
ÉLABORATION DU PLAN DE GESTION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE

RAPPORT D'ETAPE 1 : ETAT DES LIEUX

FICHE THEMATIQUE N°1: HYDROSEDIMENTAIRE – BOUCHON VASEUX –
OXYGENE DISSOUS RAPPORT

RM1-E1-1

ARTELIA Eau & Environnement

Branche MARITIME

6 rue de Lorraine

38130 - Echirolles

Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00

Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33



Cette étude a bénéficié du soutien financier de :



N° 8 71 3583 - Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde					
Etape 1 – Etat des lieux					
RM1-E1-1					
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date
4	Corrections suite observations du SMIDDEST 11/02/2016	TSD			24/02/2016
3	Corrections suite aux observations du GPMB reçues le 07/10/2015	LTT	-	-	14/10/2015
2	Corrections suite aux remarques du comité technique et des experts + point téléphonique A. Sottolichio le 06/08/2015	LTT	-	-	24/08/2015
1		LTT	SLX	TSD	02/06/2015

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

La bonne gestion des sédiments de dragage du chenal de navigation de l'estuaire de la Gironde est aujourd'hui reconnue comme un enjeu majeur pour le bon fonctionnement de l'écosystème estuarien. En mars 2015, le SMIDDEST a lancé l'élaboration du premier plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire. Cette mission a été confiée à un groupement dont Artelia est mandataire.

La première phase de la mission consiste à effectuer un état des lieux, à partir des données collectées auprès des acteurs concernés et rencontrés.

Cet état des lieux regroupe sept thématiques, qui sont les suivantes :

1. hydrosédimentaire, bouchon vaseux, oxygène dissous ;
2. navigabilité et maintien des accès nautiques ;
3. petits ports de l'estuaire ;
4. contamination : qualité des eaux, du sédiment, du biota ;
5. peuplements et habitats benthiques ;
6. peuplements de poissons et espèces ;
7. usages.

Chacune de ces thématiques fait l'objet d'une fiche de synthèse indépendante, de manière à bien identifier les différents enjeux. La présente fiche traite des aspects « hydrosédimentaire-bouchon vaseux-oxygène dissous ».

La vision environnementaliste de l'estuaire (milieu physique, sédimentologie et hydrodynamique) s'est constituée dans les années 1970-80 à partir de plusieurs campagnes de mesures réalisées dans le cadre de travaux de recherche (Allen, 1972). Ces travaux ont apporté une importante somme d'informations sur les processus hydrosédimentaires (circulations, transports), à l'échelle de l'estuaire.

Aujourd'hui, dans un objectif plus opérationnel, des réseaux de mesures en continu contribuent à améliorer la connaissance de la dynamique estuarienne. A ce titre, le réseau MAGEST, mis en œuvre par l'Université de Bordeaux, apporte des renseignements complémentaires plus récents.

A. Sottolichio, enseignant-chercheur à l'Université de Bordeaux, est spécialiste de la dynamique sédimentaire estuarienne. Il a donc été rencontré dans le cadre de cet état des lieux afin d'échanger sur les données disponibles et bénéficier de sa connaissance du domaine, y compris via l'exploitation des données MAGEST.

L'hydrodynamique estuarienne est régie par l'interaction entre trois facteurs majeurs : les débits fluviaux, les marées et la morphologie de l'estuaire.

Les débits fluviaux sont enregistrés aux stations hydrologiques sur la Dordogne et la Garonne : à l'échelle interannuelle, il convient de noter que le système fluvio-estuarien de la Gironde présente une importante fluctuation (du débit) marquée par une tendance générale à la diminution au cours des dernières décennies ; au cours de la dernière décennie, certaines années sont plutôt sèches (absence de crue marquée) et d'autres sont davantage humides (débits de crues notables).

Les niveaux de marée dans la Gironde sont suivis par 9 marégraphes répartis le long de l'estuaire entre l'embouchure et Bordeaux, à environ 22 km en amont du Bec d'Ambès. La marée dynamique remonte jusqu'à 70 km en amont du Bec d'Ambès. L'amplitude de l'onde de marée s'amplifie en remontant dans l'estuaire, et passe de 4,25 m à l'embouchure à 5,30 m à Bordeaux par marée de

vive-eau. Le maximum d'amplitude se trouve à environ 32 km en amont de Bordeaux, près de Podensac.

L'analyse des vitesses à l'échelle de l'estuaire est possible grâce au développement de modèle numérique hydrodynamique. On peut relever que les plus fortes vitesses s'établissent dans le chenal de navigation et à l'embouchure de la Gironde au niveau de la Pointe de Grave.

Il faut revenir aux mesures et travaux d'Allen (1972) pour se représenter les schémas de circulation résiduelle des écoulements :

- La circulation résiduelle du fond est orientée vers l'amont, jusqu'à la limite amont de l'intrusion saline. En période de crue, cette limite amont est repoussée en aval de Trompeloup. Dans la partie aval du chenal de navigation, l'intensité de l'écoulement résiduel vers l'amont au fond est proportionnelle au débit fluvial.
- Dans la partie aval de l'estuaire, le mouvement résiduel au fond est dirigé vers l'aval dans le chenal de Saintonge et vers l'amont dans le chenal de navigation.

La circulation résiduelle est donc complexe, en particulier en aval de l'estuaire où les écoulements sont tour à tour canalisés ou libres.

La dynamique du bouchon vaseux (zone d'accumulation de MES) est appréhendée depuis les années 2000 grâce au réseau de mesures en continu MAGEST. A partir des données de turbidité, les scientifiques de l'UMR CNRS 5805 EPOC analysent sa dynamique spatio-temporelle.

Le bouchon vaseux évolue selon différentes échelles de temps :

- échelle de la marée, sous l'influence des courants de flot et de jusant ;
- échelle d'un cycle mensuel de vives-eaux – mortes-eaux, sous l'influence des volumes oscillants ;
- échelle saisonnière, sous l'influence des débits fluviaux.

Les cycles de marée ont une influence dominante sur les concentrations en MES (variations mensuelles de 1 à 10 jusqu'à 1 à 50) alors que les débits fluviaux contrôlent principalement la position du bouchon vaseux dans le système Gironde-Garonne-Dordogne.

A l'étiage, le bouchon vaseux est centré sur Bordeaux ; c'est dans ce secteur amont de l'estuaire que sont rencontrées les concentrations en MES les plus élevées à l'échelle de l'estuaire. C'est également dans ce secteur que sont observées les variabilités les plus fortes.

Avec l'augmentation des débits, le bouchon vaseux se déplace vers l'aval. Il se concentre dans le secteur de Pauillac en débit moyen. Dans ce secteur, les variations annuelles sont moins prononcées ; le bouchon vaseux est quasi-permanent dans ce secteur estuarien.

La dynamique de dépôt est associée au déplacement du bouchon vaseux ; en crue, les dépôts ont lieu préférentiellement en aval du pk 50 ; la limite aval des dépôts est située au pk 78. En étiage, les dépôts s'observent en amont du pk 50. Lorsque les crues hivernales sont marquées, les dépôts sur les fonds amont de l'estuaire sont complètement évacués vers l'aval ; en revanche au cours d'un hiver moins caractérisé, il faut attendre le printemps pour que les dépôts amont soient évacués.

Les travaux d'Allen (1972), confirmés par ceux de Sottolichio et Castaing (1999), mettent en évidence des zones de dépôt privilégiées dans le chenal de navigation ; ces zones de dépôts correspondent à des secteurs dans lesquels la section mouillée s'élargit.

Outre les dépôts de vases, des apports sableux en provenance de bancs estuariens vers les passes du chenal de navigation sont également notables.

L'oxygénation des eaux est nécessaire à la vie dans l'estuaire. L'oxygénation résulte en partie de l'hydrodynamique et de l'hydrosédimentaire. Les réseaux de mesures en continu MAGEST et SOMLIT permettent de suivre l'évolution spatio-temporelle du paramètre oxygène dissous.

- Les eaux estuariennes à Pauillac et plus en aval sont toujours bien oxygénées, quelle que soit la saison, avec des valeurs mensuelles moyennes comprises entre 7 et 11 mg/l.
- En revanche en amont de l'estuaire, dans la Garonne, les valeurs mensuelles moyennes varient plus largement, entre 3 et 14 mg/l.

Plusieurs raisons expliquent une diminution d'oxygène dissous en-dessous du seuil critique pour le vivant (5 mg/l) :

- l'augmentation de la température ;
- la présence de matières en suspension contenant de la matière organique ;
- le rejet d'eaux traitées apportant matière organique et ammonium.

Toutes ces causes conjuguées en période d'étiage expliquent pourquoi les eaux à Bordeaux montrent un minima en oxygène dissous à basse mer.

Concernant l'état des connaissances actuelles et les besoins pour le futur plan de gestion, les conclusions à l'issue de l'étape 1 sont les suivantes :

La connaissance de la bathymétrie des fonds de l'estuaire de la Gironde est issue des levés réalisés par le GPMB. C'est à partir de ces sondages, réalisés par le port entre 2005 et 2010, que le modèle numérique de terrain unifié (MNTU) a été construit pour représenter les fonds de l'estuaire dans l'outil de modélisation développé pour la présente étude.

Ces données, ayant pour application la navigation, sont satisfaisantes pour l'étude actuelle ; cependant il nous semble qu'il serait opportun, dans l'avenir, de réaliser un levé bathymétrique unique sur tout l'estuaire. Il serait utilisé comme support identique à toutes les études sur l'estuaire, dans le système de référence RGF/IGN.

La dynamique sédimentaire, transport en suspension, et notamment l'évolution du bouchon vaseux en fonction des forçages, est bien appréhendée à partir des mesures collectées en continu par le réseau MAGEST. Pour les besoins de l'étude, cette dynamique pourrait être affinée dans certains secteurs. Une caractérisation plus détaillée des processus hydrosédimentaires, au niveau des sites actuels de dépôts dans l'estuaire, sera nécessaire pour la suite de l'étude (diagnostic, proposition de scénarios).

Le modèle numérique en cours de construction sera profitable pour analyser plus finement la dynamique en certains points que nous définirons lors de l'exploitation du modèle. Toutefois, des éléments de connaissance / de caractérisation complémentaires au modèle pourraient être acquis par des mesures en nature. Ces besoins étant à rattacher à l'analyse des pratiques actuelles de dragages-immersions, ceux-ci seront présentés dans la fiche thématique n°2 « navigation et dragages ».

La dynamique sédimentaire, sédimentation-dépôt, a beaucoup moins été étudiée que les mécanismes dans la colonne d'eau. Pour les besoins ultérieurs de l'étude, il est primordial de connaître les zones de dépôt naturelles de sédiments dans l'estuaire :

- Afin de replacer les effets des opérations de dragage et d'immersion dans le contexte de la dynamique naturelle de l'estuaire (mission réglementaire) ;
- Afin de proposer des mesures de gestion des sédiments dragués (proposition de scénarios, analyse comparative) cohérentes avec la dynamique générale de l'estuaire ;

Dans l'idéal, ces zones de dépôt doivent être identifiées à partir de mesures in-situ ; à l'échelle de tout l'estuaire, les seules données en nature existantes sont les levés bathymétriques du GPMB.

Un travail d'analyse, à partir des bandes de levé (si conservées par le port) permettrait, à l'image de ce qui a été fait par EPOC pour le GIP Loire Estuaire, de localiser les zones de dépôt et d'analyser leurs évolutions en fonction des conditions de débit et de marée.

A défaut, nous utiliserons pour la suite de l'étude les informations apportées par la modélisation qui va être mis en œuvre ; nous rappelons toutefois que l'objectif de la modélisation est d'étudier le fonctionnement hydrosédimentaire des matériaux clapés dans l'estuaire. L'évolution naturelle de l'estuaire et de son bouchon vaseux ne seront pas étudiés à l'aide de la modélisation. En complément, nous pourrions également utiliser les cartographies de dépôts sédimentaires résultantes de l'exploitation du modèle de transport SiAM (Ifremer-EPOC).

Tableau 1 – Données existantes : lacunes, limites et besoins complémentaires

Volet/ thématique	Données existantes	Méthodologie envisagée sur la base des données existantes	Mesures possibles pour l'amélioration de la connaissance
Bathymétrie	Levés réalisés par le GPMB Absence de levé unique couvrant l'ensemble de l'estuaire	Modélisation : construction d'un MNTU à partir des dalles disponibles entre 2005 et 2010	Bathymétrie couvrant l'intégralité de l'estuaire, référence altimétrique : IGN69. Pas indispensable pour l'étude actuelle ; utile comme support commun à toutes les études futures, quelles que soient les applications
Dépôts sédimentaires, crème de vase	Chenal de navigation : étude Sottolichio A., Castaing P., 1999. Estuaire : absence d'étude	La dynamique naturelle de dépôt à l'échelle de l'estuaire : utilisation de données « indicatrices » : - modélisation des sédiments clapés dans l'estuaire ; - cartographies de dépôt issues de l'exploitation du modèle SIAM Nota : ces deux sources d'information n'avaient / n'ont pas pour objet l'étude de la dynamique de dépôt sédimentaire de l'estuaire.	Analyse des bandes de sondage du GPMB pour caractériser la présence de dépôts, leurs épaisseurs, leurs concentrations. OU Analyse à partir de nouvelles données issues d'une campagne bathymétrique globale.

