FASCICULE 3.3

FONCTIONNEMENT HYDRO-SÉDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE









GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

FONCTIONNEMENT HYDRO-SÉDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

COORDINATEUR

J.P. Lemoine[1]

AUTEURS

J.P. Lemoine[1], R. Verney[2]

CONTRIBUTEURS

C. Cayrol[5], J. Deloffre[3], C. Fisson[1], F. Grasso[2], L. Guézennec[7], L. Hamm[5], V. Landemaine[3,6], S. Lesourd[4]

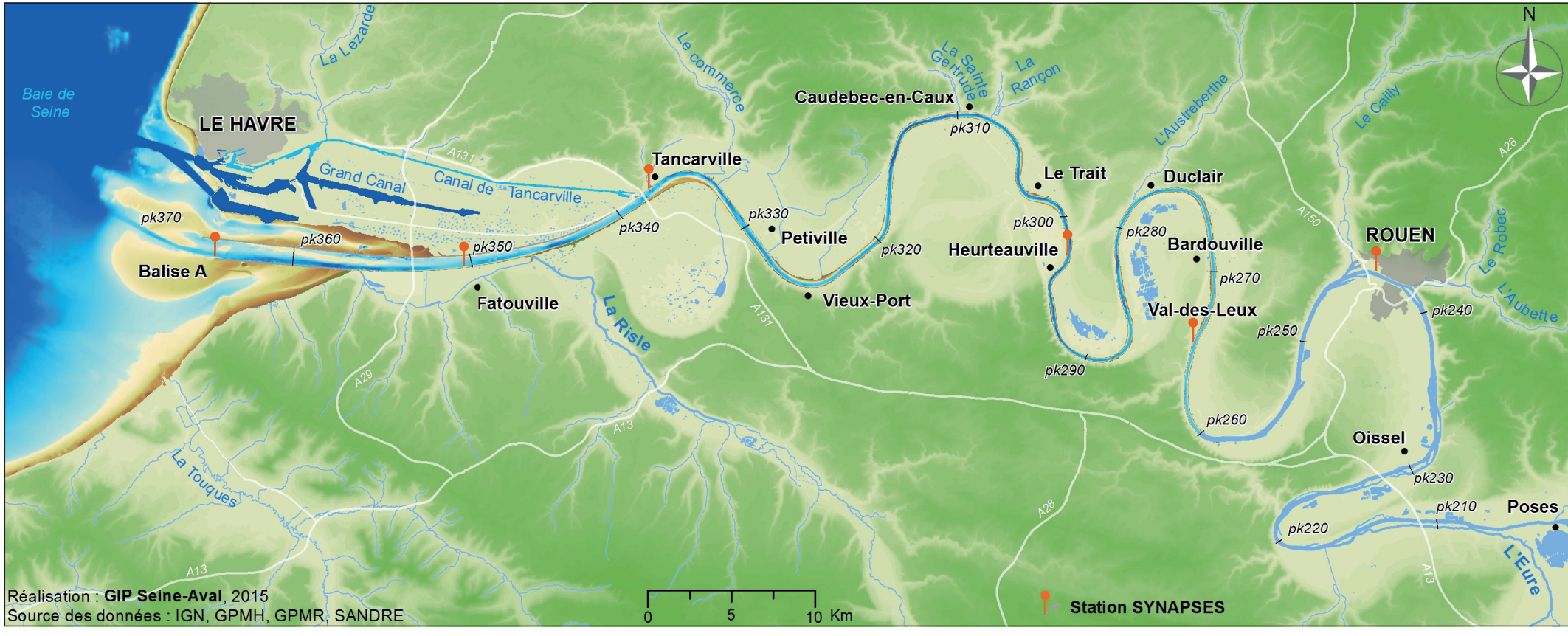
MARS 2015

(1) : GIP Seine-Aval
(2) : IFREMER Dyneco/Physed
(3) : Université de Rouen, CNRS UMR 6143 M2C
(4) : Université de Caen, CNRS UMR 6143 M2C
(5) : ARTELIA
(6) : BRGM
(7) : Agence de l'Eau Seine Normandie

GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

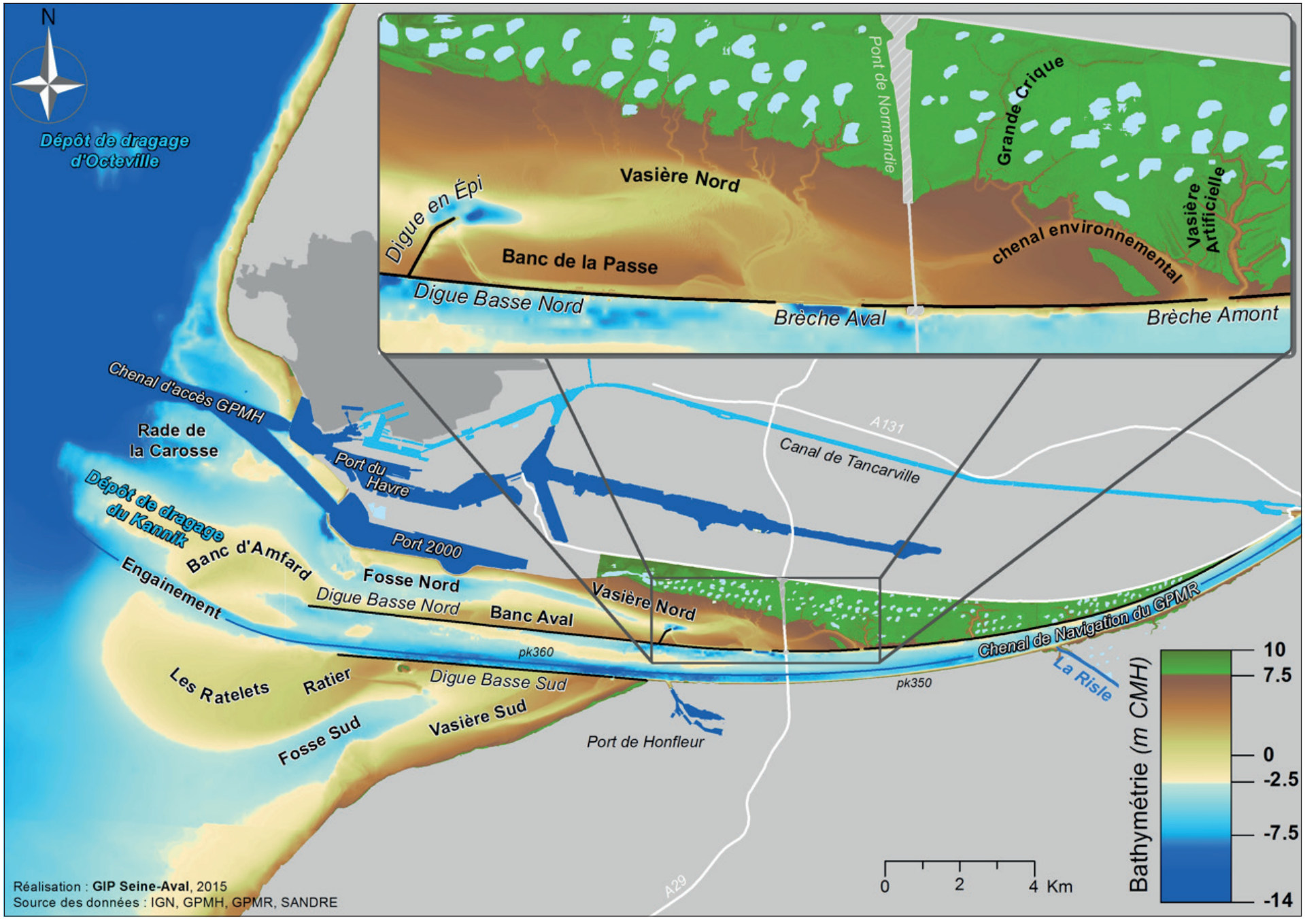
PANORAMAS

L'estuaire de la Seine



CARTE 1 L'estuaire de la Seine.

GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC



CARTE 2 L'embouchure de l'estuaire de la Seine et ses lieux-dits.

GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Sommaire

INTRODUCTION 5

I LE FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE 6

A Les apports liquides 6

B La marée dans l'estuaire de la Seine 11

Encart n° 1 La marée, de la théorie à la tenue du plein caractéristique de la baie de Seine Orientale

C Le vent et les vagues à l'embouchure 14

Encart n° 2 Modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les pleines mers en estuaire de Seine

D Hydrodynamisme de l'estuaire de la Seine 17

Encart n° 3 Modélisation numérique hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine

II LES MATIÈRES EN SUSPENSION DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE 22

A Caractéristiques des MES estuariennes 22

B Mécanismes hydro-sédimentaires 24

Encart n° 4 Les techniques de caractérisation des MES

C Dynamique du compartiment sédimentaire 34

Encart n° 5 Le batillage en estuaire de Seine

III LE BILAN SÉDIMENTAIRE 40

A Les apports amont 40

B Les apports latéraux et intra-estuariens 42

Encart n° 6 Vers une meilleure évaluation de la contribution des apports solides issus de l'érosion des bassins versants intra-estuariens

C Les apports marins 44

Encart n° 7 Les Dragages de l'estuaire de la Seine

D Bilan des apports annuels en MES à l'estuaire de la Seine 46

E Bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine 47

Encart n° 8 Les évolutions d'ensemble de l'embouchure de l'estuaire entre 2001 et 2011

CONCLUSION 51

GLOSSAIRE 52

BIBLIOGRAPHIE 55

TABLES DES ILLUSTRATIONS 58

Liste des figures 58

Liste des tableaux 61

INTRODUCTION



L'estuaire de la Seine est un milieu complexe, à l'interface entre fleuve et mer, dont le fonctionnement est principalement influencé par les interactions entre l'hydrologie de son bassin versant, les conditions marines typiques de la baie de Seine et l'activité anthropique (aménagements, rejets…). Défini comme la zone du fleuve sous influence de la marée dynamique*, l'estuaire de la Seine s'étend du barrage de Poses jusqu'à la baie de Seine. Il représente les 160 derniers kilomètres du fleuve.

La Seine se jette dans la Manche, plus précisément dans la partie orientale de la baie de Seine. Ce secteur mégatidal* de la baie est caractérisée par l'asymétrie de sa courbe de marée qui présente une phase de montée relativement courte et une tenue du plein de près de deux heures. Cette marée et les courants qu'elle génère expliquent de nombreuses spécificités du fonctionnement hydrodynamique* de l'estuaire de la Seine.

L'estuaire est, de son côté continental, l'exutoire d'un bassin versant* de près de 80 000 km^2, abritant 17,5 millions de personnes et 40 % de l'activité économique nationale. Prenant sa source sur le plateau de Langres en Haute-Marne, ce bassin versant est drainé par près de 23 000 km de cours d'eau au travers desquels s'écoulent près de 14 milliards de m^3 d'eau par an (Fisson, 2014). L'érosion de ce bassin versant, résultante des mécanismes naturels et de l'ensemble des activités anthropiques, apporte près d'un million de tonnes de sédiments par an vers l'estuaire.

Dans l'estuaire, la dynamique de ces sédiments est régie par l'hydrologie continentale, mais aussi par les conditions marines. Les interactions entre les processus propres à ces deux milieux distincts sont à la base d'un fonctionnement complexe, où chaque processus doit être analysé en prenant en compte l'ensemble des caractéristiques de chacun des forçages* estuariens.

Depuis les premières campagnes de mesures scientifiques menées sur l'estuaire de la Seine dans les années 1950, puis avec la mise en place du programme de recherche Seine-Aval en 1995, notre connaissance du fonctionnement estuarien s'est largement développée. Ces progrès se sont notamment fait au travers de l'étude des processus hydro-sédimentaires pris individuellement, mais surtout en étudiant leurs interactions réciproques ; notamment grâce à l'avènement des outils de modélisations numériques. Le programme de recherche Seine-Aval (1995-2003) et le GIP Seine-Aval (depuis 2003) ont fortement contribué à la dynamique de recherche, identifiant le fonctionnement hydro-sédimentaire comme un axe structurant de son programme scientifique.
(http://programme-scientifique.seine-aval.fr).

Ce fascicule présente un bilan des connaissances actuelles des mécanismes régissant le fonctionnement hydro-sédimentaire* de l'estuaire et renvoie le lecteur vers de nombreuses références bibliographiques dans lesquelles il pourra trouver des informations plus détaillées sur les différents thèmes abordés. La première partie est dédiée à la présentation du fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine et de l'ensemble des forçages qui en sont à l'origine. La deuxième partie présente les caractéristiques des sédiments estuariens ainsi que leurs dynamiques dans l'estuaire. Enfin la troisième partie propose un bilan sédimentaire de l'estuaire mettant en évidence les limites de notre connaissance actuelle de l'ensemble des flux solides* entrants et sortants.

I LE FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE



D'un point de vue hydrodynamique, le terme estuaire désigne une étendue d'eau côtière s'étendant dans les terres, jusqu'à la limite d'influence de la marée. L'eau marine salée y est significativement diluée avec l'eau douce provenant du drainage des terres du bassin versant. D'un point de vue biologique, un estuaire permet le développement d'espèces marines et d'eau douces ainsi que d'espèces dites euryhalines*, qui peuvent y effectuer tout ou partie de leur cycle de vie (d'après Perilo, 1996). D'un point de vue sédimentologique, un estuaire est la partie aval d'un système de vallées incisées recevant des sédiments d'origines marine et fluviatile, et dont les faciès sont influencés par des processus marins et fluviatiles. Un estuaire est considéré comme l'extension dans les terres de la limite des faciès tidaux et la limite vers le large des faciès côtiers d'embouchure (d'après Dalrymple, 1992).

Ainsi l'estuaire de la Seine s'étend selon cette terminologie de l'embouchure à la limite artificielle de la zone soumise à la marée, le barrage de Poses. Cette zone, à l'interface océan/continent, est le siège de processus hydrodynamiques complexes, résultants de la rencontre entre les eaux marines et fluviales. L'objet de ce chapitre est de caractériser les différents forçages hydrodynamiques, hydrogéologiques, atmosphériques, et leurs impacts sur l'estuaire pour enfin décrire son fonctionnement hydrodynamique.

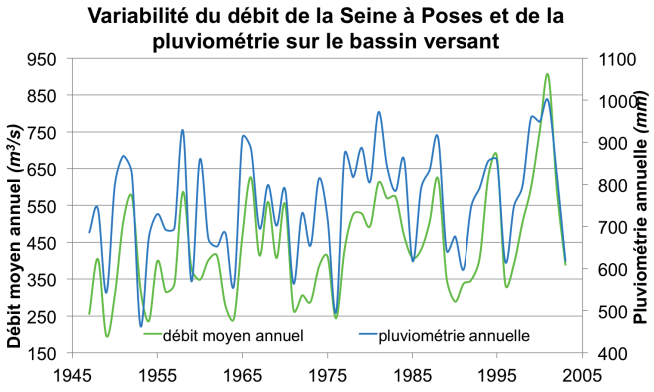
A. LES APPORTS LIQUIDES

Les apports liquides à l'estuaire sont séparés en trois catégories, les apports de la Seine (au droit de Poses), les apports des affluents à l'estuaire et les apports de la nappe.

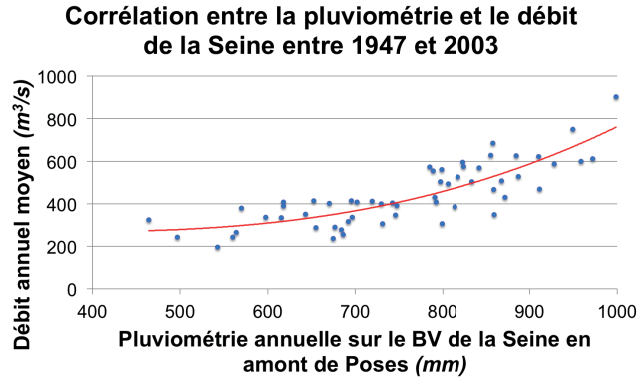
1. Apports amont

Au niveau du barrage de Poses, la Seine draine un bassin versant d'environ 67 000 km^2, soumis à un climat de type océanique tempéré. En moyenne la pluviométrie sur ce bassin versant est de 750 mm/an dont un peu plus de 2/3 (550 mm/an) rejoignent l'atmosphère par évapotranspiration* (Viennot *et al.*, 2009). Le résiduel (200 mm/an) s'écoule en direction de l'estuaire soit rapidement par la surface, soit sur des échelles séculaires par les nappes souterraines. Au final, il en résulte un régime hydrologique dit « pluvial océanique » avec un débit maximal en hiver quand l'évapotranspiration est faible et les pluies élevées, et inversement en été (FIGURE 1) (Ducharne *et al.*, 2010).

Historiquement, les données de débit de la Seine à l'entrée de l'estuaire sont calculées à partir de données mesurées au barrage de Poses et quelques dizaines de kilomètres en amont (Poissy ou Vernon). Leurs analyses statistiques montrent qu'au niveau du barrage de Poses, le débit moyen annuel sur la période 1941-2013 est d'environ 410 m^3/s (FIGURE 2). Le bassin versant de la Seine étant soumis à un climat de type océanique, les débits les plus importants sont observés entre les mois de janvier et avril avec des pics de crue* moyens aux alentours de 1 400 m^3/s. Les faibles débits se produisent généralement entre le mois d'août et le mois d'octobre ; durant cette période d'étiage*, le débit est en moyenne inférieur à 140 m^3/s.



a)



b)

FIGURE 1 a) Variation du débit de la Seine et de la pluviométrie moyenne sur son bassin versant entre 1947et 2003 ; b) Corrélation entre la pluviométrie et le débit de la Seine entre 1947 et 2003

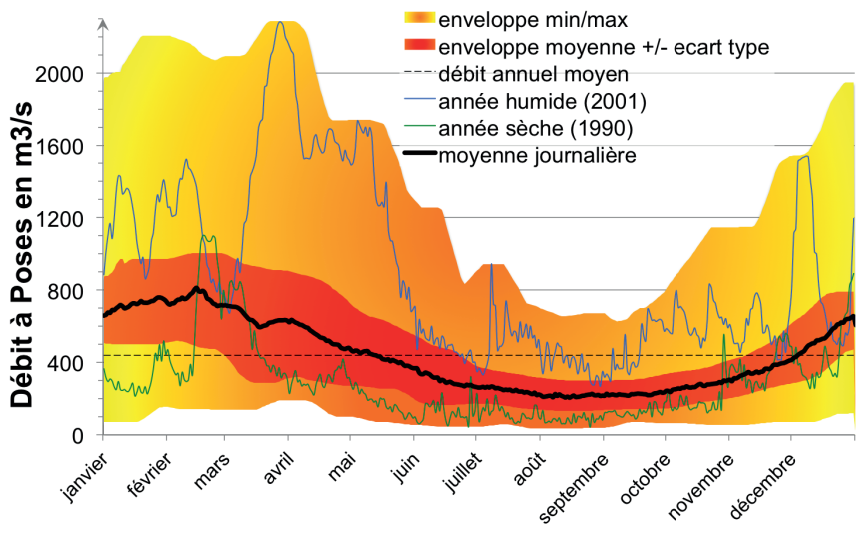




FIGURE 2 Statistiques journalières sur les débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013

Durant la deuxième moitié du XX^{e} siècle, quatre grands lacs réservoirs ont été créés sur le bassin versant de la Seine en amont de Paris. L'objectif initial de ces aménagements était de réguler le débit des principales rivières, pour limiter les crues et soutenir le débit d'étiage de la Seine. Ils permettent ainsi de limiter les inondations en écrêtant les pics de crues : leurs actions combinées permettraient de diminuer de 70 cm la hauteur d'eau à Paris dans le cas d'une crue comparable à celle de 1910. En régulant les débits à Paris, cette série d'aménagements a modifié l'hydrologie du fleuve, en particulier les crues de périodes de retour* supérieures à 2 ans sont moins importantes qu'avant la construction de ces lacs réservoirs. Par exemple, la crue de période de retour 100 ans est passée d'environ 2 900 m^3/s à 2 600 m^3/s à Poses (TABLEAU 1) (Artelia & GIP Seine-Aval, 2013).

2. Apports intra estuariens

Les apports intra estuariens représentent une part non négligeable des apports hydriques à l'estuaire de la Seine. En effet, les 11 500 km^2 du bassin versant intra estuarien représentent près de 15 % de la surface totale du bassin versant de la Seine (FIGURE 50). Ces apports hydriques sont de deux origines : les apports de surface s'écoulant par les affluents intra-estuariens et les apports souterrains des nappes.

• Les apports de surface

La variabilité saisonnière du débit des affluents intra-estuariens est moins importante que celle de la Seine en amont de Poses ; ainsi durant l'étiage la part relative de ces affluents aux apports hydriques est plus importante qu'en hiver et peut atteindre des valeurs proches de 18 % (FIGURE 3) →.

TABLEAU 1 Périodes de retour associées au débit de la Seine et de ses affluents (m^3/s).
ARTELIA ET GIP SEINE-AVAL 2013

Temps de retour (années)	Seine avant les grands lacs	Seine après les grands lacs	Seine avant les grands lacs	Seine après les grands lacs	Eure	Risle	Andelle	Cailly	Austreberthe
	à Austerlitz (m^3/s)		à Poses (m^3/s)		à la confluence avec la Seine (m^3/s)				
1				1450					
2	1094	1091	1650	1640	58	36	18	6,5	6
5	1576	1385	2225	2105	77	64	23	8,5	7,5
10	1831	1526	2400	2230	99	83	29	12	11
20	2037	1662	2565	2350	120	102	39	17	15
30	2155	1740	2660	2420	132	113	46	20	18
50	2300	1837	2775	2510	147	127	53	23	21
100	2500	1969	2930	2625	167	145	63	27	25
500	2962	2273	3290	2900	215	188	87	38	34

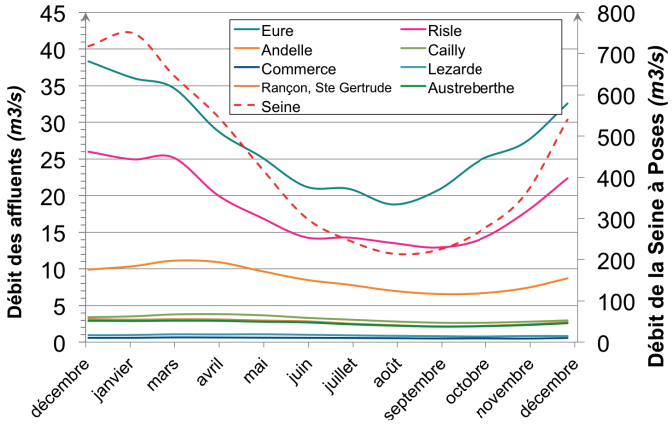


FIGURE 3 Évolution des débits moyens mensuels des affluents intra-estuariens et de la Seine à Poses calculés à partir des débits journaliers de 1996 à 2006

En lien avec la surface des différents bassins versants intra-estuariens, les affluents de la rive gauche, l'Eure et la Risle, constituent les deux principaux apports de surface intra-estuariens. L'impact de ces affluents intra-estuariens sur les apports sédimentaires sera discuté dans le paragraphe III.B.1.

• Les apports souterrains

Compte tenu du contexte hydrogéologique de l'estuaire (massif crayeux fortement karstifié), les apports intra-estuariens doivent être appréhendés avec les apports souterrains. Dupont *et al.* (2006) et Massei et Fritier (2010) ont montré qu'à l'échelle des bassins versants intra-estuariens, les apports souterrains sont en moyenne aussi importants que les apports de surface (FIGURE 4).

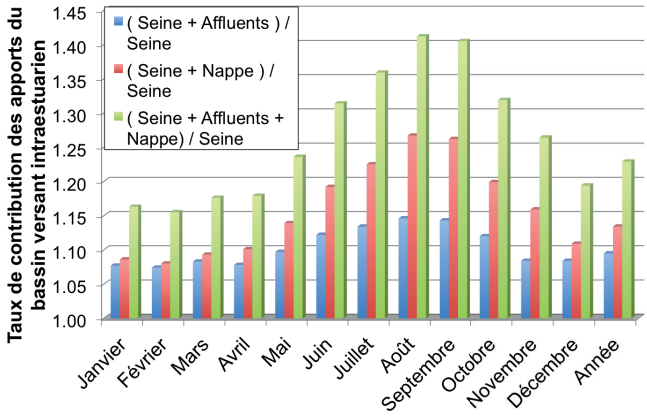


FIGURE 4 Contribution des apports intra-estuariens totaux (nappes + surface) par rapport à la Seine « amont » (d'après Dupont 2006)

La contribution de l'ensemble des apports intra-estuariens est maximale durant l'étiage et peut représenter jusqu'à 40 % des apports provenant de l'amont de la Seine et transitant à Poses (Dupont *et al.*, 2006). Cet ordre de grandeur sera affiné dans le cadre du projet Seine-Aval 5 ECHANGES. Ce projet vise en effet à mettre en place une modélisation du fonctionnement hydrogéologique de l'estuaire qui permettra d'étudier la variabilité spatiotemporelle des apports hydrogéologiques à l'estuaire.

• Les apports intra-estuariens totaux

Les résultats des simulations numériques réalisées dans le cadre de l'étude « Quantification de l'évolution spatiotemporelle de la contribution de la nappe de la craie au débit de la Seine-Aval » (Massei et Fritier, 2010) montrent que les différents affluents de la rive droite ont un fonctionnement semblable, avec des apports s'effectuant principalement par ruissellement. Les apports de la rive gauche sont quant à eux plus influencés par le fonctionnement hydro-géologique de leur bassin versant : 65 % des apports du bassin versant de l'Eure sont souterrains et 17 % pour celui de la Risle.

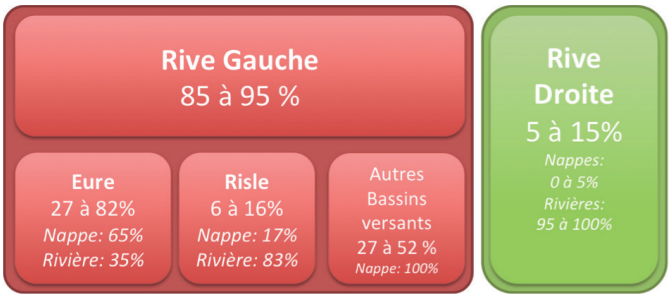


FIGURE 5 Bilan des apports latéraux à l'estuaire de la Seine (la contribution de la nappe correspond aux apports latéraux non drainés par une rivière)

Il est à noter qu'actuellement aucune étude ne permet de quantifier de manière précise les apports hydrogéologiques à l'échelle de l'estuaire ; en particulier le fonctionnement de la nappe d'accompagnement de la Seine dans sa partie estuarienne n'est pas connu. Ainsi l'ensemble des études antérieures à 2014 s'intéressant à l'hydrodynamisme de l'estuaire ne considère que les apports de surface s'effectuant par ruissellement et le plus souvent uniquement ceux en provenance du bassin versant de la Seine en amont de Poses.



ENCART N° 1

J.P. LEMOINE - GIP Seine-Aval

La marée, de la théorie à la tenue du plein caractéristique de la baie de Seine Orientale

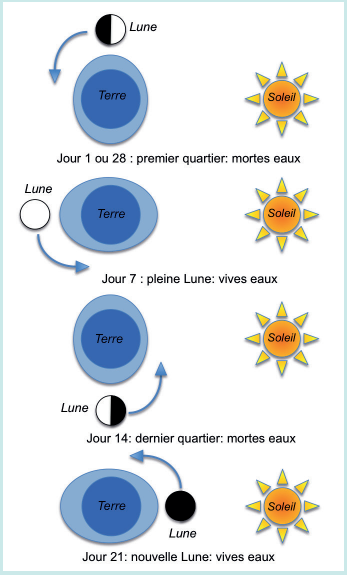
La marée océanique est un phénomène résultant (1) de la force centrifuge liée à la rotation de la terre autour du soleil et (2) des forces d'attraction gravitationnelle exercées par la Lune et le Soleil sur la Terre. L'amplitude de ces forces et donc de la marée dépend de la distance entre chacun de ces astres et de leur alignement. Cette force oscille ainsi au rythme de leurs mouvements relatifs (FIGURE A).

• la marée semi-diurne

La Terre étant en rotation autour d'elle même, l'intensité de la force génératrice de marée en un point oscille au rythme des alignements entre ce point, la Lune et le centre de la Terre ; soit un peu moins de deux fois par jour. En effet, la Terre effectue un tour sur elle-même en 24 heures, alors que la lune tourne autour de la Terre en 28 jours, ainsi pour que la Lune revienne à une latitude donnée il faut que la Terre effectue un tour + 1/28 de tour.

• Les cycles mortes eaux/vives eaux

La Lune tourne autour de la Terre en 28 jours, ainsi la Terre, la Lune et le Soleil sont alignés tous les 14 jours, additionnant les forces d'attraction. Cette configuration engendre les vives eaux*, correspondant aux périodes de fort marnage*. Entre deux vives eaux, lorsque la Lune est en position de premier quartier ou dernier quartier (à 90° de l'axe Terre Soleil), les forces d'attraction dues à la Lune et au Soleil ne sont pas dans le même sens, le marnage est alors moindre, on parle de période de morte eaux*.



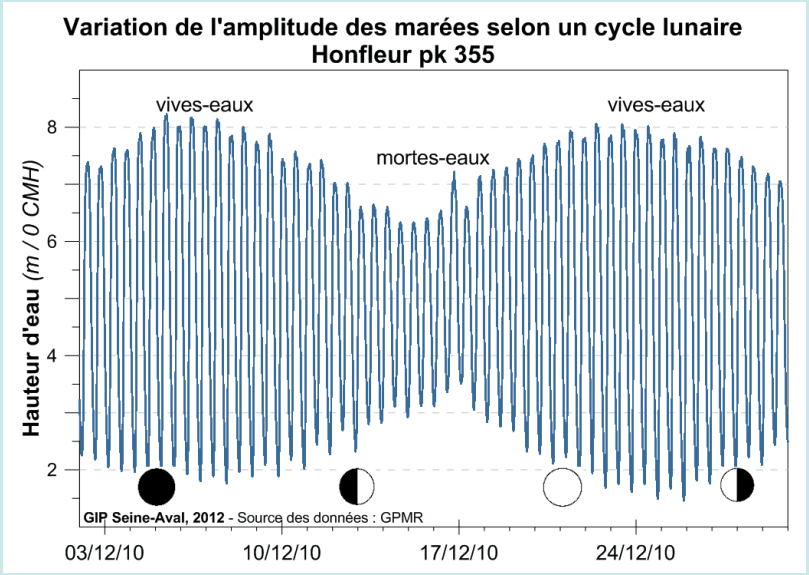


FIGURE A Explication du phénomène de morte eau/vive eau en lien avec la position de la Lune par rapport à la Terre

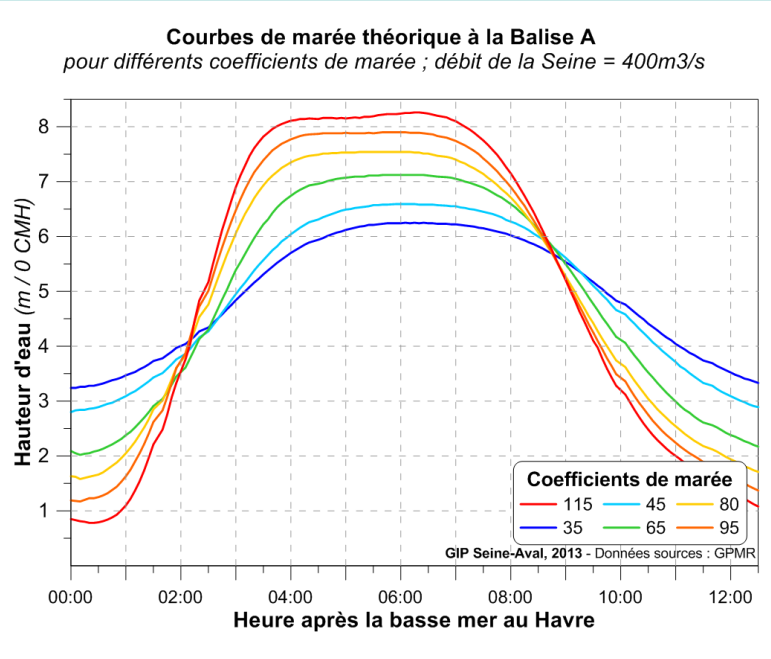
Néanmoins, la force génératrice de marée ne suffit pas à elle seule à expliquer l'allure des marées à la surface du globe, il faut pour cela considérer ce que l'on appelle la marée dynamique qui elle, prend en compte le mouvement des masses d'eau, leurs inerties et interactions avec les fonds marins.

En effet, la marée diffère d'un point du globe à un autre, le relief et la latitude sont les deux principaux facteurs permettant d'expliquer cela.

• Le relief

Les continents et la morphologie* des fonds empêchent l'onde de tourner librement autour de la terre. Les détroits, caps, baies sont autant d'obstacles qui déforment ou encore scindent l'onde de marée. De plus, les frottements induits par le contact de l'onde sur le fond empêchent cette dernière de faire le tour de la Terre en 24 h 50 (en théorie pour que cela soit possible il faudrait que la profondeur minimale des océans soit de 22 km contre 3,5 km en moyenne). Ces interactions avec les fonds génèrent des déformations de l'onde modifiant ainsi son amplitude et sa forme théoriquement sinusoïdale. En baie de Seine, la diminution des profondeurs canalise l'onde de marée et son énergie, ce qui a pour conséquence d'augmenter le marnage.

• Impact de la latitude



L'intensité de la force génératrice de marée est fonction de la latitude. De plus, l'onde générée par cette dernière est soumise à la force de Coriolis dont le module dépend également de la latitude. La forme des courbes de marée est ainsi largement dépendante de la latitude du site considéré.

D'autres facteurs sont considérés dans les calculs de marées: néanmoins les deux listés ci-dessus suffisent à expliquer la forme de la courbe de marée au Havre.

La tenue du plein et la rapidité du flot caractéristiques de la marée à l'embouchure de l'estuaire résultent de la déformation de l'onde provenant de l'Atlantique lors de sa propagation sur les 650 km qui séparent le rebord du plateau continental de la baie de Seine.

FIGURE B **Courbes de marée théorique à la Balise A (CMH = Cote Marine du Havre*)**

La forme convergente d'ouest en est de la Manche et les faibles profondeurs du plateau continental canalisent l'énergie de l'onde de marée venant de l'Atlantique, résultant en une augmentation du marnage de l'ordre de 60 % par rapport à l'amplitude à l'entrée de la Manche (La Manche est ainsi la mer ayant le plus fort marnage d'Europe).

