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

ETAPE 2 : DIAGNOSTIC OPERATIONNEL – DEFINITION DES ENJEUX ET DES BESOINS

RM1-E2-2 : CONSTRUCTION, CALAGE ET VALIDATION DU MODELE

ARTELIA Eau & Environnement

Activité 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 2					
RM1-E2-2 : construction, calage et validation du modèle					
2	Modification suite remarques du 27/10/2015 et 11/02/2016 2016	TSD			11/03/2016
1	1 ^{ère} diffusion	DLS/FGN/RWR	FGN	LTT	14/10/2015
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Dans le cadre de l'élaboration du plan de gestion des sédiments de la Gironde, un modèle de la Gironde a été construit sur une emprise qui s'étend de La Réole en limite amont de la Garonne, Flaujacques en limite amont de la Dordogne et jusqu'au domaine maritime en aval, qui s'étend à environ 100 km de l'embouchure suivant le Nord, 85 km suivant l'Ouest et 75 km vers le Sud. Les fonds du modèle dans la partie d'intérêt sont représentatifs d'un état de l'estuaire compris entre les années 2005 et 2010. La précision du modèle en termes de taille de maille horizontale est de 60 m sur le chenal de navigation, 70 à 500 m dans le reste de l'estuaire et 3,5 km pour la frontière maritime au large.

Le calage du modèle hydrodynamique s'est effectué sur l'année hydrologique 2008-2009. Le calage en niveaux a été réalisé sur trois cycles de marée de 15 jours correspondant à des périodes de débit sensiblement constant à 350, 800 et 1600 m³/s ; le calage a été réalisé en utilisant les mesures de niveaux des 9 marégraphes installés entre Le Verdon et Bordeaux. Ces trois débits sont représentatifs de 3 positions bien marquées de la crête de vase dans l'estuaire. A l'issue du calage, trois cartes de frottement correspondant à ces 3 débits représentatifs ont été obtenues et une interpolation de ces cartes de frottement a été mise en place pour les autres débits.

Le modèle hydrodynamique a ensuite été validé en courant au niveau de Pauillac sur des mesures ADCP effectuées par EDF R&D sur cette même période hydrologique.

La validation en salinité a été effectuée à partir des données du réseau de mesure en continu MAGEST, sur les stations de Pauillac et Bordeaux pour l'ensemble de l'année hydrologique 2008-2009. Les données du programme SOMLIT ont notamment permis de valider le modèle sur les aspects de stratification entre le fond et la surface sur 3 points dans l'estuaire (PK 86, 52 et 30).

Le pompage tidal en amplitude et intensité est bien modélisé avec notamment une bonne représentation du mélange vertical de la salinité. Ceci est gage d'une bonne représentation des vitesses en 3D et des effets de densité, qui sont les principaux moteurs de la dynamique estuarienne.

La dynamique estuarienne étant calée et validée en niveau, courant et salinité, le modèle est à ce stade, prêt pour reproduire la modélisation des processus vaseux et un scénario de clapage de sédiment.

Pour cela deux étapes sont nécessaires :

- une analyse des mesures et rapports existants sur les propriétés rhéologiques des vases en Gironde sera effectuée, afin de modéliser les processus vaseux avec des paramètres représentatifs des vases de Gironde :
 - vitesse de chute ;
 - contrainte d'érosion en fonction de la concentration ;
 - constante de Partheniades pour l'érosion ;
 - paramètres pour le modèle de tassement et calage du modèle de tassement.
- La création d'un scénario de clapage à partir des clapages effectués sur l'année 2008-2009, ce qui implique la définition pour chaque clapage sur l'année:
 - D'une date ;
 - D'une position de clapage (X, Y) ;
 - D'une masse de sédiment (vase ou sable).

SOMMAIRE

SYNTHESE ET CONCLUSIONS	A
1. PREAMBULE	1
2. CONSTRUCTION DU MODELE	2
2.1. METHODOLOGIE	2
2.2. REFERENCE ALTIMETRIQUE	2
2.3. EMPRISE DU MODELE	2
2.4. CONSTRUCTION DU MNT	3
2.4.1. ZONE DE L'ESTUAIRE : DE BORDEAUX/ILE D'AMBES (AMONT) A L'OUEST DU BANC DU MATELIER (AVAL)	3
2.4.2. ZONE AMONT – COTE GARONNE : DE BORDEAUX A LA REOLE	5
2.4.3. ZONE AMONT – COTE DORDOGNE : DE L'AMONT DE L'ILE D'AMBES A FLAUJAGUES	5
2.4.4. ZONE AVAL – EMBOUCHURE ET ZONE MARITIME	6
2.5. CONSTRUCTION DU MAILLAGE	8
2.5.1. MAILLAGE HORIZONTAL	8
2.5.2. MAILLAGE VERTICAL	9
3. PRINCIPE DE CALAGE DU MODELE ET PERIODE CHOISIE	10
4. DONNEES DE FORÇAGES	11
4.1. FORÇAGE EN DEBIT	11
4.2. IMPOSITION DU NIVEAU ET DES VITESSES	11
4.3. FORÇAGE EN VENT	12
5. CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE EN NIVEAUX	13
5.1. METHODOLOGIE	13
5.2. DETERMINATION D'UNE CARTE DE FROTTEMENT DE L'ESTUAIRE « SANS CREME DE VASE »	14
5.2.1. LOIS DE FROTTEMENT	15
5.2.2. MISE EN PLACE DES ZONES DE FROTTEMENT	15
5.2.2.1. Frottement longitudinal le long du chenal de navigation	15
5.2.2.2. Frottement par zones	16
5.2.3. PARAMETRAGE DU FROTTEMENT OBTENU POUR UN ESTUAIRE « SANS VASE »	17
5.3. DETERMINATION DE CARTES DE FROTTEMENT DE L'ESTUAIRE EN TENANT COMPTE DE LA CREME DE VASE	19
5.4. RESULTATS DU CALAGE	21
6. VALIDATION DE LA DYNAMIQUE ESTUARIEENNE	24
6.1. VALIDATION DE LA COURANTOLOGIE	24

6.2. VALIDATION DE LA DYNAMIQUE HALINE **24**

6.2.1. MODELE DE TURBULENCE VERTICAL UTILISE	24
6.2.2. MISE EN APPLICATION PRATIQUE	25
6.2.3. FACTEUR SUR LES FORCES DE DENSITE	26
6.2.4. MODELISATION HALINE DE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 2008-2009	26
6.2.5. MESURES DISPONIBLES	26
6.2.6. COMPARAISON AUX MESURES	27

REFERENCES **29**

ANNEXE 1 FIGURES HORS TEXTE **30**

TABLEAUX

Tableau 1 – Liste des fichiers de bathymétrie utilisés.....	3
Tableau 2 – Correspondance entre le zéro étiage et le zéro IGN69.....	5
Tableau 3 – Rugosité dans le chenal de navigation pour un « estuaire sans vase »	17
Tableau 4 – Rugosité sur les zones complémentaires pour un « estuaire sans vase »	17
Tableau 5 – Rugosité dans le chenal de navigation pour un estuaire avec présence de vase	21
Tableau 6 – Rugosité sur les zones complémentaires pour un estuaire avec présence de vase	21

FIGURES

Figure 1. Emprise du MNT construit à partir des fichiers généraux.	4
Figure 2. Récapitulatif des sources de données utilisées pour la construction du MNT.....	6
Figure 3. MNT global et zoom à l'embouchure.	7
Figure 4. Maillage du modèle (vue globale et zoom)	9
Figure 5. Maillage vertical (coupe verticale suivant le chenal de navigation) à Basse mer (BM) et à Pleine mer (PM).....	9
Figure 6. Débit journalier de la Garonne et le Dordogne – octobre 2008 à septembre 2009	11
Figure 7. Vent (intensité et direction de provenance) – années 2008 et 2009.....	12
Figure 8. Caractérisation du bouchon vaseux et présence de crème de vase dans l'estuaire de la Gironde (extrait Réf. [3])	13
Figure 9. Correspondance entre débit de la Gironde et présence de crème de vase (extrait Réf. [3])	14
Figure 10. Choix des deux périodes retenues pour le calage de la carte de frottement sans présence de vase	15
Figure 11. Localisation des différents marégraphes dans l'estuaire	16
Figure 12. Carte de frottement pour un estuaire « sans vase ».....	18
Figure 13. Carte sédimentologique du SHOM (issue de la thèse Lan Anh VAN, 2013 : Modélisation du transport des sédiments mixtes sable-vase et application à la morphodynamique de l'estuaire de la Gironde, Réf. [4])	19
Figure 14. Correspondance entre débit et présence de crème de vase	20
Figure 15. Choix des trois périodes retenues pour le calage des cartes de frottement avec présence de vase	20
Figure 16. Correspondance entre le calage de la position de crème de vase dans le modèle et la position de la crème de vase reléevée en nature	22
Figure 17. Cartes de frottement pour un estuaire avec présence de vase pour un débit de 1500, 800 et 350 m3/s	23
Figure 18. Comparaisons des résultats du modèle 3D en vitesses aux mesures ADCP effectuées par EDF R&D au point P4 (proche Pauillac) [Ref 5]	24
Figure 19. Schéma de principe du modèle de mélange multicouche	25
Figure 20. Station du réseau MAGEST qui permettent une comparaison avec le modèle en salinité	27
Figure 21. Points de mesures SOMLIT qui permettent une comparaison avec le modèle en salinité.....	27

1. PREAMBULE

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 mission comprend 4 étapes :

- Etape n°1 : Etat des lieux – qualification et hiérarchisation des enjeux actuels
- Etape n°2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins
- Etape n°3 : Définition des scénarios
- Etape n°4 : Plan de gestion

Dans le cadre de l'étape 2, un modèle numérique a été réalisé. Il fait l'objet de trois rapports :

- Rapport RM1-E2-2 qui correspond à la description de la construction, du calage hydraulique et de la validation hydraulique du modèle ;
- Rapport RM1-E2-3 qui correspond à la présentation des hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage ;
- Rapport RM1-E2-4 qui correspond à la présentation des résultats du calcul hydrosédimentaire

Le présent document correspond au rapport RM1-E2-2.

2. CONSTRUCTION DU MODELE

2.1. METHODOLOGIE

La construction du modèle numérique comporte plusieurs étapes :

- recensement des données de bathymétrie/topographie sur la zone ;
- création du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au vue des objectifs du modèle ;
- création de la grille de calcul appelé « maillage » sur la base du MNT.

Le modèle numérique vise à simuler le devenir des sédiments clapés le long de l'estuaire. Il doit donc représenter l'hydrodynamique de l'estuaire dans sa globalité.

Un point essentiel dans la construction du MNT est d'obtenir une bathymétrie/topographie cohérente tout le long de l'estuaire sur la base des données mises à disposition. Pour cela, un travail de traitement, référencement, validation et assemblage (retraitement local de la bathymétrie) des données a été réalisé pour reconstituer un MNT récent de la bathymétrie sur l'ensemble de l'estuaire.

Compte tenu des objectifs de l'étude, le modèle numérique ne représente que **le lit mineur** du fleuve. Les ouvrages de protection ne sont pas représentés et les zones non immergées comme les îles (île d'Ambès, île Macau, île du Nord, île Cazeau, île Verte, île Boucheau, île Vouvelle, île de Patiras, vasard de Beycherelle...) ne sont pas prises en compte dans le modèle (zones non maillées considérées comme hors d'eau).

2.2. REFERENCE ALTIMETRIQUE

La référence altimétrique du modèle numérique est le référentiel **IGN69**.

La référence planimétrique est le **Lambert-93**.

2.3. EMPRISE DU MODELE

L'emprise du modèle s'étend :

- à l'amont jusqu'à la limite d'influence de la marée soit jusqu'à Flaujagues sur la Dordogne et La Réole sur la Garonne ;
- à l'aval, il s'étend sur environ :
 - 85 km au large à l'ouest de l'estuaire ;
 - 75 km au sud de l'embouchure (jusqu'au sud de l'étang de Lacanau) ;
 - 100 km au nord de l'embouchure (Les Sables-d'Olonne) ;

afin de prendre en compte la partie maritime de l'embouchure et ses processus physiques ainsi que l'intégralité de l'extension des panaches turbides issus des clapages.

2.4. CONSTRUCTION DU MNT

2.4.1. Zone de l'estuaire : de Bordeaux/Ile d'Ambès (amont) à l'ouest du Banc du Matelier (aval)

Un certain nombre de données bathymétriques de l'ensemble de l'estuaire a été fourni par le GPMB, parmi elles :

- Des données générales de 2005 à 2010 réparties le long de l'estuaire (12 dalles);
- Des données locales plus récentes (jusqu'en 2014).

L'emprise de ces données s'étend entre :

- Bordeaux côté Garonne ;
- 500 m à l'aval de l'île d'Ambès côté Dordogne,
- Environ 7 km à l'ouest du banc du Matelier du côté de l'embouchure.

Après vérification des fichiers, les données générales sont suffisantes pour construire un MNT cohérent de bonne résolution.

La **Figure 1** représente le MNT de l'estuaire construit à partir des données générales de 2005-2010 fournies par le GPMB.

Les fichiers utilisés pour la construction sont répertoriés dans le **Tableau 1**. La plupart des données sont datées de 2005 à 2008. Un fichier inclut de la bathymétrie 2009 et un fichier de la bathymétrie de 2010. Il n'a pas été possible de distinguer précisément au sein d'un même fichier les dates des données. Les dalles sont cohérentes les unes par rapport aux autres. Aucun différentiel altimétrique n'apparaît entre les différentes données.

Tableau 1 – Liste des fichiers de bathymétrie utilisés.

LISTE DES FICHIERS UTILISES
GX11 A FIN JUIN 2008 MOD.txt
GXF01_2005 2006_L93.txt
GXF02_2005 2006_L93.txt
GXF03_2005 A 2009_L93.txt
GXF04_2005 A 2006_L93.txt
GXF05_2005 2008 L93.txt
GXF06_2005 2006_L93.txt
GXF07_2005 2006_L93.txt
GXF08_2005 A 2007_L93.txt
GXF09_2005 2008_L93.txt
GXF10_2005 à mai 2010_L93_Non Validé.txt
GXF12_2005 2006 2007 COMPLET_L93_non validé.txt

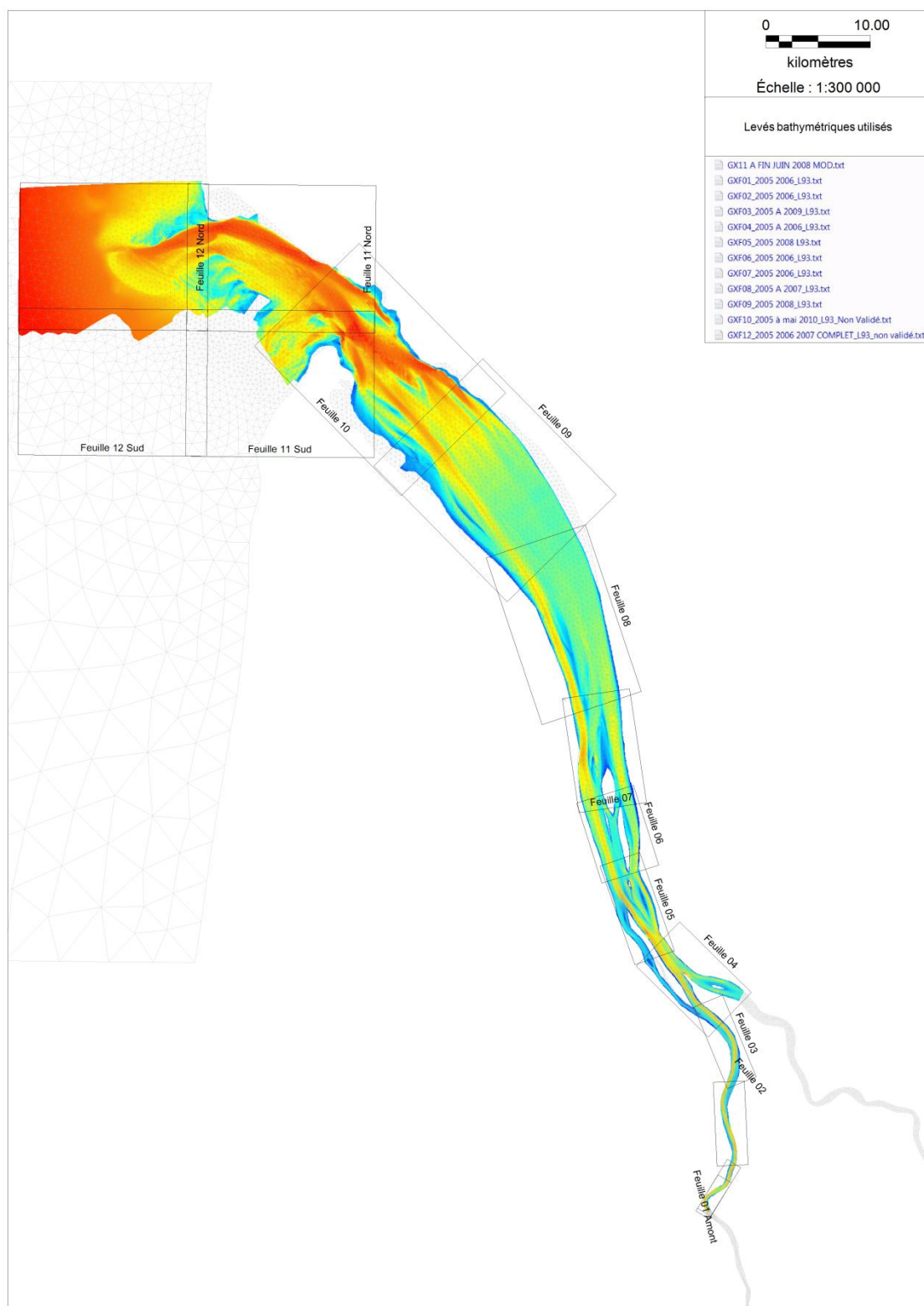


Figure 1. Emprise du MNT construit à partir des fichiers généraux.

Les données du GPMB sont fournies par rapport au zéro étiage. Pour convertir ces données dans le référentiel IGN69, ARTELIA s'est appuyée sur la correspondance entre le zéro étiage et le 0 IGN69 tel que fourni par le GPMB en 9 stations marégraphiques (Tableau 2).

Pour chaque point P de bathymétrie, l'altimétrie a été translatée d'une valeur X. Cette valeur X est estimée par interpolation en fonction de la distance du point P aux stations marégraphiques de référence. Cette méthode permet d'avoir la conversion la plus juste et la plus optimale le long de l'estuaire.

A l'aval, les données sont disponibles jusqu'à l'embouchure (ouest du banc du Matelier). Or, la dernière station de référence marégraphique disponible est la station du Verdon (Port Bloc) au PK 92.75 avec une hauteur 0 étiage/0 IGN69 de -2.871m. Cette valeur de référence a été conservée à l'embouchure de l'estuaire pour convertir les données en IGN69.

Tableau 2 – Correspondance entre le zéro étiage et le zéro IGN69.

Station Marégraphique	Hauteur du zéro étiage / 0 IGN 69 (en m)	PK
Bordeaux	-1.812	3.50
Bassens	-1.824	8.21
Le Marquis	-1.878	19.83
Ambès	-2.027	25.35
Fort-Médoc	-2.261	37.40
Trompeloup	-2.539	49.38
Laména	-2.817	62.92
Richard	-2.859	78.50
Port-Bloc	-2.871	92.75

Dans les zones marnantes (banc de Saint Vivien, banc de Saint Servin...) où les levés du GPMB n'apportent pas d'information suffisante, la bathymétrie du modèle actuel a été actualisée en utilisant les données LIDAR. Ces zones sont peu nombreuses dans l'emprise du modèle ; de plus, aucun « raffinement » particulier n'a été réalisé au niveau de ces zones dans le maillage compte tenu des objectifs de l'étude.

2.4.2. Zone amont – Côté Garonne : de Bordeaux à La Réole

Les données disponibles sur cette zone sont :

- des données de 2003 issues d'un levé réalisé pour le compte de VNF ;
- les données de 1999-2000 provenant du modèle numérique existant sur la zone (modèle développé par ARTELIA pour le compte du SMIDDEST dans le cadre de l'étude de « l'élaboration d'un référentiel de protection contre les inondations sur l'estuaire de la Gironde »).

Les données de 2003 ont été utilisées en priorité puis complétées avec les données de 1999-2000. Un travail d'assemblage a été réalisé afin d'avoir un MNT cohérent dans la zone de jonction avec le reste de l'estuaire.

Les données étant déjà référencées en m IGN69, aucune conversion n'a été réalisée.

2.4.3. Zone amont – Côté Dordogne : de l'amont de l'île d'Ambès à Flaujacgues

Les uniques données disponibles et utilisées pour la construction du MNT sont celles provenant du modèle numérique existant. Un travail d'assemblage a été réalisé afin d'avoir un MNT cohérent dans la zone de jonction avec le reste de l'estuaire.

Les données étant déjà référencées en m IGN69, aucune conversion n'a été réalisée.

2.4.4. Zone aval – Embouchure et zone maritime

Les sondes des dalles SHOM ont été utilisées pour cette zone. Elles ont été converties en m IGN69 selon les informations disponibles dans le « Référentiel Altimétrique Maritime » édité par le SHOM.

La Figure 2 récapitule les différentes données utilisées dans la construction du MNT.

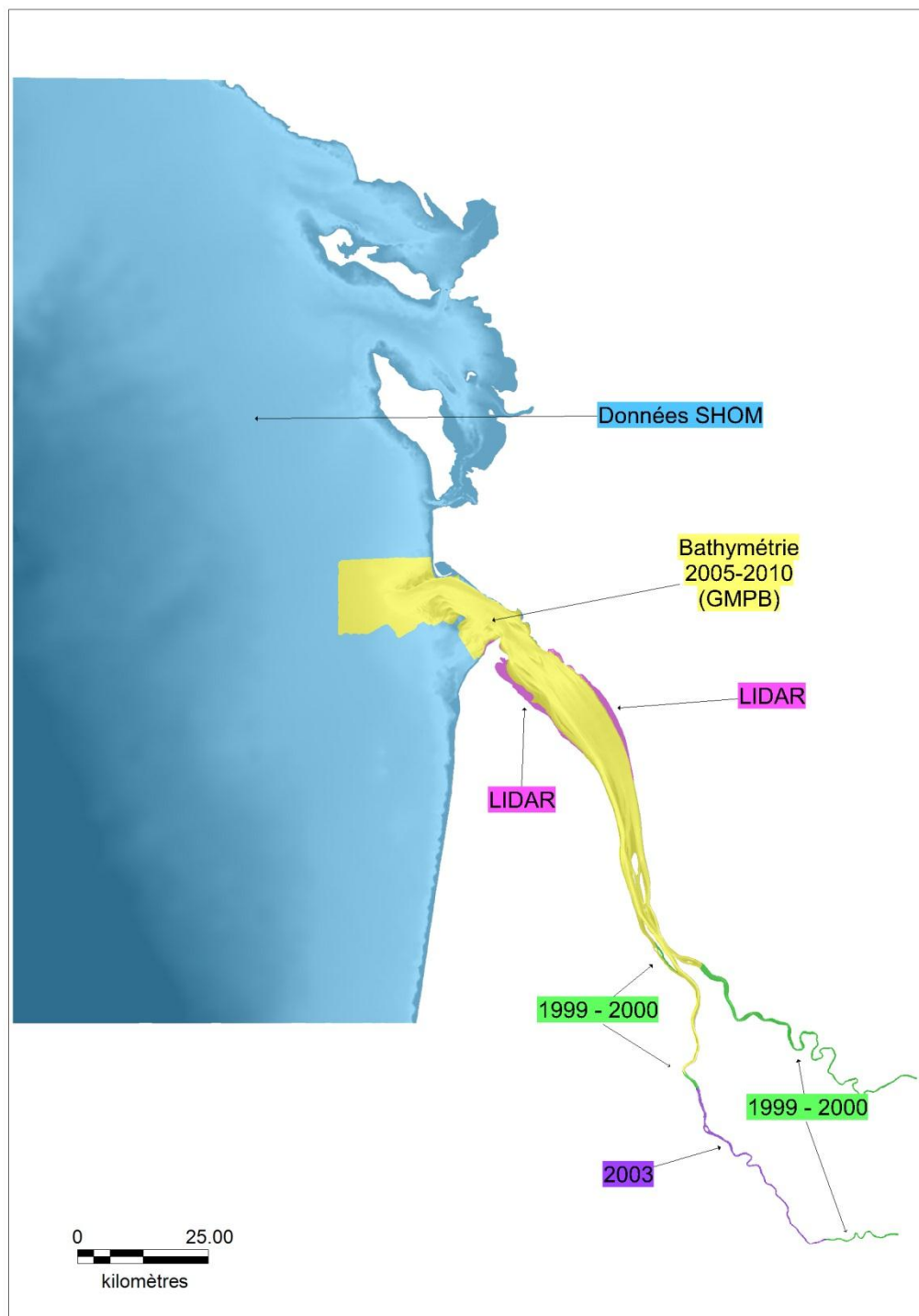


Figure 2. Récapitulatif des sources de données utilisées pour la construction du MNT.

La Figure 3 représente la bathymétrie globale du MNT ainsi qu'un zoom au niveau de l'embouchure.

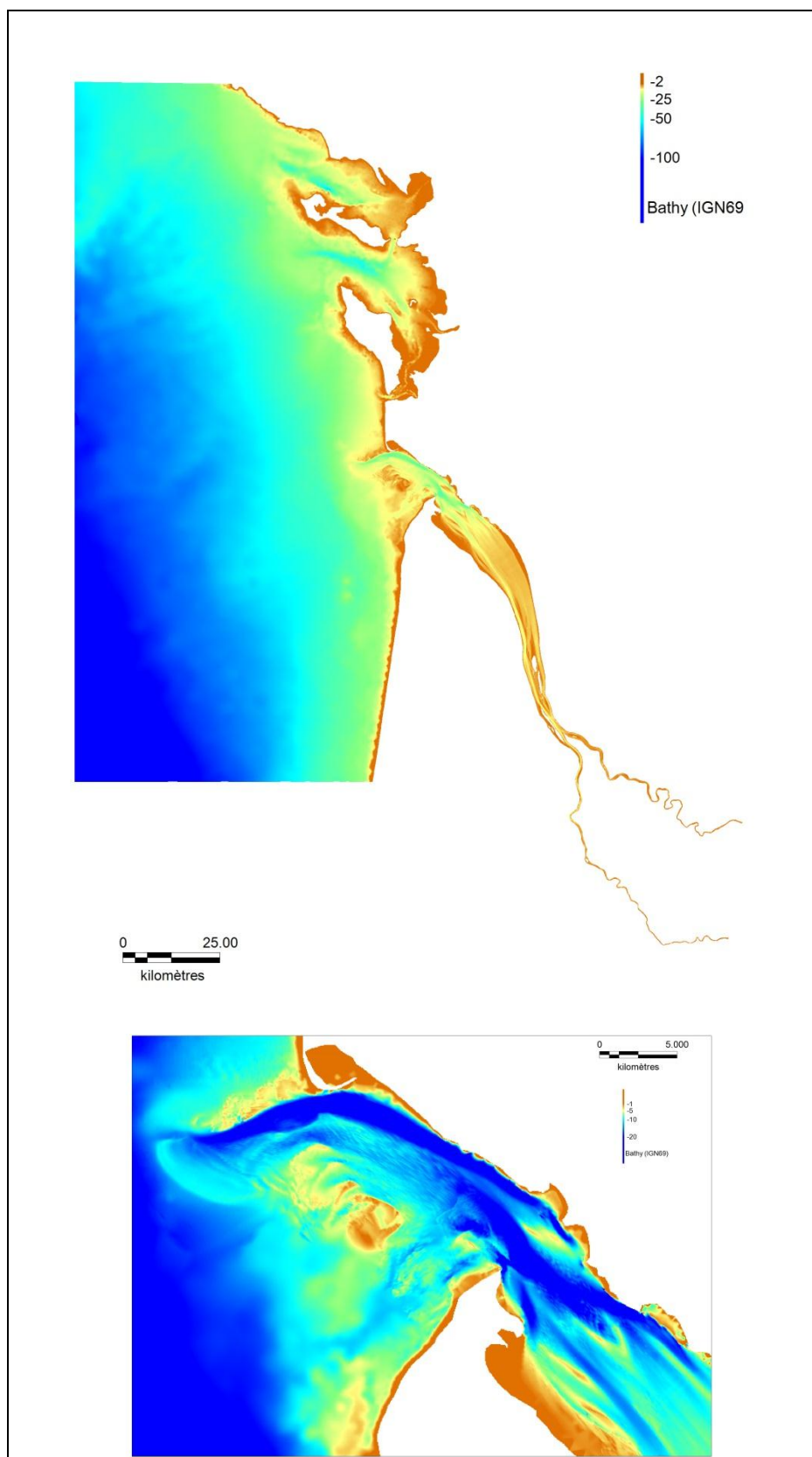


Figure 3. MNT global et zoom à l'embouchure.

