

## **Réhabilitation de la vasière Nord de l'estuaire de la Seine Synthèse des éléments**

La dynamique des vasières de l'estuaire de la Seine constitue un thème dont l'importance a particulièrement été mise évidence lors des débats préalables à la réalisation de Port 2000. C'est ainsi que lors du débat public de Port 2000 clôturé en mars 1998, il est apparu nécessaire d'introduire au titre des mesures environnementales d'accompagnement du projet Port 2000 un programme de réhabilitation des vasières. Ainsi, depuis la fin des années 90 de nombreuses études et des travaux ont été entrepris pour répondre à cette attente.

Afin de permettre à ceux qui le souhaitent d'avoir une vision synthétique de la démarche entreprise, le Conseil Scientifique de l'Estuaire de la Seine a demandé l'établissement d'une note de synthèse sur le programme de réhabilitation de la vasière nord de l'estuaire de la Seine qui explique de manière pédagogique les objectifs, les contraintes existantes et les enjeux associés.

La présente note a pour objectif de répondre à cette demande, en présentant successivement :

- les évolutions observées avant les travaux de réhabilitation (2004) et les enjeux associés
- les objectifs des travaux de réhabilitation et les contraintes associées
- les évolutions de la fosse nord après les travaux aussi bien d'un point de vue morphologique que biologique
- la compréhension actuelle des phénomènes hydro-sédimentaires.

### **1. EVOLUTIONS DE LA VASIERE NORD AVANT LA REALISATION DES TRAVAUX (2004)**

#### **1.1. HISTORIQUE**

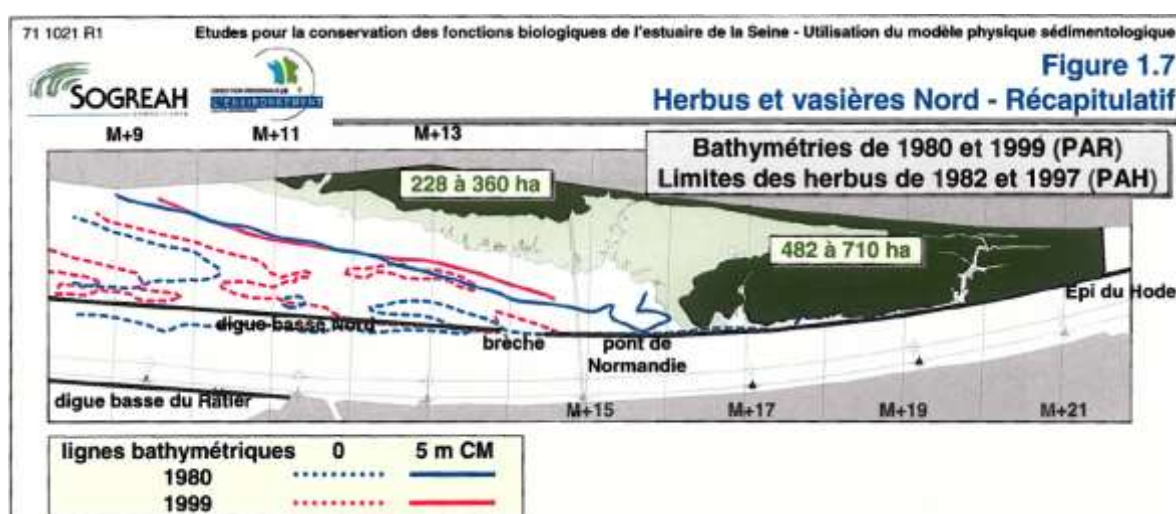
La vasière nord s'est créée en 1974 après la construction de l'épi du Hode (voir figure 1) qui ferme à la marée le chenal secondaire nord, ancien chenal de navigation pour accéder au port de Rouen dont le tracé était naturel et qui a été abandonné à la suite des travaux de recalibrage des années 1958-1962. Cette fermeture à la marée conjuguée à la construction de la digue basse nord, a créé un casier indépendant du reste de l'estuaire qui sédimente et se comble rapidement conduisant en 1979 à la création d'une brèche dans la digue basse nord permettant de conserver la partie aval du chenal secondaire, dénommé aujourd'hui fosse nord. Cette brèche, située juste à l'aval du Pont de Normandie, permet en particulier de capter une partie du jusant pour auto-entretenir la fosse nord. La largeur initiale de la brèche de 1000m à la cote +1mCMH est réduite à 600m en 1986 pour limiter l'afflux de sédiments en flot en direction du chenal de navigation de Rouen (Sogreah, 1983). Enfin, la construction du remblai nord puis du viaduc nord du Pont de Normandie (1989-1991) sépare la vasière nord en deux et rend irréversible une grande partie de l'avancée du schorre le long de la digue haute nord.

#### **1.2. AVANCEE DE LA VEGETATION (1974 -2004)**

Le suivi bathymétrique de cette zone, aisée en 1974 est rendue difficile ensuite du fait de la sédimentation intense qui transforme les fonds subtidiaux en estran sableux (entre 0 et +5m CMH) puis vaseux (entre +5 et +7,0/7,5mCMH) et enfin en schorre incluant herbus et roselières (entre +7,0/7,5 et +8,3mCMH). En pratique, les levés s'arrêtent à la ligne

bathymétrique +5mCMH. Ils ont donc été complétés entre 1974 et 1998 par un suivi de la limite de végétation sur les photos aériennes. Ce sont ensuite les orthophotos du port du Havre, les orthophotos haute-résolution d'Antoine Cuvilliez (université du Havre) et les levés aéro-lasers qui prennent le relais du suivi de la vasière à partir de 1999, 1995 et 2001 respectivement.