Par ailleurs, la force de Coriolis dévie l'onde de marée et les importants courants qui lui sont associés vers le sud au niveau du Cotentin. D'autre part, les phénomènes de résonances se produisant sur les faibles profondeurs séparant la baie de Seine et les côtes anglaises génèrent des interactions entre les différentes composantes d'origine astronomique du signal de marée, enrichissant ainsi le spectre de marée, d'ondes secondaires et composées (Le Provost *et al.*, 1986).

L'étude du spectre de la marée (ou analyse harmonique) à l'embouchure de l'estuaire montre que la tenue du plein est en fait une double pleine mer, particulièrement visible en vives eaux. Cette dernière est due au déphasage d'ondes secondaires et composées, générées par les interactions avec la morphologie de la Manche. En effet, certaines de ces ondes secondaires (MS) sont en avance de phase par rapport à l'onde principale M2 ce qui a notamment pour effet d'accélérer le flot. Les ondes secondaires ou ondes quart diurnes, et leurs phasages, issues des interactions avec le fond, sont ainsi à l'origine de l'asymétrie flot/jusant et de la tenue du plein observé sur la marée au Havre (FIGURE B) (Le Floch, 1961).

B. LA MARÉE DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE



Après sa propagation en Manche, l'onde de marée caractéristique de la baie de Seine orientale (CF. ENCART N°1), subit plusieurs modifications à son arrivée dans l'estuaire.

• L'atténuation de l'amplitude de marée vers l'amont

La morphologie de l'estuaire de la Seine, en particulier les faibles profondeurs se trouvant au niveau des vasières proches de l'embouchure, favorise la dissipation de l'énergie par frottement par rapport à son amplification liée à la forme convergente de l'embouchure (Bonnefille, 1976). Ainsi l'amplitude de la marée, d'environ 7 m en vives eaux* à l'embouchure, décroit vers l'amont pour n'être plus que de l'ordre du mètre à Poses. Néanmoins, lors des marées de très faibles coefficients, la faible hauteur des pleines mers n'atteint pas les zones intertidales* hautes, où la dissipation de l'énergie par frottement est importante. La concentration de l'énergie par canalisation est alors légèrement supérieure à sa dissipation et le marnage* augmente de l'embouchure au début de la partie endiguée (Tancarville) (Lafite, 2004). L'estuaire de la Seine se classe ainsi dans la catégorie des estuaires hyposynchrones*, mais il peut également être synchrone* voir hypersynchrone* en mortes eaux* et en étiage (FIGURE 6).

• La déformation de la courbe de marée vers l'amont

Durant sa propagation vers l'amont de l'estuaire, l'onde de marée est modifiée par la morphologie des fonds, par la rencontre avec les eaux douces provenant de l'amont, mais aussi par les courants tidaux* en particulier par le courant de jusant* de la marée précédente (FIGURE 7, FIGURE 8). Ainsi pour une hauteur d'eau moyenne de 8 m et une célérité de 8,9 $m.s^{-1}$, l'onde de marée met environ 5 heures pour parcourir les 150 km séparant Honfleur du barrage de Poses. La basse mer quant à elle met pratiquement 6 heures à se propager de Honfleur à Poses. La basse mer de Honfleur a elle-même plus d'une heure de retard sur celle du Havre. Cette différence de vitesse de propagation selon la phase de la marée, liée à une variation de la hauteur d'eau moyenne, engendre un certain « rattrapage » de la pleine mer sur la basse mer qui précède et donc un raidissement de l'onde de marée en flot. Cet écart de vitesse entre le flot et le jusant a également pour conséquence de faire diminuer progressivement vers l'amont la durée des étales de pleine et basse mer, renforçant ainsi l'asymétrie de l'onde de marée. Ainsi, la double pleine mer de l'embouchure disparaît au fur et à mesure que l'onde se propage vers l'amont (Le Hir et Jacinto, 2001).

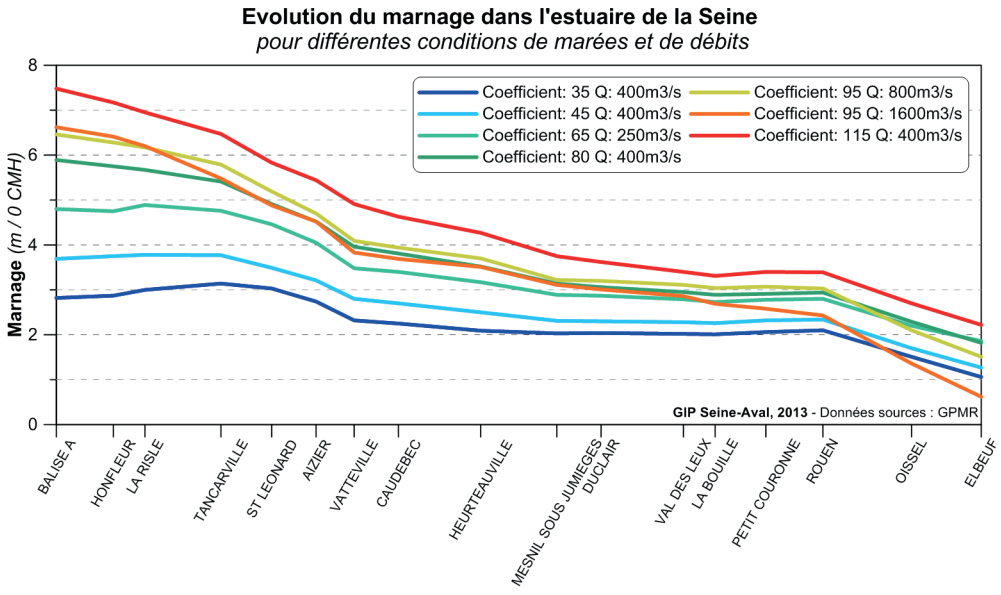
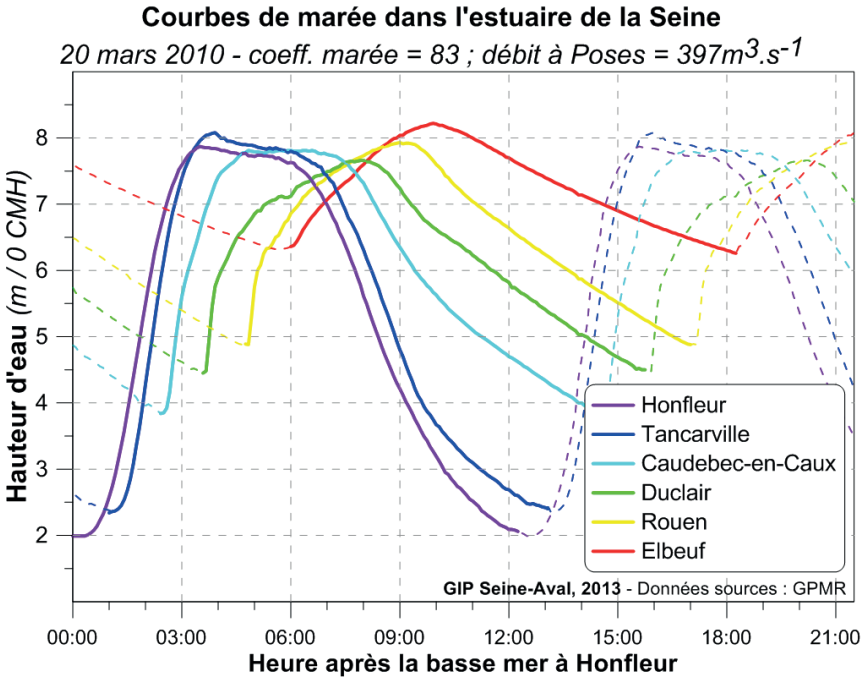


FIGURE 6 Evolution de l'aval vers l'amont du marnage dans l'estuaire de la Seine pour différents coefficients de marée et différents débits



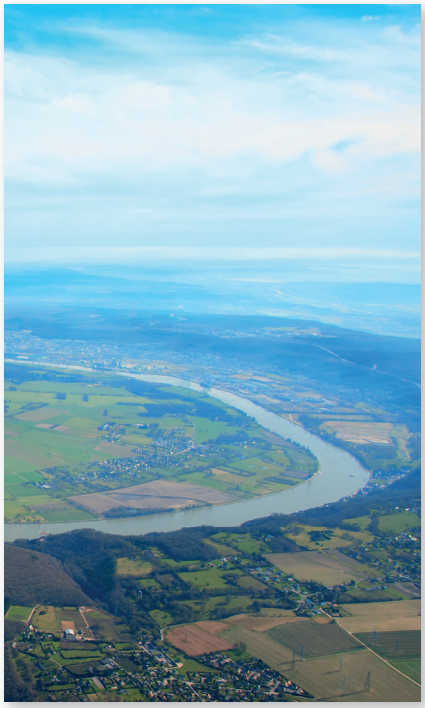


FIGURE 7 Evolution des hauteurs d'eau dans l'estuaire de la Seine (données mesurées)

Cette brève transition jusant/flot, combinée à un flot très rapide peut, dans certaines conditions hydrologiques, donner naissance à un mascaret* (Guézennec, 1999). Très marqué jusqu'en dans les années 1960, ce phénomène a été très largement atténué par les aménagements de l'estuaire. Il ne se produit maintenant que dans des conditions « extrêmes », en particulier durant les vives eaux et lors de la période d'étiage, et ne représente plus qu'une lame d'eau de quelques dizaines de centimètres.

La FIGURE 8 illustre la décroissance du niveau d'eau moyen de l'amont vers l'aval, en lien avec un écoulement qui, indépendamment des courants de marée, est dirigé vers l'aval.

• L'incidence des cycles vives eaux/mortes eaux en estuaire

Au-delà des phénomènes semi-diurnes, la propagation de la marée est également influencée par les alternances vives eaux/mortes eaux. À l'aval, la marée se comporte comme en milieu littoral, les marées basses de vives eaux sont plus basses que celles de mortes eaux. Par contre à l'amont, les marées basses de mortes eaux sont plus basses que celles de vives eaux car le volume oscillant étant moins important en mortes eaux qu'en vives eaux, une plus grande partie de l'eau se trouvant à l'amont peut s'écouler vers l'aval avec le jusant (FIGURE 9).

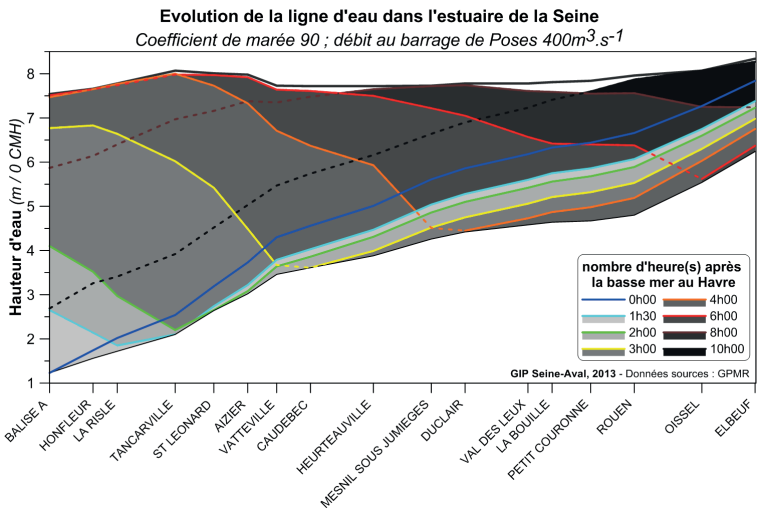


FIGURE 8 Évolution temporelle de la ligne d'eau au cours d'une marée

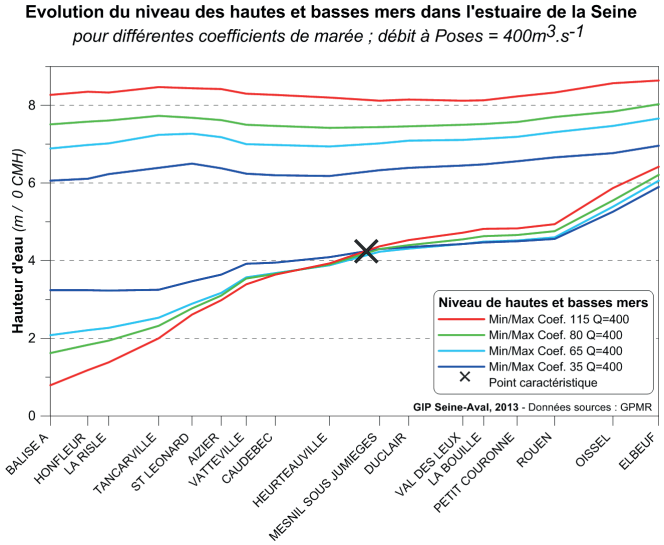


FIGURE 9 Évolution du niveau des hautes et basses mers dans l'estuaire et position du point caractéristique

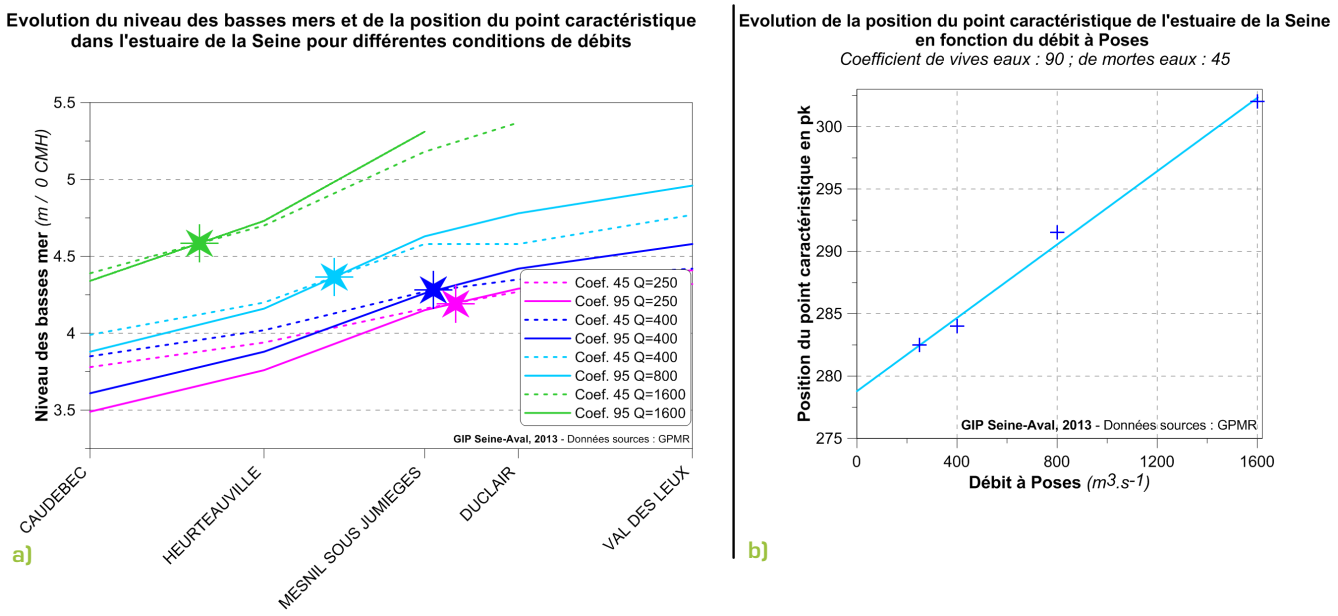


FIGURE 10 a) Position du point caractéristique pour différents débits ; b) position du point caractéristique en pk en fonction du débit de la Seine

La limite aval de ce phénomène, nommé point caractéristique, se situe d'autant plus à l'aval que l'écoulement de jusant est intense. Ainsi, sa position oscille avec les variations du débit : plus le débit est fort, plus les courants de jusant sont importants, et donc plus le point caractéristique se situe en aval. Les modifications de la bathymétrie* peuvent également influencer sur sa position. Les nombreux aménagements qui ont eu pour objectifs d'intensifier les courants de jusant, ont ainsi déplacé le point caractéristique vers l'aval (FIGURE 10).

• L'impact de l'évolution de la morphologie et des aménagements sur la marée en estuaire

Les aménagements successifs de l'estuaire depuis la deuxième moitié du 19e siècle ont été réalisés pour sécuriser et améliorer les conditions de navigation dans l'estuaire (Foussard *et al.*, 2010). Ces modifications de la morphologie de l'estuaire ont eu pour effet de renforcer les courants de jusant (augmentation des vitesses dirigées vers l'aval dans la zone naviguée) et ainsi favoriser l'auto-entretien du chenal en permettant l'expulsion des sédiments les plus fins vers la baie de Seine. L'étude des courbes de marées anciennes illustre ces évolutions hydrodynamiques. Ainsi à Rouen, une diminution des niveaux de basses mers actuels comparativement à ceux de la fin du 19e siècle est clairement observée à partir des données marégraphiques, alors que les niveaux de pleine-mer sont comparables (FIGURE 11). À Tancarville, le double-plein est bien visible sur la courbe de marée de 1876 ; il est lissé aujourd'hui avec une tenue du plein de plus de 2 heures.

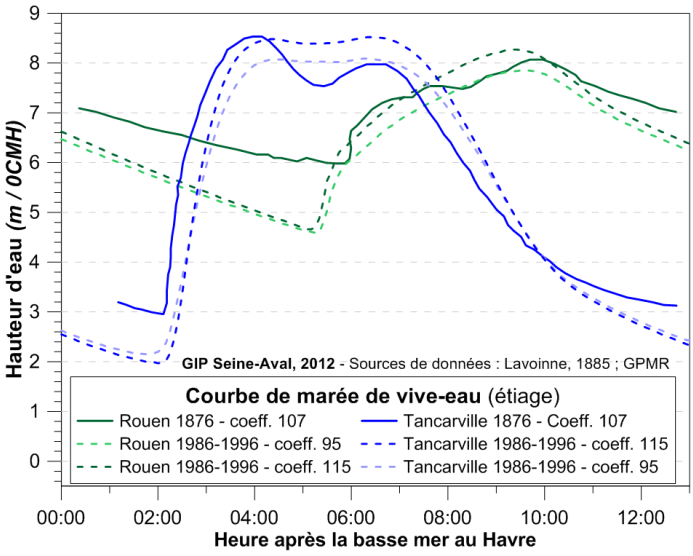


FIGURE 11 Comparaison des courbes de marées de vives eaux de 1876 et 1996 à Rouen et Tancarville

C. LE VENT ET LES VAGUES À L'EMBOUCHURE

Les événements météorologiques sont au même titre que la marée et le débit du fleuve, des contraintes régissant l'hydrodynamisme estuarien. De manière générale, leurs influences sont minimes, néanmoins les épisodes exceptionnels tels que les tempêtes peuvent avoir d'importantes conséquences, tant sur l'hydrodynamique que sur la dynamique des sédiments.

1. Le vent au cap de la Hève

Le vent à la surface de l'eau génère une contrainte de cisaillement* qui pousse les masses d'eau dans sa direction lorsque la hauteur d'eau est faible. Ainsi, si le vent souffle vers la côte, le déplacement des masses d'eau génère une surcote* à l'embouchure de l'estuaire, et inversement si le vent souffle vers la mer.

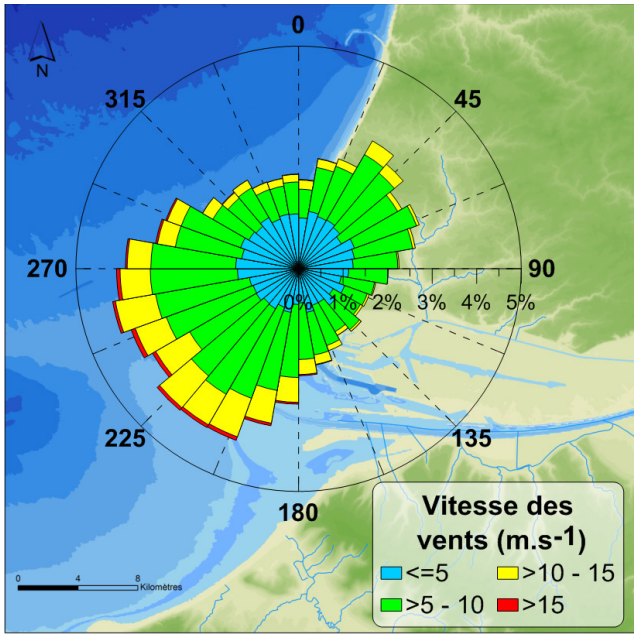


FIGURE 12 Statistiques des vents en baie de Seine entre 1995 et 2011 calculées à partir du modèle météo-france Arpège (Données issues du projet Seine-Aval 4 MODEL)

La rose des vents présentée en FIGURE 12 indique les statistiques des vents à l'embouchure entre 1995 et 2011 calculée à partir du modèle ARPEGE de Météo France (Le Hir et Lafite, 2012). Cette figure montre clairement la prédominance des vents de secteur sud-ouest, en particulier les épisodes de fortes intensités en rouge sur la figure sont majoritairement en provenance du secteur 180° – 270°. En terme d'intensité, les épisodes venteux ont des vitesses généralement inférieures à 10 $m.s^{-1}$. À titre d'exemple, l'analyse statistique des vents mesurés au niveau du cap de la Hève montre que l'intensité d'un vent de période de retour* annuelle est de 11,9 $m.s^{-1}$ (TABLEAU 2; ARTELIA, 2013).

TABLEAU 2 Période de retour de l'intensité du vent mesuré au cap de la Hève (vent moyen en $m.s^{-1}$ sur 3 heures réduit à 10 m d'altitude) (ARTELIA, 2013)

Temps de retour *(années)*	Vent moyen sur 3 h à 10 m *(m/s)*
1	11,9
2	14
5	16,7
10	18,8
20	20,8
50	23,6
100	25,6
200	27,6
500	30,4
1000	32,4

Étant donnée la complexité des phénomènes régissant l'hydrodynamisme de la baie de Seine, il n'est pas possible de corréler directement la surcote à l'embouchure au vent dans la baie de Seine. Celle-ci dépend des conditions météorologiques agissant sur l'ensemble du système Manche/Mer du Nord.

Néanmoins les périodes de retour des surcotes ont été caractérisées à l'embouchure de l'estuaire de la Seine (TABLEAU 3). On notera par exemple que la surcote de période de retour annuelle est ainsi estimée à 75 cm contre –40 cm pour la décote annuelle (SHOM, 2012; CETMEF, 2013).

La surcote générée par le vent au sein de l'estuaire a été déterminée par modélisation dans le cadre de l'étude «Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine» réalisée par Artelia (ARTELIA & GIPSA, 2013).

TABLEAU 3 Périodes de retour de la surcote océanique de pleine mer au Havre (SHOM, 2012; CETMEF, 2013)

Temps de retour *(années)*	Surcote *(m CMH)* [SHOM, 2012]	Surcote et IC à 70 % *(m CMH) – loi exponentielle –* [CETMEF, 2013]	Surcote et IC à 70 % *(m CMH – loi GPD –* [CETMEF, 2013]
1	75		
5	95		
10	104	103 (96-110)	104 (94-113)
20	112	115 (106-123)	120 (105-136)
50	125	130 (119-141)	147 (118-176)
100	132	142 (129-155)	172 (127-216)
1000	161	181 (162-200)	291 (143-439)

Différents scénarios de vents ont ainsi pu être testés grâce au modèle TELEMAC®, l'objectif de cette série de simulations étant de déterminer les effets de vents d'amplitudes et de directions différentes sur le gonflement de l'estuaire. Les 22 scénarios modélisés ont confirmé que la direction 260°, soit le vent marin soufflant en direction de l'embouchure, génère des surcotes maximales. Ainsi, indépendamment de la surcote marine à l'embouchure, un vent de direction 260° et d'une vitesse de 17 m/s (période de retour 5 ans) peut générer à l'intérieur de l'estuaire une surcote d'environ 50 cm au niveau de Rouen (TABLEAU 4).

TABLEAU 4 Résultats des simulations sur l'effet du vent sur le gonflement de l'estuaire à Rouen en cm (ARTELIA, 2013)

Rouen		Amplitude du vent *(m/s)*					
pk = 243		13	17	20,7	24	27,7	
Direction du vent *(° Nord)*	160			– 27			Surcote *(cm)*
	180				– 4		
	200	10	16	24	30		
	230	23	38	58	72	91	
	260	30	50	76	95		
	300		45	69	87		



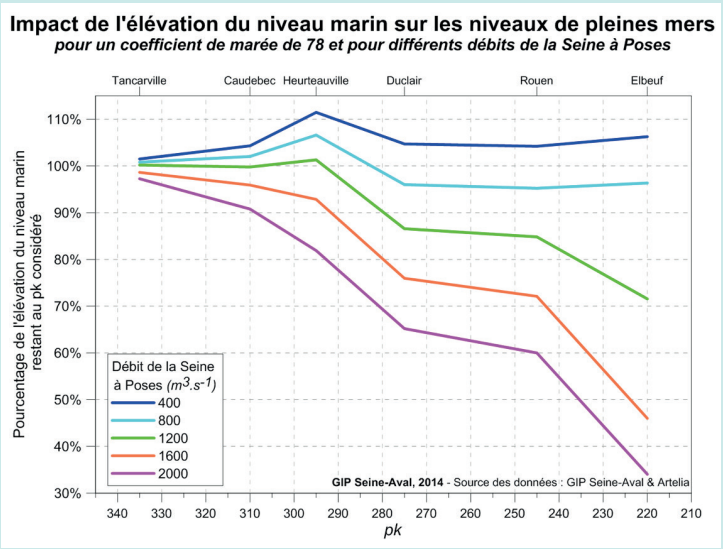
ENCART N° 2

J.P. LEMOINE - GIP Seine-Aval

Modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les pleines mers en estuaire de Seine.

Une des conséquences du changement climatique est l'élévation des niveaux marins. Actuellement, les prévisions du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indiquent que le niveau moyen de la Manche pourrait s'élever de 0,2 m à 1 m (cas extrême) d'ici 2100. Les conditions hydrodynamiques de l'estuaire de la Seine, particulièrement dépendantes des niveaux marins, seront impactées par la variation du niveau moyen de la Manche. Cette évolution des conditions hydrodynamiques liées à l'élévation du niveau marin peut être étudiée grâce aux outils de modélisations numériques.

L'exploitation du modèle développé dans le cadre de l'étude « Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation en estuaire de Seine » a permis de simuler l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer en estuaire de Seine. Avant cette étude, nous ne connaissions l'impact de l'élévation du niveau marin qu'à travers des simulations faites avec des forts débits de Seine et des élévations du niveau marin de 0,6 et 1 m. Ce travail a donc permis de compléter ces connaissances pour des débits compris entre 400 et 2 000 $m^3.s^{-1}$ et des élévations du niveau marin de 0,2 à 1,2 m dans le cas d'un coefficient de marée moyen.



Les principaux résultats issus des simulations faites dans le cadre de cette étude montrent que :

- L'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est principalement régi par le débit de la Seine : plus le débit de la Seine est important, moins l'élévation du niveau marin se propage dans l'estuaire de la Seine ;
- Pour les débits proches du débit moyen de la Seine (400 $m^3.s^{-1}$), l'élévation du niveau marin est retranscrite intégralement, voire amplifiée, sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire (FIGURE C).

FIGURE C Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleines mers pour un coefficient de marée de 78 et pour différents débits

2. Les vagues à l'embouchure

L'estuaire de la Seine est abrité des houles venant de l'Atlantique NE par la presqu'île du Cotentin. Seules les houles de longue période sont réfractées dans la baie mais elles n'abordent l'estuaire que fortement atténuées comme l'illustre la FIGURE 13 (Le Hir *et al.*, 2001 ; Grasso, 2013).

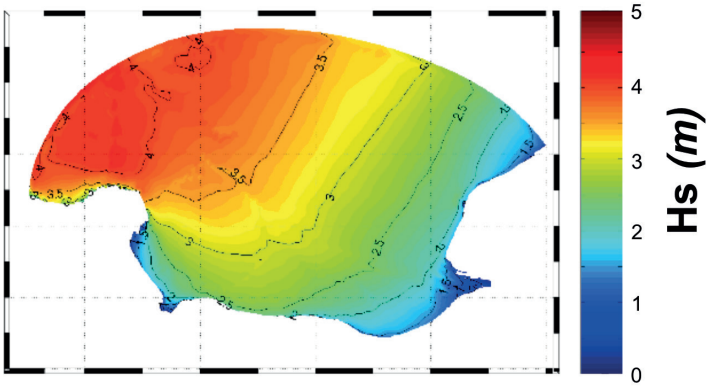


FIGURE 13 Illustration de la propagation d'une houle d'ouest dans la baie de Seine, représentation de la hauteur significative des vagues le 1er mars 2008 (simulation WaveWatch3 projet Seine-Aval 4 MODEL)

De manière générale, les vagues atteignant l'embouchure sont majoritairement générées dans la baie de Seine par les vents locaux. Ces vagues sont caractéristiques des vagues générées sur un fetch* court conforme aux dimensions de la baie de Seine.

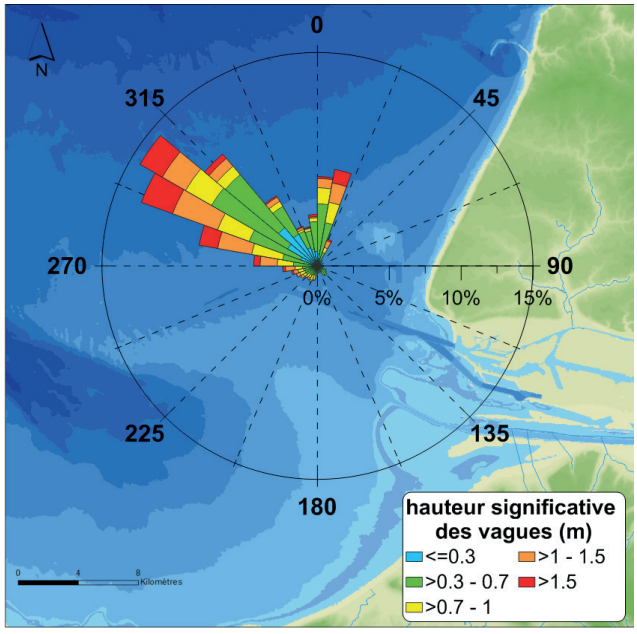


FIGURE 14 Rose des vagues à l'embouchure calculée à partir des données de la bouée Metzinger entre février 2011 et Mai 2012 (Données Candhis CETMEF)

La FIGURE 14 est issue des mesures de houles réalisées par le CETMEF entre février 2011 et mai 2012 au niveau de la bouée « Le Havre Metzinger », dans le cadre de son réseau de mesure CANDHIS. Cette figure, représentant la répartition de la hauteur de la houle en fonction des directions de provenance, met bien en évidence la relation entre la hauteur des houles atteignant l'embouchure et le fetch associé. En accord avec la géométrie de la baie de Seine, les vagues les plus fréquentes et les plus hautes de cette série de mesures sont celles provenant du secteur nord-ouest. Par contre, il est surprenant de voir que durant cette période les houles de secteur sud-ouest sont très peu représentées alors qu'il s'agit du secteur de vent localement dominant. L'allure de ce spectre peut s'expliquer par le fait que le fetch correspondant à la direction de vent dominante est faible (une vingtaine de km) ainsi les vagues générées par ce vent constituent une mer de vent, un clapot de faible amplitude et de période courte. Or, les houlographes directionnels sur bouée tel que celui de la bouée « Le Havre Metzinger » sont réputés pour sous-estimer la mesure de ce type d'agitations (Jacinto, 2005).

Remarques : *On trouve dans la littérature d'autres roses des agitations, notamment dans le fascicule Seine-Aval Courants, Vagues et marées ou encore dans la thèse de Jacinto 2005, ces roses sont issues des observations visuelles réalisées au cap de la Hève entre 1955 et 1960. Contrairement aux données issues des bases de données plus récentes (Mesure : Candhis et modèle : Anemoc ; du Cetmef), elles mettent en évidence une plus grande importance des agitations de secteur Sud-Ouest. Étant donné le caractère subjectif et l'âge de ces données, elles ne seront pas discutées dans ce fascicule.*

Ensuite, lors de sa propagation vers l'estuaire, la houle perd progressivement son énergie, qui est dissipée par frottement sur les faibles profondeurs de l'embouchure. Ainsi, une houle de hauteur significative 1 m au large de l'embouchure, ne mesurera plus qu'une cinquantaine de centimètres à l'aval de la fosse nord, au droit de Port 2000, et sera complètement dissipée au niveau du pont de Normandie (FIGURE 15).

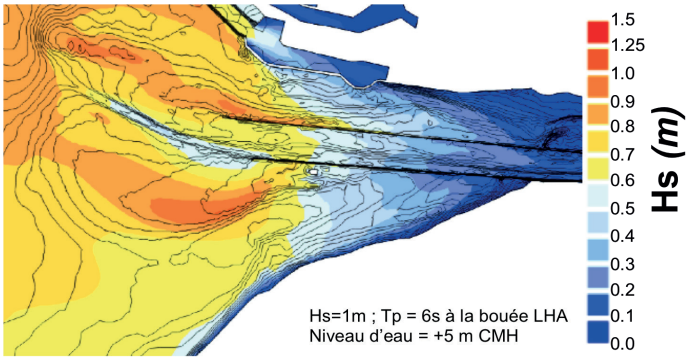


FIGURE 15 Illustration de la propagation d'une houle d'ouest à l'embouchure, représentation de la hauteur significative des vagues le 1er mars 2008 (simulation WaveWatch3 projet Seine-Aval 4 MODEL)

• Importance de la marée dans la prise en compte de l'agitation

En règle générale l'étude de l'agitation liée aux vagues est faite indépendamment de la marée. Or en baie de Seine, la grande amplitude des marées crée d'importantes variations de la hauteur d'eau et des courants dont les effets sur les vagues ne sont pas négligeables. Ainsi les courants de jusant amplifient la houle par réfraction alors que sa propagation vers les faibles profondeurs entraine une dissipation de l'énergie des vagues et donc une diminution de leur hauteur. La FIGURE 16 issue d'une étude du CETMEF intitulée « Modélisation des effets de la marée sur les hauteurs de houle aux abords de Port 2000 au Havre », représente la moyenne sur des différences absolues entre les hauteurs de houle prédites en considérant les effets de la marée sur les hauteurs d'eau et les courants et les hauteurs de houles prédites indépendamment des effets de la marée. Les plus fortes valeurs correspondent aux zones où la hauteur de houle est modifiée par la marée (CETMEF, 2011).