2.5. CONSTRUCTION DU MAILLAGE

2.5.1. Maillage horizontal

Le maillage horizontal prismatique du modèle est composé de facettes triangulaires de tailles variables selon les zones du modèle. Il est ainsi possible de représenter fidèlement le terrain (bathymétrie, faibles fonds, chenal ...) et les zones d'intérêts (zones d'immersion, ...).

De plus, le maillage s'appuie sur un système précis de « lignes de contraintes » afin de bien représenter le chenal principal (pente et fond du chenal), les passes, les hauts fonds, la bathymétrie entre les îles (île d'Ambès, île Macau...).

Le nombre total de nœuds du maillage horizontal est d'environ **53 500 nœuds**. La taille de maille évolue ainsi :

- 3 500 m au large ;
- 400 à 500 m à la cote ;
- 70 à 500 m dans l'estuaire selon les zones d'intérêts ;
- 60 m autour des passes et du chenal.

Nota : pour la phase exploitation du modèle sur une année hydrologique, le maillage sur les zones d'immersion sera d'environ 50 m.

La **Figure 4** représente le maillage global maillage prismatique du modèle bidimensionnel (vue globale et zoom).

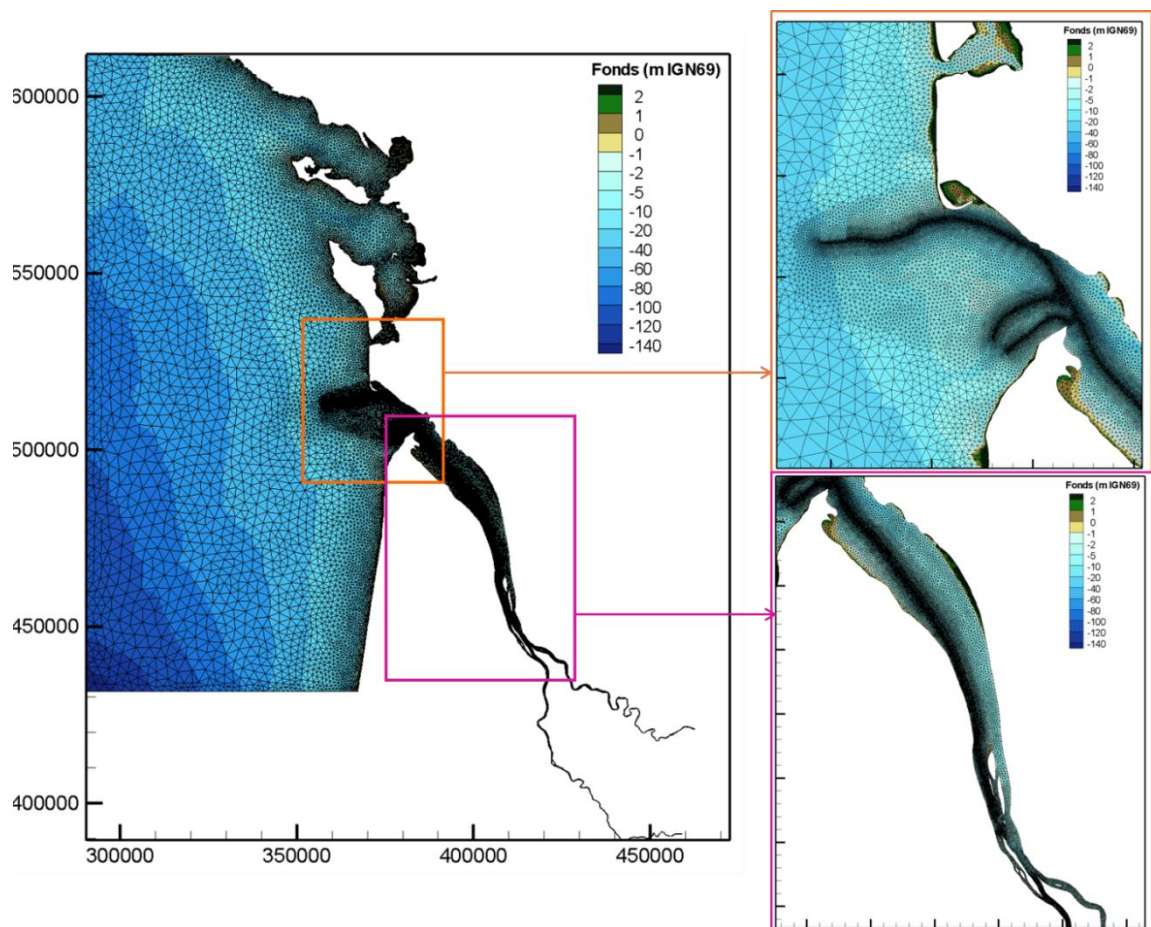


Figure 4. Maillage du modèle (vue globale et zoom)

Des représentations de la bathymétrie et du maillage sont présentées en **Annexe 1 (fig. 1.1 à 1.3)**.

A noter que pour la phase d'exploitation du modèle, les zones d'immersions seront spécifiquement raffinées.

2.5.2. Maillage vertical

Le maillage vertical est composé de 14 plans avec une stratégie de plans fixes (en rouge sur la **Figure 5**) et de plans « sigma » (en noir) pour avoir un raffinement près du fond (les 4 premières couches ont une taille inférieure à 0,5m pour capter les gradients de courant, de salinité et de MES) et près de la surface pour intégrer proprement les effets du vent.

La figure suivante montre une coupe verticale du maillage qui suit le chenal de navigation pour un niveau de pleine mer et pour un niveau de basse mer :

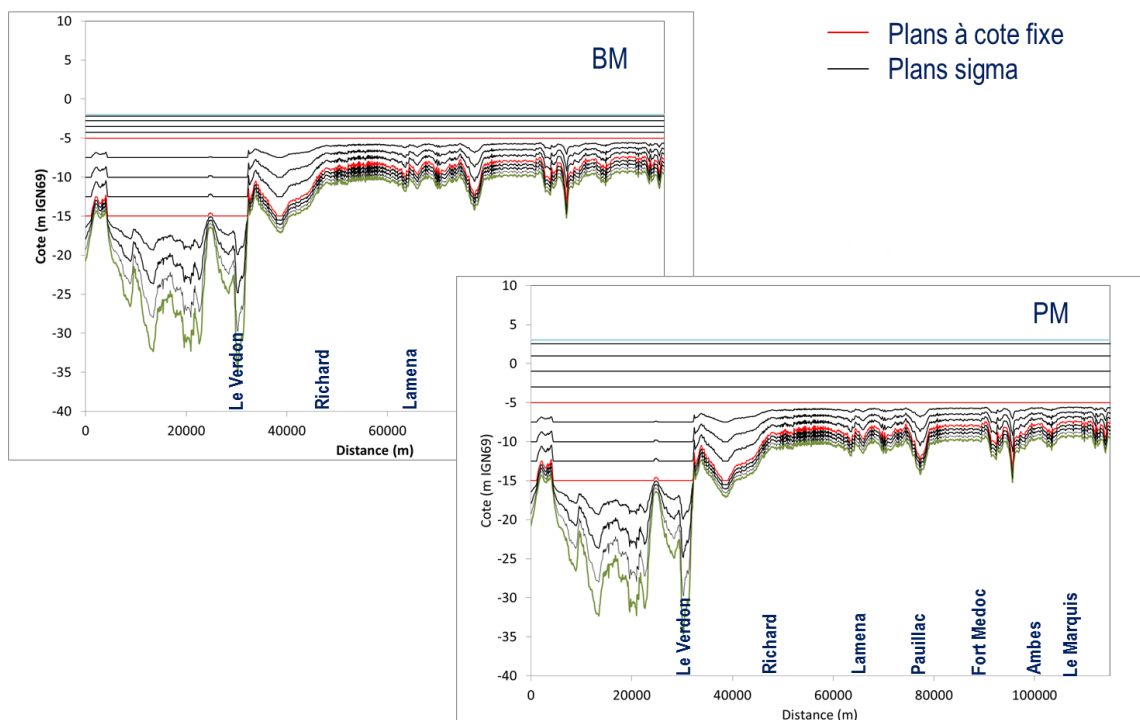


Figure 5. Maillage vertical (coupe verticale suivant le chenal de navigation) à Basse mer (BM) et à Pleine mer (PM)

3. PRINCIPE DE CALAGE DU MODELE ET PERIODE CHOISIE

Concernant le calage en niveau, le principal paramètre qui va être utilisé est le coefficient de frottement qui peut varier spatialement et temporellement en fonction de la position de la crème de vase dans l'estuaire. Ce calage va s'effectuer à partir des différentes données marégraphiques disponibles dans l'estuaire, sur une année entière afin de couvrir différentes situations hydrologiques.

La validation du modèle se fera par comparaison avec les mesures de courant disponibles durant cette année et par comparaison avec les mesures de salinité disponibles. En effet, la bonne représentation de la dynamique saline à l'échelle de l'estuaire est le gage d'une bonne reproduction des courants en 3D et des effets densimétriques qui sont les moteurs de la création et du positionnement d'un bouchon vaseux et donc de la dynamique sédimentaire vaseuse.

Le choix de l'année à simuler pour le calage, s'est porté sur l'année hydrologique 2008-2009 pour plusieurs raisons majeures :

- les données de forçages pour le modèle (marée, niveau moyen, vent, houle et débits de la Garonne et de la Dordogne) sont disponibles ;
- cette année possède des variabilités hydrologiques intéressantes ;
- une diversité de mesures in-situ sont disponibles (niveaux d'eau, vitesse et salinité).

Ce choix a été validé par le comité technique lors de la réunion du 4 septembre 2015.

4. DONNEES DE FORÇAGES

Toutes les données de forçages couvrent la période de calage du modèle à savoir d'octobre 2008 à fin septembre 2009.

4.1. FORÇAGE EN DEBIT

Les débits journaliers de la Dordogne et de la Garonne sont imposés à chaque limite amont du modèle. L'évolution temporelle de ces débits est présentée sur la Figure 6. Ces données ont été fournies par le GPMB.

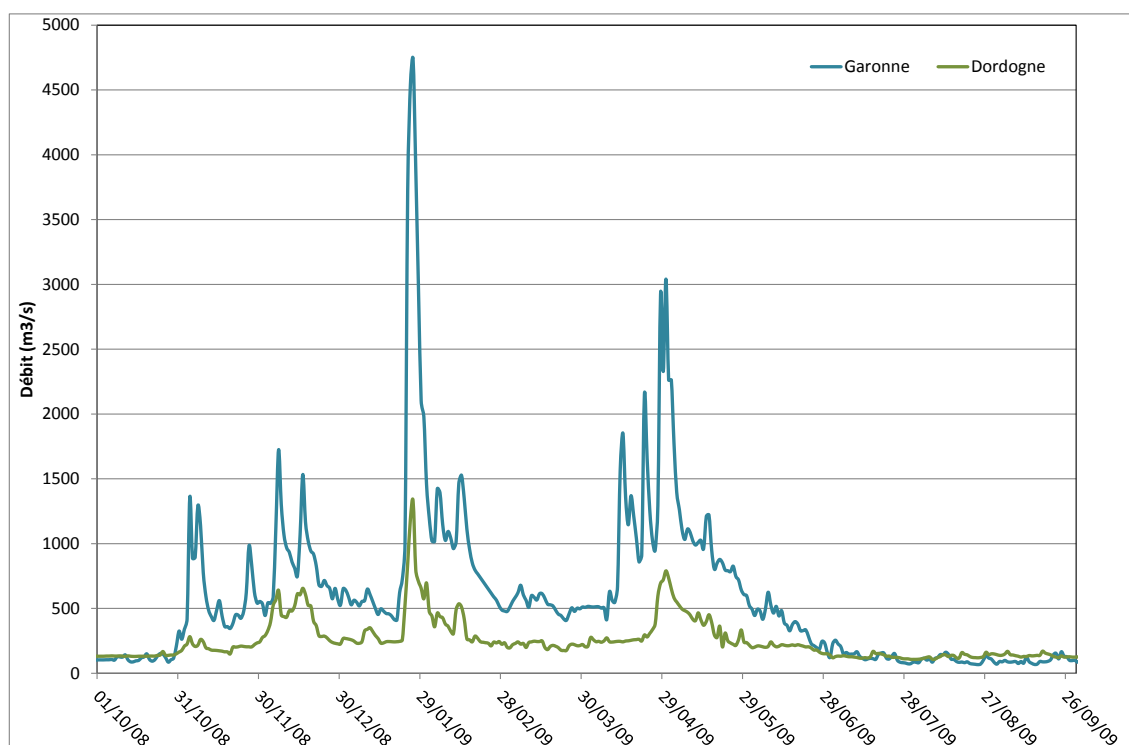


Figure 6. Débit journalier de la Garonne et le Dordogne – octobre 2008 à septembre 2009

4.2. IMPOSITION DU NIVEAU ET DES VITESSES

Le niveau et les courants de marée sont imposés à la frontière maritime du modèle. Ces données proviennent du modèle global de marée FES2012¹.

Ce modèle de marée inclut les 33 ondes suivantes : M2, K1, S2, N2, K2, 2N2, O1, P1, Q1, S1, L2, Mu2, Nu2, R2, T2, E2, J1, La2, M4, M6, M8, MN4, MS4, M3, MKS2, N4, S4, Mf, Mm, Mtm, MSf, Ssa, Z0. Ces ondes sont les principales ondes générant la marée dans le golfe de Gascogne.

Afin de prendre en compte les différents phénomènes météorologiques locaux (surcote dépressionnaire ou décote ...), le niveau moyen au marégraphe du Verdon est calculé sur la

¹ développé par Noveltis, Legos et CLS Space Oceanography Division, distribué par Aviso, avec le soutien du Cnes

période de calage puis ajouté sous forme de série temporelle à l'ensemble des points frontières, s'ajoutant ainsi au niveau d'eau lié à la marée.

4.3. FORÇAGE EN VENT

Les données de vent ont été extraites de la base de données HOMERE² (zone Manche – Golfe de Gascogne) en un point au large de l'embouchure.

Ces données sont imposées sur l'ensemble du modèle.

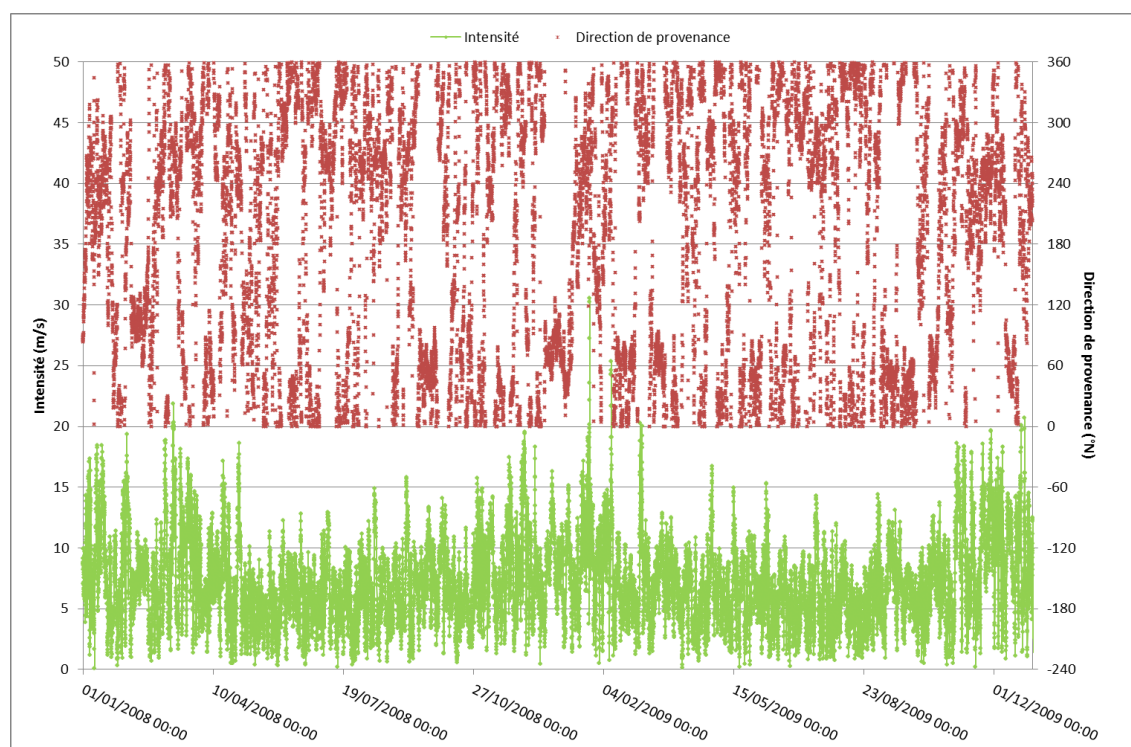


Figure 7. Vent (intensité et direction de provenance) – années 2008 et 2009

² Développée par Ifremer

5. CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE EN NIVEAUX

5.1. METHODOLOGIE

Fort de l'expérience de la modélisation 3D des estuaires de la Loire et de la Seine, nous savons l'importance que peut jouer le rôle de la crème de vase dans un estuaire et la façon dont ce phénomène peut être pris en compte dans la modélisation (Hamm L. and Walther R., 2008 [Réf. 1], Walther R et al. 2012 [Réf. 2]).

C'est pourquoi, le travail d'A. Sottolochio (Réf. [3] - Figure 8 et Figure 9) qui a notamment répertorié des bandes de relevé sonar du Port Autonome de Bordeaux en fonction des débits, a été précisément étudié ; ce travail lui a permis de localiser la crème de vase en fonction du débit.

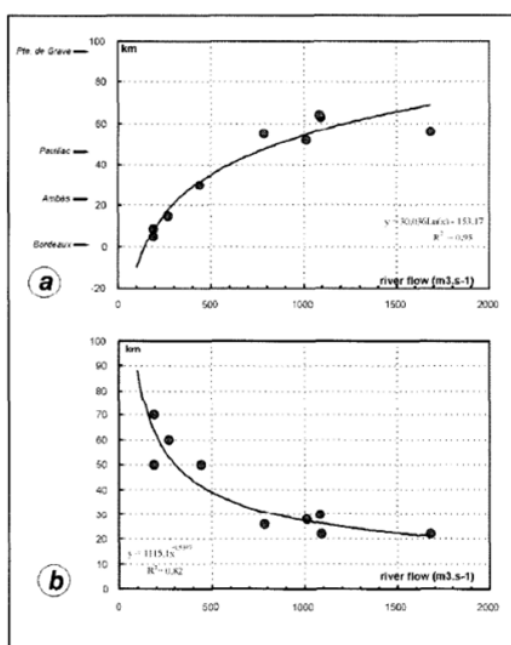


Figure 4. Characteristics of the turbidity maximum as a function of the river flow: a) position of the core (in km downstream from Bordeaux); b) length of the high-concentrated area.

Caractéristiques du bouchon vaseux en fonction du débit fluvial : a) position du centre (en km en aval de Bordeaux) ; b) longueur en km.

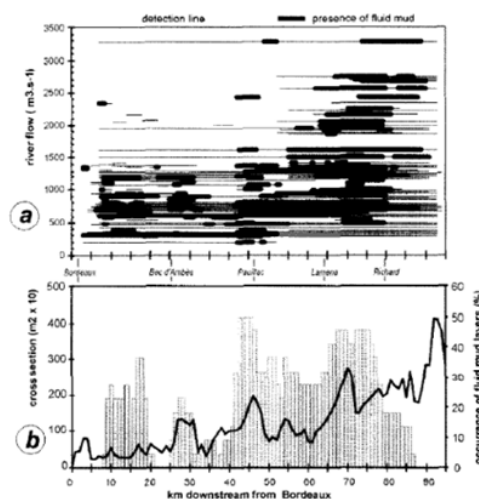


Figure 5. Fluid mud patterns in the navigation channel: a) geographic distribution of the fluid mud as a function of the river flow; b) comparison of the occurrence rate of fluid mud (bars) with the channel cross section (solid line).

Présence de crème de vase dans le chenal de navigation : a) répartition géographique en fonction du débit fluvial ; b) comparaison de l'occurrence de la crème de vase (barres verticales) avec la section du chenal (trait plein).

Figure 8. Caractérisation du bouchon vaseux et présence de crème de vase dans l'estuaire de la Gironde (extrait Réf. [3])

Il est intéressant de remarquer sur la Figure 9 qu'il existe deux valeurs seuils de débit de la Gironde :

- $Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$: il n'a plus de crème de vase à l'aval du PK 54 (entre Pauillac et Lamena) ;
- $Q > 1500 \text{ m}^3/\text{s}$: il n'y a plus de crème de vase à l'amont du PK 54.

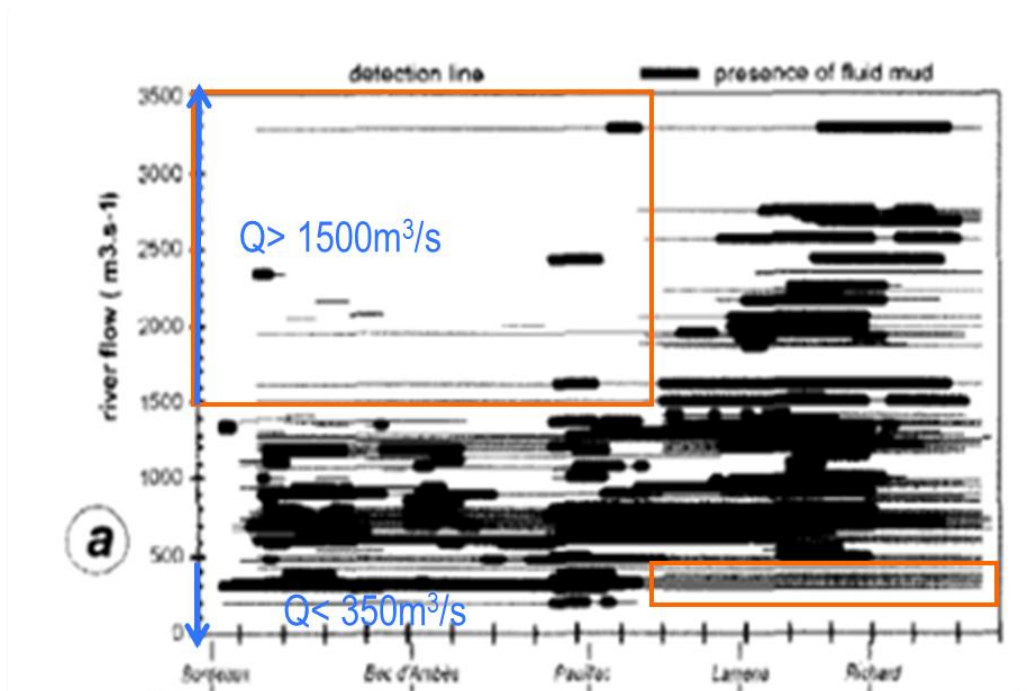


Figure 9. Correspondance entre débit de la Gironde et présence de crème de vase (extrait Réf. [3])

Le but est de créer dans un premier temps une carte de frottement constante dans le temps dite « sans crème de vase » sur laquelle nous superposerons par la suite un frottement lisse sur les zones où la crème de vase est localisée en fonction du débit.

5.2. DETERMINATION D'UNE CARTE DE FROTTEMENT DE L'ESTUAIRE « SANS CREME DE VASE »

Pour définir cette première carte de frottement de l'estuaire dite « sans crème de vase », nous allons utiliser deux périodes de débit, une inférieure à 350 m³/s pour caler la partie aval de l'estuaire et une supérieure à 1500 m³/s pour régler la partie amont au pk54 de l'estuaire.

Pour cela les résultats du modèle sont comparés aux mesures marégraphiques de deux périodes :

- >1500 m³/s : période du 2 février au 16 février 2009 ;
- <350 m³/s : période du 11 août au 24 août 2009.

Ces périodes durent au moins 15 jours afin de bien prendre en compte un cycle complet de marée.

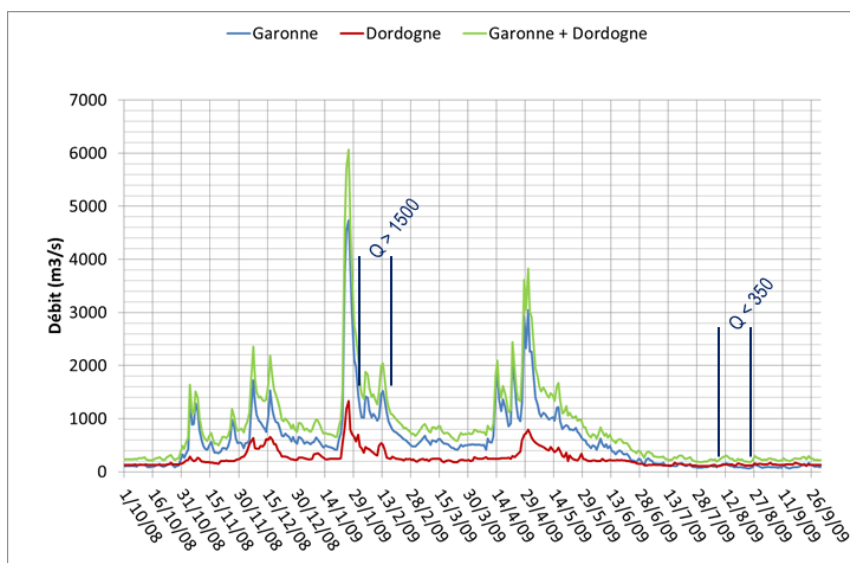


Figure 10. Choix des deux périodes retenues pour le calage de la carte de frottement sans présence de vase

5.2.1. Lois de frottement

Deux lois de frottements sont retenues : Nikuradse et Strickler.

La formulation de Nikuradse est plus physique en trois dimensions puisqu'elle est rapportée à la vitesse du fond alors qu'une formulation de type Strickler se rapporte à la vitesse moyenne verticale. En revanche, dès que la valeur de frottement englobe d'autres pertes de charges que celles dues au frottement du fond, il est plus pertinent d'utiliser une formulation en Strickler qui permet d'appliquer une perte de charge en relation avec la vitesse moyenne de l'écoulement.

- Une loi de type Nikuradse est donc utilisée dans l'estuaire et jusqu'à Bordeaux.
- Une loi de type Strickler est utilisée à l'amont de Bordeaux en Garonne et dans la Dordogne. Dans cette partie du modèle, dont le maillage est simplifié au maximum, l'objectif est de retrouver les hauteurs d'eau et vitesses correctes, afin d'approcher au mieux les volumes oscillants.