La première analyse de ces données a été effectuée par Sogreah en 1997 (Sogreah, 1997) et les résultats intégrés et complétés dans le projet européen INTRMUD (1996-1999) ainsi que dans l'étude pour la conservation des fonctions biologiques de l'estuaire de la Seine, réalisée par Sogreah sous maîtrise d'ouvrage de la DREAL et sous le contrôle du comité d'experts pour l'estuaire de la Seine (devenu par la suite le Conseil Scientifique de l'Estuaire de la Seine). Elle montre (fig. 1) une remontée vers le nord de la position de la ligne bathymétrique +5mCMH depuis 1980 (sous l'effet du développement du banc de la Passe) et une colonisation importante par la végétation (le schorre figuré en vert foncé sur la figure 1) réduisant ainsi d'autant la surface de l'estran vaseux.



**Figure 1. Evolutions de la vasière nord entre 1980 et 1999 (Sogreah, 2001a)**

La quantification des superficies a conduit aux éléments chiffrés suivants mis à jour ensuite par Artelia (2012, chap. 7.2).

**Tableau 1 – Avancée de la végétation : suivis par photos aériennes entre 1974 et 2004 (en ha)**

Année	1974	1982	1988	1994	1997	1999	2004
Sogreah, 2001a	188	710	980	990	1070		
Artelia, 2012	145		925		1002	1033	1051

Ainsi, après une progression très rapide de plus de 50ha/an entre 1974 et 1988, le rythme d'avancée ralentit ensuite à 10 ha/an entre 1988 et 1999 puis à 5ha/an entre 1999 et 2004. C'est donc sur la base de ce constat d'une avancée de 10 ha/an sur les 10 dernières années que le comité d'experts formulait son diagnostic en 1999.



**Figure 2. l'estuaire de la Seine en 1998 (photo GPMH)**

### **1.3. EVOLUTION PROBABLE EN L'ABSENCE DES TRAVAUX**

Les essais réalisés sur modèle physique à fonds mobiles entre 1996 et 2001 ne permettaient pas d'apprécier la progression du schorre car il n'y avait qu'un seul sédiment dans le modèle simulant les sables fins de l'estuaire. C'est donc l'évolution sur le modèle de la ligne bathymétrique +5mCMH qui a servi de base à l'estimation de l'avancée de la végétation dans l'essai de référence en l'absence d'aménagements. Celle-ci a été estimée à 5 ha/an sur les 10 prochaines années. Dans le même temps, le modèle prévoyait une perte de 7ha/an de la surface du bas-estran entre 0 et +5mCMH.

A plus long terme et sans pouvoir définir à quelle échéance, il est vraisemblable que, sans intervention, la limite de l'herbu se serait stabilisée dans la fosse nord entre la pile nord du pont de Normandie, qui marque la limite Est de la brèche de la digue basse nord, et Port 2000 comme l'illustre la figure 3.



**Figure 3. Evolution vraisemblable de la progression des herbus en l'absence d'aménagement ( base photo 1999 GPMH)**

## **1.4. LES PRINCIPAUX ENJEUX**

### **1.4.1. LES ENJEUX ECOLOGIQUES**

A l'occasion des discussions qui se sont tenues fin des années 90 et en particulier au cours du débat public de Port 2000 (novembre 1997- mars 1998), il est clairement apparu comme le souligne la note de synthèse du comité d'experts de juin 1999, que face aux évolutions constatées et probables précédemment exposées, le principal enjeu écologique au sein de l'estuaire est celui du maintien voire du développement de la surface des vasières dans la fosse nord de l'estuaire de la Seine en privilégiant les surfaces situées au dessus du niveau moyen (+4 à +5 CMH) car plus productives d'un point de vue biologique et donc plus intéressantes aussi bien pour les espèces aquatiques que pour l'avifaune. Cet enjeu s'exprime aussi dans le plan de gestion de la Réserve Naturelle de l'estuaire de la Seine.

Les autres enjeux écologiques significatifs évoqués par le comité d'experts en 1999 sont ceux relatifs aux zones humides et à la qualité des eaux. Ces enjeux demeurent d'actualité en particulier le premier dans le cadre du plan de gestion de la Réserve Naturelle de l'estuaire de la Seine.

### **1.4.2. LES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES**

Par rapport à la problématique de la réhabilitation des vasières, le principal enjeu socio-économique est celui de la garantie de la navigabilité du chenal d'accès du port de Rouen. De ce fait, l'influence que peuvent avoir les travaux de réhabilitation sur les apports sédimentaires dans le chenal de navigation pouvant induire des variations dans les volumes et les localisations des dragages est à considérer plus particulièrement.

Par ailleurs, la conception des aménagements pour la réhabilitation des vasières doit intégrer la nécessité de garantir la pérennité de la stabilité des piles du pont de Normandie.

L'enjeu socio-économique lié à la pêche professionnelle rejoint celui lié au maintien des vasières au regard du rôle de nourriceries qu'elles peuvent jouer.