SOMMAIRE

SYNTHESE ET CONCLUSIONS	A
1. PRESENTATION DE LA THEMATIQUE	2
2. DONNEES RECENSEES ET BIBLIOGRAPHIE	4
2.1. DONNEES SUR L'HYDRODYNAMIQUE	4
2.2. DONNEES SUR L'HYDROSEDIMENTAIRE	4
2.3. DONNEES SUR L'OXYGENE DISSOUS	5
2.4. AUTRES DONNEES	6
2.5. BIBLIOGRAPHIE	6
3. ENTRETIENS REALISES	7
4. SYNTHESE DES DONNEES – ETAT DES LIEUX	8
4.1. LEXIQUE	8
4.2. HYDRODYNAMIQUE	8
4.2.1. HYDROLOGIE DE L'ESTUAIRE	8
4.2.2. MAREE ET NIVEAUX D'EAU	10
4.2.3. VOLUMES OSCILLANTS	12
4.2.4. COURANTS DE MAREE	12
4.2.5. CIRCULATION RESIDUELLE	13
4.3. HYDROSEDIMENTAIRE	15
4.3.1. NATURE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS	15
4.3.2. IMPORTANCE DES APPORTS AMONT SABLES-VASES	18
4.3.3. SYSTEME BOUCHON VASEUX – CREME DE VASE	18
4.3.3.1. Description générale	18
4.3.3.2. Evolution à court terme	20
4.3.3.3. Effet des marées	21
4.3.3.4. Effet des crues et origine des MES en période de crue	21
4.3.3.5. Evolution à moyen terme, échelle saisonnière	22
4.3.3.6. Evolutions sur le long-terme, interannuelles	23
4.3.3.7. Masses de sédiments en jeu	24
4.3.4. ZONES EN SEDIMENTATION SUR LE COURT/MOYEN TERME	24
4.3.5. EFFET DE L'HYDROSEDIMENTAIRE SUR LA SEDIMENTATION PORTUAIRE	24
4.3.6. CORRELATIONS ENTRE HYDROSEDIMENTAIRE ET DRAGAGES	27
4.4. OXYGENE DISSOUS	27
4.4.1. GENERALITES	27
4.4.2. OBJECTIFS DU SAGE EN MATIERE DE CONCENTRATION EN OXYGENE	28
4.4.3. RESULTATS ISSUS DES RESEAUX DE SUIVI	28

5. VALIDITE DES DONNEES ET JUSTIFICATION CONCERNANT L'ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES	30
5.1. VALIDITE DES DONNEES	30
5.2. JUSTIFICATION CONCERNANT L'ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES	30
5.2.1. LEVE BATHYMETRIQUE DE L'ESTUAIRE	30
5.2.2. ETUDE / ANALYSE DES ZONES DE SEDIMENTATION NATURELLE	31
5.2.3. PROCESSUS HYDROSEDIMENTAIRES AU NIVEAU DES ZONES DE VIDAGE ACTUELLES	31

TABLEAUX

Tableau 1 – Données existantes : lacunes, limites et besoins complémentaires	d
Tableau 2 – Niveaux caractéristiques de la marée, en m CM (RAM, SHOM 2013)	11

FIGURES

Figure 1. Carte de l'estuaire de la Gironde, entités géographiques. Benaouda, 2008	3
Figure 2. Marégraphes émetteurs du GPMB sur l'estuaire de la Gironde.	4
Figure 3. Localisation des stations de mesures (Etcheber et al, 2011)	5
Figure 4. Débits moyens annuels depuis 1959 (source MAGEST).....	9
Figure 5. Débits journaliers mesurés en Dordogne et Garonne, sur la période 2005-2014 (Artelia).....	10
Figure 6. Courbes de marée aux marégraphes de l'estuaire (marée de vive-eau). D'après les données du GPMB. En cm / 0 étiage.	12
Figure 7. Schématisation théorique des vitesses résiduelles dans un estuaire (Allen, 1972).	13
Figure 8. Circulation résiduelle. Adapté de Allen, 1972.	15
Figure 9. Faciès sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde (d'après Allen in Jouanneau et Latouche).	16
Figure 10. Répartition du grain moyen dans l'embouchure de la Gironde (unité phi). Mallet, 1998.	16
Figure 11. Illustration des phénomènes de bouchon vaseux et crème de vase. GIP Loire Estuaire.....	18
Figure 12. MES et salinité mesurés à la station MAREL de Pauillac en juin 2005. Adapté de Doxaran et al, 2009.	20
Figure 13. Turbidité mesurée à Bordeaux sur 48h, dans 2 situations hydrologiques : à gauche, étiage et à droite, crue. (a) débit (b) turbidité et niveau d'eau (c) turbidité en fonction du niveau d'eau (Jalon Rojas et al., 2014).....	21
Figure 14. MES en janvier 2005 d'après données satellite MODIS Terra and Aqua. Adapté de Doxaran et al, 2009. Débit moyen : ~790 m ³ /s.....	22
Figure 15. Synthèse des 10 années de mesures, au niveau des 4 stations MAGEST. En fonction de l'hydrologie (hautes et basses eaux) et du marnage (vives-eaux et basses-eaux). Jalon Rojas et al, 2014. .	23
Figure 16. Durée de présence du bouchon vaseux, par année, au niveau des 3 stations de mesures amont. Les hachures représentent la durée en période hivernale. Jalon Rojas et al., 2014	23
Figure 17. Répartition spatiale des MES de surface mesurées à basse mer, à faible débit et débit de crue. D'après Sottolichio et Castaing, 1999.	25
Figure 18. Répartition spatiale de la crème de vase dans le chenal de navigation (a) et occurrence des dépôt vaseux en relation avec la section mouillée. D'après Sottolichio et Castaing, 1999.	26

1. PRESENTATION DE LA THEMATIQUE

Le bouchon vaseux est un phénomène dynamique naturel caractéristique des estuaires macrotidaux. Il se compose de sédiments fins en suspension associés à de la matière organique qui s'accumulent autour de la zone de rencontre des eaux douces et des eaux salées.

Des nombreux enjeux de l'estuaire sont en lien avec le bouchon vaseux ; les dragages en particulier sont consécutifs, en partie, aux dépôts associés à la dynamique du bouchon vaseux.

L'élaboration du plan de gestion des sédiments nécessite donc une bonne connaissance du système dans lequel les activités ont lieu. Les évolutions naturelles de l'estuaire de la Gironde doivent être connues afin de re-contextualiser les pratiques de dragages et immersions et leurs effets.

La dynamique estuarienne conditionne le caractère dispersif ou stable des sites de dépôts. Elle détermine la dispersion des sédiments remis en suspension.

La dynamique sédimentaire structure la répartition du substrat superficiel dans l'estuaire ; substrat support de vie des peuplements benthiques, ressource trophique essentielle dans l'estuaire.

L'hydrodynamisme (circulation et renouvellement des eaux) et l'hydrosédimentaire (mise en mouvement et transport des matières en suspension) jouent des rôles majeurs dans l'oxygénation des eaux, critère essentiel pour la qualité de l'eau et des milieux estuariens.

Cet état des lieux du milieu physique est nécessaire en préalable au diagnostic des opérations de dragages et d'immersion.

Le système de la Gironde est cartographié sur la figure page suivante.

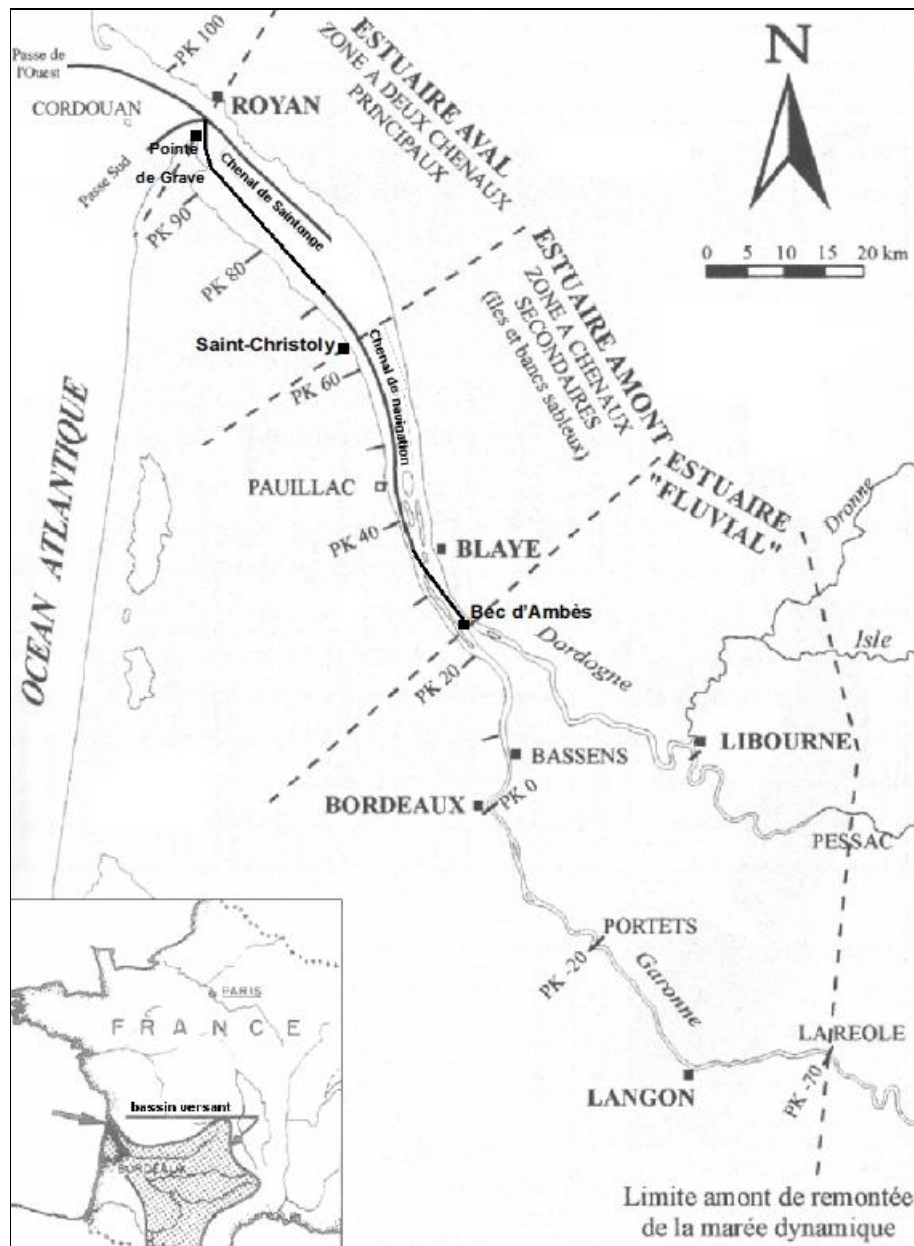


Figure 1. Carte de l'estuaire de la Gironde, entités géographiques. Benaouda, 2008

Les différentes entités géo-morphologiques sont les suivantes :

- Embouchure ou panache de la Gironde : elle est située à l'aval de la Pointe de Grave.
- Estuaire aval : il est délimité par l'embouchure en aval et Saint-Christoly en amont.
- Estuaire amont : il est délimité par Saint-Christoly en aval et le Bec d'Ambès en amont.
- Estuaire fluvial : il regroupe les parties avales de la Garonne et de la Dordogne, situées entre le Bec d'Ambès et la limite amont de la marée dynamique respective à chaque fleuve.

2. DONNEES RECENSEES ET BIBLIOGRAPHIE

2.1. DONNEES SUR L'HYDRODYNAMIQUE

Le forçage de la marée est renseigné par les 9 marégraphes situés sur l'estuaire ; les enregistrements ont été fournis par le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB) entre 2005 et 2015.

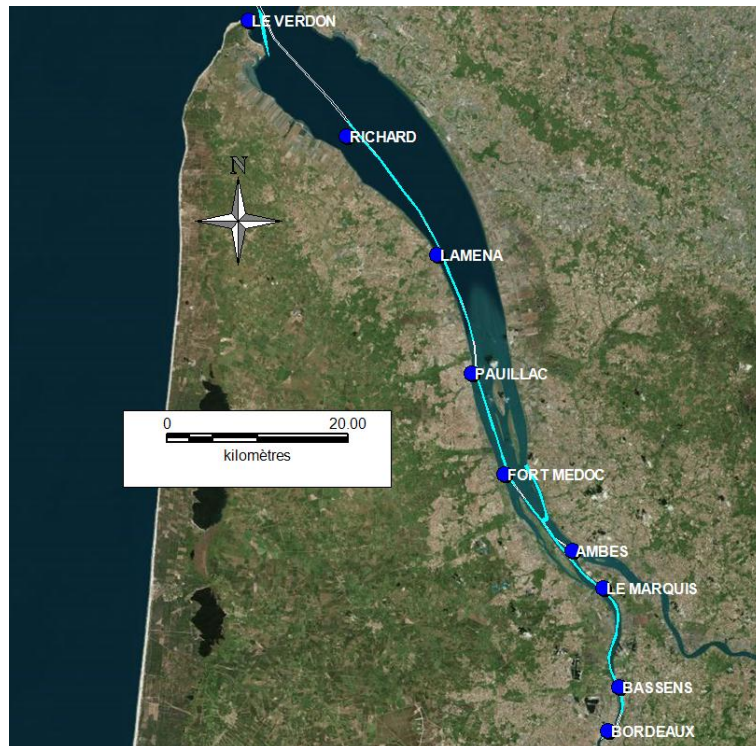


Figure 2. Marégraphes émetteurs du GPMB sur l'estuaire de la Gironde.

Le forçage hydrologique (débits de la Garonne et de la Dordogne) est renseigné par la Banque Hydro, aux stations de Tonneins et Pessac-sur-Dordogne.

Les courants de marée et la circulation résiduelle ont été analysés pour les besoins des différentes thèses et études réalisées sur l'estuaire, par des mesures ponctuelles. Des modèles numériques hydrodynamiques ont également été mis en œuvre pour différents besoins sur l'estuaire.

L'ensemble de ces données sont exploitables pour l'étude.

2.2. DONNEES SUR L'HYDROSEDIMENTAIRE

Les différents travaux universitaires réalisés dans les années 1970 et 1980 sont une source importante de connaissance globale de l'estuaire ; les travaux réalisés dans ces années sont basés sur des campagnes de mesures ponctuelles (vision géographique, morphologique, naturaliste).

Depuis 2004, la mise en place du réseau MAGEST (MArel Gironde ESTuaire), permet d'avoir une vision plus dynamique de l'estuaire, avec une mesure de la turbidité en continu, à haute fréquence.

Le réseau MAGEST mesure la qualité des eaux de surface (à 1 m) de l'estuaire de la Gironde, basé sur le déploiement initial de quatre stations de mesures automatisées MAREL :

- dans l'estuaire central : Pauillac ;
- dans la Dordogne aval : Libourne ;
- dans la Garonne aval : Bordeaux, Portets (jusqu'en 2012).

Les paramètres mesurés sont : température, salinité, turbidité et oxygène dissous, toutes les 10 minutes, et les données transférées toutes les 6 heures au laboratoire EPOC de l'Université de Bordeaux.

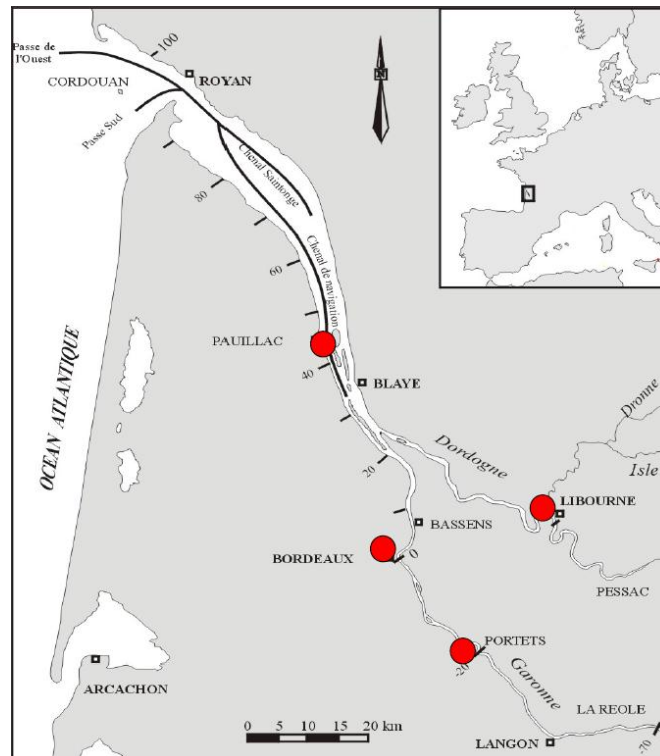


Figure 3. Localisation des stations de mesures (Etcheber et al, 2011)

Les résultats de ce réseau de mesures apportent une information essentielle sur la dynamique sédimentaire en suspension.

Plus récemment, la télédétection a fourni également des informations sur l'hydrosédimentaire de l'estuaire. Doxaran a notamment étudié la charge turbide des eaux à partir des observations satellites. Ces données permettent d'offrir une lecture à l'échelle de tout l'estuaire.

2.3. DONNEES SUR L'OXYGENE DISSOUS

Le réseau d'observation haute-fréquence MAGEST et le réseau d'observation long terme SOMLIT (Service d'Observation en Milieu Littoral) offrent respectivement :

- des mesures en O_2d toutes les 10 minutes, au niveau des 3 à 4 stations fixes ;
- des mesures en O_2d mensuelles (10 mois) au niveau des 3 stations fixes.

Les travaux du programme de recherche ETIAGE 2010-2014 (Université Bordeaux 1 et IRSTEA) traitent des aspects liés à l'oxygène dissous au niveau de Bordeaux, où sont localisés les problèmes d'hypoxie.

2.4. AUTRES DONNEES

Sans objet.

2.5. BIBLIOGRAPHIE

Cette fiche fait référence et s'appuie en particulier sur la bibliographie citée ci-dessous.

Allen P., 1972. *Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde*. Thèse. Université de Bordeaux.

Benaouda A., 2008. *Dynamique saisonnière des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Gironde : modélisation opérationnelle de la réponse aux forçages hydrodynamiques*. Thèse, Université Bordeaux I.

Castaing P., 1981. *Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde*. Mémoires de l'Institut de Géologie du bassin Aquitaine. 530 pp.

Doxaran D., Froidefond J-M., Castaing P., Babin M., 2009. *Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (The Gironde, France): observations from field and MODIS satellite data*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 81 (2009) 321-332.

Etcheber H., Schmidt S., Sottolichio A., Maneux E., Chabaud G., Escalier J-M., Wennekes H., Derriennic H., Schmeltz M., Quéméner L., Repecaud M., Woerther P., Castaing P. 2011. *Monitoring water quality in estuarine environments: lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system*.

Jouanneau J-M., Latouche C., 1981. *The Gironde Estuary*. Contributions to sedimentology n°10, 115 pp.

Lanoux A., Etcheber H., Schmidt S., Sottolichio A., Chabaud G., Richard M., Abril G., 2012. *Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France)*. Environmental Science Processes and Impacts, 2013.

Mallet C., 1998. *Etude de la dynamique des sédiments non-cohésifs de l'embouchure de la Gironde*. Thèse. Université de Bordeaux 1.

Rojas I.J., Schmidt S., Sottolichio A., 2014. *Analyse de 10 ans de mesures continues de turbidité dans les sections fluviales de l'estuaire de la Gironde : description de la dynamique des matières en suspension d'un estuaire très turbide*. Colloque MAREL. 12 et 13 juin 2014. Boulogne-sur-mer.

Rojas I.J., Schmidt S., Sottolichio A., 2015. *Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (S-W France) based on 10 year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 12, 2843–2883, 2015.

Schmidt S., Sottolichio A., 2013. *Réseau d'observation automatisée pour la surveillance de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde*. MAGEST: Rapport scientifique annuel, 2013.

Sottolichio A., Castaing P., 1999. *Synthèse de la dynamique saisonnière des structures turbides dans l'estuaire de la Gironde*. C.R. Acad. Sc. Paris, Sciences de la terre et des planètes. 1999, 329, 795-800.

3. ENTRETIENS REALISES

Afin de compléter les données disponibles, un entretien a été réalisé avec

- M. Aldo Sottolichio, enseignant-chercheur à l'Université de Bordeaux, équipe Modélisation Expérimentale et Télédétection en Hydrodynamique Sédimentaire. UMR CNRS 5805 EPOC – OASU. Université de Bordeaux. Site de Talence - Bâtiment B18. Allée Geoffroy Saint-Hilaire CS 50023. 33615 PESSAC CEDEX. Rencontré à l'Université le 8 avril 2015.

4. SYNTHÈSE DES DONNÉES – ÉTAT DES LIEUX

4.1. LEXIQUE

Bouchon vaseux : zone où la concentration en matières en suspension (MES) dans l'eau dépasse 1 g/l.

Crème de vase : dépôt de vases peu consolidé sur le fond du lit du fleuve, pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, d'une concentration comprise autour de 100 à 300 g/l.

Nitrification : nom donné à la première phase de l'élimination biologique de l'azote, réalisée notamment dans les stations d'épuration. La nitrification est une des étapes du traitement d'une eau usée qui vise la transformation de l'ammonium (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-) puis en nitrate (NO_3^-). Cette transformation est réalisée par des bactéries, en milieu aérobie. En cas de manque d'oxygène, le processus n'est que partiel.

Section mouillée : section d'un cours d'eau prise perpendiculairement à l'écoulement, sous un niveau d'eau donné.

Turbidité : propriété optique de l'eau qui fait que la lumière incidente est diffusée ou absorbée. La turbidité de l'eau vient de la présence de diverses matières en suspension (MES) telles que argiles, limon, matière organique et minérale en fines particules, plancton. L'unité de la NTU : unité de turbidité néphélogométrique.

4.2. HYDRODYNAMIQUE

L'hydrodynamique estuarienne est régie par trois phénomènes majeurs :

- les débits fluviaux, variant à l'échelle annuelle ;
- les marées, variant à l'échelle de la journée ;
- la morphologie de l'estuaire, dont l'évolution naturelle est amplifiée ou contrariée par les interventions humaines.

4.2.1. Hydrologie de l'estuaire

Les données statistiques hydrologiques sont les suivantes (source : Banque HYDRO, MAGEST...) :

- débit moyen à l'entrée du système Gironde (sur les 30 dernières années) : 950 m³/s ;
 - débit moyen à Tonneins à environ 60 km en amont de l'estuaire sur la Garonne : 600 m³/s ;
 - débit moyen à Pessac-sur-Dordogne : 254 m³/s.
- débit de crue exceptionnelle :
 - Garonne (sur les 30 dernières années) : 4 820 m³/s le 20 mars 1988 ;
 - Garonne : 5700 m³/s (maximum relevé à Tonneins en 1930) ;
 - Dordogne : 1640 m³/s (maximum relevé à Pessac-sur-Dordogne en 1998).
- débit de crue biennale :
 - Garonne : 3 400 m³/s ;
 - Dordogne : 927 m³/s.

- débit d'étiage :
 - Garonne (sur les 30 dernières années) : 93 m³/s (QMNA5 à Tonneins) ;
 - Dordogne (sur les 18 années de mesures) : 31 m³/s (QMNA5 à Pessac-sur-Dordogne).

Le rapport scientifique MAGEST 2013 présente une synthèse du contexte hydrologique entre 1959 et 2013, avec une comparaison aux données récentes acquises par le réseau.

- le système fluvio-estuarien de la Gironde (débit) présente une importante fluctuation interannuelle, marquée par une tendance générale à la diminution au cours des dernières décennies (cf. Figure 4) ;

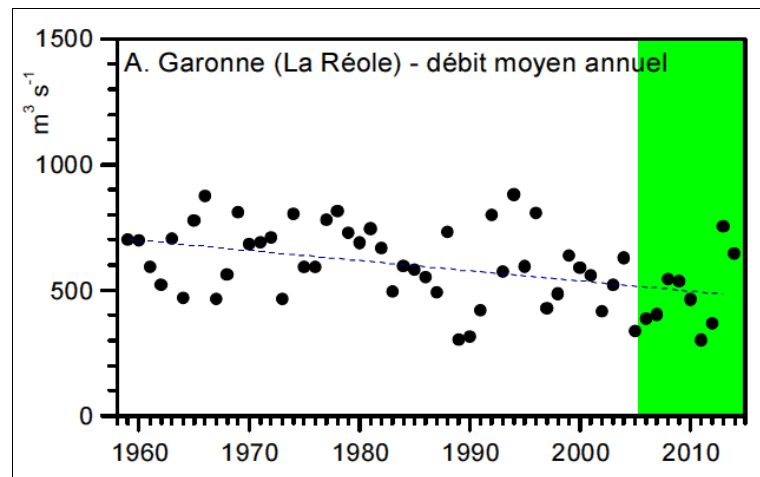


Figure 4. Débits moyens annuels depuis 1959 (source MAGEST)

- le nombre de jours de fortes crues a tendance à diminuer, et le nombre de jours d'étiage a plutôt tendance à augmenter depuis les années 1990 ;
- les années suivies par le réseau MAGEST (2005-2013) caractérisent une période plutôt sèche (cf. Figure 5), avec des débits moyens annuels en général inférieurs à la moyenne de la période 1959-2013 ;
 - 2006 : année plutôt sèche ;
 - 2008 et 2009 : débits proches de la moyenne de la période 1959-2013 ;
 - 2011 : année la plus sèche, avec un été plutôt humide ;
 - 2012 : année plutôt sèche ;
 - 2013 : année la plus humide.

Les valeurs de débits fluviaux pour la Garonne correspondent à une mesure instantanée (valeur enregistrée à 12h) ; les valeurs de débits pour la Dordogne correspondent à une mesure quotidienne. Ces valeurs nous ont été fournies par le Grand Port Maritime de Bordeaux (cf. figure suivante). Elles sont présentées par année hydrologique, d'octobre à octobre.

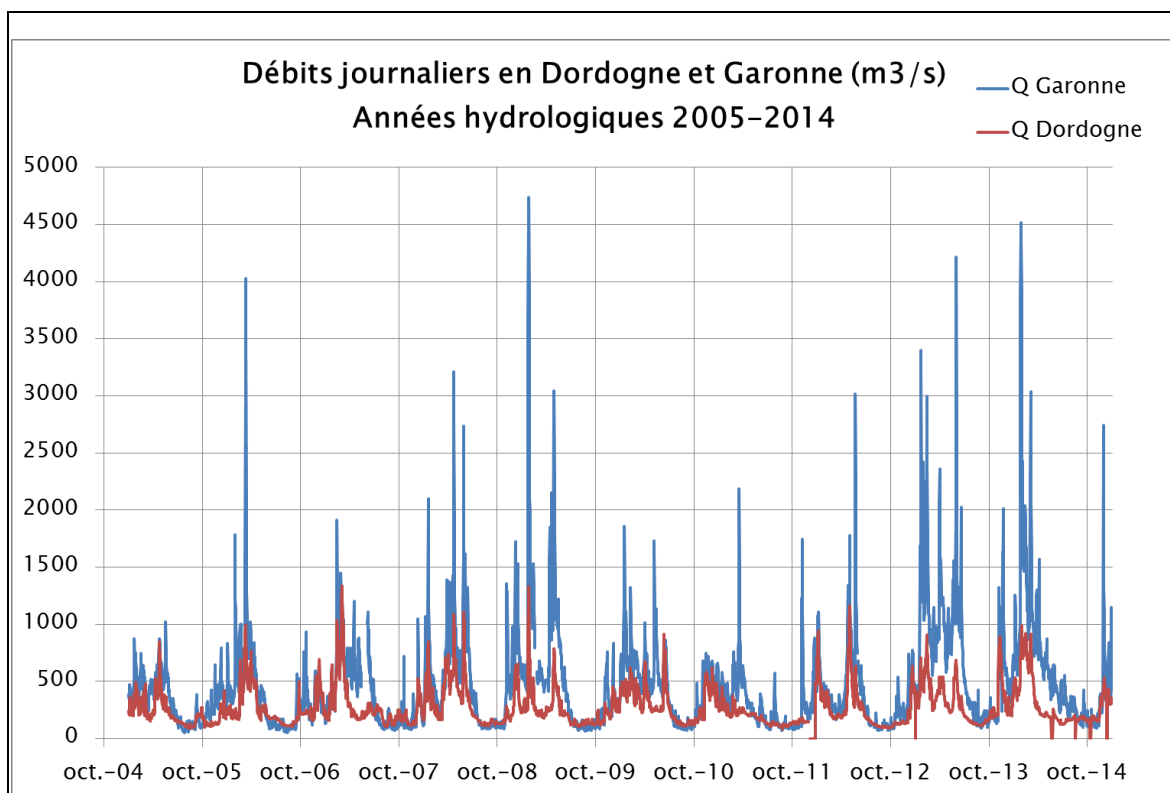
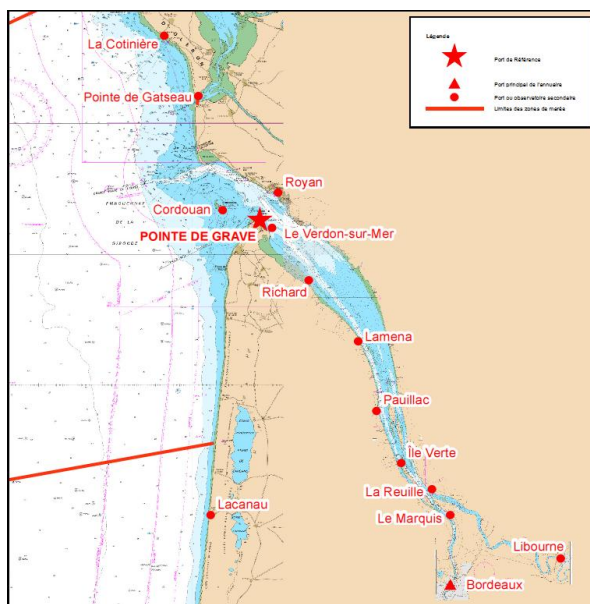


Figure 5. Débits journaliers mesurés en Dordogne et Garonne, sur la période 2005-2014 (Artelia)

4.2.2. Marée et niveaux d'eau

La marée dynamique remonte jusqu'à 70 km en amont du Bec d'Ambès. Sa limite d'influence est située à Casseuil sur la Garonne, à Castillon-la-Bataille sur la Dordogne et à Laubardemont sur l'Isle.

Les niveaux caractéristiques dans l'estuaire sont définis par le SHOM (tableau page suivante).



A l'embouchure de la Gironde, le marnage varie entre 3,30 m en morte-eau et 4,25 m en vive-eau.

Les caractéristiques de la marée en amont de l'estuaire sont le résultat de deux actions antagonistes : les frottements sur le fond et sur les rives qui tendent à diminuer l'amplitude de la marée et l'effet de convergence consécutif au rétrécissement plus ou moins progressif de l'estuaire, qui tend à faire gonfler l'onde de marée (augmentation du marnage). C'est pourquoi à Bordeaux le marnage est plus important qu'à l'embouchure : il atteint 3,80 m en morte-eau et 5,30 m en vive-eau.

Tableau 2 – Niveaux caractéristiques de la marée, en m CM (RAM, SHOM 2013)

Coefficient de marée	PHMA 120	PMVE 95	PMME 45	NM	BMME 45	BMVE 95	PBMA 120	Marnage VE	ZH/Ref
Embouchure									
Cordouan	5.75	4.95	4.05	3.03	1.95	0.80	0.09	4.15	NR
Pointe de Grave, port de référence	5.96	5.30	4.35	3.27	2.05	1.05	0.52	4.25	7.808
Gironde : ports secondaires rattachés au port de référence									
Royan	5.88	5.30	4.40	3.31	2.10	1.05	0.52	4.25	5.338
Verdon-sur-mer	6.09	5.40	4.45	3.33	2.05	1.05	0.51	4.35	7.105
Richard	5.99	5.35	4.35	3.10	1.65	0.55	0.00	4.80	3.953
Lamena	6.07	5.55	4.60	3.19	1.60	0.60	0.20	4.95	3.859
Pauillac	6.41	5.55	4.40	3.09	1.15	0.55	0.13		3.963
Ile Verte	NR	5.40	4.20	2.75	0.90	0.45	NR	4.95	NR
La Reuille	NR	5.25	4.10	2.49	0.80	0.30	NR	4.95	4.870
Garonne									
Le Marquis	NR	5.15	4.05	2.46	0.60	0.10	NR	5.05	NR
Bordeaux	NR	5.35	4.25	2.45	0.45	0.05	NR	5.30	6.112
Dordogne									
Libourne	NR	4.70	3.50	NR	0.10	0.60	NR	4.10	NR

Les niveaux fournis dans le tableau précédent sont définis par rapport au niveau de référence des cartes marines (CM) : le zéro hydrographique (ZH).

Lors de sa propagation dans l'estuaire, la marée présente un comportement asymétrique (distorsion non linéaire de l'onde), impactant sa dynamique. Ce phénomène est dû à la vitesse de la propagation de l'onde de marée qui dépend de la profondeur : la célérité est plus faible en basse mer qu'en pleine mer.

L'asymétrie de l'onde dans l'estuaire est présentée sur la [Figure 6](#) à partir des courbes de marée aux différents marégraphes présents le long de l'estuaire.

On observe un déphasage de la marée entre l'aval et l'amont :

- de 1h40 entre les niveaux de pleine mer ;
- de 3h40 entre les niveaux de basse mer (jusant qui s'allonge à Bordeaux).

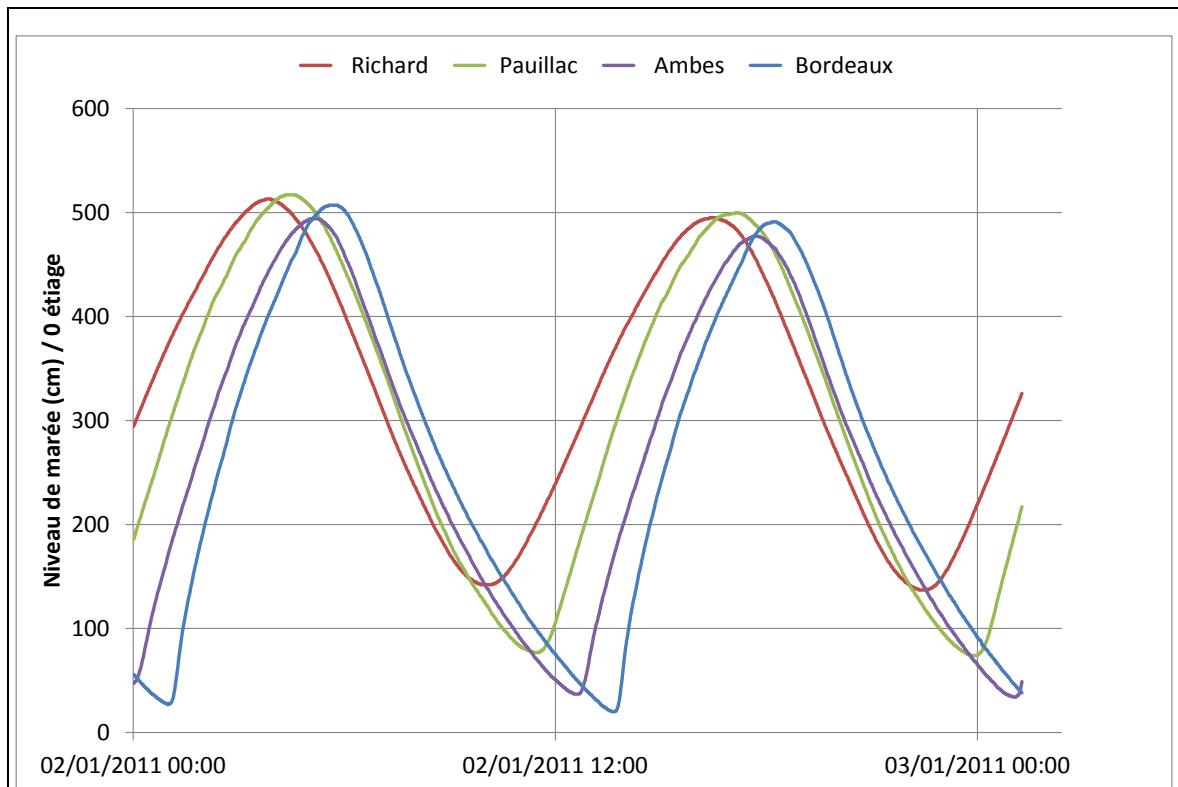


Figure 6. Courbes de marée aux marégraphes de l'estuaire (marée de vive-eau). D'après les données du GPMB. En cm / 0 étiage.

4.2.3. Volumes oscillants

La marée met en jeu des volumes d'eau oscillants considérables au niveau de la Pointe de Grave :

- 2 109 Mm³ en vive-eau correspondant à un débit moyen de 90 000 m³/s ;
- 1 109 Mm³ en morte-eau correspondant à un débit moyen de 50 000 m³/s.

Les volumes oscillants décroissent vers l'amont. A Bordeaux, ils sont voisins de 60 Mm³ en vive-eau et de 40 Mm³ en morte-eau (débits moyens respectifs de 2 600 m³/s et de 1 730 m³/s).

4.2.4. Courants de marée

Les vitesses des courants varient au cours de la marée ; ils varient également selon le coefficient de marée et en fonction du débit fluvial.

Les données présentées ici sont issues de mesures anciennes et des résultats issus du modèle mathématique développé par Sogreah en 2004 pour l'actualisation de l'annuaire des marées 2005 du Port de Bordeaux.

Par marée de vive-eau et débit moyen, les vitesses maximales dans l'estuaire et la Garonne sont atteintes au flot. Dans l'embouchure, les vitesses maximales sont atteintes au jusant.

Par fort débit fluvial, dans les cours aval de la Dordogne et de la Garonne et dans le haut estuaire, les vitesses et durées de flot diminuent, corrélativement celles de jusant augmentent. Par fortes crues (débit > 3 500 m³/s) un régime fluvial est observé : le flot ne s'établit pas et le jusant domine pendant la totalité de la marée.

Dans l'embouchure de la Gironde, les vitesses maximales des courants de marée s'observent :

- au débouché de l'estuaire dans la fosse entre la Pointe de Grave et le banc de Saint-Georges et localement dans le chenal principal au niveau de La Coubre (en jusant 1,75 à 2,00 m/s ; en flot 1,50 à 1,75 m/s) ;
- dans le chenal principal et ses abords : entre La Coubre et l'amont de la passe de l'Ouest (1,50 à 1,75 m/s en jusant ; 1,25 à 1,50 m/s en flot).

Dans l'estuaire de la Gironde, les vitesses les plus fortes sont identifiées sur les secteurs suivants :

- chenal de navigation, entre Saint-Christoly et l'aval de Pauillac ;
- chenal de navigation, entre l'amont de Pauillac et Arcins ;
- au niveau de l'île du Nord.

Les champs de courant ne sont pas étudiés davantage dans cette étape de la mission ; ils seront analysés plus finement lors de l'exploitation du modèle en cours de construction (cf. rapport technique : construction et de calage du modèle), selon les besoins spécifiques de l'étude.

4.2.5. Circulation résiduelle

L'écoulement de flot et de jusant ne sont pas égaux dans la colonne d'eau : au bout d'un cycle de marée, il y aura eu un écoulement net soit vers l'amont, soit vers l'aval, ce qu'on appelle « circulation résiduelle ».

La circulation résiduelle peut être définie comme la circulation résultante, après « filtrage » de la marée. Elle peut être approchée par la Vitesse Résiduelle Eulérienne (V_R).

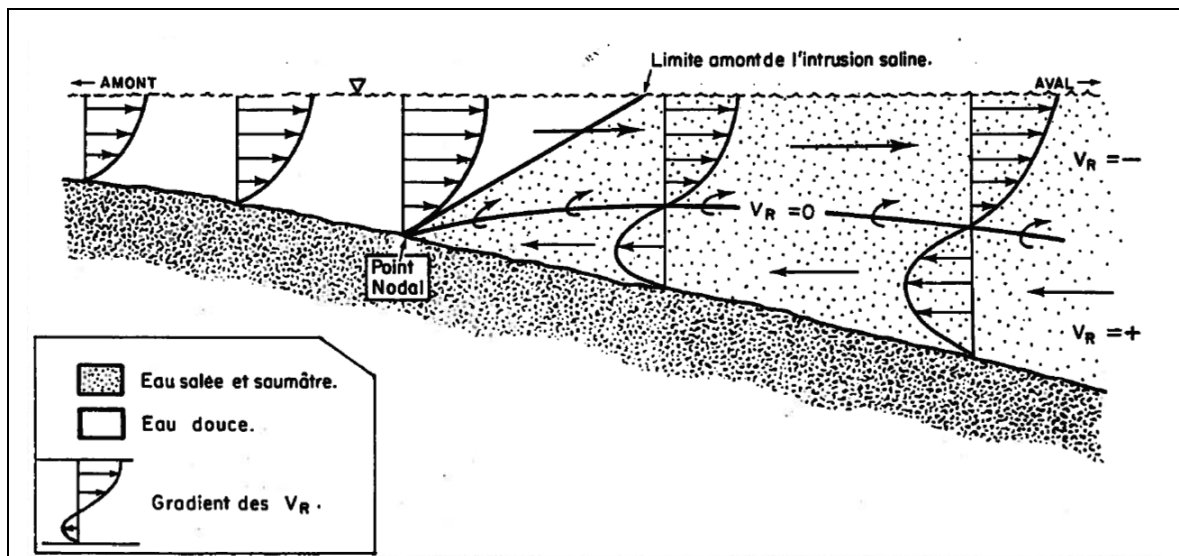


Figure 7. Schématisation théorique des vitesses résiduelles dans un estuaire (Allen, 1972).

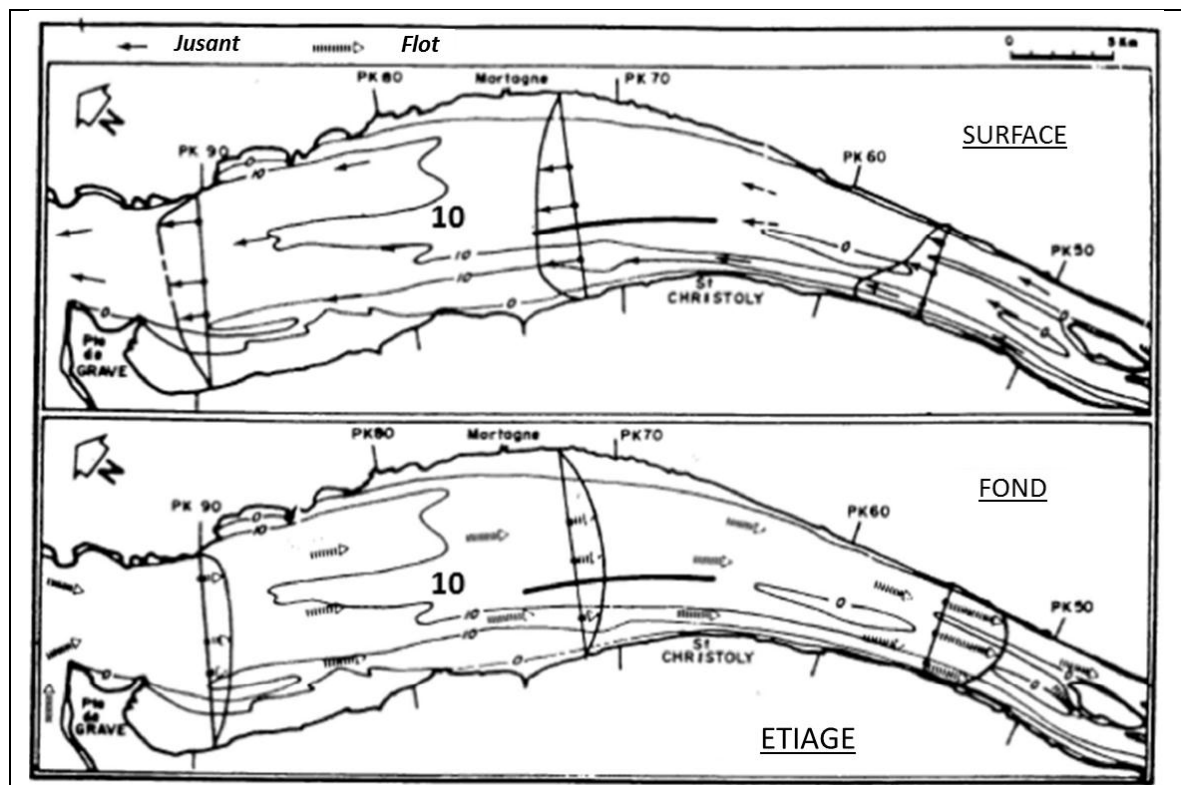
Il est intéressant d'analyser la circulation résiduelle car elle est responsable des phénomènes sédimentologiques estuariens. La formation du bouchon vaseux est en partie liée à la circulation résiduelle.

Celle-ci a été étudiée par Allen (1972) dans la partie aval de Pauillac ; il n'y a pas d'étude publiée plus récente à notre connaissance.

En période d'étiage (Figure 8, haut) et en conditions de marées moyennes, la vitesse résiduelle sur le fond est orientée vers l'amont sur tout l'estuaire (chenal et rive droite) en aval du pk 54.

En période de crue (Figure 8, bas), le front de l'intrusion saline est situé en aval du pk 54 ; en amont de ce point, la vitesse résiduelle sur le fond est orientée vers l'aval. Et en aval de ce point, la vitesse résiduelle sur le fond est orientée vers l'amont en rive gauche (chenal de navigation), et vers l'aval en rive droite.

D'une manière générale, la circulation résiduelle est complexe en aval de l'estuaire, qui devient très large, avec des écoulements canalisés à certains endroits (bancs et îles) et des écoulements qui divergent latéralement à d'autres endroits où les reliefs sont moins présents.



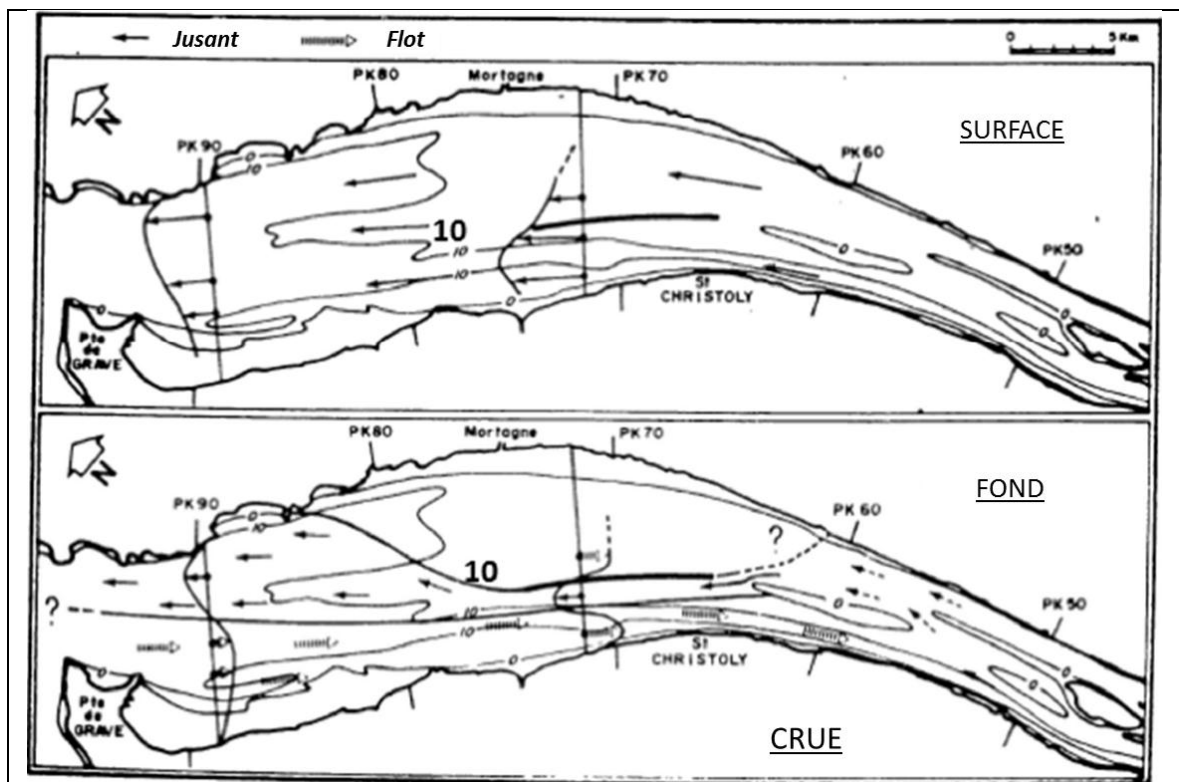


Figure 8. Circulation résiduelle. Adapté de Allen, 1972.

4.3. HYDROSEDIMENTAIRE

Les processus hydrosédimentaires dans un estuaire sont fortement liés aux courants, régis par la marée et le débit. L'influence de l'hydrologie à l'amont et l'influence du forçage de la marée à l'aval concourent à une stratification plus ou moins marquée de la masse d'eau estuarienne, influençant les processus sédimentaires.

4.3.1. Nature des sédiments superficiels

Trois principaux assemblages morpho-sédimentaires se distinguent dans l'estuaire :

- La partie fluviale en amont du Bec d'Ambès,
- L'estuaire amont et central,
- L'estuaire aval et l'embouchure.

Les deux premiers cités correspondent à des fonds vaseux ; l'estuaire aval et l'embouchure sont caractérisés à l'inverse par des fonds sableux (Figure 9).

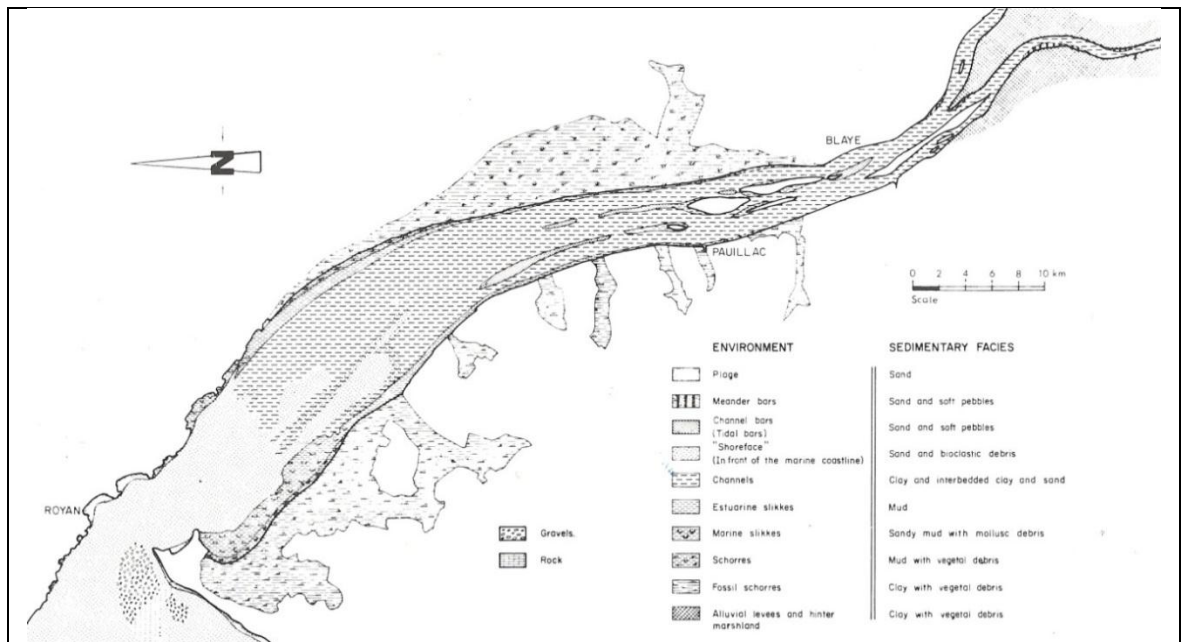


Figure 9. Faciès sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde (d'après Allen in Jouanneau et Latouche).

Mallet (1998) a établi la cartographie la plus récente des faciès sédimentaires à l'embouchure de la Gironde (Figure 10).

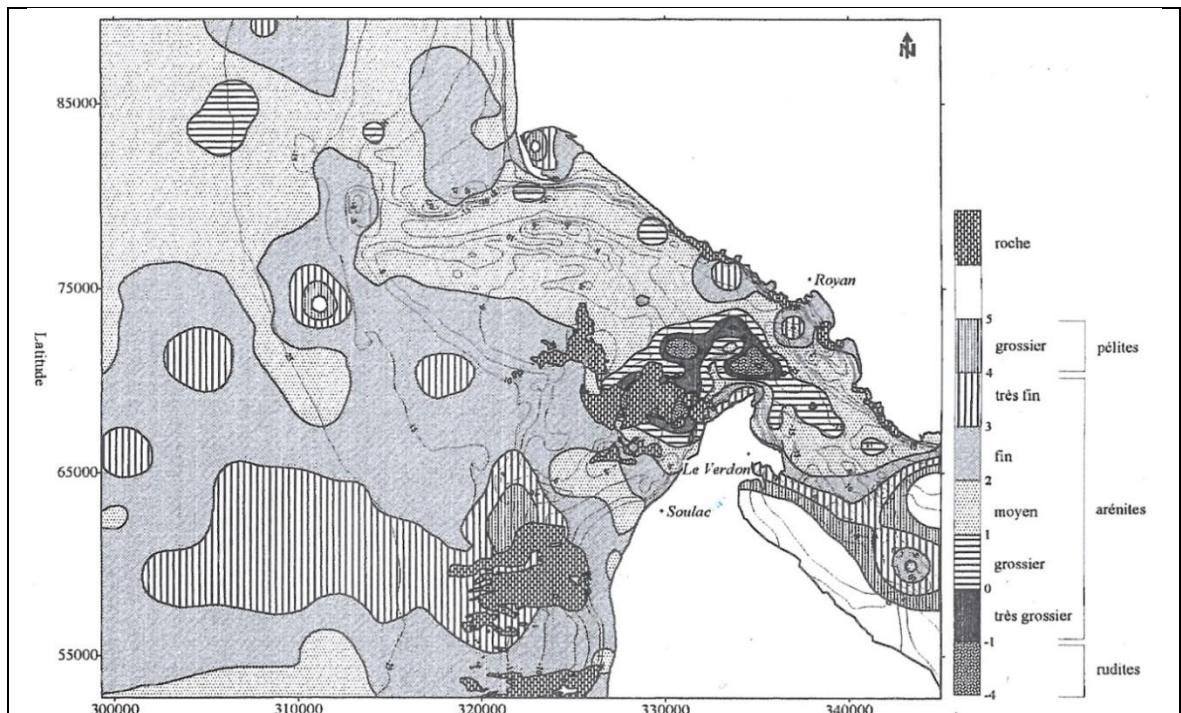


Figure 10. Répartition du grain moyen dans l'embouchure de la Gironde (unité phi). Mallet, 1998.

Les sédiments présents dans l'embouchure de la Gironde sont majoritairement sableux. Des fractions plus grossières et des graviers sont représentés localement dans certaines zones particulières.

De manière générale, les sables présentent une granulométrie moyenne sur la partie nord de l'embouchure, des sables fins à très fins sont localisés sur la partie sud, et des sables plus grossiers sont répartis en particulier autour de la Pointe de Grave et du plateau rocheux de Cordouan.

La cartographie des faciès sédimentaires dans l'estuaire n'a pas été actualisée comme a pu le faire Mallet. La cartographie générale est celle décrite par Allen (1972).

Dans la partie fluvio-estuarienne, la nature des fonds est liée aux unités morpho-sédimentaires présentes (chenaux, barres, bancs, estrans...).

Les fonds rocheux affleurent en plusieurs endroits, principalement à l'ouest du chenal de navigation :

- Entre le phare de Richard et Saint-Yzans de Médoc, et au large de Valeyrac – Port de By ;
- Au large de Laména (pk 63) et de Saint-Estèphe (pk 55) ;
- Au niveau de Cussac et de Saint-Julien Beychevelle (pk 36 à pk 43).

De l'argile compacte (formation ancienne) affleure dans le chenal de navigation uniquement au niveau de la passe de Beychevelle.

Dans la partie fluviale de l'estuaire, les barres de méandres sont des zones d'accumulation des sables qui transitent lors des crues.

Du Bec d'Ambès jusqu'au pk 70, des faciès sableux sont présents dans les zones proches des bancs. Les sables constituant les bancs et les barres sont généralement unimodaux, de taille moyenne 200-500 µm et bien triés.

Entre le pk 60 et 70, on observe un affinement du grain moyen vers l'aval, suivi d'une augmentation de la taille moyenne des sables vers l'aval.

Entre les pk 70 et 80, les bancs sableux sont plus rares. Au-delà du pk 80, les sables couvrent la totalité des fonds et les plus grossiers occupent le fond des chenaux.

Les vases constituent, en amont du pk 80, les fonds du système estuarien. Apportées par les régimes fluviaux, elles se déposent dans les chenaux et sur les estrans vaseux (slikke).

Dans la partie amont de l'estuaire, les slikkes encore peu étendues sont constituées par les matériaux vaseux décantés vers la pleine-mer formant une succession de couches très régulières, localement interrompues par des niveaux sableux.

A partir du pk 70, les slikkes ont un caractère plus marin, marqués par la présence de nombreuses lentilles de sables et de débris coquilliers.

L'étude granulométrique des vases de l'estuaire de la Gironde réalisée par le Port de Bordeaux en 1984 fournit les caractéristiques suivantes :

- Diamètre médian (D50) : 4-5 µm
- Argiles et silts fins : 54-58%
- Silts moyens et grossiers : 41-44%
- Sables : 1-2%.

Toujours d'après cette même étude, la crème de vase est constituée par une proportion plus importante d'éléments fins que dans la vase :

- Diamètre médian (D50) : 1.5 μm
- Argiles et silts fins : 76%
- Silts moyens et grossiers : 24%
- Sables : 0%.

4.3.2. Importance des apports amont sables-vases

Les apports fluviaux en sédiments dans l'estuaire de la Gironde ont été évalués :

- par Migniot (1969) entre 1,5 et 3,0 millions de tonnes par an ;
- par Castaing (1981) à environ 2,0 millions de tonnes par an lors d'une année sèche (*in* Doxaran et al, 2009) ;
- par Schäfer (2002) à environ 3,2 millions de tonnes par an lors d'une année humide (*in* Doxaran et al, 2009).

Les apports de sables par le bassin versant seraient de l'ordre de 500 à 600 000 m^3 par an.

Les sédiments fins transportés en suspension dans l'estuaire sont des argiles (granulométrie inférieure à 2 microns) et silts (granulométrie inférieure à 20 microns).

4.3.3. Système bouchon vaseux – crème de vase

4.3.3.1. Description générale

Le système « bouchon vaseux – crème de vase » est constitué par le bouchon vaseux (zone où la concentration en matières en suspension (MES) dépasse 1 g/l, soit environ 1000 NTU), qui peut se déposer au fond du lit et former alors de la crème de vase (matière fine déposée au fond du lit et facilement mobilisable, concentrations de l'ordre de 100 à 300 g/l) quand la courantologie faiblit.

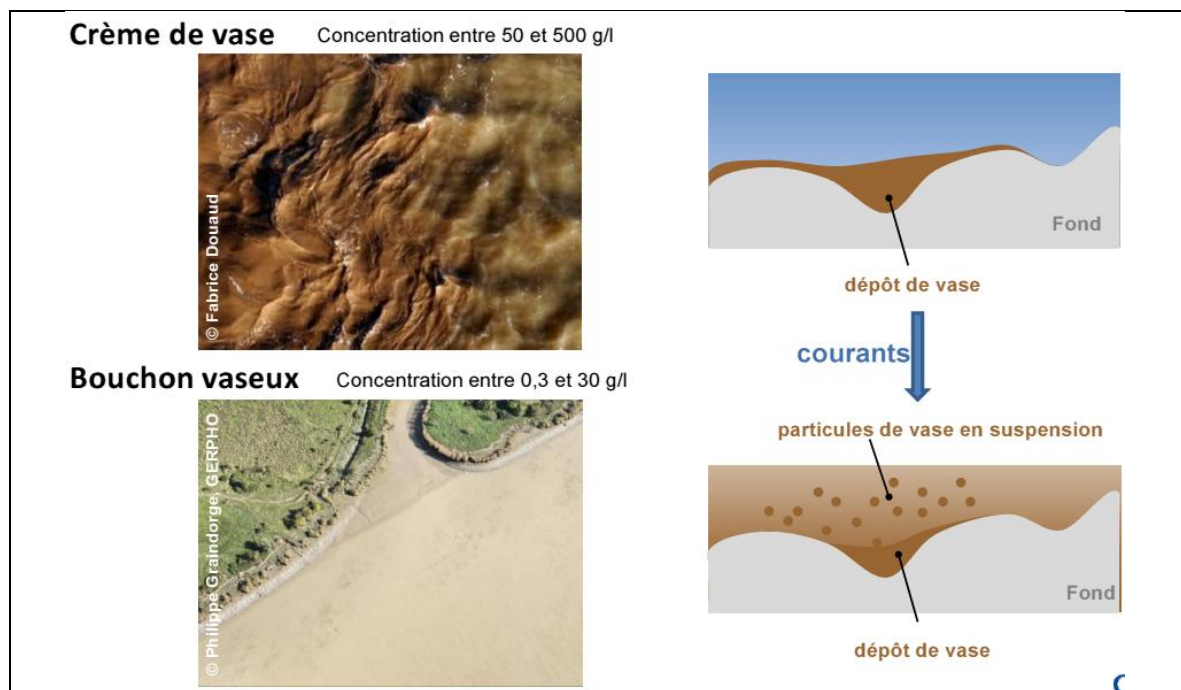


Figure 11. Illustration des phénomènes de bouchon vaseux et crème de vase. GIP Loire Estuaire.

Benaouda (2008) explique plus précisément les processus dynamiques qui contrôlent les interactions bouchon vaseux – crème de vase :

Au début des mortes-eaux, la crème de vase se forme par la décantation du noyau du bouchon vaseux. Cette décantation est extrêmement rapide aux étales par réduction de la turbulence, qui augmente la vitesse de chute des particules. Selon Winterwerp et al. (2001), c'est la suppression de la turbulence par une saturation de la colonne d'eau en fortes concentrations qui est responsable de l'accumulation rapide de crème de vase.

Les particules déposées forment des lits de vase dont l'épaisseur peut atteindre de 2 à 3 mètres. Ces lits de vase sont suffisamment denses et visqueux pour résister aux courants de mortes-eaux. Au cours du revif, la vase se fragmente, sous l'influence des courants, en plusieurs lentilles. Celles-ci se déplacent alors avec le bouchon vaseux sous l'effet de la marée. A partir d'une certaine intensité du courant, la vase est en partie remise en suspension et contribue à l'augmentation de la concentration du bouchon vaseux. Cependant, une autre partie est assez compacte pour se maintenir au fond. Le développement du bouchon vaseux et de la crème de vase suivent un cheminement inverse. Ainsi, en mortes-eaux, le volume de crème de vase atteint son maximum, alors que le bouchon vaseux est restreint au minimum. En vives-eaux, c'est l'inverse qui se produit.

La position et l'extension du bouchon vaseux dépend des débits fluviaux et des cycles de marée.

Le bouchon vaseux (MES) évolue selon différentes échelles de temps, comme le montrent les graphiques suivants :

- échelle de la marée, sous l'influence des courants de flot et de jusant ;
- échelle d'un cycle mensuel de vives-eaux – mortes-eaux, sous l'influence des volumes oscillants ;
- échelle saisonnière, sous l'influence des débits fluviaux.

Les cycles de marée ont une influence dominante sur les concentrations en MES (variations mensuelles de 1 à 10 jusqu'à 1 à 50) alors que les débits fluviaux contrôlent principalement la position du bouchon vaseux dans le système Gironde-Garonne-Dordogne ; les variations de MES sont plus faibles, 1 à 5 (Doxaran et al, 2009).

Ces différents points sont détaillés ci-après.

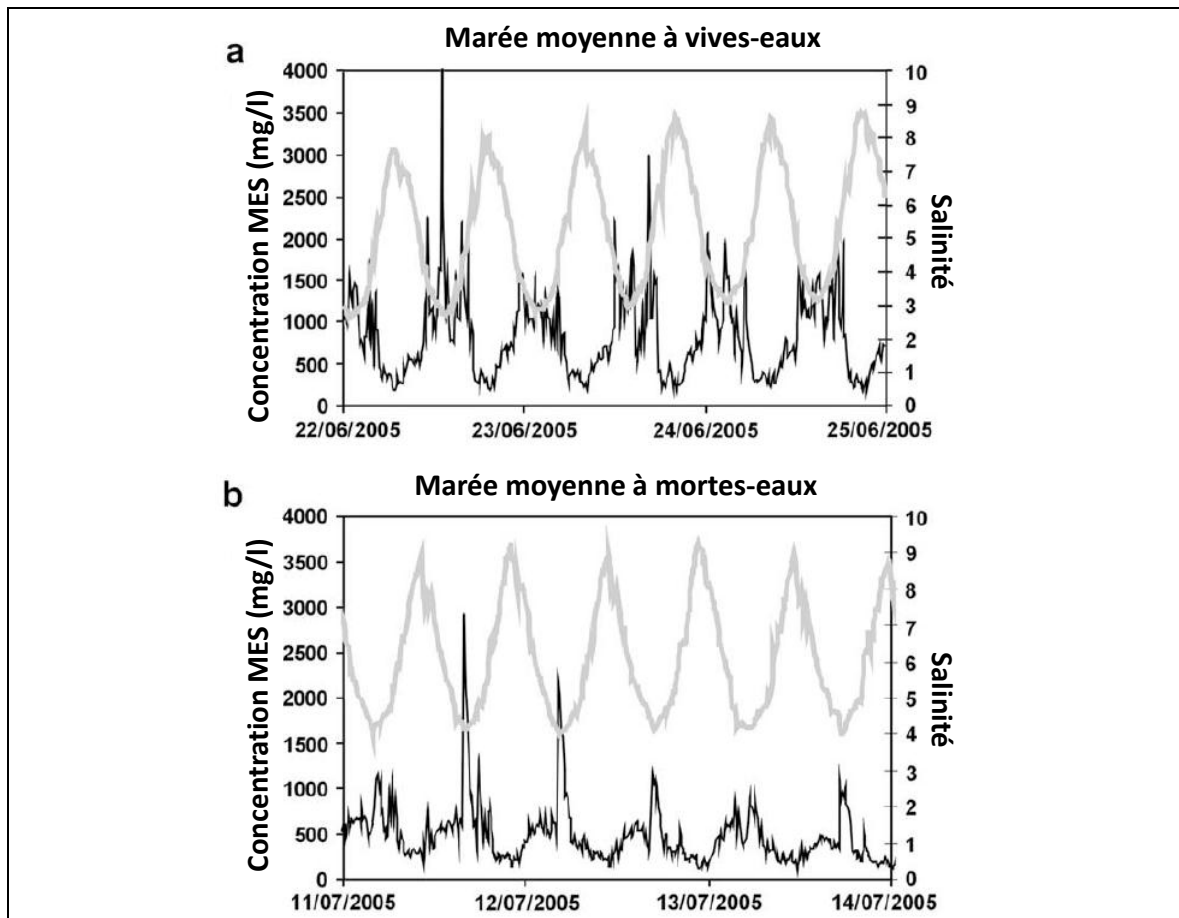


Figure 12. MES et salinité mesurés à la station MAREL de Pauillac en juin 2005. Adapté de Doxaran et al, 2009.

4.3.3.2. Evolution à court terme

- A Bordeaux

En période d'étiage, le bouchon vaseux est présent sur le secteur de Bordeaux. La station MAGEST située à Bordeaux permet de suivre les évolutions temporelles, à court terme, des concentrations en MES.

En période de basses eaux, les capteurs de mesure optique saturent, ce qui signifie que la concentration en MES est supérieure à 6 g/l. Cette très forte concentration est observée plusieurs heures par marée. Au cours de la marée, ces concentrations sont observées autour de la mi-marée, lorsque les courants de marée sont les plus forts.

A l'inverse, autour de l'étalement de pleine mer (faibles courants), les concentrations sont généralement inférieures à 1 g/l.

Ces variations, à l'échelle d'une marée, témoignent des processus court-termes, de dépôt et resuspension, au gré des courants de marée

- Augmentation des courants de marée : mise en suspension des sédiments et augmentation de la turbidité
- Réduction des courants de marée : sédimentation des MES et baisse de la turbidité.

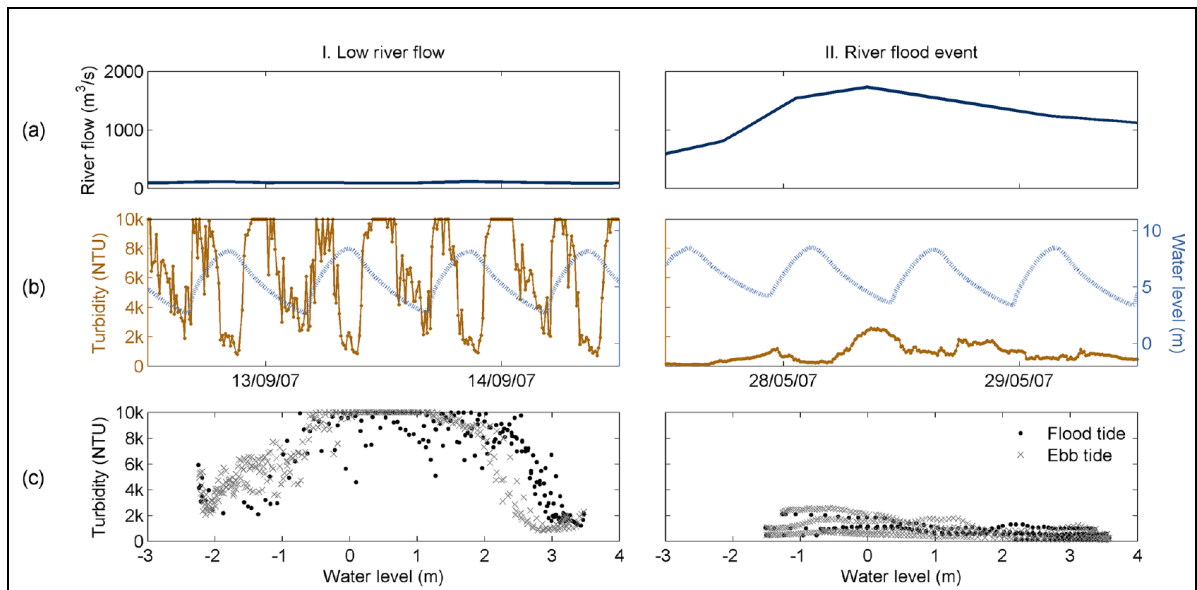


Figure 13. Turbidité mesurée à Bordeaux sur 48h, dans 2 situations hydrologiques : à gauche, étiage et à droite, crue. (a) débit (b) turbidité et niveau d'eau (c) turbidité en fonction du niveau d'eau (Jalon Rojas et al., 2014).

En période de crue (ici débit de la Garonne entre 1000 – 1500 m³/s), la turbidité est plus faible qu'en période d'étiage ; elle reste généralement inférieure à 2000 NTU. La dynamique à l'échelle de la marée est différente : à marée montante, les courants de marée s'opposent au courant fluvial, et les concentrations en MES sont plus faibles.

4.3.3.3. Effet des marées

Allen (1972) précise l'influence des marées sur l'extension latérale du bouchon vaseux :

- en marées moyennes et en mortes-eaux, le bouchon vaseux est essentiellement concentré dans le chenal de navigation ;
- en vives-eaux, le bouchon vaseux « s'étale » essentiellement vers la rive droite, en suivant les gradients de dessalure et les trajectoires de la circulation résiduelle.

4.3.3.4. Effet des crues et origine des MES en période de crue

L'apport de sédiments depuis l'amont (rivière Garonne) en période de crue est étudié à partir des données MAGEST. Les apports de l'amont sont identifiés et distingués des resuspensions locales à partir d'une analyse particulière¹.

D'après l'article de Jalon-Rojas et al, 2015, les années 2008 et 2009 ont été caractérisées par des crues assez marquées ; l'analyse des enregistrements de turbidité permet de conclure que les pics de turbidité sont associés à des apports amont et non à des resuspensions de dépôts locaux, ce qui signifie également qu'il n'y a plus de dépôt locaux de vases dans le secteur de Bordeaux dès le début des hivers 2008 et 2009.

Au contraire, les années 2007 et 2012 sont des années sans crue marquée. L'analyse des enregistrements de turbidité montre que les pics de turbidité sont associés à une mise en suspension de dépôts de vases locaux, toujours présents au cours des hivers et du printemps. Ce

¹ patrons d'hystérésis positive ou négative.

n'est qu'au mois de mai de ces années « sèches » que les dépôts sont totalement évacués de Bordeaux.

Les crues ont donc pour effet dominant d'expulser les dépôts de vases vers l'aval de l'estuaire, et non d'alimenter le bouchon vaseux.

4.3.3.5. Evolution à moyen terme, échelle saisonnière

L'acquisition des données sur une période de 10 ans a permis d'analyser la dynamique temporelle à l'échelle des cycles de marée (vives-eaux – mortes-eaux) et en fonction de l'hydrologie (influence saisonnière).

En amont de l'estuaire (Portets, Libourne et Bordeaux), les turbidités maximales sont enregistrées au cours des vives-eaux (plus forts courants). Les valeurs les plus élevées sont notées en période de basses-eaux, généralement entre juillet et novembre. La turbidité est minimale au printemps, après les crues.

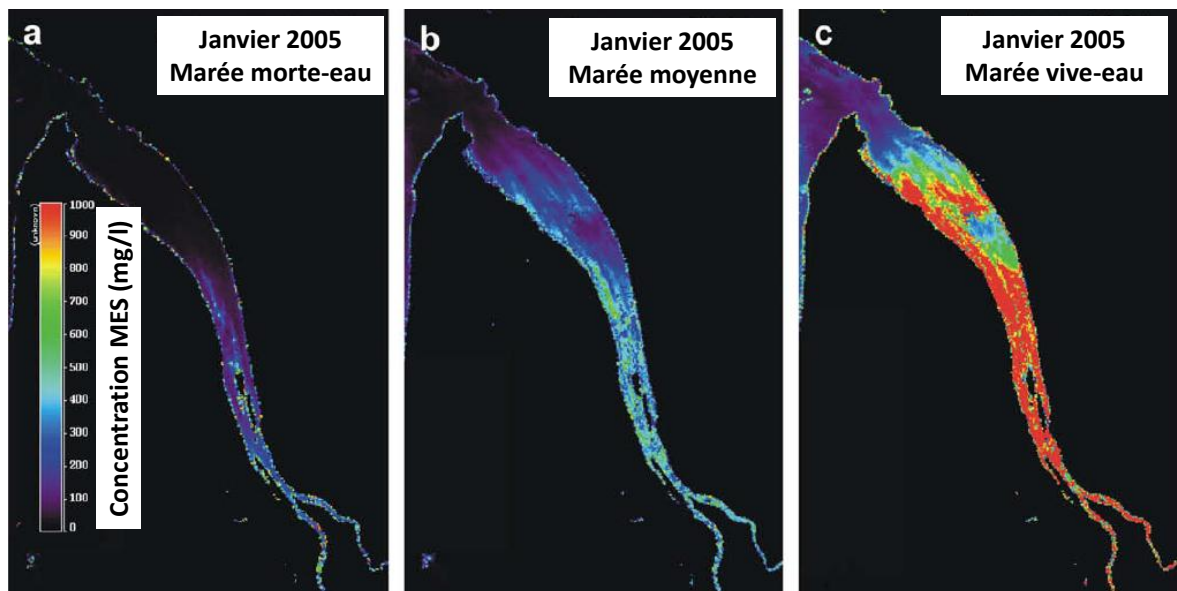


Figure 14. MES en janvier 2005 d'après données satellite MODIS Terra and Aqua. Adapté de Doxaran et al, 2009. Débit moyen : ~790 m³/s

Plus en aval (Pauillac), les évolutions saisonnières sont moins marquées (bouchon vaseux toujours présent) et suivent une tendance inverse à celles en amont.

La Figure 15 synthétise les caractéristiques principales de la turbidité, en comparant les quatre stations de l'estuaire, en relation avec l'influence de la marée et l'influence de l'hydrologie.

On note en amont les fortes variations saisonnières, moins nettes à l'aval (Pauillac).

Les valeurs de turbidité sont les plus élevées en été à Bordeaux et Libourne ; elles sont les plus élevées en hiver à Pauillac.

Les variations en fonction des marées (influence des courants de marée) sont notables sur tout l'estuaire.

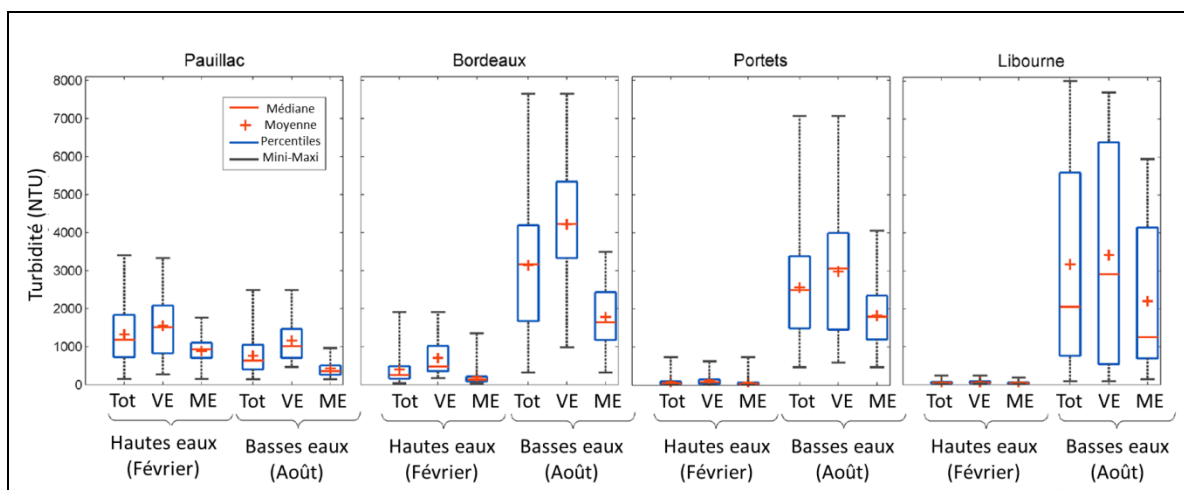


Figure 15. Synthèse des 10 années de mesures, au niveau des 4 stations MAGEST. En fonction de l'hydrologie (hautes et basses eaux) et du marnage (vives-eaux et basses-eaux). Jalón Rojas et al, 2014.

4.3.3.6. Evolutions sur le long-terme, interannuelles

Les 10 années de mesures ont permis de mettre en évidence des disparités interannuelles. Les stations amont sont fortement influencées par le débit fluvial (années sèches – années humides).

A Bordeaux, le bouchon vaseux est présent entre 3 et 8 mois par an (variable en fonction de l'hydrologie).

A Libourne, le bouchon vaseux est présent entre 1 et 5 mois par an ; il n'est pas systématiquement présent en été.

Le bouchon vaseux, présent l'été, peut toutefois être présent en hiver, lors d'hivers secs, comme ce fut le cas en 2012.

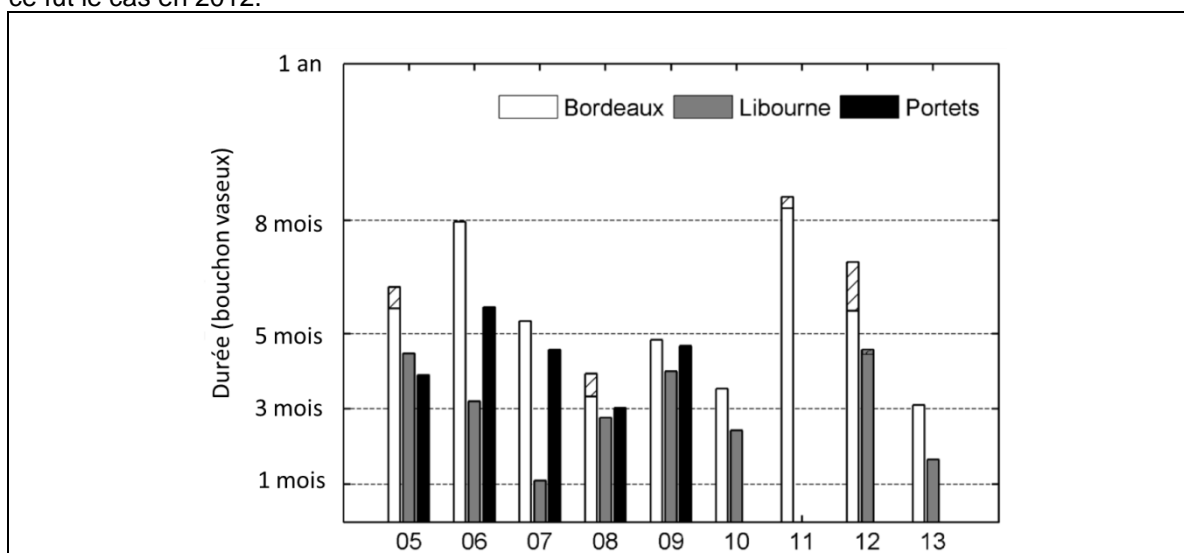


Figure 16. Durée de présence du bouchon vaseux, par année, au niveau des 3 stations de mesures amont. Les hachures représentent la durée en période hivernale. Jalón Rojas et al., 2014

4.3.3.7. Masses de sédiments en jeu

Migniot (1969) a estimé la masse du bouchon vaseux entre 2,5 et 4,0 millions de tonnes de sédiments fins en période de vives-eaux.

Le stock total de sédiments fins mobiles a été estimé (en 1977) à 5 millions de tonnes.

Jouanneau (1979) donne une estimation beaucoup plus précise à partir des mesures de turbidité, dans l'eau et dans la crème de vase : entre 1,7 et 2,3 millions pour le bouchon vaseux et entre 2,5 et 3,0 millions de tonnes pour la crème de vase. La masse totale du système est comprise entre 4,2 et 5,3 millions de tonnes. Ces estimations ont été effectuées en mortes-eaux ou marées moyennes, et pendant une période où le bouchon vaseux se situait au milieu de l'estuaire à débit moyen. Néanmoins, Jouanneau suppose que ces valeurs sont valables en période de crue ou d'étiage.

4.3.4. Zones en sédimentation sur le court/moyen terme

Il y a eu peu, voir pas de travaux consacrés spécifiquement à la sédimentation « naturelle » de l'estuaire : chenal de navigation, chenaux latéraux secondaires, slikkes...

Allen semble avoir été le précurseur dans l'étude de la crème, au niveau du chenal de navigation et des fosses. Les campagnes qu'il a réalisées, notamment en amont de l'estuaire, ont montré une évolution lithologique des fonds, avec des fonds vaseux en période d'étiage et des fonds sableux en période de gros débit fluviaux.

En Loire, une étude a été consacrée aux dépôts de vases superficiels. Pour cela, 200 bandes de levés bi-fréquence (1997-2007) du Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire ont été analysées afin de localiser les zones de dépôts dans l'estuaire, et d'analyser les évolutions spatio-temporelles des masses de dépôts. Ce type d'étude n'a jamais été entrepris dans l'estuaire de la Gironde, en-dehors du travail réalisé par Sottolichio et Castaing, dans la zone exclusive du chenal de navigation (cf. paragraphe suivant).

La connaissance des zones de dépôts sédimentaires est fondamentale pour l'élaboration du plan de gestion des sédiments de dragage. Dans le cadre de scénarios de dragage et de gestion des sédiments permettant une amélioration des pratiques actuelles de dragage, il apparaît primordial de mieux connaître la dynamique de ces dépôts.

A défaut d'une analyse / étude générale sur l'estuaire de la Gironde, nous pourrions exploiter quelques résultats issus des travaux de recherche de Benaouda (2005), basés sur l'exploitation du modèle de transport SiAM (Ifremer-EPOC).

Il faut rappeler l'objectif de la thèse de Benaouda : au travers de l'utilisation du modèle SIAM-3D, proposer une meilleure compréhension des dynamiques sédimentaire et saline. L'approche adoptée par Benaouda consiste à étudier l'impact du débit, de l'évolution de la bathymétrie des fleuves et des modifications des paramètres hydro-sédimentaires, sur ces dynamiques. Des cartographies de dépôts sédimentaires résultent de ce travail. Celles-ci pourront être récupérées par la suite de l'étude auprès d'Aldo Sottolichio.

4.3.5. Effet de l'hydrosédimentaire sur la sédimentation portuaire

Sottolichio et Castaing ont analysé la dynamique des structures turbides de l'estuaire (bouchon vaseux et crème de vase), en lien avec les dépôts récents (vases fraîches) dans les accès portuaires.

A partir de mesures de MES réalisées entre 1984 et 1994, les chercheurs ont identifiés deux zones maximales de turbidité (Figure 17) :

- L'une située entre les pk 50 et 60, caractérisée par la présence d'une zone de turbidité maximale stationnaire, en rive gauche, au-dessus du chenal de navigation. Les concentrations en MES sont élevées et peu sensibles au débit fluvial ;
- L'autre, plus en amont sur l'estuaire (entre pk 10 et 30), très sensible au débit fluvial, témoignant de la dynamique du bouchon vaseux.

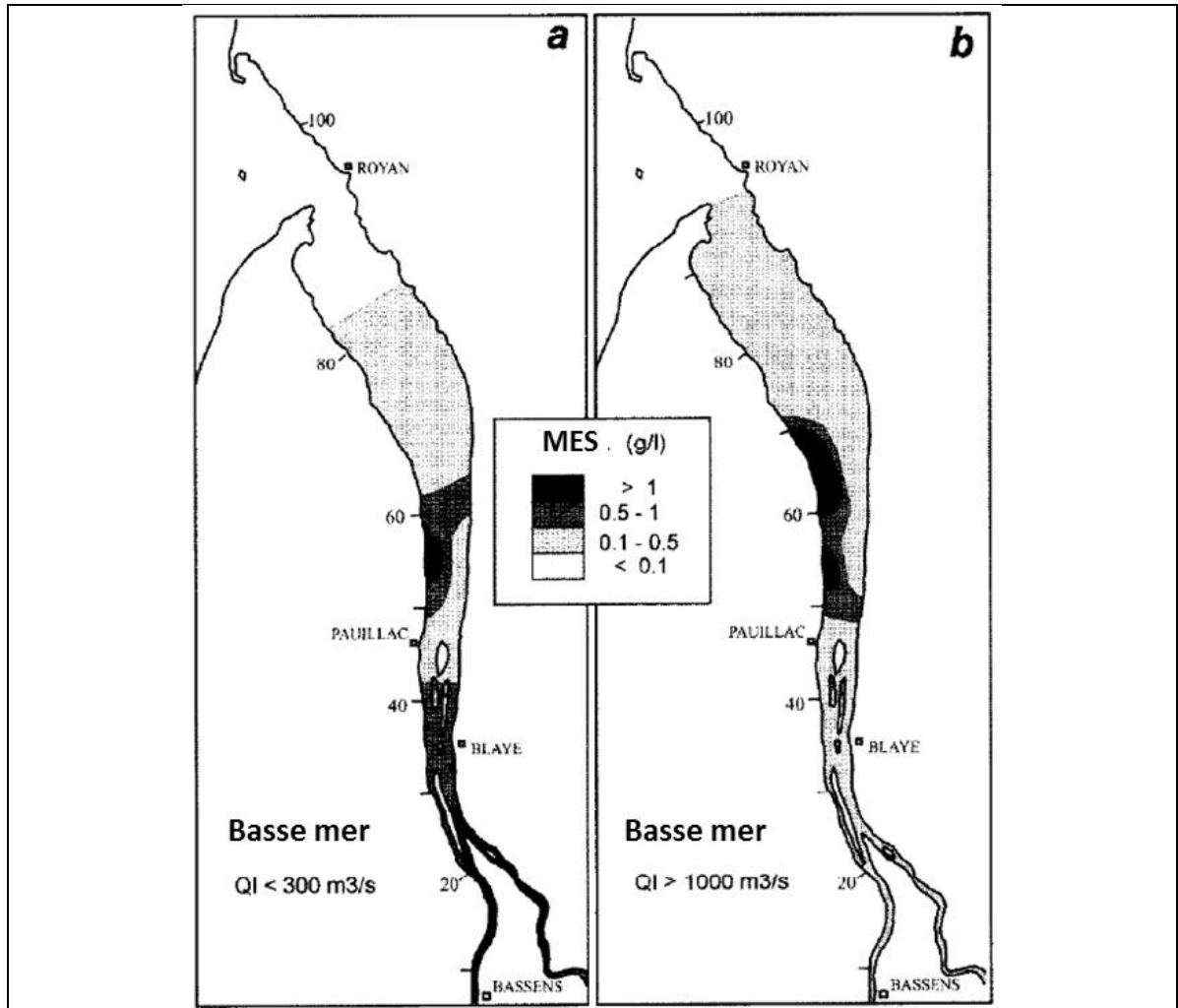


Figure 17. Répartition spatiale des MES de surface mesurées à basse mer, à faible débit et débit de crue. D'après Sottolichio et Castaing, 1999.

L'analyse comparative avec la dynamique de la crème de vase a été réalisée par Sottolichio et Castaing à partir des bandes de sondes du GPMB, entre 1983 et 1988. Leurs conclusions sont les suivantes :

- La localisation des dépôts de vases fraîches sur les fonds est sensiblement liée au débit fluvial, lorsque les dépôts sont associés aux zones de turbidité maximale qui concentrent d'importantes quantités de MES ;
- Les dépôts sont clairement identifiés en amont de l'estuaire, lors de l'étiage, lorsque le bouchon vaseux est présent ; inversement pour l'aval de l'estuaire, où les dépôts se forment lors que le débit augmente et que le bouchon vaseux se déplace vers l'aval.

En complément de ces observations et corrélation entre présence du bouchon vaseux et dépôt, Sottolichio et Castaing ont identifié des zones préférentielles de dépôt qui ne sont pas à l'existence des zones de turbidité maximale :

- Pk 17-18,
- Pk 28-30,
- Pk 45,
- Pk 67-76.

Sottolichio et Castaing ont observé que ces secteurs correspondent à des zones d'augmentation de la section mouillée du chenal (Figure 18). Tout comme les zones d'approfondissement, ces zones sont des secteurs privilégiés d'accumulation sédimentaire (influence de la géométrie du chenal sur la dynamique de dépôt des vases).

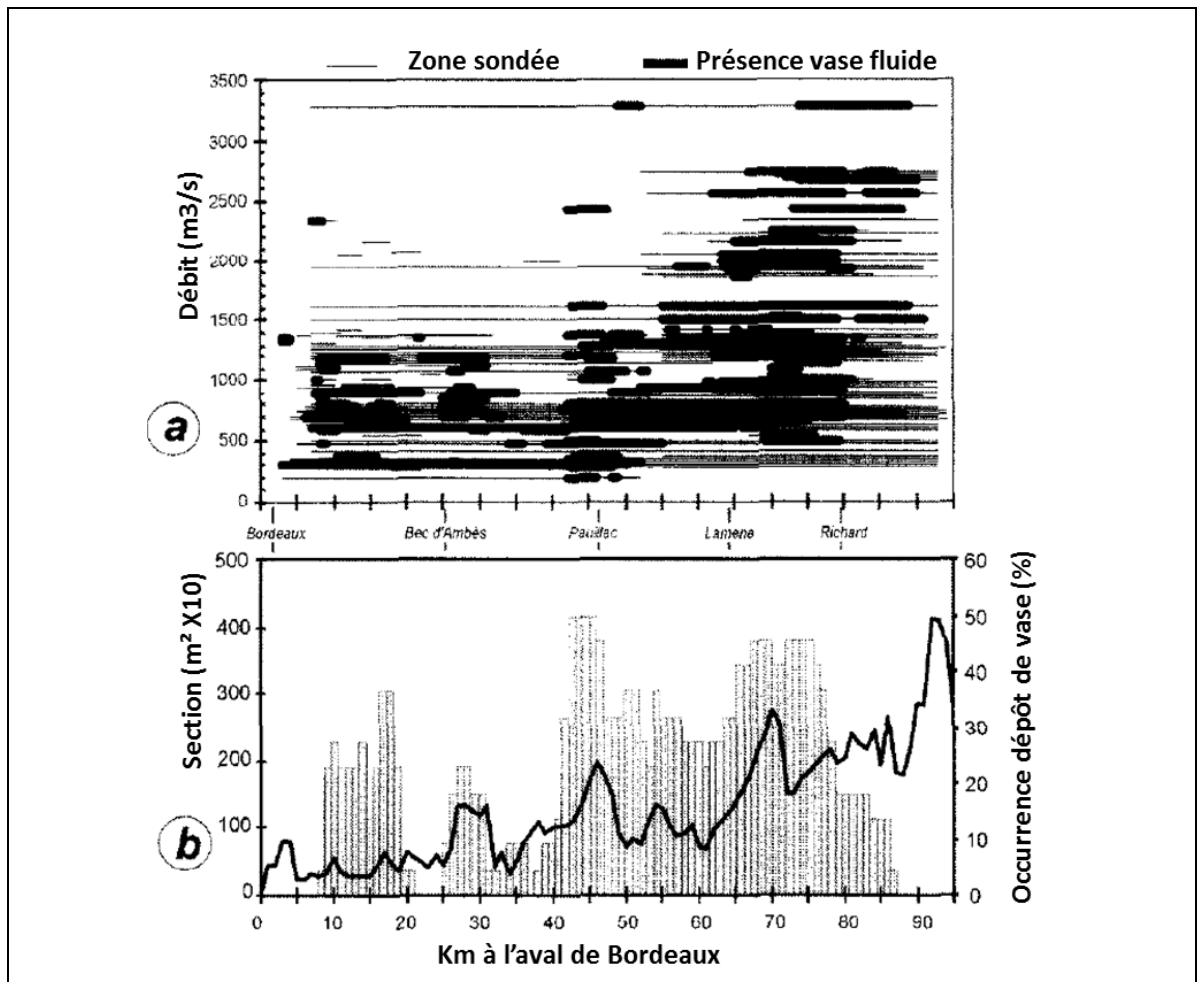


Figure 18. Répartition spatiale de la crème de vase dans le chenal de navigation (a) et occurrence des dépôt vaseux en relation avec la section mouillée. D'après Sottolichio et Castaing, 1999.

