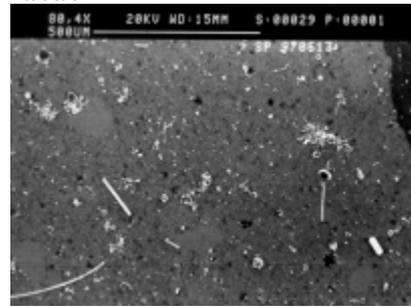


Spectres microgranulométriques des particules fines en suspension dans l'estuaire amont de la Seine à l'amont de Rouen — (pk 206,30) et à l'aval de Rouen — (pk 265,55).

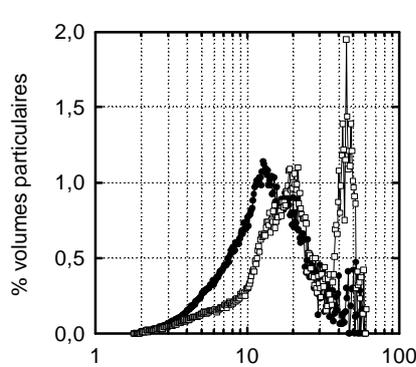
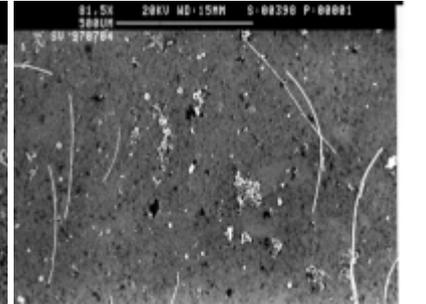
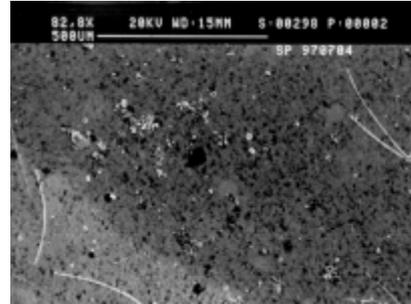




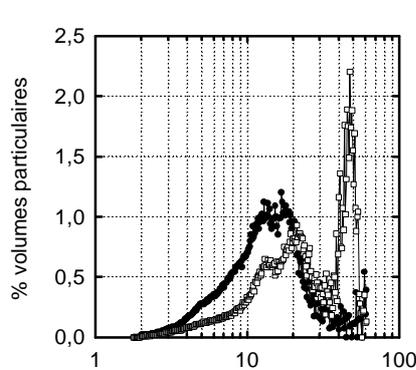
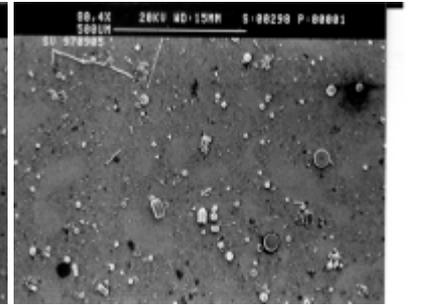
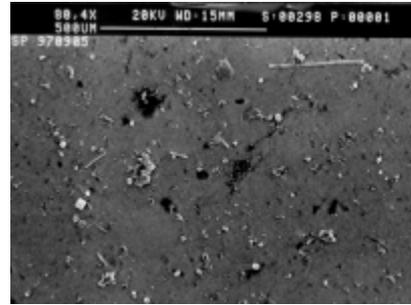
13/06/97



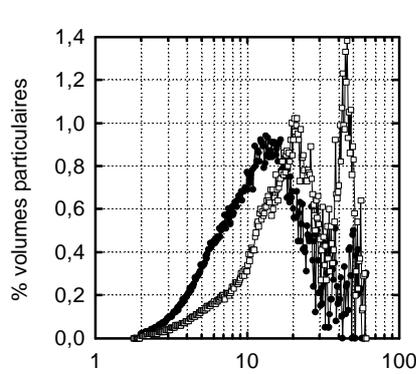
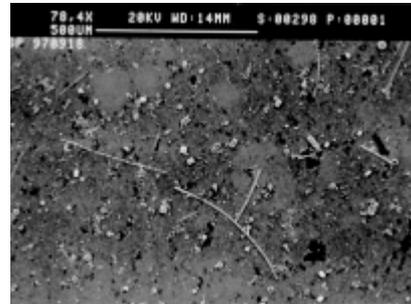
04/07/97