## **2. DEFINITION DES AMENAGEMENTS ET REALISATION**

Début 1999, le Préfet a créé un comité d'experts qui a confirmé les enjeux liés aux vasières et souhaité que toutes les possibilités d'ingénierie écologique soient explorées pour les maintenir voire développer dans la partie nord de l'estuaire de la Seine.

### **2.1. LES OBJECTIFS ET LES CONTRAINTES**

Trois objectifs ont été recherchés :

- bloquer la progression des herbues
- permettre le développement d'une centaine d'hectares de vasières
- faire en sorte que le système s'auto-entretienne

La définition des aménagements devait tenir compte des contraintes liées au chenal de navigation du Port de Rouen, la stabilité du Pont de Normandie et la présence éventuelle de contaminants dans les sédiments susceptibles d'être remaniés à l'occasion des travaux ou des conséquences de ceux-ci.

### **2.2. LES AMENAGEMENTS REALISES**

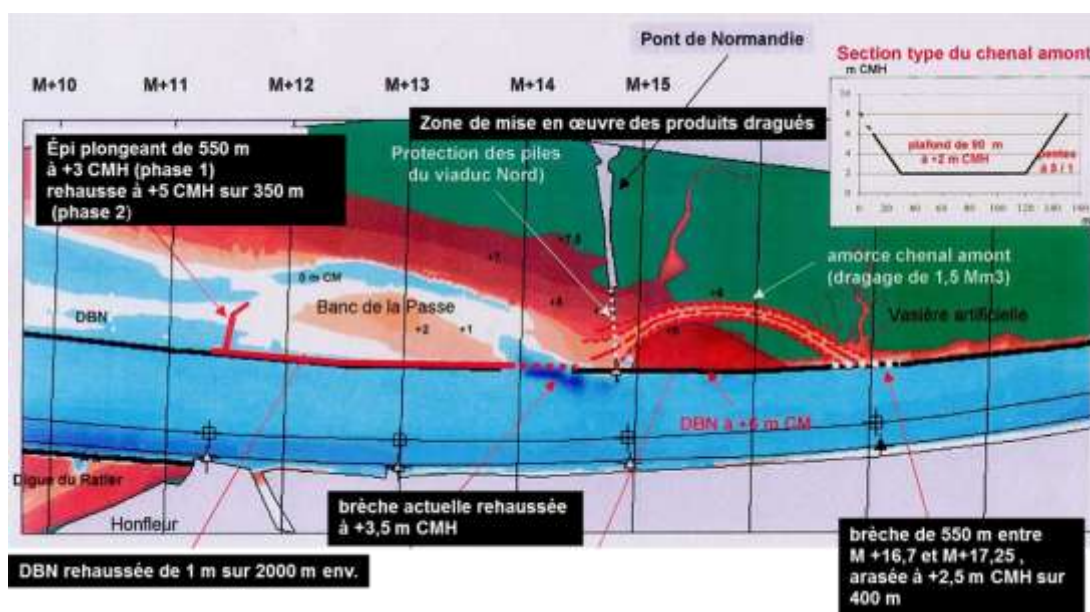
Sous l'autorité de la DREAL (DIREN à l'époque) des études ont été menées par la SOGREAH en utilisant les mêmes outils de modélisation (modèles physique et numérique) que ceux utilisés pour la définition des ouvrages portuaires afin de définir des aménagements répondant aux objectifs précédemment définis.



Un schéma d'aménagement environnemental visant à maintenir, voire développer des surfaces de vasières tout en limitant la colonisation par la végétation ainsi que la chenalisation de la fosse nord fût développé dans l'étude pour la conservation des fonctions biologiques de l'estuaire de la Seine précédemment citée. Il comprenait :

- Un épi transversal (épi de la Passe) construit en deux étapes : un soubassement de galets et graviers suivi d'un épi submersible plongeant proprement dit,
- Un rehaussement de la digue basse nord de 1m entre cet épi et la brèche,
- Un rehaussement de la cote de la brèche située à l'aval du Pont de Normandie,
- La création d'une brèche amont dans la digue basse nord,
- Le creusement d'un chenal environnemental entre les deux brèches,

Il s'est accompagné de la mise en place d'une protection anti-affouillement des piles du viaduc nord du pont de Normandie.



**Figure 4. Schéma de principe des aménagements environnementaux amont (Sogreah, 2001c)**

L'objectif de cet aménagement était de développer la sédimentation à l'amont de l'épi sur le banc de la Passe et le long de la digue basse nord rehaussée, de déplacer l'axe de la fosse nord vers le nord et de la prolonger jusqu'à la brèche amont de façon à stopper l'avancée de la végétation et maintenir des filandres actives.

Cet aménagement devait d'autre part s'inscrire dans le cadre des travaux de construction de la nouvelle darse portuaire et de ses travaux d'accompagnement qui visaient à réduire la sédimentation dans la fosse nord amont et assurer la sécurité des installations du port de Rouen. La conception et le planning de réalisation des aménagements pour remplir ce triple objectif a été la partie la plus délicate de l'étude.