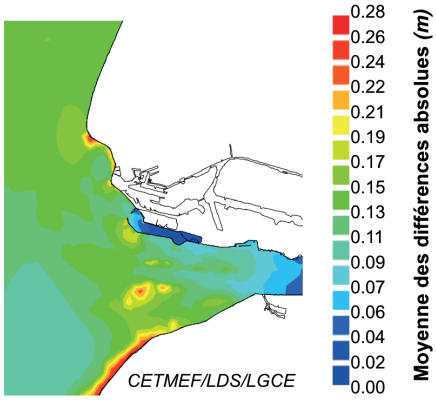


FIGURE 16 Moyenne des différences absolues sur les hauteurs de houle prédite avec et sans prise en compte des effets de la marée sur les hauteurs d'eau et les courants (CETMEF, 2011)

D'un point de vue hydro-sédimentaire, ces interactions vagues/marées ont d'importantes répercussions. En effet, plus les vagues sont hautes et plus la hauteur d'eau est faible, plus la contrainte exercée par les vagues sur le fond est importante et est susceptible de remobiliser les sédiments (Jacinto, 2005).

D. HYDRODYNAMISME DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

1. Les courants

La propagation de la marée de l'embouchure jusqu'au barrage de Poses induit un déplacement important des masses d'eau. En effet à chaque marée, c'est entre 100 et 150 millions de m^3 d'eau salée (respectivement en morte eau et en vive eau) qui rentrent et sortent de l'estuaire sous l'action des marées (Le Hir, 2001). Ce volume, appelé volume oscillant*, génère des courants importants dirigés vers l'amont pendant le flot et vers l'aval en jusant. Il est également à l'origine du gradient* de salinité (§ I.D.2). L'intensité de ces courants est en lien direct avec la forme de l'onde de marée, en particulier son asymétrie. Ainsi durant les 3 heures de flot, les courants sont très intenses et peuvent atteindre 2 m. s^{-1} au niveau de l'embouchure. Alors qu'en jusant, les vitesses maximales sont de l'ordre de 1,2 m. s^{-1}, mais ceci pendant quasiment 5 heures (FIGURE 17).

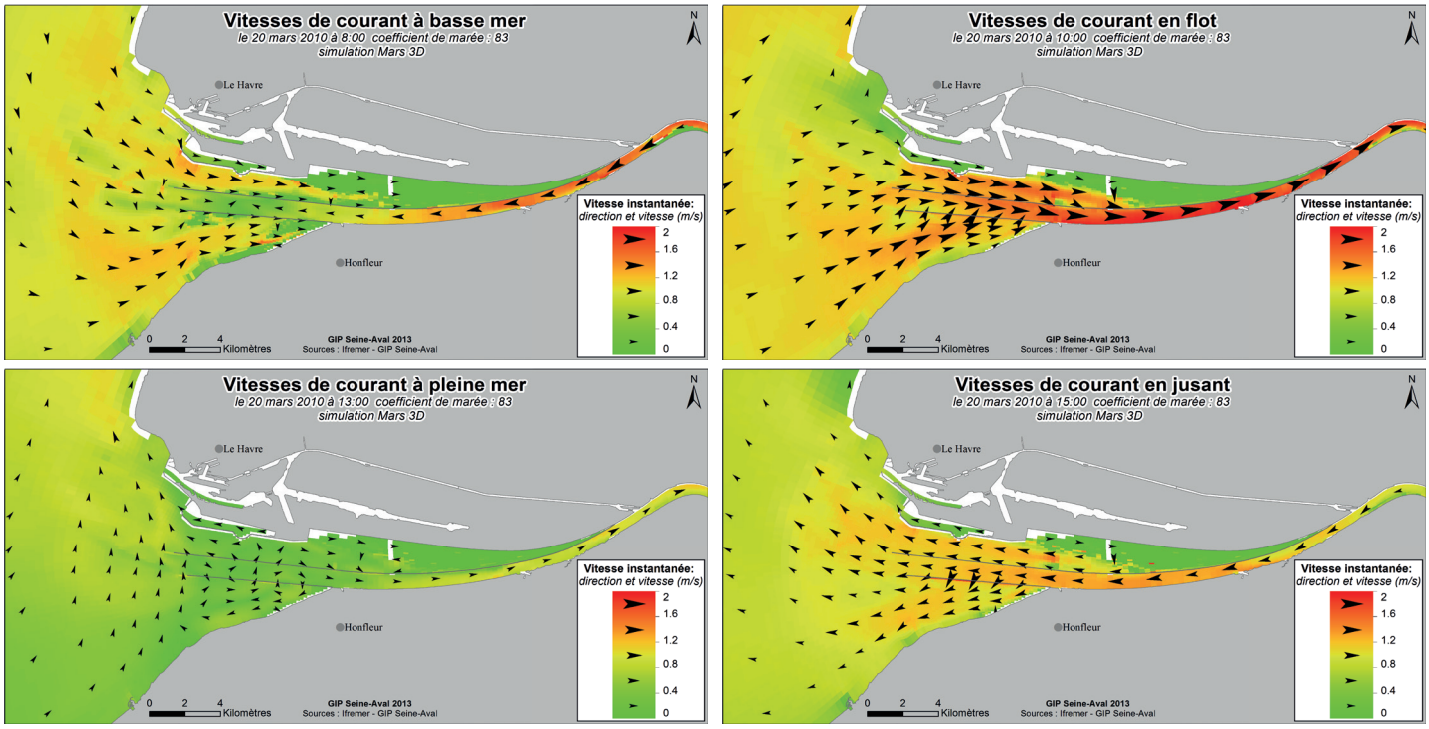
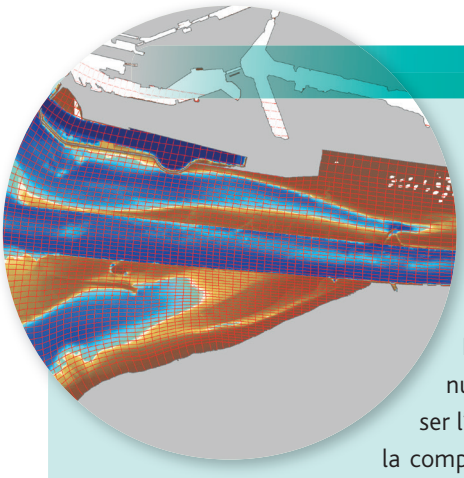


FIGURE 17 Répartition des vitesses de courants au niveau de l'embouchure pour différents moments de la marée en conditions moyennes (débit: 397 $m^3.s^{-1}$, coeff. de marée 83) vitesses moyennées sur la hauteur d'eau

En fin de marée basse, à l'arrivée du flot, l'opposition des courants de flot et de jusant entre les digues a pour conséquence de favoriser la propagation de l'onde de marée dans les fosses nord et sud également appelées fosses de flot.
En effet, une des particularités morphologiques de l'estuaire de la Seine est la présence des deux digues submersibles nord et sud. Mises en place à partir des années 1950 pour faciliter la navigation et permettre aux navires marchands à fort tirant d'eau* de remonter jusqu'à Rouen, ces digues gouvernent l'hydrodynamisme de l'embouchure.



ENCART N° 3

F. GRASSO - IFREMER

Modélisation numérique hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine

Intérêts de la modélisation numérique

En s'appuyant sur les mesures *in situ* (calibration, validation), la modélisation numérique représente un outil complémentaire aux mesures permettant de spatialiser l'analyse des processus hydro-sédimentaires de l'estuaire de la Seine et d'améliorer la compréhension de son fonctionnement. Utilisés comme « simulateurs », les modèles numériques permettent également d'étudier le comportement du système estuarien face à différents scenarii de forçages hydrologiques, climatiques ou anthropiques (Grasso, 2014). Il est ainsi possible d'analyser quels seraient les impacts potentiels de changements climatiques (ex. tempêtes, montée du niveau de la mer), hydrologiques (ex. crues/étiages) ou anthropiques (ex. dragages*, ouvrages maritimes, pollution) sur la dynamique sédimentaire estuarienne. De par sa capacité d'intégration, l'outil de modélisation numérique a pour ambition d'aider à répondre aux questionnements scientifiques et sociétaux associés au fonctionnement physique, biologique, chimique et écologique de l'estuaire et de la baie de Seine.

Modèle numérique hydro-morpho-sédimentaire MARS3D

La modélisation hydro-morpho-sédimentaire* développée au cours des programmes Seine-Aval 1, 2, et 3 (SiAM – Ifremer) permettait de simuler les processus hydrodynamiques (courants, hauteurs d'eau), hydrologiques (salinité), sédimentaires (matières en suspension, érosion/dépôt) et morphodynamiques à moyen terme (2-5 ans) pour des forçages hydrodynamiques réalistes liés à la marée, au vent et au fleuve (Le Hir, 2001 ; Waeles, 2005). Dans l'optique d'augmenter la résolution du modèle (embouchure et biefs amont) ainsi que d'étendre son emprise à l'ensemble de la baie de Seine (de Cherbourg à Fécamp), le modèle morpho-sédimentaire SiAM a été couplé au modèle hydrodynamique MARS3D (Ifremer) (Lazure, 2008) en version curviligne dans le cadre du projet MODEL de Seine-Aval 4 (FIGURE D).

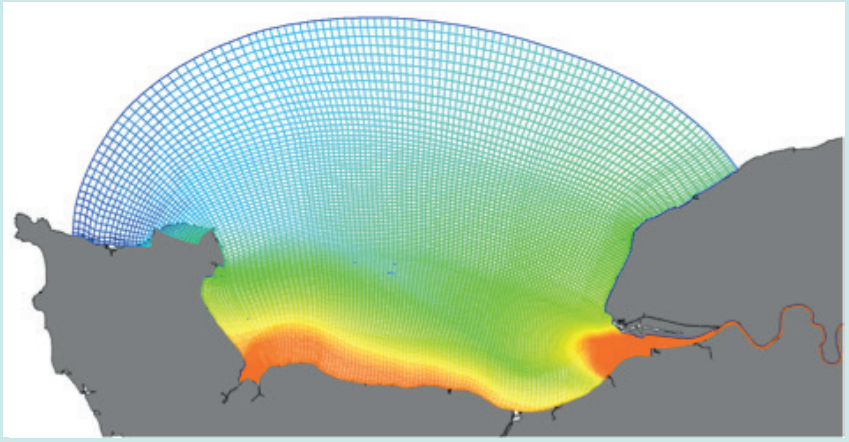


FIGURE D Représentation de l'emprise du modèle MARS3D en baie de Seine

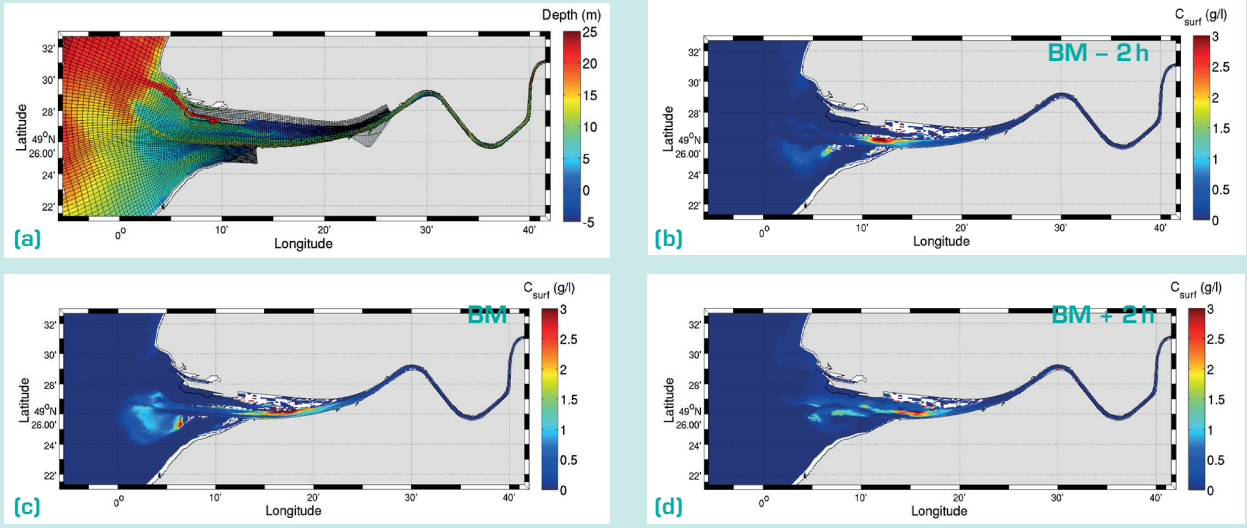


FIGURE E **(a) Représentation de la bathymétrie et du maillage du modèle MARS3D à l'embouchure de l'estuaire de la Seine. (b, c et d) Simulations de la concentration en matières en suspension à la surface de l'embouchure en fin de jusant et début de flot (au niveau du Havre) le 10 décembre 2010 ; (b) Basse Mer – 2 h ; (c) Basse Mer ; (d) Basse Mer + 2 h. Les fortes concentrations (en rouge sur les figures b, c et d) sont représentatives de la structure turbide caractéristique de l'estuaire, appelée le « bouchon vaseux* »**

Le maillage curviligne du modèle permet de mieux respecter la géométrie de l'estuaire, d'optimiser le temps de calcul et d'améliorer l'estimation des flux sédimentaires. La résolution des mailles de calcul est de l'ordre de 2 km au large et d'environ 100 m à l'embouchure de l'estuaire. En plus des forçages hydrodynamiques liés à la marée, au vent et au fleuve, le forçage des vagues est simulé par l'intermédiaire du modèle WAVEWATCH III® considérant la houle venue du large, simulée par un modèle de plus grande emprise, et la mer de vent générée en baie de Seine. Le modèle hydrodynamique est couplé à un modèle sédimentaire pour les mélanges sablo-vaseux (Le Hir 2011) simulant les processus d'érosion-suspension-déposition pour différentes classes de sédiments (un gravier, trois sables et deux vases) initialement distribuées selon les faciès sédimentaires observés en estuaire de Seine (FIGURE E, PROJET HYMOSED – SEINE-AVAL 5).

Ces aménagements ont eu pour effet de renforcer les vitesses entre les digues et plus particulièrement dans le chenal de navigation où les grandes profondeurs réduisent l'effet du frottement sur le fond.

La canalisation des courants par les digues a un effet particulièrement important sur les courants de jusant qui sont maximaux entre les digues. Cette accentuation « artificielle » du jusant entre les digues avait été recherchée lors de la conception des digues pour éviter la sédimentation dans le chenal voir même pour auto-draguer le chenal (Le Hir, 2001). La FIGURE 18, représentant les vitesses résiduelles barotropes* (moyenne sur la hauteur d'eau), illustre ce phénomène ; en effet les vitesses résiduelles entre les digues sont toutes dirigées vers l'aval et leurs amplitudes est largement supérieures aux vitesses observées dans les fosses nord et sud.

Cette carte démontre également qu'un fleuve coule vers la mer malgré la marée !

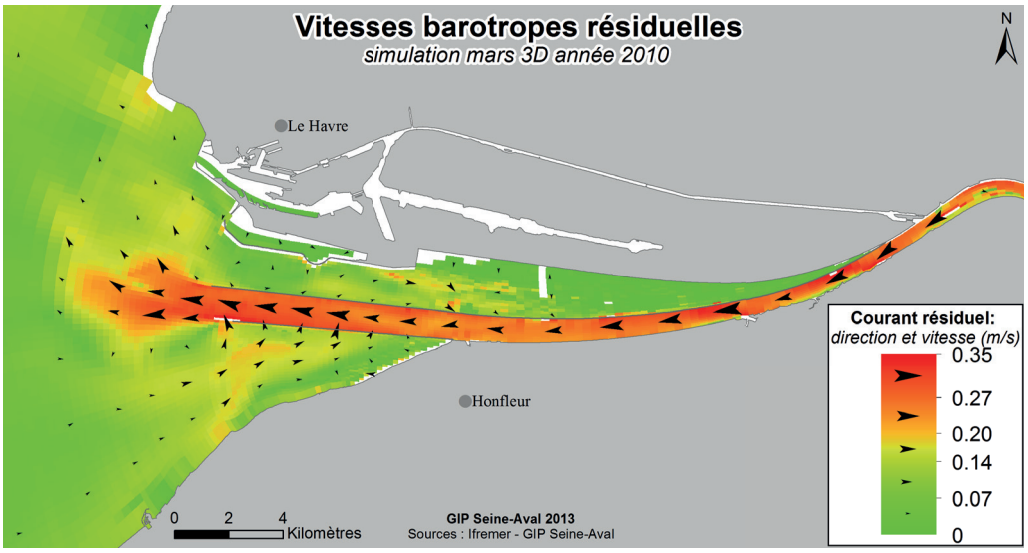


FIGURE 18 **Répartition des vitesses de courants barotropes résiduelles pour l'année 2010**

2. La salinité

À l'embouchure de l'estuaire, les eaux douces drainées par la Seine se mélangent aux eaux salées apportées par la marée, générant une zone de mélange appelée gradient de salinité. La position et l'emprise de cette zone sont principalement contrôlées par l'intensité des marées et par les débits.

À l'échelle de la marée, le va-et-vient du volume oscillant entrainé par la marée régit la salinité à l'embouchure. Lors du flot et jusqu'à l'étale de pleine mer, les eaux marines remontent dans l'estuaire et induisent une montée progressive de la salinité. Après la renverse, les courants s'inversent et le niveau d'eau s'abaisse (jusant) ; la salinité diminue alors jusqu'à la fin de l'étale de basse mer (FIGURE 19).

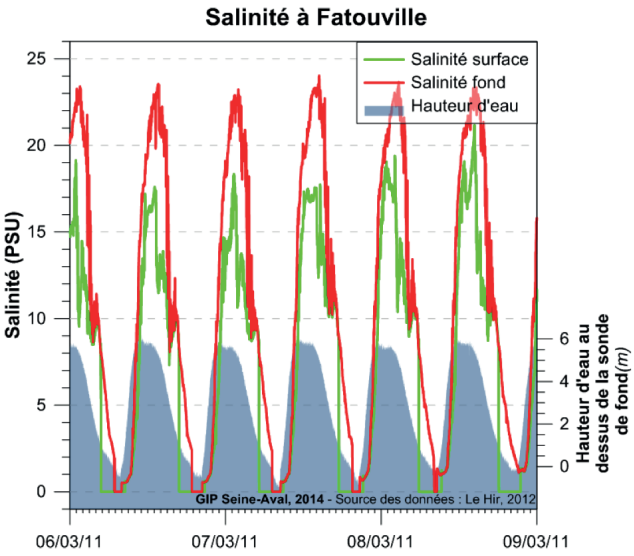


FIGURE 19 Variation de la salinité en lien avec la marée à l'embouchure (site de Fatouville). Données mesurées dans le cadre du Projet Seine-Aval 4 MODEL (Le Hir, 2012)

À l'échelle annuelle, la salinité moyenne représentée sur la FIGURE 20, est à mettre en lien avec les conditions hydrodynamiques de l'embouchure, en particulier avec les vitesses de courants résiduelles*. En effet, le courant résiduel étant dirigé vers l'aval entre les digues, la majeure partie des eaux douces y transite, rendant la salinité plus faible que dans les fosses nord et sud où l'influence marine est plus forte. La limite « officielle « de dessalure des eaux se trouve à Vieux-Port au pk* 325 au niveau de l'extrémité droite de la flèche n° 3 (FIGURE 20), néanmoins cette limite est largement dépendante des conditions hydrologiques et peut soit remonter vers l'amont durant des phases d'étiages sévères, soit descendre vers l'aval en crue.

Le mélange des eaux douces et salées de densités différentes implique également un gradient vertical de salinité : l'eau salée, plus dense, s'écoulant sous l'eau douce (FIGURE 21). Ceci explique le phénomène de circulation estuarienne avec les eaux de surface (moins salées) qui s'écoulent vers l'aval et les eaux proches du fond (plus salées) qui s'écoulent vers l'amont. Cet écoulement est lui-même sous l'influence de facteurs qui fluctuent à l'échelle saisonnière (alternance crue / étiage et morte-eau / vive-eau), dont la combinaison contrôle l'intensité de la variation de la salinité en un point. Ce phénomène contribue également à la formation du bouchon vaseux* (CF. § II.C.5).

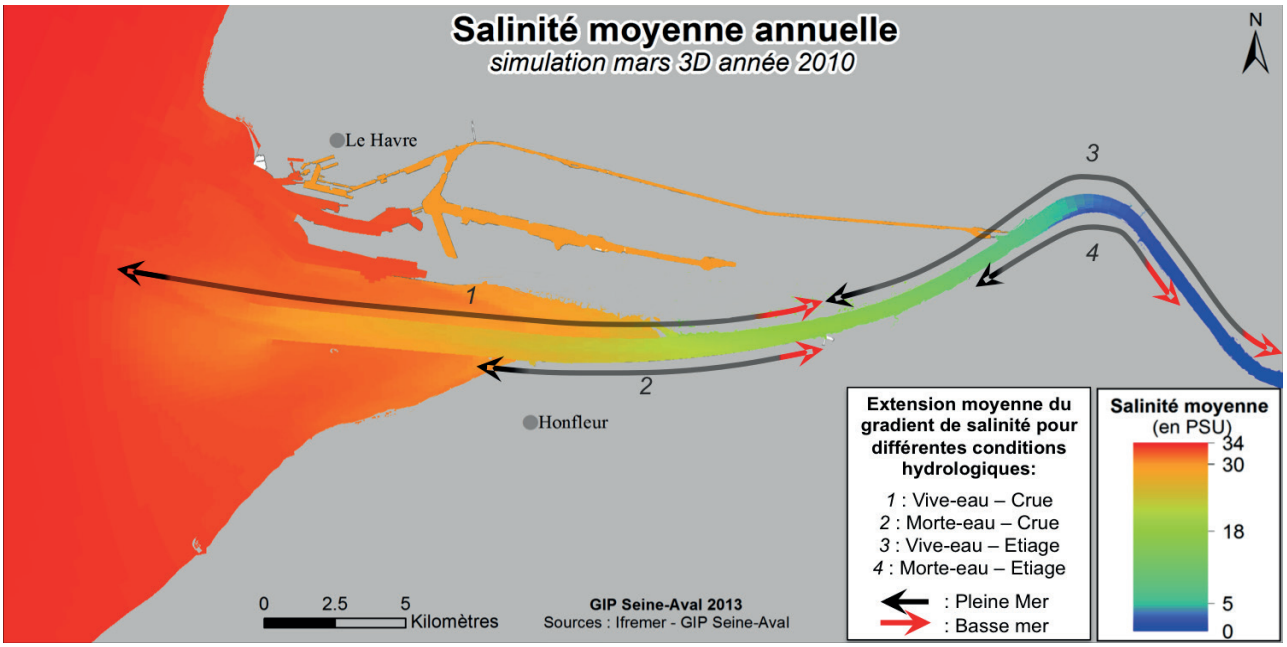


FIGURE 20 Représentation des salinités moyennes à l'embouchure pour l'année 2010

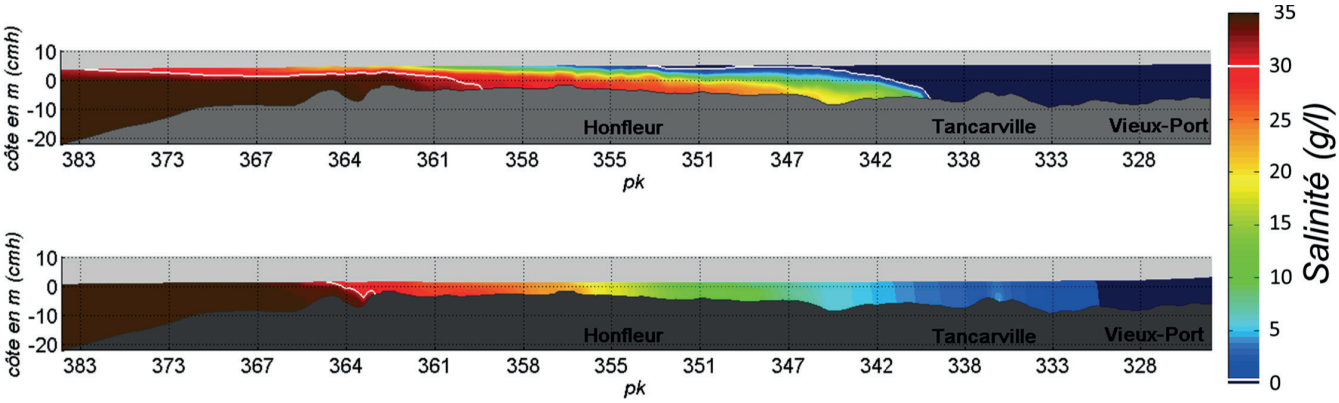


FIGURE 21 Illustration du gradient vertical de salinité pour deux conditions hydrologiques contrastées. En haut : basse mer de morte eau et en crue (débit : 1076 $m^3.s^{-1}$, coeff. : 29, le 13 mars 2007). En bas : pleine mer de vive eau et en étiage (débit : 248 m^3s^{-1}, coeff. : 94, le 2 aout 2007)

3. Temps de transit ou de renouvellement des eaux douces en estuaire

La FIGURE 22 représente le temps nécessaire aux eaux en provenance de la Seine amont pour rejoindre l'embouchure. Cette modélisation a été effectuée pour différents débits de la Seine à Poses (les apports latéraux ne sont pas considérés). En étiage, avec des débits de l'ordre de 150 $m^3.s^{-1}$, les eaux douces en provenance du bassin versant « amont » mettent 25 jours pour s'écouler jusqu'en baie de Seine ; contre seulement 3 jours en période de crue, pour des débits avoisinant les 1600 $m^3.s^{-1}$.



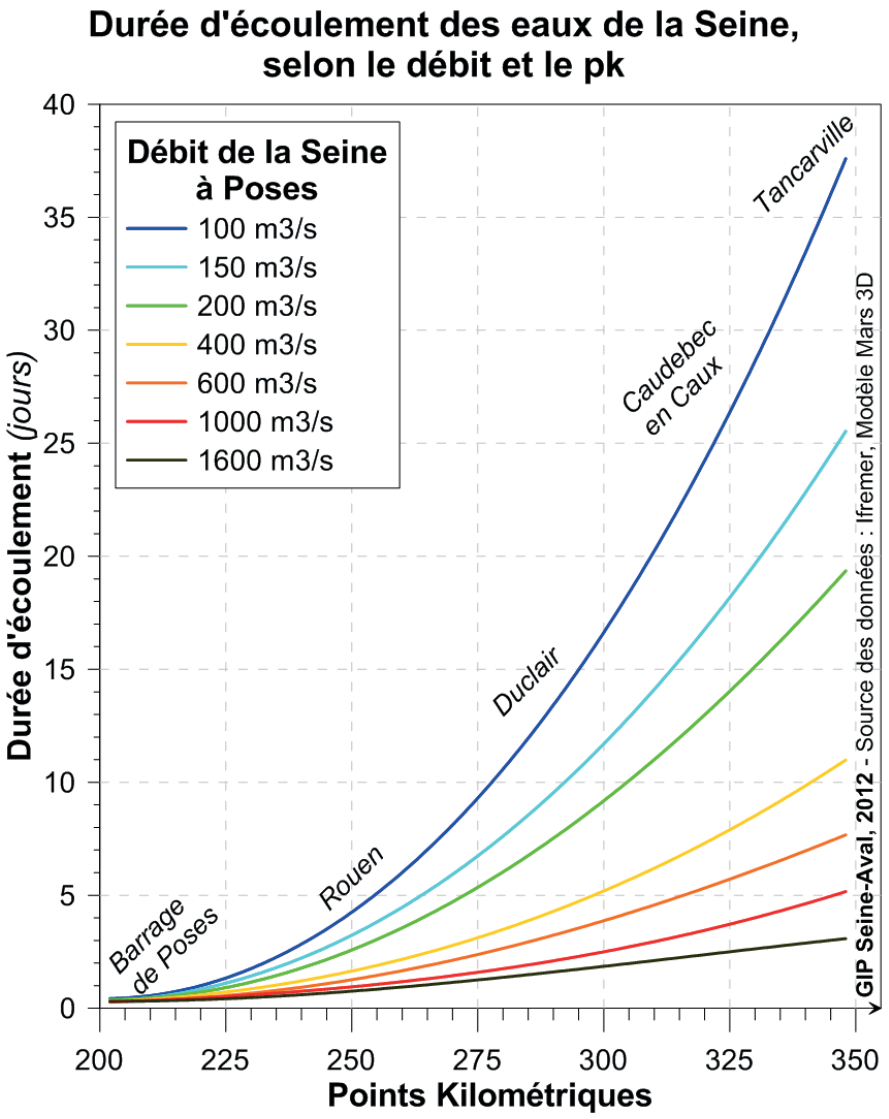


FIGURE 22 Temps de transit des eaux de Poses à l'embouchure pour différents débits de la Seine à Poses

II LES MATIÈRES EN SUSPENSION DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE



Le terme matières en suspension ou MES désigne les particules solides, de taille supérieure à 0,45 µm, qui sont transportées en suspension au sein de la masse d'eau. De caractéristiques variables dans le temps et l'espace, elles se déposent par sédimentation quand les conditions hydrodynamiques ne les maintiennent plus en suspension dans la colonne d'eau.

L'estuaire de la Seine, en tant qu'exutoire d'un bassin versant de près de 80 000 km², reçoit une importante quantité de matières en suspension (MES) issue de l'érosion et des activités anthropiques. Ce flux de MES aux origines et aux caractéristiques variées combiné aux forçages hydrodynamiques précédemment décrits est à l'origine des processus hydro-morpho-sédimentaires estuariens, objets de ce fascicule.

A. CARACTÉRISTIQUES DES MES ESTUARIENNES

En fonction de leurs natures, de leurs origines, de leurs histoires, les particules en suspension ont des caractéristiques différentes. À l'échelle de l'estuaire de la Seine, les processus hydro-sédimentaires sont à la fois dépendants de la quantité et des propriétés cohésives des matériaux disponibles. Les paragraphes suivants s'attacheront à décrire les différents types de matériaux particulaires en suspension que l'on peut rencontrer dans l'estuaire de la Seine.

Au sein des MES, il est possible de différencier deux classes en fonction de leurs tailles. D'un côté, les matériaux considérés comme dissous correspondent aux particules dont la taille caractéristique est inférieure à 0.45 µm ; de l'autre le matériel de taille supérieure dit particulaire. La fraction dissoute est principalement constituée des molécules, des macromolécules, et des colloïdes d'origine minérale ou organique*. Les interactions entre cette fraction des MES et les processus hydro-sédimentaires sont supposées négligeables et n'ont jamais été étudiées sur l'estuaire de la Seine. Les caractéristiques de la fraction dissoute ne seront donc pas détaillées dans ce fascicule.

La fraction particulaire des sédiments est composée de matériaux d'origines diverses, provenant soit du bassin versant ou du milieu marin (on parle de matériaux allochtones*) soit de la production intra-estuarienne (autochtone*). La composition de ces matériaux est minérale ou organique. Les particules organiques peuvent globalement avoir 3 origines différentes :

- les débris végétaux et humiques issus du lessivage du bassin versant
- les rejets anthropiques
- la production primaire

La FIGURE 23 présente les grandes familles de matériaux observables dans les eaux estuariennes.

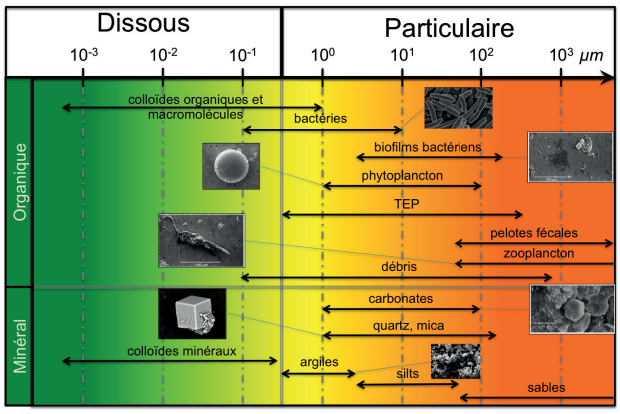


FIGURE 23 Présentation des grandes classes de particules en suspension rencontrées dans les eaux estuariennes

L'étude des processus hydro-sédimentaires s'attache principalement aux particules minérales (sédimentaires), caractérisées par leurs propriétés physiques (taille, poids, cohésion). Ainsi l'on distinguera deux grandes familles de sédiments :

- les sédiments fins,
- les sédiments grossiers

1. Les sédiments fins

Les particules fines ou vases sont communément définies selon un critère de taille, supérieures à 0,45 µm et inférieures à une coupure granulométrique variant selon les écoles scientifiques entre 40 et 100 µm (Poizot, 2009).

Remarques : *en pratique, les études s'intéressant à l'estuaire de la Seine utilisent soit une coupure à 50 µm (norme AFNOR)*

soit à 63 µm (norme anglo-saxonne). La valeur « singulière » de 63 µm est issue d'un formalisme dit diamètre phi qui consiste à utiliser le logarithme en base 2 de l'inverse du diamètre exprimé en mm, ainsi un diamètre de 63 µm correspond à un diamètre phi de 4 (ce formalisme sera utilisé par la suite).

Les particules minérales constituant les sédiments fins sont classiquement subdivisées en deux familles :

- les silts dont la taille est comprise entre 63 µm et 2 ou 4 µm,
- les argiles dont la taille est inférieure à 2µm ou 4 µm selon les auteurs. Ces dernières, issues de l'altération des roches, sont les plus abondantes particules sédimentaires, elles représentent environ 69 % des sédiments continentaux. En fonction du climat et des roches mères, les processus d'érosion donnent naissance à différents types d'argiles tels que illite, chlorite, kaolinite, smectite, etc. La propriété majeure des argiles est leur caractère cohésif, lié à leurs charges surfaciques et aux interactions de Van der Waals.

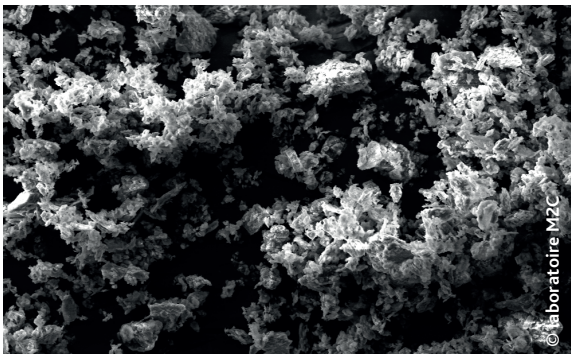


FIGURE 24 Image MEB d'agglomérats de cristaux de kaolinite

2. Les sédiments grossiers, non cohésifs

Les particules non-cohésives sont définies comme les particules de taille supérieure à 63 µm. Dans la pratique, cette fraction sédimentaire n'a pas de limite supérieure de taille, néanmoins en estuaire, elle est principalement composée de sables, de graviers et de galets.