5.2.2. Mise en place des zones de frottement

5.2.2.1. Frottement longitudinal le long du chenal de navigation

La zone de chenal de navigation pour le frottement est définie par les cotes bathymétriques inférieures à -6,8 mIGN69.

Les données marégraphiques disponibles définissent les zones de frottements. Entre le Verdon et Bordeaux nous possédons 9 mesures distinctes (Figure 11) :

- Le Verdon ;
- Richard ;
- Lamena ;
- Pauillac ;
- Fort-Medoc ;
- Ambes ;

- Le Marquis ;
- Bassens ;
- Bordeaux.

Ces mesures sont suffisamment éloignées les unes des autres pour assigner une valeur de frottement à chacun de ces lieux.

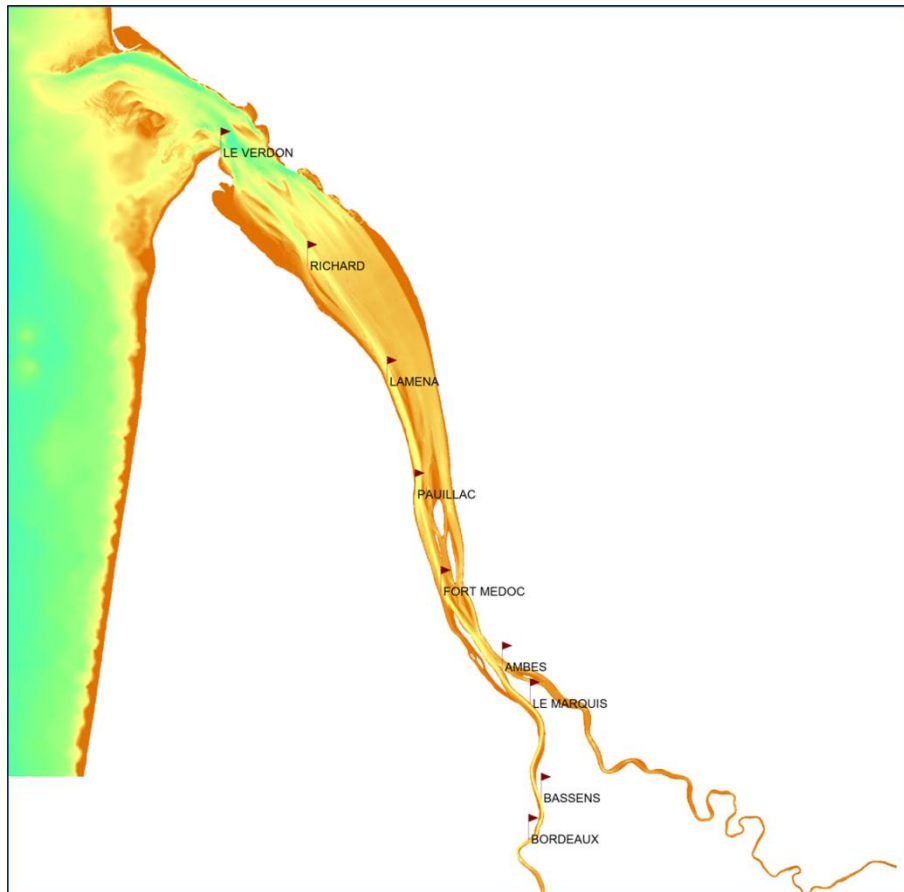


Figure 11. Localisation des différents marégraphes dans l'estuaire

La répartition du frottement le long de l'estuaire se fait en interpolant longitudinalement les valeurs de coefficients fixés à ces différents niveaux. Cette méthode d'interpolation permet de ne pas avoir de changements trop rapides entre les différents coefficients de frottement.

5.2.2.2. Frottement par zones

De plus 6 zones complètent la partie hors chenal de navigation:

- Une zone maritime allant du large jusqu'au Verdon ;
- Une zone lit mineur 1 qui correspond à l'estuaire interne du Verdon jusqu'à Bordeaux ;
- Une zone lit mineur 2 qui correspond à la partie amont de l'estuaire interne de Lamena jusqu'à Bordeaux ;
- Une zone Garonne ;
- Une zone Dordogne ;
- Une zone bras secondaire.

5.2.3. Paramétrage du frottement obtenu pour un estuaire « sans vase »

Les résultats obtenus après plusieurs calculs sont donnés sous formes de tableaux (Tableau 4 et Tableau 5) et sous la forme d'une carte de frottement.

Tableau 3 – Rugosité dans le chenal de navigation pour un « estuaire sans vase »

FROTTEMENT chenal de navigation sans vase		
	PK	Ks (Nikuradse)
PK0	0	0.02
BORDEAUX	2.96	0.001
BASSENS	8.496	0.001
LE MARQUIS	20.34	0.001
AMBES	25.79	0.001
FORT MEDOC	37.22	0.001
PAUILLAC	48.84	0.001
LAMENA	62.76	0.001
PK78	78	0.001
RICHARD	79.26	0.01
LE VERDON	96.06	0.01

(Cf. paragraphe 5.2.1, nota : au pK0, Ks de 0,02 pour éviter les sauts de Ks à la frontière)

Tableau 4 – Rugosité sur les zones complémentaires pour un « estuaire sans vase »

Frottement zones		
ZONE_MARITIME_LARGE (nikuradse)	0.01	
ZONE_LIT_MINEUR_1 (nikuradse)	0.001	/ au dessus de -6.3 m IGN69/
ZONE_LIT_MINEUR_2 (nikuradse)	0.2	/au dessus de -3m IGN69/
ZONE_GARONNE (STRICKLER)	30	
ZONE_DORDOGNE (STRICKLER)	30	
ZONE_BRAS_SECONDAIRE_GARONNE (STRICKLER)	30	

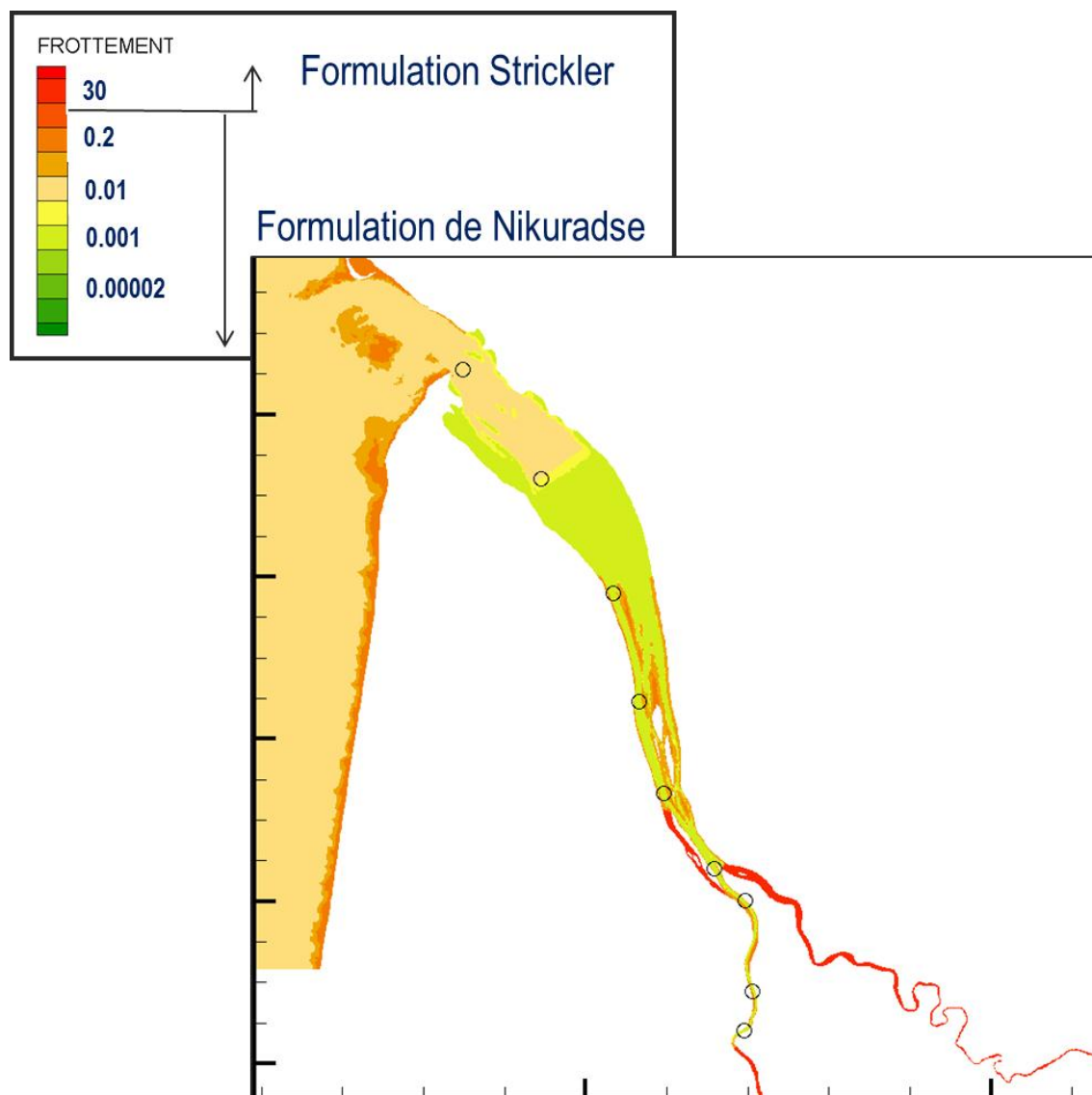


Figure 12. Carte de frottement pour un estuaire « sans vase »

Physiquement, un coefficient de rugosité (Nikuradse) de l'ordre de 0,01m est plutôt représentatif d'un sol sableux (aux formes près car un état ridé ou avec des mégas-rides peut bien sûr avoir un effet sur ce coefficient). En revanche, un frottement de l'ordre de 0,001m est plus représentatif d'un sol sablo-vaseux. Il est intéressant de voir qu'une coupure assez marquée entre ces deux types de sol a été trouvée aux alentours du marégraphe du Richard, ce qui est très cohérent avec la carte sédimentologique du SHOM.

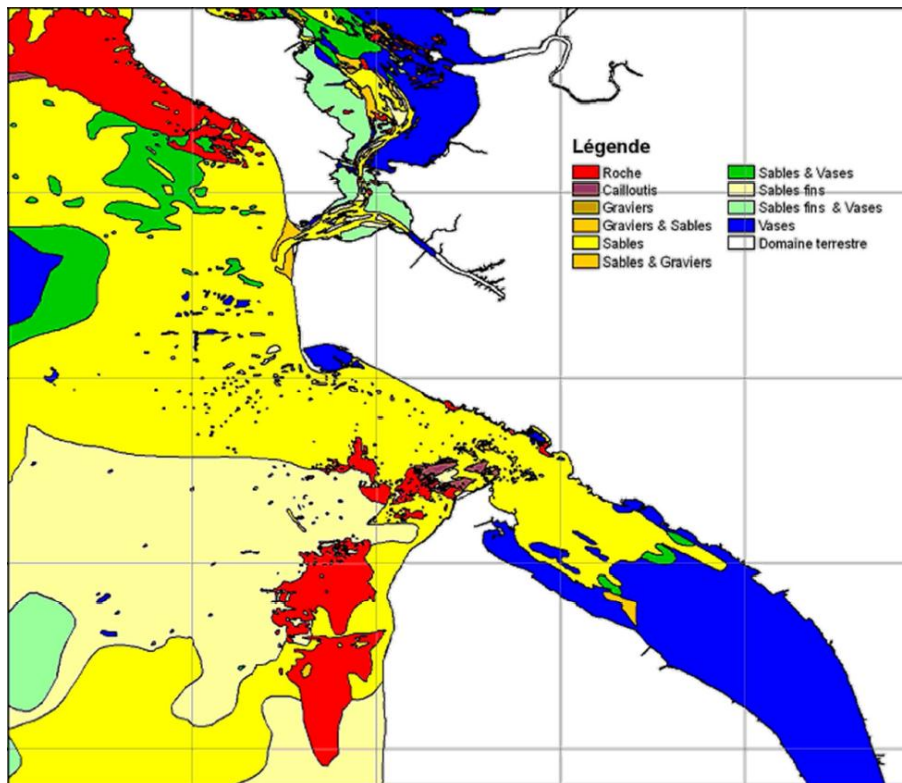


Figure 13. Carte sédimentologique du SHOM (issue de la thèse Lan Anh VAN, 2013 : *Modélisation du transport des sédiments mixtes sable-vase et application à la morphodynamique de l'estuaire de la Gironde, Réf. [4]*)

5.3. DETERMINATION DE CARTES DE FROTTEMENT DE L'ESTUAIRE EN TENANT COMPTE DE LA CREME DE VASE

Pour tenir compte de la crème de vase, nous avons calé le modèle par rapport aux mesures marégraphiques sur 3 périodes :

- Une période pour $Q > 1500 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Une période pour $Q < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Et une période intermédiaire, $Q \sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$.

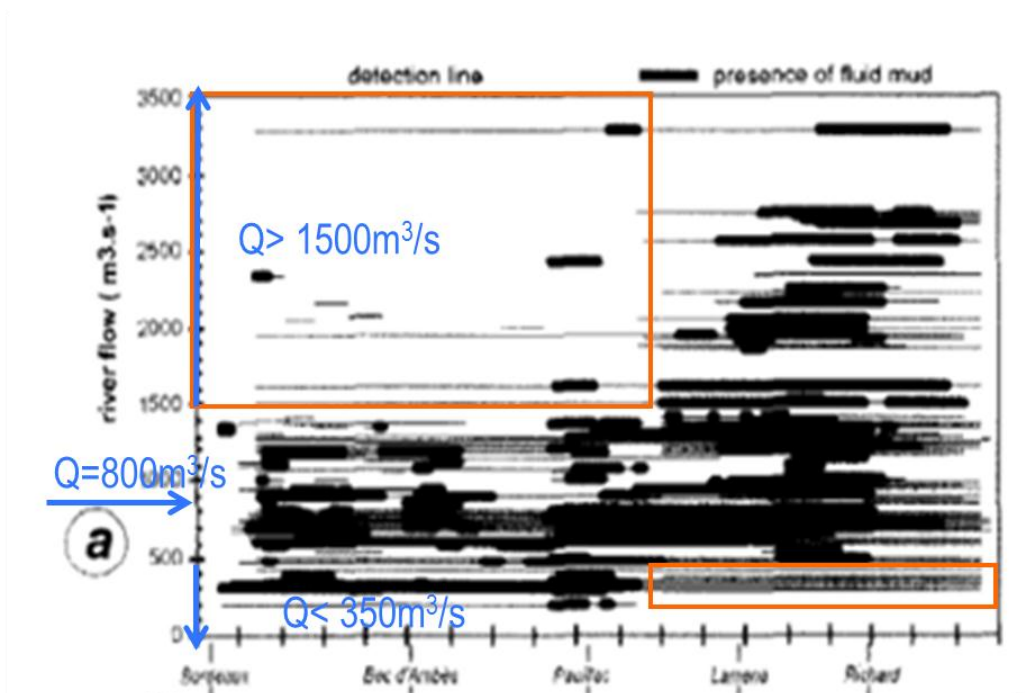


Figure 14. Correspondance entre débit et présence de crème de vase

Les périodes de calage suivantes ont été choisies dans l'hydrogramme 2008-2009 (Figure 15) :

- $>1500 \text{ m}^3/\text{s}$: période du 2 février au 16 février 2009 ;
- $800 \text{ m}^3/\text{s}$: période du 3 mars au 17 mars 2009 ;
- $<350 \text{ m}^3/\text{s}$: période du 11 août au 24 août 2009.

Ces périodes durent au moins 15 jours afin de bien prendre en compte un cycle complet de marée.

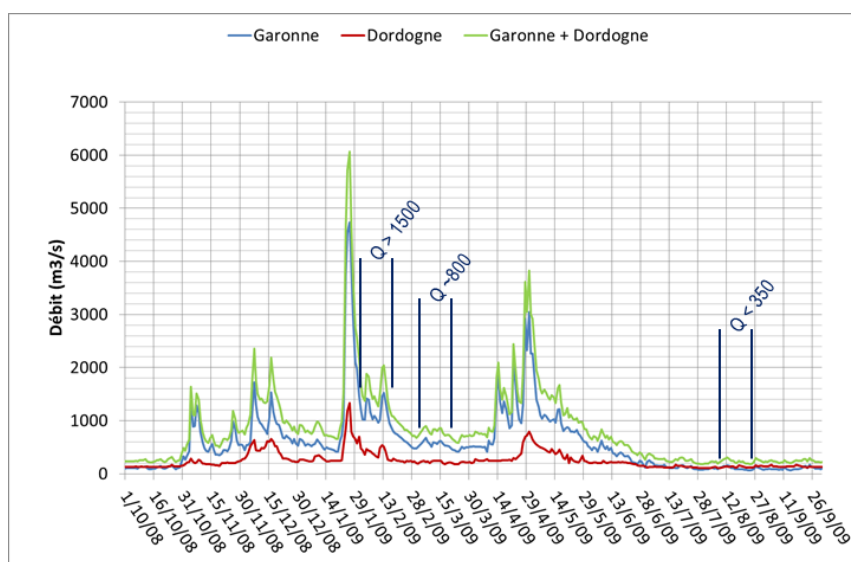


Figure 15. Choix des trois périodes retenues pour le calage des cartes de frottement avec présence de vase

Chaque calcul se base sur la carte de frottement de l'estuaire « sans vase » sur laquelle le frottement est remplacé par un frottement lisse de type crème de vase ($k_s=0,0002m$) dans une partie du chenal de navigation. L'étendue et la position sont calées jusqu'à obtenir une bonne correspondance entre les niveaux d'eau calculés et les niveaux d'eau mesurés aux marégraphes.

5.4. RESULTATS DU CALAGE

Les résultats obtenus après plusieurs calculs sont donnés sous formes de tableaux (Tableau 5 et Tableau 6) et sous la forme de trois cartes de frottement (Figure 17). Les zones encadrées en vert sont les zones où un coefficient de rugosité de type crème de vase a été appliqué pour pouvoir caler le modèle sur les mesures marégraphiques.

Tableau 5 – Rugosité dans le chenal de navigation pour un estuaire avec présence de vase

FROTTEMENT chenal de navigation				
	PK	k_s (Q 350 m ³ /s)	k_s (Q 800 m ³ /s)	k_s (Q 1500 m ³ /s)
AMONT CV Q250+2KM	0	0.02	0.02	0.02
AMONT CV Q250	2	0.00002	0.001	0.001
BORDEAUX	2.96	0.00002	0.001	0.001
AMONT CV Q800+2KM	4	0.00002	0.001	0.001
AMONT CV Q800	6	0.00002	0.00002	0.001
BASSENS	8.496	0.00002	0.00002	0.001
LE MARQUIS	20.34	0.00002	0.00002	0.001
AMBES	25.79	0.00002	0.00002	0.001
FORT MEDOC	37.22	0.00002	0.00002	0.001
PAUILLAC	48.84	0.00002	0.00002	0.001
AVAL CV Q250	54	0.00002	0.00002	0.001
AVAL CV Q250-2KM	56	0.001	0.00002	0.001
AMONT CV Q1500+2KM	58	0.001	0.00002	0.001
AMONT CV Q1500	60	0.001	0.00002	0.00002
LAMENA	62.76	0.001	0.00002	0.00002
RICHARD+1	78	0.001	0.00002	0.00002
RICHARD	79.26	0.01	0.00002	0.00002
AVAL CV Q800	81	0.01	0.00002	0.00002
AVAL CV Q800-2KM	83	0.01	0.01	0.00002
AVAL CV Q1500	96	0.01	0.01	0.00002
LE VERDON	96.06	0.01	0.01	0.00002
AVAL CV Q1500-2KM	98	0.01	0.01	0.01

Tableau 6 – Rugosité sur les zones complémentaires pour un estuaire avec présence de vase

Frottement zones		
ZONE_MARITIME_LARGE (nikuradse)	0.01	
ZONE_LIT_MINEUR_1 (nikuradse)	0.001	/ au dessus de -6.3 m IGN69/
ZONE_LIT_MINEUR_2 (nikuradse)	0.2	/au dessus de -3m IGN69/
ZONE_GARONNE (STRICKLER)	30	
ZONE_DORDOGNE (STRICKLER)	30	
ZONE_BRAS_SECONDAIRE_GARONNE (STRICKLER)	30	

Les positions de crème de vase obtenues par calage des niveaux d'eau sont positionnées comme suit :

- $Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$: du PK 2 à 54 ;
- $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$: du PK6 à PK81 ;
- $Q > 1500 \text{ m}^3/\text{s}$: du PK 54 à PK 90.

Dans la figure ci-après (Figure 16) représentant des mesures de position de crème de vase, une très bonne correspondance du modèle avec les relevés des bandes sonar est observée. Ceci confirme bien que cette méthodologie de modélisation des frottements est physiquement bien représentative des observations en nature.

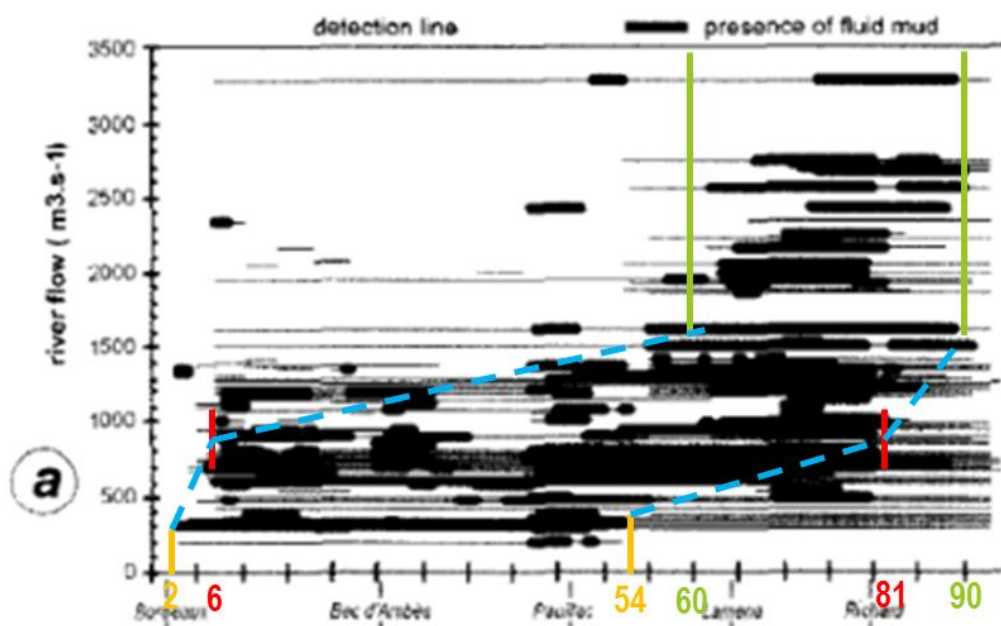


Figure 16. Correspondance entre le calage de la position de crème de vase dans le modèle et la position de la crème de vase relevée en nature

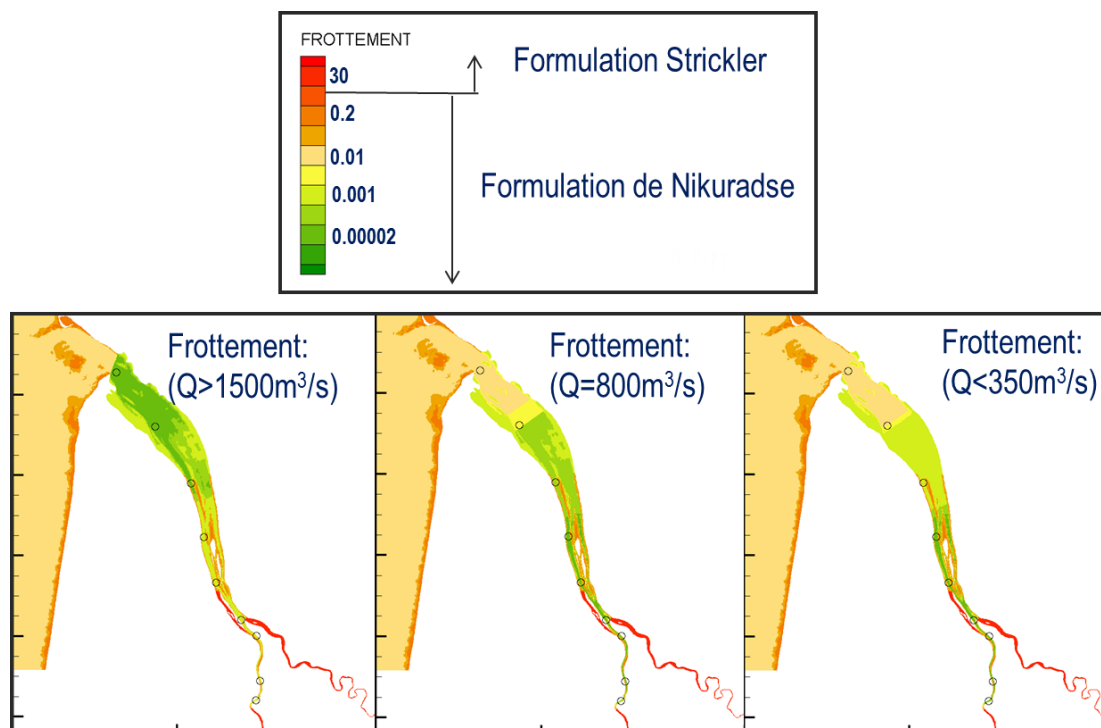


Figure 17. Cartes de frottement pour un estuaire avec présence de vase pour un débit de 1500, 800 et 350 m³/s

Les trois cartes de frottement obtenues et visibles sur la Figure 17 sont alors interpolées temporellement au cours du calcul en fonction des débits journaliers de la Garonne et de la Dordogne imposés.

L'ensemble des résultats de comparaison aux marégraphes obtenus après calage sont présentés :

- En Annexe 1 par débit et sur 15 jours (fig 1.5 à 1.7) ;
- En Annexe 1 par marégraphe et sur 3 jours de Vives eaux (fig 1.8 à 1.16).

Le modèle représente bien la propagation de la marée dans l'estuaire. Les niveaux modélisés sont globalement cohérents avec les mesures et les instants de Pleine Mer et de Basse Mer modélisés sont également en phase avec les mesures (aucun décalage temporel significatif n'apparaît). Le modèle hydrodynamique 3D peut être considéré à ce stade comme calé en niveaux.

6. VALIDATION DE LA DYNAMIQUE ESTUARIEENNE

Afin de valider la dynamique estuarienne, des comparaisons avec des mesures in-situ sont effectuées sur l'année 2008-2009 en courant et en salinité.

6.1. VALIDATION DE LA COURANTOLOGIE

Peu de mesures in-situ sont disponibles dans l'estuaire de la Gironde à des dates concomitantes.

Cependant, à l'issue de l'année hydrologique 2008-2009, il a été effectué des mesures par ADCP au point P4 proche de Pauillac par EDF R&D (Figure 18). La figure de positionnement et le graphique des mesures de vitesse (courbe en tirets noirs) est issue de la publication : N. Huybrechts et al. 2012. [Réf. 5]. Les résultats de notre modèle 3D sont tracés en bleu sur ce même graphique. Ces derniers sont tout à fait cohérents avec la mesure.