Les mesures prises pour réduire la sédimentation dans la fosse nord amont ont consisté en un prédragage de 3,3 millions de m<sup>3</sup> au sud de la darse (Sogreah, 2002) complété par la mise en place d'un piège à sable dans le futur cercle d'évitage (bilan final de 1,5 millions de m<sup>3</sup> captés),

Les mesures prises pour la sécurité des installations du port de Rouen incluaient :

- Un allongement de 750 m de la digue basse nord,
- Une remise en état de la digue basse nord à l'amont du pont de Normandie à sa cote d'origine,

- Un rehaussement de la cote des deux brèches de 0,5m pour limiter le surplus de dragage d'entretien.

**Tableau 2** – Principales dates des travaux de Port 2000 et des mesures environnementales en fosse nord

Phases de travaux	Dates de réalisation
Construction des casiers, creusement du piège à sable et mise en place du soubassement digue ouest	Février 2002 à juillet 2003
Dragages d'accompagnement ouest (Z1)	Avril à novembre 2003
Construction des digues de protection	Août 2003 à avril 2004
Dragages d'accompagnement est (Z2)	Décembre 2003 à juillet 2004
Prolongement de 750m de la digue basse nord	Juin à novembre 2003
Remise en état de la digue basse nord à l'amont du Pont de Normandie	Juin à septembre 2003
Soubassement de l'épi de la Passe	Août 2003
Construction de l'épi de la Passe et rehaussement de la digue basse nord	Septembre à novembre 2004
Protection anti-affouillement des piles du viaduc nord du pont de Normandie	Mars à avril 2005
Creusement du chenal environnemental	Mars à juillet 2005
Création de la brèche amont par arasement de la digue basse nord	Juillet 2005
Rehaussement de la brèche existante	Septembre 2005

Le déroulement des travaux effectivement réalisé a été le suivant (le tableau 2 en donne les principales dates) :

La première étape a consisté, durant l'été 2003, à créer le soubassement de l'épi dans la fosse Nord de l'estuaire au droit de la tour radar de Honfleur. Les évolutions constatées in situ (remontée des fonds et amorce de vasière) ont confirmé les études, ce qui a permis de lancer la deuxième phase des travaux (Sogreah, 2004). De septembre à décembre 2004, l'épi a donc été rehaussé sur quasiment toute sa longueur (500 mètres) et la digue basse Nord sur une longueur de 2 000 mètres (en aval du Pont de Normandie, entre la brèche et l'épi).

La troisième et dernière étape de ce programme a eu pour but d'améliorer la circulation d'eau à l'amont du Pont de Normandie pour limiter la progression des herbues et ainsi préserver les nourriceries. Démarrée fin 2004, elle comprenait le creusement d'un chenal environnemental et la création d'une brèche au débouché amont du chenal tout en relevant la brèche actuelle. Lancée sous forme de concours durant l'été 2003, la consultation pour cette dernière étape a retenu la société SODRANORD, filiale du groupe néerlandais VAN OORD spécialisée dans les études et la réalisation de travaux de dragages, sa solution technique étant la plus respectueuse de l'environnement.

L'été 2004 a été mis à profit par la société pour la réalisation des études projet et du cahier des charges, les travaux démarrant fin 2004 par l'aménagement d'une chambre de dépôt, au Nord de la Route de l'Estuaire, reliée à la drague par 2,5 km de conduites. En préalable au dragage du chenal environnemental, un complément de protection des piles d'accès Nord

du Pont de Normandie a été effectué. Les travaux de dragages du chenal se sont déroulés sur une largeur d'environ 90 mètres (du Nord au Sud) et une longueur de 2 800 mètres (d'Ouest en Est). Une nouvelle brèche a été créée à l'été 2005 au débouché amont du chenal environnemental et la brèche aval a été rehaussée afin de favoriser le flux dans le nouveau chenal.

**Tableau 3** – Les travaux de réhabilitation des vasières en quelques chiffres

Linéaire des digues basses du Port de Rouen rehaussées	:	3 800 m
Volume d'enrochements pour les travaux sur les digues et seuils	:	70 000 m <sup>3</sup>
Longueur de l'épi construit dans la fosse Nord	:	550 m
Longueur et largeur du chenal environnemental	:	2 800 et 100 m
Volume des dragages pour le creusement du chenal	:	1.8 Mm <sup>3</sup>
Volume d'enrochements pour protéger les piles du viaduc du Pont de Normandie	:	4 000 m <sup>3</sup>



**Figure 5.** Situation en juin 2005 juste avant la fin du creusement du chenal environnemental (photo GPMH)

### 3. EVOLUTIONS DE LA FOSSE NORD APRES TRAVAUX (ARTELIA, 2012)

Un important programme de suivis scientifiques dans les domaines sur lesquels Port 2000 était susceptible d'avoir des impacts sur l'estuaire, a été élaboré et mis en œuvre sur 10 ans entre 2001 et 2011 en cohérence avec l'établissement de l'état initial réalisé entre 1998 et 2000. Ils se sont focalisés sur la fosse nord de l'estuaire, principale zone d'impact du projet, tout en intégrant les suivis routiniers morphologiques de l'ensemble de l'estuaire ainsi qu'un suivi spécifique du littoral sud.

Ces suivis de la fosse nord ont inclus la topographie et de la bathymétrie de l'estuaire, la courantologie, la couverture sédimentaire, la macrofaune benthique, le supra-benthos, les peuplements halieutiques.