Les sables dont la taille est comprise en 63 µm et 2 mm selon la classification de Wentworth peuvent être lithoclastiques* (issu de l'érosion de roches détritiques) ou bioclastiques* (produit de la désagrégation des coquilles).

La présence du barrage de Poses, ainsi que les faibles vitesses de courants rencontrées en amont de l'estuaire limitent le flux de sédiments grossiers en provenance de l'amont. À l'aval du barrage, les affluents n'ont pas des débits suffisants pour charrier des sédiments grossiers. Ces apports (amont et latéraux) sont donc considérés comme négligeables.

Les apports en sédiments grossiers à l'estuaire sont ainsi soit marins (érosion des fonds de la baie de Seine ou origine bioclastiques) soit autochtones (érosion des fonds du lit mineur de la Seine, érosion des berges, phase bioclastique (FIGURE 25) sous forme de thanatocénoses* : principalement des débris coquillers) (Lesourd, 2000).



FIGURE 25 Benne de prélèvement sédimentaire contenant du sable bioclastique

3. Mode de transport des sédiments

Les sédiments fins et les sédiments grossiers, de par leurs différences de tailles et de poids, se différencient par leur mode de transport. De manière générale, les sédiments fins sont transportés en suspension alors que les sédiments grossiers vont adopter des comportements différents en fonction de leurs densités et des conditions hydrodynamiques du milieu. Les sables se déplacent en saltation* (en effectuant des sauts par rapport au fond), les graviers et les éléments plus grossiers roulent sur le fond, on parle de charriage* (FIGURE 26).

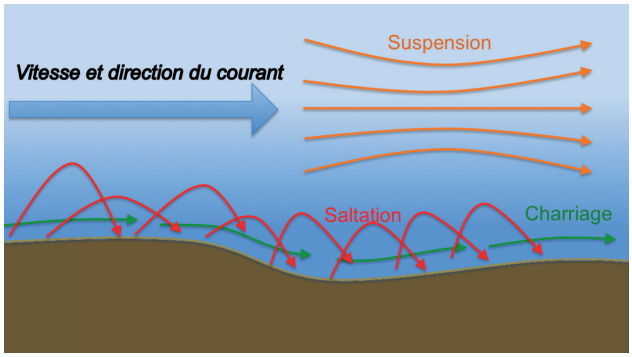


FIGURE 26 Illustration des différents modes de transport des sédiments

De manière générale, les matériaux transportés par charriage ou saltation à proximité du fond sont des matériaux non cohésifs. Les matériaux transportés en suspension sont quant à eux généralement cohésifs.

Le diagramme suivant basé sur la classification des particules établie par Wentworth en 1922 associe la taille, le type des particules, à leurs modes de transport et à une indication qualitative de leurs capacités cohésives (FIGURE 27).

Diamètre			Classification de Wentworth	Mode de transport	Cohésion
mm	µm	phi			
<0.00045	<0.45	<11	colloïde	suspension	
0.00045	0.45	11	argile		
0.004	4	8	limons		
0.063	63	4	sablons		
0.125	125	3	sables fins	saltation	
0.25	250	2	sables moyens		
0.5	500	1	sables grossiers		
1	1000	0			
2	2000	-1	granulats	chariage	
4	4000	-2	graviers		
60	60000	-6	blocs		
256	256000	-8	blocs		

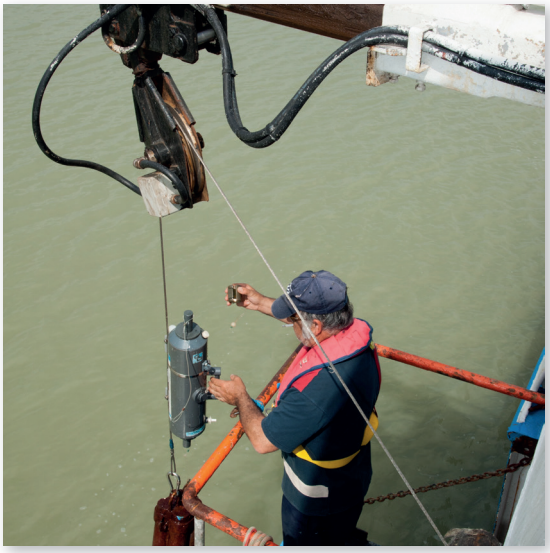


FIGURE 27 Relation entre le diamètre des particules, la typologie de Wentworth, le mode de transport des particules et leur cohésion

B. MÉCANISMES HYDRO-SÉDIMENTAIRES

La dynamique sédimentaire en estuaire est régie par un cycle de processus hydro-sédimentaires (FIGURE 28), principalement forcé par la marée sur l'ensemble du continuum estuarien, couplé aux vagues à l'embouchure. Cette cyclicité est modulée saisonnièrement par le régime hydrologique de la Seine (crue/étiage) et les cycles biogéochimiques annuels (production primaire).

Schématiquement les processus contrôlant la dynamique sédimentaire peuvent être dissociés par compartiment :

i) colonne d'eau : floculation, sédimentation, advection

ii) sédiment : dépôt, consolidation, érosion.

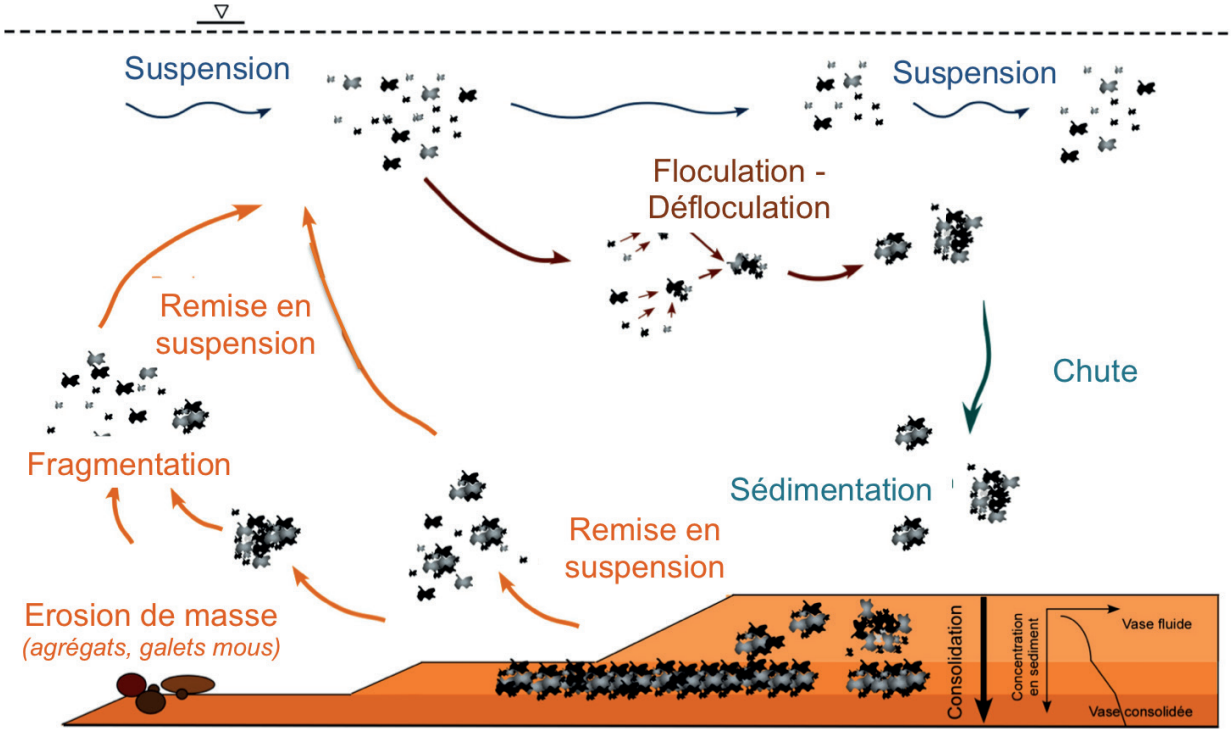


FIGURE 28 Cycle des matières en suspension en estuaire (d'après Maggi 2005 in Verney 2006)

1. Processus dans la colonne d'eau : dynamique des MES

a. Floculation/défloculation des MES

Les MES, particules fines (inférieures à 63 µm) d'origine minérales ou organiques, se caractérisent par une forte cohésion qui se traduit, via les processus de floculation/défloculation par le regroupement dynamique de ces particules sous forme d'agrégats, de taille de la dizaine de microns à plusieurs millimètres, de forme sphérique à allongée et de densité variable (excès de densité* (Dr) de quelques dizaines à plusieurs centaines de kg.m^{-3}).

Les MES en estuaire sont majoritairement représentées par des particules inférieures à 20 µm. Sous l'action de différents mécanismes détaillés ci-dessous, ces particules s'agrègent sous forme de flocs (ou agrégats). En fonction de leurs caractéristiques géométriques et structurelles, les flocs peuvent être classés en deux populations distinctes : les microflocs et les macroflocs (FIGURE 29).

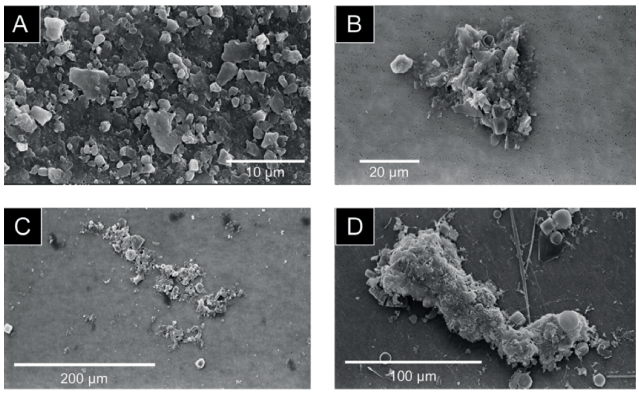


FIGURE 29 Flocs et terminologie : images MEB de particules primaires (A), microfloc(B), macrofloc aéré (C) et macrofloc dense (D)

Les microflocs sont des agrégats de petite taille (inférieure à 100 ou 150 µm selon les auteurs), constitués de particules élémentaires organo-minérales, quasi sphériques, denses (Dr O (100 kg/m^3), O = ordre de grandeur), résistants au cisaillement turbulent. De façon complémentaire, les macroflocs sont des agrégats de grande dimension (supérieure à 100 ou 150 µm), produits de l'agrégation de microflocs, de formes très variables, de faible densité (Dr O (10 kg/m^3) et de faible cohésion générale donc fragile vis-à-vis des processus turbulents.

De nombreuses études se sont attachées à décrire les processus de floculation et à identifier les facteurs contrôlant la formation de macroflocs ou leur fragmentation en microflocs, et ainsi déterminer la distribution en classe de taille des agrégats. Ces facteurs peuvent être hiérarchisés comme suit :

i) La turbulence* de l'écoulement constitue le paramètre dominant des processus de floculation : sans turbulence, les particules sont sans mouvement, limitant les collisions et in fine la possibilité d'agrégation. Augmenter la turbulence permet pour des valeurs faibles (O (1s^{-1})) de favoriser la formation de macroflocs. De forts niveaux de turbulence contribuent à l'inverse à exercer de forts cisaillements à l'échelle des flocs et ainsi fragmenter les plus fragiles, i.e. les macroflocs. Il a ainsi été montré que l'échelle de Kolmogorov, la plus petite échelle des tourbillons turbulents présents dans l'écoulement, déterminait la taille maximale des agrégats pouvant être potentiellement observés dans le milieu.

ii) Les processus de floculation sont favorisés par l'augmentation de la concentration en MES, le nombre de collisions potentielles étant statistiquement corrélées au nombre de particules par unité de volume.

iii) Les forces interparticulaires de Van der Wals associées aux charges surfaciques des particules fines forment une barrière d'énergie, qui limite l'agrégation. La salinité tend à réduire cette barrière et ainsi favorise les processus de floculation.

iv) Au même titre que la salinité, les populations phytoplanctoniques ou bactériennes produisent un mucus organique, substance fortement cohésive participant à la création de macroflocs. Ces interactions seront étudiées dans le cadre du projet Seine-Aval 5 DYNAPAT.

La turbulence et la concentration en MES sont les deux paramètres majeurs contrôlant les processus de floculation, comme synthétisé par Dyer (Figure 30). Les deux autres paramètres (salinité et matière organique) modulent l'intensité des processus de floculation.

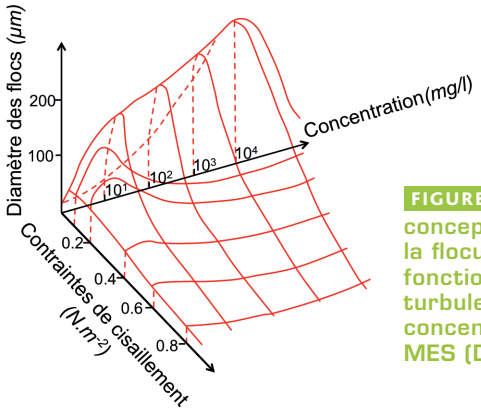


FIGURE 30 Schéma conceptuel de la floculation en fonction de la turbulence et de la concentration en MES (Dyer, 1989)

La campagne FLUMES 2011 (Verney, 2012) a permis de décrire et quantifier l'intensité des processus de floculation au sein des trois compartiments clés de l'estuaire : l'estuaire fluvial, le bouchon vaseux et le panache. La FIGURE 31 présente la dynamique des MES à l'échelle d'un cycle de marée de morte eau, dans la zone du maximum de turbidité (amont du Pont de Normandie). Lors des périodes de maximum de

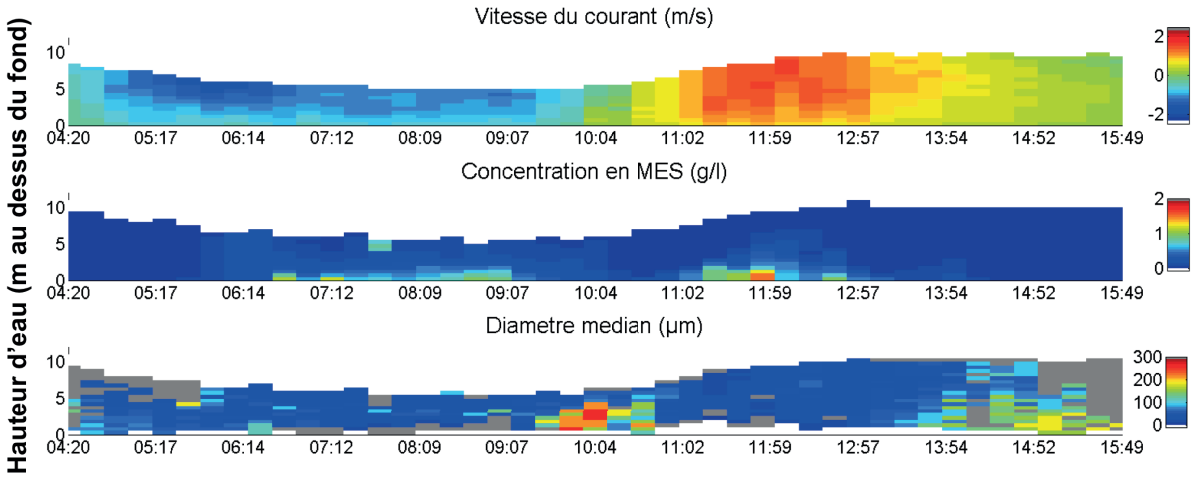


FIGURE 31 Evolution des profils verticaux de vitesse de courant, de concentration en MES et du diamètre médian des particules au sein du bouchon vaseux durant un cycle de marée (campagne FLUMES 23 MAI 2011)

courant, lors du flot et du jusant, les MES sont présentes sous la forme de microflocs du fait des fortes turbulences, et malgré des concentrations en MES fortes (au-delà de 1g/l). Lors des périodes d'étales de pleine mer et de basse mer, la turbulence diminue et les conditions deviennent favorables à la formation de macroflocs, avec des diamètres médians pouvant dépasser 300 µm.

L'évaluation de la densité moyenne des populations de flocs à partir des estimations de concentrations massique et volumique (CF ENCART N° 4) a permis de caractériser la structure des flocs, et confirmer les ordres de grandeur de densité des microflocs et des macroflocs.

Dans le cadre du programme Seine-Aval 3, le modèle FLOCMOD reproduisant la mécanique des processus de floculation selon une distribution en classe de taille (de quelques microns à plusieurs millimètres) a été développé, puis couplé au modèle hydrosédimentaire SiAM3D et appliqué à l'estuaire de la Seine (Projet Seine-Aval 4 FLUMES). Ce couplage permet de suivre l'évolution des micro/macroflocs dans l'ensemble de l'estuaire, en fonction des gradients hydrodynamiques et de concentration en MES. La FIGURE 32 montre ainsi la variabilité spatiale du diamètre médian des flocs (près du fond) autour de la pleine mer et de la basse mer. La pleine mer, de durée plus longue que la basse mer, favorise la création de grands macroflocs, pour l'ensemble de l'embouchure (diamètre médian compris entre 600 et 900 µm). Inversement les étales de basse mer sont courtes (1 h), ce qui se traduit par une zone de floculation optimale réduite (10 km autour du pont de Normandie) et ne permettant pas d'atteindre l'état d'équilibre des processus de floculation (diamètre médian entre 400 et 500 µm). À l'amont de cette zone, les courants de jusant restent forts, à l'aval le flot s'intensifie. Cet hydrodynamisme fort se traduit par une turbulence significative et une fragmentation des macroflocs en une population de microflocs (diamètre médian inférieur à 150 µm).

b. Vitesse de chute

La vitesse de chute des particules constitue un paramètre déterminant dans la dynamique de transport des MES et de leur devenir dans le système estuarien. Dépendante à la fois de la taille et de la densité des flocs, et donc des phénomènes de floculations, la vitesse de chute reste un paramètre difficilement quantifiable. La méthode de mesure la plus couramment utilisée consiste à piéger un volume d'eau chargée en MES dans une colonne de décantation et d'observer la chute des particules tout en caractérisant leurs tailles. D'autres méthodes sont présentées dans l'ENCART N° 4.

De nombreuses études se sont consacrées à la quantification des vitesses de chute en estuaire. Les vitesses de chutes de flocs sont différentes d'un estuaire à l'autre. Dans l'estuaire de la Seine, les observations montrent des vitesses de chute inférieures à 1 mm/s pour les microflocs (D < 200 µm) et entre 1 et 3 mm/s pour les macroflocs, valeurs légèrement supérieures à la moyenne des valeurs observées sur les autres estuaires (Lafite, 2001).

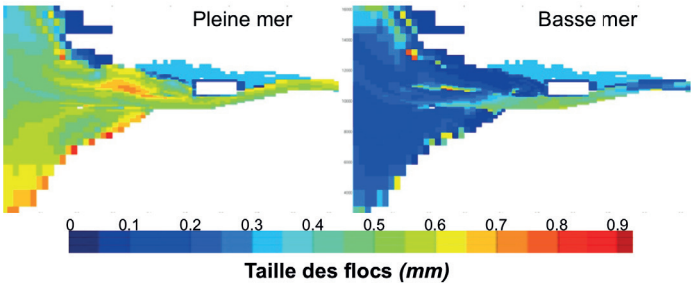


FIGURE 32 Variabilité spatiale du diamètre moyen des flocs à pleine mer (gauche) et à basse mer (droite) au niveau du fond de l'embouchure de l'estuaire de la Seine.

2. La dynamique sédimentaire estuarienne

La concentration en MES varie spatialement et temporellement au sein de l'estuaire, en fonction des principaux forçages. On peut identifier trois compartiments clés de l'estuaire, se distinguant par les ordres de grandeur caractéristiques des MES observées : l'estuaire fluvial amont (de Poses à Caudebec-en-Caux), le panache d'embouchure (à l'aval de l'engainement / bancs d'embouchure) et le bouchon vaseux. Ce dernier site caractéristique des estuaires est une zone d'accumulation turbide à l'extension et au positionnement variant en fonction des forçages marée/débit.

a. L'estuaire fluvial amont

À l'échelle annuelle, les concentrations en MES dans l'estuaire amont sont principalement régulées par les apports amont liquides et solides (CF § I.A.1). La FIGURE 33 (issues des mesures SYNAPSES), représentant l'évolution des concentrations en MES sur le site de Val-des-Leux durant l'année 2012, illustre cette dépendance. En période hivernale (entre décembre et janvier), les débits de Seine à Poses sont soutenus (supérieurs à 1000 m^3/s), et associés à de fortes concentrations en MES (> 100 mg/l). La concentration moyenne journalière dans l'estuaire amont peut alors dépasser les 250 mg/l. A contrario en période d'étiage (août/septembre), les concentrations moyennes mesurées sont comprises entre 50 et 100 mg/l.

À cette cyclicité annuelle se superpose l'influence forte de la marée, avec les cycles semi-diurnes et vive eau/morte eau. Les cycles vive eau/morte eau modulent l'intensité des courants de marée. Ainsi, une vive eau, caractérisée par des courants forts, contribue à remettre en suspension plus de MES qu'une morte eau. Ce forçage à 14 jours est parfaitement visible sur le site de Val-des-Leux, se traduisant par des concentrations maximales en vive eau pouvant dépasser 400 mg/l en crue. À l'opposé, les MES en étiage se caractérisent par des concentrations maximales de l'ordre de 50 mg/l.

À l'échelle diurne, les concentrations en MES sont étroitement corrélées avec les phases de la marée. Ainsi, la charge particulaire est maximale lorsque les vitesses de courants sont maximales et inversement. En particulier, le pic de flot très marqué en estuaire de Seine remobilise les sédiments et augmente de manière significative la concentration en MES. Lors de l'étale de pleine mer, particulièrement longue en Seine, les MES floculent et chutent, entraînant une diminution de la concentration en MES. Celle-ci augmentera de nouveau avec les courants de jusant avant de diminuer lors de l'étale de basse mer.

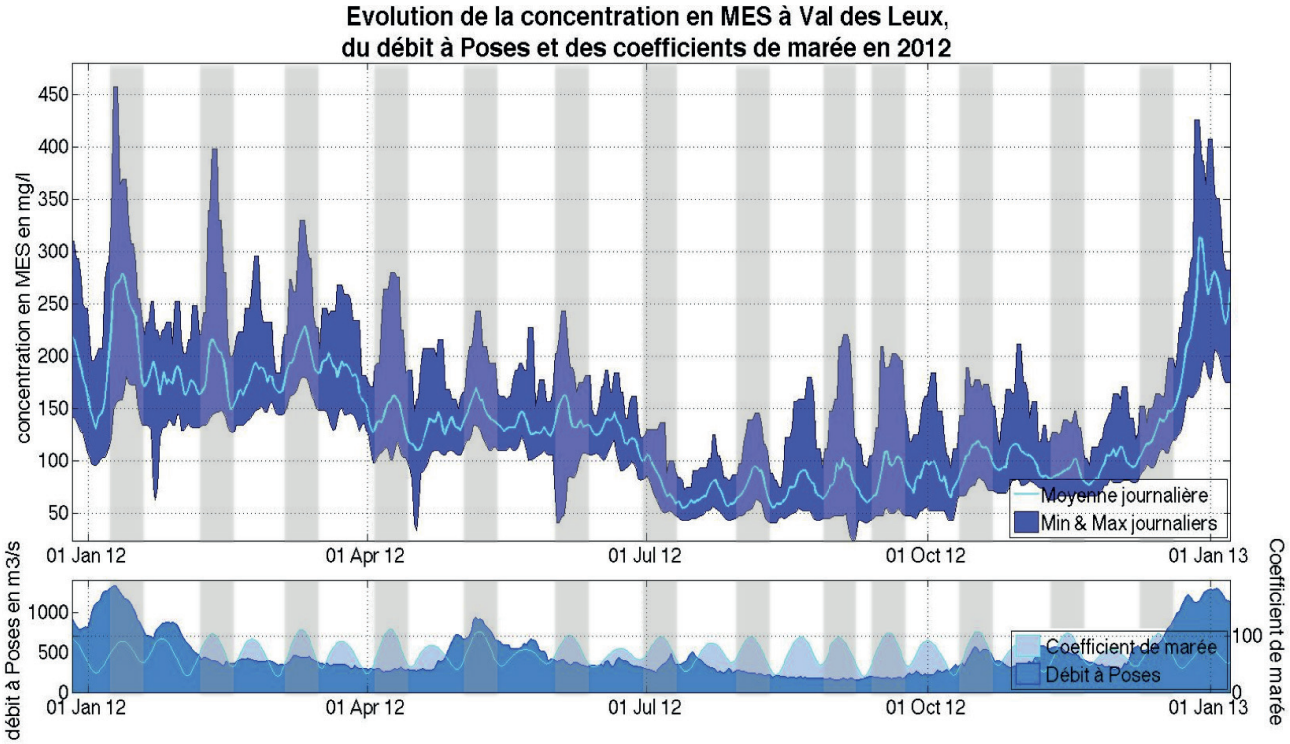


FIGURE 33 Evolution de la concentration en MES à Val-des-Leux, des coefficients de marée et du débit sur l'année 2012 (données SYNAPSES) (les bandes grises correspondent aux périodes de grandes vives eaux)



ENCART N° 4

R. VERNEY - IFREMER

Les techniques de caractérisation des MES

Les matières en suspension désignent un ensemble de particules d'origines minérales et/ou organiques en suspension dans la colonne d'eau. Classiquement, le paramètre global caractérisant ces MES est la concentration massique, masse de MES par unité de volume, exprimée en $kg.m^{-3}$ ou g/l. Bien que simple en l'apparence, la quantification de la concentration en MES soulève encore aujourd'hui de nombreuses questions techniques, méthodologiques et scientifiques.

La méthode la plus fiable quantitativement consiste à prélever dans le milieu un volume d'eau chargé en MES. Ce volume est filtré à travers un filtre pré-pesé retenant les particules de taille supérieure à 0,45 µm. Après séchage, ce filtre est pesé une seconde fois, quantifiant par différence la masse particulaire déposée. Associée au volume filtré, cette masse permet alors de quantifier la concentration en MES. La principale limitation est associée au caractère ponctuel, basse fréquence, du prélèvement, sa représentativité dans un système dynamique comme l'estuaire de la Seine, et la nécessité de déployer des moyens logistiques et humains coûteux.

Pour pallier à ces limitations, deux approches (optique et acoustique) de mesure indirecte de la concentration en MES ont été développées. Ces deux approches reposent sur un principe identique : une onde (acoustique ou lumineuse), est émise à une certaine fréquence ou longueur d'onde et se propage dans la colonne d'eau. Sur son trajet l'onde rencontre des particules, qui la rétrodiffusent et l'atténuent. La part d'onde réfléchie ou transmise est mesurée par un récepteur et transformée en signal électrique, souvent calibré en NTU pour les capteurs optiques. Cette valeur est un proxy de la concentration en MES. L'interprétation de ce signal brut en terme de concentration en MES nécessite :

i) soit de calibrer directement la mesure fournie par l'instrument, selon une fonction empirique (cas des capteurs optiques à rétrodiffusion ou des capteurs acoustiques dans des environnements peu concentrés) ;

ii) soit de résoudre des modèles théoriques ou semi-empiriques permettant d'inverser le signal, moyennant la détermination de paramètres de calages (communément pour les capteurs acoustiques dans des environnements concentrés types bouchon vaseux, (Thorne *et al.*, 2014, Verney *et al.*, 2012, Moore *et al.*, 2012).

Quelle que soit l'approche utilisée, la principale difficulté réside dans la très forte dépendance des propriétés d'atténuation/rétrodiffusion à la nature, la forme, la taille et la densité des particules. Ces caractéristiques sont cependant extrêmement variables en estuaire, du fait des processus de floculation et de la nature des MES (§II.B.1). Cette grande variabilité se traduit en pratique par la nécessité de répéter « régulièrement » les étapes de calibration des capteurs pour le passage en concentration massique. La variabilité saisonnière du débit de la Seine, la production primaire autochtone ou allochtone sont autant de paramètres pouvant modifier la nature des MES et donc les relations de calibration des capteurs. Des mesures récentes en estuaire de Seine ont montré qu'à l'échelle d'un cycle vive eau/morte eau, au sein du bouchon vaseux, la pente de calibration NTU/concentration massique pouvait varier d'un facteur 3 (FIGURE F), en lien avec la variation de densité des flocs en suspension (Verney, 2012). Cette variabilité à courte échelle de temps est actuellement peu ou pas prise en compte et introduit une forte incertitude critique vis-à-vis des objectifs de mesure des flux et de compréhension et de surveillance des systèmes côtiers à moyen et long terme.

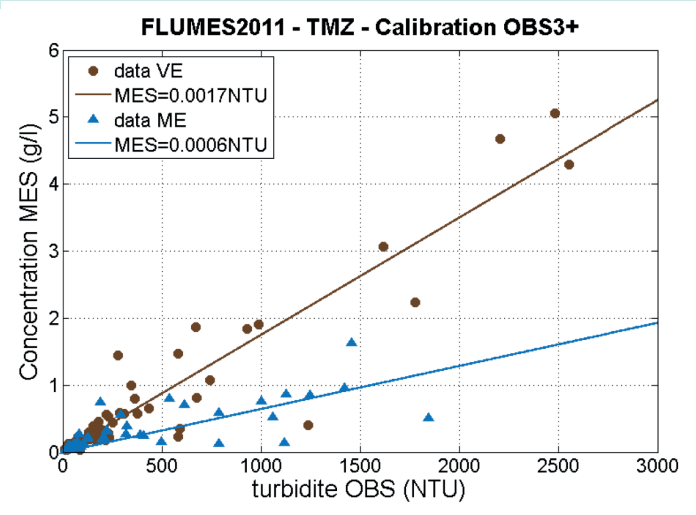


FIGURE F **Variabilité de la relation de calibration NTU/g/l d'un capteur optique entre vive eau et morte eau (exemple tiré des mesures effectuées à Fatouville dans le cadre des campagnes FLUMES 2011)**

Outre les mesures court ou moyen termes réalisées au sein des projets de recherche du programme Seine Aval, les capteurs optiques ont été déployés en estuaire par la cellule anti-pollution du Service de Navigation de la Seine (de 1996 à 2004) à l'amont de Tancarville et sur les systèmes MAREL à l'embouchure (de 1998 à 2010), permettant pour la première fois l'observation long terme et haute fréquence de la dynamique des MES. Depuis 2012, le GIP Seine Aval et le GPMR, avec le concours scientifique de l'Université de Rouen et l'Ifremer, mettent en œuvre le réseau SYNAPSES, réseau de sondes multiparamètres incluant la mesure optique de la concentration en MES en 6 stations le long de l'estuaire, de Rouen (amont) à la Balise A (aval). Ce réseau est associé à un projet de recherche Seine-Aval 5 (SUSPENSES) dédié à la caractérisation de la variabilité des MES, leur impact sur la quantification de la concentration en MES et le développement d'une méthode de calcul des flux sédimentaires.

Pour aller plus loin que la concentration en MES…

Outre la concentration, il est également possible de caractériser la distribution en classe de taille des particules en suspension. Une méthode électrochimique (historique) et deux méthodes optiques sont usuellement utilisées :

i) La mesure électrochimique repose sur l'enregistrement du champ électrique entre 4 électrodes encadrant un volume de mesure. Les particules transitant par cette chambre de mesure modifient la quantité d'électrolyte entre les électrodes et modifient ainsi (proportionnellement au volume de la particule) le signal électrique enregistré, permettant ainsi de revenir à une distribution en classe de taille de l'échantillon (méthode de laboratoire, counter Coulter).

ii) L'imagerie directe, consistant à prendre des images haute définition des agrégats. Les images sont ensuite traitées en laboratoire en terme de forme, de taille et pour certains systèmes de densité. Ces dispositifs sont souvent des prototypes développés par des laboratoires de recherche.

iii) L'imagerie indirecte, basée sur la diffraction d'un faisceau laser par une particule : un agrégat traverse un faisceau laser, ce dernier est alors diffracté selon des angles inversement proportionnels à la taille de la particule. L'onde lumineuse est alors enregistrée par une série de capteurs photosensibles concentriques. Cette distribution d'onde lumineuse est ensuite inversée, en s'appuyant sur différents modèles théoriques de diffraction, pour obtenir la distribution volumique (en ul/l) en chaque classe de taille. Cette technologie est utilisée en laboratoire (type Malvern, mesurant de 0,5 µm à 2 mm) ou in situ (type LISST).



Ces derniers permettent de décrire la population de particules en suspension en 32 classes de taille de 2.5 µm à 500 µm (LISST 100X). L'information associée à la distribution en classe de taille peut être réduite à l'estimation de percentile, comme le diamètre médian de la distribution représentant 50 % de la masse (ou du volume) de l'échantillon (FIGURE G).

L'association de mesure de concentration massique et de distribution en classe de taille permet d'estimer également la densité des particules, soit moyenne sur la population (I) soit en utilisant l'approche fractale des agrégats, reliant la taille et la densité des particules via un nombre fractal (II).