05/09/97

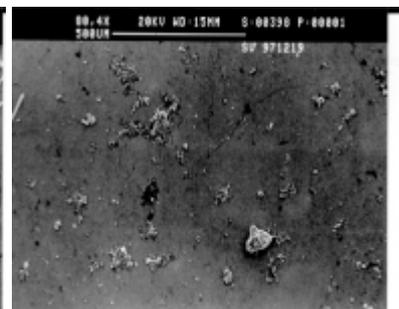
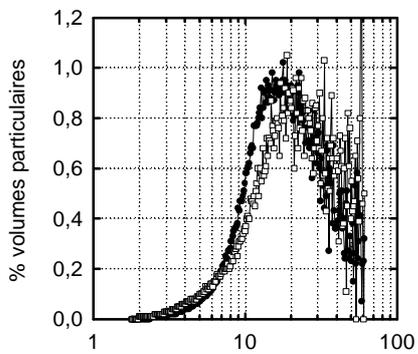
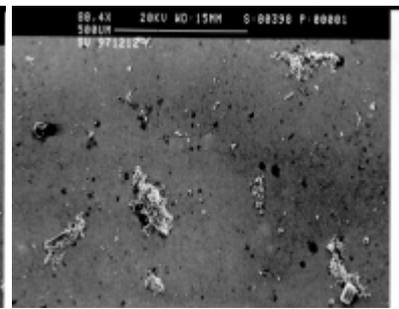
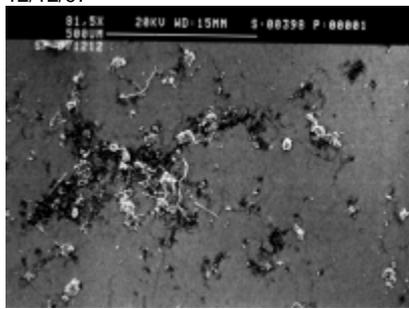
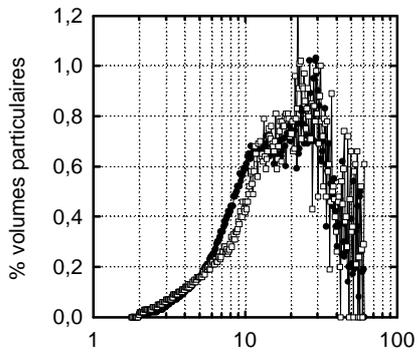
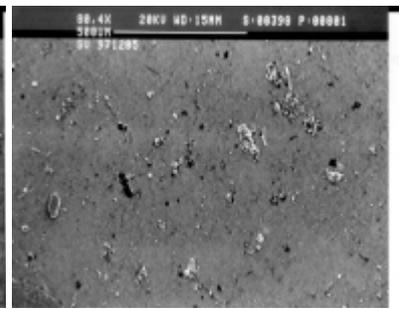
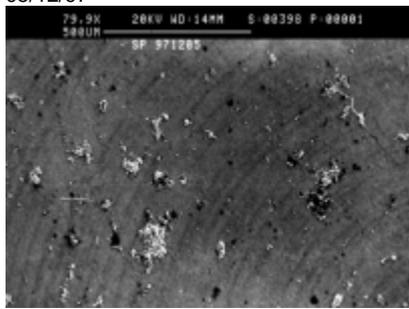
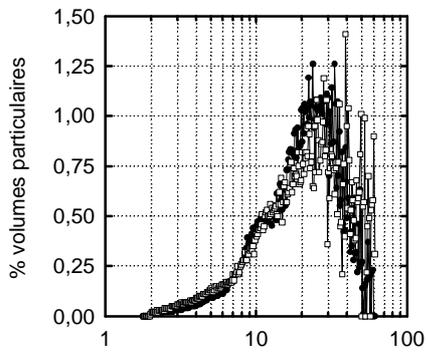
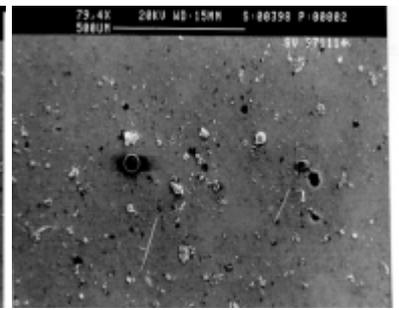
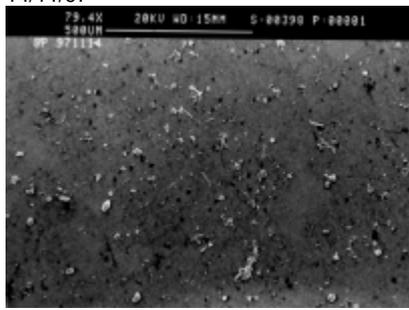
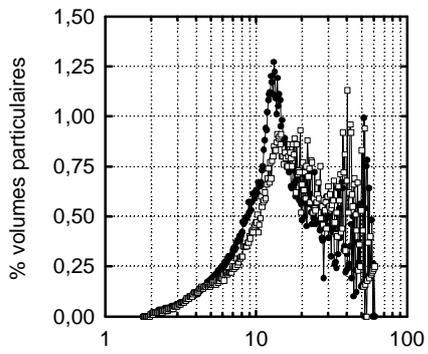
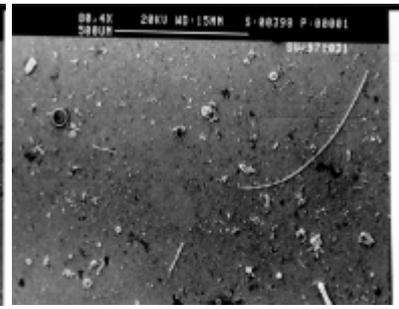
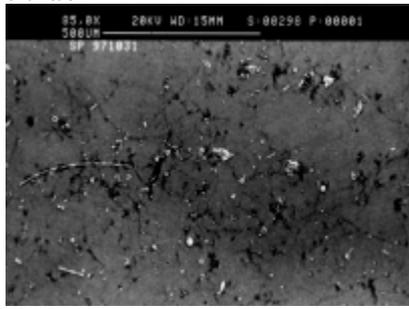
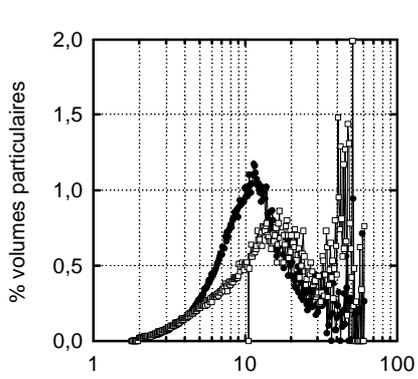