L'importance de l'hydrologie de la Seine a d'abord été rappelée dans l'analyse de tous ces suivis. La période postérieure aux travaux (2005-2011) a en effet connu une baisse importante des apports d'eau par rapport aux cinq années humides de la période 1999-2003 pendant lesquelles les états initiaux ont été établis et une partie des travaux effectuée. Les années sèches 2005, 2009 et 2010 ont été particulièrement difficiles pour le milieu vivant. La conséquence de cette faible hydrologie a été double : d'une part une intrusion importante de la salinité dans l'estuaire qui a fait basculer la fosse nord du régime mésohalin à polyhalin ; d'autre part, un faible apport en matières en suspension de l'amont conduisant à un dévasement des fonds par expulsion vers l'embouchure des vases initialement présentes durant la période humide.

Le suivi morphologique global a, pour sa part, mis en évidence le découverture progressif de plusieurs substrats de graviers et galets et de vases indurés inaffouillables par les forces hydrodynamiques naturels qui sont autant de points durs qui dévient la trajectoire des courants de marée et conduisent à des évolutions morphodynamiques inattendues. Cela a été observé aussi bien sur la zone de creusement de la nouvelle fosse nord aval au sud de port 2000 que dans la partie endiguée à l'extrémité de la digue basse nord et aussi dans la zone sud avec le découverture du banc de galets du Ratier.

L'analyse morphologique indique que des évolutions à plusieurs échelles de temps cohabitent actuellement dans l'estuaire. La fosse nord réagit de manière très significative à court-terme et le reste de l'estuaire est soumis à des évolutions plus lentes à l'œuvre depuis 30 à 50 ans qui se résument par :

- Un front d'avancée deltaïque induit principalement par les clapages du port de Rouen sur le site du Kannik ainsi que par l'expansion des courants de jusant en sortie des digues basses qui construisent le banc du Ratier,
- 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 a) des points hauts dans le chenal qui sont régulièrement arasés et b) des obstacles à l'écoulement sur la banquette nord qui perturbent l'évolution des fonds meubles adjacents,
- Les évolutions lentes de la zone sud suite à la construction de la digue du Ratier en 1960. Ces évolutions s'effectuent à section constante et sont modulées par deux points durs que sont le banc de galets du Ratier et la zone rocheuse de Villerville. Le chenal secondaire de flot longeant la côte du Calvados a été plutôt dynamisé durant la dernière décennie.

L'analyse détaillée des évolutions dans la fosse nord présente un bilan que l'on peut résumer de la façon suivante :

- La fosse nord aval s'est largement creusée mais s'est étendue plus au sud du fait de la présence d'un haut-fond inaffouillable mis à jour durant les dragages d'accompagnement,
- des vasières se développent sur plus de 100 ha plutôt à l'aval des aménagements environnementaux le long de la digue basse Nord (banc aval) et au sud du reposoir sur dune,
- le banc de la Passe s'est bien exhausé mais il est actuellement constitué essentiellement de sables,
- la progression des herbues a bien été stoppée,
- et un apport significatif de sédiments (sable et vase) se produit continuellement dans le chenal environnemental creusé à l'amont du Pont de Normandie conduisant à son comblement.

Du point de vue biologique, certains secteurs présentent donc un intérêt trophique notable mais la progression des faciès sableux au sein de la fosse Nord freine la restauration du



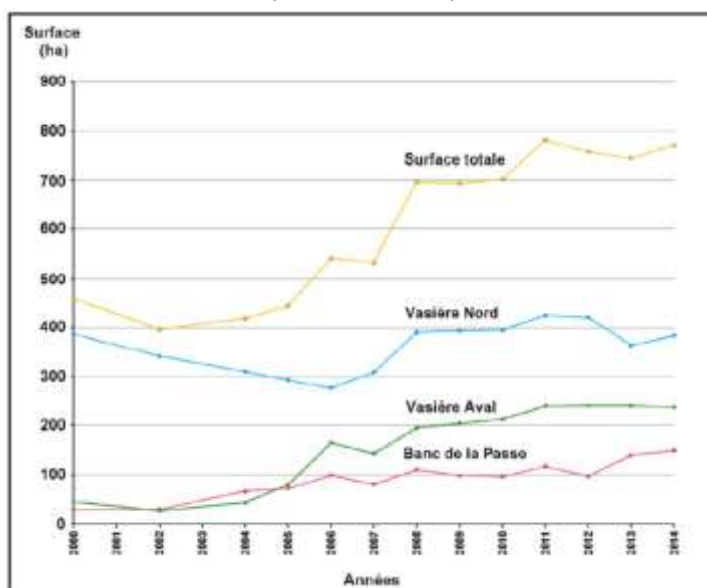
compartiment benthique. On note aussi la difficulté de la mise en place de fonds vaseux sur une grande partie de la fosse Nord liée en partie à la faible hydrologie qui limite la progression des communautés estuariennes ou marines affines des sédiments envasés et à fort intérêt trophique.

D'autre part, la tendance au comblement du système à l'amont de l'épi demeure la plus préoccupante avec des effets observés sur la structuration du peuplement piscicole (répartition de plus en plus contrastée des guildes liée à la compartimentation au sein de la fosse nord) et sur les échanges hydrologiques et faunistiques en net déclin.

#### 4. EVOLUTIONS RECENTES

L'étude d'Artelia (2012) reposait sur des données relevées jusqu'à mars 2012. La situation a cependant continué d'évoluer au cours des trois dernières années et est toujours suivi par le GPMH qui note que :

- la vasière située le long de la digue basse Nord à l'aval de l'épi se maintient, voire se développe et une sédimentation vaseuse significative s'observe maintenant dans la partie ouest du banc de la Passe (Cuvilliez, 2015)



**Figure 6. Evolution des surfaces intertidales non végétalisées de la Fosse Nord entre 2000 et 2014 (Cuvilliez 2015)**

- l'ensemble des estrans à l'amont de l'épi y compris le secteur du chenal environnemental présentent un intérêt certain pour l'avifaune et il convient d'éviter que ce milieu se referme (communication personnelle de l'observatoire de l'avifaune),
- d'un point de vue benthique sur la base des résultats de 2014 (CSLN, 2015)
  - pour l'amont du pont de Normandie : « malgré une biomasse relativement peu élevée, ce secteur constitue tout de même une zone intéressante pour les maillons trophiques supérieurs, avec notamment des populations importantes de *Corophium volutator*, d'*Hediste diversicolor* et de *Macoma baltica*, qui constituent des proies appréciées par l'ichthyofaune comme par l'avifaune »
  - pour le secteur directement à l'aval du Pont de Normandie (Fosse nord amont) : « Depuis 2011, la partie aval du secteur semble à nouveau s'envaser, ce qui permet sa reconquête par la communauté vasicole, avec notamment des densités et des biomasses très élevées sur la partie occidentale du Banc de la Passe où une vasière intertidale relativement stable semble se mettre en place ».



**Figure 7. Situation en mars 2015 (photo GPMH)**

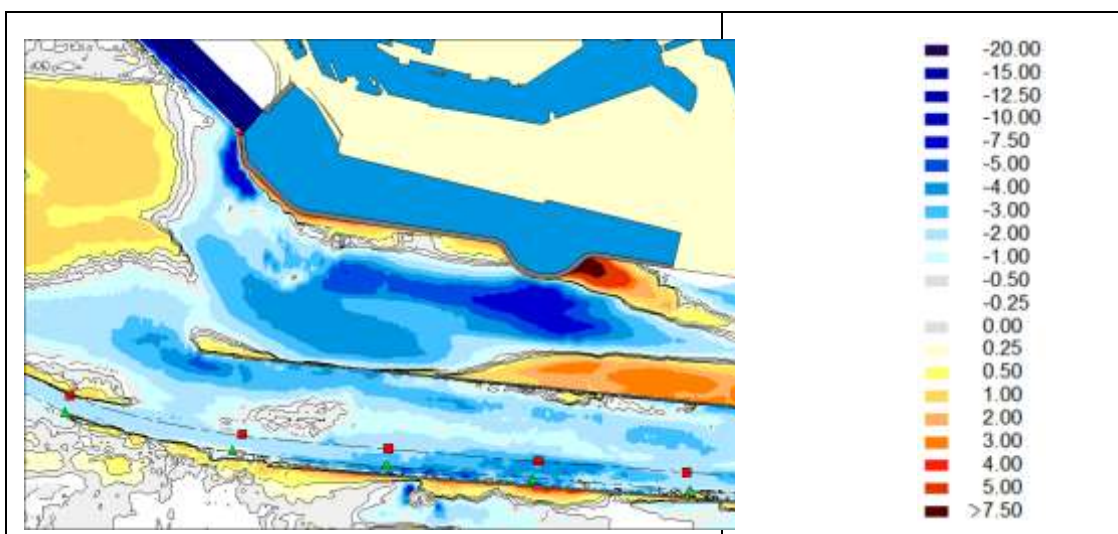
## 5. COMPREHENSION ACTUELLE DES PHENOMENES

### 5.1. ECARTS OBSERVES PAR RAPPORT AUX PREVISIONS

Si l'on compare ces observations avec les prévisions de l'étude pour la conservation des fonctions biologiques de l'estuaire de la Seine (Sogreah, 2001b), on observe que (Artelia, 2012) :

Le déplacement et le creusement de la fosse nord aval au sud du port a été plus important que prévu en volume (17,8 millions de m<sup>3</sup> de creusement à fin 2011 au lieu de 10 millions de m<sup>3</sup> prévus) sur une surface plus étendue vers le sud (jusqu'en limite de digue basse nord) du fait de la mise à jour de fonds inaffouillables (substrats anciens composés de galets et graviers) au sud-ouest immédiat du port, contournée par les courants de flot.

Une zone inaffouillable similaire a été également mise à jour plus au sud de l'autre côté de la digue basse nord ce qui contribue à éroder la banquette du chenal de Rouen le long de la digue basse. Ces deux zones « dures » dévient les courants de marée en direction du banc d'Amfard-sud qui est en cours de démantèlement.



**Figure 8. Creusement de la nouvelle fosse nord aval (différentiel fin 2011-fin2001)**

Le déplacement vers le nord de l'axe de la fosse nord amont ainsi que son comblement modéré avaient bien été anticipé dans l'étude ainsi que la création du banc aval le long de la digue basse nord, à l'aval de l'épi de la Passe. Ce déplacement de la fosse vers le nord s'accompagne d'une érosion qui là encore met à jour des fonds inaffouillables plutôt constitués de vases indurées (Dauvin et al., 2012).

La réorganisation du banc de la Passe à l'aide d'un épi et du rehaussement de la digue basse nord a bien permis de stopper l'avancée du schorre comme espéré et les filandres restent très actives (Lesourd et al., 2012). Par contre, le développement du banc de la Passe s'accompagne d'une sédimentation essentiellement sableuse. Une sédimentation vaseuse commence cependant à s'observer récemment côté ouest.

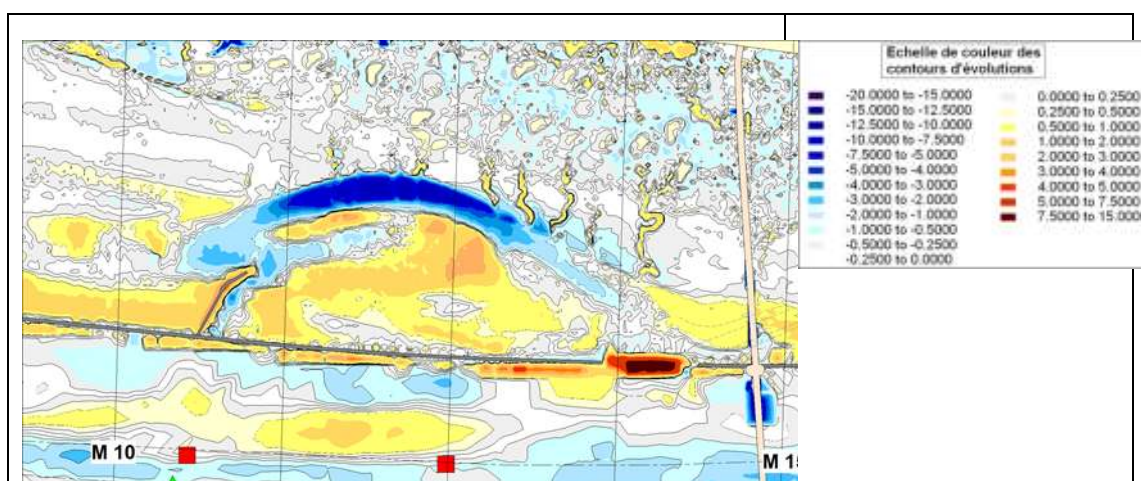
Enfin le creusement d'un méandre amont permettant de prolonger la fosse nord au-delà du pont de Normandie n'a pas conduit au résultat espéré puisqu'il s'est retrouvé très vite en sédimentation continue et est maintenant comblé pour une bonne part.

## 5.2. EXPLICATIONS DES ECARTS OBSERVES

A l'aval, la mise à jour de surfaces importantes de fonds inaffouillables explique les écarts d'évolution morphodynamique observés. Les points restant à comprendre étaient donc la présence importante de sable sur le banc de la Passe et le comblement du méandre amont.

L'étude de modélisation numérique hydrosédimentaire 3D mise en place entre 2012 et 2014 a permis de mieux comprendre les mécanismes hydrosédimentaires ayant conduit à cette situation. Ce modèle présente en effet une avancée importante par rapport à la modélisation physique de 1996-2001 puisqu'il permet de traiter un mélange de vase et de plusieurs classes de sables (sablon, sables fins et moyens) ce qui est une représentation plus réaliste de l'hétérogénéité des couches sédimentaires de l'estuaire. Il fournit également une représentation tridimensionnelle complète de l'hydrodynamique (courants de marée, salinité), de la circulation des matières en suspension (et notamment du bouchon vaseux) ainsi que de la consolidation des dépôts sédimentaires. Il reste par contre limité par les temps de calcul, ce qui se concrétise par des durées de simulation limitées à 6 années, et par la qualité des données d'entrée et notamment du prisme sédimentaire (stratigraphie des dépôts dans l'estuaire à la date de démarrage des calculs).

Ce modèle a été calé et validé sur la période fin 2005 – fin 2011. L'analyse de ces calculs a permis de montrer que la sédimentation dans le méandre amont démarrait par le développement d'un banc de sable à l'aval immédiat du pont de Normandie. De fait, la présence d'un banc de sable à l'aval immédiat du viaduc nord, a été très tôt repérée lors des travaux de construction. La comparaison des levés de fin 2001 et fin 2004 a de plus confirmé la présence de ce banc (volume estimé de 113 000 m<sup>3</sup>, Artelia, 2010, p.59).



**Figure 9. Banc de la Passe : évolution 2001-2004**

La modélisation a permis de comprendre que c'est l'obstacle constitué par les piles du pont et le tapis d'enrochements anti-affouillements qui ralentit les écoulements et retient le sable à cet endroit. Ce ralentissement des écoulements s'effectue aussi bien au flot (qui apporte le sable au départ) qu'au jusant qui était censé, grâce à la brèche amont, provoquer une chasse pour entretenir le méandre. A partir de cet élément déclencheur, la sédimentation commence à s'opérer dans le méandre d'abord sableuse puis vaseuse dans une dynamique auto-entretenu.