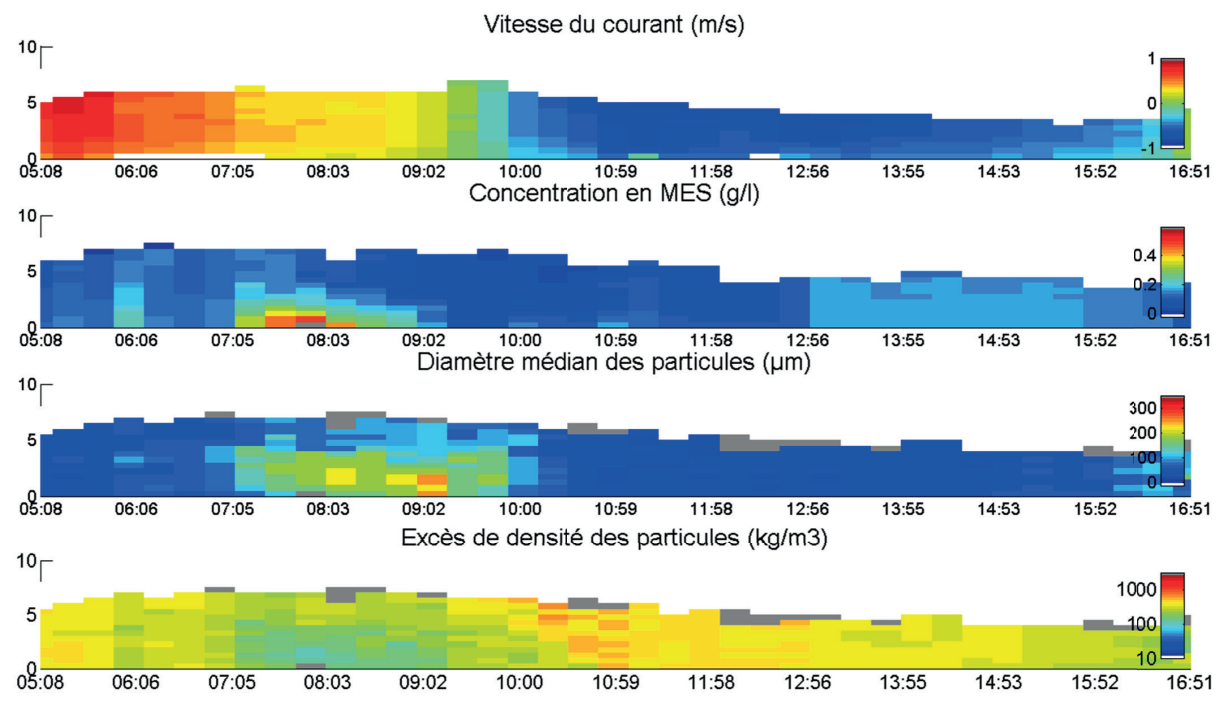


FIGURE G **Dynamique hydrosédimentaire en estuaire de Seine, exemple tiré des mesures effectuées à Caudebec en Caux dans le projet FLUMES. De haut en bas : vitesse du courant, concentration en MES, diamètre médian des particules et excès de densité des particules. Cette figure illustre la complémentarité des moyens de mesures permettant d'observer et d'analyser les processus hydrosedimentaires, et en particulier l'évolution des caractéristiques des particules en suspension (taille/densité) au cours d'un cycle de marée**



b. Bouchon vaseux

La rencontre entre les eaux douces du fleuve et les eaux salées introduites par la marée dans les estuaires forme une zone d'accumulation de particules appelée bouchon vaseux ou zone de turbidité maximale. Cette zone est générée :

I) par l'asymétrie de l'onde de marée et sa propagation dans l'estuaire (CF. I.B) ;

II) par la circulation résiduelle induite par la différence de densité existant entre les eaux douces et salées (Brenon, 1997).

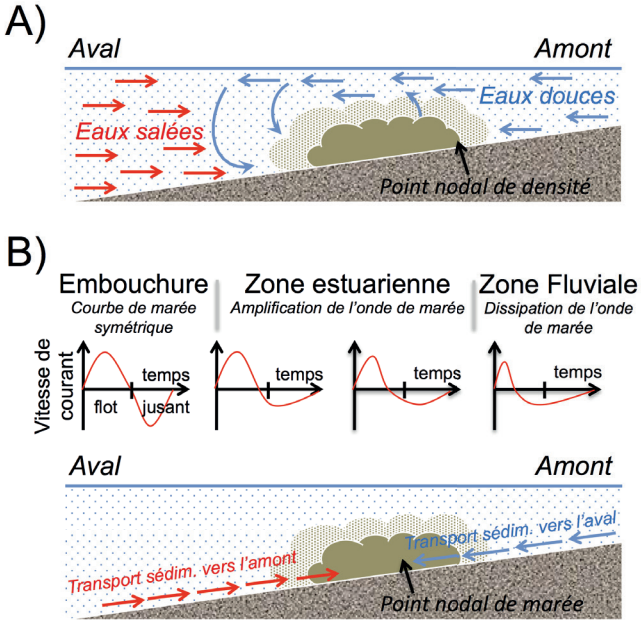


FIGURE 34 Mécanismes à l'origine du bouchon vaseux ; (A) circulation résiduelle ; (B) asymétrie de marée (Dyer *et al.*, 1986 et Allen *et al* 1980, in Deloffre 2005)

I/ Asymétrie et propagation de l'onde de marée

Lors de sa propagation vers l'estuaire, l'onde de marée se déforme et devient asymétrique avec des durées de flot inférieures à celles de jusant et des courants plus intenses en flot (§ I.D.1). Cette asymétrie de l'onde de marée et les courants qui y sont associés, contribuent à piéger les sédiments en suspension dans l'estuaire aval via :

I) une érosion préférentielle en flot associé à un transfert des MES vers l'amont ;

II) une sédimentation plus importante durant la longue étale de pleine mer (3 h). Les courants de jusant, plus faibles, ne remobilisent qu'une partie de ces sédiments, contribuant à un stockage net en amont (FIGURE 34).

II/ Circulation de densité

À l'embouchure, la stratification haline combinée à l'asymétrie de l'onde de marée génère une circulation résiduelle de densité. Les eaux douces plus légères s'écoulent vers l'aval en surface alors qu'au fond les eaux salées, plus lourdes,



s'écoulent vers l'amont jusqu'au point nodal de densité (FIGURE 34). Les matières en suspension transitent ainsi de l'amont vers l'aval en surface. Lorsqu'elles chutent à l'aval du point nodal de densité elles sont entrainées par les courants de fond vers l'amont, créant ainsi une zone d'accumulation de particules.

Ces deux phénomènes conduisent à la formation d'une structure sédimentaire caractéristique des estuaires : le bouchon vaseux. Le bouchon vaseux est ainsi défini comme une zone d'accumulation des MES caractérisée par de forts gradients verticaux, horizontaux et temporels. Comme le montre la FIGURE 35, les concentrations au fond sont plus élevées qu'en surface. Comme pour les compartiments amont et aval

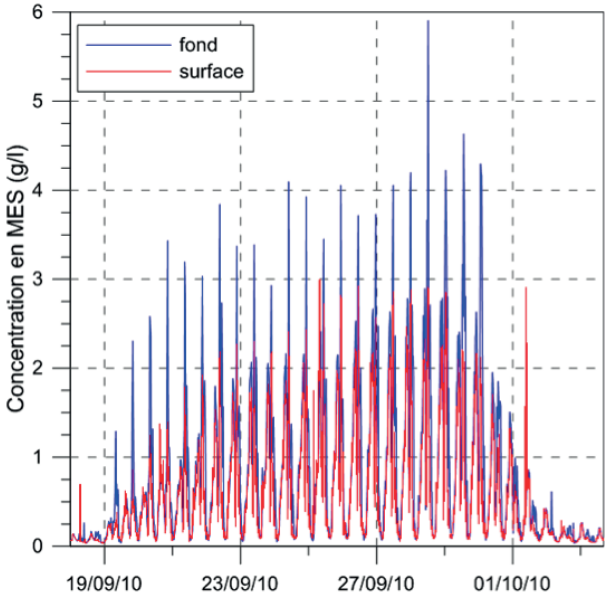


FIGURE 35 Evolution de la concentration en MES sur le site de Fatouville du 18/09/2010 au 3/10/2010

adjacents, les concentrations caractéristiques du bouchon vaseux sont également fortement variables à l'échelle du cycle vive eau/morte eau. Les concentrations maximales varient en surface entre 2 g/l en vive eau et 0,05 g/l en morte eau et au fond entre 4 g/l en vive eau et 0,1 g/l en morte eau. Les estimations de la masse du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine sont globalement comprises entre 200 000 et 350 000 tonnes en fonction des conditions hydrodynamiques (Artelia, 2014 ; Verney, 2012).

La position du bouchon vaseux est dépendante des conditions hydrodynamiques ; elle oscille avec les phases de la marée, entre le pk 355 et 365 à basse mer et entre le pk 330 et 350 à pleine mer. Cette position moyenne est également modulée par le débit : la position du bouchon vaseux sera d'autant plus aval que les débits seront forts (FIGURE 36). En cas de forte crue, le bouchon vaseux peut même être expulsé en baie de Seine.

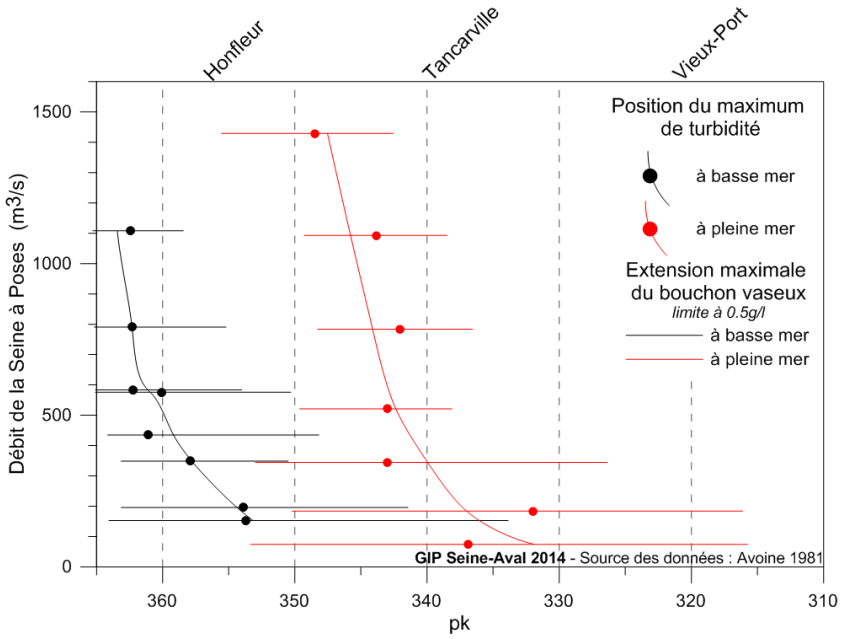


FIGURE 36 Position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Seine en marée de vive eau d'après Avoine 1981

L'évolution spatio-temporelle des concentrations en MES à pleine mer depuis 1956 entre le barrage de Poses et Honfleur peut se lire sur deux échelles de temps (FIGURE 37) :

– l'échelle annuelle gouvernée par l'alternance crue/étiage qui joue sur le positionnement du bouchon vaseux (FIGURE 36) :

• En crue ($Q > 800$ m^3.s^{-1}), le centre de gravité du bouchon vaseux est translaté vers l'aval, localisé environ entre le pont de Normandie à pleine mer et l'extrémité des digues submersibles à basse mer.

• En étiage ($Q < 200$ m^3.s^{-1}), il se situe approximativement à basse mer au niveau d'Honfleur et à pleine mer à l'amont de Tancarville.

– l'échelle pluri-annuelle :

• les variations du régime hydrologique de la Seine conditionnent la position moyenne du bouchon vaseux. Par exemple durant les années sèches de 2003 à 2004 des concentrations en MES de l'ordre de 500 mg/l étaient observées à Tancarville ; alors que durant les années humides, telles que 2001, cette limite se situe à Honfleur.

• les aménagements jouent un rôle majeur sur le positionnement du maximum de turbidité : globalement, la concentration en MES tend à diminuer sur les cinquante dernières années et le bouchon vaseux à se positionner plus en aval. Cette tendance est essentiellement due à une amélioration de l'écoulement des eaux (liée à la calibration et au dragage* du chenal) et à une baisse des apports solides (réduction des rejets de MES, surtout visible en amont du bouchon vaseux).

L'analyse des images satellite de couleur de l'eau (MODIS 2004-2014) permet l'estimation de la concentration en MES de surface à l'échelle de l'embouchure. Une première calibration a été réalisée dans le cadre du projet Seine-Aval 4 MODEL, pointant toutefois une forte incertitude autour de la mesure dans le bouchon vaseux. Ces images permettent néanmoins d'identifier qualitativement les structures turbides à l'embouchure et d'évaluer les ordres de grandeurs des concentrations en MES de surface. Ces données, complémentaires des observations aux points fixes des réseaux de mesure, permettent une analyse basse fréquence de la variabilité spatiale des MES. Les figures suivantes présentent des exemples de distributions spatiales des MES pour des situations hydrodynamiques et hydrologiques contrastées.

Un travail complémentaire est réalisé au sein du projet Seine-Aval 5 HYMOSED, de façon à optimiser les algorithmes de traitements des images couleur de l'eau dans les zones à fortes concentrations en MES, à partir de mesures in situ spécifiques et en exploitant les données existantes.

L'image satellite de la FIGURE 38 a été réalisée le 11 février 2008 à pleine mer et avec un débit relativement fort de 912 m^3.s^{-1}. Le maximum de turbidité est alors situé au

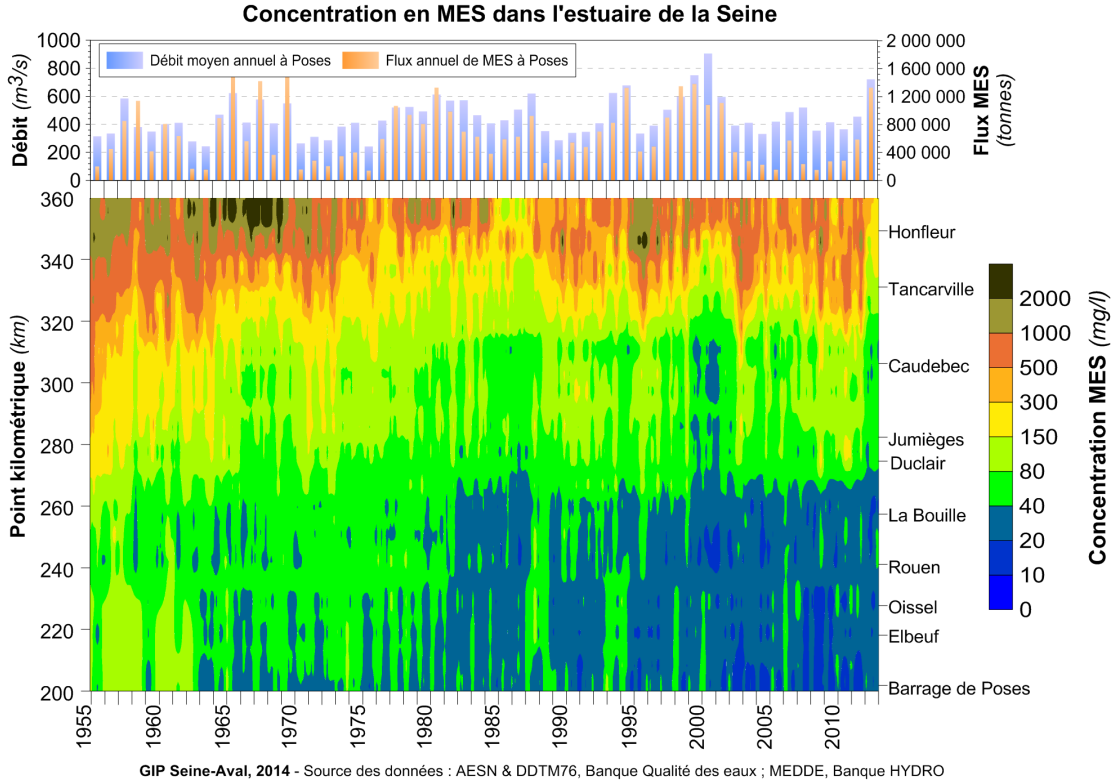


FIGURE 37 Evolution des concentrations en MES à pleine mer en sub-surface dans l'estuaire de la Seine entre 1955 et 2013

niveau du Pont de Normandie, on notera le panache de la Seine orienté vers le nord sous l'influence du courant de Verhaule*.

L'image satellite de la FIGURE 39 a été réalisée le 3 mars 2007 4 heures avant la basse mer et avec un débit de 1285 $m^3.s^{-1}$ mais surtout elle fait suite à une importante tempête relativement importante avec des vagues d'environ 1,50 m à l'embouchure. Le bouchon vaseux est alors situé au niveau de Honfleur. Cette image est particulièrement intéressante, car on peut y voir l'importance des vagues sur la remise en suspension des sédiments au niveau des bancs d'embouchure et au droit du Pays de Caux (Le Hir, 2012).

L'étude de la dynamique du bouchon vaseux est en cours d'actualisation dans le cadre du projet Seine-Aval 5 Hymosed, notamment grâce à l'utilisation d'images satellitales et d'outils de modélisation numérique.

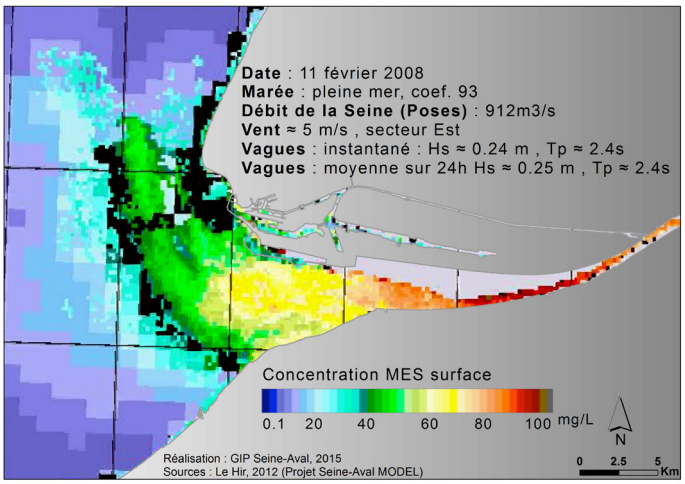


FIGURE 38 Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 11 février 2008 (données qualitatives) ; marée : pleine mer, débit : 912 $m^3.s^{-1}$

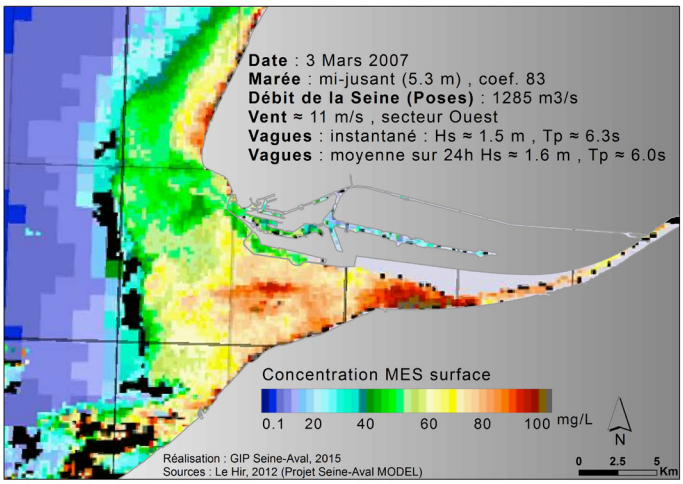


FIGURE 39 Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 3 mars 2007 (données qualitatives) ; marée : mi-jusant, débit : 535$m^3.s^{-1}$

C. DYNAMIQUE DU COMPARTIMENT SÉDIMENTAIRE

1. Dépôt/tassement-consolidation

Lors de leur chute, les flocs se concentrent près du fond, atteignant des concentrations en MES de l'ordre de 10 g/l ou supérieures. À partir de cette concentration, les flocs entrent en interaction, passant d'une chute libre à un mode de chute entravée : la vitesse de chute diminue proportionnellement à la concentration. Cette chute se poursuit jusqu'à la formation d'une matrice sédimentaire constituée d'un assemblage d'agrégats, formant alors des entités sédimentaires dont les caractéristiques évoluent au cours du temps, en fonction des contraintes hydrodynamiques.

Dans un premier temps, les sédiments déposés forment une vase fluide (ou crème de vase) constituée d'un mélange eau-sédiment d'une concentration massique supérieure à 100 g/l. La différenciation entre MES et vase fluide est associée à une concentration seuil au-delà de laquelle une modification des propriétés rhéologiques du mélange eau/sédiment, de liquide à plastique, est observée (Deloffre, 2005).

Ensuite, si les contraintes générées par les courants à la surface de la crème de vase n'ont pas remis cette dernière en suspension, celle-ci continue de décanter et va perdre sa mobilité, on parle de vase fluide stationnaire (vs. vase fluide mobile). Les concentrations de ce type de corps sédimentaire sont généralement proches de 250 g/l (Figure 40 ; Ross et Mehta, 1989).

Si l'hydrodynamisme est suffisamment calme, les flocs composant la crème de vase vont sous l'action de leurs poids s'écraser et expulser une partie de l'eau interstitielle pour passer à l'état solide. Cette phase relativement courte (O (1 h)), constitue la première phase du tassement (FIGURE 41).

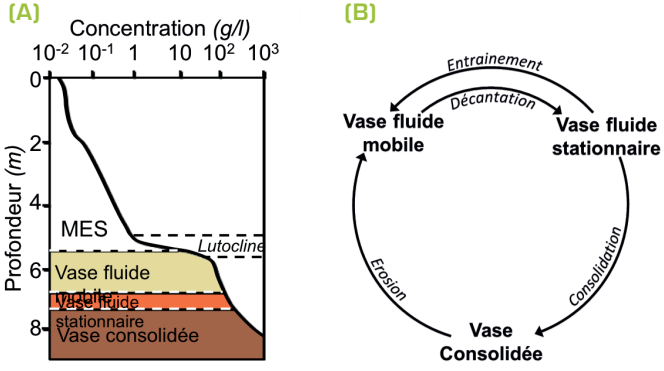


FIGURE 40 Formation et relations entre les différentes couches turbides ; (A) : Profil vertical de concentration schématisant les différents états de concentration des vases (Ross et Mehta, 1989) ; (B) Relation entre les différentes couches turbides (Kirby et Parker, 1983)

Il se crée ensuite au sein du sédiment des puits de drainage qui vont permettre à la vase d'évacuer l'eau interstitielle. La dernière phase du tassement, durant laquelle l'eau est éliminée par compression est beaucoup moins rapide, la hauteur de sédiment tend alors à être constante. On parle alors de vase consolidée (Lesourd, 2005).

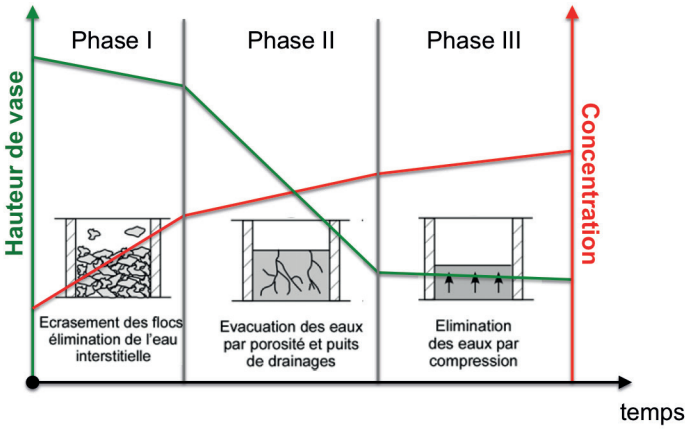
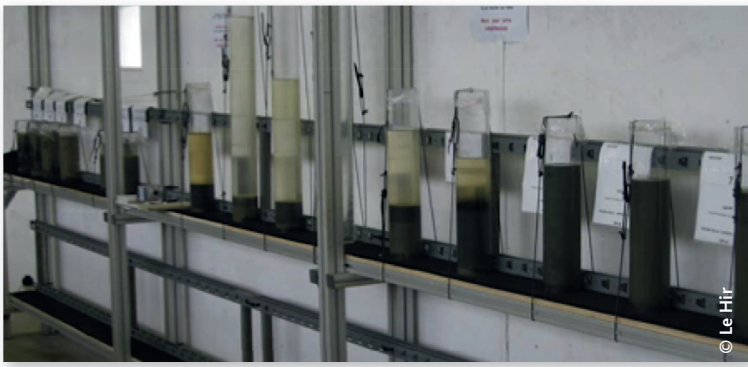


FIGURE 41 Illustration des différentes phases du tassement des vases (adapté de Migniot, 1989 et Lesourd, 2005)



Dans la pratique les vitesses de tassement des sédiments sont dépendantes de plusieurs paramètres dont la concentration initiale du sédiment, et sa composition granulométrique en particulier la présence de sables. La FIGURE 42 illustre les expériences de tassements réalisées par Le Hir et Lesourd dans le cadre du programme Seine-Aval 3 à partir de sédiments prélevés dans la vasière nord et le chenal de navigation. Les courbes associées aux mélanges artificiels 1, 3 et 5 (composition sable/vase à 50 % et concentrations initiales différentes), montrent que naturellement la vase se consolide plus rapidement lorsque la concentration initiale est plus faible. La comparaison des mélanges 2, 3 et 4 (concentration initiale : 400 g/l et composition sable/vase différente) illustre la dépendance de la vitesse de tassement à la granulométrie* du mélange ; plus le sédiment est sableux, plus il se tasse rapidement. Ceci s'explique par :

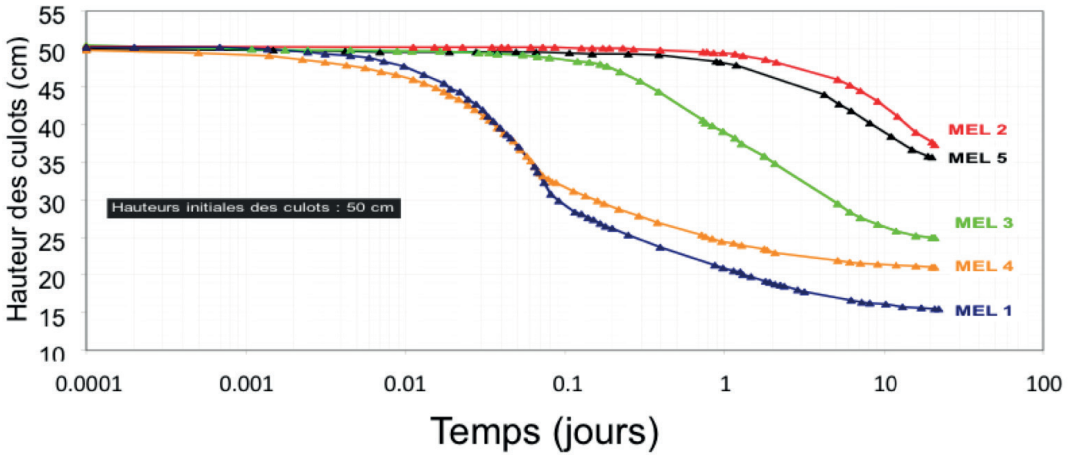


FIGURE 42 Illustration et exemple de résultats issus d'expériences de tassement de différents mélanges sablo-vaseux sur 23 jours (Le Hir 2006)
Mélange 1 : 50 % Vases, 50 % Sables, concentration initiale : 200 g/l,
Mélange 2 : 80 % Vases, 20 % Sables, concentration initiale : 400 g/l ;
Mélange 3: 50 % Vases, 50 % Sables, concentration initiale : 400 g/l ;
Mélange 4: 20 % Vases, 80 % Sables, concentration initiale : 400 g/l ;
Mélange 5 : 50 % Vases, 50 % Sables, concentration initiale : 600 g/l

I) le rôle drainant du sable vis-à-vis du mélange ainsi que par II) la densité plus importante des sables par rapport aux vases, ce qui impose une contrainte normale plus élevée sur l'ensemble des couches sous-jacentes et accélère donc leur consolidation. Ces courbes mettent également en évidence les différentes phases du tassement décrites précédemment (Lesourd, 2000 ; Lesourd, 2005 ; Le Hir *et al.*, 2006, Grasso *et al.*, 2014 ; Grasso *et al.* accepted).

2. Érosion des sédiments estuariens

L'érosion* des sédiments vaseux ou mixtes s'exprime classiquement comme le produit d'un taux d'érosion E_0 (kg/m^2/s), caractéristique du sédiment, et d'un excès de cisaillement, traduisant le rapport entre la contrainte exercée par les forçages hydrodynamiques τ_b et la résistance du sédiment à l'érosion, appelée contrainte critique d'érosion τ_{ce}, via la relation de Partheniades :

$$E = E_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)$$

En lien avec les processus de tassement, la contrainte critique d'érosion dépend des caractéristiques du sédiment et en particulier de son état de consolidation (ou concentration massique) ainsi que du ratio sable/vase. Pour un sédiment donné, la valeur de la contrainte critique d'érosion est directement corrélée au degré de compaction de la vase, i.e. une vase fluide s'érodera plus facilement qu'une vase consolidée. Le ratio sable/vase joue également un rôle particulier sur l'évolution de la loi d'érosion du sédiment. En effet sous un certain seuil de fraction vaseuse, le sédiment peut être considéré comme non-cohésif. Dans ce cas, l'érosion des grains de sables et l'érosion des particules fines sont supposées indépendantes. Par contre, au-delà de ce même seuil, le sédiment a un comportement « semi-cohésif », sa contrainte critique d'érosion est alors proportionnelle à la teneur en vase. Ce comportement est observé jusqu'à un autre seuil à partir duquel le sédiment a un comportement cohésif (Waeles, 2005 ; Le Hir, 2006, 2012). Cette schématisation de l'évolution de la contrainte critique d'érosion en fonction de la fraction vaseuse du sédiment est représentée sur la FIGURE 43.

Cette schématisation, relativement simple des processus d'érosion, ne tient pas compte d'un certain nombre de processus pouvant intervenir dans le sédiment comme la bioturbation, les phénomènes de pavage *(bed armoring)*, l'érosion en masse, etc.

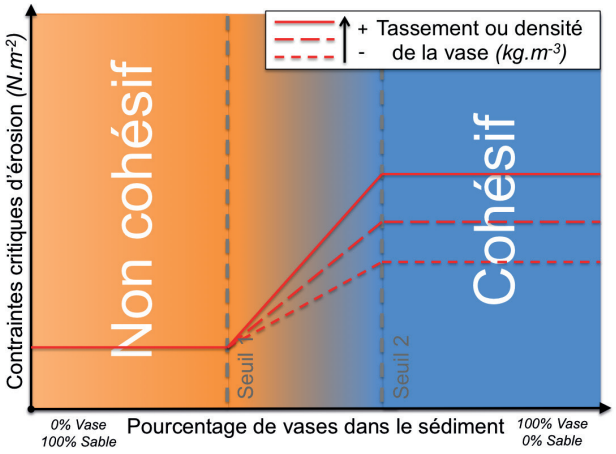
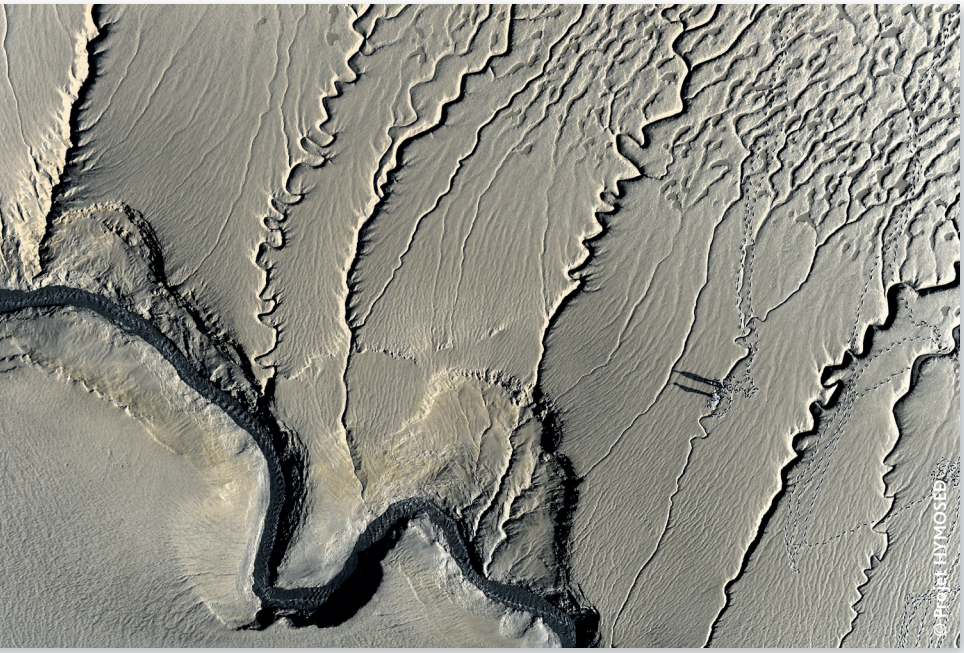


FIGURE 43 Evolution de la contrainte critique d'érosion en fonction de la teneur en fine du sédiment (d'après Le Hir, 2011)

3. La rythmicité des dépôts/érosions en estuaire de la Seine

Les vasières se définissent comme des zones de stockage de court à long terme, faiblement impactées par les courants de marée. Ce sont préférentiellement des zones latérales intertidales, présentes de façon discontinue le long du linéaire de l'estuaire.

En fonction du secteur de l'estuaire considéré, les forçages dominants diffèrent : par exemple le secteur amont est principalement contrôlé par le débit de la Seine tandis que l'embouchure est également sous l'influence du milieu maritime et donc des tempêtes et des marées. Ainsi, les rythmicités des phénomènes de dépôts/érosions évoluent différemment de l'amont à l'aval de l'estuaire. Les paragraphes suivants visent à expliquer le fonctionnement des vasières de l'estuaire de la Seine en découpant l'estuaire en trois compartiments : l'amont, le secteur intermédiaire et le secteur aval. Il est néanmoins important de préciser que le fonctionnement des vasières évolue de façon continue le long du linéaire estuarien ; les limites géographiques de ces compartiments ne sont donc que des indications et leur caractérisation par leurs forçages dominants est à privilégier.



• Les vasières de l'estuaire amont

Les vasières dites de l'estuaire amont présentent la particularité d'être submergées quasiment en permanence durant la période des hautes eaux liées aux forts débits de la Seine. Géographiquement cette zone s'étend globalement de l'amont de Rouen au barrage de Poses. Durant la période des crues de la Seine, les vasières telles que la vasière de Oissel sont en sédimentation (la vasière de Oissel, largement étudiée dans le cadre de Seine-Aval, est considérée comme représentative des vasières amont). Cette phase de dépôt est due :

I) aux fortes concentrations en MES apportées par les crues de la Seine ;

II) au fait que durant cette période les vasières sont continuellement submergées.

Les vasières amont piègent ainsi entre 10 et 30 % des sédiments transitant par Poses (Deloffre, 2005).

En période d'étiage, les dépôts hivernaux sont progressivement remaniés et remis en suspension par les courants tidaux. L'érosion de ces vasières est surtout réalisée pendant les marées de vives-eaux et en particulier par les courants associés au flot très brusque dans cette partie de l'estuaire. Le batillage (VOIR ENCART N° 5), peut également contribuer à éroder partiellement les dépôts récents.

• Les vasières d'embouchure

Les vasières d'embouchure désignent globalement les vasières situées à l'aval du pont de Tancarville. Le fonctionnement de ces vasières est principalement gouverné par :

I) les conditions d'agitations rencontrées à l'embouchure ;

II) le positionnement du bouchon vaseux.