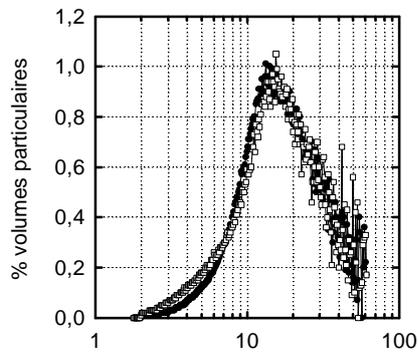
18/09/97



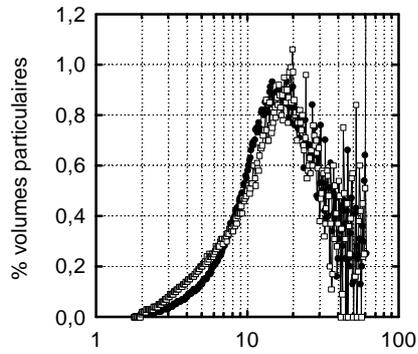
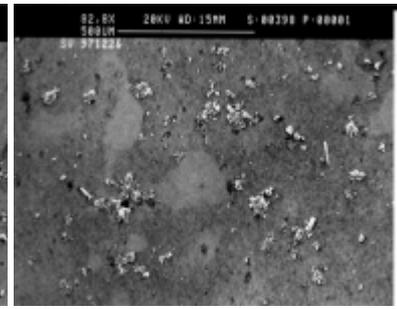
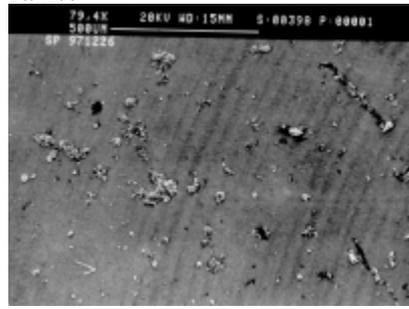
10/10/97



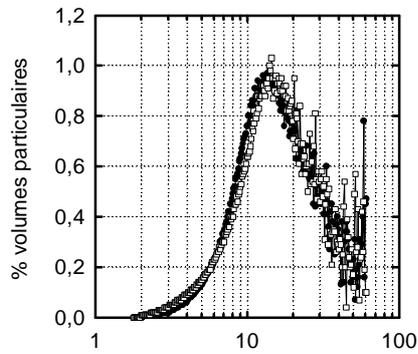
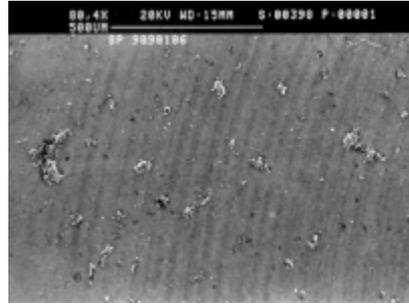




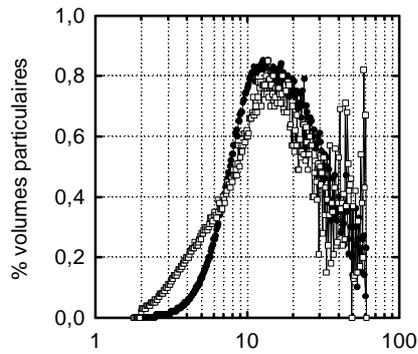
26/12/97



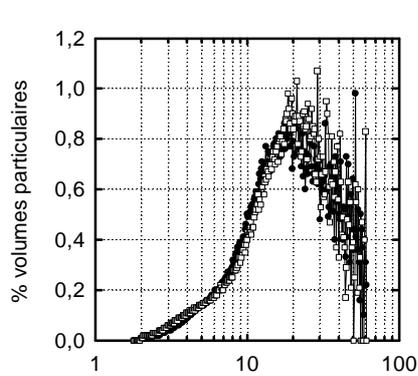
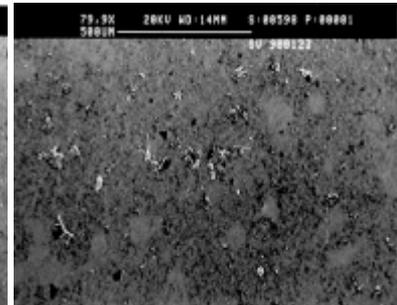
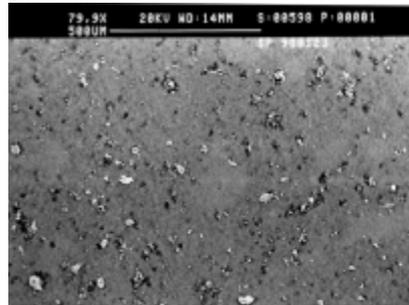
06/01/98



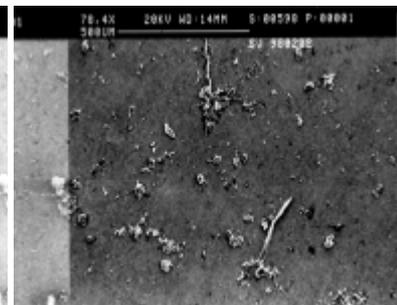
13/01/98

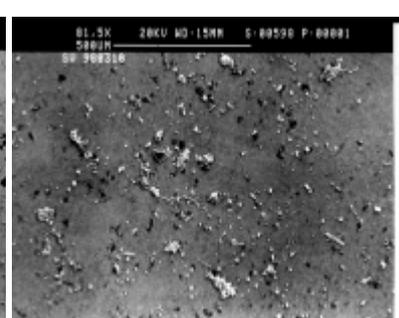
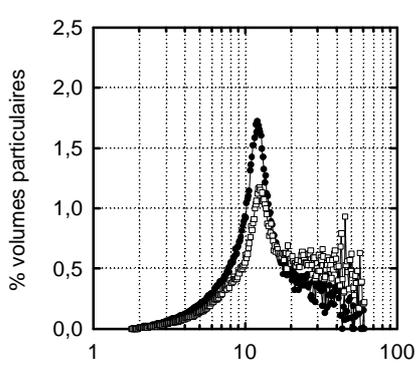
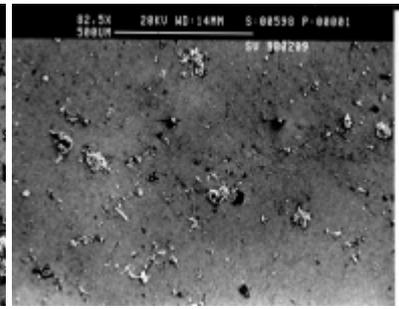
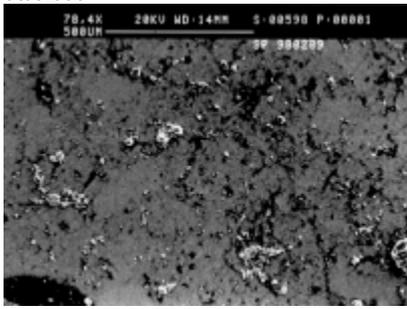
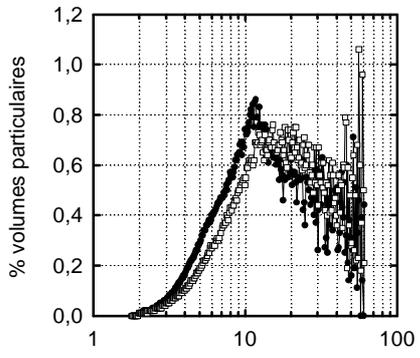