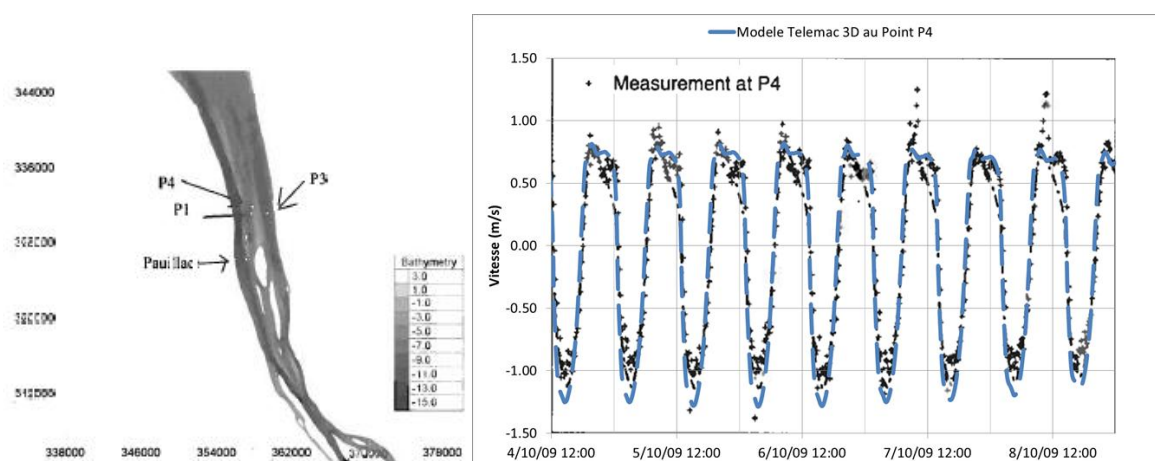


Figure 18. Comparaisons des résultats du modèle 3D en vitesses aux mesures ADCP effectuées par EDF R&D au point P4 (proche Pauillac) [Ref 5]

6.2. VALIDATION DE LA DYNAMIQUE HALINE

6.2.1. Modèle de turbulence vertical utilisé

La bonne reproduction des stratifications verticales en courant et salinité nécessite de porter une attention particulière à la modélisation de la turbulence verticale générée par l'écoulement 3D. Le développement de la modélisation de ces processus dans l'estuaire de la Loire nous a amené à mettre en place un modèle multicouche testé avec succès dans les estuaires de la Loire et de la Seine (Walther R et al. 2009. [Réf.6]).

Le principe repose sur des bases physiques. Le modèle de longueur de mélange classique consiste à faire l'hypothèse qu'une échelle de la turbulence domine la dynamique de mélange. Cette hypothèse est reprise par les modèles K-L. Seule l'énergie des tourbillons est calculée (K), pas son échelle de dissipation qui est fixée (L). En milieu océanique et fluvial et dans un contexte non stratifié, la longueur de mélange a été déterminée à partir de la source d'émission de cette turbulence : la couche limite de fond. On a alors $L_m = K \cdot 0,2 \cdot H$ (avec K =constante de Karman = 0,41 ; L_m =longueur de mélange et H =Hauteur d'eau).

La prise en compte des effets de stratification dans ce type de modèle a été réalisée au travers de caractéristiques d'inhibition par effet de cisaillement et se traduit par une fonction d'amortissement dont différents auteurs ont développé des formulations (tels que Lehfeldt et Bloss) sur la base de différents jeux de mesures expérimentales ou in situ. Cette fonction s'applique au modèle de turbulence par convolution directe avec la viscosité turbulente.

Cependant, les applications qui sont faites couramment oublient les hypothèses de base retenues. En effet, pour appliquer un modèle de longueur de mélange il faut en principe connaître la taille de l'échelle de dissipation dominante. C'est ce qui est corrigé dans les modèles bicouches océaniques qui servent à représenter l'évolution des thermoclines dans les très grands bassins océaniques. La longueur de mélange verticale au-dessus de la thermocline est conditionnée par l'épaisseur de la thermocline et non pas par l'épaisseur de la hauteur d'eau océanique. Nous proposons donc de reprendre ce principe afin de l'appliquer au cas estuarien en cas de stratification forte. L'objet n'est pas de remplacer le rôle de la fonction d'amortissement, mais de tenter de corriger l'évaluation initiale de la longueur de mélange verticale en calculant de manière automatique la bonne échelle de dissipation sur la verticale.

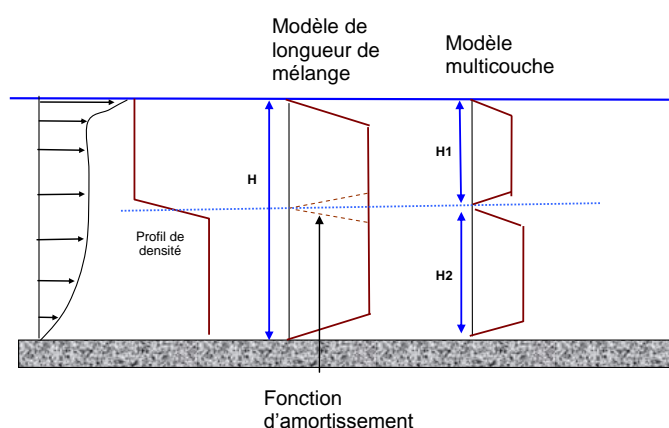


Figure 19. Schéma de principe du modèle de mélange multicouche

6.2.2. Mise en application pratique

Le principe de la longueur de mélange est de mettre en relation la viscosité turbulente avec la taille des tourbillons pour une turbulence pleinement développée.

La correction appliquée à la longueur de mélange est basée sur une fonction à seuil. Si la stratification est suffisamment forte, alors les échanges entre les couches supérieures et inférieures sont faibles et la production turbulente verticale dans la couche supérieure est supposée indépendante de la couche inférieure. La longueur de mélange est alors calculée en appliquant la longueur de mélange de manière indépendante dans les deux cas.

La mise en œuvre se fait sur la base de l'analyse du profil vertical du nombre de Richardson (RI). Les couches définies par $RI < Cst$ sont recherchées. Cette constante (Cst) est ajustable et grâce à une analyse basée sur les publications traitant des gradients océaniques de température, la valeur de 0,25 a été choisie.

Pour chacune de ces couches, son épaisseur est calculée et alors le principe de longueur de mélange est appliqué :

- Si le nombre de Richardson est inférieur à 0.25, traduisant un effet faible de la stratification, le modèle n'a pas pour vocation d'agir et c'est le modèle classique de longueur de mélange basé sur la hauteur d'eau qui est appliqué. Dans ce cas, la fonction d'amortissement est appliquée réduisant la diffusion turbulente selon la formulation employée ;
- Si le nombre de Richardson est supérieur à 0.25, nous considérons l'effet de la stratification comme dominant et toute turbulence verticale inhibée. Le cisaillement est alors total.

6.2.3. Facteur sur les forces de densité

Une correction du calcul des forces de densité induites par les différences de densité a été également introduite dans le modèle en complément à la mise en place du modèle multicouches afin de pallier aux sous-estimations des modèles qui reproduisent des gradients moins marqués qu'en nature.

Cette insuffisance se justifie par le fait que les courants de densité sont proportionnels aux gradients de densité. Ces gradients peuvent être très marqués en nature alors qu'ils sont souvent lissés numériquement ce qui induit des courants de densités modélisés plus faibles qu'en nature. Deux raisons principales expliquent ce phénomène :

- Dans notre cas, le modèle comprend 14 plans de calcul ce qui ne permet pas une estimation précise des gradients. En effet, la densité calculée (comme toute autre variable) est discrétisée suivant le maillage, les gradients ont donc tendance à être lissés notamment lorsque l'on a peu de plans sur la verticale (les gradients sont dilués à l'échelle de la maille) ;
- Les propriétés des schémas numériques à caractère « conservatif » ont tendance aussi à lisser les fronts marqués.

A ce stade, un renforcement simple et uniforme a été calé et consiste à multiplier par 1,5 le gradient de densité calculé afin d'amplifier l'effet des forces de courant de densité.

6.2.4. Modélisation haline de l'année hydrologique 2008-2009

L'année hydrologique 2008-2009 a été simulée et les résultats de salinité en surface et au fond ont été extraits à chaque position de marégraphe afin d'apprécier la dynamique haline tout au long de l'estuaire au cours d'une année hydrologique complète (**Annexe 1 : fig 1.17**).

Ces graphiques permettent de montrer le gradient de salinité observé tout au long de l'estuaire et l'importance que peut avoir le débit sur la variabilité en salinité.

A noter également la stratification que l'on peut observer principalement à l'aval et principalement pendant les périodes de Mortes eaux. La diminution d'intensité des vitesses permet la mise en place d'une stratification importante qui induit de fortes remontées salines par le fond depuis l'aval durant ces périodes.

Lors des périodes de Vives eaux, les salinités sont homogénéisées entre le fond et la surface car l'intensité des vitesses permet un meilleur mélange des couches d'eaux et une destruction partielle des stratifications existantes. En revanche, les amplitudes de salinité journalières sont plus importantes qu'en Mortes eaux étant donné que les excursions longitudinales dans l'estuaire sont amplifiées.

6.2.5. Mesures disponibles

Le réseau d'observation automatisée pour la surveillance de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde (MAGEST) permet d'avoir sur l'année hydrologique 2008-2009, une mesure en continu de la salinité à 1,5m sous la surface, en 2 points dans notre zone d'intérêt : Pauillac et Bordeaux (**Figure 20**).

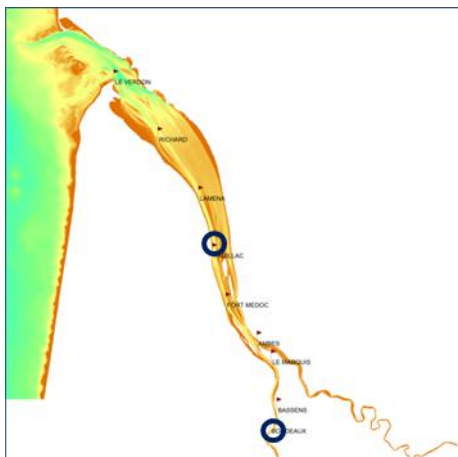


Figure 20. Station du réseau MAGEST qui permettent une comparaison avec le modèle en salinité

De plus, le Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) a permis de récupérer sur 3 lieux environ huit points de mesures de salinité à Pleine mer, à Basse mer, et pour deux profondeurs (Figure 21) :

- PK86 : -1m et -8m sous la surface ;
- PK52 : -1m et -7m sous la surface ;
- PK30 : -1m et -8m sous la surface.

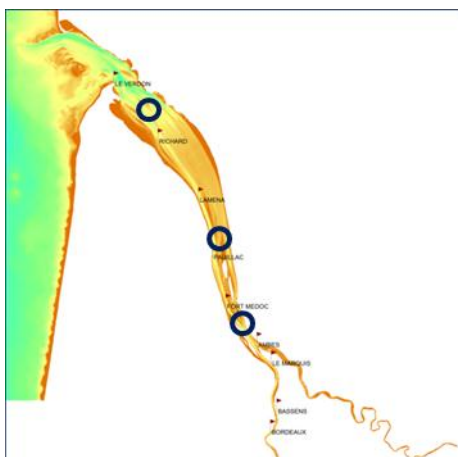


Figure 21. Points de mesures SOMLIT qui permettent une comparaison avec le modèle en salinité

6.2.6. Comparaison aux mesures

Les résultats du modèle 3D ont été comparés à l'ensemble de ces mesures aux différentes profondeurs mesurées et ceci sur l'ensemble de l'année hydrologique 2008-2009. Les figures sont présentées en **Annexe 1** comme suit :

- Fig 1.18 : au PK86 ;
- Fig 1.19 : au PK52 ;
- Fig 1.20: à Pauillac ;
- Fig 1.22: au PK30 ;
- Fig 1.22: à Bordeaux.

Pour tous les points de mesures, une très bonne représentativité de la dynamique annuelle haline est observée, avec une bonne réponse du modèle aux variations de débit imposées.

Les stratifications sont bien représentées entre le fond et la surface avec cependant une sous-estimation locale sur une marée de Mortes Eaux exceptionnellement stratifiée en hiver au PK 86 et ceci malgré une très forte stratification modélisée ce jour, ce qui apparaît comme une limite ponctuelle de la modélisation.

La dynamique estuarienne étant calée et validée en niveau, courant et salinité, le modèle est à ce stade, prêt pour reproduire la modélisation des processus vaseux et un scénario de clapage de sédiment.

REFERENCES

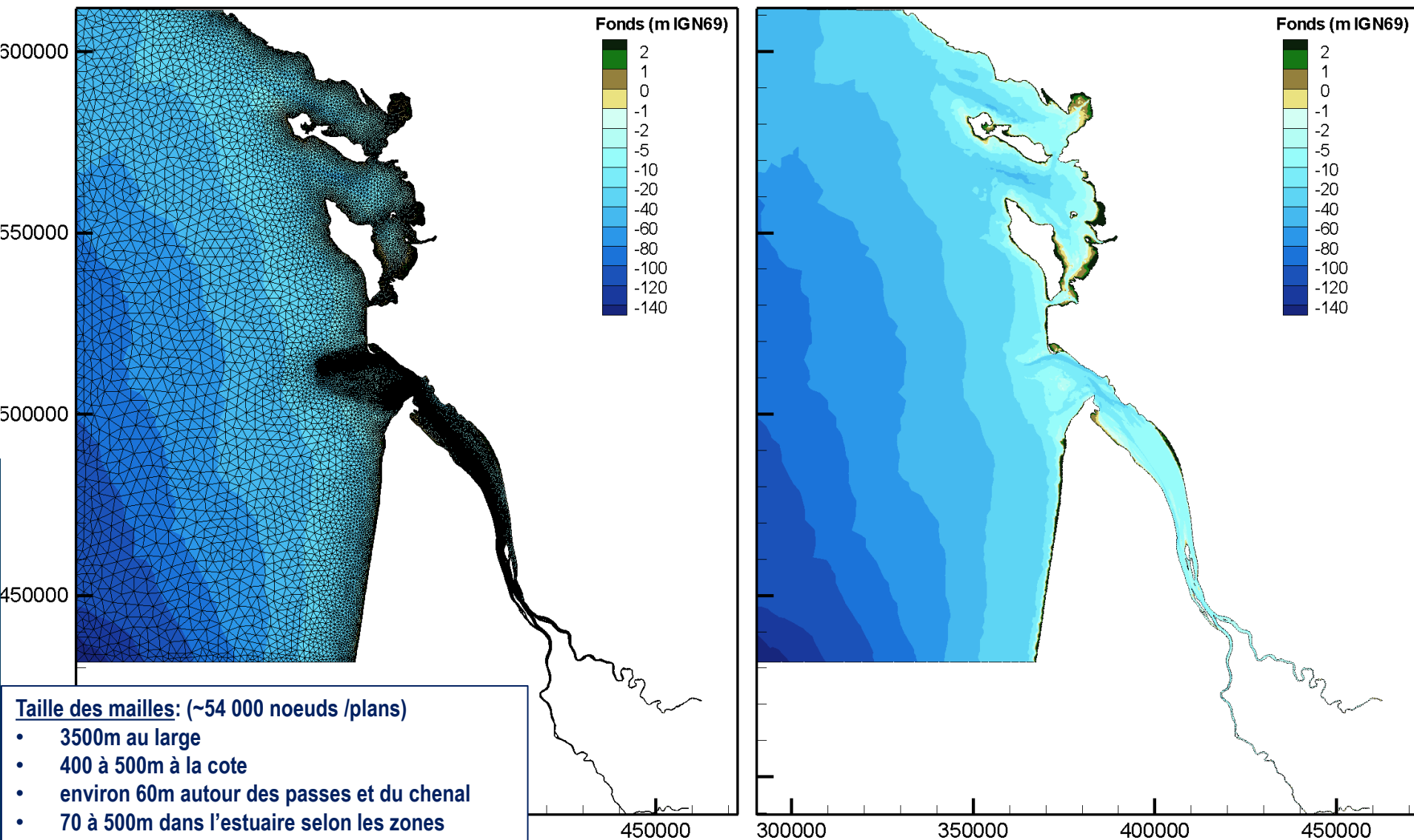
- [Ref. 1]: Hamm L. and Walther R., Morphodynamic coupling of bottom roughness and fluid mud for modeling tidal propagation in the Loire estuary, Proc. 31 st International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, World scientific, Vol. 3, 2832-2841, ICCE 2008
- [Ref. 2]: Walther R., Schaguene J., Hamm L., David E., 2012. Coupled 3D modeling of turbidity maximum dynamics in the Loire estuary, Coastal Engineering Proceedings, 1(33)
- [Ref. 3]: Aldo Sottolichio, Patrice Castaing - « A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary » - Surface Geosciences – Oceanography – 1999
- [Ref. 4]: Lan Anh VAN, Thèse : Modélisation du transport des sédiments mixtes sable-vase et application à la morphodynamique de l'estuaire de la Gironde, Laboratoire d'Hydraulique Saint – Venant, Université Paris-Est, 2013
- [Ref. 5]:N. Huybrechts, C. Villaret, F. Iyad, Optimized predictive two-dimensionnal hydrodynamic model of the Gironde Estuary in France, Journal of waterway, Port, Coastal dan Ocean Engineering, 2012
- [Ref. 6]: Walther R., Rivier A., Rieu J., David E. and Hamm L., Modeling three-dimensional hydro-sedimentary of the estuary of the Loire - evaluation of vertical turbulence model, Société hydraulique de France, Morphodynamics and sediment management in estuaries, bays and deltas, Paris, France, 22-23 September 2009

oOo

ANNEXE 1

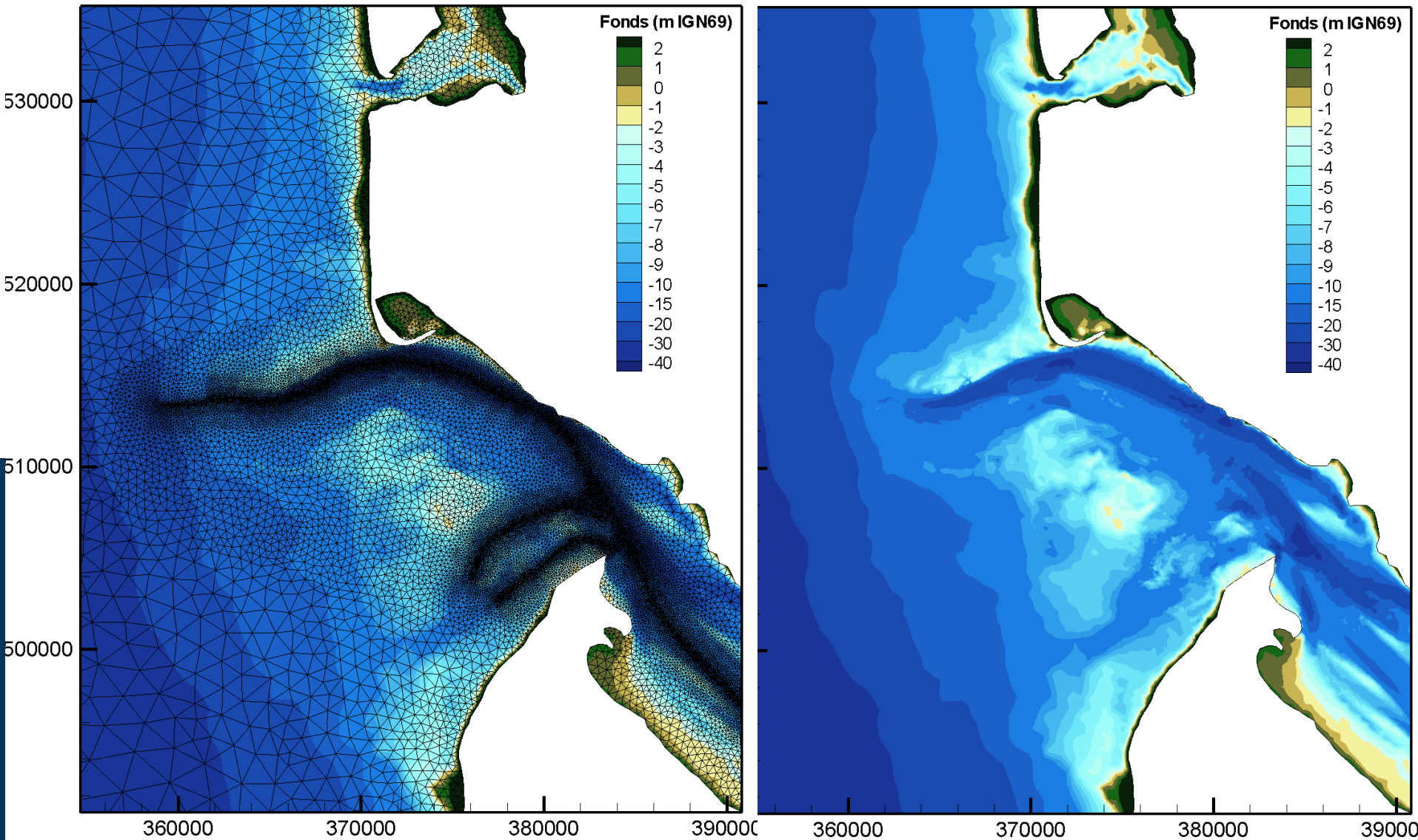
FIGURES HORS TEXTE

Emprise, maillage et bathymétrie: vue globale

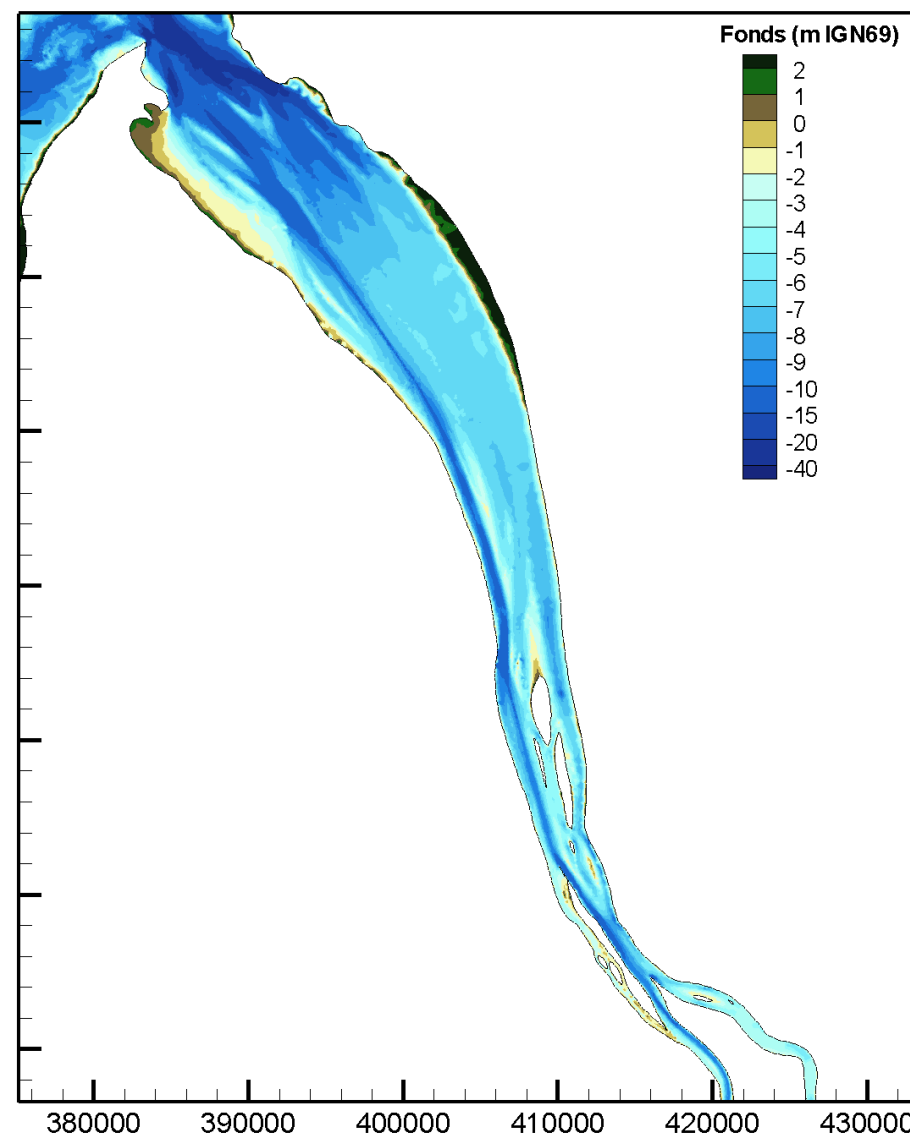
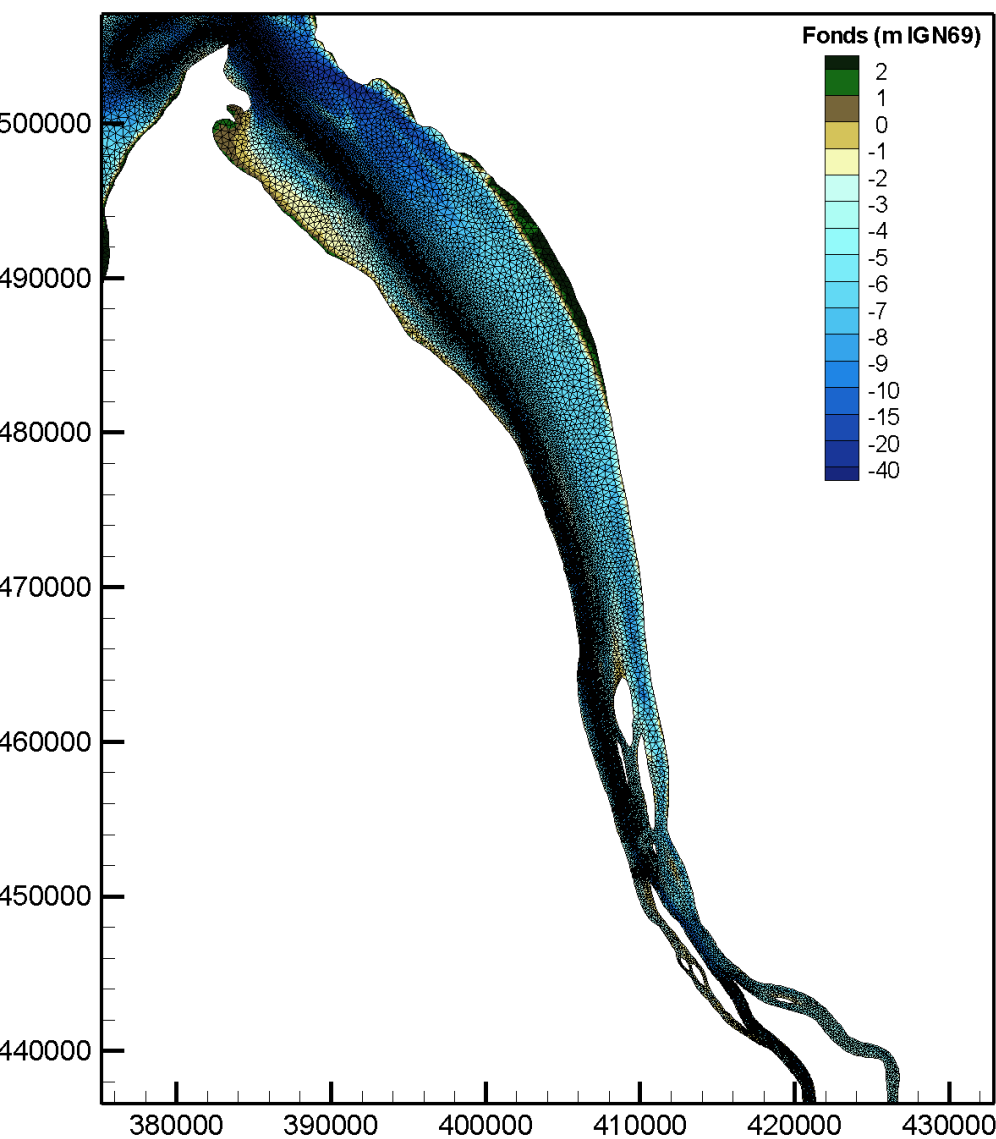
Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures, Mars 2016 ARTELIA 1