Lors de la période hivernale, les forts débits vont déplacer le bouchon vaseux vers l'aval voir l'expulser en baie de Seine, limitant ainsi le stock sédimentaire potentiellement disponible pour alimenter les vasières. De plus, cette saison est concomitante aux périodes des tempêtes en baie de Seine, générant des vagues significatives, qui ont elles tendance à éroder les vasières se situant à l'aval du pont de Normandie. Dans ces conditions, jusqu'à 200 000 tonnes de sédiments peuvent être érodées de la vasière nord (Deloffre, 2005).

Ensuite, à la fin des crues, l'absence d'agitation et la position du bouchon vaseux, au droit de la vasière nord, vont rendre la sédimentation possible à l'embouchure. Durant cette période, près de 200 000 tonnes de sédiments peuvent se déposer sur les vasières d'embouchures (Deloffre, 2005).

En revanche durant l'été, les faibles débits vont permettre au bouchon vaseux de remonter en amont du pont de Normandie, limitant de nouveau la sédimentation à l'aval de ce dernier. Durant cette période également caractérisée par une faible agitation (houles + clapots) en baie de Seine, les vasières d'embouchure sont globalement stables.

Malgré la forte dynamique saisonnière décrite précédemment, ce secteur de l'estuaire est connu pour présenter, à l'échelle annuelle, une relative stabilité (études datantes de 2005). Néanmoins, dans le contexte des récentes évolutions morphologiques, en particulier celles décrites dans l'ENCART N° 8, ces résultats méritent d'être mis à jour. Ils devraient l'être prochainement notamment grâce au projet SA5 HYMOSED dont la caractérisation du fonctionnement des vasières d'embouchures constitue un des objectifs.

• Les vasières « intermédiaires »

Positionnées au centre de l'estuaire où les forçages sont mixtes (marins et continentaux), les vasières situées en amont du pont de Tancarville ont une dynamique contrôlée par le débit de la Seine, l'amplitude des marées à l'embouchure. Elles sont également largement impactées par l'activité humaine, en particulier par le batillage. Leur fonctionnement est donc intermédiaire entre celui des vasières amont et aval.

À l'échelle annuelle, les études faites sur les vasières du Trait ou de Petiville, démontrent que ces dernières sont stables avec cependant une certaine cyclicité pluriannuelle à mettre en lien avec la variabilité interannuelle des débits de la Seine (Lemoine, 2014). Ces vasières étant principalement alimentées en MES par le bouchon vaseux, leurs engraissements ne peut se faire que durant les années sèches, lorsque le bouchon vaseux est suffisamment en amont, et que les concentrations en MES sont suffisantes pour que la sédimentation durant les étales soit prépondérante sur l'érosion du flot. Durant les années sèches, le bouchon vaseux :

I) est plus gros que lors des années humides car son expulsion en baie de Seine est généralement moindre ;

II) remonte dans l'estuaire du fait des faibles débits. Ainsi, Lemoine (2014) montre que la vasière de Petiville est en sédimentation durant l'étiage lorsque le bouchon vaseux est à l'amont. De manière analogue, la vasière du Trait est en sédimentation lors des étiages prolongés quand le bouchon vaseux est très étendu et positionné très en amont (§ II.B.3). La sédimentation sur ces vasières est donc principalement rythmée par le débit de la Seine et son impact sur la position du bouchon vaseux.

Dans cette partie de l'estuaire, l'érosion est gouvernée par les cycles tidaux mais également par les évènements de haute énergie tel que le batillage (CF. ENCART N° 5), qui entraînent une érosion brusque du sédiment.

La FIGURE 44 représente les évolutions altimétriques de la vasière de Petiville et les conditions hydrologiques associées durant les suivis réalisés dans le cadre de la thèse de Lemoine (2014). En période de crue, la vasière présente une relative stabilité (suivi piquets). En période d'étiage, des dépôts pluri-centimétriques sont observés sur la vasière. En période de fin de crue, on observe un déplacement de ces dépôts vers la partie basse de l'estran et certainement un transfert d'une partie de ces dépôts vers le chenal. À l'échelle des cycles vive eau/morte eau, des érosions de plusieurs centimètres se produisent durant les vives eaux exceptionnelles, mais ces derniers se redéposent généralement durant les mortes eaux suivantes.

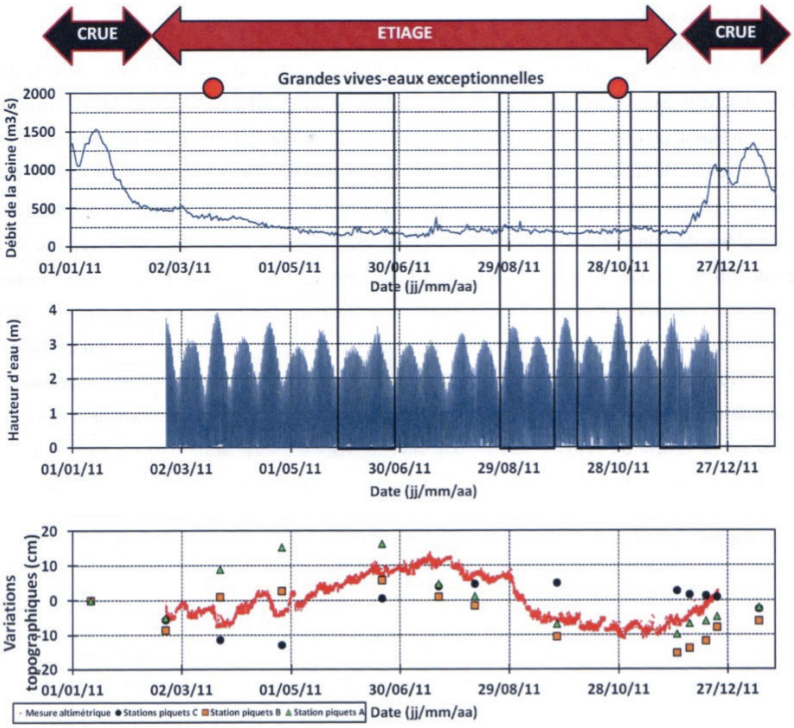


FIGURE 44 Conditions de débit, hauteurs d'eau mesurées sur le site de Petiville et variations de topographie enregistrées par des mesures piquets et un altimètre ponctuel (Lemoine, 2014)

• Synthèse à l'échelle de l'estuaire

La FIGURE 45 synthétise le fonctionnement des vasières de l'estuaire de l'aval vers l'amont. D'une manière générale, étant données les contraintes hydrodynamiques dues à la marée et aux vagues (houles ou batillage), les dépôts sédimentaires ne sont possibles qu'en présence d'une forte charge particulaire.

À l'amont, les dépôts sur les vasières se font exclusivement durant la période hivernale, lorsque les forts débits de la Seine transportent une importante quantité de MES et que les vasières sont quasiment continuellement submergées.

Dans le reste de l'estuaire, la sédimentation sur les zones intertidales va principalement dépendre de la présence du bouchon vaseux. À l'aval, la sédimentation ne sera possible que pour les débits permettant au bouchon vaseux de rester à l'embouchure. Plus en amont, les vasières dites intermédiaires, ne seront en sédimentation que durant l'étiage quand le bouchon vaseux remonte en amont du pont de Tancarville. Il est important de noter qu'à l'échelle annuelle, l'amplitude des variations topographiques des zones intertidales est au maximum de 15 cm (Deloffre, 2005).

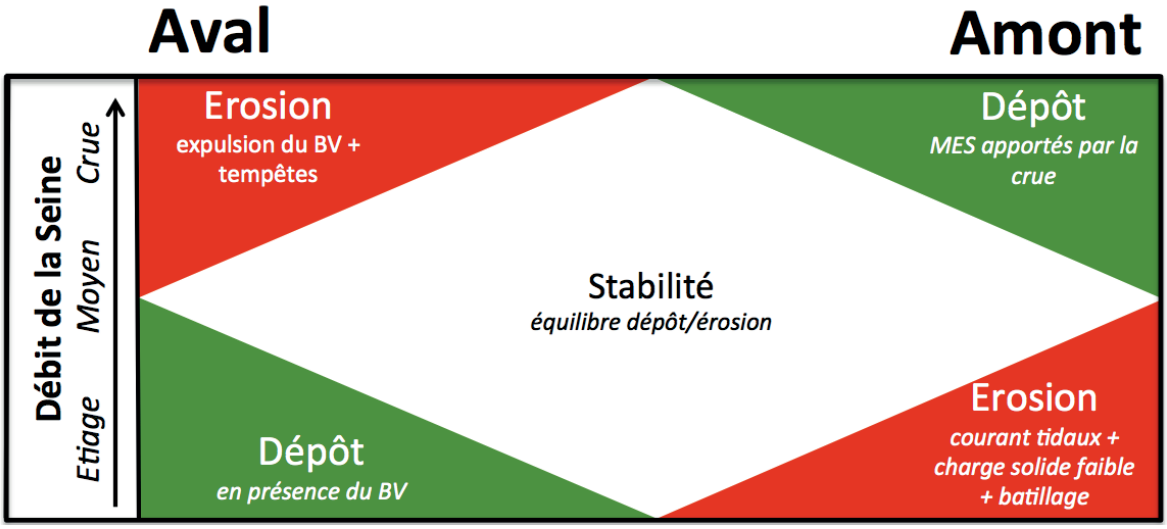


FIGURE 45 Synthèse qualitative du fonctionnement des vasières intertidales de l'aval vers l'amont en fonction du débit de la Seine et des forçages (marée, houle, batillage)



ENCART N° 5

J. DELOFFRE - M2C

Le batillage en estuaire de Seine

L'érosion des berges est un phénomène affectant la plupart des cours d'eau. Les facteurs naturels responsables de ce processus sont multiples : les crues, les courants de marée ou les vagues de vent. L'activité humaine, et notamment l'introduction de vagues générées par les bateaux (batillage), contribue à accélérer ce phénomène. Cet accroissement de l'érosion peut entraîner des nuisances environnementales, par exemple en détruisant les habitats, mais également économiques en endommageant les quais et les digues ou en mettant en danger des habitations. La densification du trafic côtier et fluvial, l'accroissement de la puissance des navires entraînent une amplification du phénomène d'érosion.

Pour répondre à cette problématique, l'objectif du programme Seine-Aval 4 IBIS (Investigation du Batillage en Seine) était d'améliorer la connaissance de l'effet du batillage sur les zones intertidales de l'estuaire de la Seine. Dans ce système, la compréhension et la quantification du processus de batillage sont complexes en raison de :

(I) la multiplicité des gabarits de navires navigant en Seine (80 % de la flotte mondiale est susceptible de remonter jusqu'au port de Rouen),

(II) le caractère macrotidal* de l'estuaire impliquant une modification quasi continue de la hauteur d'eau,

(III) la morphologie (e.g. méandres, endiguement, profondeur du chenal...),

(IV) la pluralité des faciès sédimentaires intertidaux de l'estuaire (e.g. sable, vase, graviers et mélanges).

Les vagues de batillage (FIGURE H) sont dépendantes des caractéristiques des navires (tirant d'eau, vitesse du bateau, forme de coque). Elles induisent une augmentation des vitesses de courant (jusqu'à des vitesses de 1 m/s sur quelques secondes), qui érodent l'estran et induisent une augmentation de la concentration en MES. Les analyses statistiques basées sur environ 1 700 passages de navires montrent que 63 % des passages de bateaux génèrent une remise en suspension (entre quelques mm et plusieurs cm) de l'estran. Pour des navires de caractéristiques similaires, l'érosion sera d'autant plus intense que la tranche d'eau sur l'estran est faible (FIGURE I).

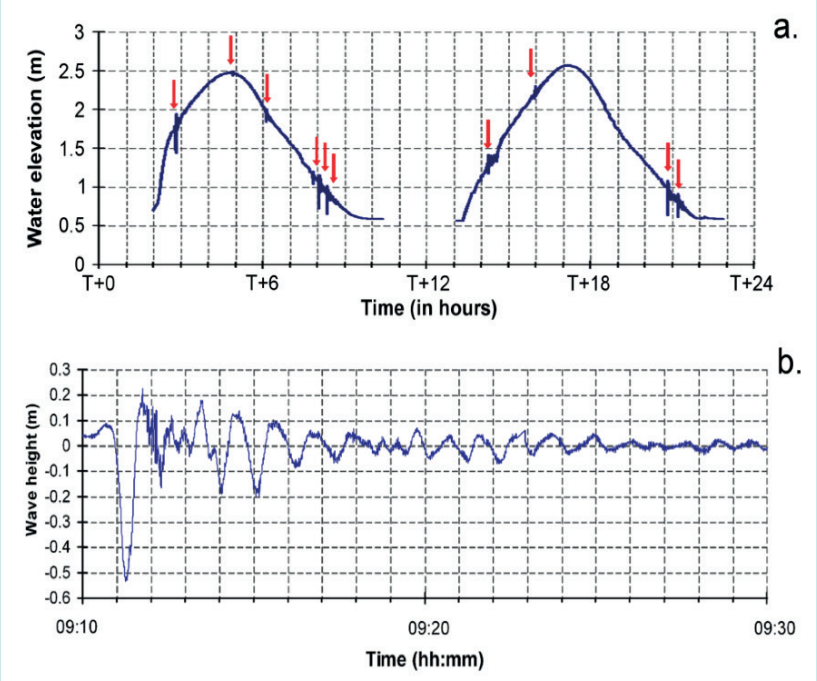


FIGURE H Evolution de la hauteur d'eau liée au batillage. a. Echelle de deux cycles de marée semi-diurne (chaque flèche correspond à un événement de batillage). b. Echelle d'un événement (filtré de la marée)

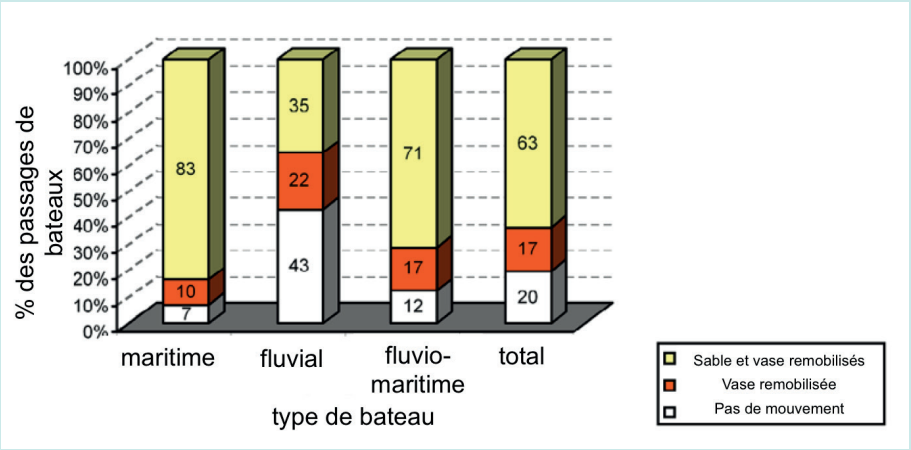


FIGURE I Remise en mouvement potentielle des sédiments en fonction des types de navires qui naviguent en Seine

Les différents suivis annuels réalisés sur des zones intertidales clés de l'estuaire ont permis de dissocier l'influence du batillage en fonction des faciès caractéristiques.

- Sur les zones intertidales vaseuses (Vasières de Oissel, Petiville, Le Trait), un événement de batillage induit une érosion significative et un export net de sédiments hors de la zone d'étude
- Sur les zones intertidales plus sableuses (Bardouville), un événement de batillage contribue à remanier localement le sédiment, modifiant la morphologie du site (déplacement de rides, transfert haut/bas d'estran). Ces mouvements n'impactent pas le bilan sédimentaire de l'estran, à l'échelle d'un événement.

Les différentes études montrent que, malgré le dynamisme des zones intertidales à des pas de temps courts, à l'échelle annuelle le bilan sédimentaire montre une relative stabilité quelle que soit la zone intertidale étudiée.

III LE BILAN SÉDIMENTAIRE



L'ensemble des forçages décrits au chapitre 1 génère des flux sédimentaires à destination ou en provenance de l'estuaire. La mise en regard de l'ensemble de ces apports/exports sédimentaires à l'estuaire permet de dresser le bilan sédimentaire* de l'estuaire de la Seine. En théorie, les évolutions morphologiques de l'estuaire sont directement liées à ce bilan : ainsi, si celui-ci est excédentaire, l'estuaire se comble ; à l'inverse, si ce dernier est déficitaire, l'estuaire est en érosion.

A. LES APPORTS AMONT

Les apports issus de l'érosion des 67 000 km^2 du bassin versant amont et des rejets industriels et domestiques dans le réseau hydrographique constituent la principale source de MES continentales à l'estuaire de la Seine. Ce flux solide est estimé en condition moyenne entre 600 000 et 700 000 t par an, dont 75 % se font en période de crue et principalement durant la phase ascendante des crues (Avoine, 1985). Durant les années sèches, ce flux se limite à 200 000 t contre 1 000 000 t pour les années humides ; ce qui équivaut à une érosion moyenne du bassin versant amont comprise entre 3 et 10 t.km^{-2}.an^{-1} (7,5 t.km^{-2}.an^{-1} en conditions moyennes). D'après ces chiffres, l'arasement du bassin versant de la Seine est alors de l'ordre de 0,4 cm par millénaire en condition moyenne (Avoine, 1995).

Relation débit/charge solide

Transporté par les eaux de la Seine, le flux de matières en suspension transitant au barrage de Poses est principalement étudié en lien avec le débit de la Seine et ses variations. Ainsi, les travaux d'Avoine (1985), de Cossa *et al.* (1994), de Meybeck, Idlafkih *et al.* (1995), et de Guézennec (1999), se sont attachés à caractériser la relation existante entre le débit liquide et la charge solide* de la Seine à Poses. Les diverses campagnes de mesures en continu réalisées dans le cadre de ces études 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).

L'étude de ces chroniques de mesures a montré qu'environ 75 % des apports particulaires provenant de l'amont se faisaient en condition de crue et plus particulièrement durant la phase ascendante des crues. Ces phases ascendantes de crues représentent une vingtaine de jours par an, et peuvent transporter jusqu'à 50 % des apports amont (Avoine, 1982 ; Avoine, 1985 ; Meybeck and Idlafkih, 1995 in Guézennec, 1999).

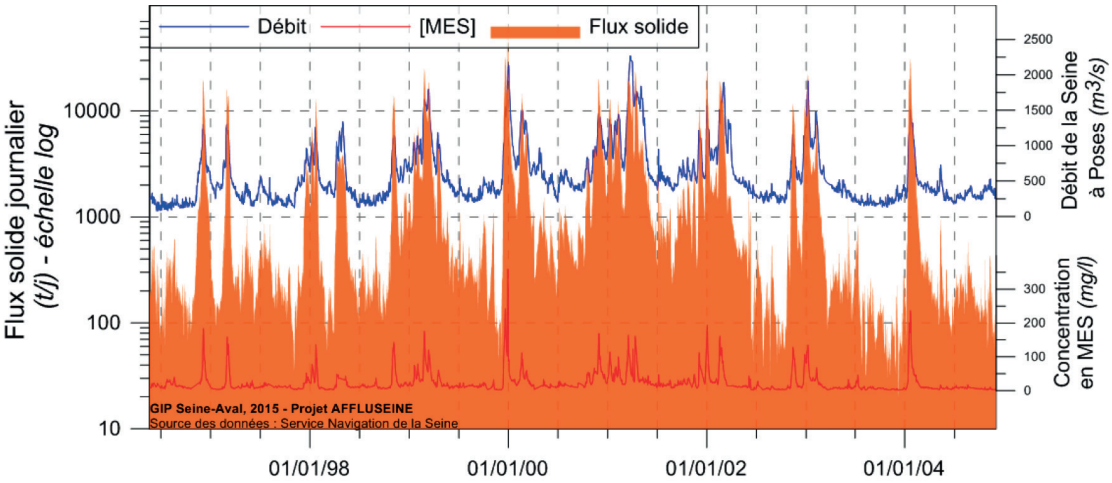


FIGURE 46
Evolution quotidienne : des débits fluviaux, des concentrations pondérales de MES calculées et des flux de MES au barrage de Poses (pk 202) entre 1996 et 2004 (Données Service Navigation de la Seine ; retraitées dans le cadre du projet Seine-Aval 5 AFFLUSEINE)

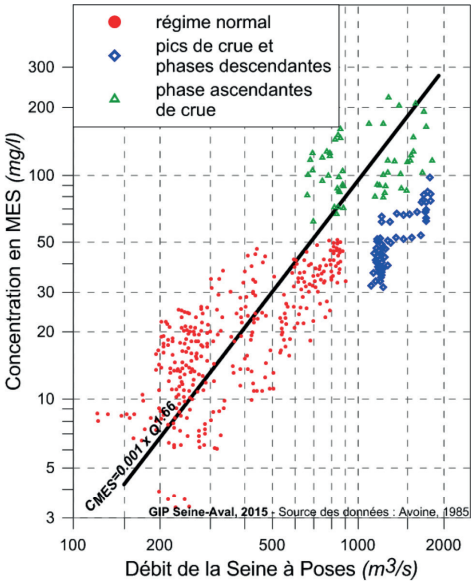


FIGURE 47 Relation entre la charge solide et le débit fluvial à Poses, issue de Avoine, 1985 (mesures de décembre 1982 à décembre 1984)

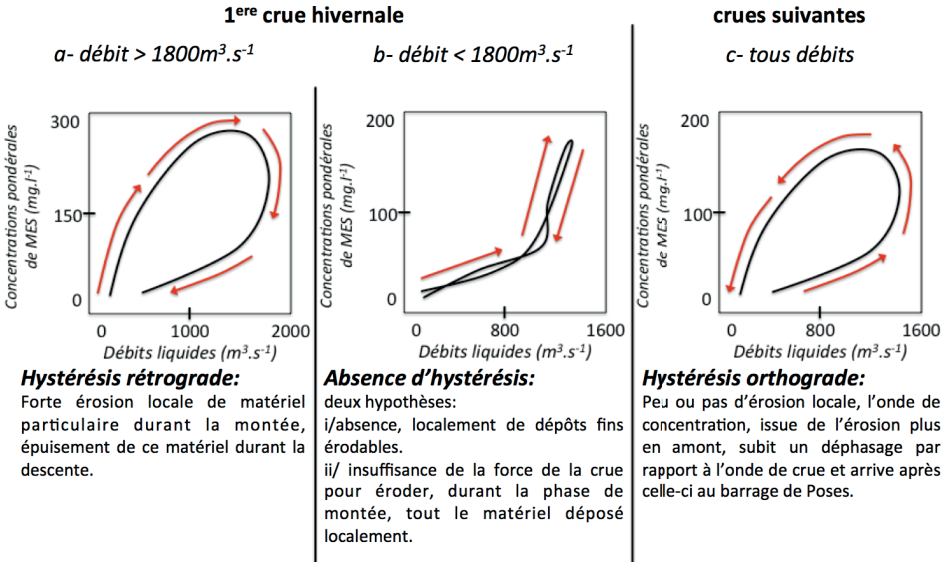


FIGURE 49 Interprétation des relations entre charge solide/débit liquide au barrage de Poses (d'après Guézennec 1999)

Avoine (1985) propose une formulation à appliquer en dehors des pics de crue et des phases de débits descendantes (FIGURE 47). Cette relation et ses conditions d'applications ont par la suite été modifiées et complétées, a priori suite aux mesures réalisées dans les années 90 par le Service Navigation de la Seine (SNS) (Avoine, 1995). Actuellement, ces équations dont les limites ont été démontrées (Le Hir et Lafite, 2012) sont utilisées dans les conditions d'applications définies dans Guézennec (1999) (FIGURE 48).

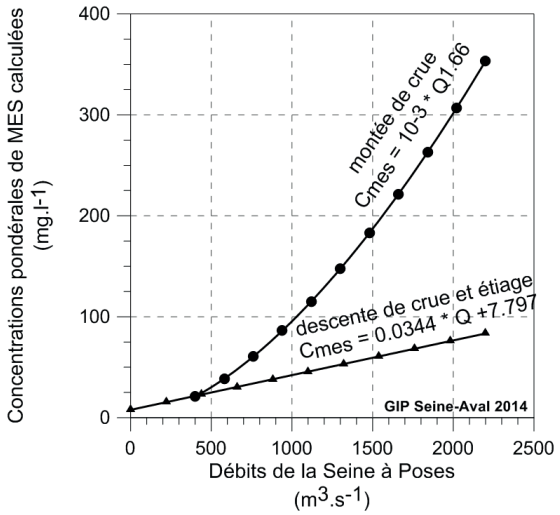


FIGURE 48 Relations entre charge solide et débit de la Seine actualisées par Guézennec 1999

Les études portant sur la relation entre le débit liquide et la charge solide en période de crue montrent également que cette dernière est non seulement dépendante du débit, mais aussi de ses évolutions passées. Temporellement, le maximum de concentration en MES peut, en fonction du type de crue, être soit en phase, soit en avance ou en retard par rapport au débit ; ces deux derniers cas engendrent respectivement des relations débits/charge solide présentant des hystérésis* rétrograde et orthograde (FIGURE 49). Guézennec (1999) montre par exemple que la relation débit/charge solide forme une hystérésis rétrograde si le débit dépasse 1800 m^3/s et que les crues suivantes seront associées à des hystérésis orthogrades. Ces phénomènes s'expliquent par une disponibilité plus importante des MES à la remise en suspension lors de la première crue de la saison par rapport aux crues suivantes pour lesquels le matériel sédimentaire aura déjà été charrié (Guézennec, 1999 ; Avoine, 1985).

Les équations dites d'Avoine (1985) (FIGURE 48) définissent la charge solide en fonction du débit instantané. Elles ne sont pas pour l'instant à même de reproduire ce phénomène qui traduit la complexité des écoulements sur le bassin versant amont (Guézennec, 1999). Cette limite à l'application de ces équations peut induire une erreur sur le flux solide annuel entrant dans l'estuaire variant entre 4 % pour les années hydrologiques sèches (exemple calculé sur 1998-1999) à 94 % pour les années humides (exemple calculé sur 2000-2001). La mise en place d'une station de mesure en amont du barrage de Poses, telle qu'envisagée dans le projet Seine-Aval Synapses, constitue une alternative à cette technique de calcul et devrait à terme permettre d'améliorer ces équations.

B. LES APPORTS LATÉRAUX ET INTRA-ESTUARIEN

1. Les apports issus de l'érosion des bassins versants latéraux

Peu d'études se sont directement intéressées aux apports solides intra-estuariens, néanmoins les études existantes ont donné des ordres de grandeur des taux d'érosions des bassins versants alimentant l'estuaire de la Seine.

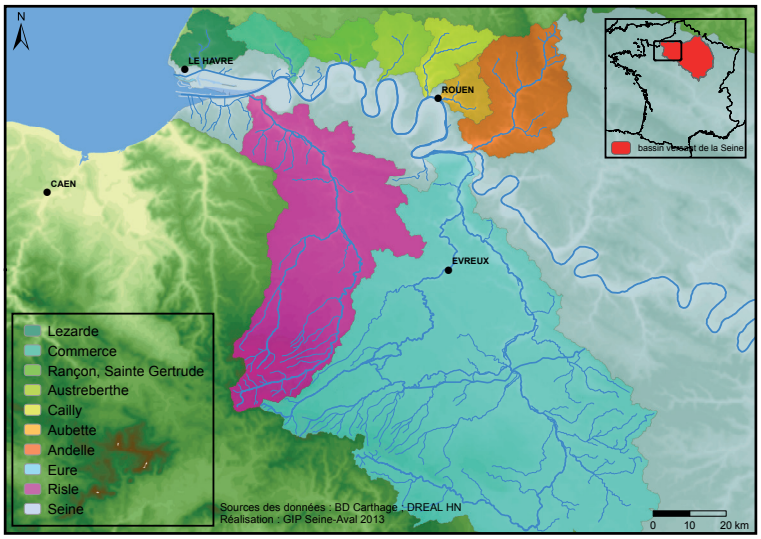


FIGURE 50 Délimitation des bassins versants intra-estuariens

Les études de Laignel (2006) portant sur l'Andelle et l'Austreberthe ont par exemple permis d'estimer les apports de l'ensemble des affluents de la rive droite à environ 30 000 t.an^{-1} et ceux de la Risle à 29 500 t.an^{-1}. Ces études ont également fourni des taux d'érosions moyens pour ces bassins. Dans le cadre de cette synthèse, les taux d'érosions disponibles dans la bibliographie ont été généralisés aux bassins versants voisins, afin de fournir une indication qualitative de la contribution des bassins versants intra-estuariens aux apports particulaires globaux de l'estuaire. Ce calcul, illustré par le diagramme de la FIGURE 51, montre l'importance des apports intra-estuariens, qui représentent plus de 20 % des apports en MES d'origine continentale. La surface des bassins intra-estuariens représentant environ 15 % de la surface totale du bassin versant de la Seine, ce calcul rend également compte de l'importante érodabilité des sols hauts et bas normands comparés à ceux du bassin parisien.

Le calcul réalisé ici est soumis à une incertitude très importante. En effet, 6 des 9 apports issus des bassins versants intra-estuariens ont été extrapolés à partir des connaissances actuelles. En particulier, la contribution de l'Eure, qui est ici représentée comme la principale source de MES latérale en raison de son importante surface, est très incertaine étant donnée le peu de connaissance dont nous disposons actuellement à ce sujet. Considérant son importance à l'échelle du bassin versant de la Seine (≈ 7,5 % de la surface du bassin versant amont) et l'incertitude que notre manque de connaissance à son sujet introduit dans l'ensemble des études hydro-sédimentaires de l'estuaire, l'Eure devra à l'avenir être étudiés et suivis de manière plus précise.

Les apports karstiques solides issus des écoulements souterrains bien que supposés négligeables, n'ont jamais fait l'objet de la moindre quantification ; ce type d'apport ne sera donc pas détaillé dans cette synthèse.

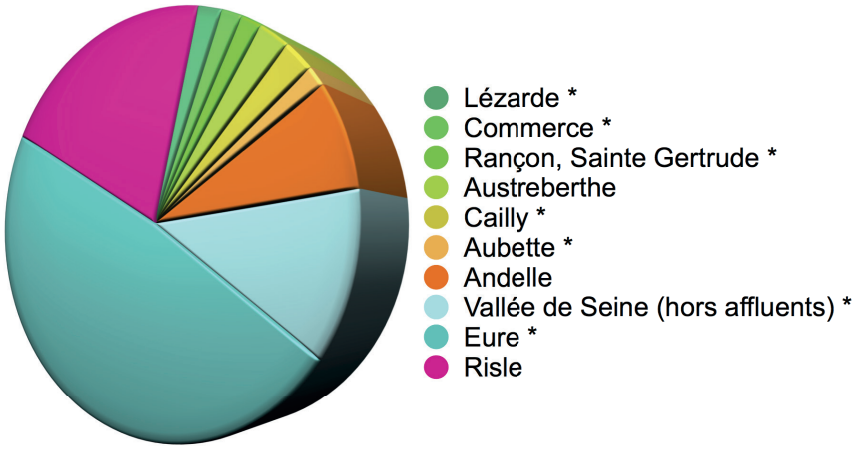
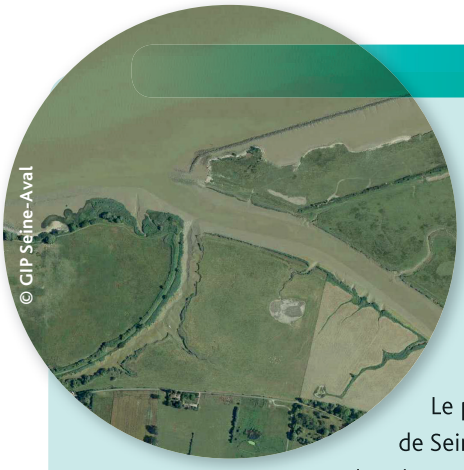


FIGURE 51 Comparaison des contributions de chacun des bassins versants intra-estuariens à l'estuaire en MES (* calculé en extrapolant les taux d'érosion des bassins versants voisins ; la vallée de Seine représente la partie du bassin versant de l'estuaire non rattachée aux affluents intra-estuariens)


© GIP Seine-Aval

ENCART N° 6

V. LANDEMAINE M2C/BRGM

Vers une meilleure évaluation de la contribution des apports solides issus de l'érosion des bassins versants intra-estuariens

Le projet Seine-Aval 5 AFFLUSEINE (Flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de Seine), coordonné par le laboratoire M2C de l'université de Rouen et le BRGM, se place dans la continuité des travaux réalisés dans les précédentes phases du programme Seine-Aval. Il se fixe comme objectif de quantifier les flux sédimentaires annuels de l'ensemble des affluents de la Seine sur sa partie estuarienne, d'étudier la variabilité temporelle de ces flux, de fournir des flux sédimentaires moyens représentatifs d'une longue période de temps et de quantifier les incertitudes.

D'un point de vue technique, la quantification des flux sédimentaires est simple. Par exemple, le flux sédimentaire journalier (t/j) correspond au simple produit du débit moyen journalier ($m^3.s^{-1}$) par la concentration en Matières En Suspension (MES) moyenne journalière (mg/l). En théorie, il suffirait d'implanter des stations de suivi sur l'ensemble des affluents de la Seine mesurant en continu les débits et les concentrations en MES pour pouvoir répondre aux objectifs d'AFFLUSEINE. En pratique, seul le suivi en continu des débits est réalisé car le suivi des concentrations en MES nécessite de déployer d'importants moyens humains, techniques et financiers. Des mesures de concentrations en MES sont toutefois disponibles sur le bassin Seine-Aval : (1) des mesures ponctuelles (fréquence mensuelle voire plus) sur l'ensemble des rivières réalisées par l'Agence de l'Eau Seine Normandie, et (2) des mesures en continu sur quelques rivières (l'Andelle, l'Austreberthe, le Dun, et l'Yères) réalisées par le Laboratoire de M2C de l'Université de Rouen.