23/01/98

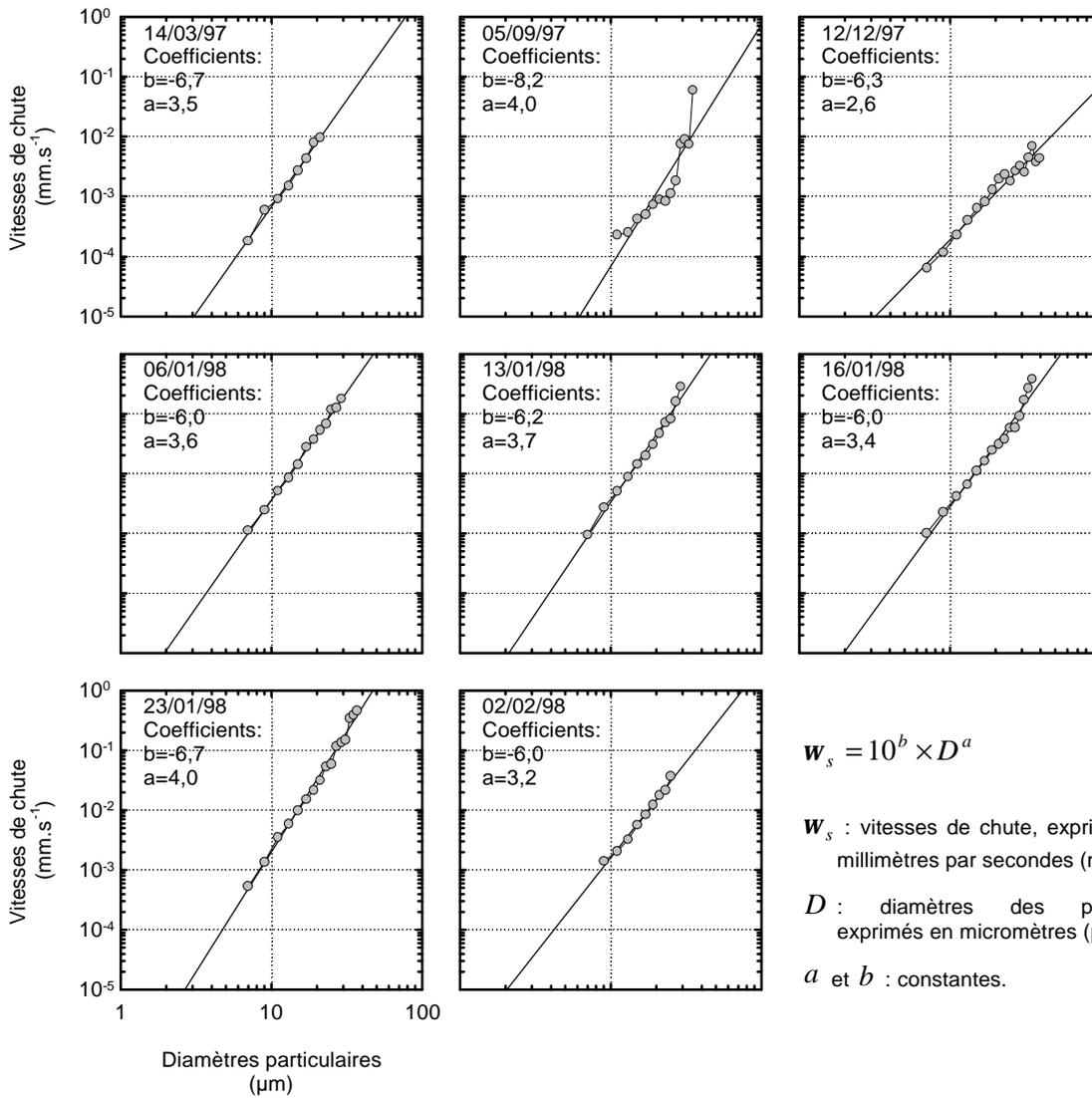


02/02/98





Vitesses de chute des particules fines en amont de Rouen (pk 206,30) en fonction de leur taille.



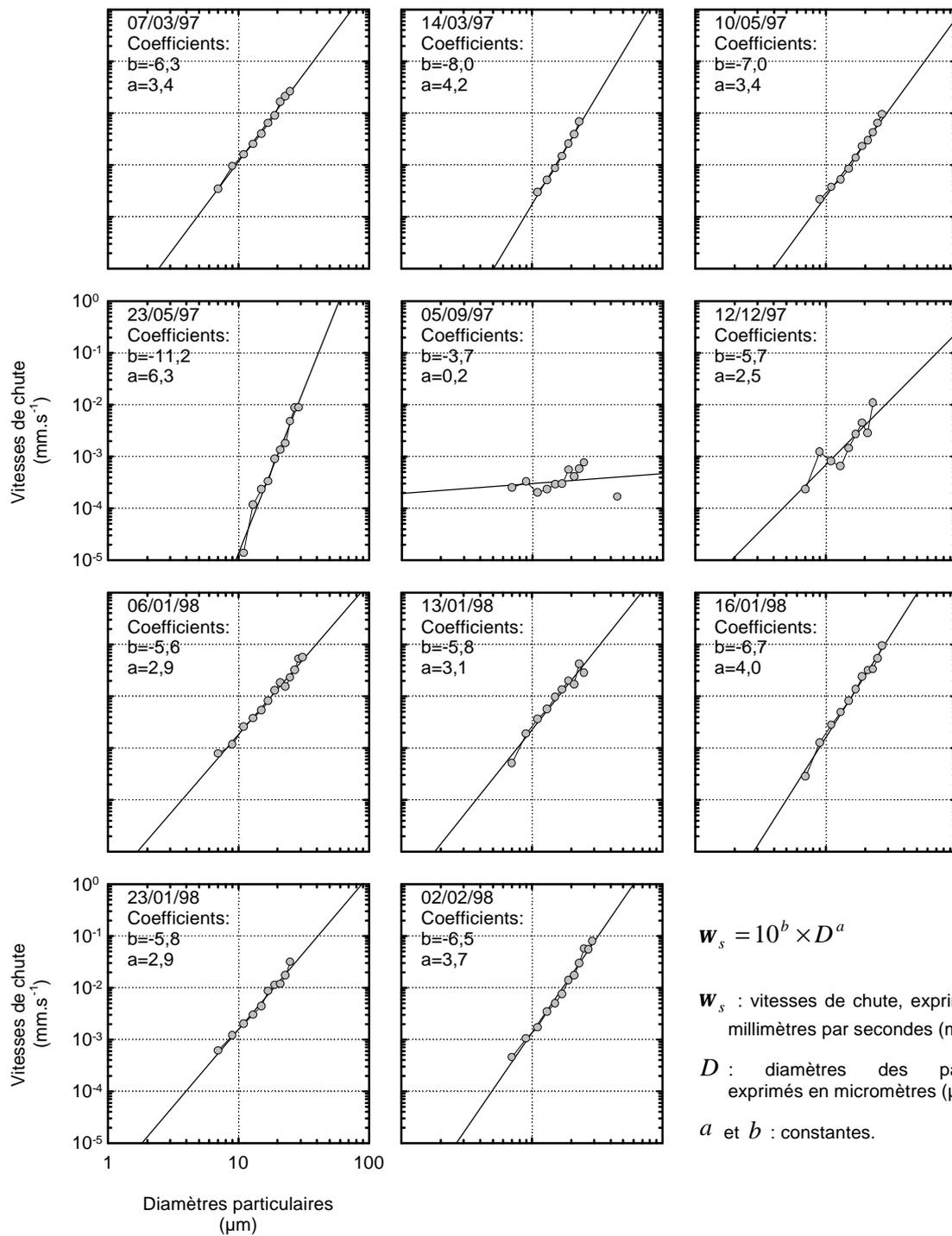
$$w_s = 10^b \times D^a$$

w_s : vitesses de chute, exprimées en millimètres par secondes (mm.s⁻¹).

D : diamètres des particules, exprimés en micromètres (μm).

a et b : constantes.

Vitesses de chute des particules fines en aval de Rouen (pk 265,55) en fonction de leur taille.



$$w_s = 10^b \times D^a$$

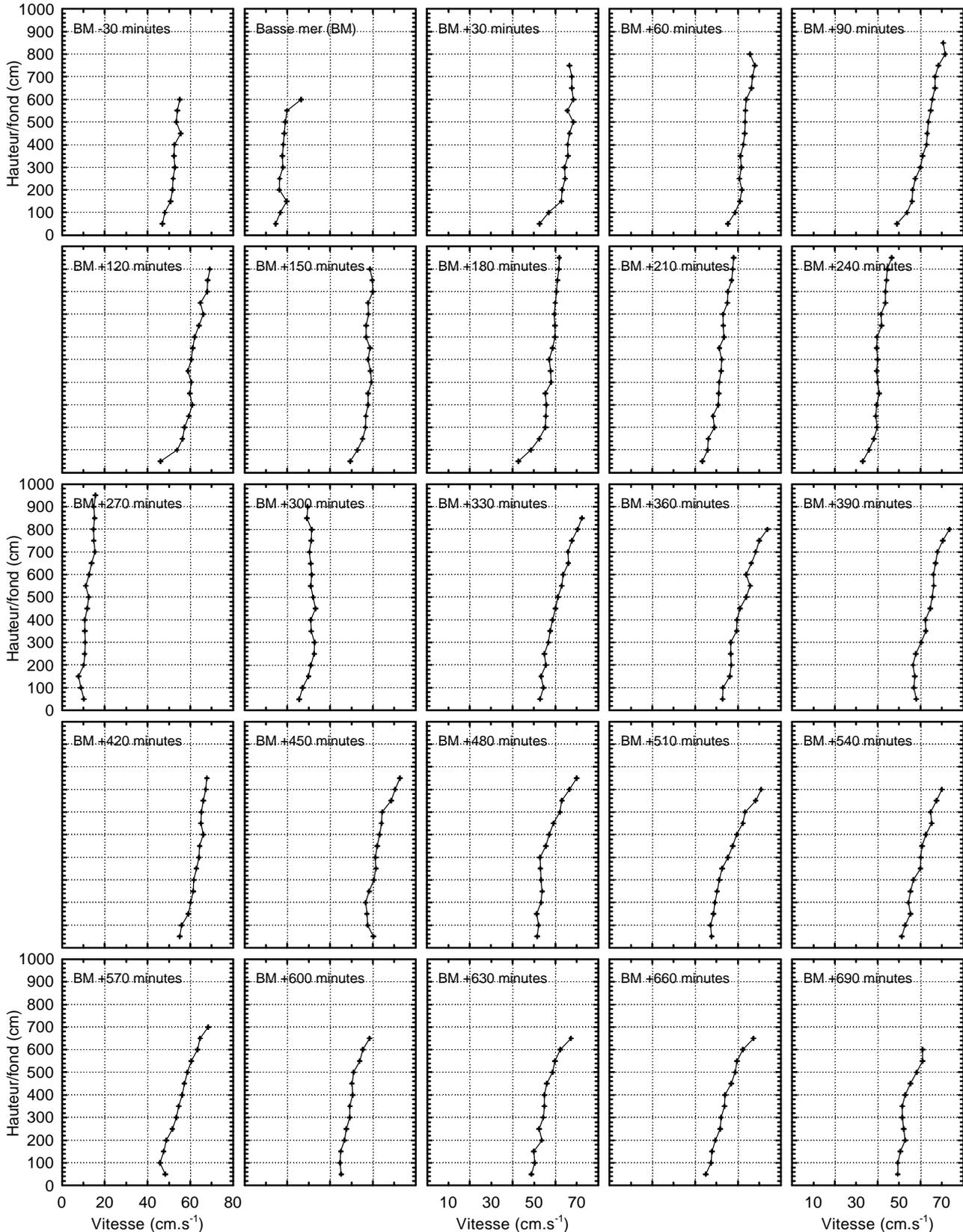
w_s : vitesses de chute, exprimées en millimètres par secondes (mm.s⁻¹).

D : diamètres des particules, exprimés en micromètres (µm).

a et b : constantes.

Annexe VIII

Exemples de profils verticaux de vitesses de courant le 12 février 1997 sur le site de Rouen (pk 243,25) au cours d'un cycle semi-diurne de marée (≈ 6 m du bord en rive gauche).



Hydrodynamics and suspended matter transport in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary: the Seine estuary (France).

Abstract

The Seine flows out onto the North-West European continental shelf. With a low water flow, it is submitted to oceanic pluvial regime. Its macrotidal estuary is hugely embanked and industrialised. Tide and river discharge act on the transport of fine suspended sediment through the 120km of the fluvial estuary. Meanders and local natural embankments allow fine sediment to be settled.

High river discharges bring 75% of sedimentary material, as microflocs and macroflocs. River flow increasing brought out strong die down of tidal dynamics. Fluvial intertidal zones are the settling zones of suspended matter. It is reworked after the flood period. Fine sediment trapped in the harbour dock is taken out of the estuarine system by dredging.

During the low river flow, tidal dynamics dominates particulate transit in the fluvial estuary. Semidiurnal and fortnightly erosion/sedimentation cycles are observed. During spring tide, strong tidal pumping stops particulate transit to mid-estuary: particulate residence time is increased and marine particles go up in the estuary. At the end of spring tide period, huge suspended particulate concentrations and water volumes trapped in the upper estuary are observed. Water volume and particulate matter flow downstream during the spring-neap tide transition.

The macrotidal regime of the Seine estuary delays fine sediment transit coming from catchment area. In this way, tidal dynamics controls half part of fine sediment transit.

Key words: *estuary, sediment transport, suspended particulate matter, hydrodynamics, Seine*

Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France).

Résumé

La Seine, fleuve à régime pluvial océanique et à faible débit, débouche sur le plateau continental nord-ouest européen. Son estuaire, de type macrotidal, est fortement chenalisé et anthropisé. La marée et le débit fluvial agissent sur le transfert du matériel particulaire en suspension au sein des 120 km du secteur estuarien non soumis à l'intrusion saline. Les méandres et quelques zones non endiguées contribuent au stockage du matériel fin.

Les crues apportent 75% du matériel sédimentaire structuré en microflocs et macroflocs. L'augmentation du débit fluvial provoque une très forte atténuation de la dynamique de marée. Les zones intertidales du fleuve constituent les lieux de dépôt temporaire pour 1/3 du matériel fin qui est restitué après la crue. Le matériel piégé dans les bassins et les souilles des infrastructures portuaires est exclu du bilan de transfert par immobilisation définitive et exportation par dragage.

Pendant l'étiage, la dynamique de marée domine le transfert particulaire dans l'estuaire amont. Des cycles semi-diurnes et semi-lunaires d'érosion/sédimentation du matériel particulaire sont observés. En vives-eaux, un important pompage tidal stoppe localement le transit particulaire vers l'estuaire moyen : le temps de résidence des particules est accru et la remontée de particules marines dans l'estuaire amont est observée. En fin de période de vives-eaux, les concentrations particulières en suspension et les volumes d'eau stockés dans l'estuaire amont sont les plus élevés. Ces volumes d'eau et de matériel particulaire sont évacués vers l'estuaire moyen en période de déchet.

Le régime macrotidal de l'estuaire de la Seine, retarde le transit sédimentaire fin issu du bassin versant. La dynamique de marée contrôle ainsi près de la moitié du transit sédimentaire fin.

Mots-clefs estuaire, transport sédimentaire, matières en suspension, hydrodynamique, Seine