La dernière question concerne l'origine de ces sables qui ont sédimenté non seulement au pied du pont mais aussi sur le banc de la Passe. Le calcul des volumes de sédiments érodés et déposés depuis 2001 dans toute la zone nord montre un équilibre entre les volumes érodés dans la fosse nord aval et amont (plus de 21 millions de m<sup>3</sup> au total entre 2001 et 2011) et les dépôts observés sur les bancs. On observe notamment, sur l'évolution 2001-2004 du banc de la Passe, un creusement important du chenal de l'ordre de 2 millions de m<sup>3</sup> (Artelia, 2010, p. 59) lié à la construction du soubassement de l'épi de la Passe qui remet en circulation des sédiments dont une partie est allé se déposer au pied du pont.

## 6. CONCLUSION

Les suivis scientifiques du programme de réhabilitation des vasières de l'estuaire de la Seine effectués depuis 2005 mettent en évidence plusieurs constats :

- la progression des herbues a bien été stoppée,
- des vasières se développent sur plus de 100 ha à l'aval des aménagements,
- le Banc de la Passe s'est bien exhausé et sa colonisation par de la vase débute dans sa partie ouest,
- un apport significatif de sédiments (sable et vase) se produit dans le chenal environnemental creusé à l'amont du Pont de Normandie. Le phénomène perture tout en se ralentissant.

Par ailleurs, les suivis biologiques ont permis de mieux mettre en évidence les relations entre les milieux physiques et vivants et donc de mieux orienter les réflexions sur les aménagements complémentaires à envisager en particulier vis-à-vis des filandres.

La modélisation hydrosédimentaire 3D mise en œuvre par ARTELIA depuis fin 2011 pour le GPMH a permis de mieux comprendre les dynamiques en jeu (en particulier l'influence des piles du Pont de Normandie) et de prévoir quelle pourrait être l'évolution sans nouvel aménagement. Ce modèle est actuellement utilisé pour éclairer des choix futurs d'aménagements permettant de mieux répondre aux objectifs.



## 7. REFERENCES

- Artelia, 2010.** Expertise sur la fosse nord de l'estuaire de la seine. Analyse et interprétation des données morphosédimentaires. Rapport n°171 1900 R2 de mars 2010 établi pour le Grand Port Maritime du Havre.
- Artelia, 2012.** Expertise sur la fosse nord de l'estuaire de la seine. Synthèse finale. Rapport n°171 1900 R9 de décembre 2012 établi pour le Grand Port Maritime du Havre.
- Comité d'experts sur l'estuaire de la Seine, 1999.** Note de synthèse Juin 1999 – Préfecture de région Haute-Normandie.
- CSLN, 2015** Suivi des sédiments et des peuplements benthiques dans l'estuaire de la Seine – rapport de synthèse année 2014
- Cuvilliez, A., 2008.** Dynamiques morphologique et sédimentaire d'une slikke et d'un schorre dans un estuaire macrotidal anthropisé (Seine-France). Thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Cuvilliez, A., 2015.** Campagne 2014 de télédétection à basse altitude de la fosse nord de l'estuaire de la seine. Rapport final pour le GPMH, avril 2015, 18p.
- Dauvin, J.C., Brind'Amour, A., Cuvilliez, A., Dancie, C., Desroy, N., Le Hir, P., Lesourd, S., Mear, Y. et J. Morin, 2012.** COLMATAGE. Couplage bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long-terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine aval. Rapport Seine-Aval 4, d'octobre 2012 établi pour le GIP Seine-Aval, 209 p.
- Lesourd, S., Bessineton, C., Carpentier, A., Chouquet, B., Cuvilliez, A., Duhamel, S., Julve, P., Lecarpentier, T., Marion, C. et Morel, F., 2012.** DEFHYS : Dynamique des Ecosystèmes et Fonctionnement Hydromorphologique des Flandres en Seine. Rapport final Seine-Aval 4, octobre 2012 établi pour le GIP Seine-Aval, 59 p.
- Sogreah, 1983 :** Etude des nouveaux aménagements dans l'estuaire de la Seine. Rapport 35 1474 de décembre 1983 établi pour le Port Autonome de Rouen.
- Sogreah, 1997 :** Port2000. Etude sédimentologique sur modèle physique – Rapport de synthèse. Rapport 51 1471 R2 d'Avril 1997 établi pour le Port Autonome du Havre.
- Sogreah, 2001a :** Etudes pour la conservation des fonctions biologiques de l'estuaire de la Seine. Etape 1 : analyse préliminaire et calculs courantologiques. Rapport 71 1021 R1 de Décembre 2001 établi pour le compte de la DIREN Haute Normandie.
- Sogreah, 2001b :** Etudes pour la conservation des fonctions biologiques de l'estuaire de la Seine. Mesures d'accompagnement à Port2000. Rapport final. Rapport 71 1021 R8 de Décembre 2001 établi pour le compte de la DIREN Haute Normandie.
- Sogreah, 2001c :** Projet Port 2000 - Etudes des mesures d'accompagnement et de réhabilitation des vasières. Essai sur modèle physique des aménagements en zone nord (Essai E8). Rapport 71 1021 PA2 d'octobre 2001 établi pour le compte du Port Autonome du Havre.
- Sogreah, 2002 :** Projet Port 2000 - Etudes des mesures d'accompagnement et de réhabilitation des vasières. Synthèse sur la définition d'un dragage d'accompagnement dans la zone nord. Rapport 71 1021 PA3 de novembre 2002 établi pour le compte du Port Autonome du Havre.
- Sogreah, 2004 :** Travaux d'accompagnement Port2000. Expertise du soubassement de l'épi de la Passe.