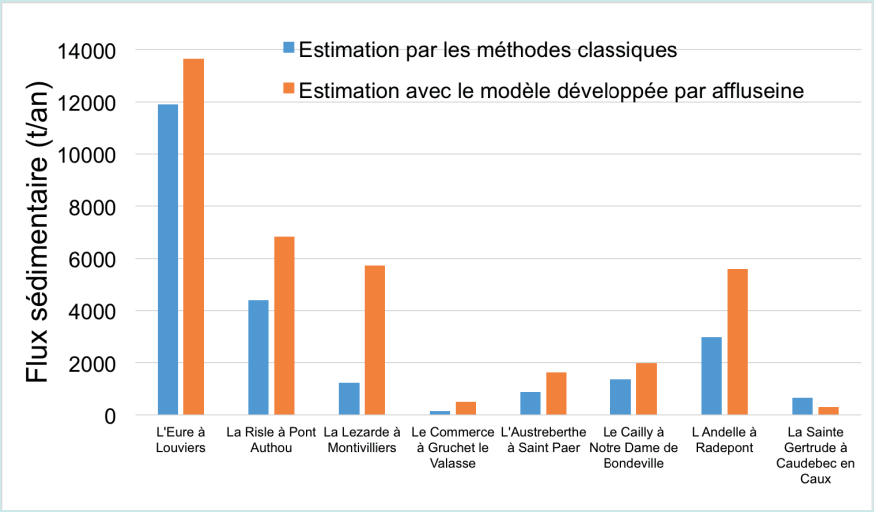


FIGURE J Estimation antérieure et révisée des apports sédimentaires de différents affluents de l'estuaire de la Seine entre 1991 et 2012 dans le cadre du Projet AFFLUSEINE

L'hétérogénéité de la disponibilité des données de concentrations en MES ne permet pas de quantifier directement les flux sédimentaires. Elle nécessite de construire ou d'appliquer des méthodologies d'interpolation ou d'extrapolation des concentrations en MES. Dans le cadre du projet AFFLUSEINE, les méthodes classiquement utilisées dans la littérature ont été appliquées aux rivières disposant de mesures de concentration en MES de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Les performances de ces méthodes ont été évaluées et les résultats montrent qu'elles ne sont pas adaptées pour le contexte régional puisqu'en moyenne, elles entraînent une sous-estimation de l'ordre de 25 % des apports sédimentaires intra-estuariens (FIGURE J).

Face à ces résultats, une autre méthode a dû être développée pour quantifier plus précisément les flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine. Cette approche, appelée régionalisation, consiste à calibrer un modèle de prédiction des concentrations en MES pour chacune des rivières disposant de mesures en continu et d'utiliser les caractéristiques physiographiques des bassins versants (topographie, géologie, occupation des sols, hydrographie, etc.) pour extrapoler aux rivières disposant seulement de mesures de débit.

L'intérêt de cette méthode est double puisqu'il permet d'une part de quantifier les flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine ne disposant pas de mesures de concentrations en MES et d'autre part, de comprendre le rôle des caractéristiques physiographiques dans la réponse sédimentaire de ces affluents.

Les incertitudes sur les flux sédimentaires annuels ont également été évaluées en comparant les flux estimés par le modèle avec les flux mesurés en rivière. Cette analyse montre que les performances du modèle sont bien meilleures que celles des méthodes classiques ; la variabilité temporelle des flux sédimentaires, liée aux épisodes de crue, est notamment mieux reproduite, réduisant ainsi l'incertitude sur ces derniers. En lien avec le projet ECHANGES, ce modèle pourra être mobilisé pour estimer l'impact du changement climatique sur les flux sédimentaires à l'estuaire.

2. Les apports endogènes et industriels

Les apports endogènes, principalement liés à la production phytoplanctonique, ont été évalués par Dupont (2001) dans le cadre du fascicule Seine-Aval « matériaux fins ». Ils sont estimés à 60 000 t/an. Cette source est négligeable en période de crue, néanmoins elle peut représenter 50 % des apports en étiage, pendant les périodes de blooms (Verney, 2006). Il est à noter qu'il n'existe actuellement dans la bibliographie, aucune trace de la méthode ayant été utilisée pour obtenir ce chiffre, qui est ainsi à considérer que de manière très qualitative. Concernant les apports particulaires liés aux rejets industriels et urbains, ceux-ci étaient estimés à 11 000 t/an en 1999 (Guézennec, 1999).

C. LES APPORTS MARINS

1. Les sédiments fins marins

La dynamique des MES dans la baie de Seine est contrôlée par les courants de marée et les épisodes de houles. Ainsi ce transport est principalement orienté vers l'estuaire de la Seine et est maximal pendant les épisodes de tempêtes, indépendamment du débit de la Seine (Avoine, 1995). Ces résultats ont été confirmés grâce à des expérimentations réalisées par l'IRSN à l'aide de deux marqueurs radioactifs le cobalt 60 (^{60}Co) et le césium 137 (^{137}Cs) dans les années 90. Ce suivi de traceurs a permis de retrouver des particules d'origines marines jusqu'au pk 280 à Duclair (Boust, 1997 ; Guézennec *et al.*, 1998 in Guézennec, 1999 ; Dubrulle-Brunaud 2007). La quantification de ce flux constitue un véritable défi scientifique, étant données ses dépendances avec les processus sédimentaires naturels et anthropiques intra-estuariens telles que l'érosion des sédiments reliques de la baie de Seine ou la remobilisation des sédiments clapés* dans la proche baie par les deux Ports. Avoine (1995), en effectuant la différence entre le volume estuarien se comblant annuellement (dans les années 80) et les apports fluviatiles, estime que les apports marins vaseux sont équivalents aux apports issus du bassin versant soit un ordre de grandeur proche de 1,5 million de m^3.

2. Les sables marins

De la même manière que pour les apports en particules fines, la dynamique des sables est régie par les courants de marée et par la houle. Ainsi, le transport sableux se fait préférentiellement d'ouest en est, en direction de l'estuaire de la Seine. Ces courants sont à l'origine du développement de structures sédimentaires sableuses longitudinales dont l'orientation est conforme à la direction des courants de marée dominant dans le secteur. Ces structures sableuses s'organisent sous forme de mégarides asymétriques indiquant un transport dominant vers l'estuaire (Avoine, 1995). Ces sables sont issus de l'érosion des fonds de la baie de Seine par les courants locaux. Avoine (1995), en comparant également des cartes bathymétriques datant de 1874 et 1913, estime à 1,5 cm/an l'érosion de la baie de Seine orientale soit 2,5 millions de m^3/an sur le secteur allant du Havre à Ouistreham. Une étude de la SOGREAH datant de 1994 propose un schéma de synthèse des apports dans les zones draguées indiquant les

sources d'apports, les résultantes du transport amont-aval, ainsi que les zones de dépôts (FIGURE 52). Cette étude conclue également que 2,5 millions de m^3 de sables de la baie de Seine rentrent dans l'estuaire chaque année.

Les résultats précédents sont principalement issus des travaux réalisés par Avoine dans les années 80 (synthétisés en 1995) et sont ainsi à considérer avec précautions étant donné les évolutions de l'estuaire au cours des 20 dernières années, et en prenant également en compte les moyens de mesures de l'époque. Néanmoins, la tendance de transport des sables présenté est cohérente avec les résultats obtenus par Garnaud en 2003 plus récemment par modélisation dans le cadre du projet Seine-Aval 4 MODEL (Le Hir *et al.*, 2012).

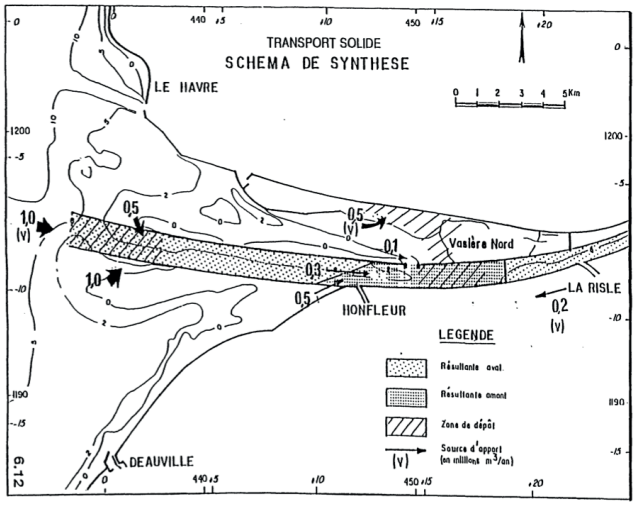


FIGURE 52 Schéma des apports solides à l'embouchure (SOGREAH 1994 in Avoine1995)



ENCART N° 7

J.P. LEMOINE AVEC LES CONTRIBUTION DU SERVICE CHENAL ET AIDE À LA NAVIGATION DU GPMR ET DU SERVICE ACCÈS ET ENVIRONNEMENT MARITIME DU GPMH

Les Dragages de l'estuaire de la Seine

Les estuaires, et plus particulièrement les bassins portuaires, sont des zones littorales abritées, propices à la sédimentation. Etant donnés les enjeux économiques importants associés à leur accessibilité, les accès portuaires sont aménagés et entretenus afin d'y maintenir des profondeurs compatibles avec les besoins de la navigation. Ainsi depuis le 19ème siècle l'estuaire de la Seine, qui abrite les Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen, est dragué, soit dans le cadre de travaux d'approfondissement ou d'aménagement, soit pour maintenir les profondeurs liées aux dépôts naturels (dragage d'entretien) (Foussard *et al.*, 2010). Annuellement ces dragages d'entretien représentent actuellement près de 6,5 millions de m^3 de sédiment pour les deux ports confondus. Ils sont soit clapés en mer, soit déposés à terre.

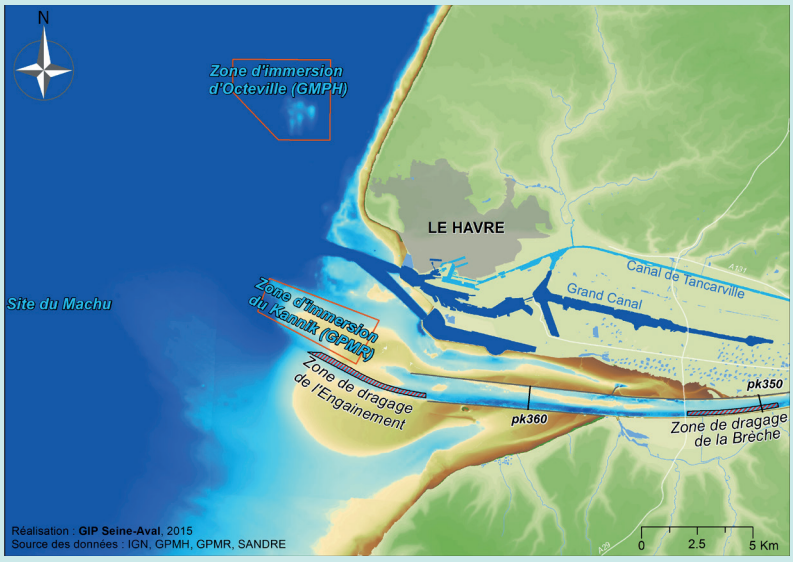


FIGURE K Localisation des principaux sites de dragages et de clapages à l'embouchure de l'estuaire de la Seine

Afin de garantir un accès jusqu'aux terminaux rouennais pour les navires disposant d'un tirant d'eau allant jusqu'à 11,4m, le GPMR extrait en moyenne près de 4,5 millions de m^3 de sédiment par an à l'embouchure (dans la zone située entre l'Engainement et la confluence de la Risle). Les deux principaux sites de dragage sont les lieux dits de l'Engainement et de la Brèche aval qui représentent respectivement 60 % et 35 % des volumes totaux dragués par le GPMR (FIGURE K).

En lien avec la nature des faciès sédimentaires avoisinants, les sédiments dragués au niveau de l'Engainement sont composés de 50 à 60 % de vases (<63 µm). La sédimentation dans cette zone est particulièrement importante en fin de forte crue et lorsque les épisodes de tempête remettent en suspension les sédiments des bancs d'embouchure (Banc d'Amfard et les Ratelets) qui se déposent ensuite durant les étales dans le chenal de navigation. Au niveau de la Brèche aval, les conditions hydrodynamiques sont bien plus intenses (courants tidaux importants), et les sédiments dragués sont composés à 60 % de sables fins. Cette zone semble, quand à elle, plus propice aux dépôts lors des années sèches. Les 5 % de sédiments dragués à l'embouchure restants sont quant à eux dragués durant les années sèches entre Tancarville et l'embouchure de la Risle. Depuis 1977, la majeure partie de ces sédiments est clapée sur le dépôt de dragage du Kannik ; le reste, soit environ 100 000 m^3, est déposé à terre. La stabilité des dépôts effectués au Kannik est estimée à 60 %, autrement dit 40 % des sédiments clapés sont remis en suspension par l'hydrodynamisme local et quitte ainsi le site.

Remarque : Le site du kannik arrive en fin d'exploitation et sera a priori remplacé par le site du Machu situé plus au large.

Entre Tancarville et Rouen, les dragages de sédiments effectués par le GPMR sont moindres, et représentent annuellement un volume d'environ 350 000 m^3. À l'amont de Rouen, la navigation fluviale nécessite un tirant d'eau plus faible, VNF y drague entre 5 000 à 10 000 tonnes de sédiments par an (voire 15 000 t en cas de forte crue).

Depuis mars 2010 et la fin des travaux de la 2e phase de Port 2000, le GPMH drague environ 2 millions de m^3 de sédiment par an pour l'entretien des profondeurs de ses chenaux d'accès et de ses bassins portuaires. Globalement les volumes dragués dans les chenaux et bassins dits de l'ancien port sont légèrement inférieurs à ceux dragués dans Port 2000 et son chenal d'accès. Les sédiments dragués par le GPMH sont plus vaseux que ceux dragués par le GPMR, leurs compositions en vases est comprise entre 80 et 90 %. L'ensemble de ces sédiments est clapé sur le dépôt de dragage d'Octeville au nord ouest du cap de la Hève. Sur ces dernières années, la stabilité de ce site est voisine de 40 %. Ainsi, près de 60 % des matériaux immergés sont dispersés (GPMH, 2014).

D. BILAN DES APPORTS ANNUELS EN MES À L'ESTUAIRE DE LA SEINE

Les données présentées dans les paragraphes précédents permettent, malgré leurs incertitudes, de proposer un bilan des apports sédimentaires à l'estuaire (FIGURE 53). Le bilan présenté ici est un bilan en masse de sédiments, la réalisation d'un bilan en volume est plus délicate, étant donné la dynamique des particules cohésives au sein de l'estuaire, et en particulier les phénomènes de consolidation des dépôts sédimentaires.

Contrairement au bilan précédemment établi par Verney en 2006, ce bilan intègre les apports marins cohésifs et sableux dont la quantification à l'échelle annuelle est difficile en raison du manque de connaissances sur les mécanismes naturels et anthropiques associés à ce flux, notamment la remobilisation des sédiments dragués dans l'estuaire et clapés à l'embouchure. Il est important de noter que ce bilan est un bilan des apports, il ne tient donc pas compte des exports vers la baie de Seine mis en avant par Dubrulle en 2005. En particulier, il ne prend pas en compte la remobilisation et les flux de sédiments induits par les opérations de dragages, qui seront abordés dans le paragraphe suivant.

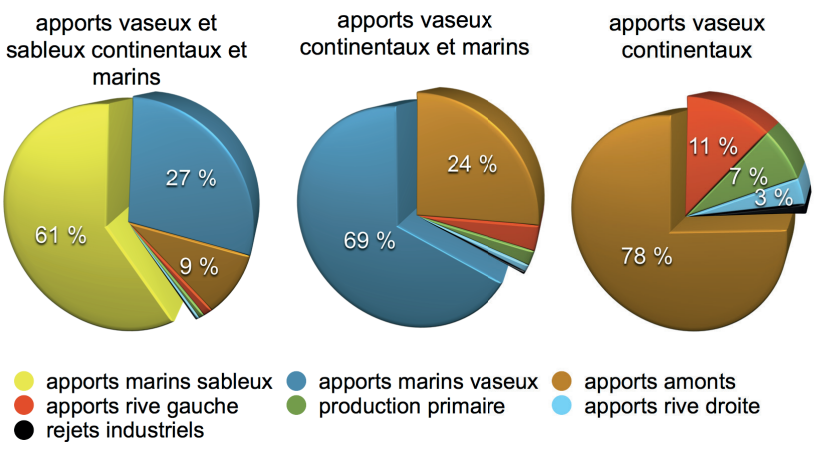


FIGURE 53 Bilan en masse des apports annuels en MES à l'estuaire

E. BILAN SÉDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

La mise en regard de l'ensemble des apports cités précédemment avec les volumes de sédiments dragués annuellement par les deux grands ports maritimes de Rouen et du Havre permet d'obtenir un bilan sédimentaire quasiment équilibré (FIGURE 54). Ainsi, pour le maintien des conditions de navigation le port de Rouen drague environ 4,5 millions de m^3 de sédiments par an soit quasiment l'équivalent du volume de sédiment entrant dans l'estuaire naturellement. Une fois de plus, cette conclusion sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire doit être appréhendée de manière qualitative. En effet d'une part, l'étude du ratio sables/vases des apports et des granulométries réalisées par le GPMR sur les sédiments dragués laisse supposer que les 2,5 millions de m^3 d'apport sableux estimés par Avoine sont surestimés (GPMR, 2010). D'autre part, le présent bilan ne tient pas compte du flux de MES exportés naturellement vers la baie de Seine ceci étant nous pouvons supposer que la majeure partie de ce flux est réintroduit dans l'estuaire par les courants marins à une échelle de temps inférieur à une année, ou encore que les apports en sédiments cohésifs cités précédemment sont sous-estimés.

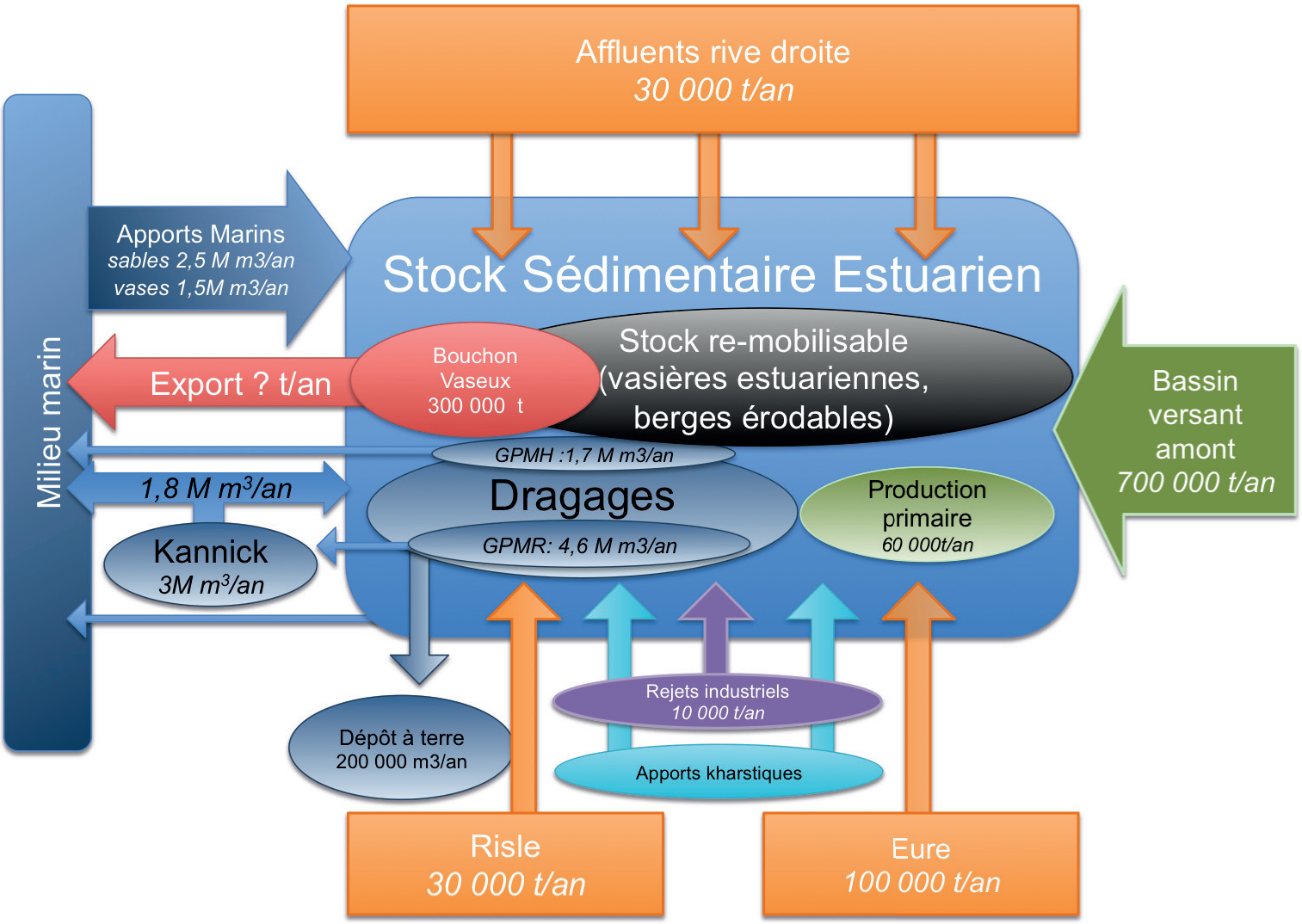


FIGURE 54 Bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine construit d'après la bibliographie


© GPMH

ENCART N° 8

L. HAMM, C. CAYROL - ARTELIA

Les évolutions morphologiques de l'embouchure de l'estuaire entre 2001 et 2011

• Le contexte

La dernière décennie (2001-2011) a vu une évolution contrastée des différents compartiments de l'embouchure induite essentiellement par les travaux neufs et d'entretien réalisés par les Grands Ports Maritime du Havre et de Rouen. Côté travaux neufs, ce sont les travaux dits « Port 2000 » qui ont impacté la fosse nord de l'estuaire.

Les travaux d'entretien concernent essentiellement le maintien des profondeurs dans le chenal d'accès au port de Rouen, à l'aval de Tancarville, qui a conduit à des volumes dragués de l'ordre de 44 millions de m^3 dont 90 % ont été clapés sur le site du Kannik. Cela concerne aussi l'entretien des bassins et accès du port du Havre (port Nord et bassin Port2000), les vases draguées étant exportées hors de l'estuaire et clapées sur le site d'Octeville.

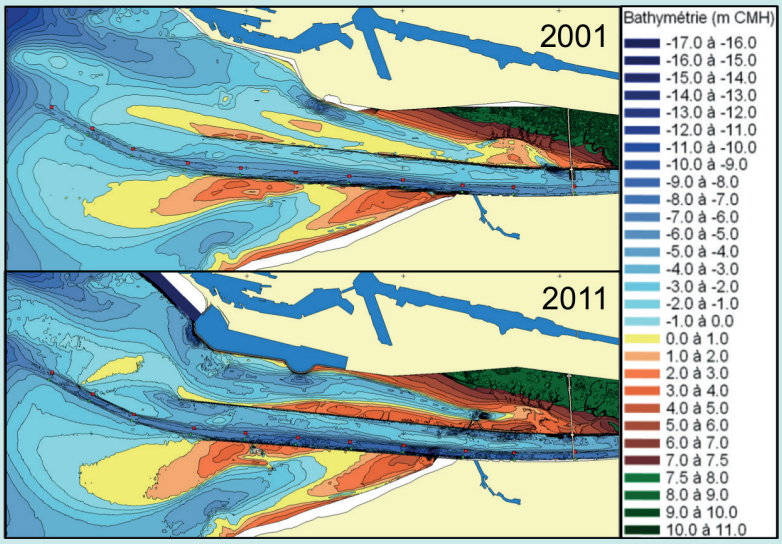
Ces travaux s'effectuent dans un estuaire compartimenté par les aménagements majeurs réalisés il y a 50 ans à l'occasion de l'ouverture du nouveau chenal d'accès à Rouen (Foussard *et al*, 2010). Cette compartimentation visait à pérenniser et développer la navigation jusqu'à Rouen. Elle a conduit à un schéma de la dynamique hydrosédimentaire dans l'estuaire caractérisé par :

- un flot entrant préférentiellement par le Nord et le Sud qui conduit au remplissage de la zone centrale endiguée par déversement au-dessus des digues submersibles, ce qui tend à faire remonter les fonds dans ces deux zones latérales (sédimentation sablo-vaseuse) tout en limitant la sédimentation dans le chenal de navigation de Rouen.
- Un jusant canalisé entre les deux digues basses pour faciliter l'expulsion des sédiments du chenal de navigation, qui conduit à un approfondissement de cette zone, en complément des dragages d'entretien du chenal.

Dans la fosse nord, deux brèches dans la digue basse nord permettent des échanges avec la zone endiguée en flot et en jusant sur plus de 1 100 m de linéaire. Une brèche de 100 m de long existe également près de l'enracinement de la digue du Ratier pour permettre des échanges entre la zone sud et la zone endiguée.

Ce schéma est forcé par la marée mais aussi par l'hydrologie de la Seine avec ses fluctuations pluriannuelles faisant alterner périodes humides et sèches et par la météorologie des tempêtes produisant des agitations (vagues) capables de remettre en mouvement de grosses quantités de sédiments meubles déposés sur le fond.

• Les évolutions observées



La FIGURE L fournit les levés topo-bathymétriques mesurés en 2001 et 2011, fin de la période considérée. La carte différentielle (FIGURE M) entre les deux situations bathymétriques souligne bien les évolutions observées qui s'opèrent à plusieurs échelles de temps cohabitant actuellement dans l'estuaire. La réorganisation des fonds de la fosse nord depuis la fin des travaux a été en effet

FIGURE L Levé topo-bathymétrique en haut :fin 2001 ; en bas : fin 2011 (ARTELIA, 2012)

rapide et se poursuit encore actuellement comme cela a été décrit en détail dans un fascicule précédent (Fisson, 2014). Côté embouchure, les surfaces et volumes soustraits par Port 2000 à l'estuaire conduisent au creusement d'une nouvelle fosse nord au sud du port pour un volume de l'ordre de 17 millions de m^3 qui s'étend jusqu'à la digue basse nord du fait de la présence de fonds inaffouillables au sud immédiat du port. Ce processus de flot se conjugue avec un renforcement du jusant dans la zone endiguée le long de la digue basse nord pour démanteler le banc d'Amfard-sud.

D'un autre côté, le reste de l'estuaire est soumis à des évolutions plus lentes à l'œuvre depuis 30 à 50 ans qui se résument par :

a) Un front d'avancée deltaique induit principalement par les clapages du port de Rouen sur le site du Kannik et leur remaniement par l'hydrodynamique de l'estuaire. L'avancée de ce front est estimée à 50 m/an en moyenne. Ce rythme est similaire à celui observé sur la décennie précédente avec cependant une dissymétrie nord-sud qui apparaît conduisant à une avancée plus rapide du front côté Kannik de 70 m/an et plus lente côté Ratelets de 40 m/an. Cette avancée correspond à un dépôt de sédiments estimé à 35 millions de m^3.

b) Le creusement de la zone centrale endiguée induit par les dragages du chenal de Rouen et la configuration des digues basses. Ce creusement est modulé spatialement par la mise à nu de zones inaffouillables par les courants de marée qui constituent des points hauts dans le chenal qui sont régulièrement arasés (dernière opération en date en 2012). Ils sont aussi des obstacles à l'écoulement sur la banquette nord, qui perturbent l'évolution des fonds meubles adjacents. Le volume net creusé sur la période est estimé à 26 millions de m^3.

c) Les évolutions de la zone Sud suite à la construction de la digue du Ratier en 1960 conduisant au comblement de l'ancien chenal de navigation de Rouen qui passait le long des côtes du Calvados, au creusement d'un nouveau chenal principal de flot (appelé aussi fosse sud) à l'ouest de l'ancien chenal et à l'engraissement du banc du Ratier sur son flanc sud lié à la circulation de fin de jusant/début de flot à l'embouchure. Ces évolutions s'effectuent à section sensiblement constante et sont modulées par deux points durs que sont le banc de galets du Ratier et la zone rocheuse de Villerville. Enfin, le chenal secondaire de flot longeant la côte du Calvados et aboutissant à la brèche sud a été plutôt dynamisé durant la dernière décennie.

Au final, nous avons assisté à une réactivation de la morphodynamique de l'estuaire avec 6 millions de m^3 de sédiments déplacés par an en moyenne sur 10 ans. Cela a conduit à un remaniement important des sédiments vaseux et sableux bien mis en évidence dans le projet Seine-Aval 4 COLMATAGE. Le bilan volumétrique de l'estuaire reste sensiblement à l'équilibre sur la décennie, les apports amont en sédiments fins de la Seine paraissant être compensés par les exportations naturelles ou anthropiques (dragages d'entretien du Havre) des sédiments hors de l'estuaire.

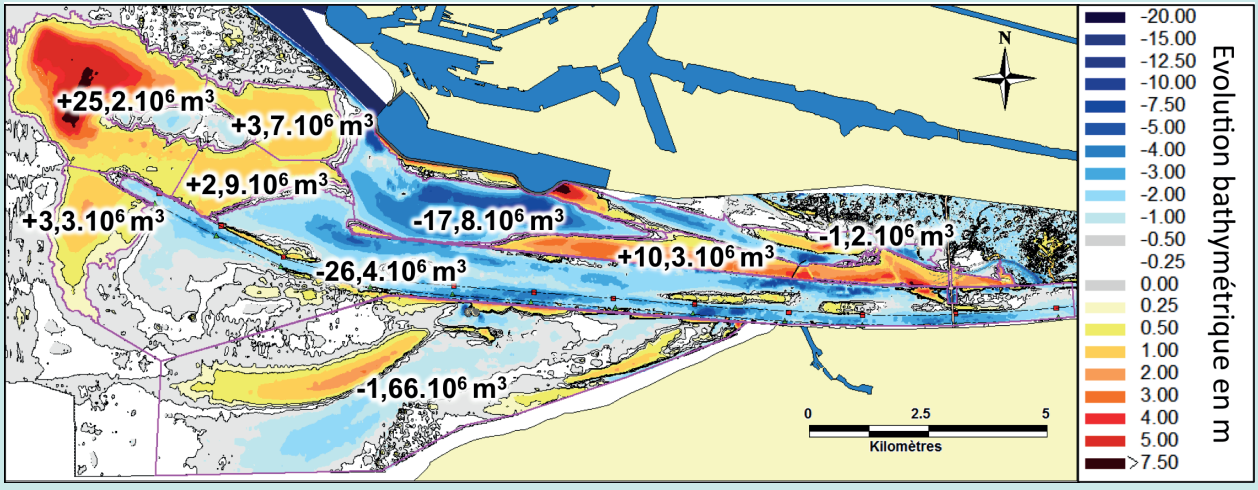


FIGURE M Différentiel bathymétrique entre les levés fin 2011 et fin 2001 et bilan sédimentaire par zone (ARTELIA, 2012)



CONCLUSION

Le fonctionnement de l'estuaire de la Seine, sous la double influence des forçages naturels fluviaux/continentaux et marins ; intervient dans un milieu fortement impacté par les activités anthropiques. Il en résulte une dynamique complexe, où l'ensemble des processus interagit selon plusieurs échelles spatio-temporelles. L'hydrodynamisme de l'estuaire, moteur des processus hydro sédimentaires, est caractérisé par une variabilité temporelle allant de l'échelle tidale à l'échelle pluriannuelle, où les processus saisonniers comme les tempêtes et les crues de la Seine jouent un rôle important sur la dynamique sédimentaire. Ce fonctionnement hydro-sédimentaire « naturel » est également largement influencé par les activités anthropiques, que ce soit les travaux d'aménagements ou d'entretiens des voies navigables. Le bilan sédimentaire proposé montre notamment que les volumes dragués annuellement sont comparables aux apports sédimentaires naturels marins et continentaux à l'estuaire.

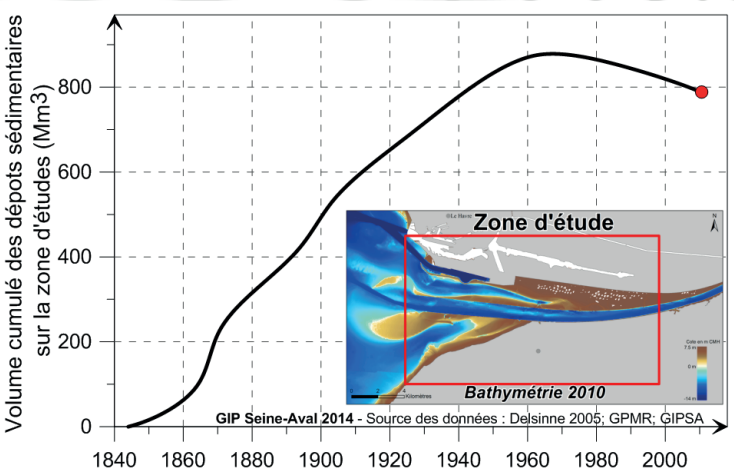


FIGURE 55 Volume cumulé des dépôts sédimentaires sur la zone encadrée en rouge depuis 1834 (les volumes déposés cumulés sont calculés avec un pas de temps de 20 ans) d'après Delsinne, 2005

Actuellement, les caractéristiques des différents forçages (CF. CHAPITRE 1) et leurs interactions avec le compartiment sédimentaire (CF. CHAPITRE 2) sont globalement bien connues. L'étude des mécanismes morpho-sédimentaires montre que ces derniers sont directement dépendants de l'ensemble des flux sédimentaires estuariens et en particulier de la variabilité des apports. L'agrégation des connaissances permet de proposer un bilan sédimentaire, même si de nombreuses limites liées à l'hétérogénéité des données sources sont identifiées (CF. CHAPITRE 3). Pour illustrer ces limites, ce bilan, globalement à l'équilibre, peut être mis en regard avec les évolutions morphologiques de l'embouchure qui, elles, montrent une diminution des volumes sédimentaires sur les dernières décennies (FIGURE 55 ET ENCART N° 8). Ceci met en avant la difficulté d'établir un bilan sédimentaire cohérent dans un système au fonctionnement complexe, où les interactions entre processus d'origines naturels et anthropiques sont encore mal connues.

Dans son ensemble, le travail de synthèse présenté dans ce fascicule démontre que malgré notre relativement bonne compréhension du fonctionnement global de l'estuaire, il subsiste certaines lacunes dans notre connaissance. Certaines de ces lacunes font l'objet de projets de recherche dans le cadre du programme Seine-Aval 5. C'est notamment le cas des projets ECHANGES et AFFLUSEINE, dont les objectifs sont respectivement de mieux quantifier les apports hydriques et solides à l'estuaire. L'articulation entre le réseau de mesure en continu SYNAPSES et le projet SUSPENSE permettra également de mieux quantifier les flux intra-estuarien. Enfin dans le cadre du projet HYMOSED, l'intégration de l'ensemble des connaissances issues des projets passés et actuels dans l'outil de modélisation Seine-Aval permettra d'améliorer notre capacité à modéliser le fonctionnement et les évolutions de l'estuaire.



GLOSSAIRE

Accrétion : Développement progressif d'une accumulation sédimentaire recevant constamment des apports nouveaux. (*vs* érosion).

Advection : L'advection est le transport d'une quantité telle que la chaleur, l'énergie interne, un élément chimique arbitraire, les charges électriques par le mouvement (et donc la vitesse) du milieu environnant.