Maillage et bathymétrie: vue sur l'embouchure

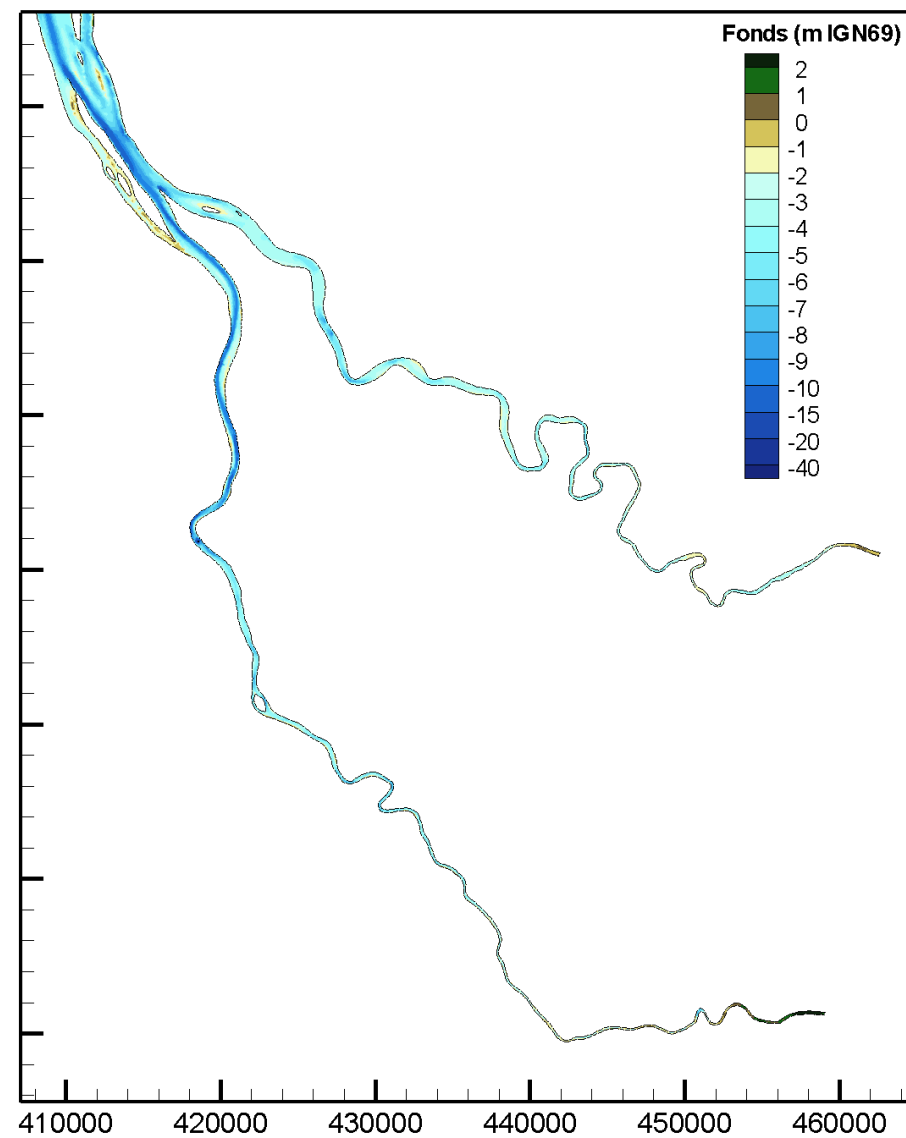
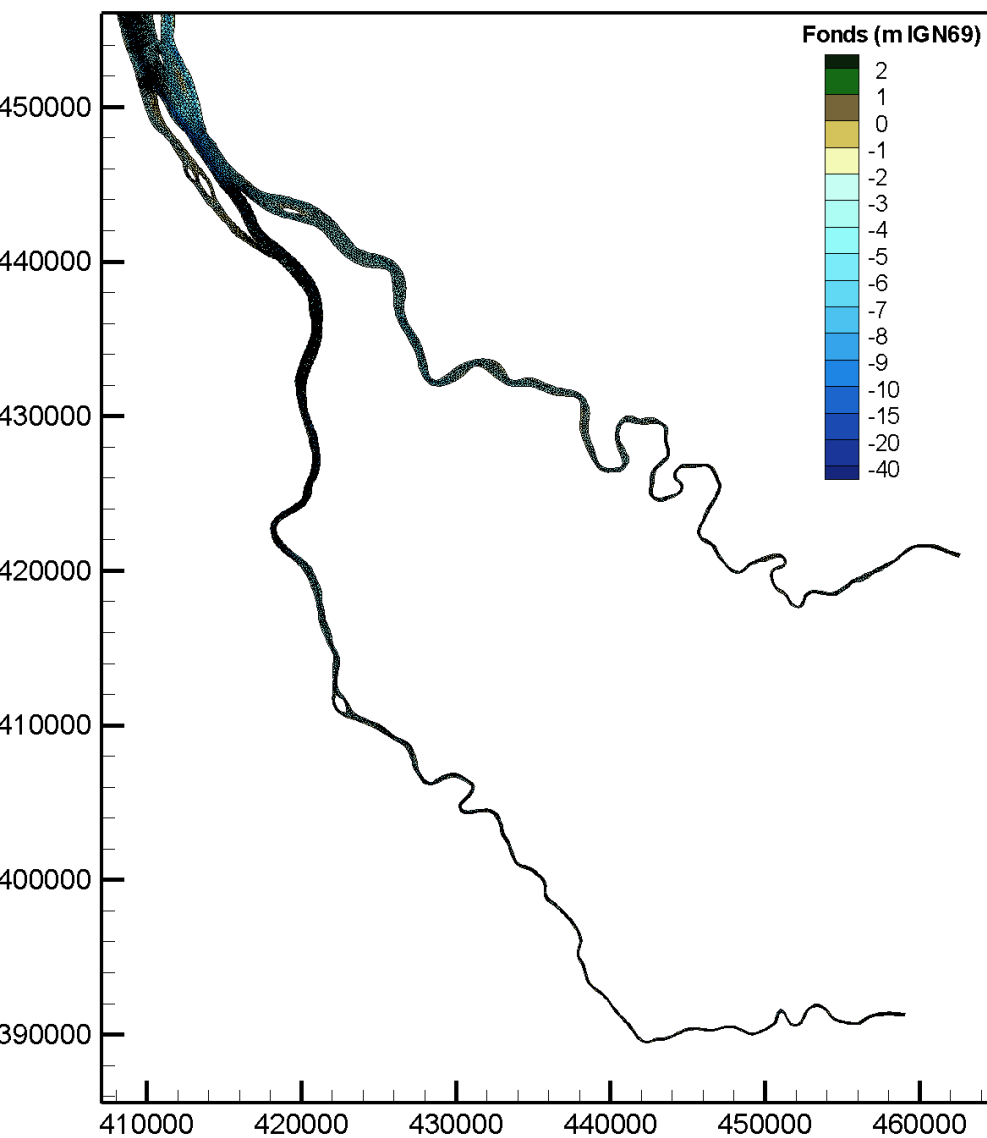
Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures, Mars 2016 **ARTELIA** 2

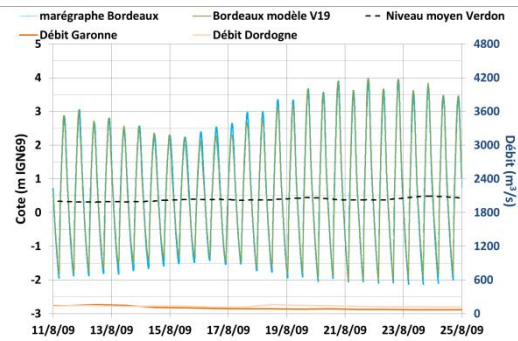
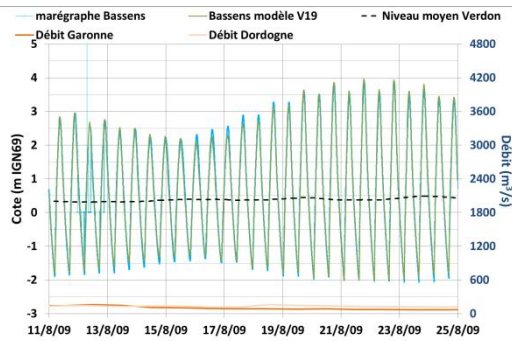
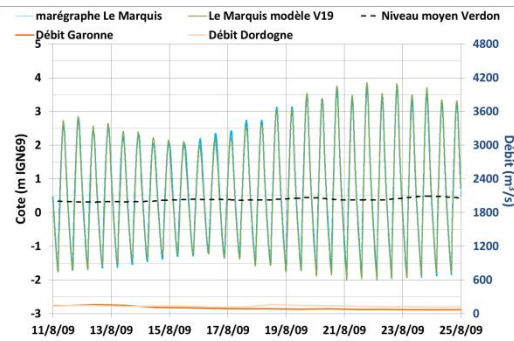
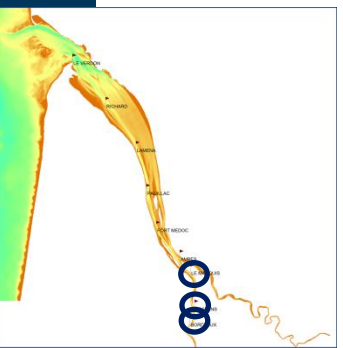
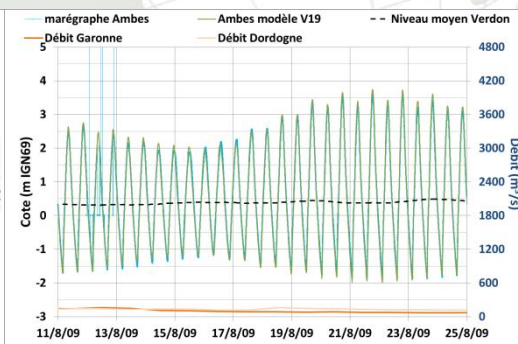
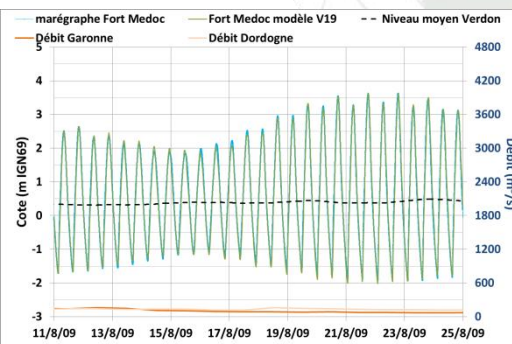
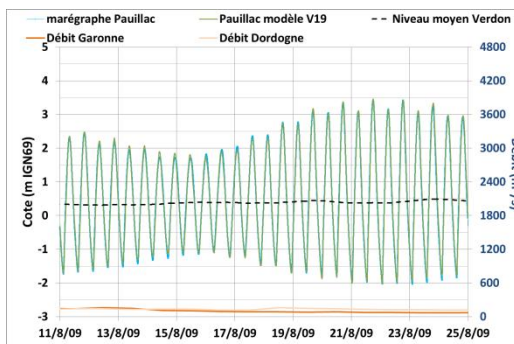
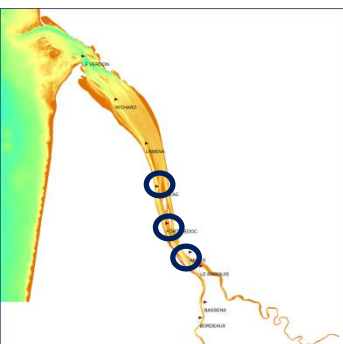
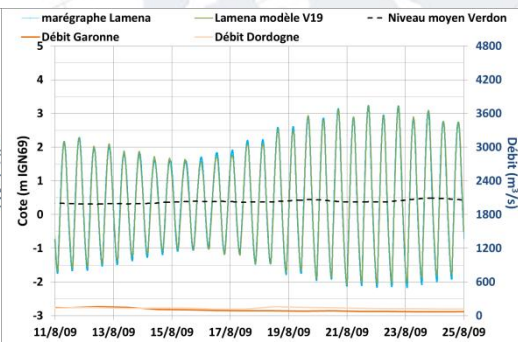
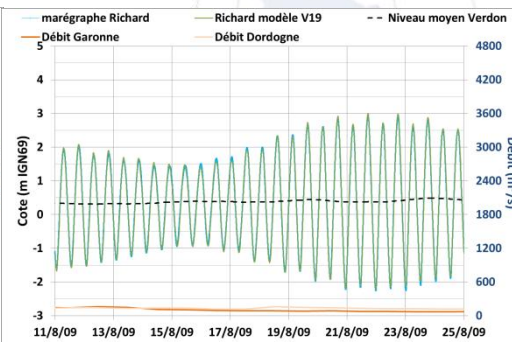
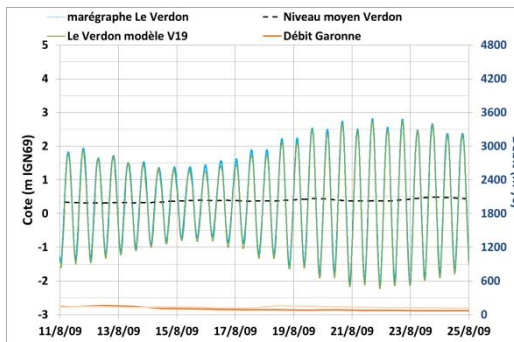
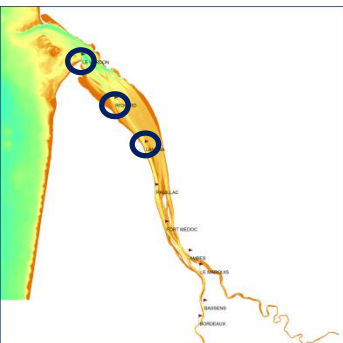


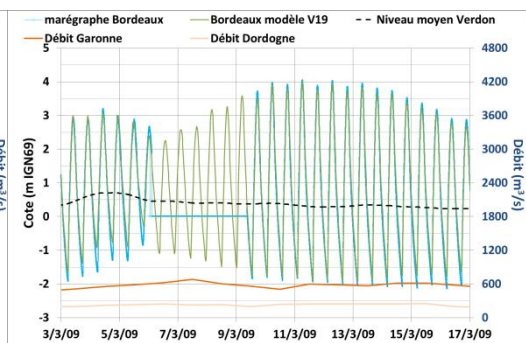
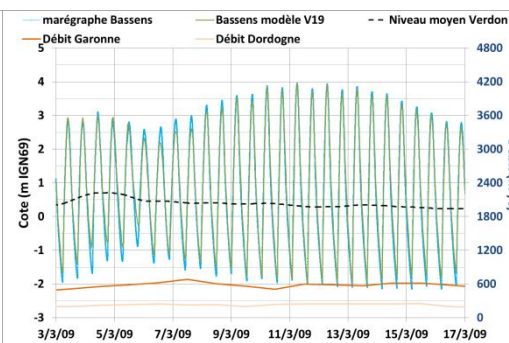
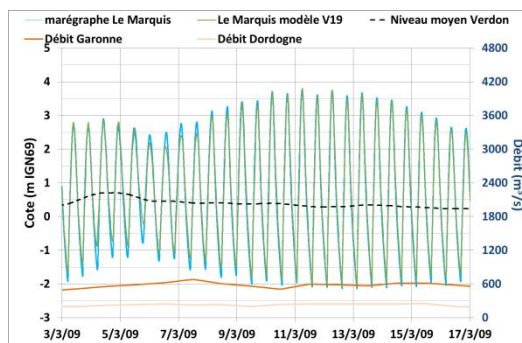
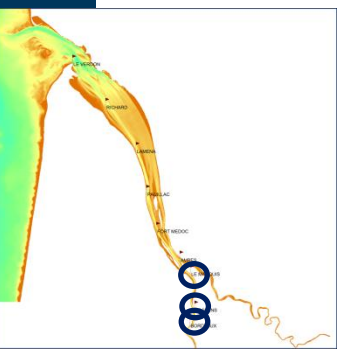
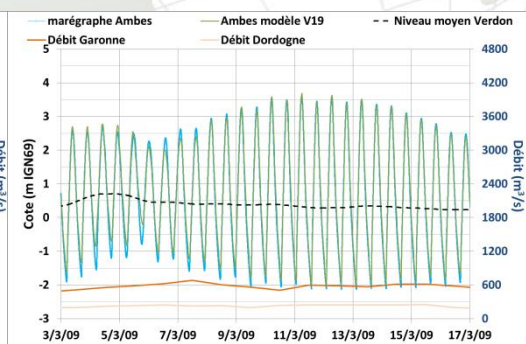
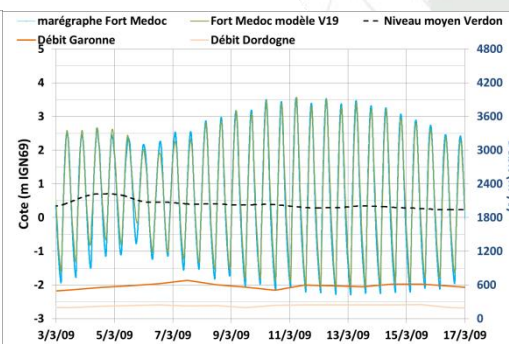
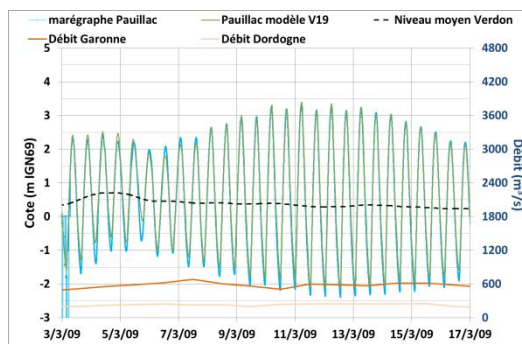
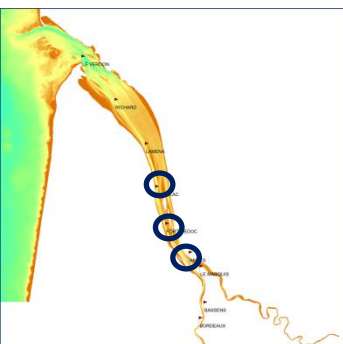
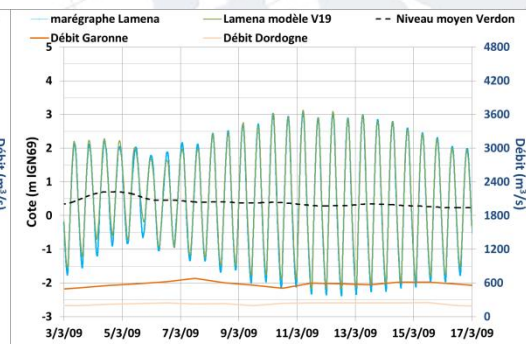
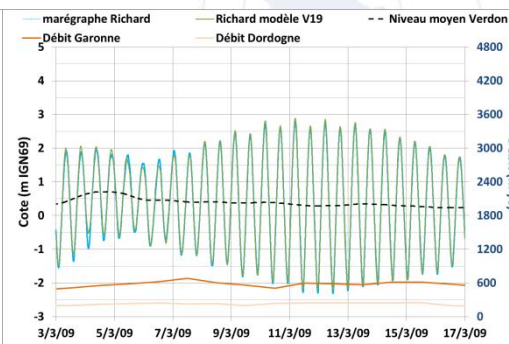
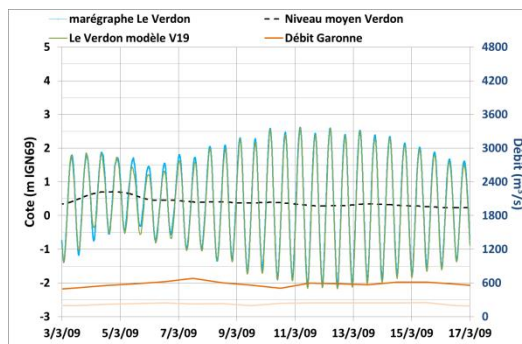
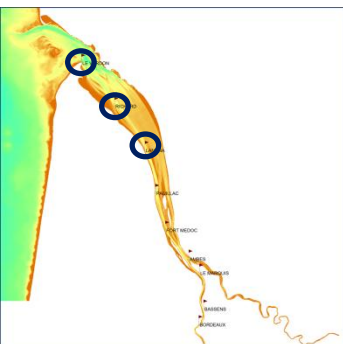
Maillage et bathymétrie: vue sur l'estuaire interne



Maillage et bathymétrie: vue sur l'amont de l'estuaire

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures, Mars 2016 ARTELIA 4

Période $Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$
 Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
 Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures , Mars 2016 ARTELIA 5


Période Q $\sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$ Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures, Mars 2016 ARTELIA 6

Période Q crue = 1600m³/s

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures, Mars 2016 ARTELIA 7

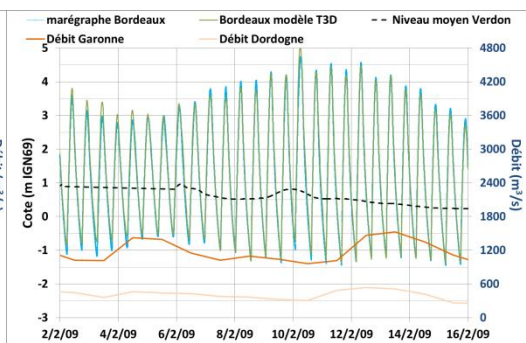
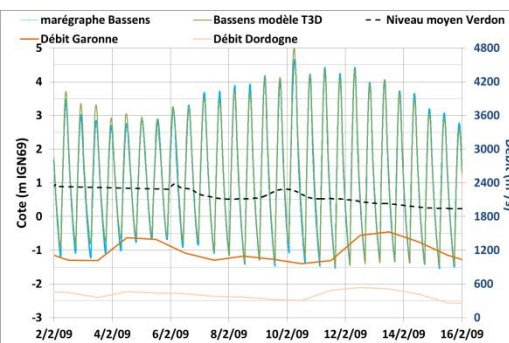
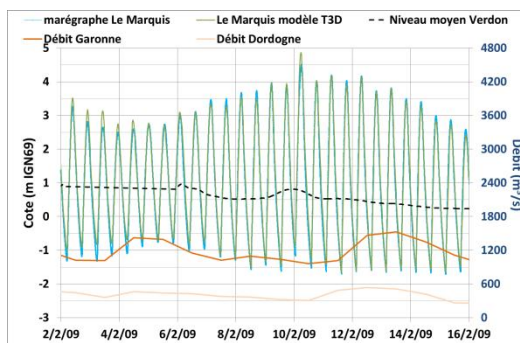
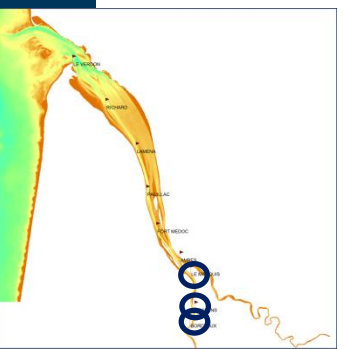
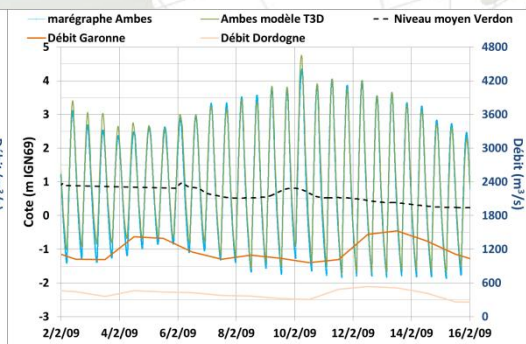
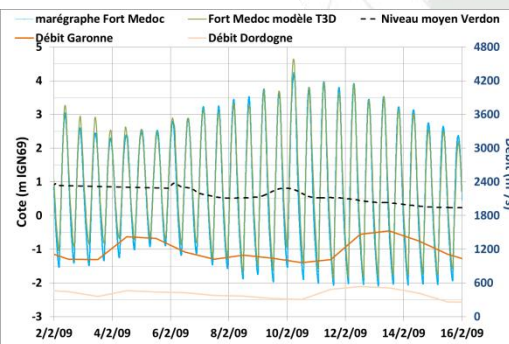
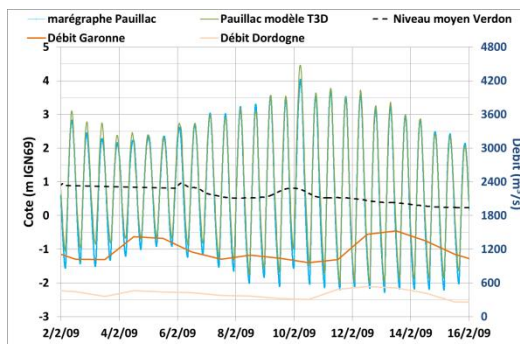
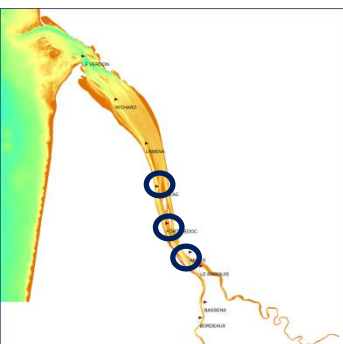
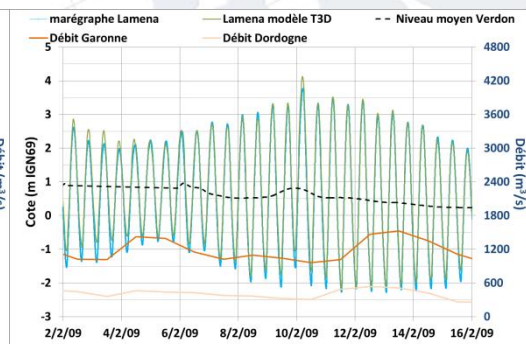
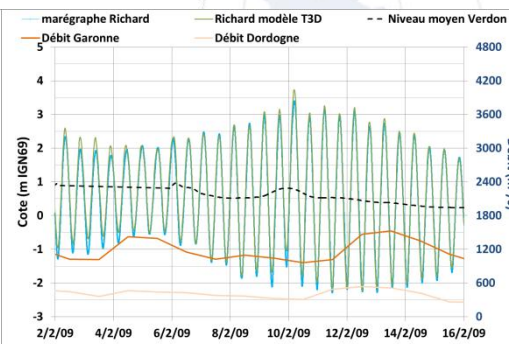
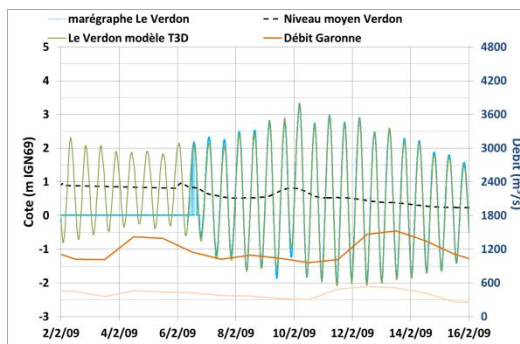
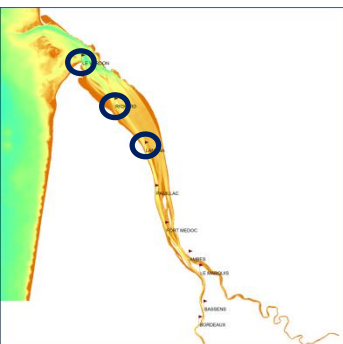


FIG 1.8

Construction, calage et validation du Modèle 3D hydrodynamique



Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

LE VERDON

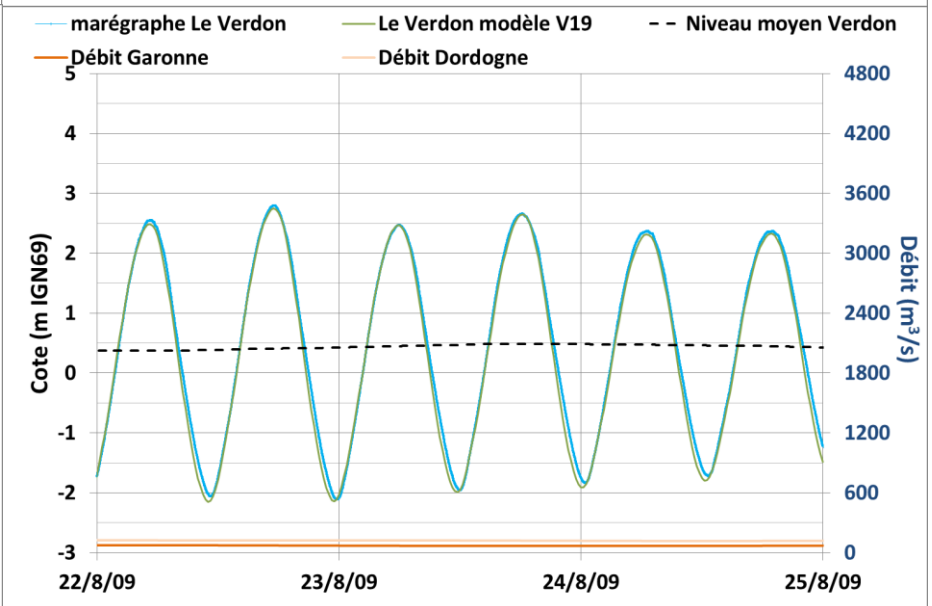
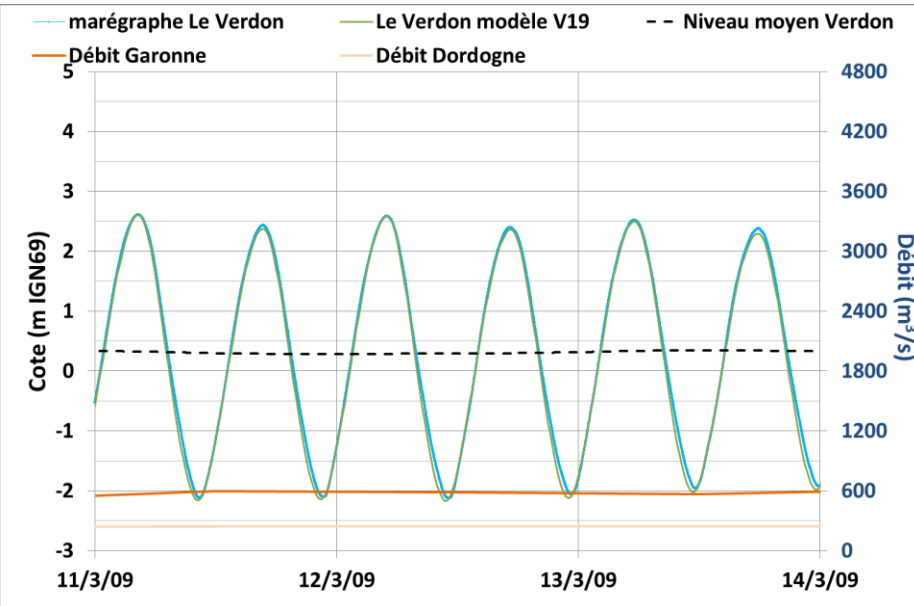
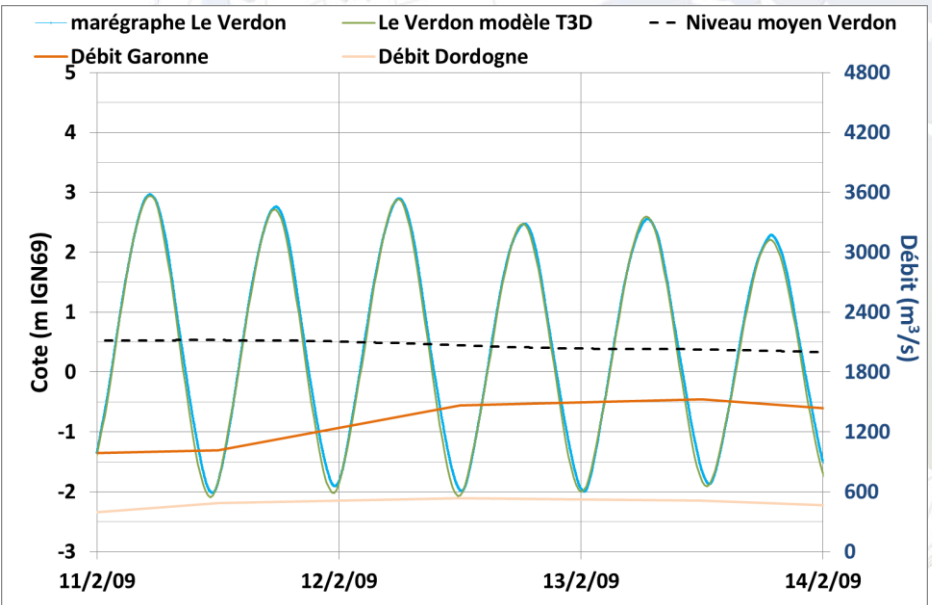
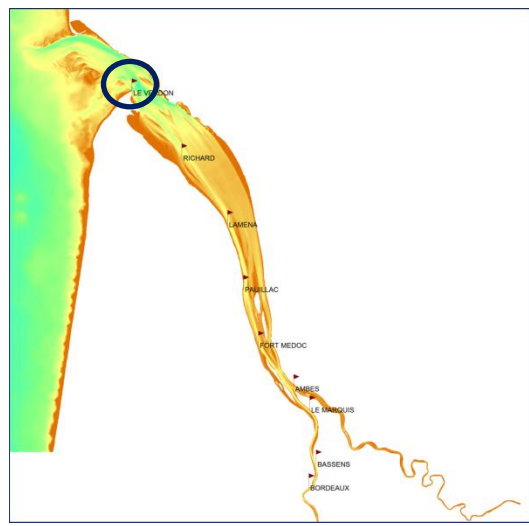
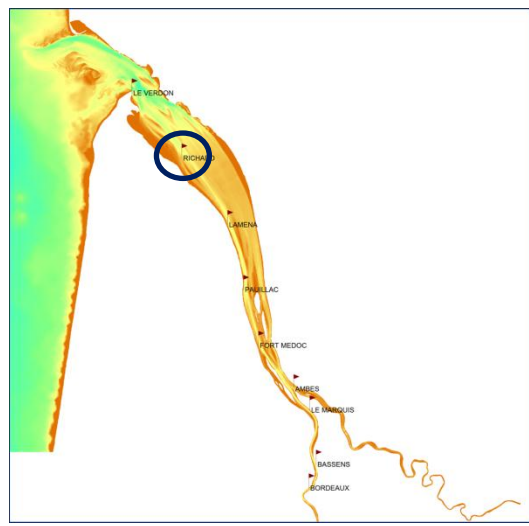


FIG 1.9

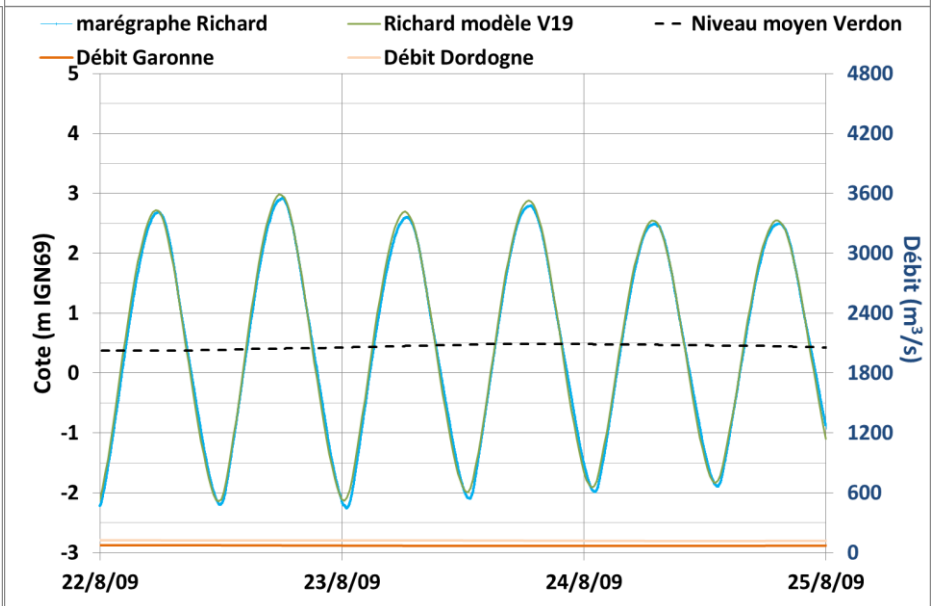
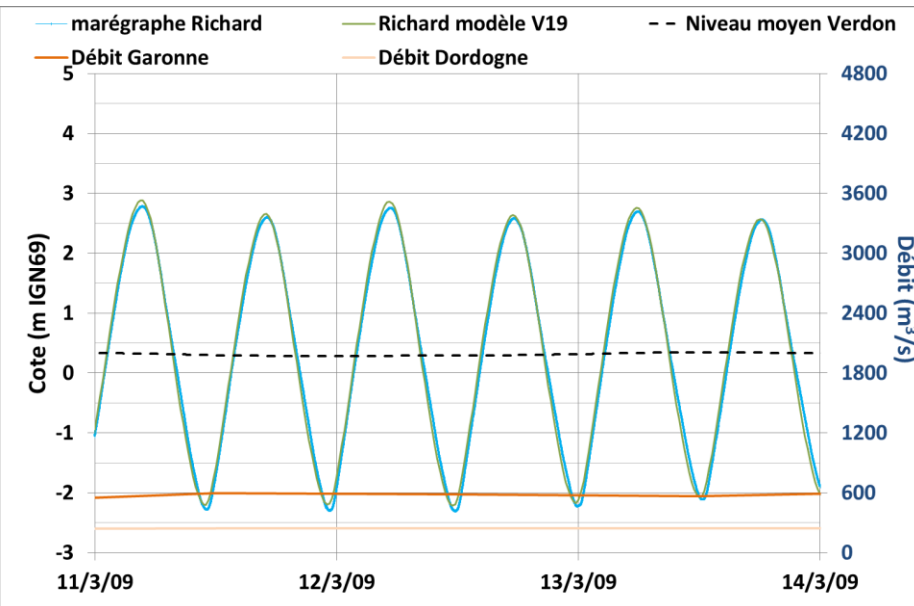
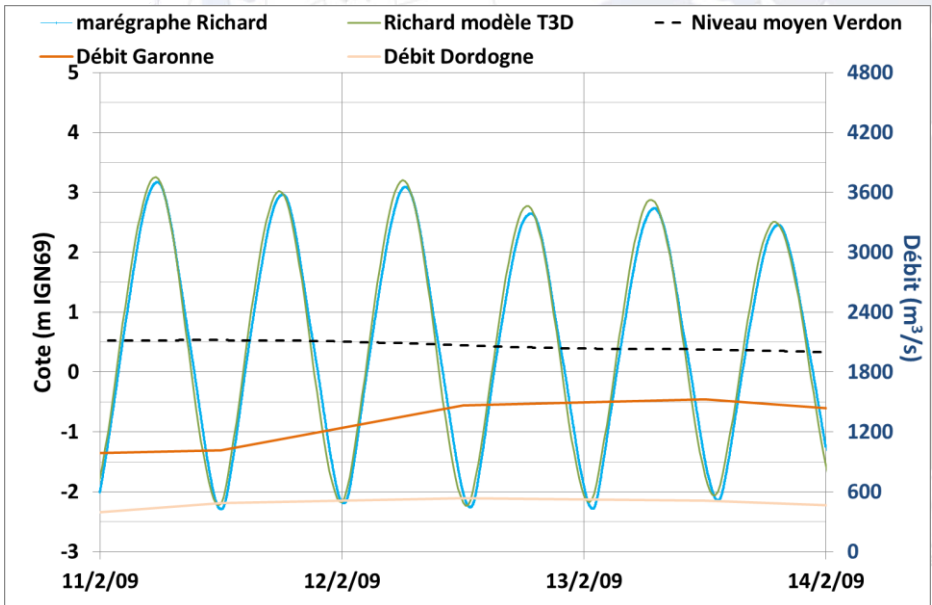
Construction, calage et validation du Modèle 3D hydrodynamique



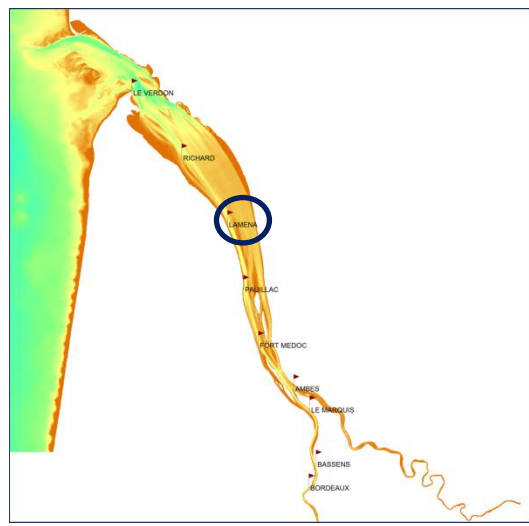
RICHARD



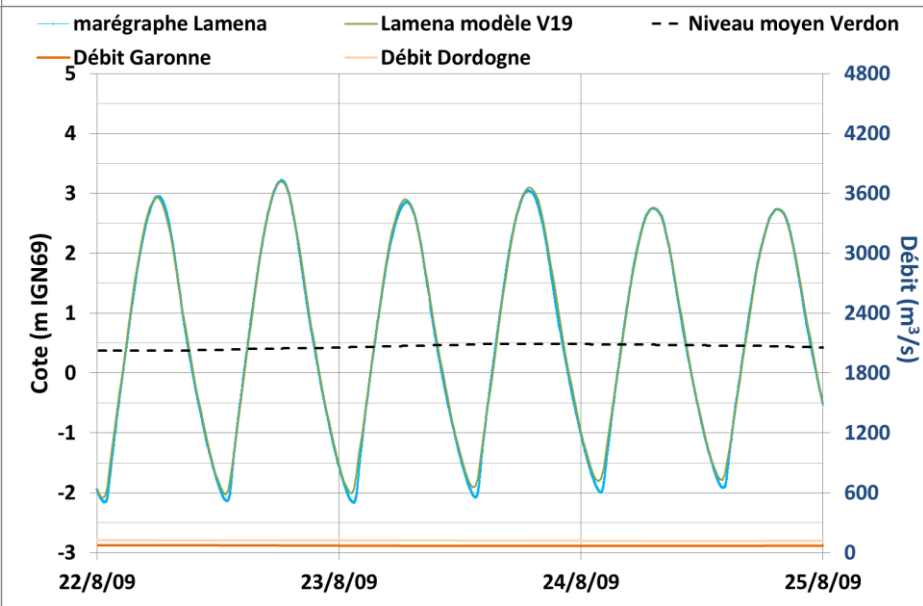
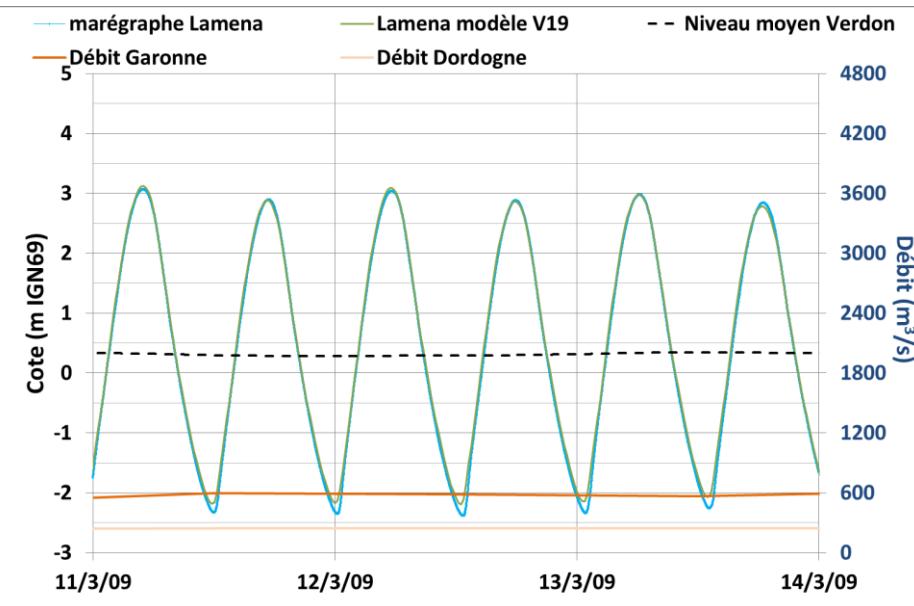
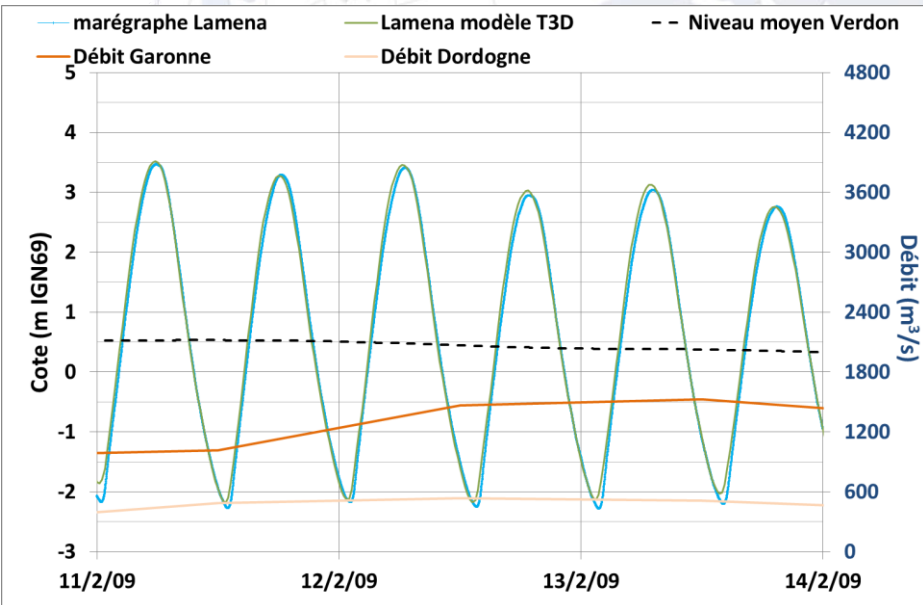
Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde



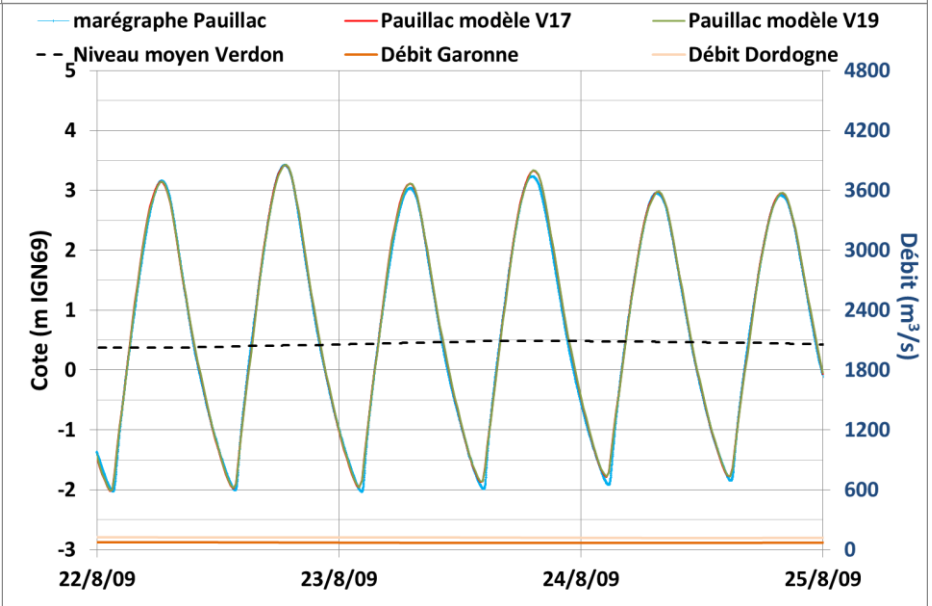
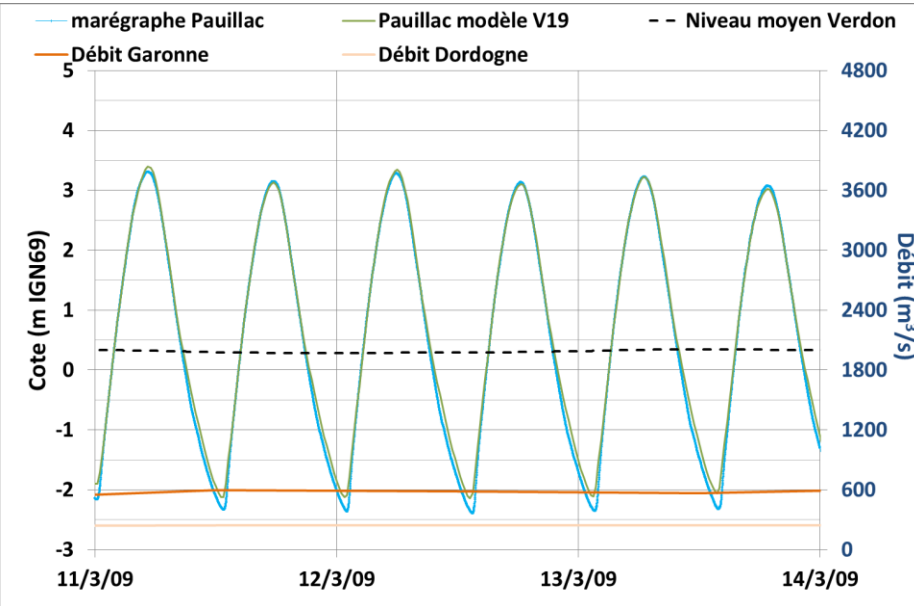
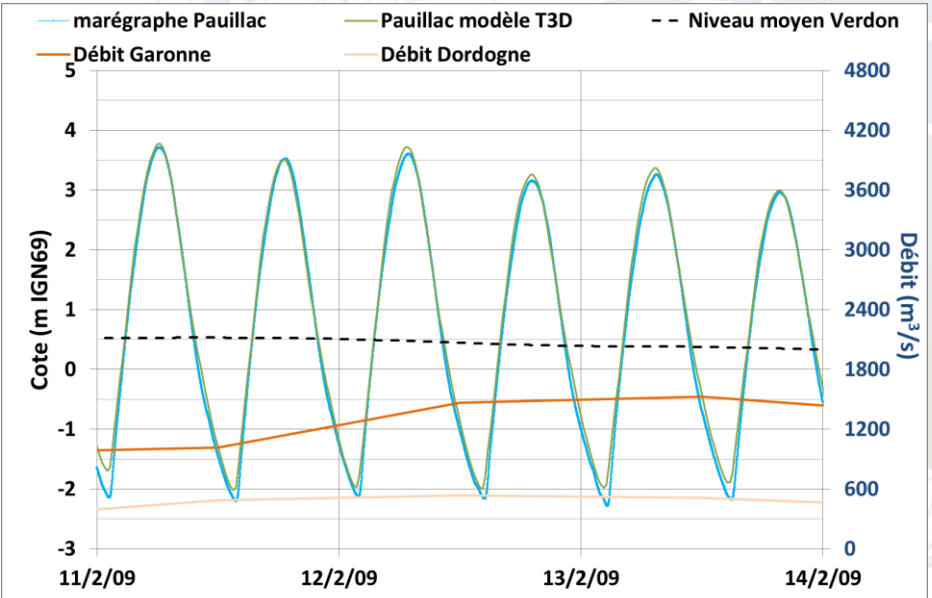
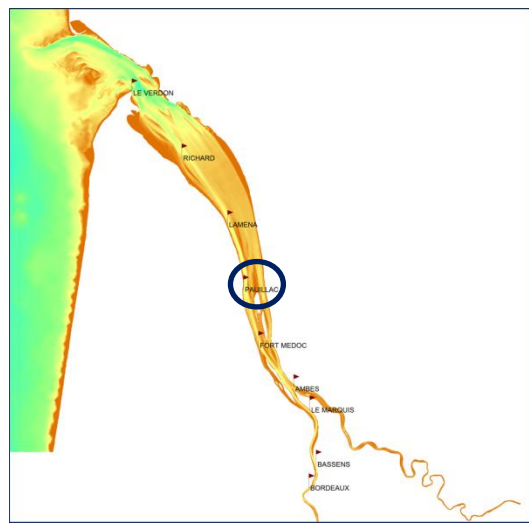
LAMENA



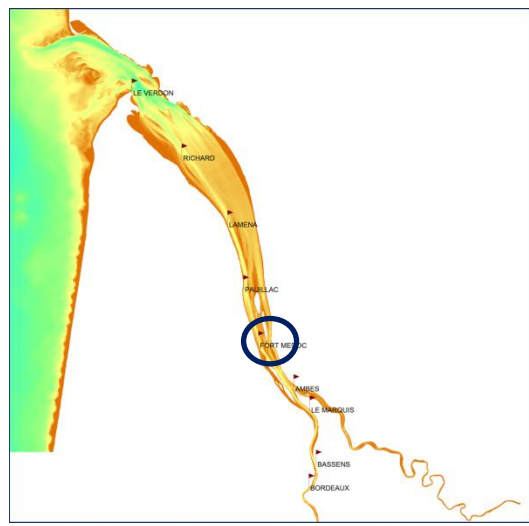
Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde



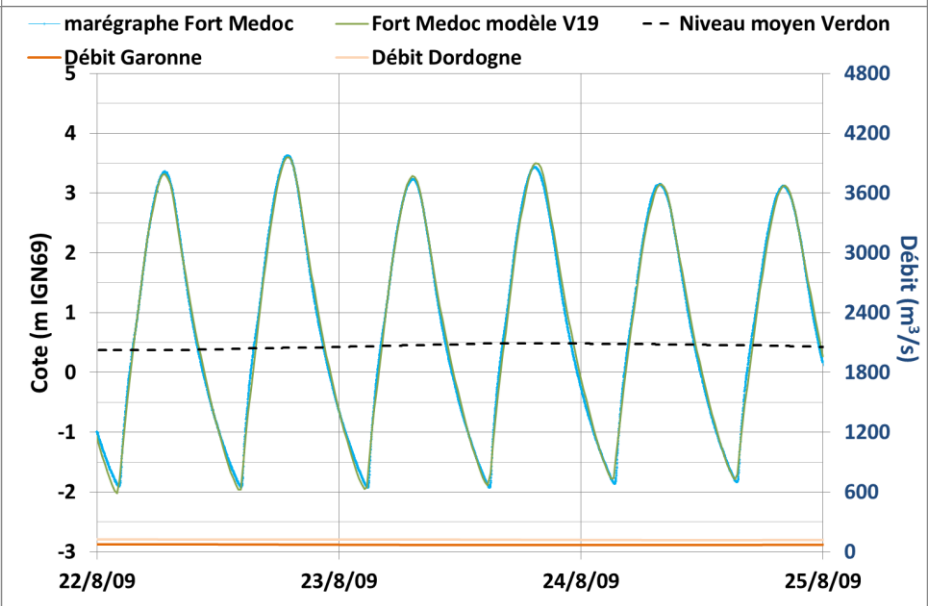
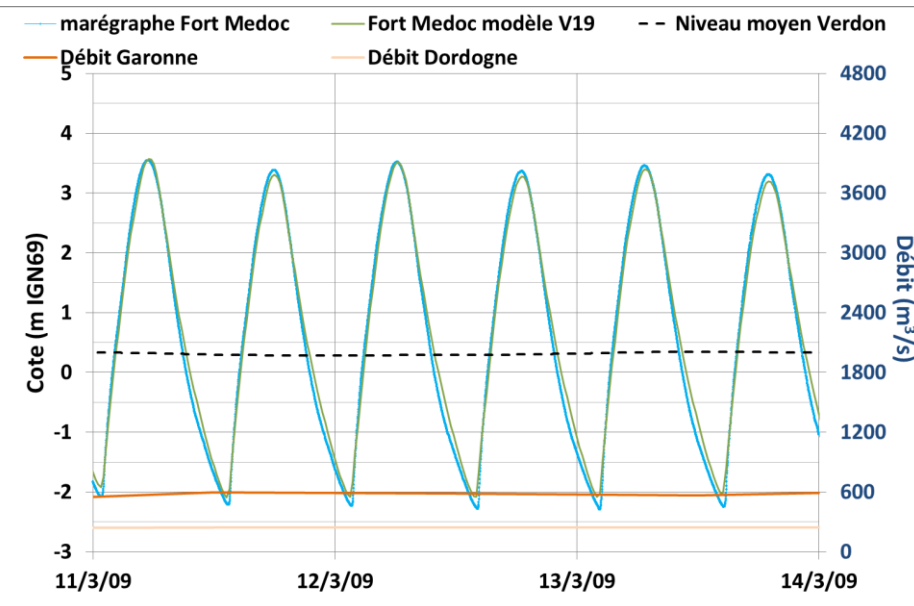
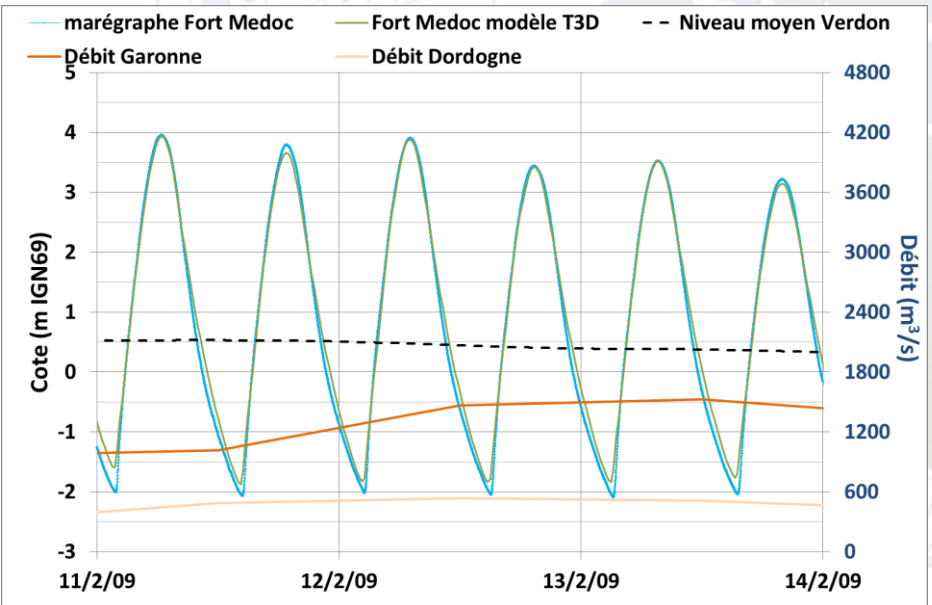
PAUILLAC



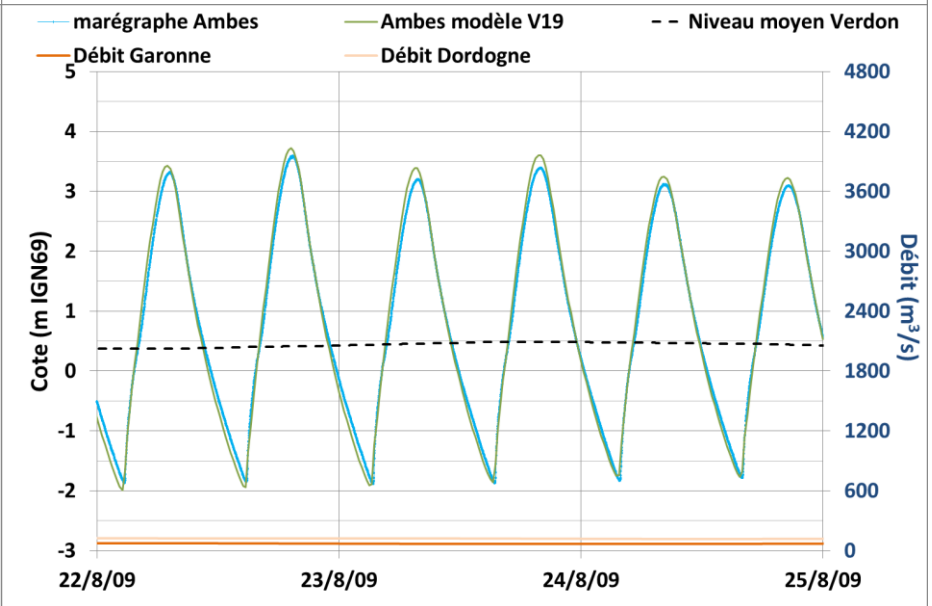
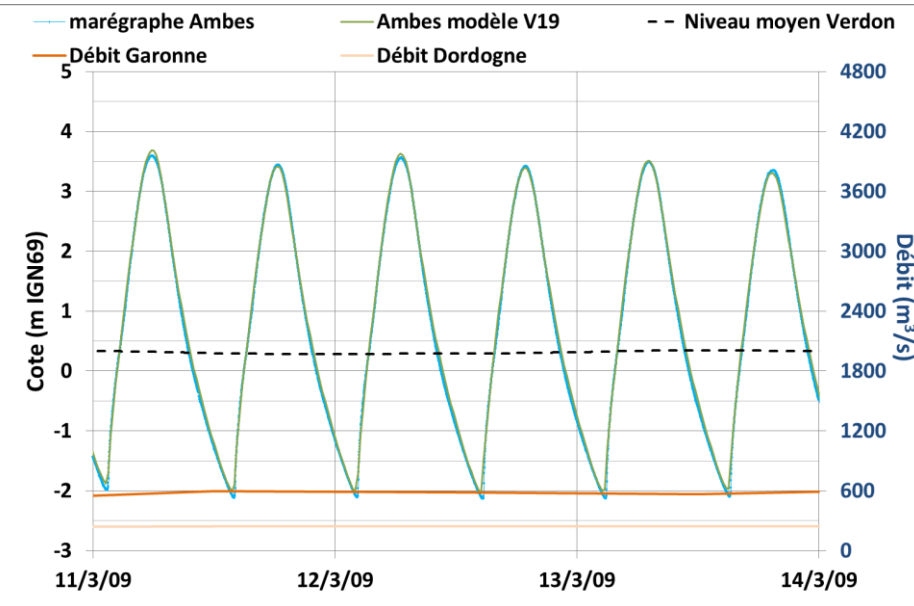
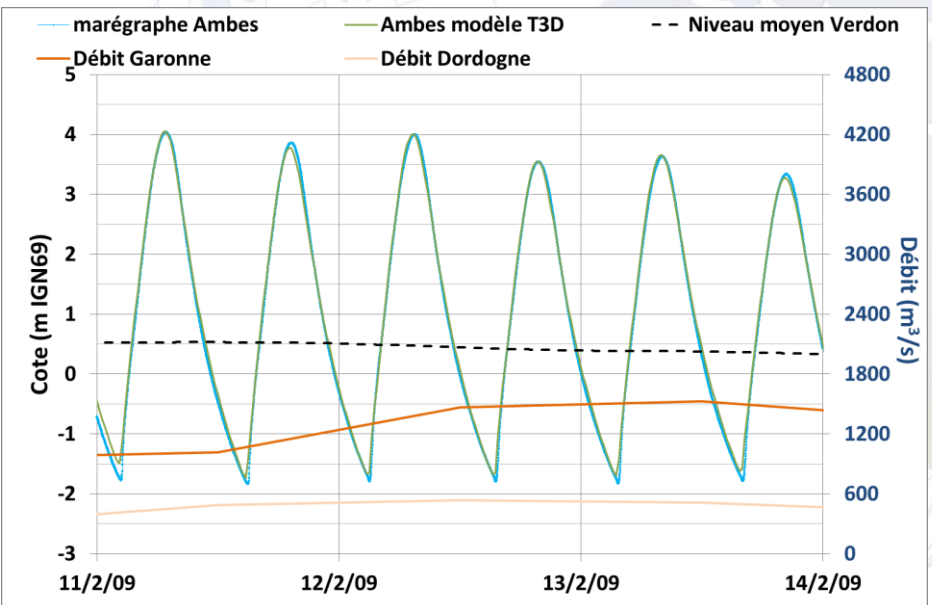
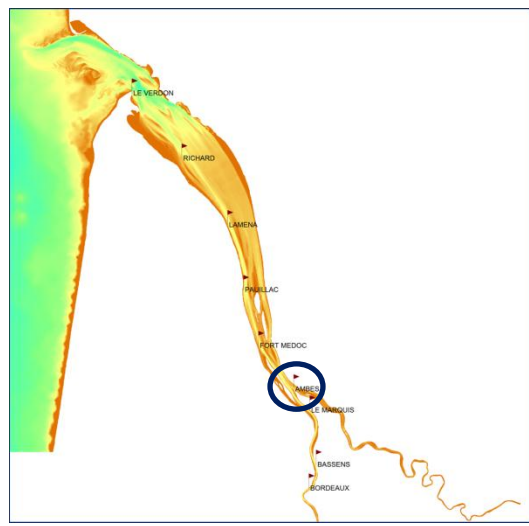
FORT MEDOC



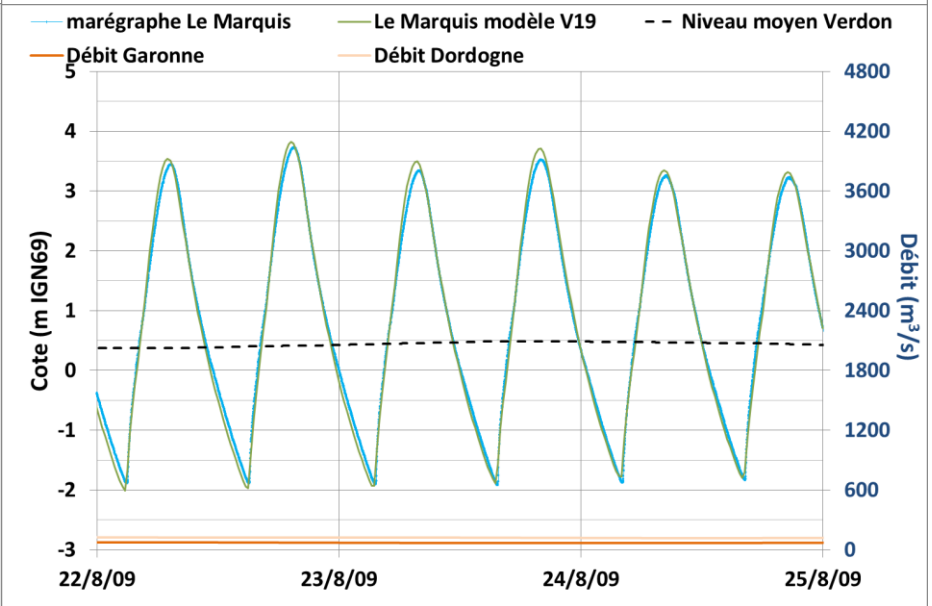
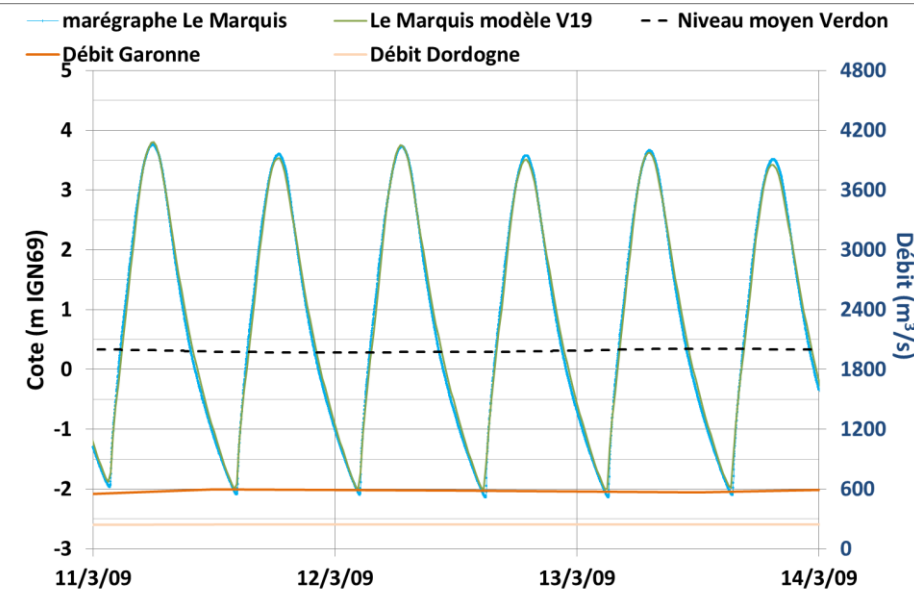
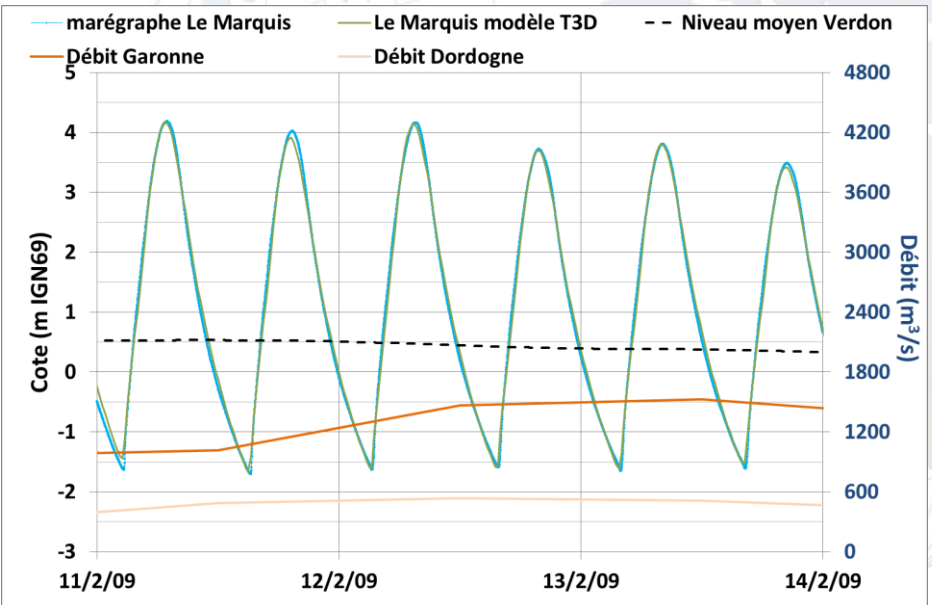
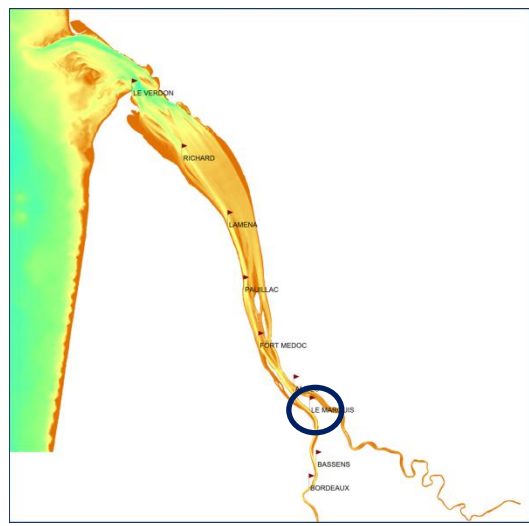
Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde



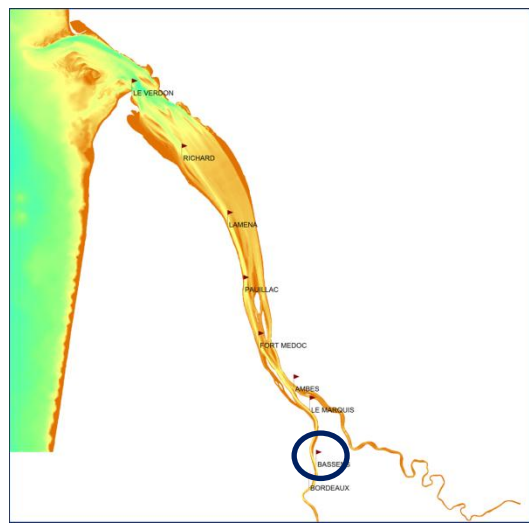
AMBES



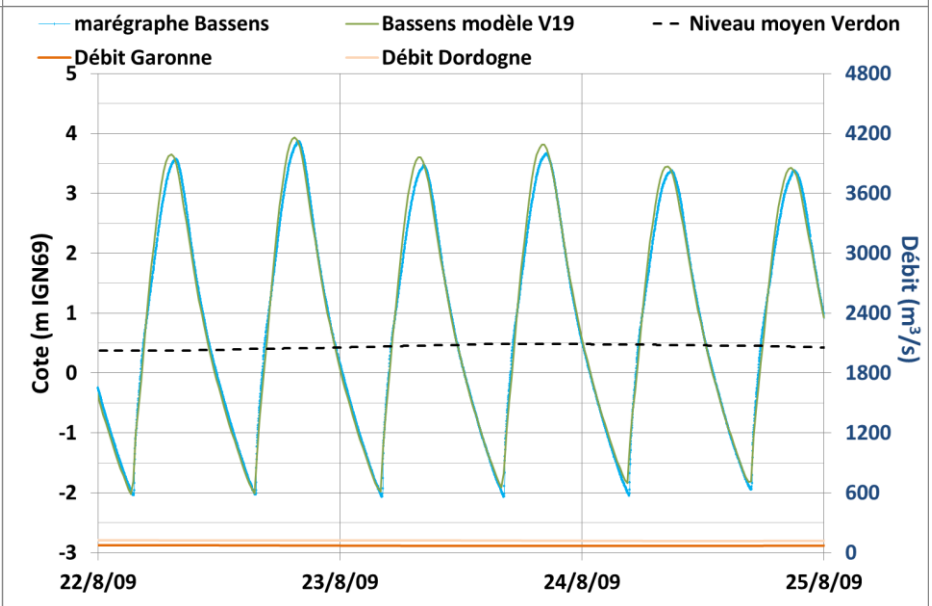
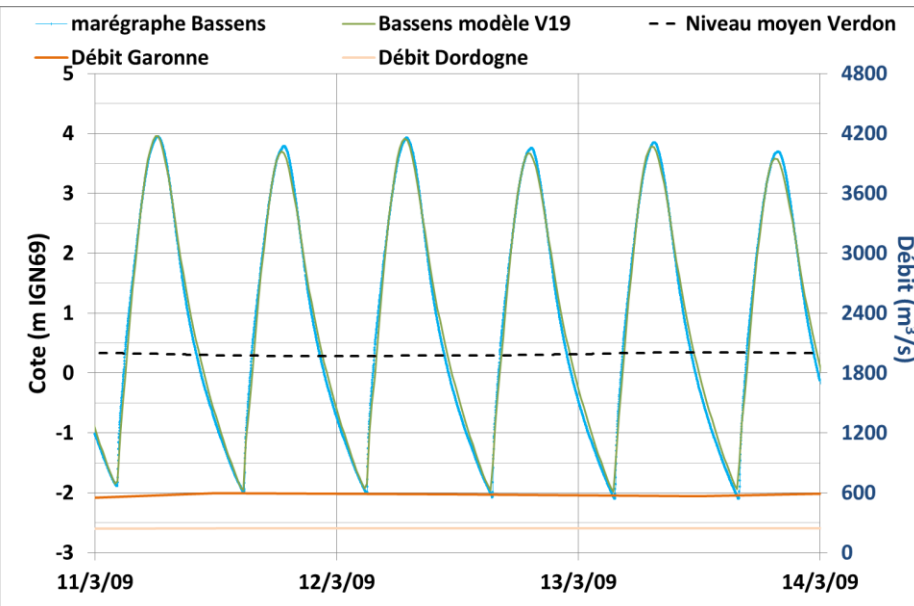
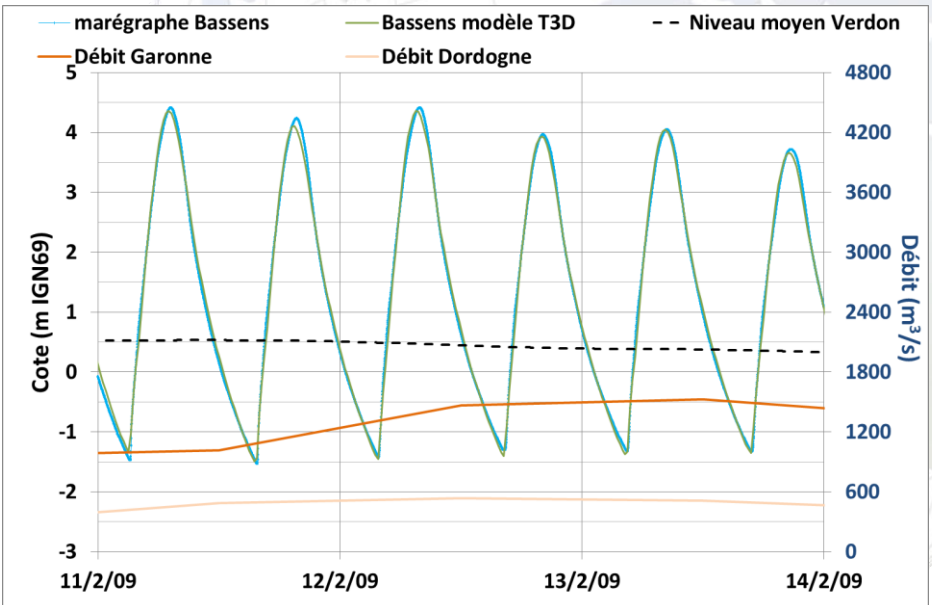
LE MARQUIS



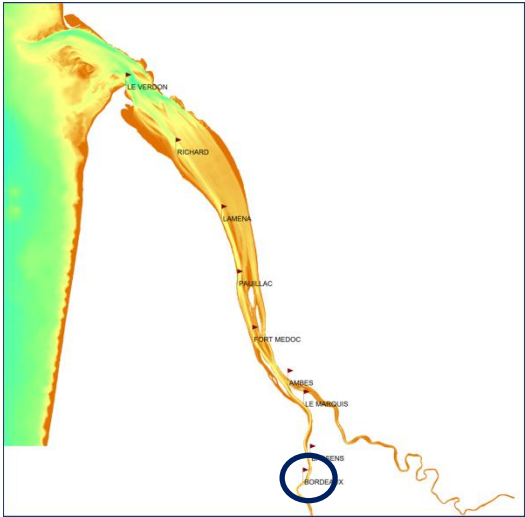
BASSENS



Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde



BORDEAUX



Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

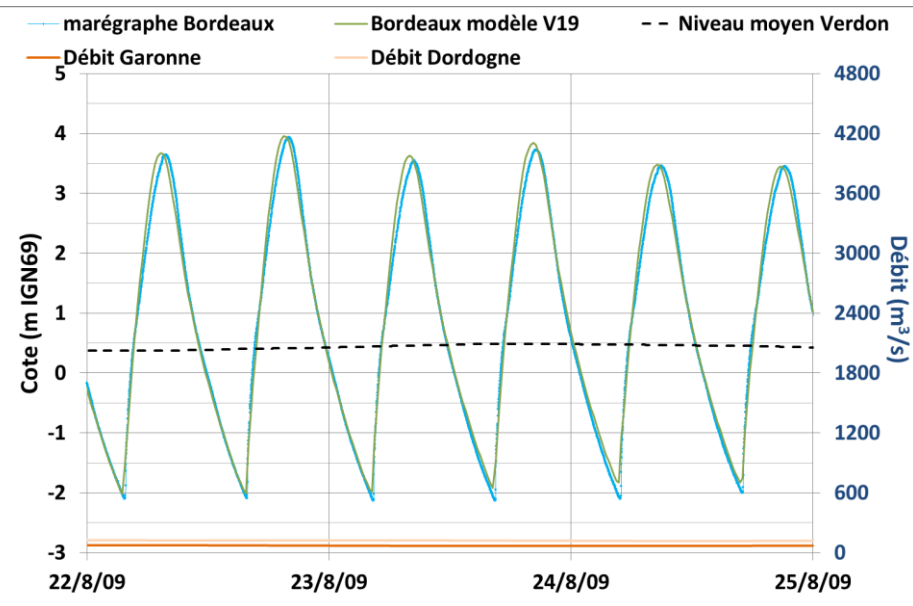
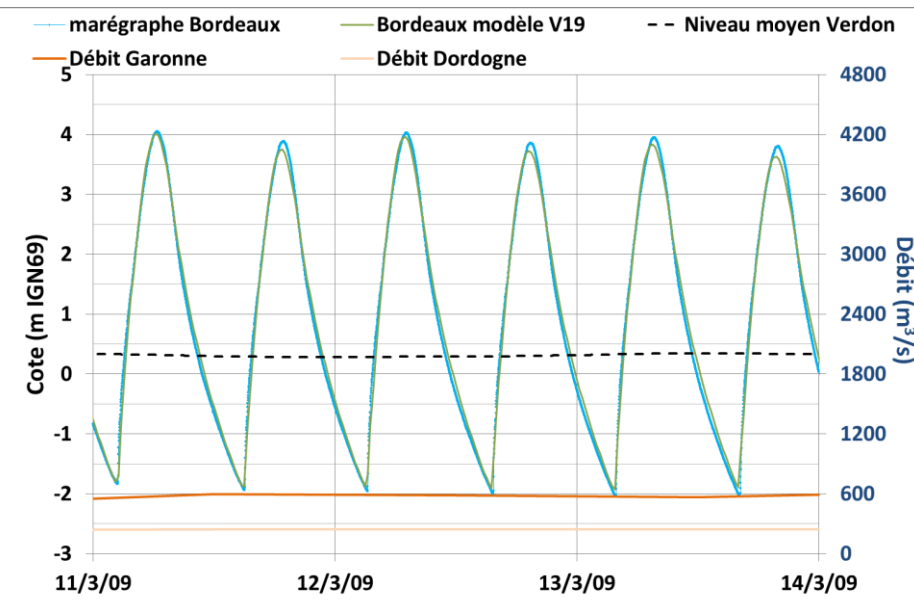
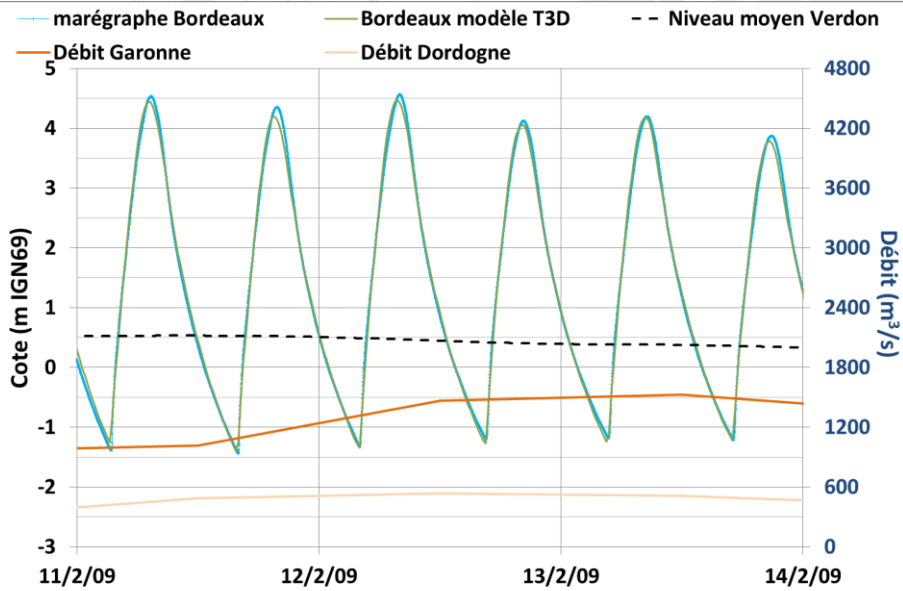
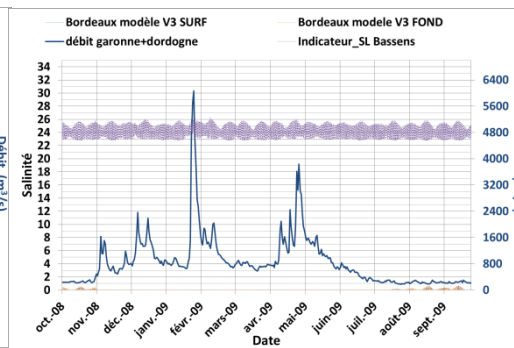
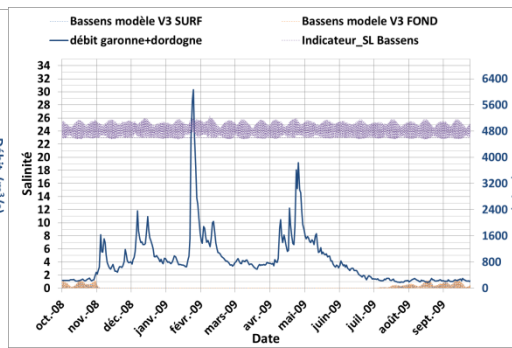
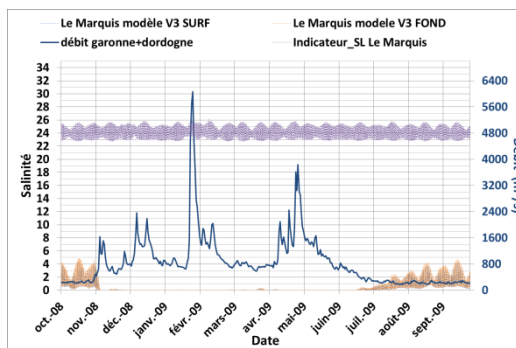
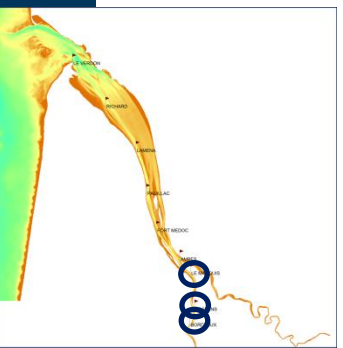
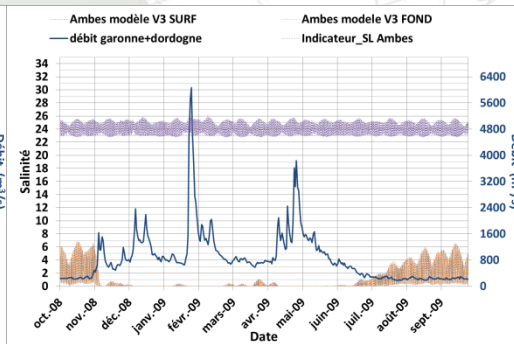
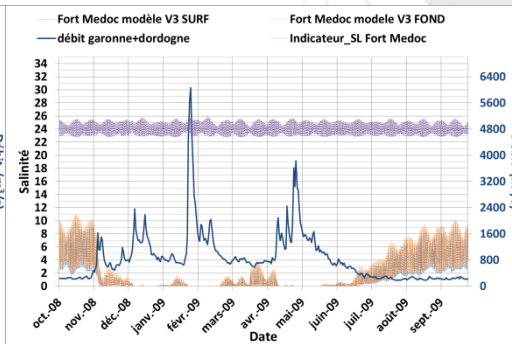
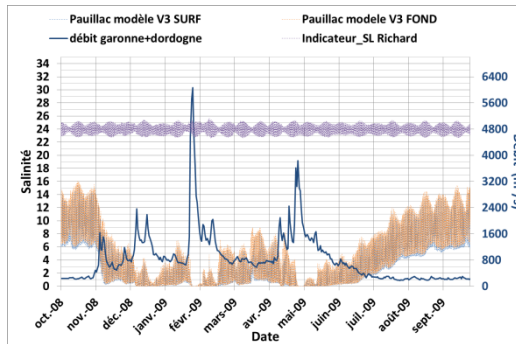
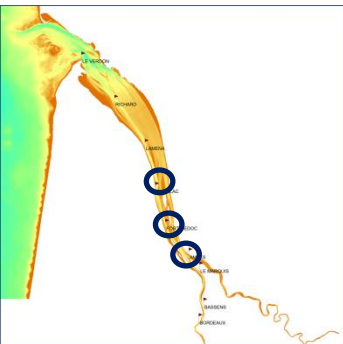
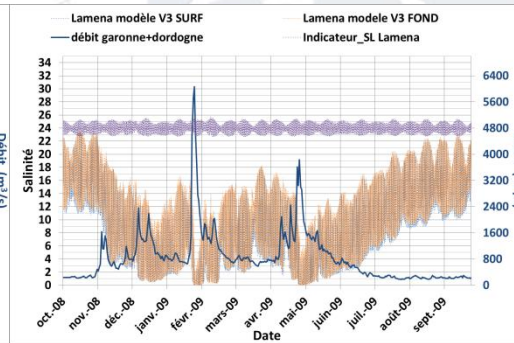
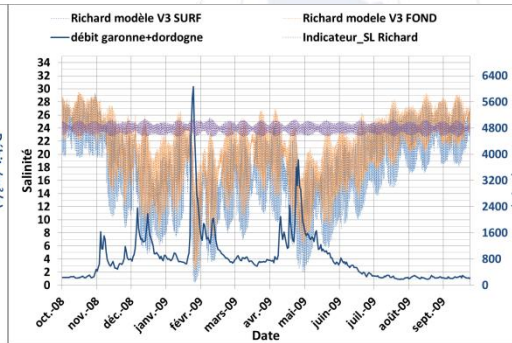
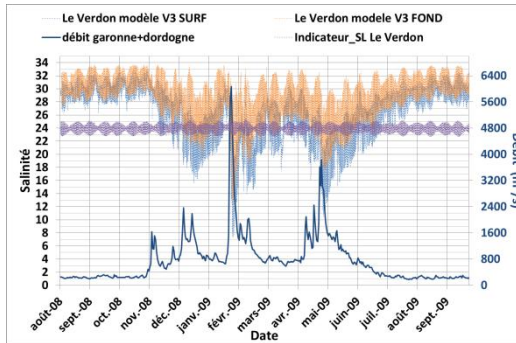
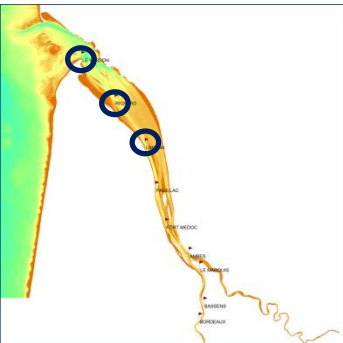


FIG 1.17 Construction, calage et validation du Modèle 3D hydrodynamique

Période de calage - Salinité

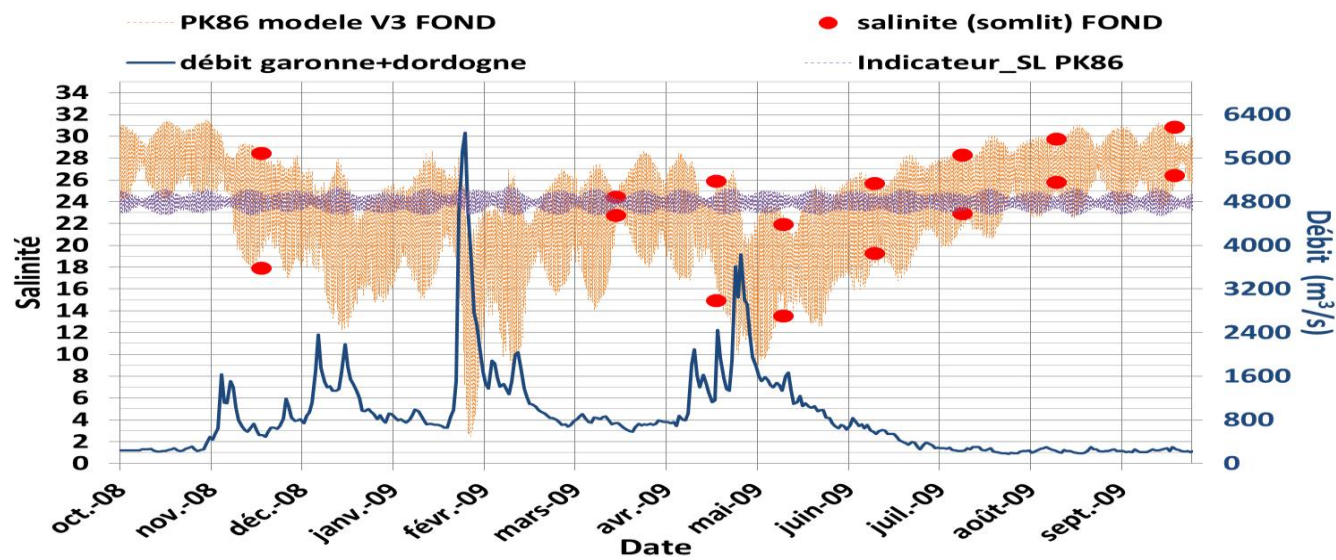
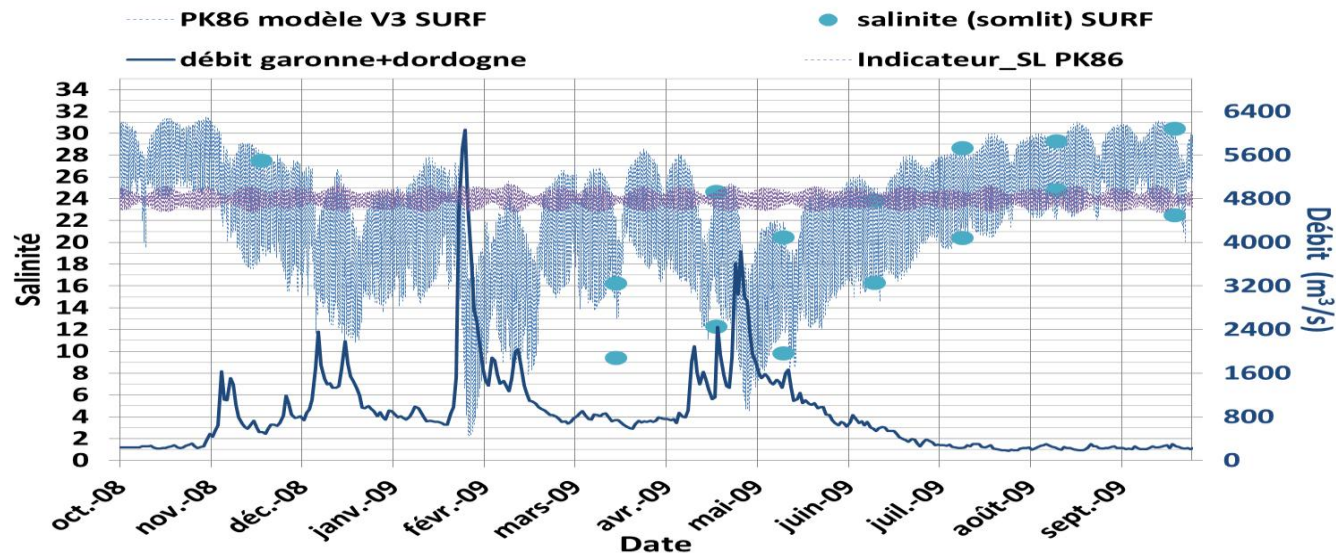
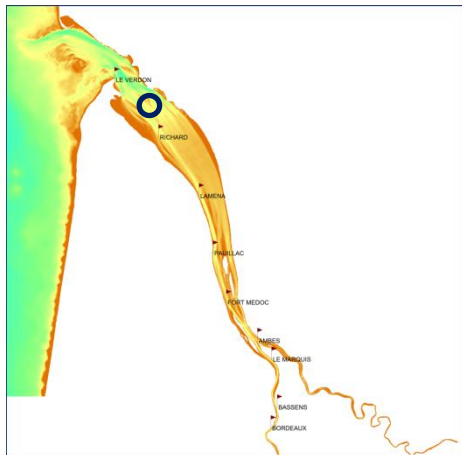
Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures, Mars 2016 ARTELIA 17



~30km

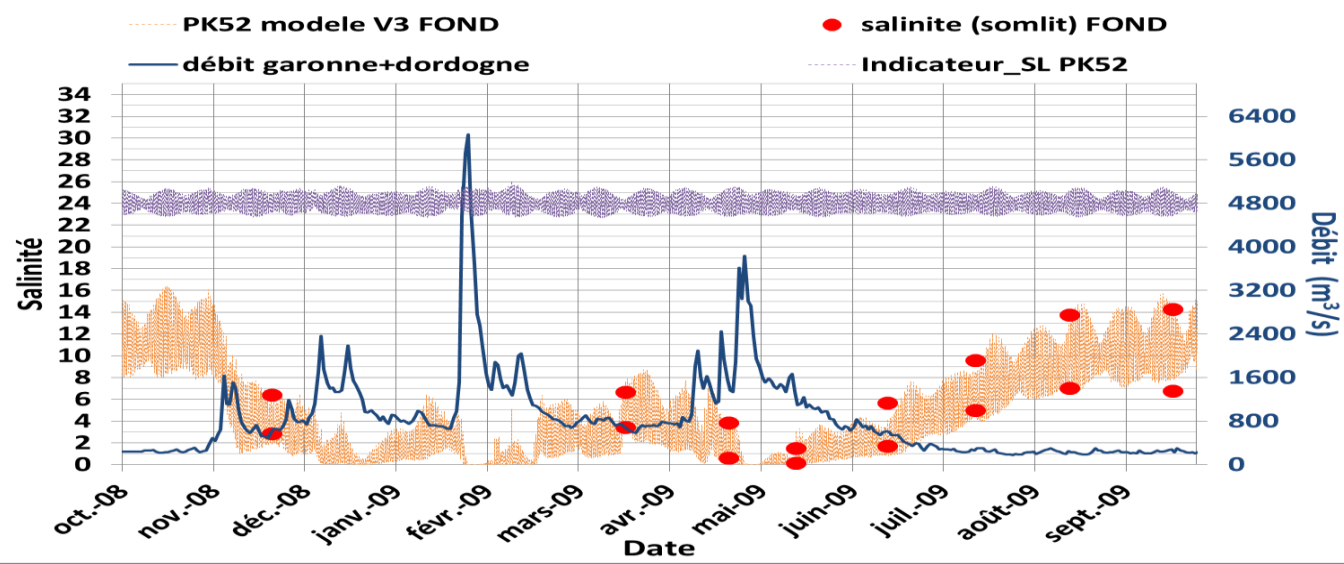
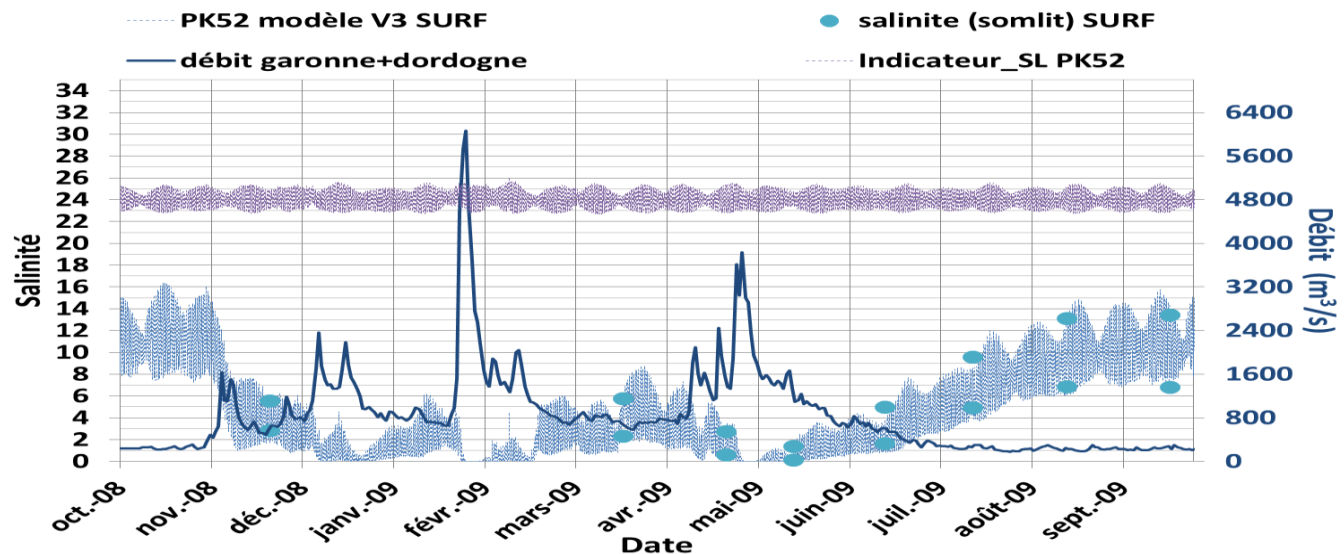
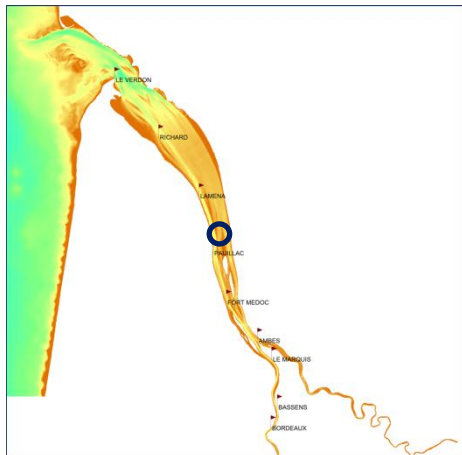
PK86 mesures SOMLIT - Salinité

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 - Annexe 1 – figures, Mars 2016 ARTELIA 18



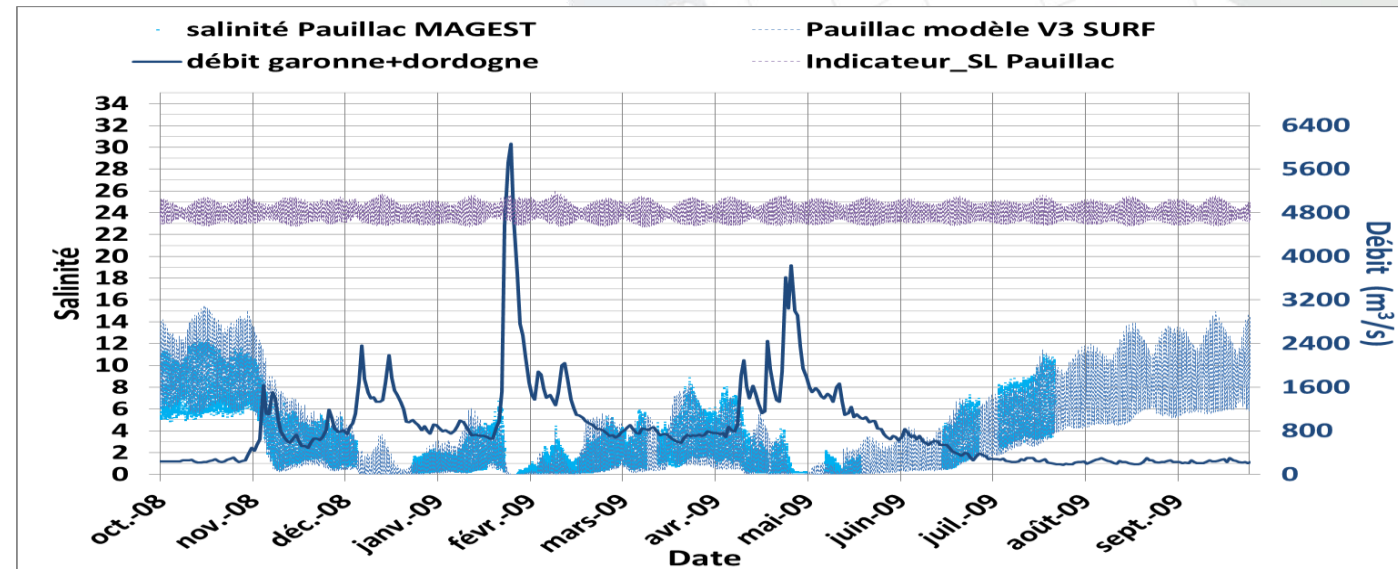
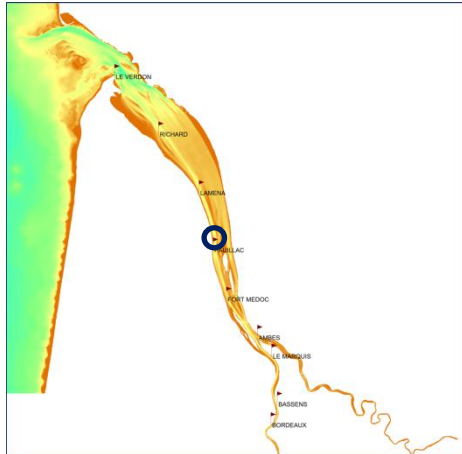
PK52 mesures SOMLIT - Salinité

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures , Mars 2016 ARTELIA 19



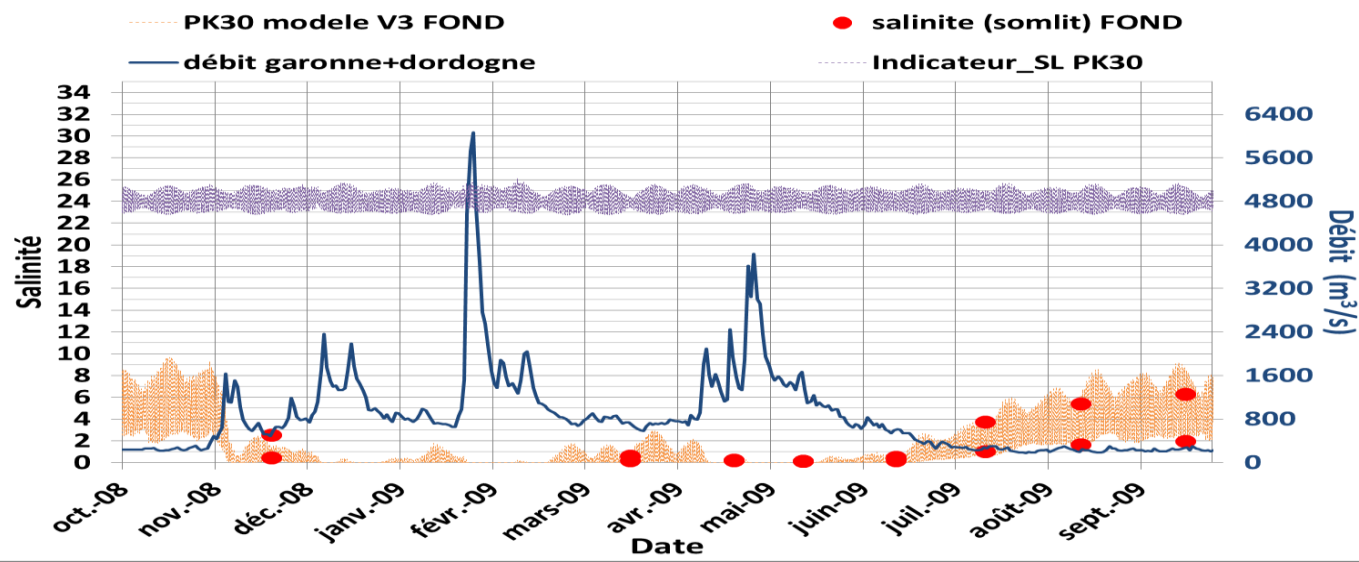
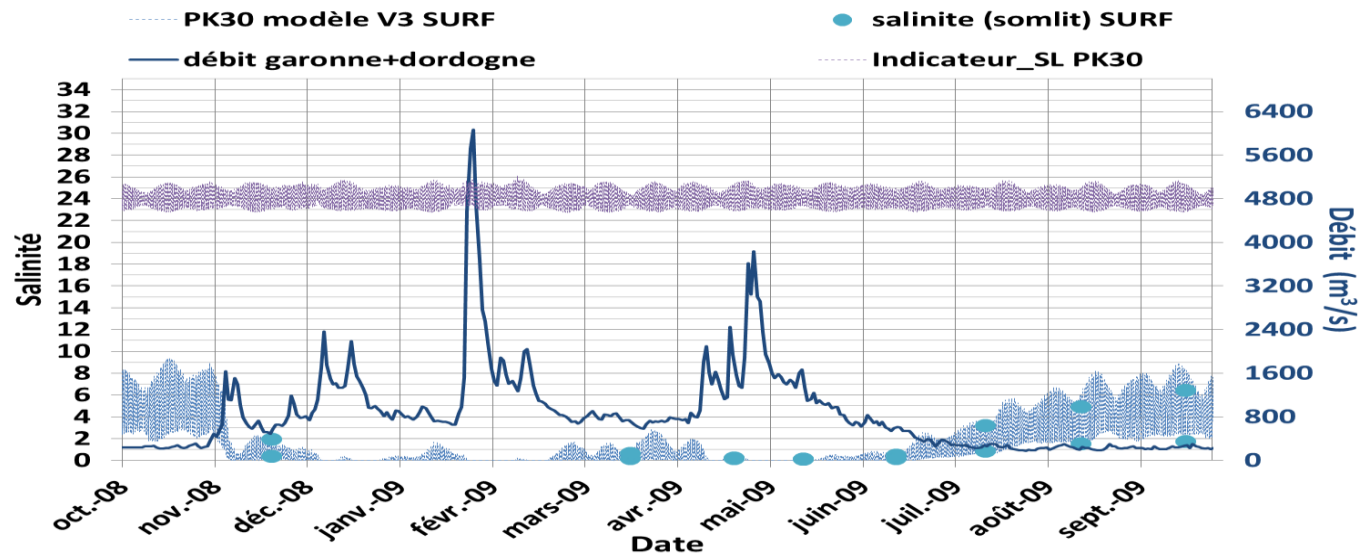
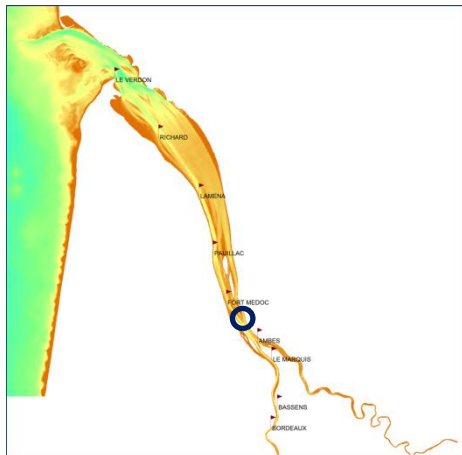
Pauillac mesures MAGEST - Salinité

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures , Mars 2016 ARTELIA 20



PK30 mesures SOMLIT - Salinité

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures , Mars 2016 ARTELIA 21



Bordeaux mesures MAGEST - Salinité

Plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
Rapport RM1-E2-2 -Annexe 1 – figures , Mars 2016 ARTELIA 22