Ainsi, la sédimentation vaseuse dans les accès portuaires n'est pas uniquement due au dépôt des sédiments fins transportés en suspension, dans le bouchon vaseux ; la géométrie du chenal (sections singulières plus larges) favorise également le dépôt des sédiments fins.

Dans les conditions hydrauliques favorables au dépôt (calme hydrodynamisme lors de la reverse des courants et en période de mortes-eaux) et en présence du bouchon vaseux (source de quantités importantes de matières), la hauteur de dépôt (crème de vase) peut atteindre plus de 0,6 m en 2,5 heures.

La vase fraîchement déposée se consolide rapidement. La concentration de la crème de vase augmente avec la profondeur ; les différentes couches qui se superposent présentent des densités différentes.

Lorsque l'hydrodynamisme remonte (courants plus forts), les couches les moins denses sont déplacées voire remises en suspension ; les couches les plus consolidées sont résistantes à l'érosion et restent en place. La vase non remaniée par les courants entraîne progressivement un exhaussement des fonds qui nécessitent alors un entretien par dragages.

Une moindre partie de la sédimentation dans les accès nautiques est consécutive à des apports sableux, en provenance des bancs vers les chenaux. Les sables dans l'estuaire sont stockés sous forme de bancs sableux. Selon l'hydrodynamisme et notamment les débits, les bancs ou barres sableuses observent des phases d'érosion et des phases d'accrétion.

Des évolutions notables sont observées au niveau des bancs du Pâté et de Saint-Estèphe ; la translation de ces bancs vers le chenal de navigation est responsable des apports sableux vers les passes de Cussac et de Laména. Cette situation conduit au dragage de 300 000 m³ /an de sables sur la passe de Cussac.

4.3.6. Corrélations entre hydrosédimentaire et dragages

Nous avons cherché à mettre en relation les volumes dragués sur le secteur de la Garonne avec le débit de la Garonne ; les hypothèses sont les suivantes :

- Au cours des années humides (2008 et 2009), le bouchon vaseux est peu présent sur l'amont et les dépôts sont évacués par les crues ; les volumes dragués sur l'amont seraient alors plus faibles ;
- Lors d'années sèches, le bouchon vaseux est présent longtemps en amont sur la Garonne, et les dépôts sont plus importants ; les volumes dragués seraient alors plus élevés que lors des années sèches.

Pour cela nous avons croisé les données de débit sur la Garonne et les volumes dragués au niveau des passes et accès de la Garonne.

Aucune corrélation significative entre débits et volumes dragués n'a été mise en évidence ; nous n'avons pas pu vérifier les hypothèses émises précédemment.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette absence de corrélation :

La succession d'années sèches a conduit à une sédimentation importante sur certains secteurs, contraignant le GPMB à des efforts de dragage supérieurs à ce qu'il peut produire, à mobiliser des moyens de dragage supplémentaires. Le GPMB a géré la situation, en fonction de la disponibilité des moyens de dragage et des chantiers urgents à réaliser pour assurer la sécurité de la navigation.

Si débits et dépôts sont corrélés, dépôts et dragages ne le sont pas systématiquement.

4.4. OXYGENE DISSOUS

4.4.1. Généralités

L'oxygène dissous (O₂) dans l'eau est indispensable à la vie de la faune et de la flore aquatiques. Sa concentration dépend d'une part de la température et de la salinité de l'eau et d'autre part de l'équilibre entre production et consommation. La production est favorisée par la photosynthèse (faible dans l'estuaire), mais surtout par l'aération, stimulée par le renouvellement de l'eau et par l'agitation qui favorisent les échanges gazeux de surface. La consommation est liée à la dégradation de la matière organique particulaire (abondante dans le bouchon vaseux) ou dissoute.

Cinq seuils sont définis, en deçà desquels les impacts sont croissants sur les poissons ; organismes aquatiques les plus sensibles (figure suivante).

La zone d'hypoxie est la zone où la concentration en oxygène dissous descend en-deçà de 5 mg/l.

	Concentration en O ₂	Impact sur les poissons
Seuil sensible hypoxie	plus de 5 mg/l	Absence d'effets à long terme. Passage de l'ensemble des espèces migratrices
Seuil critique	de 4 à 5 mg/l	Salmonidés : migration incertaine, croissance altérée
	de 3 à 4 mg/l	
Seuil léthal	de 2 à 3 mg/l	Survie des juvéniles incertaine. Croissance et fécondité altérées. Arrêt ou retard du développement embryonnaire. Migration impossible pour beaucoup d'amphihalins. Mortalité des salmonidés
	de 1 à 2 mg/l	Mortalité pour la plupart des espèces
	moins de 1 mg/l	Milieu azoïque

Source : GIP Loire Estuaire

4.4.2. Objectifs du SAGE en matière de concentration en oxygène

Le plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD) décrit les objectifs du SAGE et les conditions de leur réalisation.

Le SAGE a fixé des objectifs de concentration en oxygène dissous dans l'eau à l'aval des fleuves à respecter :

- 9 jours maximum consécutifs par an durant lesquels la teneur en oxygène dissous dans l'eau est inférieure à 5 mg/l en moyenne journalière, sur la Garonne aval ;
- 4 jours maximum consécutifs par an durant lesquels la teneur en oxygène dissous dans l'eau est inférieure à 5 mg/l en moyenne journalière, sur la Dordogne aval.

Le réseau MAGEST, en place depuis 2004 est chargé du suivi et de l'analyse du respect de ces objectifs.

4.4.3. Résultats issus des réseaux de suivi

Le réseau MAGEST mesure l'oxygène dissous au niveau des quatre stations (aujourd'hui trois) à Pauillac, Bordeaux, Libourne et Portets. Une station de mesure SOMLIT fournit des mesures plus en aval, au PK 86.

Les eaux estuariennes à Pauillac et plus en aval sont toujours bien oxygénées, quelle que soit la saison, avec des valeurs mensuelles moyennes comprises entre 7 et 11 mg/l.

Au contraire, sur les stations amont, localisées dans les parties fluviales, les valeurs mensuelles moyennes varient plus largement, entre 3 et 14 mg/l. Les valeurs élevées sont enregistrées à la période hivernale alors que les valeurs basses sont observées à la période estivale.

La première raison à cette évolution saisonnière est l'effet de la température sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau (plus la température est élevée, plus la solubilité de l'oxygène dans l'eau est faible.).

La seconde raison est la présence de matières en suspension (bouchon vaseux), auxquelles sont associées la matière organique et les bactéries hétérotrophiques (processus de respiration et donc de consommation d'oxygène dissous).

Toutefois, bien que la température et les MES soient élevées à Libourne comme à Bordeaux à la période estivale, seul le secteur bordelais souffre d'hypoxie (<5 mg/l). A Libourne, le seuil à 5 mg/l

n'est jamais dépassé. A noter toutefois que les MES à Libourne restent inférieures aux concentrations rencontrées à Bordeaux.

Un troisième facteur vient donc expliquer la consommation d'oxygène à Bordeaux : le rejet des eaux traitées (apport en matière organique et ammonium) participe à la respiration microbienne et à la nitrification dans le bouchon vaseux, processus consommateurs d'oxygène.

Les eaux à Bordeaux montrent des minima en oxygène dissous à basse mer (faible dilution) ; Ceci peut être expliqué par le fait que la station MAGEST est en aval des STEP bordelaises qui rejettent le plus d'effluents urbains. Ces eaux sont ensuite advectées vers l'amont au cours du flot, ce qui explique que la station MAGEST à Portets enregistre des minima en oxygène dissous à pleine mer.

La comparaison des deux périodes similaires (en température, salinité et turbidité) mais avec des débits d'étiage différents ($< 100 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2005 et $> 100 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2007) met en évidence l'importance du débit d'étiage sur la saturation en oxygène : celle-ci est comprise entre 30 et 45% à basse mer en 2005, et elle est comprise entre 40 et 55% à basse mer en 2007. Le débit fluvial apporte des eaux plus oxygénées de l'amont, favorisent une dilution et une dispersion des effluents urbains.

Par rapport aux objectifs du SAGE, les données MAGEST permettent d'observer les périodes (jours consécutifs) pendant lesquelles la concentration en oxygène dissous est inférieure à 5 mg/l :

- 2006 : 53 jours consécutifs ;
- 2007 : 10 jours consécutifs ;
- 2008 : 5 jours consécutifs ;
- 2009 : 12 jours consécutifs ;
- 2010 : 7 jours consécutifs ;
- 2011 : 11 jours consécutifs ;
- 2012 : 38 jours consécutifs ;
- 2013 : 4 jours consécutifs.

5. VALIDITE DES DONNEES ET JUSTIFICATION CONCERNANT L'ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES

5.1. VALIDITE DES DONNEES

Les données hydrodynamiques sont satisfaisantes pour appréhender de manière générale les conditions dominantes dans l'estuaire. Seule l'exploitation de ces données, et notamment grâce au développement d'un modèle numérique, permet une analyse fine et locale des forçages.

Les données hydrosédimentaires (mesures ponctuelles, mesures en continu, télédétection) plus ou moins récentes permettent de dresser une image naturaliste et dynamique du fonctionnement estuarien. Elles sont satisfaisantes pour avoir une vision des mécanismes à l'échelle de l'estuaire.

Toutefois ces données ne permettront pas de répondre directement à des questions que l'on va être amené à se poser dans le cadre de la gestion des sédiments dans l'estuaire :

- Zones de clapage les plus instables / les plus stables ;
- Enveloppes de dispersion des sédiments clapés et non stabilisés selon les zones d'immersion ;
- Zones de dépôt préférentielles des sédiments clapés et non stabilisés selon les secteurs de l'estuaire et les conditions hydrodynamiques ;
- Zones de dépôt naturel à l'échelle de l'estuaire (zones de sédimentation dans l'estuaire, indépendamment des zones de vidage).

Nota : la suite de l'étude (modélisation, analyse des données bathymétriques...) permettra de répondre plus ou moins précisément à ces questions.

Les connaissances acquises notamment par les réseaux MAGEST et SOMLIT permettent de bien cibler les enjeux dans l'estuaire quant à l'oxygène dissous. Les résultats des études et recherches dressent une analyse des causes des problèmes identifiés et sont donc satisfaisantes tant pour l'analyse des enjeux que pour le diagnostic.

5.2. JUSTIFICATION CONCERNANT L'ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES

5.2.1. Levé bathymétrique de l'estuaire

La connaissance de la bathymétrie des fonds de l'estuaire de la Gironde est issue des levés réalisés par le GPMB.

Lorsque la vedette hydrographique du service dragages du GPMB n'est pas occupée à lever les fonds du chenal de navigation, elle lève les fonds sur toute la section de l'estuaire. Il faut plusieurs années pour que les levés assemblés couvrent la totalité de l'estuaire.

C'est à partir de levés réalisés par le port entre 2005 et 2009 que le modèle numérique de terrain unifié (MNTU) a été construit pour représenter les fonds de l'estuaire dans l'outil de modélisation développé pour la présente étude. Sa construction a nécessité l'assemblage des dalles de différentes années et la conversion des données altimétriques, du système du GPMB au système de référence national.

Il nous semble important de rappeler l'intérêt de disposer d'un levé unique, couvrant l'intégralité de l'estuaire :

- Sur la Loire, entre Nantes et Saint-Nazaire, un levé bathymétrique complet de l'estuaire par sondeur multifaisceaux (SMF) a été réalisé par une société de mesures hydrographiques entre octobre 2008 et février 2009. Couplé à un levé des zones latérales de la Loire par scanner laser aéroporté (LIDAR), un MNTU a été construit. Ce MNTU sert à différentes applications, entre autres, à mesurer indifféremment l'évolution de la ligne de rive, celle des vasières latérales, à évaluer les volumes oscillants, à réaliser des modélisations prospectives dans le cadre de scénario d'aménagement ou de scénario tendanciel.
- Un levé bathymétrique général, qui ne soit pas réalisé en vue d'une application pour la navigation, mais comme support identique à toutes les études sur l'estuaire, dans le système de référence RGF/IGN.

5.2.2. Etude / analyse des zones de sédimentation naturelle

Il est primordial de connaître les zones de dépôt naturelles de sédiments dans l'estuaire pour les besoins ultérieurs de l'étude afin de :

- Replacer les effets des opérations de dragage et d'immersion dans le contexte de la dynamique naturelle de l'estuaire (mission réglementaire) ;
- Proposer des mesures de gestion des sédiments dragués (proposition de scénarios, analyse comparative) cohérentes avec la dynamique générale de l'estuaire ;

Dans l'idéal, ces zones de dépôt doivent être identifiées à partir de mesures in-situ ; à l'échelle de tout l'estuaire, les seules données en nature existantes sont les levés bathymétriques du GPMB. Un travail d'analyse, à partir des bandes de levé (si conservées par le port) permettrait, à l'image de ce qui a été fait par EPOC pour le GIP Loire Estuaire, de localiser les zones de dépôt et d'analyser leurs évolutions en fonction des conditions de débit et de marée.

A défaut, nous utiliserons pour la suite de l'étude :

- Les informations apportées par la modélisation qui va être mis en œuvre ; nous rappelons toutefois que l'objectif de la modélisation est d'étudier le fonctionnement hydrosédimentaire des matériaux clapés dans l'estuaire. L'évolution naturelle de l'estuaire et de son bouchon vaseux ne seront pas étudiés à l'aide de la modélisation ;
- Les cartographies de dépôts sédimentaires résultantes de l'exploitation du modèle de transport SiAM (Ifremer-EPOC), qui fournit une approche des zones à l'échelle de l'ensemble de l'estuaire. Rappelons que ce modèle n'a pas été calé par des mesures in situ. Ces cartographies SIAM seront un complément intéressant à la modélisation ARTELIA.

5.2.3. Processus hydrosédimentaires au niveau des zones de vidage actuelles

Vis-à-vis des objectifs de l'étude de la gestion des sédiments dragués dans l'estuaire, une caractérisation plus détaillée des processus hydrosédimentaires au niveau des sites de dépôts dans l'estuaire pourra être bénéfique pour la suite de l'étude (diagnostic, proposition de scénarios) ; ou sur d'autres sites potentiellement envisageables.

Le modèle numérique en cours de construction, réalisé dans le cadre de cette étude, sera profitable pour analyser plus finement la dynamique en certains points que nous définirons lors de l'exploitation du modèle.

Toutefois, des éléments de connaissance et de caractérisation complémentaires au modèle pourraient être acquis par des mesures en nature. Ces besoins étant à rattacher à l'analyse des pratiques actuelles de dragages-immersions, ceux-ci sont présentés dans la fiche thématique n°2 « navigation et dragages ».

oOo