Allochtone : En sédimentologie, allochtone qualifie des particules qui ne proviennent pas du milieu étudié. (*vs* autochtone).

Anthropique: Relatif à l'activité humaine.

Autochtone : En sédimentologie, autochtone qualifie des particules qui proviennent du milieu étudié. (*vs* allochtone).

Bassin versant : Territoire qui draine l'ensemble des eaux vers un même exutoire (lac, cours d'eau, océan, etc.).

Bathymétrie : La bathymétrie est la science de la mesure des profondeurs et du relief de l'océan pour déterminer la topographie du sol de la mer. Le terme bathymétrie signifie également topographie des fonds marins.

Bilan Sédimentaire : Un bilan sédimentaire est le résultat chiffré de la comparaison des apports et des pertes de sédiments dans un milieu donné.

Bioclaste : Désigne un sédiment qui contient les restes, voire quelques organismes fossiles entiers noyés au milieu de débris, que ces éléments aient été transportés ou non.

Bouchon vaseux: Zone d'accumulation de sédiments fins, particulière aux estuaires et induisant une forte turbidité. Son emplacement varie selon le coefficient de marée, le moment de la marée et le débit.

Charge solide : Ensemble des matériaux solides transportés qu'ils soient en solution, en suspension ou roulés sur le fond.

Charriage : Le charriage (ou roulement ou roulage) désigne en géomorphologie un processus de déplacement des sédiments sous l'effet du vent ou de l'eau. Il affecte les particules les plus massives qui restent en contact avec le sol et qui se déplacent de manière relativement lente et discontinue.

Clapage: Vidange en mer des produits de dragage en un lieu réservé à cet effet.

Contrainte de cisaillement : Désigne une contrainte appliquée de manière parallèle ou tangentielle à une face d'un matériau, par opposition aux contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire.

Cohésion : Propriété des sédiments fins (sédiments cohésifs) liée aux forces de surface entre grains, leur permettant de résister à un courant d'entraînement.

Cote Marine du Havre (CMH) : Plan de référence des cartes marines se situant à – 4,38 m par rapport au zéro NGF (1969).

Courant de Verhaule : Courant traversier (orienté nord-est) s'établissant dans le secteur de l'embouchure de la Seine en seconde partie de flot.

Courant résiduel : Un courant (ou vitesse) résiduel correspond à la moyenne vectorielle des courants (ou vitesses).

Courants tidaux : Les courants tidaux sont les courants générés par la marée.

Crue: Augmentation du débit d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois son débit moyen. (*vs* Étiage).

Dragage: Opération d'extraction des matériaux (sable, gravier, vase) déposés au fond d'un cours d'eau.

Dr ou excès de densité : correspond à la différence entre la densité de l'objet considéré et la densité de l'eau. L'excès de densité caractérise en particulier la flottabilité d'un corps.

Érosion : Diminution du volume d'un corps par perte de matière (*vs* Accrétion).

Étiage: Qualifie la période de l'année où un cours d'eau atteint son débit le plus bas. (*vs* Crue).

Euryhalin : Un organisme euryhalin qualifie une espèce aquatique capable de supporter de grandes variations de salinité de l'eau environnante, typiquement comme dans un estuaire.

Évapotranspiration : Émission de vapeur d'eau par la végétation, liée à sa respiration.

Fetch: Distance sur laquelle un vent a généré des vagues.

Floc : Ensemble de particules d'un milieu dispersé qui adhèrent faiblement les unes aux autres.

Flot : Moment de la marée montante (courants dirigés vers l'amont dans un estuaire). (*vs* Jusant).

Forçage : Processus (en général physique) agissant sur le milieu et provoquant des mouvements ou des changements d'état.

Gradient : En physique, on définit le gradient comme une grandeur qui indique de quelle façon une grandeur physique varie dans l'espace ou dans le temps.

Granulométrie : La granulométrie d'un sédiment est la distribution statistique des tailles des particules le composant.

Hydrodynamique : Science qui étudie le mouvement des eaux, en lien avec le milieu dans lequel elles évoluent.

Hydrosédimentaire : Science qui étudie la dynamique des sédiments, au regard des conditions hydrodynamique.

Hypersynchrone : Un estuaire hypersynchrone est un estuaire où l'effet du rétrécissement d'aval en amont de la section transversale, est supérieur à l'effet de la dissipation d'énergie par l'écoulement : l'amplitude de la marée augmente de l'aval vers l'amont de l'estuaire avant de se dissiper à l'amont.

Hyposynchrone : Un estuaire est hyposynchrone lorsque l'effet du rétrécissement est inférieur à celui de la dissipation d'énergie par l'écoulement : l'amplitude de la marée décroît dans l'estuaire.

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

Intertidale : Qualifie la zone comprise entre la plus haute mer et la plus basse mer de vive eau (zone de balancement des marées).

Jusant : Moment de la marée descendante (courants dirigés vers l'aval). (*vs* Flot).

Lithoclaste : Terme utilisé en sédimentologie, en géomorphologie et en géologie pour désigner des fragments issus de la désagrégation d'une masse rocheuse.

Lit majeur : Espace correspondant à la plaine inondable d'un cours d'eau sans les aménagements. Il est limité par l'emprise des crues exceptionnelles.

Lit mineur : Espace occupé par l'écoulement d'un cours d'eau, hors évènements hydrologiques exceptionnels. Il est séparé du lit majeur par des berges et dans le contexte estuarien, il inclut la zone intertidale.

Macrotidal : Le terme macrotidal qualifie les milieux marins où l'amplitude de la marée est supérieure à 5 m.

Marée Dynamique : La marée provoque dans un estuaire un mouvement alternatif de la masse d'eau qu'il contient. La pénétration de l'eau de mer pendant le flot refoule l'eau douce vers l'amont jusqu'au point à partir duquel on retrouve un courant fluvial dirigé vers l'aval. C'est ce que l'on appelle la marée dynamique dont l'ampleur dépend du marnage, de la pente du lit submergé, de la largeur et de la profondeur de l'estuaire, du débit fluvial. Elle n'a donc pas la même importance en vives-eaux et en mortes-eaux, en étiage, en eaux moyennes et en crues.

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

Mascaret : Le mascaret est un phénomène naturel typique de certains estuaires macrotidaux désignant une brusque surélévation de l'eau provoquée par l'onde de la marée montante lors des grandes marées. Il se produit dans l'embouchure et le cours inférieur de certains fleuves lorsque leur courant est contrarié par le flux de la marée montante.

Matières en suspension (MES) : Ensemble des particules solides de petite taille transportées au sein de la masse d'eau.

Matière organique : Matière fabriquée par les êtres vivants (*vs* matière minérale). Elle correspond à la biomasse vivante ou morte d'un écosystème.

Mégatidal : Le terme mégatidal qualifie les mers dont le marnage peut être supérieur à 8 m.

Morphologie : En océanographie, le terme morphologie désigne la forme des fonds marins.

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

Morte eau : Se dit d'une marée de faible amplitude, avec un coefficient inférieur à 50 (premier et dernier quartier de lune). (*vs* Vive eau).

Période de retour : La période de retour, ou temps de retour, caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels comme les tremblements de terre, la crue ou l'inondation, la tempête, l'orage, etc.

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

Saltation : En sédimentologie, il s'agit du processus de transport de sédiment par l'eau ou par le vent. Entraînées par le fluide, les particules (de la taille de sable ou de gravier) se déplacent par sauts.

Schorre : Étendue de vases salées végétalisées soumises à la marée. Le schorre, plus élevé topographiquement que la slikke*, n'est recouvert par la mer que lors des grandes marées (vive eau) et des tempêtes.

Slikke : Étendue de vases salées, soumises à la marée et non végétalisées.

Stratification : Différence (de densité, de salinité…) selon la verticale au sein de la colonne d'eau.

Subtidale : Qualifie la zone toujours en eau, située sous la zone intertidale.

Surcote : Augmentation du niveau de la surface libre.

Surface libre : Surface de l'eau (mer ou rivière) en contact avec l'air (non limitée par un obstacle…).

Suspension : La suspension est un processus de transport de sédiment par l'eau ou par le vent. Les particules (de la taille des limons, voire des sables fins) sont emportées, sans se redéposer, sur de longues distances. Les particules transportées en suspension sont appelées des matières en suspension.

Synchrone : Un estuaire est synchrone, lorsque l'effet du rétrécissement est égal à celui de la dissipation d'énergie par l'écoulement : l'amplitude de la marée reste constante dans l'estuaire.

Thanatocénose : La thanatocénose est l'ensemble des êtres vivants morts, dont les restes peuvent être trouvés en un même site.

Tirant d'eau : Hauteur de la partie immergée de la coque d'un navire.

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

Turbulence : La turbulence désigne l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. L'échelle de kolmogorov, caractérise la plus petite taille des tourbillons turbulents présents dans l'écoulement.

Vitesse barotrope : En océanographie, la vitesse barotrope désigne la valeur moyenne de la vitesse du fluide sur la hauteur de la colonne d'eau.

Vive eau : Se dit d'une marée de forte amplitude, avec un coefficient supérieur à 90 (périodes de pleine et nouvelle lune). (*vs* Morte eau*).

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

BIBLIOGRAPHIE

ARTELIA, 2012. **Expertise sur la fosse nord de l'estuaire de la Seine.** Rapport d'étude pour le compte du Grand Port Maritime du Havre 88p.

ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013. **Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine – Rapport de l'objectif A : Définition des périodes de retour des évènements jouant un rôle dans les inondations.** 131p. et annexes.

ARTELIA, 2014. **Réhabilitation des vasières de l'estuaire de la Seine – Développement et exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire 3D de l'estuaire.** Rapport d'étude pour le compte du Grand Port Maritime du Havre 184p.

Avoine J., 1981. **Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France : effect of man-made modifications on estuary shelf sedimentology.** Marine Geology 40, p119-137.

Avoine J., 1985. **Evaluation des apports fluviatiles dans l'estuaire de la Seine**. Actes de colloques n°4 GRECO-MANCHE, p117-124.

Avoine J., 1985. **Influence des apports fluviatiles dans l'estuaire de la Seine.** Actes de colloques n°4 GRECO-MANCHE, p117-124.

Avoine J., 1995. **Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine – Partie 2 – Sédimentologie**. Synthèse des connaissances réalisée par l'Ifremer à la demande du Port Autonome du Havre, 191p.

Bonnefille R., 1976. **Cours d'hydraulique maritime.** Support de cours de l'école nationale supérieure de techniques avancées. 161p.

Boust D., 1997. **Etude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire de la Seine par l'analyse des radionucléides naturels et artificiels.** Rapport Scientifique du programme Seine-Aval 1. 12p.

Brenon I., 1996. **Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine.** Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, 179p.

CETMEF, 2011. **Modélisation des effets de la marée sur les hauteurs de houle aux abords de Port 2000 au Havre.** 50p.

CETMEF, 2013. **Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines.** 128p.

Cuvilliez A., **Dynamiques morphologique et sédimentaire d'une slikke et d'un schorre dans un estuaire macrotidal anthropisé (Seine-France).** Thèse de doctorat, Université de Rouen, 270p.

Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R., 1992. **Estuarine Facies models : conceptual basis and stratigraphic implication.** Journal of sedimentary petrology, 62(2): 1130-1146pp.

Deloffre J., 2005. **La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux, processus, quantification et modelisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle**. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 227p.

Deloffre J., Verney R., Lafite R., Lesueur P., Lesourd S., Cundy A.B., 2007. **Sedimentation on intertidal mudflatsin the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation.** marine Geology 2007, p19-32.

Deloffre J., Lafite R., Blanpain O., Fournier M., Simon M., Lemoine M., Mesquita J., Calluaud D., David L., Gomit G., 2012. **Projet IBIS : Investigation du batillage en Seine.** Rapport scientifique Seine-Aval 4, 73p.

Delsinne N., 2005. **Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique.** Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 179p.

Dubrulle–Brunaud C., 2007. **Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (Continuum Seine Baie de Seine) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources.** Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 341p.

Dubrulle-Brunaud C., Lesueur P., Tessier B., Sorrel P., Dugué O., Poupinet N., Thouroude C., Lafite R., Laignel B., Durand A., Raux J., Deloffre J., Simon M., Boust D., Rozet M., Solier L., 2008. **Synthèse MEDIUM – Etude du mélange et de dispersion des sédiments par l'utilisation de marqueurs particulaires dans l'estuaire de la Seine.** Rapport scientifique Seine-Aval 3, 74p.

Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoin S., Rieu J., 2009. **Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme.** Programme GICC Rapport de fin de contrat. 62p.

Publication Seine-Aval | Article scientifique, thèse | Autre publication

Ducharne A., Habets F., Oudin L., Gascoin S., Sauquet E., Viennot P., Hachour A., Deque M., Martin E., Page C., Terray L., Thierry D., 2010. **Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique.** Colloque SHF : «Risques inondation en Ile de France», Paris, 24-25 mars 2010.

Dupont J-P., Guézennec L., Lafite R., Le Hir P., Lesueur P., 2001. **Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension.** Fascicule Seine-Aval 1.2, 32p.

Dupont J-P., Fournier M., Massei N., Valdès D., Dupuis E., Slimani S., Laignel B., 2006. **Contribution de l'aquifère de la craie au débit de la Seine-Aval : Suivi et interprétations des données hydrologiques acquises sur le site témoin de Norville**. Rapport scientifique Seine-Aval 3, 23p.

Dupont J-P., Slimani S., Mesquita J., Fournier M., 2007. **Les apports latéraux à l'estuaire de Seine**. Rapport scientifique Seine-Aval 3, 25p.

Durand A., Laignel B., 2003. **Apports fluviatiles latéraux à l'estuaire de Seine (SEINELAT).** Rapport scientifique Seine-Aval 2, 32p.

Fisson C., , Leboulenger F., Lecarpentier T., Moussard S., Ranvier G., 2014. **L'estuaire de la Seine : Etat de santé et évolution.** Fascicule Seine-Aval n°3.1, 48p.

Foussard V., Cuvilliez A., Fajon P., Fisson C., Lesueur P., Macur O., 2010. **Evolution morphodynamique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours.** Fascicule Seine-Aval n°2.3, 48p.

Garreau P., 1997. **Caractéristiques hydrodynamiques de la Manche.** Océanis Vol23 n°1 p65-87.

Garnaud S., 2003. **La sédimentation fine sur une plateforme interne actuelle macrotidale : La baie de Seine Sud-Orientale (France).** Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 378p.

Grasso F., 2013. **Rapport complémentaire du projet MODEL : Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine.** Rapport scientifique Seine-Aval 4, 29p.

Grasso F., Le Hir P., Bassoullet P., 2014. **Analysis of mixed-sediment consolidation experiments.** Proceedings of the 13th Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Dunkerque, France.

Grasso F., Le Hir P., Bassoullet P., accepted. **Numerical modelling of mixed-sediment consolidation.** Ocean Dynamics.

Grasso F., Verney, R., Le Hir P.,2014. **Numerical modelling of the turbidity maximum dynamics in a macrotidal estuary: sensitivity to hydrodynamic and hydrological forcing**. Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil, 19-24 October 2014.

Grand Port Maritime du Havre, 2014. **Dossier de demande de renouvellement de l'autorisation des dragages d'entretien du GPMH et de l'immersion des produits y afférents au titre de l'article R214-20 du Code de l'Environnement**. 2014-080-A.)

Grand Port Maritime de Rouen, 2010. **Dossier d'enquête publique, Projet d'amélioration des accès maritimes du port de Rouen.** Dossier d'enquête publique. 526p.

Guézennec L. , 1999. **Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France)**. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 254p.

Guillou N. et G. Chapalain, 2011. **Modélisation des effets de la marée sur les hauteurs de houle aux abords de Port 2000 au Havre.** Rapport de recherche CETMEF-L11-01, 49 pages.

Idlafkih Z., Cossa D., Meybeck M., 1995. **Comportement des contaminants en trace dissous et particulaires (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) dans la Seine.** Hydroécologie appliquée Tome 7 Vol1-2, pp127-150.

Kirby R., Parker W.R., 1983. **Distribution and behavior of fine sediment in the Severn Estuary and Inner Bristol channel, U.K.** Canadian journal of fisheries and aquatic science, 40, p. 83-95.

Lafite R., Dupont J-P., Mikes D., Orgier S., Tiphagne K., Simon C., 2002. **Projet DYVA : Dynamique des vasières dans l'estuaire de la Seine**. Rapport d'avancement Seine-Aval 2, 12p.

Lafite R., Deloffre J., Lesueur P., Lesourd S., Dupont J-P., 2003. **Projet DYVA : Dynamique des vasières dans l'estuaire de la Seine.** Rapport scientifique Seine-Aval 2, 32p.

Lafite R., Deloffre J., Verney R., 2004. **Construction d'un indice de qualité physique d'un estuaire.** Rapport scientifique Seine-Aval 2, 29p.

Laignel B., Dupuis E., Durand A., Dupont J-P., Hauchard E., Massei N., 2006. **Erosion balance in the watersheds of the western Paris Basin by high-frequency monitoring of discharge and suspended sediment in surface water.** Compte rendus Geoscience 338, p556-564.

Laignel B., Costa S., Lequien A., Massei N., Durand A., Dupont J-P., Le Bot S., 2006. **Current inputs of continental sediment to the English Channel and its beaches: A case study of the cliffs and littoral riversof the Western Paris Basin.** Z. Geomorph N.F. 52 Suppl.3 , p21-40.

Publication Seine-Aval | Article scientifique, thèse | Autre publication

Lazure, P., Dumas, F., 2008. **An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS).** Advances in Water Ressources, 31, 233-250.

Le Floch JF., 1961. **Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime.** Thèse de doctorat, centre de recherches et d'études océanographiques de Paris, 578p.

Le Hir P., Silva Jacinto R., 2001. **Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau.** Fascicule Seine-Aval 1.2, 32p.

Le Hir, P., Ficht, A., SilvaJacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.-P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B., Cugier, P., 2001. **Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France)**. Estuaries, 24(6B), 950-963.

Le Hir P., Bassoulet P., Cann P., 2006. **Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine – Adaptation du modèle tassement/érodabilité et expérimentations en laboratoires.** Rapport scientifique Seine-Aval 3, 46p.

Le Hir P. Cayocca F., Waeles B., 2011. **Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy.** Continental Shelf Researh 31 S-135-S149.

Le Hir P., Lafite R., 2012. Projet MODEL : **Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine.** Rapport scientifique Seine-Aval 4, 144p.

Lemoine M., 2014. **Rôle des affluents intra-estuarien et des vasières intertidales dans le bilan sédimentaire – Cas de l'estuaire de la Seine.** Thèse de doctorat, Université de Rouen, 206p.

Lesourd S., 2000. **Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine.** Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 319p.

Lesourd S., Brun-Cottan J-C., Lesueur P., Deloffre J., Lafite R., Caillaud J., Philippe S., 2005. **Le tassement des vases de l'estuaire de la Seine**. Rapport scientifique Seine-Aval 3, 50p.

Lesueur P., Garnaud S., Lesourd S., Brun-Cottan J-C., Poupinet N., Tessier B., 2002. **Contribution au projet DYVA : Fonctionnement sédimentaire des vasières de la Seine**. Rapport d'avancement Seine-Aval 2,36p.

Massei N., Fritier N., 2010. **Quantification de l'évolution spatiotemporelle de la contribution de la nappe de la Craie au débit de la Seine Aval.** Rapport scientifique Seine-Aval 4, 62p.

Migniot, C. 1989. **Tassement et rhéologie des vases.** La Houille Blanche, 1 p11-29 & 2 p95 -111.

Moore, S. a., Le Coz, J., Hurther, D., & Paquier, a. (2012). **On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers.** Continental Shelf Research, 46, 50–63.

Perillo G.M.E, 1996. **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries**. Developments in sedimentology 53 Ed. Elsevier, 246p.

Poizot E., 2009. **La dynamique sédimentaire au travers de la géostatistique et des systèmes d'informations géographiques.** Thèse de doctorat de l'université de Perpignan, 263p.

Ross M.A., Mehta A.J., 1989. **On the mechanics of lutocline and fluid mud.** Journal of coastal research, 15, p51-61.

SHOM, 2012. **Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique).** 160p.

Silva Jacinto R., 2005. **Action des vagues sur les estrans et vasières Application à l'estuaire de la Seine.** Thèse de doctorat, Université de Rouen, 207p.

Tessier L., 2003. **Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine : Identification de signatures naturelles et anthropiques.** Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 348p.

Thorne, Peter D., MacDonald, Iain T., Vincent, Christopher E., 2014 **Modelling acoustic scattering by suspended flocculating sediments**. Continental Shelf Research, 88. 81-91.

Verney R., 2006. **Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs, mesures in-situ, mesures expérimentales et modélisation, application à l'estuaire de Seine.** Thèse de doctorat, Université de Rouen, 330p.

Verney R., Deloffre J., Brun-Cottan J-C., Lafite R., 2005. **The effect of wave induced turbulence on intertidal mudflats : Impact of boat traffic and wind.** Continental Shelf Research. 19p.

Verney R., Lafite R., Claquin P., 2012. **Projet FLUMES : Flux de matières en estuaire de Seine**. Rapport scientifique 4, 114p.

Viennot P., Ducharne A., Habets F., Lamy F., Ledoux E., 2009. **Hydrogéologie du bassin de la Seine.** Programme PIREN-Seine, Fascicule 2. 55p.

Waeles B., 2005. **Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine.** Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 225p.

Publication Seine-Aval | Article scientifique, thèse | Autre publication

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : a) Variation du débit de la Seine et de la pluviométrie moyenne sur son bassin versant entre 1947et 2003 ; **b)** Corrélation entre la pluviométrie et le débit de la Seine entre 1947 et 2003 6

Figure 2 : Statistiques journalières sur les débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013 7

Figure 3 : Evolution des débits moyens mensuels des affluents intra-estuariens et de la Seine à Poses calculés à partir des débits journaliers de 1996 à 2006 8

Figure 4 : Contribution des apports intra-estuariens totaux (nappes + surface) par rapport à la Seine « amont » (d'après Dupont 2006) 8

Figure 5 : Bilan des apports latéraux à l'estuaire de la Seine (la contribution de la nappe correspond aux apports latéraux non drainés par une rivière) 8

Figure 6 : Evolution de l'aval vers l'amont du marnage dans l'estuaire de la Seine pour différents coefficients de marée et différents débits 11

Figure 7 : Evolution des hauteurs d'eau dans l'estuaire de la Seine (données mesurées) 12

Figure 8 : Evolution temporelle de la ligne d'eau au cours d'une marée 12

Figure 9 : Evolution du niveau des hautes et basses mers dans l'estuaire et position du point caractéristique 12

Figure10 : a) Position du point caractéristique pour différents débits ; **b)** Position du point caractéristique en pk en fonction du débit de la Seine 13

Figure 11 : Comparaison des courbes de marées de vives eaux de 1876 et 1996 à Rouen et Tancarville 13

Figure 12 : Statistiques des vents en baie de Seine entre 1995 et 2011 calculées à partir du modèle météo-france Arpège (données issues du projet Seine-Aval 4 MODEL) 14

Figure 13 : Illustration de la propagation d'une houle d'ouest dans la baie de Seine, représentation de la hauteur significative des vagues le 1er mars 2008 (simulation WaveWatch3 projet Seine-Aval 4 MODEL) 16

Figure 14 : Rose des vagues à l'embouchure calculée à partir des données de la bouée Metzinger entre février 2011 et mai 2012 (données Candhis CETMEF) 16

Figure 15 : Illustration de la propagation d'une houle d'ouest à l'embouchure, représentation de la hauteur significative des vagues le 1er mars 2008 (simulation WaveWatch3 projet Seine-Aval 4 MODEL) 16

Figure 16 : Moyenne des différences absolues sur les hauteurs de houle prédite avec et sans prise en compte des effets de la marée sur les hauteurs d'eau et les courants (CETMEF, 2011) 17

Figure 17 : Répartition des vitesses de courants au niveau de l'embouchure pour différents moments de la marée en conditions moyennes (débit : 397 $m^{3}.s^{-1}$, coeff. de marée 83) vitesses moyennées sur la hauteur d'eau 17

Figure 18 : Répartition des vitesses de courants barotropes résiduelles pour l'année 2010 19

Figure 19 : Variation de la salinité en lien avec la marée à l'embouchure (site de Fatouville). Données mesurées dans le cadre du Projet Seine-Aval 4 MODEL (Le Hir, 2012) 20

Figure 20 : Représentation des salinités moyennes à l'embouchure pour l'année 2010 20

Figure 21 : Illustration du gradient vertical de salinité pour deux conditions hydrologiques contrastées. En haut : basse mer de morte eau et en crue (débit : 1076 $m^{3}.s^{-1}$, coeff. : 29, le 13 mars 2007). En bas : pleine mer de vive eau eten étiage (débit : 248 $m^{3}.s^{-1}$, coeff. : 94, le 2 août 2007) 21

Figure 22 : Temps de transit des eaux de Poses à l'embouchure pour différents débits de la Seine à Poses. 21

Figure 23 : Présentation des grandes classes de particules en suspension rencontrées dans les eaux estuariennes 22

Figure 24 : Image MEB d'agglomérats de cristaux de kaolinite (M2C). 23

Figure 25 : Benne de prélèvement sédimentaire contenant du sable bioclastique 23

Figure 26 : Illustration des différents modes de transport des sédiments 23

Figure 27 : Relation entre le diamètre des particules, la typologie de Wentworth, le mode de transport des particules et leur cohésion. 24

Figure 28 : Cycle des matières en suspension en estuaire (d'après Maggi 2005 in Verney 2006) 24

Figure 29 : Flocs et terminologie : exemple de particules primaires **(A)**, microfloc **(B)**, macrofloc aéré **(C)** et macrofloc dense **(D)** 25

Figure 30 : Schéma conceptuel de la floculation en fonction de la turbulence et de la concentration en MES (Dyer 1989) . . 25

Figure 31 : Evolution des profils verticaux de vitesse de courant, de concentration en MES et du diamètre médian des particules au sein du bouchon vaseux durant un cycle de marée (campagne FLUMES 23 MAI 2011). 26

Figure 32 : Variabilité spatiale du diamètre moyen des flocs à pleine mer (gauche) et à basse mer (droite) au niveau du fond de l'embouchure de l'estuaire de la Seine 26

Figure 33 : Evolution de la concentration en MES à Val-des-Leux, des coefficients de marée et du débit sur l'année 2012 (données SYNAPSES) (les bandes grises correspondent aux périodes de grandes vives eaux) 27

Figure 34 : Mécanismes à l'origine du bouchon vaseux ; **(A)** circulation résiduelle ; **(B)** asymétrie de marée (Dyer *et al.*, 1986 et Allen *et al.* 1980, in Deloffre 2005) 31

Figure 35 : Evolution de la concentration en MES sur le site de Fatouville du 18/09/2010 au 03/10/2010 31

Figure 36 : Position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Seine en marée de vive eau d'après Avoine 1981. 32

Figure 37 : Evolution des concentrations en MES à pleine mer en sub-surface dans l'estuaire de la Seine entre 1955 et 2013. 33

Figure 38 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 11 février 2008 (données qualitatives) ; marée : pleine mer, débit : 912 $m^{3}.s^{-1}$ 33

Figure 39 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 3 mars 2007 (données qualitatives) ; marée : mi-jusant, débit : 535 $m^{3}.s^{-1}$. 33

Figure 40 : Formation et relations entre les différentes couches turbides ; **(A)** : Profil vertical de concentration schématisant les différents états de concentration des vases (Ross et Mehta, 1989) ; **(B)** Relation entre les différentes couches turbides (Kirby et Parker, 1983) 34

Figure 41 : Illustration des différentes phases du tassement des vases (adapté de Migniot, 1989 et Lesourd, 2005). 34

Figure 42 : Illustration et exemple de résultats issus d'expériences de tassement de différents mélanges sablo-vaseux sur 23 jours (Le Hir, 2006) Mélange 1 : 50 % Vases, 50 % Sables, concentration initiale : 200 g/l, Mélange 2 : 80 % Vases, 20 % Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 3 : 50 % Vases, 50 % Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 4 : 20 % Vases, 80 % Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 5 : 50 % Vases, 50 % Sables, concentration initiale : 600 g/l 35

Figure 43 : Evolution de la contrainte critique d'érosion en fonction de la teneur en fine du sédiment (d'après Le Hir, 2011) 35

Figure 44 : Conditions de débit, hauteurs d'eau mesurées sur le site de Petiville et variations de topographie enregistrées par des mesures piquets et un altimètre ponctuel (Lemoine, 2014) 37

Figure 45 : Synthèse qualitative du fonctionnement des vasières intertidales de l'aval vers l'amont en fonction du débit de la Seine et des forçages (marée, houle, batillage). 38

Figure 46 : Evolution quotidienne : des débits fluviaux, des concentrations pondérales de MES calculées et des flux de MES au barrage de Poses (pk 202) entre 1996 et 2004 (données Service Navigation de la Seine ; retraitées dans le cadre du projet Seine-Aval 5 AFFLUSEINE). 40

Figure 47 : Relation entre la charge solide et le débit fluvial à Poses, issue de Avoine, 1985 (mesures de décembre 1982 à décembre 1984) 41

Figure 48 : Relations entre charge solide et débit de la Seine actualisées par Guézennec 1999. 41

Figure 49 : Interprétation des relations entre charge solide/débit liquide au barrage de Poses (d'après Guézennec 1999) . . 41

Figure 50 : Délimitation des bassins versants intra-estuariens. 42

Figure 51 : Comparaison des contributions de chacun des bassins versants intra-estuariens à l'estuaire en MES (* calculé en extrapolant les taux d'érosion des bassins versants voisins ; la vallée de Seine représente la partie du bassin versant de l'estuaire non rattachée aux affluents intra-estuariens) 42

Figure 52 : Schéma des apports solides à l'embouchure (SOGREAH 1994 in Avoine1995) 45

Figure 53 : Bilan en masse des apports annuels en MES à l'estuaire 46

Figure 54 : Bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine construit d'après la bibliographie. 47

Figure 55 : Volume cumulé des dépôts sédimentaires sur la zone encadrée en rouge depuis 1834 (les volumes déposés cumulés sont calculés avec un pas de temps de 20 ans) d'après Delsinne, 2005 50

ENCARTS

Figure A : Explication du phénomène de morte eau/vive eau en lien avec la position de la Lune par rapport à la Terre. 9

Figure B : Courbes de marée théorique à la Balise A 10

Figure C : Propagation de l'élévation du niveau marin le long de l'estuaire de la Seine pour différents débits. 15

Figure D : Représentation de l'emprise du modèle MARS3D en baie de Seine. 18

Figure E : (a) Représentation de la bathymétrie et du maillage du modèle MARS3D à l'embouchure de l'estuaire de la Seine. **(b, c et d)** Simulations de la concentration en matières en suspension à la surface de l'embouchure en fin de jusant et début de flot (au niveau du Havre) le 10 décembre 2010 : **(b)** Basse Mer – 2 h ; **(c)** Basse Mer ; **(d)** Basse Mer + 2 h. Les fortes concentrations (en rouge sur les figures b, c et d) sont représentatives de la structure turbide caractéristique de l'estuaire, appelée le « bouchon vaseux* ». 18-19

Figure F : Variabilité de la relation de calibration NTU/g/l d'un capteur optique entre vive eau et morte eau (exemple tiré des mesures effectuées à Fatouville dans le cadre des campagnes FLUMES 2011) 29

Figure G : Dynamique hydrosédimentaire en estuaire de Seine, exemple tiré des mesures effectuées à Caudebec-en-Caux dans le projet Flumes. De haut en bas : vitesse du courant, concentration en MES, diamètre médian des particules et excès de densité des particules. Cette figure illustre la complémentarité des moyens de mesures permettant d'observer et d'analyser les processus hydrosed, et en particulier l'évolution des caractéristiques des particules en suspension (taille/densité) au cours d'un cycle de marée. 30

Figure H : Evolution de la hauteur d'eau liée au batillage. **a.** Echelle de deux cycles de marée semi-diurne et **b.** Echelle d'un événement (filtré de la marée) 38-39

Figure I : Remise en mouvement potentielle des sédiments en fonction des types de navires qui naviguent en Seine 39

Figure J : Estimation antérieure et révisée des apports sédimentaires de différents affluents de l'estuaire de la Seine entre 1991 et 2012 dans le cadre du Projet AFFLUSEINE 43

Figure K : Localisation des principaux sites de dragages et de clapages à l'embouchure de l'estuaire de la Seine 45

Figure L : Figure K : Levé topo-bathymétrique en haut : fin 2001 ; en bas : fin 2011 (ARTELIA, 2012) 48

Figure M : Différentiel bathymétrique entre les levés fin 2011 et fin 2001 et bilan sédimentaire par zone (ARTELIA, 2012) . . 49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Périodes de retour associées au débit de la Seine et de ses affluents (m^3/s). ARTELIA et GIP Seine-Aval 2013 . . . 7

Tableau 2 : Période de retour de l'intensité du vent mesuré au cap de la Hève (vent moyen en $m.s^{-1}$ sur 3 h réduit à 10 m d'altitude) (ARTELIA, 2013) 14

Tableau 3 : Périodes de retour de la surcote océanique de pleine mer au Havre (SHOM, 2012 ; CETMEF, 2013) 14

Tableau 4 : Résultats des simulations sur l'effet du vent sur le gonflement de l'estuaire à Rouen en cm (ARTELIA, 2013) . . 15

Crédit photo :
sauf mention contraire : J.P. Lemoine

Conception/réalisation :
www.partenairesdavenir.com

FASCICULES SEINE-AVAL

FASCICULES SERIE 2

2.1 Le Programme Seine-Aval 3 : contexte, bilan et enjeux
2.2 La génotoxicité : quel risque pour les espèces aquatiques ?
2.3 Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours
2.4 Le benthos de l'estuaire de la Seine
2.5 Poissons, habitats, & ressources halieutiques : cas de l'estuaire de la Seine
2.6 Le Risque inondation : conditions de déclenchement et perspectives
2.7 Effets de la contamination chimique : des organismes en danger ?
2.8 Ecologie du copépode *Eurytemora affinis* : une espèce au centre du réseau trophique estuarien
2.9 Contre vents et marées : Les tempêtes dans l'aval de la Seine entre 1750 et 1930
2.10 Les végétations de l'estuaire de la Seine

FASCICULES SERIE 3

3.1 L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution
3.2 Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine

FASCICULES À TÉLÉCHARGER SUR : http://fascicules.seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité sous la forme suivante :
J.P. Lemoine, 2015. **Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine.** Fascicule Seine-Aval 3.3, 64 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval : gipsa@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval est financé par :

GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC