

N° d'ordre : 3618

THESE

PRESENTEE A

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE **SCIENCES ET ENVIRONNEMENTS**

par **M. Abdelkader BENAOUA**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : **PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT**

SUJET

**DYNAMIQUE SAISONNIERE DES SEDIMENTS EN SUSPENSION DANS L'ESTUAIRE DE LA
GIRONDE : MODELISATION OPERATIONNELLE DE LA REPONSE AUX FORCAGES
HYDRODYNAMIQUES**

Soutenue le : 08 septembre 2008

Après avis de :

M. Thierry GARLAN, *Ingénieur H.D.R. au SHOM Brest*
M. Robert LAFITE, *Professeur à l'Université de Rouen*

Rapporteur
Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

M. Philippe BERTRAND, *Directeur de Recherche au CNRS*
M. Patrice CASTAING, *Professeur à l'Université Bordeaux1*
M. Thierry GARLAN, *Ingénieur H.D.R. au SHOM Brest*
M. Robert LAFITE, *Professeur à l'Université de Rouen*
M. Pierre LE HIR, *Chercheur à l'IFREMER Brest*
M. Aldo SOTTOLICHIO, *Enseignant-Chercheur à l'Université Bordeaux1*

Président
Examineur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

Remerciements

Mes premiers remerciements vont naturellement à Patrice Castaing et Aldo Sottolichio pour m'avoir encadré et suivi, de façon continue tout au long de cette thèse.

Je teins également à remercier Rémi Butel pour son aide sur l'implantation du code numérique SIAM-3D sous linux, et sur lequel, repose, la possibilité de simuler la dynamique sédimentaire.

Je remercie également Nans Bujan pour son aide sur l'interprétation des données bathymétriques.

Je suis particulièrement flatté de la présence au sein du jury de Thierry Garlan et de Robert Lafite en tant que rapporteurs, et de Philippe Bertrand et Pierre Le Hir en qualité d'examineurs.

Mes gratitude s'adressent également aux personnels du laboratoire EPOC (particulièrement Jean-Michel Escalier et Philippe Bertrand) pour m'avoir accueilli, et fournie le matériel nécessaire au bon déroulement de cette thèse.

Je n'oublie évidemment pas, tous les doctorants du laboratoire, nouveaux et anciens, pour leur sympathie et leur réconfort pendant les moments difficiles, je les remercie infiniment.

Table des matières

Introduction.....	9
--------------------------	----------

Chapitre I

Morphologie, hydrodynamique et dynamique sédimentaire de la Gironde

I.1- Le système estuarien de la Gironde	15
I.1.1- Cadre géographique.....	15
I.1.2- Estuaire fluvial	15
I.1.3- Estuaire proprement dit	15
I.2- L'embouchure.....	19
I.3- L'hydrodynamique	20
I.3.1- La marée.....	20
I.3.2- Volume d'eau introduit par la marée	22
I.3.3- Les courants de marée	22
I.3.4- La circulation résiduelle	33
I.4- la dynamique des sédiments fin.....	35
I.4.1- Généralités sur le transport en suspension.	35
I.4.2- Granulométrie et minéralogie des matières en suspension	36
I.4.3- Le bouchon vaseux.....	38
I.4.4- La crème de vase	41
I.4.5- Transfert latéral des sédiments.....	42
I.4.6- Phénomènes d'hystérésis	43
I.4.7- Devenir des sédiments évacués hors de l'estuaire	43
I.5- Conclusion.	46

Chapitre II

Application des modèles numériques simulant la dynamique des sédiments en suspension

II.1- Introduction	51
II.2- Les modèles tridimensionnels en milieu estuarien.....	51
II.2.1- Lang et al. (1989).....	51
II.2.2- Cancino et al. (1994).....	51
II.2.3- Brenon (1997)	52
II.2.4- Le Normant (2000)	52
II.2.5- Burchard et al. (2004)	53
II.2.6- Wang et al. (2005).....	53
II.3- Les modèles tridimensionnels et bidimensionnels appliqués à l'estuaire de la Gironde .	53
II.3.1- Les modèles tridimensionnels.....	53
II.3.1.1- Sottolichio (1999).....	53
II.3.1.2- Cancino et al. (1999)	54

II.3.1.3- Vinh Phan (2002)	54
II.3.2- Les modèles bidimensionnels	55
II.3.2.1- Du Penhoat et al. (1979).....	55
II.3.2.2- Li (1994).....	55
II.3.2.3- Sottolichio (1999).....	56
II.4- Conclusion.....	56

Chapitre III

Le modèle numérique SIAM de la Gironde

III.1- Introduction.....	59
III.2- La physique du modèle SIAM-3D	59
III.2.1- Equations de Navier Stokes.....	59
III.2.2- Equations de Saint-Venant	61
III.2.3- Couplage des équations de Navier-Stokes et de Saint-Venant au travers de la contrainte de cisaillement au fond	62
III.2.4- Modèle de turbulence	64
III.2.5- Equation de transport.....	65
III.2.6- Conditions aux limites	65
III.2.7- Conditions initiales	67
III.2.8- Formulation des processus hydro-sédimentaires.....	68
III.2.8.1- Vitesses de chute des matières en suspension.....	68
III.2.8.2- Flux de dépôt.....	69
III.2.8.3- Flux d'érosion	70
III.3- La résolution numérique du modèle SIAM-3D	70
III.3.1- Champ d'application et bathymétrie	70
III.3.2- Méthode numérique.....	71
III.3.3- Schémas numériques	71
III.3.4- Maillage	72
III.3.5- Cadre de simulation	73
III.4- Conclusion	74

Chapitre IV

Mise au point du modèle numérique SIAM-3D, ajustement de l'hydrodynamique et comparaison des salinités

IV.1- Implantation de la nouvelle bathymétrie des fleuves (Garonne et Dordogne)	77
IV.2- Calibration hydrodynamique du modèle	79
IV.2.1- La marée	79
IV.2.1.1- Généralités	79
IV.2.1.2- Comparaison entre la marée calculée et la marée mesurée	80
IV.2.2- Les courants de marée	92
IV.2.2.1- Station de Château-Montrose (PK48) : mesures du LNHE	92
IV.2.2.1.1- Généralités	92
IV.2.2.1.2- Description sommaire de l'acquisition des données	93
IV.2.2.1.3- Conformité de la marée calculée avec celle mesurée.....	93

IV.2.2.1.4- Comparaison entre les intensités des courants calculées et mesurées	95
IV.2.2.2- Stations de Lormont (PK6) et Cérons (PK-34) : mesures du laboratoire EPOC	97
IV.2.2.2.1- Généralités.....	97
IV.2.2.2.2- Comparaison entre les intensités des courants calculées et mesurées	98
IV.3- La salinité dans le système estuarien de la Gironde	101
IV.3.1- Les stations de mesure (stations MAREL).....	101
IV.3.2- Comparaison entre les salinités calculées et mesurées.....	101
IV.3.2.1- Généralités	101
IV.3.2.2- Salinité à Pauillac (PK45).....	102
IV.3.2.3- Salinité à Bordeaux (PK0)	103
IV.3.2.4- Salinité à Roque de Thau (PK31)	104
IV.4- Conclusion	105

Chapitre V

Impact du paramétrage hydro-sédimentaire dans SIAM-3D sur la simulation de la dynamique sédimentaire

V.1- Introduction	109
V.2- Paramétrage hydro-sédimentaire.....	109
V.3- Simulation de la dynamique du bouchon vaseux avec le paramétrage d'origine	110
V.3.1- Concentration des matières en suspension à Pauillac et Bordeaux	110
V.3.2- Bilans sédimentaires	112
V.3.3- Piégeage des sédiments	113
V.3.4- Distribution de la concentration des matières en suspension	115
V.3.4.1- Généralités.....	115
V.3.4.2- Commentaires sur la distribution de la concentration.....	116
V.3.5- Conclusion	123
V.4- Impact du paramétrage hydro-sédimentaire sur la dynamique du bouchon vaseux simulé	123
V.4.1- Généralités	123
V.4.2- Paramétrage du flux érosif et modification de la bathymétrie.....	123
V.4.2.1- La constante d'érosion	123
V.4.2.1.1- Choix du paramétrage.....	123
V.4.2.1.2- Bilans sédimentaires	124
V.4.2.1.3- Piégeage des sédiments.....	125
V.4.2.1.4- Distribution de la concentration des matières en suspension ...	127
V.4.2.2- Simulation avec une bathymétrie modifiée.....	128
V.4.2.2.1- Suppression de certaines mailles pièges à sédiment.....	128
V.4.2.2.2 - Bilans sédimentaires	129
V.4.2.2.3- Piégeage des sédiments.....	129
V.4.2.2.4- Distribution de la concentration des matières en suspension ...	131
V.4.2.3- La contrainte critique d'érosion	132
V.4.2.3.1- Choix du paramétrage.....	132
V.4.2.3.2- Bilans sédimentaires	132

V.4.2.3.3- Piégeage des sédiments.....	133
V.4.2.3.4- Distribution de la concentration des matières en suspension ...	137
V.4.3- La vitesse de chute des matières en suspension	140
V.4.3.1- Choix du paramétrage	140
V.4.3.2- Concentration des matières en suspension à Pauillac	142
V.4.3.3- Bilans sédimentaires.....	144
V.4.3.4- Distribution de la concentration des matières en suspension.....	145
V.4.3.5- Discussion sur la répartition des suspensions et leur évacuation hors de l'estuaire	148
V.5- La diffusivité turbulente.....	151
V.5.1- Choix du paramétrage.....	151
V.5.2- Bilans sédimentaires	151
V.5.3- Piégeage des sédiments	153
V.5.4- Distribution de la concentration des matières en suspension	157
V.5.5- Concentration des matières en suspension calculée à Pauillac et Bordeaux	160
V.5.6- Impact de la diffusivité turbulente sur la salinité	162
V.6- Conclusion	165

Chapitre VI

Modélisation de l'impact du régime fluvial et de la bathymétrie sur les dynamiques sédimentaire et saline

VI.1- Introduction.....	169
VI.2- Modélisation de la dynamique du bouchon vaseux	169
VI.2.1- Effets d'une crue unique.....	169
VI.2.1.1- Généralités	169
VI.2.1.2- Distribution de la concentration des matières en suspension.....	170
VI.2.1.3- Flux des sédiments à Pauillac et au Verdon	175
VI.2.2- Effets de crues successives.....	177
VI.2.2.1- Généralités	177
VI.2.2.2- Distribution de la concentration des matières en suspension.....	178
VI.2.2.3- Flux des sédiments à Pauillac et au Verdon.....	183
VI.2.3- Effets de débits constants	185
VI.2.3.1- Généralités	185
VI.2.3.2- Débits constants de 300 m ³ /s	186
VI.2.3.3- Débits constants de 900 m ³ /s	188
VI.2.3.4- Débits constants de 4000 m ³ /s	189
VI.2.3.5- Synthèse sur les flux sédimentaires à Pauillac et au Verdon	190
VI.2.4- Profils ponctuels de concentration	192
VI.3- Modélisation de la dynamique saline	198
VI.3.1- Distribution de salinité	198
VI.3.2- Etude de la stratification verticale de salinité par le calcul des gradients de salinité	202
VI.3.3- Profils ponctuels de salinité.....	209
VI.4- Modélisation des effets engendrés par l'évolution de la bathymétrie	213
VI.4.1- Généralités.....	213
VI.4.2- Comparaison de la marée	216

VI.4.3- Salinités	219
VI.4.4- Concentration des matières en suspension	220
VI.4.5- Flux sédimentaires.....	223
VI.5- Conclusion	225
Conclusions générales	231
Bibliographie	237
Annexe I	249
Annexe II	250
Annexe III	251
Annexe IV	261
Annexe V	282

Introduction

En zone estuarienne, la masse sédimentaire en suspension ou déposée a des conséquences considérables sur le fonctionnement écologique de ces milieux, ainsi que sur la pérennité de l'activité économique.

Le cas particulier de l'estuaire de la Gironde, constitué, par l'importance des flux sédimentaires, un cadre intéressant d'étude et de compréhension des problématiques soulevées par les sédiments.

La recherche en dynamique sédimentaire se traduit souvent par l'étude de deux structures turbides majeures dans l'estuaire de la Gironde : le bouchon vaseux et la crème de vase.

Ces deux entités se trouvent au cœur des problématiques écologiques, puisqu'elles sont le siège de bon nombre de processus biologiques et chimiques, notamment :

- La minéralisation des charges organiques qui induisent l'émission de gaz à effet de serre et la baisse de l'oxygène dans l'eau. Cette dernière n'est pas sans conséquence sur le développement de la faune aquatique.
- L'adsorption, par les sédiments en suspension ou déposés, des contaminants métalliques, organiques et bactériens.

Quant à la problématique économique, elle réside dans le dragage coûteux des chenaux de navigation suite au dépôt de la crème de vase.

L'intervention humaine est un facteur additionnel qui agit aussi bien sur ces processus naturels que sur la dynamique sédimentaire. Elle consiste en l'aménagement des zones côtières et estuariennes (digue, perré, port,... etc), et dans la possibilité de pollution accidentelle, ou liée au développement économique et urbain aux abords de ces zones.

Ainsi, les recherches fondamentales, en amont, sur la dynamique sédimentaire revêtent un intérêt majeur pour les gestionnaires des milieux côtiers et estuariens, mais aussi pour les chercheurs concernés par ces thématiques.

La recherche en dynamique sédimentaire s'appuie sur trois méthodes : les mesures in-situ directes et indirectes (télédétection satellitaire par exemple), les mesures en laboratoire, et la modélisation numérique du transport et du dépôt des sédiments.

Les mesures in-situ permettent d'appréhender l'évolution temporelle de certaines variables. Cependant elles restent limitées dans l'espace, et de ce fait ne peuvent couvrir avec finesse la surface des zones côtières et estuariennes.

A l'inverse, la télédétection satellitaire fournit, par étalonnage, les valeurs de certaines grandeurs sur de larges superficies. Cependant, le nombre de cartes est très limité et ne permet pas de suivre l'évolution temporelle à haute fréquence de ces grandeurs.

Les mesures de laboratoire, ont pour finalité, entre autres, d'établir des relations empiriques entre les grandeurs mesurées. Cependant, le milieu expérimental, par sa simplicité, ne permet pas de reproduire fidèlement l'environnement naturel.

Pour compléter ces méthodes et palier leurs insuffisances, la modélisation numérique s'est considérablement développée, et s'impose désormais, comme un outil indispensable à l'étude de la dynamique sédimentaire.

Dans le domaine du transport des sédiments en suspension, le premier modèle unidimensionnel semble celui de *Odd et Owen* en 1972. Rapidement, sont apparus les modèles bidimensionnels, dont le premier a été développé par *Ariathurai et Krone* en 1976. Les modèles bidimensionnels sont toujours utilisés de nos jours, mais sont de plus en plus détrônés par le développement des modèles tridimensionnels. Dans un futur proche, ces derniers seront certainement le support de base pour toute simulation de la dynamique sédimentaire.

Certains modèles tridimensionnels suscitent l'intérêt des pouvoirs publics et des maîtres d'ouvrage afin de simuler le comportement du sédiment, en réaction à différents scénarios d'intervention humaine (construction de ports, digues, perré ;etc).

L'intérêt pour ces modèles ne se limite pas à la problématique purement sédimentaire. En effet, des chercheurs, dans certains pays comme la France (voir *Gonzalez et al.*, 2001) et le Japon (voir *Taguchi et al.*, 1998), utilisent des modèles tridimensionnels couplés avec des modules annexes, afin de simuler les processus chimiques et biologiques en milieu estuarien. Dans le cas de l'estuaire de la Gironde, une requête formelle des collectivités (programme GIS-ECOBAG) a été adressée aux chercheurs concernés, afin de développer à terme des outils de gestion de la qualité de l'eau. L'un de ces outils serait le modèle SIAM-3D couplé avec des modules de chimie et de biologie. Cependant, la nécessité de valider le modèle SIAM-3D d'une part, et d'acquérir une meilleure connaissance de la dynamique sédimentaire d'autre part, est un préalable avant tout couplage. C'est dans cette perspective, que s'inscrit mon projet de recherche sur l'étude fondamentale de la dynamique sédimentaire, dont les premiers concernés sont les chercheurs de cette discipline.

Cette étude se basera sur l'utilisation du modèle de simulation SIAM-3D, cependant, nous exploiterons largement les mesures directes in-situ, pour forger notre réflexion et développer les résultats.

Les mesures de concentration des sédiments en suspension et une partie des mesures de salinité utilisées, sont fournies par les stations autonomes de mesure en continu MAREL (Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral).

Elles sont transmises automatiquement, par téléphonie, à une station de gestion installée dans les locaux du département «Sciences de la Terre et de la Mer » de l'université Bordeaux I.

Les autres mesures de salinité exploitées proviennent du laboratoire EPOC (mesures du Blayais).

Les mesures de marée ont été fournies par le laboratoire EPOC et par le Port Autonome de Bordeaux.

Les mesures du courant ont été procurées par le LNH (Laboratoire National d'Hydraulique) et le laboratoire EPOC.

Deux modèles tridimensionnels ont été précédemment appliqués à l'estuaire de la Gironde :

- Le modèle SAM-3D utilisé par *Sottolichio (1999)*, et qui représente l'ancienne version de SIAM-3D par l'attribution de valeur constante à certains paramètres hydro-sédimentaires. Le principal résultat de cette application est la mise en évidence du rôle de l'asymétrie de la marée dans la formation du bouchon vaseux, et de la stabilisation de celui par les gradients de densité en période de crue.
- Le modèle ECOMOD-3D développé par *Vinh Phan (2002)*. Les principaux résultats concernent l'évolution de la salinité et du bouchon vaseux simulés en fonction du forçage de la marée et du débit.

Dans le cadre de mes travaux de recherche, je propose, au travers de l'utilisation du modèle SIAM-3D, une meilleure compréhension des dynamiques sédimentaire et saline. L'approche adoptée 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. Nous confronterons certains de ces résultats aux connaissances établies et aux mesures que nous avons personnellement exploitées. Nous émettrons également des hypothèses pour expliquer certains phénomènes précis du comportement sédimentaire.

Cette thèse a été financée par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et s'est déroulée au sein du laboratoire EPOC de l'université Bordeaux I.

Les 6 chapitres de ce mémoire sont présentés brièvement ci-dessous :

Chapitre I : Ce chapitre sera consacré à la présentation succincte de l'estuaire de la Gironde. Le but étant de cerner la morphologie générale du domaine d'étude et les grands traits de l'hydrodynamique et de la dynamique sédimentaire.

Chapitre II : Nous évoquerons les principaux résultats des modèles 3D simulant le transport des matières en suspension en milieu estuarien. L'objectif étant d'identifier l'orientation et l'état actuel de la recherche, dans le domaine de la dynamique sédimentaire.

Chapitre III : Nous aborderons, entre autres, la structure numérique, les équations physiques ainsi que les lois hydro-sédimentaires du modèle SIAM-3D, dont certains modules sont en commun avec les autres modèles SIAM.

Chapitre IV : L'objectif de ce chapitre est de calibrer la marée par modification de la rugosité au fond. Cependant nous tenterons d'expliquer l'amortissement ou l'amplification de la marée en relation avec les évolutions de la bathymétrie et de la rugosité. Nous comparerons également les intensités des courants de marée calculées et mesurées, ainsi que les salinités.

Chapitre V : Nous étudierons l'impact des lois hydro-sédimentaires, au travers des modifications du paramétrage, sur les dynamiques du dépôt et des sédiments en suspension. Le cas de la vitesse de chute requière particulièrement notre attention par son influence sur l'évolution du bouchon vaseux. Nous évoquerons, également l'impact des stratifications de salinité et de concentration par le biais du paramétrage de la diffusivité turbulente.

Chapitre VI : Nous évoquerons l'influence du débit fluvial et de la bathymétrie sur les dynamiques sédimentaire et saline. On peut citer, entre autres, l'analyse des bilans sédimentaires et des gradients de salinité. Nous confronterons certains résultats de simulation aux connaissances établies sur l'estuaire de la Gironde.

Chapitre I

Morphologie, hydrodynamique et dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Gironde

La morphologie, l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Gironde ont été étudiées de façon exhaustive par plusieurs auteurs (*Allen, 1972 ; Allen et al., 1977 ; Castaing, 1981 ; Jouanneau et al. , 1981 ; Sottolichio, 1999*). Cet estuaire est souvent cité comme référence compte tenu des études nombreuses sur les processus hydrosédimentaires dans les années 70 (*Nichols et al., 1985*). Dans ce qui suit nous allons synthétiser les présentations de *Castaing (1981)* et d'*Allen (1972)* sur l'estuaire de la Gironde. Toutefois, nous apporterons quelques éléments nouveaux concernant l'analyse des courants de marée.

I.1- Le système estuarien de la Gironde

I.1.1- Cadre géographique

L'estuaire de la Gironde est situé à l'extrémité septentrionale de la plaine des Landes. Il est limitrophe d'un vaste plateau continental qui s'étend jusqu'à 170 km au large de l'embouchure. La morphologie du plateau a été étudiée par plusieurs auteurs : *Lapierre (1969), Vanney (1969), Naudin (1971), Prud'homme (1972)* et *Barusseau (1973)*.

Le bassin versant principal (fig.I.1), d'une superficie de 74 000 km², est constitué du réseau hydrographique de la Garonne et de la Dordogne, qui drainent, respectivement, les eaux douces venant des Pyrénées et du Massif Central.

Dans l'estuaire, on peut distinguer, d'amont en aval, plusieurs entités géographiques, aux caractéristiques morphologiques différentes (*Allen, 1972*).

I.1.2- Estuaire fluvial

Les parties 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 (fig.I.1), présentent les caractéristiques morphologiques d'une rivière à méandres. Ceux-ci sont soumis à l'érosion sur la rive concave et à la sédimentation d'alluvions sur la rive convexe. De part et d'autre des deux rives, se trouve souvent une butte nommée levée ou bourrelet alluvial, séparant la rivière d'une zone marécageuse appelée arrière marais (*Enjalbert 1949 ; Allen et al 1970*). Cette partie des fleuves contient de rares îles et bifurcations et une quasi-absence de zones intertidales. Celles-ci ne font guère qu'une cinquantaine de mètres de largeur au grand maximum.

I.1.3- Estuaire proprement dit

L'estuaire de la Gironde est le plus grand estuaire macrotidal européen avec une superficie de 625 km² à marée haute. Il s'étend sur 70 km, du Bec d'Ambès jusqu'à l'embouchure (fig.I.1). Il est caractérisé par un certain nombre de chenaux, de bancs et d'îles.

Deux étendues peuvent être distinguées dans l'estuaire de la Gironde. La première est délimitée par le Bec d'Ambès et Saint-Christoly (fig.I.1), elle est caractérisée par de nombreuses îles. La seconde est située entre Saint-Christoly et la Pointe de Grave (fig.I.1); elle se différencie par sa morphologie et ses faciès de nature marine.

Ces deux étendues sont communément connues sous l'appellation 'estuaire amont' (entre Bec d'Ambès et Saint-Christoly) et 'estuaire aval' (entre Saint-Christoly et la Pointe de Grave).

L'estuaire amont (entre Bec d'Ambès et Saint-Christoly) :

Sa morphologie est caractérisée par 4 éléments (fig.I.2) :

- un chenal en voie de comblement appelé « bras de Macau », il est situé entre la rive gauche de l'estuaire et l'ensemble des îles Cazeau, Nord et Verte.
- le chenal de navigation (en bleu sur fig.I.2 partie amont), qui prend naissance au Bec d'Ambès, et longe les îles Cazeau, Nord et Verte du côté droit. A l'aval de l'île Verte, il est situé sur la rive gauche de l'estuaire. Les profondeurs de ce chenal oscillent entre 7 et 10 mètres au-dessous du 0 marin, sa largeur varie de 400 à 800 mètres.
- Une zone de hauts-fonds qui s'étend en aval du PK31. Elle est caractérisée par un grand nombre d'îles (Paté, Sans Pain, Vasard, Bouchaud, Saint-louis et Trompeloup) et de bancs de sable (bancs de Plassac, Saint-louis et Saint-Estèphe) culminant à plus de 2.5 mètres au dessus du 0 marin (fig.I.2). La morphologie de ces bancs a été étudiée par *Migniot (1971)*, *Allen (1972)* et *Cremer (1975)*. Entre ces îles et ces bancs se localisent de petits chenaux secondaires.

On distingue également dans cette zone, des slikkes bordières beaucoup plus vastes que celles présentes dans l'estuaire fluvial.

- Un chenal situé sur la rive droite, d'importance secondaire par rapport au chenal de navigation. Il débute au niveau du Banc de Plassac (PK35) et se prolonge en aval jusqu'au Banc de Saint Louis (fig.I.2). Sa profondeur varie entre 10 m et 4 m au-dessous du 0 marin.

L'estuaire aval (entre Saint-Christoly et l'embouchure) :

Dans l'estuaire aval, les îles disparaissent et il ne subsiste que deux chenaux : le chenal de Saintonge et la partie aval du chenal de navigation (en bleu sur fig.I.2 partie aval). Ils sont séparés l'un de l'autre par une ligne de hauts-fonds qualifiée d'épine dorsale de la Gironde.

Dans cette partie de l'estuaire, le chenal de navigation longe du côté gauche le banc de Saint-Estèphe jusqu'au PK67. A partir de là, il dévie de la rive gauche et se dirige vers la rive droite (fig.I.2). Sa profondeur est relativement constante à -7 mètres jusqu'au PK81, au-delà, une rupture de pente induit l'approfondissement du chenal de navigation et atteint, ainsi, -15 mètres au PK86. On note l'apparition de bancs sableux à l'aval du PK75 ; bancs de Goulée, des Mets et des Marguerites.

Le chenal de Saintonge débute au PK75. Sa profondeur augmente régulièrement sans rupture de pente, de -3 mètres au PK75 à -25 mètres au PK89.

Les deux chenaux fusionnent au niveau de la Pointe de Grave et du Banc de Saint-Georges. La profondeur dépasse à ce niveau là, la trentaine de mètres.

Les zones intertidales couvrent une vaste superficie. Sur la rive droite, leur largeur peut atteindre 1200 mètres à Mortagne (PK74). Sur la rive gauche, la slikke atteint une largeur supérieure à 2800 mètres dans l'anse du Verdon (Sagouis, 1976).

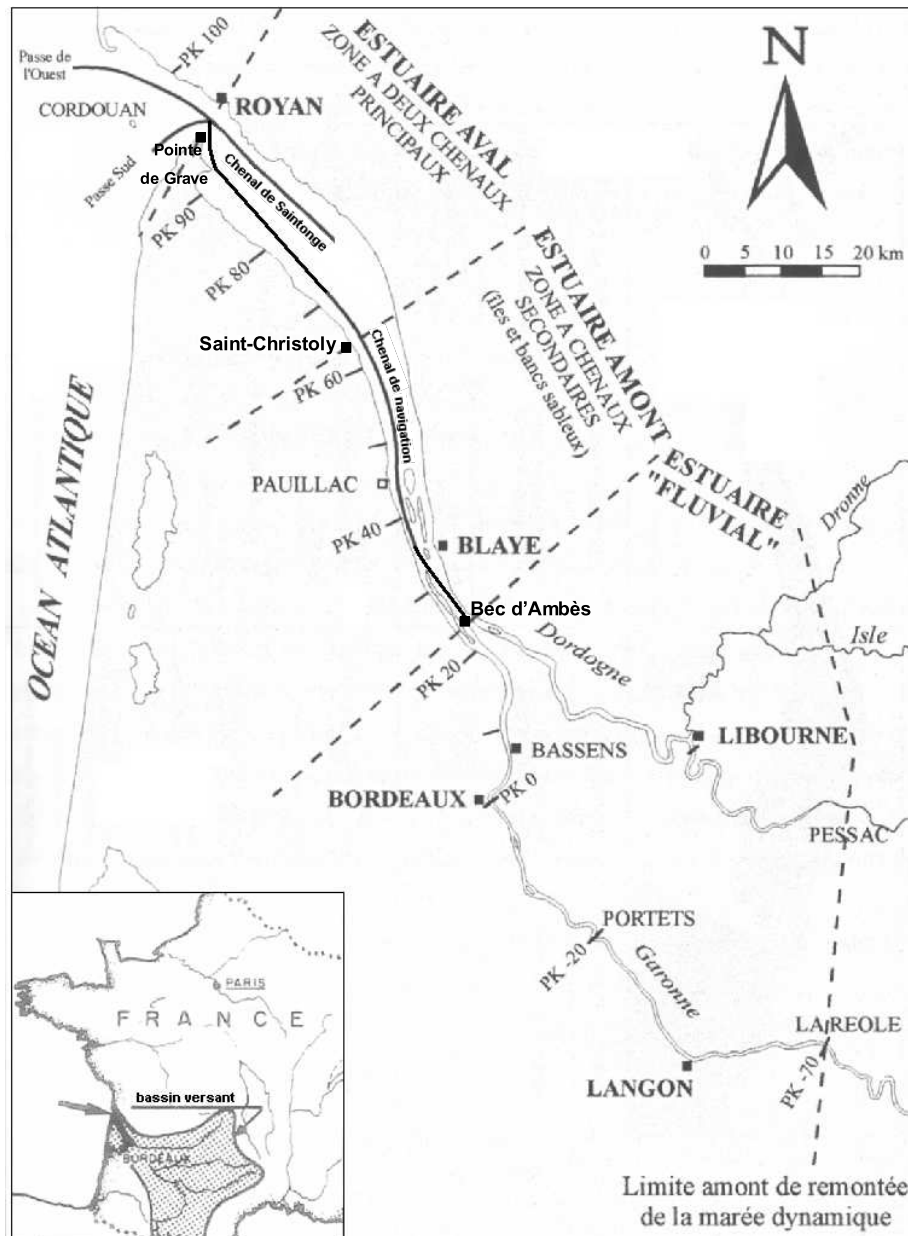


Fig.I.1- Schéma du système estuarien de la Gironde (Sottolichio, 1999, modifié) et du bassin versant (Allen et al., 1976).

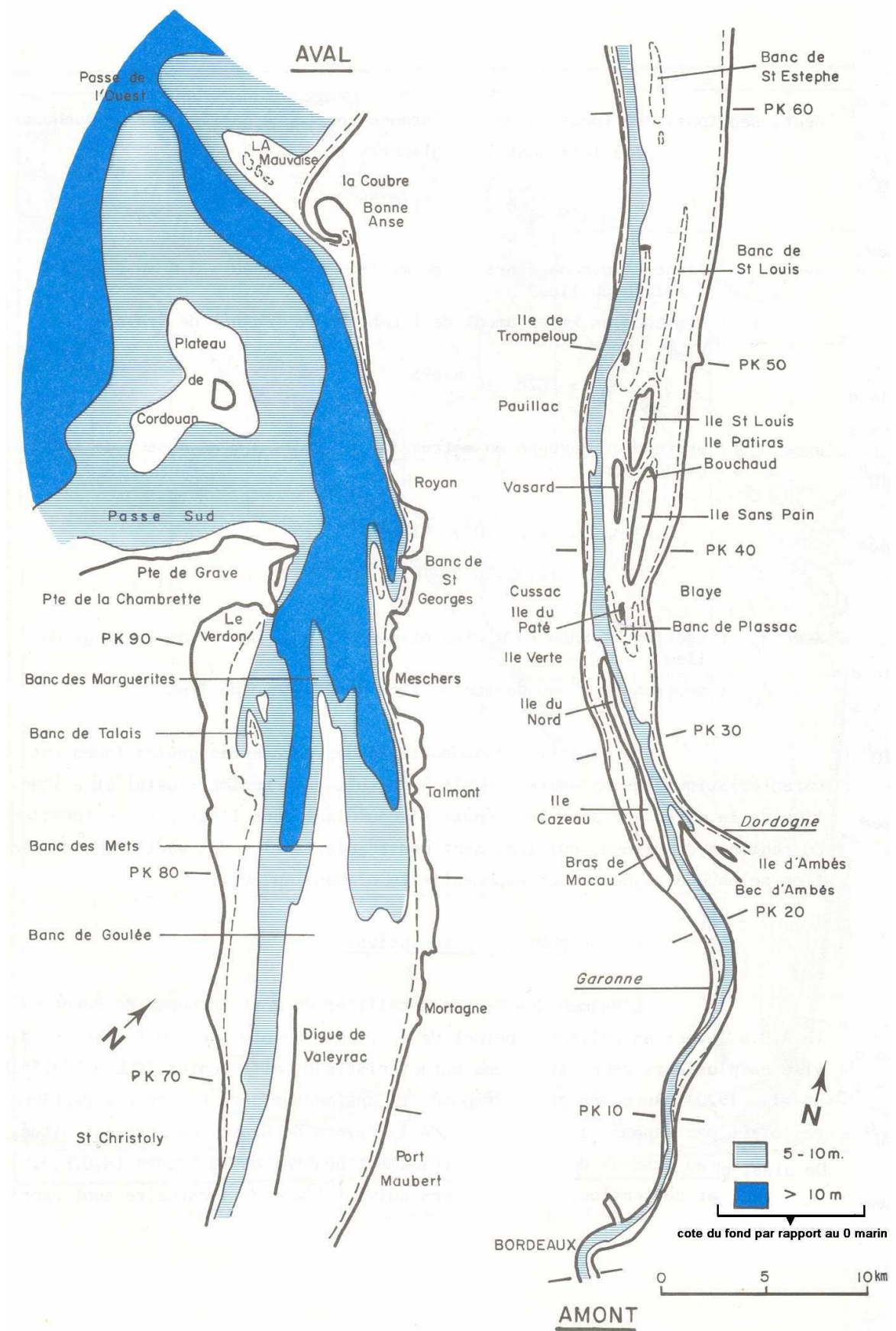


Fig.I.2- Schéma détaillé de l'estuaire de la Gironde et d'une partie de la Garonne (Castaing, 1981).

I.2 L'embouchure

Nous présenterons l'embouchure de façon succincte. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter la thèse d'Allen (1972).

A l'aval de la Pointe de Grave, le chenal principal, appelé la Passe de l'Ouest, longe les falaises crétacées de Saintonge et continue dans cette direction jusqu'à La Palmyre (fig.I.3). Il dévie, ensuite, de façon rectiligne de quelques kilomètres, avant que sa trajectoire ne décrive une courbe concave jusqu'à la « Pointe de la Courbe », et s'oriente à partir de là vers l'ouest.

Le plateau de Cordouan est situé entre la Passe de l'Ouest, et un chenal peu profond appelé Passe Sud (Allen et al., 1969 ; Castaing et al., 1974). Le plateau, de profondeur -3 mètres à -8 mètres, est recouvert de sables à l'ouest et de graviers à l'est.

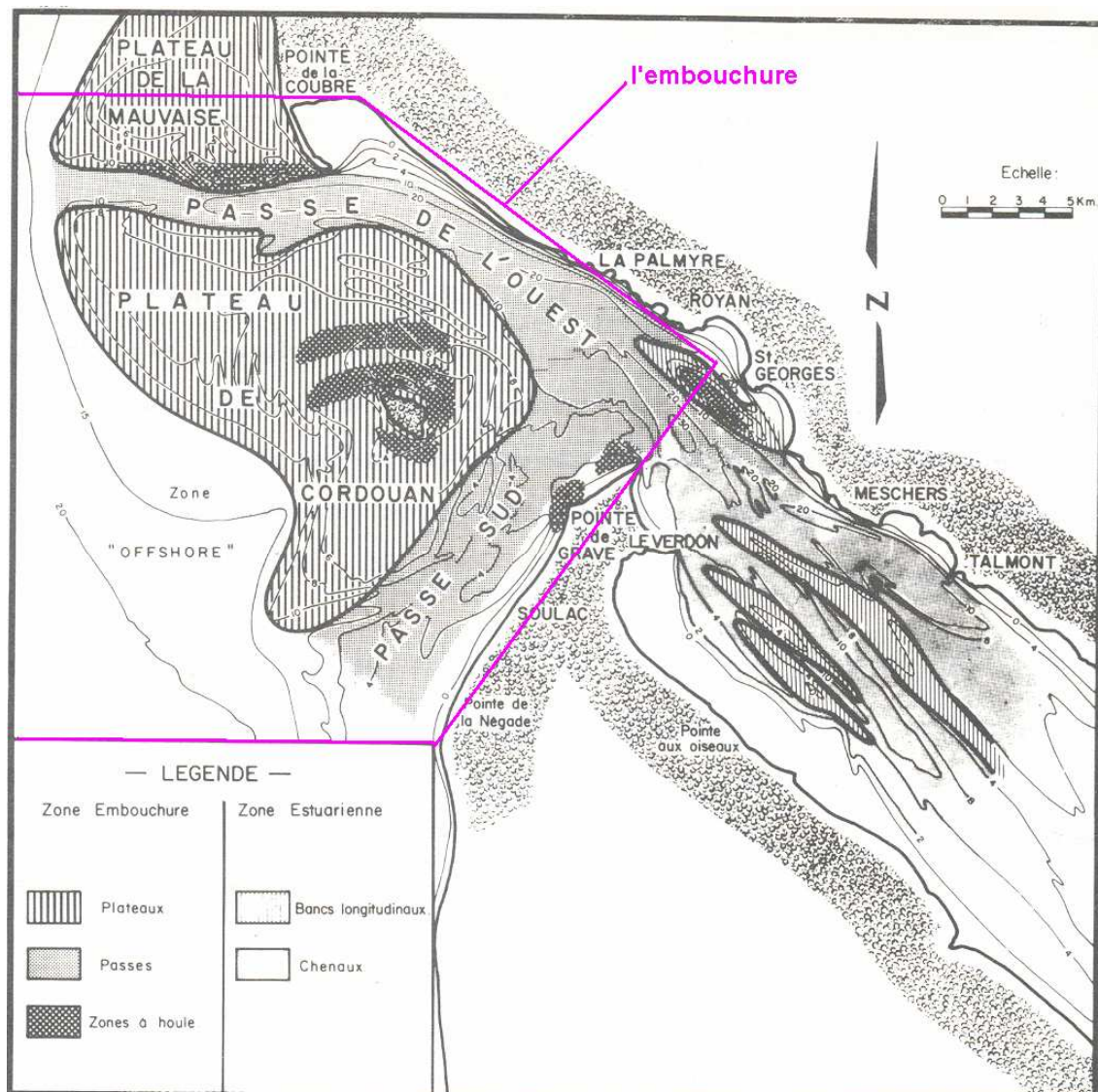


Fig.I.3- Schéma de l'embouchure (Allen, 1972, modifié).

I.3- L'hydrodynamique

I.3.1- La marée

Les caractéristiques de la marée dans l'estuaire de la Gironde, ont été mises en évidence par les ingénieurs du Service Hydrographique de la Marine (*Manen, 1867, Fichot, 1916*) et du Port Autonome de Bordeaux (*Leveque, 1936*). Sur le plateau continental, la marée a fait l'objet des travaux de *Puycouyol (1962)*, du Service Hydrographique de la Marine (*1968*) ainsi que ceux de *Cavanie et Hyacinthe (1976)*.

La marée dans le Golfe de Gascogne est de type semi-diurne avec une période de 12 heures 25 mn. *Cavanie et Hyacinthe (1976)* ont établi la carte de propagation de la composante principale M2 de la marée semi-diurne dans le Golfe de Gascogne.

A l'embouchure, les lignes cotidales s'orientent perpendiculairement aux rives et se propagent plus vite dans les chenaux que sur les hauts fonds. A l'entrée de l'estuaire (en amont de la Pointe de Grave et Royan), l'onde de marée se propage plus vite dans le chenal de Saintonge comparé au chenal de navigation. Cela est vraisemblablement dû à une plus faible profondeur et largeur de ce dernier par rapport au premier, ainsi qu'à l'amortissement de la marée dans le chenal de navigation, engendrée par la Pointe de Grave. Vers l'amont, cette différence de propagation se réduit jusqu'à l'équilibre dans la zone de Mortagne. Au niveau des îles, la tendance s'inverse, l'onde de marée se propage plus vite dans le chenal de navigation comparé au chenal de la rive droite (*Laboratoire National d'Hydraulique, 1971*).

La Gironde est un estuaire hypersynchrone (fig.I.4). L'amplitude de la marée et les vitesses des courants augmentent de l'aval vers l'amont (*Le Floch, 1961 ; Larras, 1964 ; Laval, 1964*). En outre, l'onde de marée devient dissymétrique dans le temps, avec une durée du montant plus courte que celle du perdant (fig.I.5). Ainsi, l'onde de pleine mer est plus rapide que l'onde de basse mer, et tend à rattraper la basse mer précédente dans l'estuaire amont. Ce phénomène est accru par des coefficients de marée de plus en plus forts. A titre d'exemple (fig I.5) pour une marée de vive-eau (coef. 110), le marnage est de 5m à l'embouchure (Pointe de Grave) ; il atteint 5,5 m à Pauillac (à 48 km de l'embouchure), et presque 6 m à Bordeaux (95 km de l'embouchure). En termes d'asymétrie de l'onde de marée, à Bordeaux la durée du flot est de 5 h environ en vive-eau (coef. 110), pour un jusant de 7h25mn.

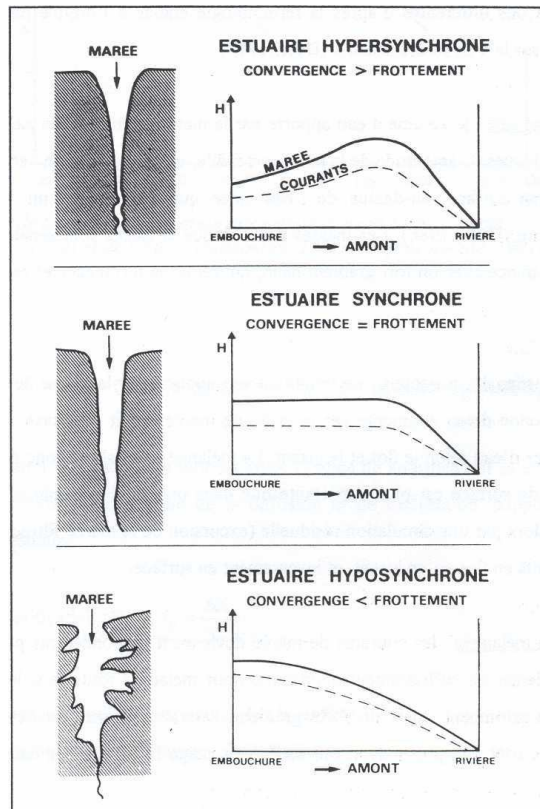


Fig.I.4- Types d'estuaires selon l'évolution spatiale de la marée et des courants (Le Floch, 1961).

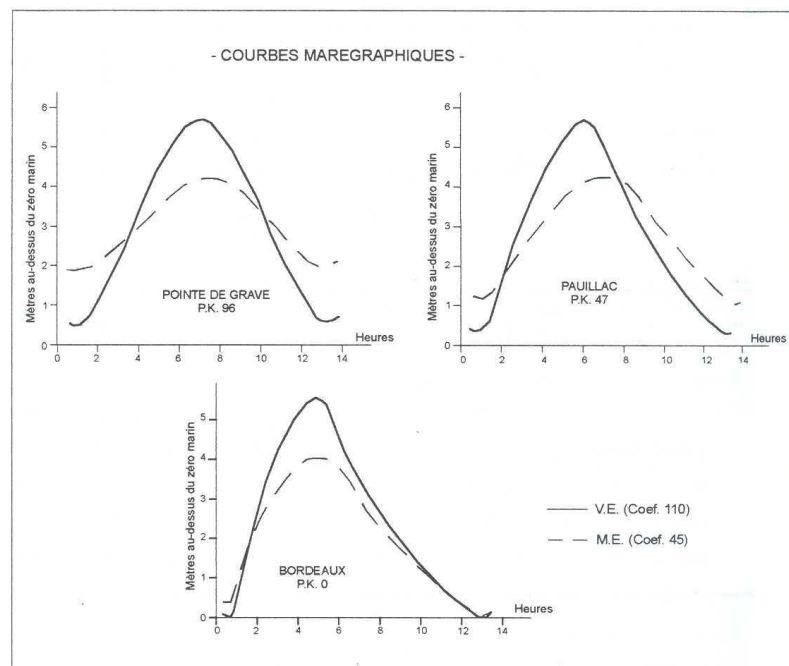


Fig.I.5 – Courbes marégraphiques à trois endroits du système estuarien de la Gironde (Allen, 1972, modifié)

I.3.2- Volume d'eau introduit par la marée

A chaque montant, le Port Autonome de Bordeaux évalue le volume d'eau pénétrant l'estuaire de la Gironde, entre $1,1$ et 2.10^9 m^3 (Allen, 1972). Ce volume varie en fonction du coefficient de marée et du débit fluvial. Bonnefille (1970) a établi une loi exponentielle permettant de calculer le volume d'eau introduit par la marée, suivant la distance évaluée à partir de l'embouchure :

$$\Omega = 0,1 C \cdot \frac{2}{3} \cdot (10^{-X/75}) \text{ pour l'estuaire de la Gironde}$$

$$\Omega = 0,1 C \cdot \frac{2}{3} \cdot (10^{-X/55}) \text{ pour la Garonne et la Dordogne}$$

Avec : Ω : le volume d'eau introduit pendant le flot.

C : le coefficient de marée en centièmes.

X : la distance en amont de l'embouchure en km.

Il est communément admis que la Garonne reçoit plus d'eau que la Dordogne, mais les estimations diffèrent sur le pourcentage du volume total attribué à chaque fleuve. Pour Bonnefille (1970), les pourcentages sont de 52,5% et 47,5% pour la Garonne et la Dordogne respectivement. Quant à Migniot (1969), il les a évalués à 65% et 35% respectivement.

I.3.3- Les courants de marée

On peut distinguer les courants à l'embouchure de ceux dans l'estuaire au sens strict.

A l'embouchure :

Dans les chenaux Sud et de la Passe de l'Ouest, ainsi que sur le plateau de Cordouan, les courants de marée sont alternatifs, alors qu'ils sont giratoires au-delà de l'isobathe -10 m en dehors des chenaux. Nous donnons un exemple de mesures du courant (Castaing, 1981) à la sortie de la Passe de l'Ouest à 1,5 m du fond (station A sur fig.I.6 et mesures sur fig.I.7). On constate que les vitesses maximales se produisent généralement juste avant la Basse Mer. Elles peuvent atteindre 40 cm/s, et s'orientent au N.-N.W pour de très forts coefficients. A Pleine Mer, les vitesses sont minimales : elles sont souvent comprises entre 5 cm/s et 10 cm/s.

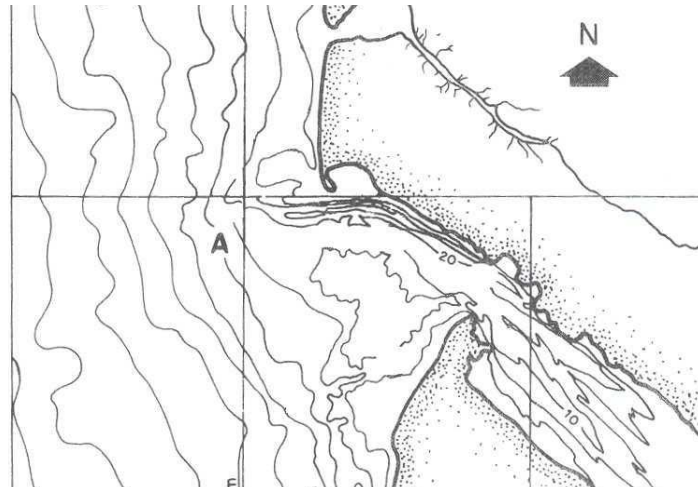


Fig.I.6- Station de mesures à la sortie de la Passe de l'Ouest au point A (Castaing, 1981, modifié).

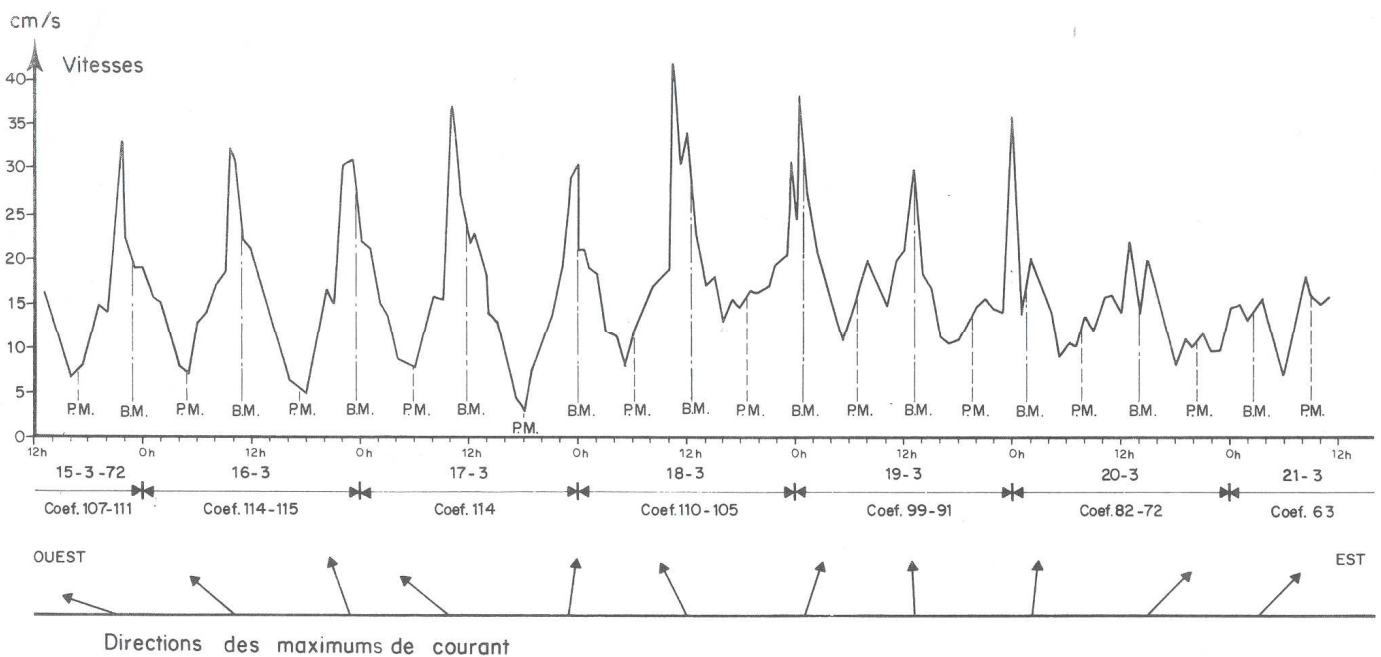


Fig.I.7- Intensité et direction du courant à la sortie de la Passe de l'Ouest au point A (voir fig. I.6) (Castaing, 1981, modifié).

Dans l'estuaire

Les mesures de courant dans l'estuaire ont été plus nombreuses que dans l'embouchure. Nous décrivons une campagne de mesures anciennes, ensuite quelques mesures plus récentes.

a) Campagne T.R.A.V.A.G.I.R (mesures anciennes)

Des mesures de courant ont été effectuées au cours de la mission T.R.A.V.A.G.I.R., le 22 mai 1974 (Castaing et al., 1975) (fig.I.8). Cette date représente une période de vives-eaux pendant un régime

hydraulique (débits) moyen. L'intérêt de cette campagne réside dans la simultanéité des mesures fines de courants en plusieurs stations, unique jusqu'à nos jours. Ces mesures ont permis de suivre l'évolution de l'hydrodynamique avec une distribution spatiale suffisante pour comprendre les processus hydrosédimentaires qui en découlent. A chaque station, des immersions d'un courantographe ont été réalisées depuis un navire au mouillage, pour effectuer des mesures toutes les heures environ, à 3 profondeurs différentes (1m sous la surface, mi-profondeur et 1m au-dessus du fond). De manière générale, la courbe des vitesses du courant suit l'évolution de la marée, et les vitesses sont plus élevées dans le chenal de navigation qu'ailleurs. En surface, les courants peuvent atteindre et dépasser 2 m/s, tandis que près du fond, elles dépassent souvent 1m/s. Au point le plus en amont (point F), les vitesses de flot dominant celles de jusant en surface et près du fond. Au point E, près du fond, les vitesses de flot sont plus élevées que celles de jusant ; en surface cette tendance s'inverse. Aux points A, B, C et D ('estuaire aval'), en surface, les vitesses de jusant sont supérieures à celles de flot, alors que près du fond, elles ont tendance à s'équilibrer.

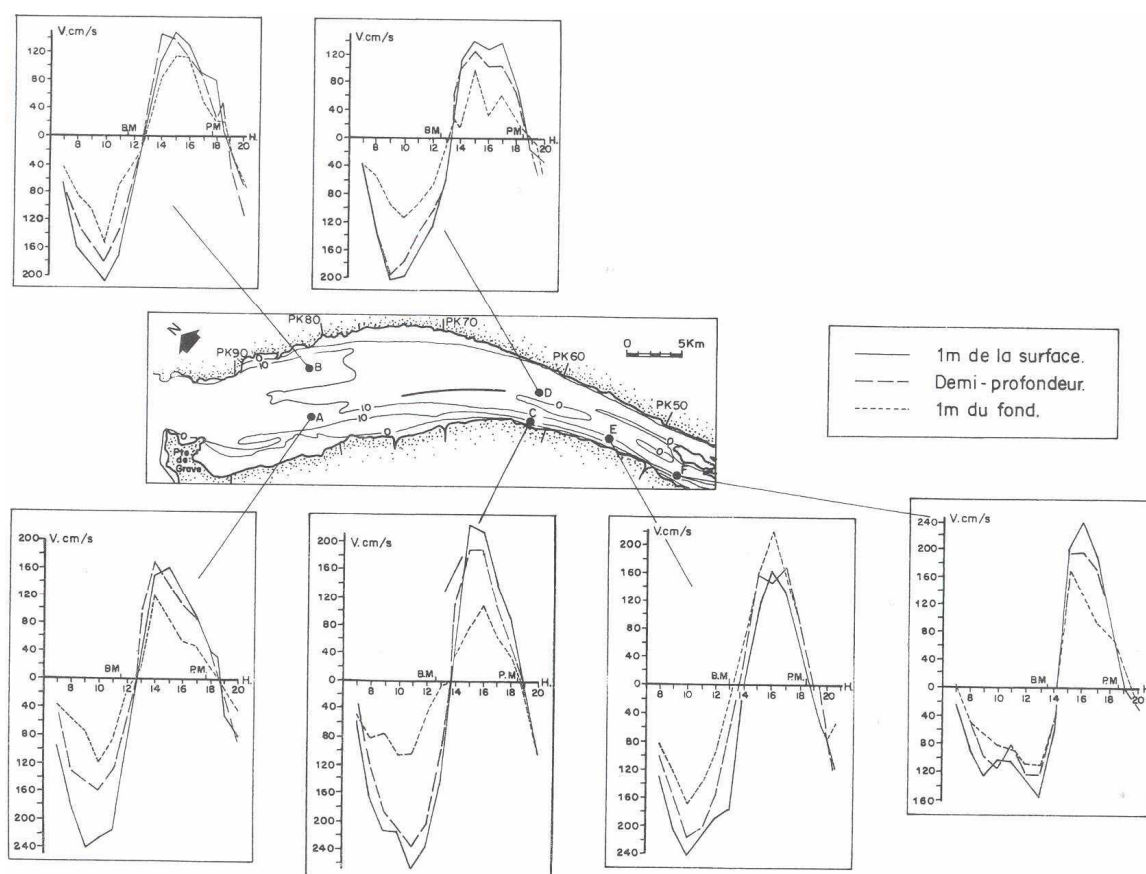


Fig.1.8- Intensité du courant à différents points dans l'estuaire de la Gironde, le 22 mai 1974 (Castaing, 1981).

Par cette série de mesures, *Castaing (1981)* avait démontré que les courants près du fond étaient suffisants pour remettre en suspension les sédiments déposés. L'asymétrie flot/jusant des intensités de courant permet quant à elle d'expliquer l'existence du bouchon vaseux (voir plus loin).

b) Mesures plus récentes :

Nous allons présenter des mesures réalisées ultérieurement, qui permettent de décrire les courants dans d'autres compartiments de l'estuaire, moins observés auparavant. L'intérêt de ces mesures réside dans leur durée assez longue permettant de couvrir des marées de vive-eau et de morte-eau. Pour cette raison, elles serviront également à valider le modèle SIAM-3D (voir chapitre IV).

Les mesures du LNH dans l'estuaire amont

Nous avons examiné les mesures fournies par le LNH, Laboratoire National d'Hydraulique, réalisées en août 2006 (*C. Villaret, comm. pers.*). Ces mesures ont été obtenues au moyen de profileurs acoustiques autonomes à effet Doppler. Trois stations de mesures ont été placées sur une section transversale de l'estuaire au niveau de Château-Montrose (PK52) (fig.I.9). Chacune des stations est située sur l'un des trois chenaux existants à cet endroit: chenal de navigation (rive gauche), chenal médian et chenal de rive droite (fig. I.10). Les courants sont enregistrés une période de 22 jours, du 03/08/2006 au 24/08/2006, avec un pas de temps de 10 minutes.

Dans cette partie, nous décrirons uniquement les mesures de la station 2 (en surface et près du fond), localisée dans le chenal de navigation, sous une profondeur d'environ 8,40 m et sous étiage (fig.I.10). Nous présenterons notamment deux périodes caractéristiques, l'une en vives-eaux (du 10/08/2006 au 13/08/2006), l'autre en mortes-eaux (du 17/08/2006 au 20/08/2006).

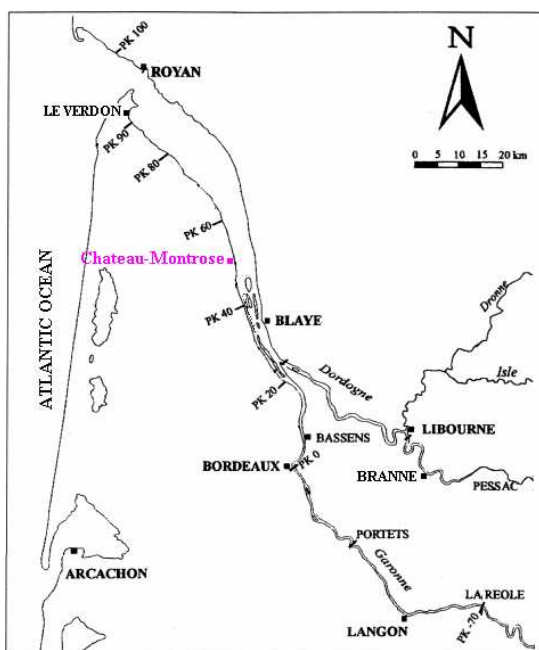


Fig.I.9- Localisation de « Château Montrose »- position des stations de mesures du LNH (août 2006)

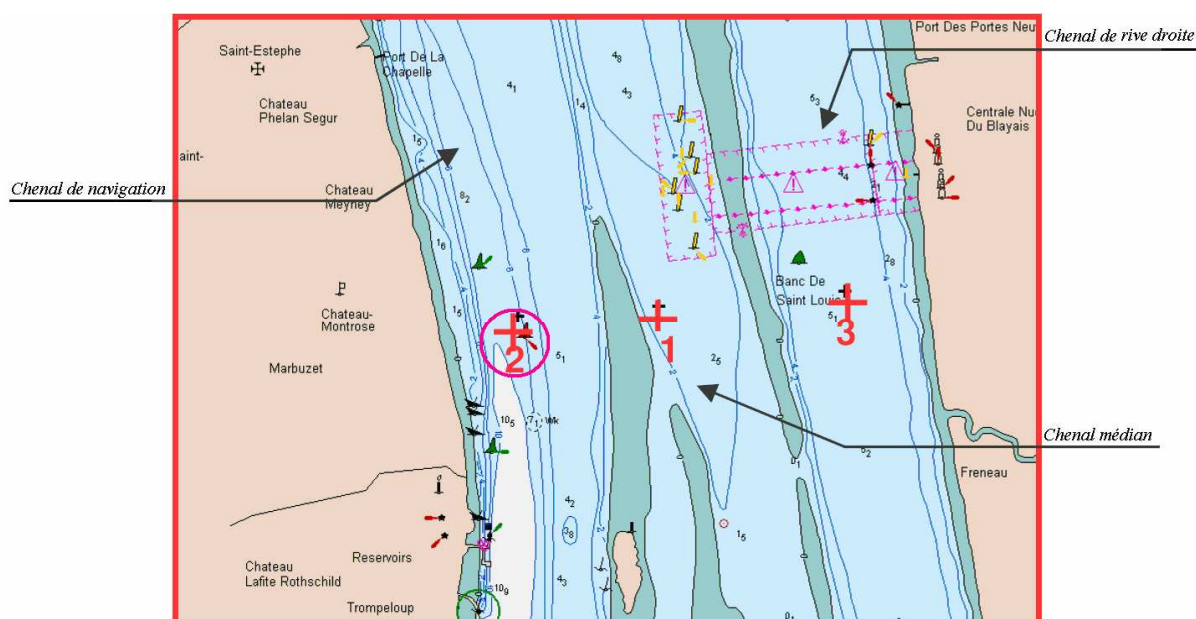


Fig.I.10- Zoom sur la position des points de mesures du LNH (août 2006)

En mortes-eaux, près du fond (fig.I.11), les intensités du courant de jusant et de flot sont du même ordre de grandeur. Les pics de vitesse atteignent et dépassent souvent 1 m/s, avec un pic de flot légèrement supérieur au pic de jusant. Il est intéressant de voir que la décélération du courant de flot est plus progressive que celle de jusant. De légères fluctuations locales prolongent considérablement la durée du flot, à tel point que cette dernière, est quasi-équivalente à la durée du jusant. La différence des étales est très marquée : la décélération du jusant puis l'accélération de flot sont rapides, tandis que la décélération du flot puis l'accélération du jusant sont plus lentes.

En surface (fig.I.12), l'intensité du courant de jusant prend le pas sur celle de flot, avec une différence plus nette que près du fond. Les vitesses atteignent 1.5 m/s en jusant. Les fluctuations locales observées lors de la décélération du courant de flot, sont moins importantes que celles près du fond. L'asymétrie des étales semble moins marquée, puisque la décélération en fin de jusant est plus lente, ainsi que l'accélération de flot qui s'ensuit.

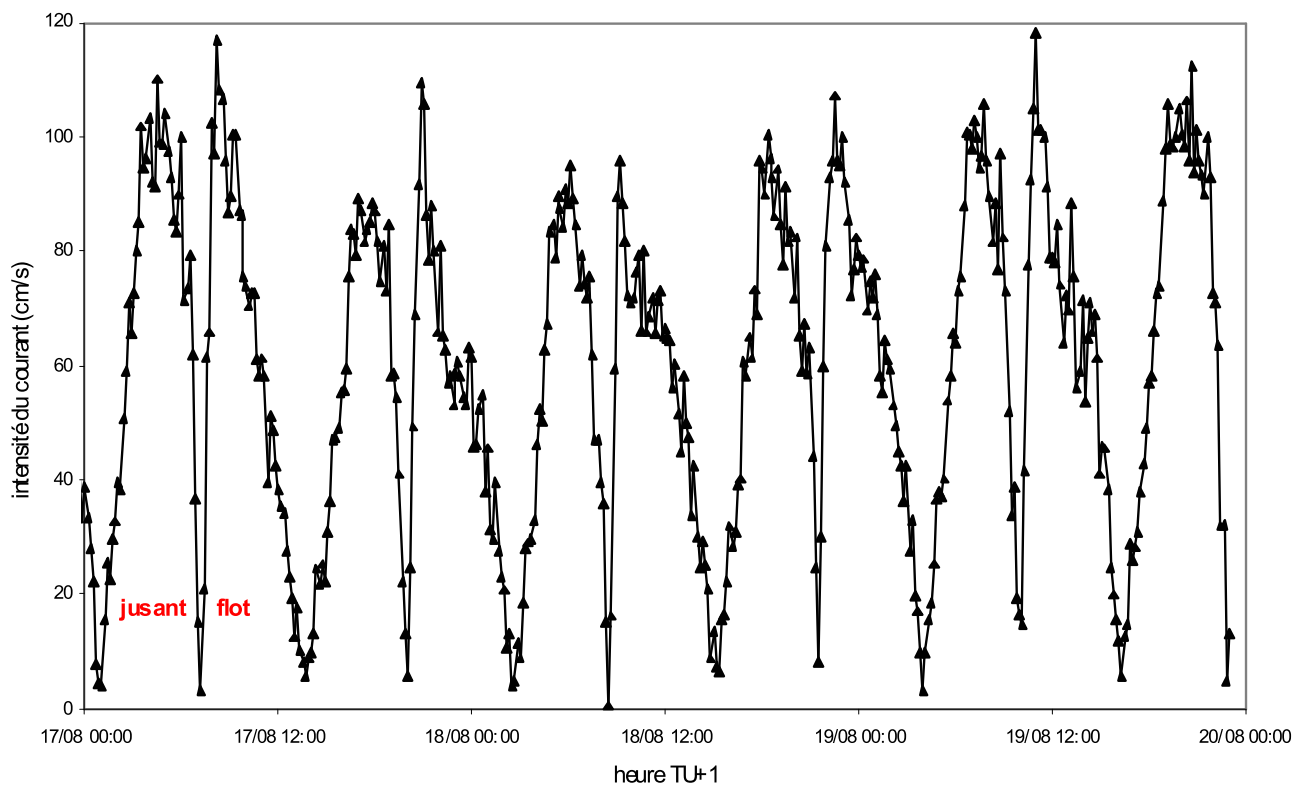


Fig.I.11- Intensité du courant mesurée près du fond à Château-Montrose du 17 au 20 août 2006 (mortes-eaux).

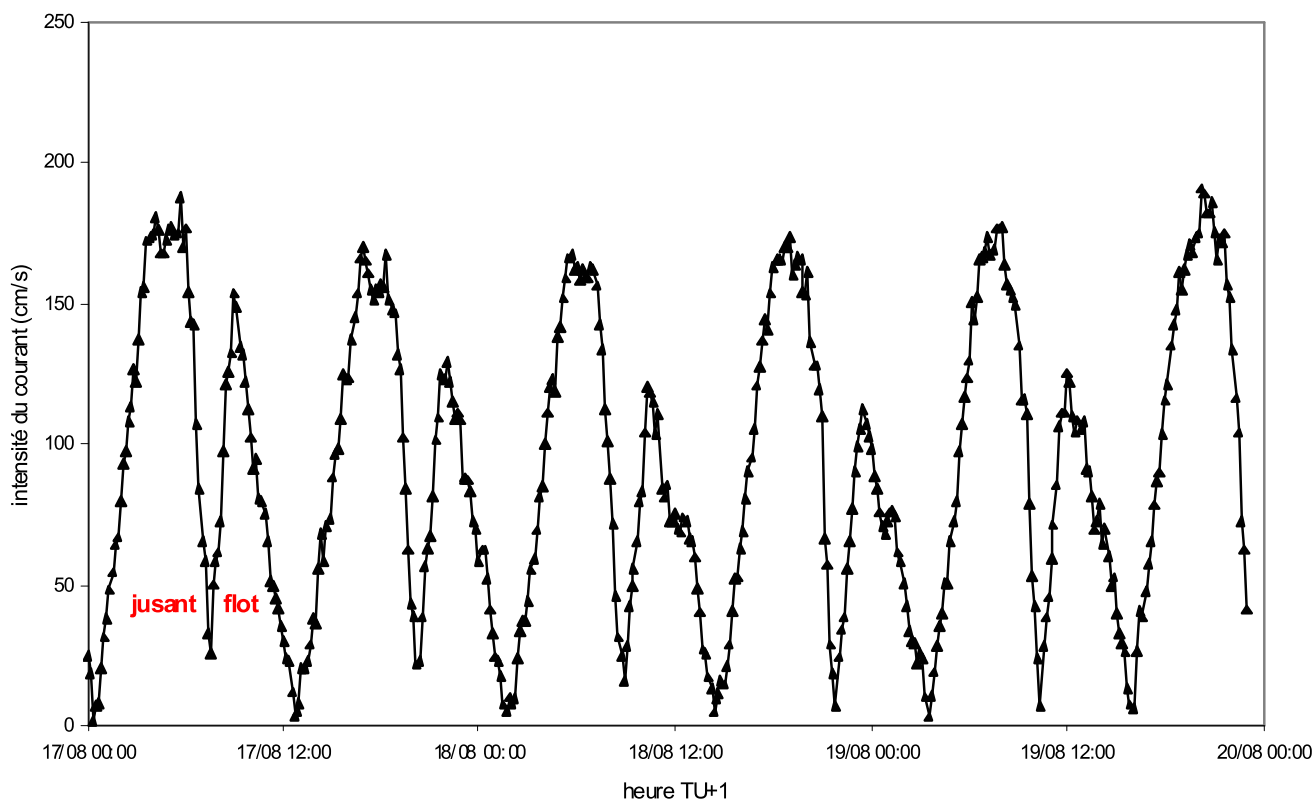


Fig.I.12- Intensité du courant mesurée en surface à Château-Montrose du 17 au 20 août 2006 (mortes-eaux)

En vives-eaux, près du fond (fig.I.13), l'intensité du courant de jusant est légèrement supérieure à celle de flot, avec des vitesses maximales de 1.6 et 1.4 m/s respectivement. Par rapport à la situation de mortes-eaux, les pics de vitesse semblent plus étalés dans le temps.

En surface (fig.I.14), les pics de flot et de jusant sont d'intensité semblable, avec une légère supériorité du jusant. Les vitesses de surface atteignent 2.5 m/s. Aussi bien en surface que près du fond, la durée de la phase de jusant est supérieure à celle de flot, avec une différence plus marquée en surface. Cette différence est associée à la dissymétrie de l'onde de marée dans cette partie de l'estuaire, à laquelle s'ajoute le flux des eaux fluviales provenant de l'amont. Ces observations sont en cohérence avec celles de la campagne T.R.A.V.A.G.I.R. commentées plus haut (Castaing *et al.*, 1975).

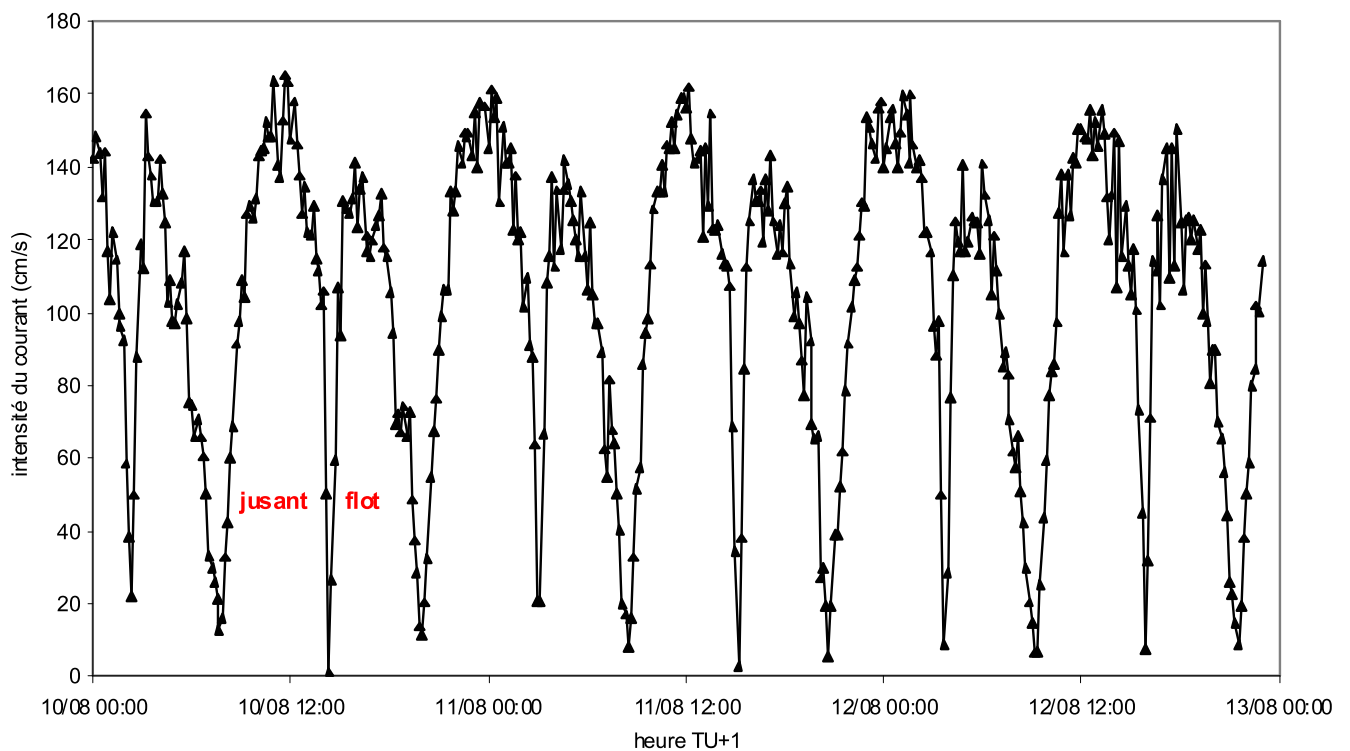


Fig.I.13- Intensité du courant mesurée près du fond à Château-Montrose du 10 au 13 août 2006 (vives-eaux).

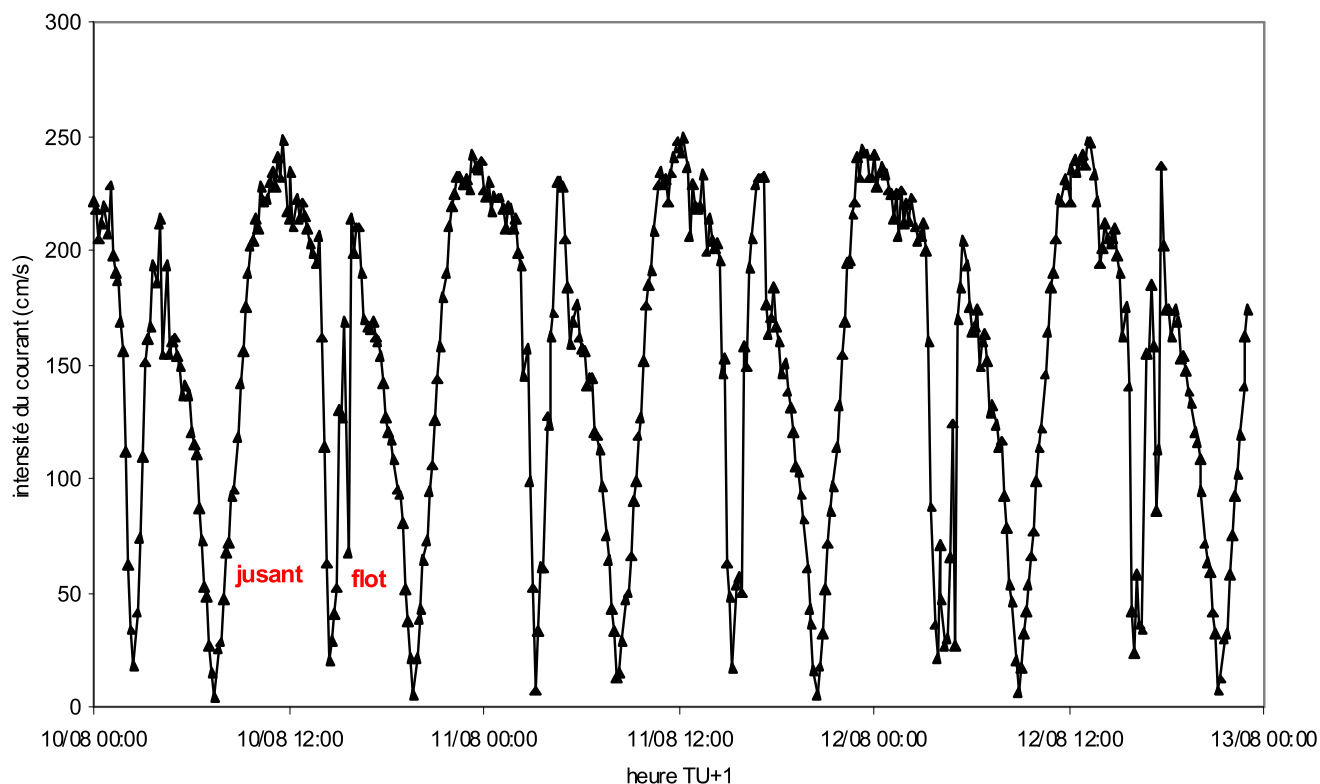


Fig.I.14- Intensité du courant mesurée en surface à Château-Montrose du 10 au 13 août 2006

Les mesures d'EPOC dans l'estuaire fluvial

Des mesures du laboratoire EPOC ont été effectuées dans la Garonne, à Lormont (aval de Bordeaux) et à Cérons (amont de Portets, fig.IV.15). Les enregistrements ont été réalisés à 2 m au-dessus du fond, au moyen de courantmètres autonomes Anderaa. La période des mesures s'étend du 14 septembre au 18 octobre 1988. Les vitesses ont été mesurées toutes les 10 minutes.

On se limitera à présenter les intensités du courant les plus fortes et les plus faibles, qu'on associera aux périodes de vives et de mortes-eaux respectivement.

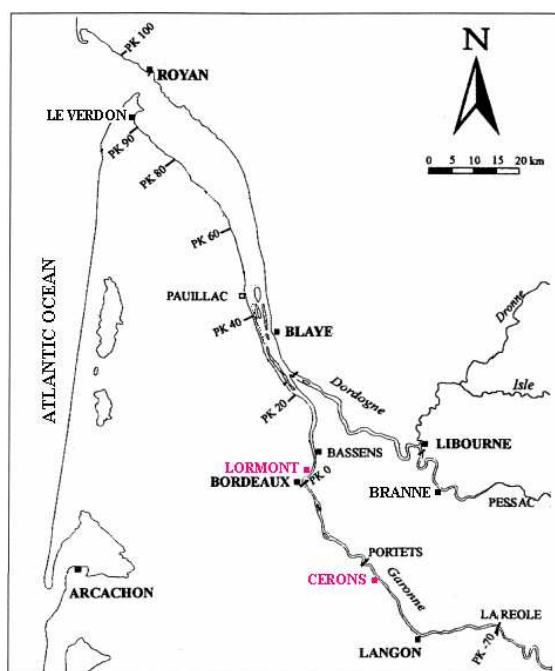


Fig.I.15- position des stations de mesure.

A Lormont, en mortes-eaux (fig.I.16) et vives-eaux (fig.I.17), la courbe des vitesses présente une allure atypique, avec des courants de flot largement supérieurs à ceux de jusant. En flot, les vitesses atteignent 70 cm/s en mortes-eaux et 80 cm/s en vives-eaux ; tandis que celles de jusant ne dépassent pas 50 cm/s, avec un pic très court, suivi d'une phase relativement longue de vitesses très faibles. Cette phase est caractérisée par des fluctuations importantes autour de 10 cm/s.

Ce signal semble peu représentatif du courant dans l'axe du chenal, le point de mesure étant situé à côté du chenal, sur une zone proche du bord ; la tranche d'eau à cet endroit là diminuait sensiblement pendant le jusant (sans aller jusqu'au découvrement) et ne permettait pas de développer des courants aussi élevés qu'en flot.

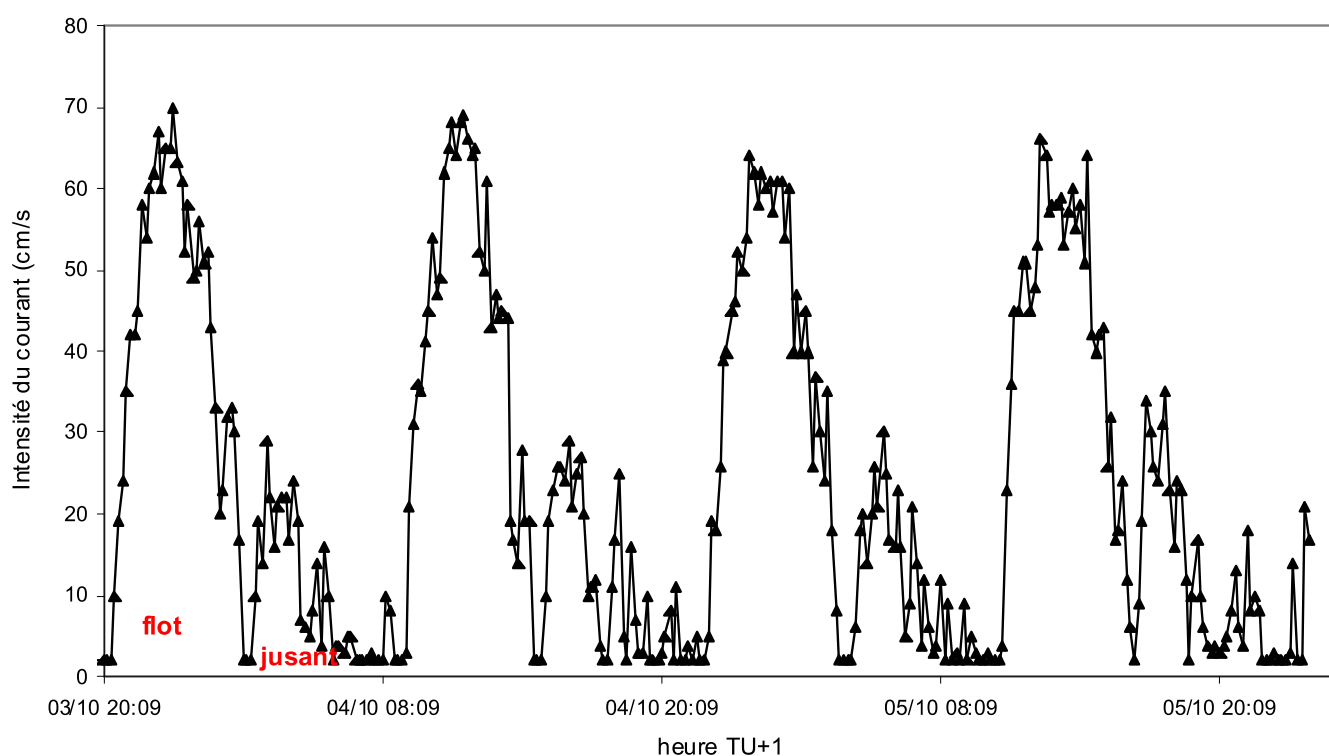


Fig.I.16- Intensité du courant à 2 m du fond à Lormont, du 03 au 05 octobre 1988 (mortes-eaux).

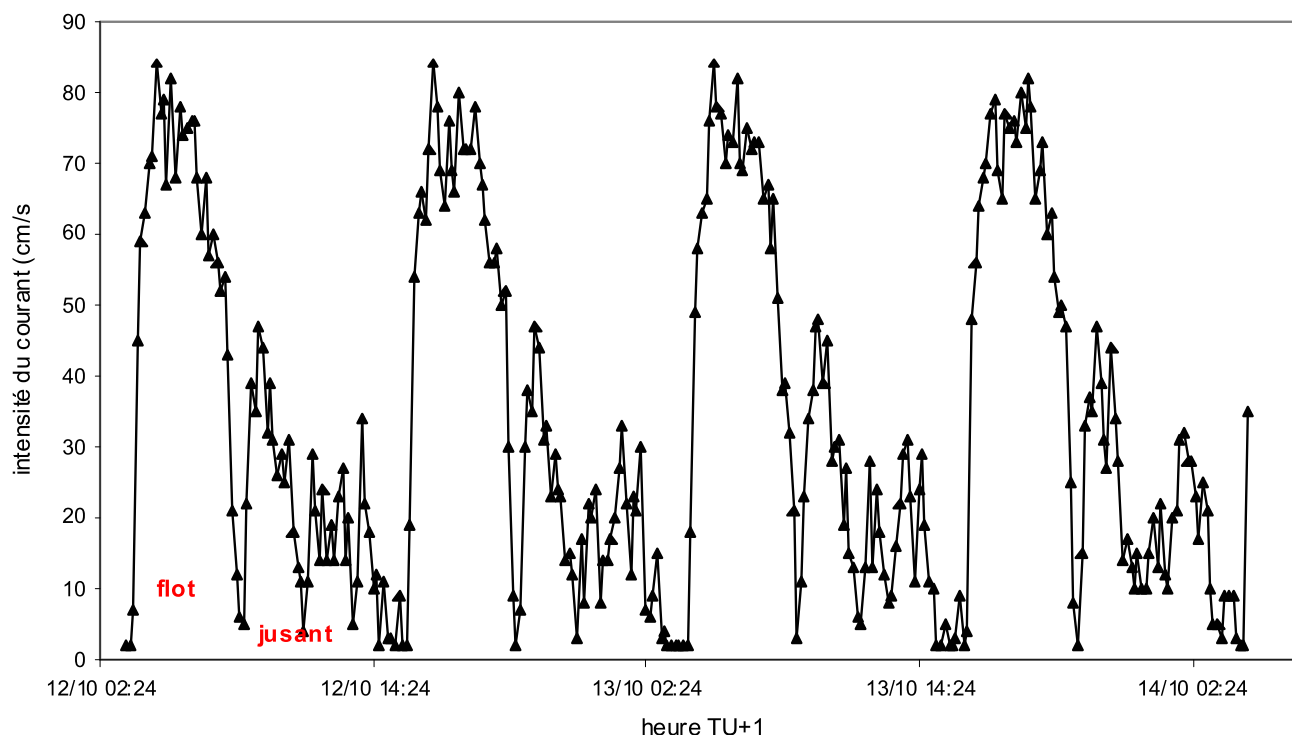


Fig.I.17- Intensité du courant à 2 m du fond à Lormont, du 12 au 14 octobre 1988 (vives-eaux).

A Cérons, (fig.I.18 et I.19) le signal enregistré semble bien représentatif de l'écoulement dans le chenal principal. En mortes-eaux (fig.I.18), les vitesses de jusant atteignent 70 cm/s et sont largement supérieures à celles de flot, qui ne dépassent pas 30 cm/s. En vives-eaux (fig.I.19), la dominance du jusant persiste (vitesses maximales de 80 cm/s), cependant, le flot développe des vitesses plus élevées qu'en mortes-eaux (jusqu'à 70 cm/s). Le signal de vitesse est en adéquation avec le signal de marée : la durée du flot est très réduite, alors que le jusant est plus long avec des vitesses de courant plus intenses. Ce contraste correspond à la quantité considérable d'eau douce à évacuer pendant le jusant par rapport au volume d'eau apporté par la marée pendant le flot.

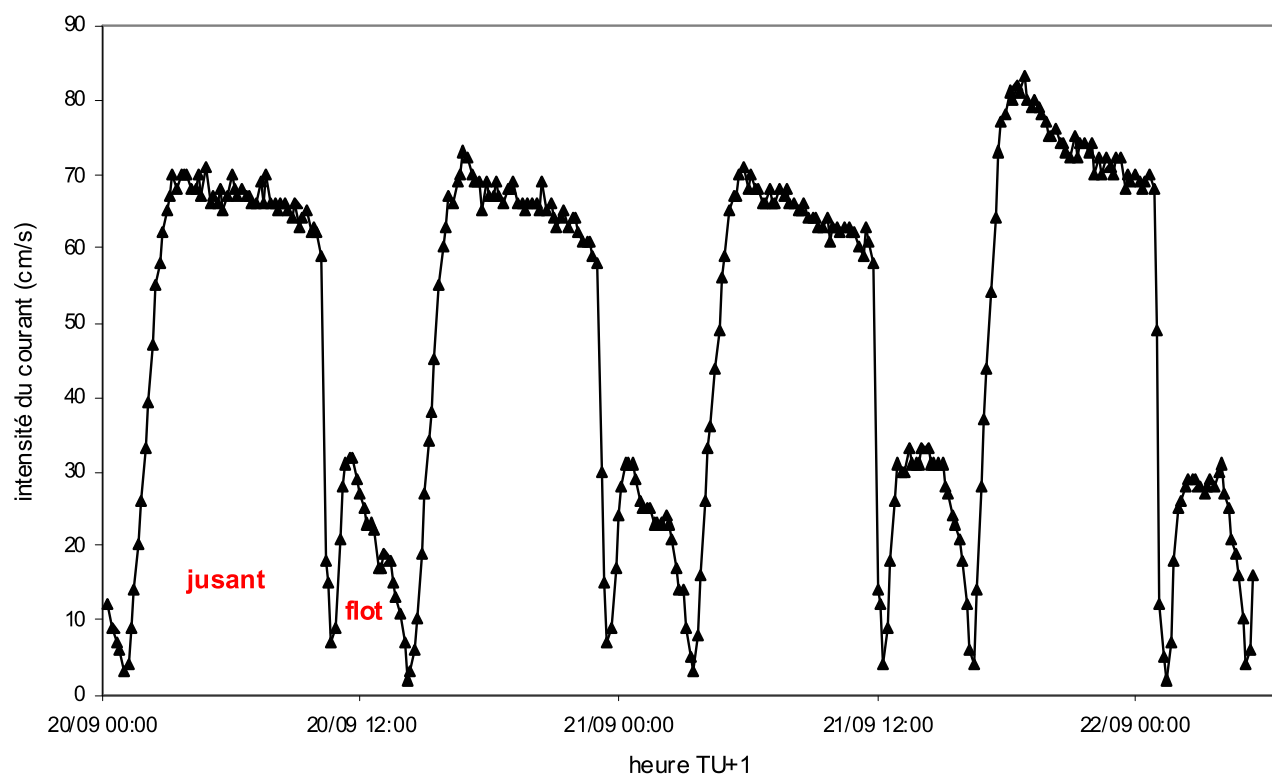


Fig.I.18- Intensité du courant à 2 m du fond à Cérons, du 20 au 22 septembre 1988 (mortes-eaux).

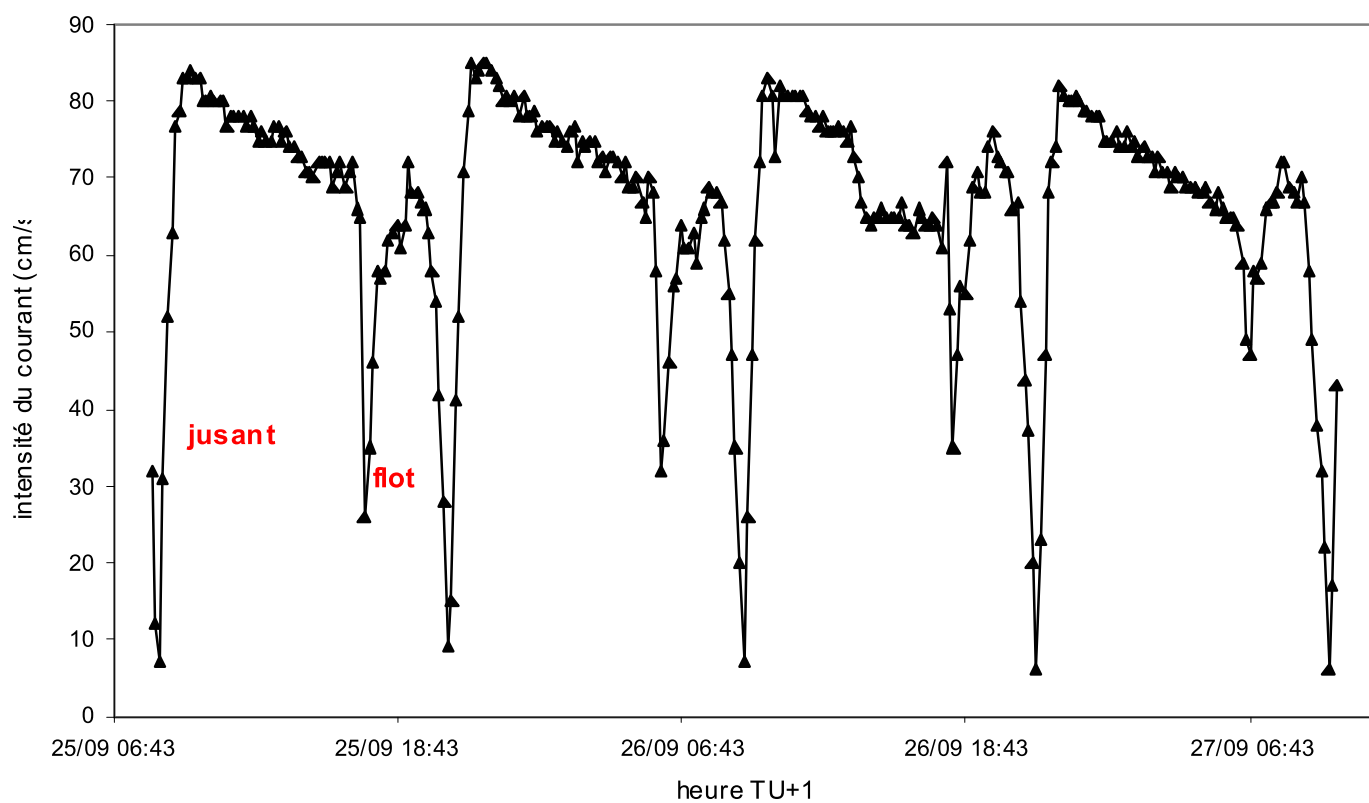


Fig.I.19- Intensité du courant à 2 m du fond à Cérons, du 25 au 27 septembre 1988 (vives-eaux).

I.3.4- La circulation résiduelle

La circulation résiduelle estuarienne met en évidence l'effet des gradients de densité liés aux stratifications de salinité (Dyer, 2000). En outre, elle indique la circulation résultante après filtrage des effets instantanés des courants de marée. En Gironde, celle-ci a été étudiée et décrite notamment par Bonnefille (1971), Allen (1972) et Castaing (1981). On peut distinguer la circulation prédominante dans la zone d'embouchure, et celle dans l'estuaire proprement dit.

a) Dans l'embouchure

Des mesures du courant ont été effectuées à différents endroits de l'embouchure représentant de faibles et fortes profondeurs (fig.I.20). Elles ont permis d'établir un schéma de circulation résiduelle en période d'étiage.

Le schéma est similaire à ceux proposés à l'embouchure de plusieurs autres estuaires (Postma, 1967 ; Harleman et al., 1969), qui établissent une circulation prépondérante de flot dans la tranche inférieure de la colonne d'eau, et une circulation prépondérante de jusant dans la partie supérieure. Les courants résiduels présentés ici (fig. I.20), ont été obtenus dans le cas de marées moyennes en période d'étiage. Cependant, leurs caractéristiques restent quasi-identiques en vives-eaux et en débits fluviaux élevés. Sur le plateau de Cordouan (station 3 dans fig. I.20) et dans la Passe Sud (station 4 dans fig. I.20), les 2/3 inférieurs de la colonne d'eau présentent des courants résiduels dirigés vers l'amont, alors que dans la Passe de l'Ouest (stations 1 et 2 dans fig.I.20), cela ne concerne que le tiers inférieur de l'écoulement. Vers l'ouest, au-delà de l'isobathe -10 m, les courants résiduels au fond sont dirigés vers le nord.

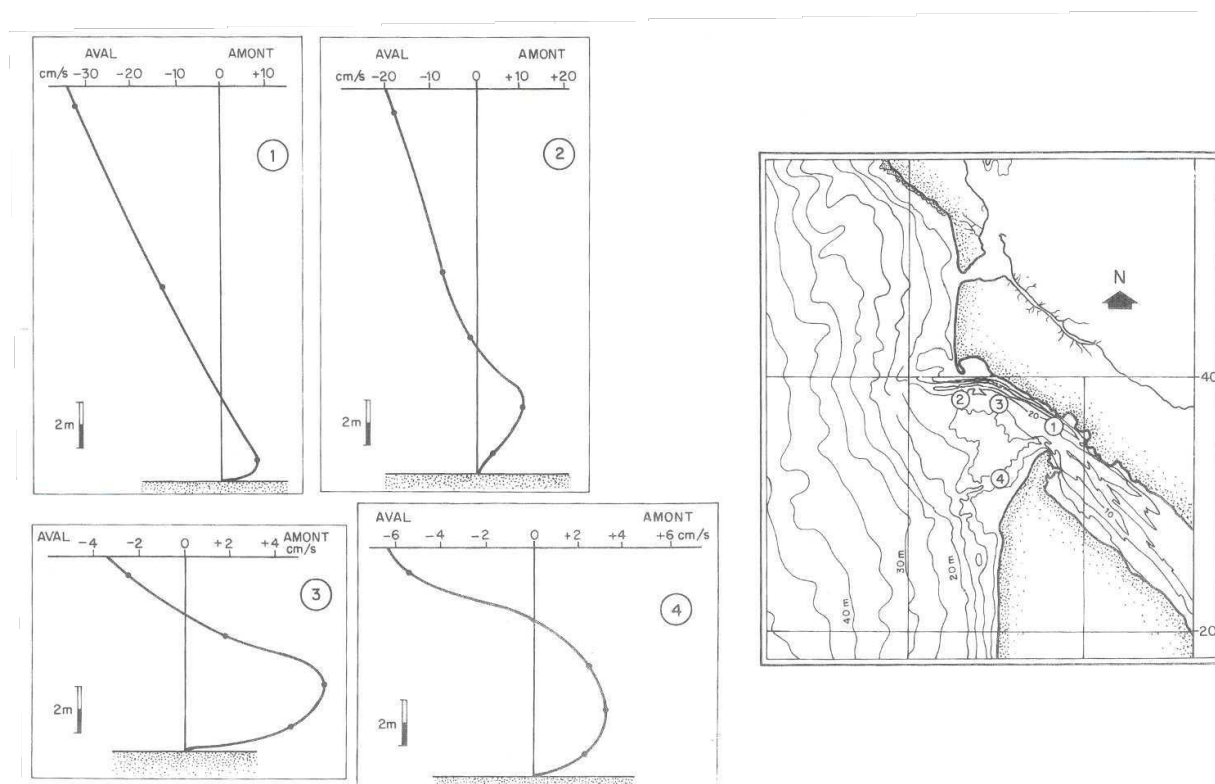


Fig.I.20- Courants résiduels dans l'embouchure aux stations 1,2,3 et 4 en période d'étiage

b) Dans l'estuaire de la Gironde

Les premiers schémas de circulation résiduelle dans l'estuaire de la Gironde, ont été esquissés grâce aux études du Port Autonome de Bordeaux et aux travaux de *Glangeaud (1938)*. *Allen (1972)* a synthétisé les connaissances acquises, suite aux travaux de *Pritchard (1955, 1967)*, *Harleman* et *Ippen (1969)*, et grâce à une série de mesures de courant réalisées en plusieurs points de l'estuaire dans les années 60 par la PAB (fig. I.21). On peut schématiquement distinguer deux situations selon le régime des fleuves.

En étiage et marée moyenne :

Près de la surface, les courants résiduels sont dirigés vers l'aval sur tout le domaine estuarien (fig.I.21). Près du fond, à l'aval du PK54, ils sont orientés vers l'amont (fig.I.21). En ce sens, ils confirment le fonctionnement déjà observé dans l'embouchure.

En crue et marée moyenne :

Près de la surface (fig.I.21), les courants résiduels sont dirigés vers l'aval sur tout le domaine estuarien, mais cette fois-ci, ils sont beaucoup plus élevés que le cas précédent. Près du fond (fig.I.21), le front de l'intrusion saline est localisé au alentour du PK55, en amont duquel, les courants résiduels paraissent se diriger vers l'aval. Dans les chenaux de Saintonge et de la rive droite, les courants sont dirigés vers l'aval excepté la zone entre le PK60 et PK80. Lors de l'établissement de ce schéma, les mesures manquent pour établir, dans cette région, un schéma de circulation résiduelle. Les travaux ultérieurs (*Castaing, 1981*) ont cependant confirmé la tendance proposée par *Allen (1972)*.

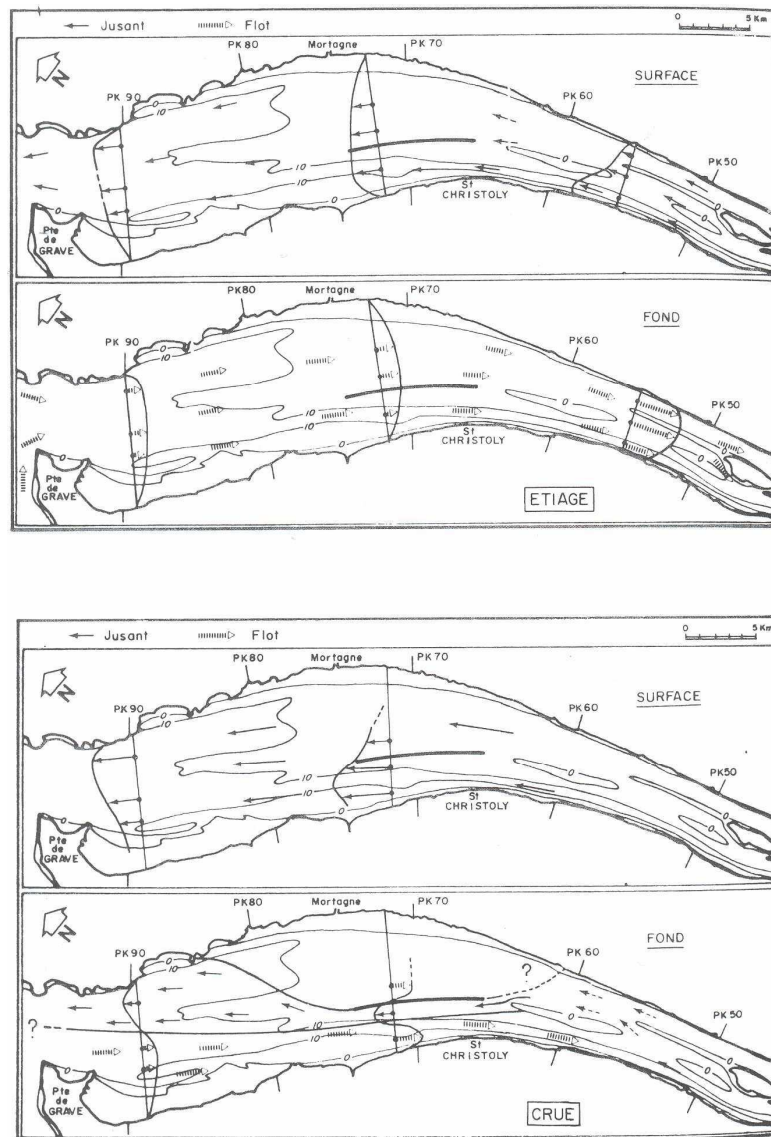


Fig.I.21- Circulation résiduelle dans l'estuaire de la Gironde en période de marée moyenne pour des débits d'étiage et de crue (Allen, 1972).

I.4- La dynamique des sédiments fins

I.4.1- Généralités sur le transport en suspension

Les sédiments sont maintenus en suspension grâce à la turbulence qui s'oppose au mouvement descendant des particules. Le transport en suspension est surtout applicable aux sédiments fins. Ainsi, les sédiments de taille supérieure à 400-600 microns sont rarement transportés en suspension, contrairement à ceux dont la taille est inférieure à 150-200 microns (Sundborg, 1956; Bagnold, 1966). Généralement, les sédiments de taille inférieure à 62 microns possèdent des propriétés cohésives et forment des complexes eaux-sol dont les propriétés physiques évoluent avec le temps (Migniot, 1989).

La mise en suspension et le transport des particules sont affectés par plusieurs mécanismes qui sont : la floculation, la vitesse de chute des particules, le dépôt, l'érosion et le tassement. Chacun de ces mécanismes est complexe, difficile à modéliser, et constitue en soi un domaine de recherche ouvert en dynamique sédimentaire côtière.

I.4.2- Granulométrie et minéralogie des matières en suspension

Dans l'estuaire de la Gironde, les matières en suspension ont été caractérisées par de nombreux auteurs, notamment sur leur composition et leur nature. Nous rappelons ici les résultats issus des travaux de *Jouanneau (1982)*, qui distingue une situation d'étiage et une situation de crue.

a) En période d'étiage

Des échantillons ont été prélevés, les 23 et 24 octobre 1978 à douze stations, entre Langon (PK-44) et Le Verdon (PK90), et une dizaine de jours avant, à La Réole (PK-70) (voir fig.I.1 pour localiser ces 3 positions). Les deux jours du 23 et 24 octobre, recouvraient une période de mortes-eaux, et le débit de la Garonne, à ce moment là, était de l'ordre de 50 m³/s. Ces échantillons, de grands et petits volumes, sont au nombre d'une dizaine et d'une trentaine, respectivement. Nous ne présenterons dans ce paragraphe que l'analyse concernant la granulométrie et la minéralogie des matières en suspension.

Granulométrie :

Il ressort deux résultats importants de cette étude :

- la fraction inférieure à 16 microns représente 90 à 99%.
- la fraction inférieure à 2 microns (argileuse) représente une proportion entre 42 et 65%.

Minéraux non argileux :

Le quartz est le minéral le plus abondant, suivent, la calcite et les feldspaths. Mise à part le quartz qui abonde en amont et diminue vers l'embouchure, les minéraux se répartissent de façon assez homogène tout le long du système estuarien.

Minéraux argileux:

A l'amont du bouchon vaseux, l'illite est dominante, suivie de près par les smectites. A l'aval du bouchon vaseux, le pourcentage des smectites diminue considérablement alors que l'illite représente plus de la moitié des minéraux argileux.

Quant à la kaolinite et la chlorite, leur variation longitudinale n'est pas significative, bien que cette dernière soit un peu plus abondante au niveau d'Ambès.

b) En période de crue

Les échantillons ont été prélevés pour l'essentiel, les 26 et 27 mars 1979, entre le PK-31 et le PK80. D'autres prélèvements ont été effectués, à la Pointe de Grave le 28 mars, et dans la partie fluvio-estuarienne, à Rions (PK-25) et Loupiac (PK-31) le 20, ainsi qu'à La Réole (PK-70) , Langon (PK-44) et Langoiran (PK-20) le 21.

On dénombre en tout, quatorze prélèvements de grands volumes, et une quarantaine de petits volumes. Les prélèvements du 20 et 21 mars ont été réalisés, après le passage d'une crue importante le 16 et 17 mars (1950 et 1800 m³/s pour la Garonne). Le 26 mars, le débit de la Garonne était de 600 m³/s. Cette campagne de prélèvements a eu lieu en période de vives-eaux. Nous aborderons uniquement, comme dans le cas précédent, la granulométrie et la minéralogie des matières en suspension.

Granulométrie :

L'analyse des échantillons montre qu'il existe deux domaines sur lesquels la granulométrie est plus fine par rapport à une zone centrale qui les sépare: la première, s'étend en amont de Langoiran (PK-20) ; la seconde, à l'aval de Saint Estèphe (PK55).

Minéraux non argileux:

Le quartz est le minéral le plus abondant avec une proportion entre 30 et 40%. Cette abondance se concentre dans les suspensions du bouchon vaseux et représenterait la classe des silts grossiers et des sables fins. En deuxième position, Les feldspaths et la calcite représentent un taux de 10% chacun.

La dolomite est détectée en quelques endroits à l'état de trace.

Minéraux argileux:

L'illite est le minéral dominant, particulièrement à l'amont et à l'aval de l'estuaire. Les smectites augmentent sensiblement dans le bouchon vaseux. La distribution de l'un par rapport à l'autre est représentée par le quotient smectites/illite. Sa valeur est de 0.3 en moyenne à l'amont, de 0.8 au centre de l'estuaire et de 0.5 à l'aval.

Il est important de remarquer que les études granulométriques en Gironde résultent d'analyses en laboratoire, qui rendent compte de la taille des particules élémentaires, mais ne considèrent pas les agrégats tels qu'ils peuvent exister in-situ. Ces agrégats sont constamment soumis aux processus de floculation et défloculation qui agissent sur leur taille et leur densité. Les résultats de la modélisation seront très sensibles à ces paramètres, qui restent mal connus en Gironde, hormis les travaux de *Manning et al. (2004)*, qui a effectué des mesures de vitesse de chute dans des eaux peu concentrées de la zone aval de l'estuaire.

I.4.3- Le bouchon vaseux

Le bouchon vaseux est une caractéristique importante des estuaires macrotidaux. Dans les grands estuaires français (Loire, Seine, Gironde), il a été étudié aussi bien expérimentalement (*Avoine, 1981 ; Allen, 1972*), que théoriquement par la modélisation numérique (par exemple *Brenon, 1997* pour la Seine ; *Migniot et al., 1994* pour la Loire). Il a été mis en évidence par *Glangeaud (1938, 1941)* en France, *Alexander et al. (1935)* en Angleterre et *Luneburg (1939)* en Allemagne.

Dans l'estuaire de la Gironde, le bouchon vaseux a été l'un des premier à être étudié (*Glangeaud 1938-1941 ; Levêque, 1936*). En raison de la capacité des sédiments en suspension à piéger des contaminants et de la matière organique, le bouchon vaseux est le siège d'une forte activité biogéochimique, qui a suscité par la suite l'intérêt de nombreux chercheurs (*Vernette, 1971 ; Tessier et al., 2002 ; Abril et al., 1999 ; Middelburg et al., 2002*). Quant aux aspects sédimentologiques, on peut citer les travaux de *Tastet et al. (1986)*, d'*Allen et al. (1974)*, *Hermida (1997)* ainsi que *Sottolichio (1999)*.

Le bouchon vaseux constitue une masse d'eau fortement chargée en matières en suspension, qui s'étend sur une distance de 70 à 80 Km dans l'axe de l'estuaire. Ses limites aval et amont sont assez fluctuantes et mal définies. On estime pour la Gironde, que le bouchon vaseux est caractérisé à partir de la concentration seuil de 1g/l. La concentration de son noyau turbide peut atteindre plus de 20 g/l (*Castaing, 1981*). La position moyenne de celui-ci fluctue au cours de la marée, entre 15 et 20 Km. En période de forts débits, le bouchon vaseux se trouve à l'aval, aux alentours du PK70 (*Allen, 1972*) alors qu'en période d'étiage, il remonte l'estuaire et se trouve pour l'essentiel entre le Bec d'Ambès (PK0) et Langoiran (PK-20) dans le Garonne. En période d'étiage, *Doxaran (2002)* a observé sur des images satellites, que la limite amont du bouchon vaseux dans la Dordogne pouvait se situer jusqu'à 50 Km du Bec d'Ambès. Il a également montré, en exploitant les mesures SOGIR/SOMLIT effectuées entre septembre 2000 et septembre 2001, qu'une partie du bouchon se maintenait autour et en aval des îles sous un régime soutenu de crues hivernales et printanières, alors que l'autre partie se déplaçait vers l'aval de l'estuaire.

Migniot (1969) a estimé la masse du bouchon vaseux entre 2.5×10^6 et 4×10^6 tonnes de sédiments fins en période de vives-eaux. *Jouanneau (1979)* donne une estimation beaucoup plus précise à partir des mesures de turbidité, dans l'eau et dans la crème de vase : entre 1.7×10^6 et 2.3×10^6 pour le bouchon vaseux, et entre 2.5×10^6 et 3×10^6 pour la crème de vase. 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.

Les apports fluviaux en sédiments ont été évalués par *Migniot (1969)* entre 1.5×10^6 et 3×10^6 tonnes par an.

Mécanismes de formation du bouchon vaseux :

Bouchon vaseux de densité

Selon certains auteurs, la formation du bouchon vaseux est due à la circulation résiduelle, et apparaît au niveau de l'intrusion saline matérialisée par l'isohaline 0.5%. Cette zone d'accumulation est qualifiée de 'piège à sédiments' par *Guilcher (1967)*.

Nous expliquons ce processus d'accumulation par une succession de mécanismes, de transport des sédiments par les courants résiduels (fig.I.22). D'abord, les matières en suspension sont acheminées vers l'aval dans la partie amont de l'intrusion saline. Arrivées au niveau de celle-ci, les particules empruntent la couche de surface et se dirigent toujours vers l'aval. Lorsque les particules chutent dans la couche inférieure (en particulier lors des étales), elles sont advectées vers l'amont, et atteignent au mieux la limite de l'intrusion saline. Cette dernière phase peut être interrompue par la turbulence, qui soulève et injecte ainsi les particules dans la couche de surface. Celle-ci les achemine vers l'aval jusqu'à ce qu'elles décantent à nouveau dans la couche inférieure qui, elle, les transporte vers l'amont. Il est important de souligner que les particules qui passent de l'une à l'autre couche de façon cyclique sont acheminées vers l'aval (fig.I.22). Cet acheminement est de plus en plus faible, lorsque, les particules atterrissent au début du cycle, de plus en plus proches de la limite de l'intrusion saline. Ainsi, le transport vers l'aval est de moins en moins efficace pour assurer la dispersion du débit solide continu, au fur et à mesure qu'on s'approche de cette limite. Cette accumulation des sédiments, ajoutée à celle induite par les particules, qui restent dans la couche inférieure et se dirigent de ce fait vers l'amont, sont à l'origine de la formation du bouchon vaseux.

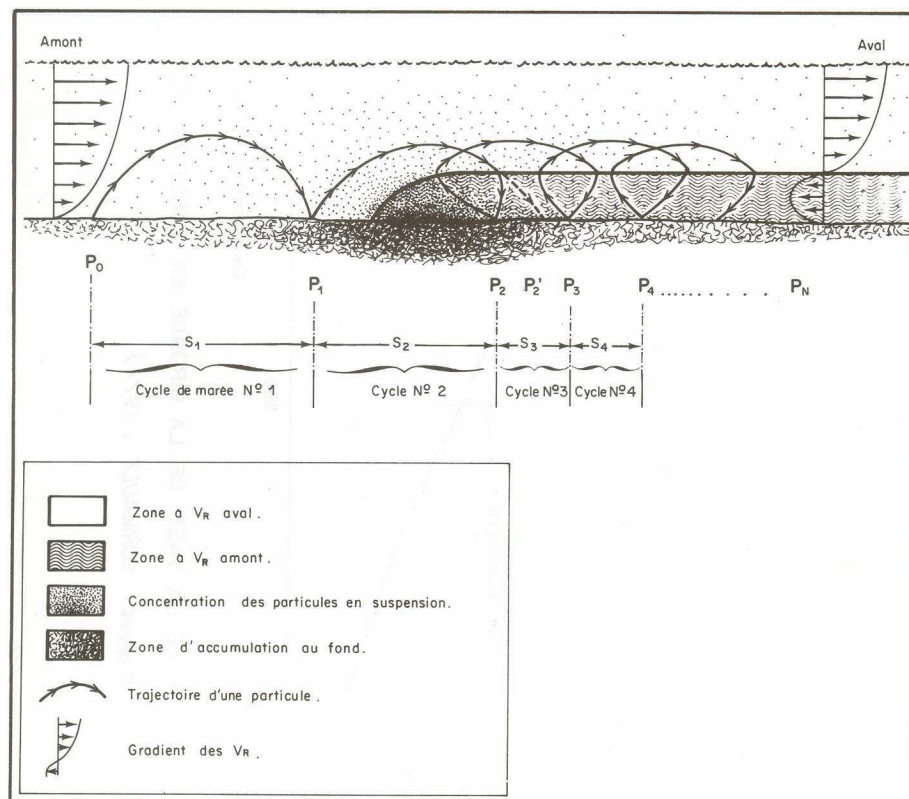


Fig.I.22- Accumulation des sédiments à la limite de l'intrusion saline : formation du bouchon vaseux de densité (Allen, 1972).

Bouchon vaseux dynamique

Fisher (1972) considère que dans les estuaires partiellement stratifiés, ce qui est souvent le cas dans l'estuaire de la Gironde, les courants convectifs dus aux gradients de salinité sont négligeables face à ceux engendrés par la marée. Bonnet (1976) a confirmé ce résultat dans l'estuaire de la Gironde en démontrant que les stratifications salines longitudinales ne modifient pas le champ de courants. Ainsi, certains auteurs, réfutent l'idée que seule la circulation de densité est à l'origine de la formation du bouchon vaseux, et propose en contre partie une approche complémentaire (Allen *et al.*, 1980). Celle-ci consiste à considérer que le bouchon vaseux est engendré par la dissymétrie vers l'amont de la marée. Cela se traduit par de plus forts courants en flot qu'en jusant provoquant ainsi une érosion plus importante et le transport des matières en suspension vers l'amont. Ce transport des sédiments s'arrête au point nodal de marée, qui représente la limite d'action de la marée dynamique, et au-delà duquel l'écoulement fluvial est dirigé vers l'aval (fig.I.23). Le point nodal de marée se déplace en fonction du débit fluvial. Ainsi, il migre de 30 à 40 km vers l'aval lorsque de forts débits de la Garonne succèdent à de faibles débits.

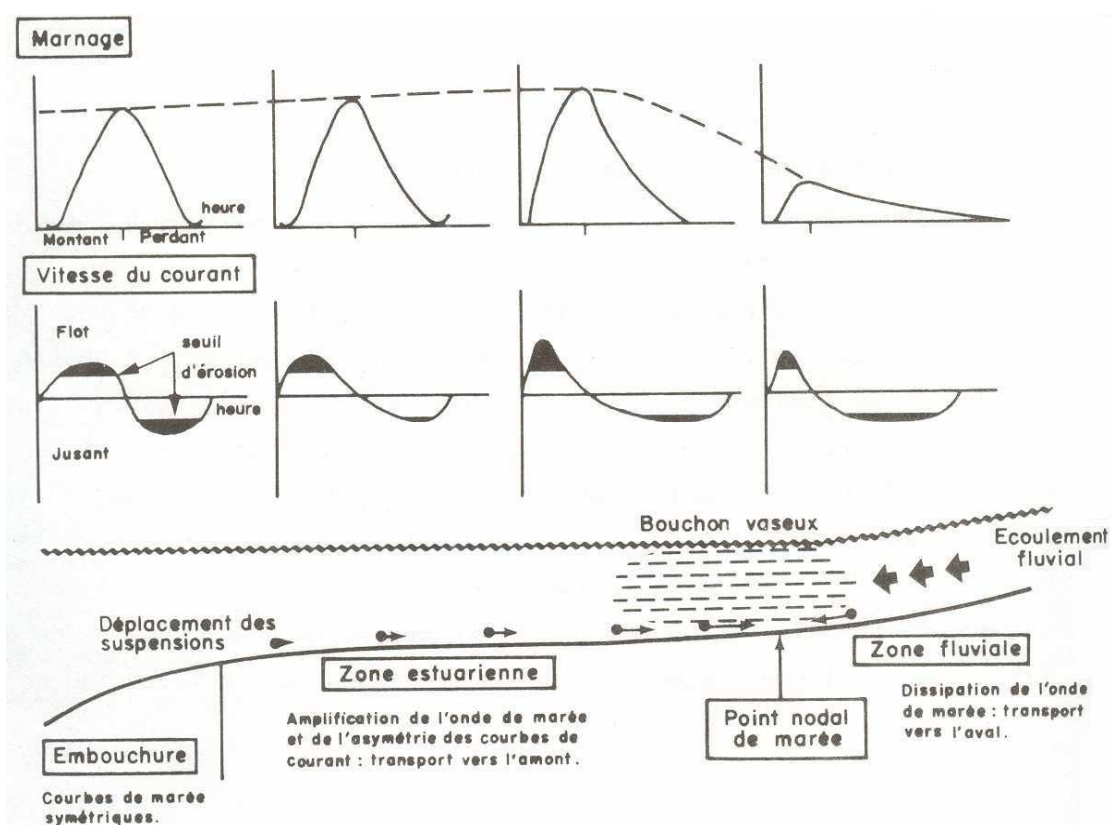


Fig.I.23- Accumulation des sédiments au point nodal de marée: formation du bouchon vaseux dynamique (Castaing, 1981).

Selon *Castaing (1981)*, il semblerait que la formation du bouchon vaseux, soit liée aux deux théories développées précédemment, selon l'intensité du débit fluvial. Ainsi, en période de crue, la circulation de densité est bien établie, l'accumulation des sédiments se faisant à la limite de l'intrusion saline. En période d'étiage, le bouchon vaseux s'étend jusqu'à 40 Km en amont de l'intrusion saline (*Allen, 1972*) et atteint le point nodal de marée.

Les études par modélisation 3D (*Sottolichio et al, 2001*) ont précisé les rôles respectifs des deux mécanismes en Gironde : l'asymétrie de la marée est suffisante pour générer un bouchon vaseux estuarien sur le court terme, mais les gradients de densité sont nécessaires pour limiter la dispersion des suspensions vers l'océan et maintenir une masse stable sur le long terme (échelle saisonnière par exemple). Ce même type de comportement avait été déjà identifié en estuaire de Seine par une stratégie de modélisation similaire effectué par *Brenon et al. (1999)*.

I.4.4- La crème de vase

La crème de vase se forme dans de nombreux fleuves par accumulation sur le fond de lentille d'eau extrêmement turbide (*Martin, 1971; Allen, 1972; Allen et al., 1974; Gallenne, 1974; Nichols et al., 1979*). Dans l'estuaire de Gironde, elle a été étudiée par *Allen (1971 b, 1973, et al., 1974)*, *Jouanneau (1977)* et *Bassoulet (et al., 1997)*.

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 *Owen (1971)*, *Sauzay (et al., 1976)* et *Castaing (et al., 1980)*.

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. Un mécanisme similaire a été mis en évidence par *Le Hir (Sottolichio et al., 2001)* en Gironde, par l'application d'un modèle 1DV qui tient compte de l'amortissement de la turbulence en présence des suspensions denses. Les stratifications de densité annulent la turbulence et maintiennent la crème de vase déposées sur le fond.

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. La salinité au sein de la crème de vase est constante sur l'échelle cyclique de la marée (*Allen, Castaing, Klingebiel, 1974*). 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.

I.4.5- Transfert latéral des sédiments

Pendant la campagne de mesures T.R.A.V.A.G.I.R. réalisée en mai 1974, la vase de l'estuaire de la Gironde a été marquée par un élément radioactif. Le suivi de la radioactivité de la vase a permis de démontrer le transfert latéral des sédiments (*Castaing et al., 1975 ; Allen et al., 1976 ; Sauzay et al., 1977*). Le bouchon vaseux était localisé dans le bas-estuaire et la crème de vase tapissait le fond du chenal de navigation. Neuf jours après l'injection de l'élément radioactif, les levés à l'écho-sondeur ont démontré que 80% de la crème de vase était érodée et remise en suspension, dont la moitié a été transférée vers le nord dans le chenal de Saintonge. Les enregistrements de radioactivité montrent que ce transfert de sédiments s'effectue à l'aval de Saint-Christoly, à travers, l'ouverture entre le Banc de Saint Estèphe et la digue de Valeyrac d'une part, et celle entre les bancs de Goulée et de Mets d'autre part (fig.I.24). Les courbes de mesures en forme de cloche (voir légende « transport de vase radioactive » fig.I.24), indique que ce transfert latéral s'est fait par advection et non par diffusion.

Dans le chenal de navigation, la radioactivité croît vers le fond au sein du bouchon vaseux. Dans le chenal de Saintonge c'est l'inverse qui se produit. Cette inversion des profils de radioactivité entre les deux chenaux, montre que le transfert latéral des sédiments en suspension, s'effectue dans la partie supérieure de l'écoulement.

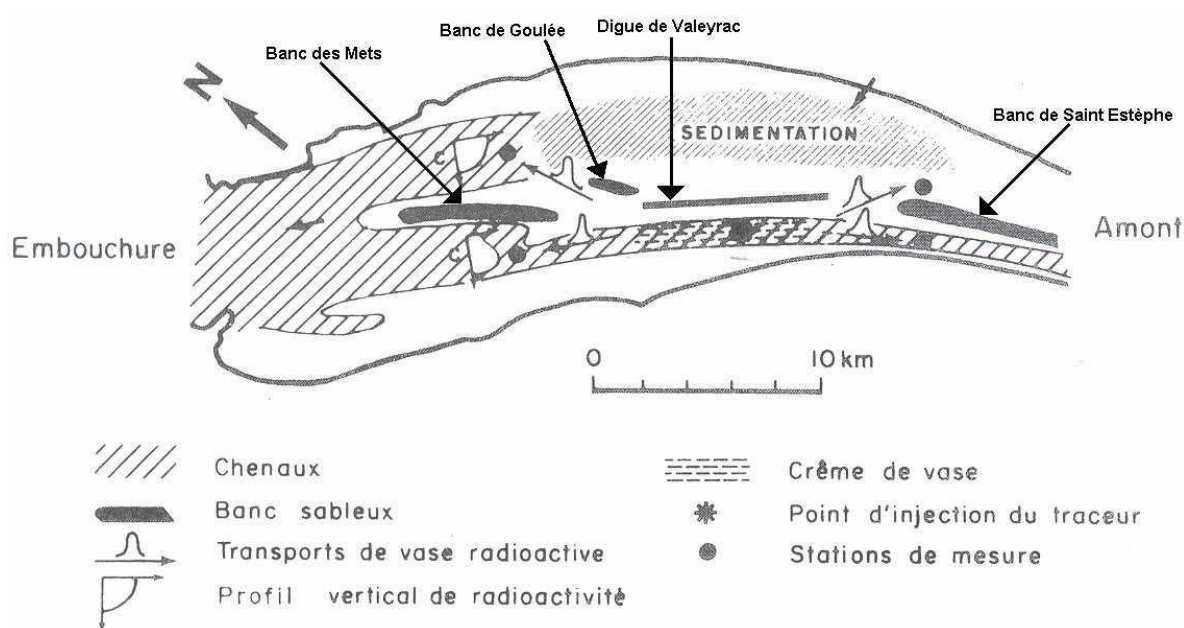


Fig.I.24- Transferts latéraux de vase radioactive en suspension entre les chenaux de navigation et de Saintonge (opération T.R.A.V.A.G.I.R en mai 1974) (*Castaing, 1981, modifié*)

I.4.6- Phénomènes d'hystérésis

Dans les estuaires, la turbidité moyenne sur la verticale est plus forte en vives-eaux qu'en mortes-eaux. Par contre, au cours du cycle lunaire, le maximum de turbidité moyenne ne coïncide pas avec le coefficient de marée le plus élevé, mais se produit en période de déchet. En outre, pour un même coefficient de marée, la turbidité est moins élevée en période de revif, qu'en période de déchet. Cette différence de turbidité induit un rejet plus important des sédiments hors de l'estuaire lors des déchets. Cet effet d'hystérésis a été observé par *Postma (1954)* et confirmé par la suite par *Castaing (1981)* dans l'estuaire de la Gironde. En effet, l'érosion et la remise en suspension de la vase en marée de revif, induit inexorablement la baisse de la vitesse critique d'érosion appliquée à la vase après son dépôt consécutif. Ainsi, en période de déchet, la vase a été suffisamment remaniée pendant la période de revif précédente, pour provoquer une baisse généralisée de la vitesse critique d'érosion. Cela explique, qu'à coefficient égaux et donc à vitesse d'écoulement équivalente, la quantité de vase érodée (et donc la turbidité dans l'eau) est plus importante en période de déchet qu'en période de revif. Il va de soi, que la quantité des sédiments évacués hors de l'estuaire est moindre en période de revif.

I.4.7- Devenir des sédiments évacués hors de l'estuaire

Des lâchers de flotteurs (*Niaussat et al., 1963*) et de perches ont été effectués par le Port Autonome de Bordeaux, et par *Allen* et *Castaing*. L'objectif étant de déterminer les trajectoires des particules en surface, et leur destination, dans le milieu océanique limitrophe de l'estuaire de la Gironde. Cette étude a été complétée par l'utilisation d'un modèle physique du Laboratoire Nationale d'hydraulique (*1971 a*) afin de calculer les champs de courants à chaque heure. Nous aborderons, comme cela a été fait par *Castaing (1981)*, uniquement les déplacements privilégiés des particules. Nous nous limiterons, dans ce paragraphe, à l'étude des particules situées, au départ, à la sortie de l'estuaire près de la Pointe de Grave. Pour le suivi des particules localisées sur le plateau continental, le lecteur est invité à consulter la thèse de *Castaing (1981)*.

Les trajectoires des particules en surface, sont esquissées par les flotteurs et les perches. Par conséquent, nous citerons nommément, dans ce qui suit, l'entité représentée « les particules » et non l'outil de l'étude « flotteurs et perches ».

Au départ de la Pointe de Grave, rive gauche, les particules empruntent préférentiellement la Passe Sud (fig.I.25). Au bout d'une marée, elles ont parcouru environ 5 Km. A partir de la deuxième marée, elles suivent une trajectoire giratoire dans la direction du N.W jusqu'à leur arrivée, au bout de cinq marées, à proximité de la vasière Ouest-Gironde. D'autres particules dévient de ce circuit type en se dirigeant vers le S.W. Elles arrivent, par la suite, dans une petite vasière localisée au large de la côte médocaine ou bien atteignent la «mud-line» qui se forme quelquefois en été parallèlement au rivage.

Considérons maintenant, comme point de départ, les particules à l'endroit de la jonction des chenaux de navigation et de Saintonge. Ces particules se dirigent vers le Pertuis de Maumusson (fig.I.26) ou l'île d'Oléron (fig.I.27) selon des trajectoires bien déterminées. Cependant, certaines d'entre elles se détachent de ce circuit, à l'ouest du banc de Montrevel, et s'orientent vers la vasière Ouest-Gironde, suivant une trajectoire courbée d'orientation Est-Ouest (fig.I.26 et I.27).

Prenons le cas des particules qui arrivent au Pertuis de Maumusson (fig.I.26). Au départ, elles se déplacent dans la Passe de l'Ouest jusqu'à la troisième marée à P.M+3. Ensuite, elles quittent la Passe de l'Ouest pour aller décrire une gyre dextre autour du banc de la mauvaise, et se retrouvent près de la Côte Sauvage à la P.M suivante. Il suffit d'une marée de plus pour que les particules arrivent à l'entrée du Pertuis de Maumusson. Elles peuvent éventuellement entrer dans le bassin de Marenne-Oléron si l'intensité et la direction du vent sont favorables. Ainsi, les particules ont mis deux jours (4 marées) pour atteindre le Pertuis de Maumusson. Nous qualifions ce trajet de « circuit rapide ».

Dans le second cas, les particules atteignent l'île d'Oléron (fig.I.27). Les trajectoires sont assez similaires au cas précédent sur les deux premières marées si ce n'est une légère incursion sur le banc de la Mauvaise aux cours de la deuxième marée. Pendant la troisième marée, elles se déplacent plus au large comparé au cas précédent. La vitesse du courant étant de plus en plus faible en s'éloignant de la côte, les particules, tout en se mouvant de façon giratoire, arrivent au niveau du Pertuis de Maumusson au bout de deux marées supplémentaires. Ainsi, elles ont mis deux jours et demi (5 marées) pour parvenir à la hauteur du Pertuis de Maumusson. Nous qualifions ce trajet de « circuit lent ». Arrivées à ce niveau, un second lâché de perches a été effectué. La trajectoire esquissée conserve le déplacement giratoire vers le nord tout en longeant l'île d'Oléron. Les particules dévient, ensuite, vers le large, au bout de la cinquième marée à compter du Pertuis de Maumusson (fig.I.27).

Des études plus récentes combinant des images satellites des panaches de surface et la modélisation 3D de la circulation du plateau continental ont affiné ces modalités d'expulsion, en mettant l'accent sur le rôle du vent qui, selon son intensité et sa direction, peut dévier de manière significative la trajectoire du panache (*Froidefond et al., 1998*).

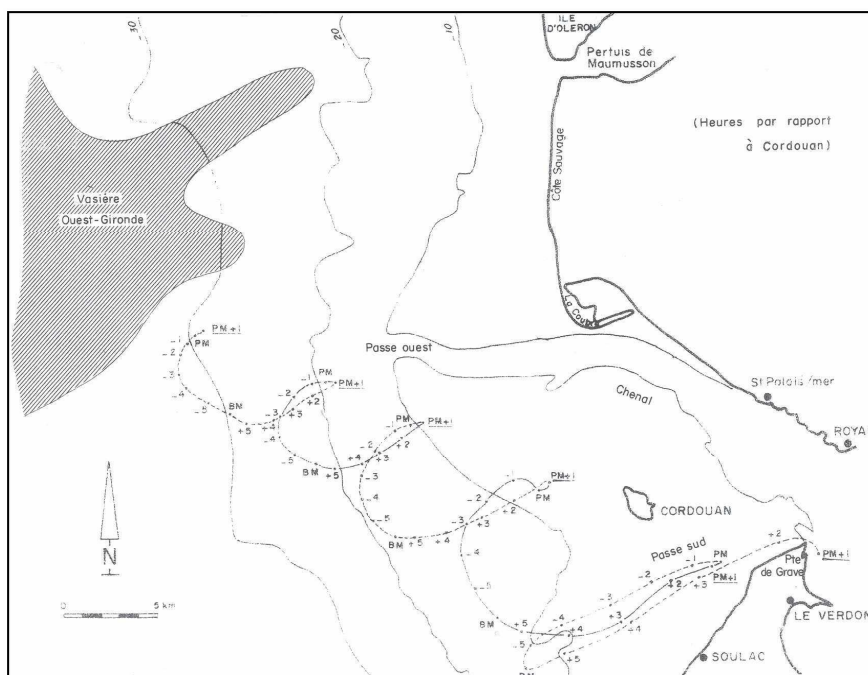


Fig.I.25- trajectoires des particules en surface, situées au départ, au niveau de la Pointe de Grave rive gauche. Période de vives-eaux (Castaing, 1981, modifié).

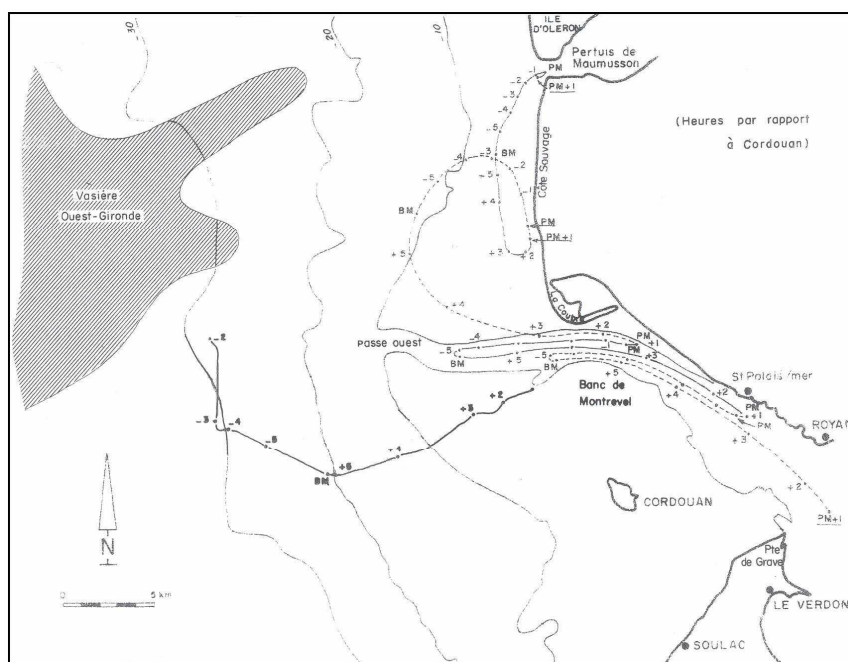


Fig.I.26- Trajectoires des particules en surface, situées au départ, à la jonction entre le chenal de navigation et le chenal de Saintonge. La destination principale de ces particules est le Pertuis de Maumusson, cependant certaines se détachent de ce circuit, et se dirigent vers la vasière Ouest-Gironde. Période de vives-eaux (Castaing, 1981, modifié).

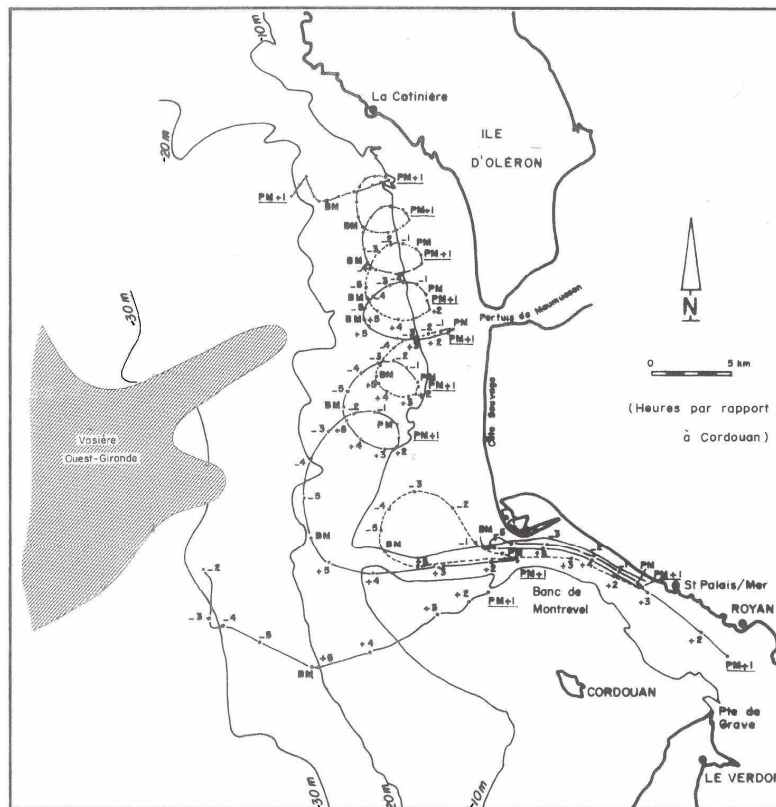


Fig.I.27- Trajectoires des particules en surface, situées au départ, à la jonction entre le chenal de navigation et le chenal de Saintonge. La destination principale de ces particules est l'île d'Oléron, cependant certaines se détachent de ce circuit, et se dirigent vers la vasière Ouest-Gironde. Période de vives-eaux (Castaing, 1981, modifié).

I.5 - Conclusion

Nous venons de présenter les grands traits de l'hydrodynamique, la dynamique sédimentaire ainsi que la morphologie de l'estuaire de la Gironde. Comme conclusion, nous résumerons les points les plus marquants abordés précédemment.

Le système estuarien de la Gironde est composé de trois parties : fluviale, amont et aval. On distingue deux chenaux principaux dans l'estuaire de la Gironde ; les chenaux de navigation et de Saintonge, et un chenal secondaire ; le chenal de la rive droite.

La marée est de type semi-diurne avec une période de 12 heures 25 mn. En se déplaçant vers l'amont, l'onde de marée devient dissymétrique dans le temps avec une durée du montant plus courte que celle du perdant.

Les circulations résiduelles, ont été établies à marée moyenne en situation d'étiage et de crue. Elles indiquent des courants résiduels orientés toujours vers l'aval en surface. Près du fond, les courants sont dirigés vers l'amont du côté nord de l'intrusion saline.

La gamme granulométrique inférieure à 16 microns représente 90% à 99% des matières en suspension en période d'étiage (mesures d'octobre 1978). En période de crue, l'analyse des échantillons a montré, l'existence de deux zones sur lesquelles la granulométrie est plus fine par rapport à une zone tampon qui les sépare. La première zone, s'étend en amont de Langoiran ; la seconde, à l'aval de Saint Estèphe (mesures de mars 1979).

Deux types de bouchon vaseux ont été identifiés suivant l'origine de leur formation : le bouchon vaseux de densité et le bouchon vaseux dynamique. La formation du bouchon vaseux de densité est due à la circulation résiduelle. Il se forme au niveau de l'intrusion saline matérialisée par l'isohaline 0.5%. Quant au bouchon vaseux dynamique, il est engendré par la dissymétrie de la marée. Il semble établi qu'en Gironde, la circulation résiduelle agit également sur le maintien d'une masse en suspension stable sur le long terme, en limitant l'évacuation des sédiments hors de l'estuaire.

Le transfert latéral des sédiments du chenal de navigation vers le chenal de Saintonge, a été démontré grâce à un marquage radioactif de la crème de vase. Ce transfert de sédiments s'effectue à l'aval de Saint-Christoly, à travers, l'ouverture entre le Banc de Saint Estèphe et la digue de Valeyrac d'une part, et celle entre les bancs de Goulée et de Mets d'autre part.

La quantité de vase érodée est plus importante pendant les déchets qu'en période de revifs, induisant ainsi une plus forte turbidité de l'eau. L'explication vient du fait que la vase est particulièrement remaniée en période de revif, et provoque, ainsi, la diminution du seuil d'érosion pendant le déchet suivant.

A la jonction entre le chenal de navigation et le chenal de Saintonge, les sédiments évacués hors de l'estuaire empruntent la Passe de l'Ouest. Ils se dirigent, par la suite, vers le Pertuis de Maumusson, ou bien, continuent leur progression vers l'île d'Oléron, avant d'être déviés vers le large. Au niveau de la Pointe de Grave, coté rive gauche, les sédiments évacués hors de l'estuaire empruntent la Passe Sud et se dirigent vers la vasière Ouest-Gironde. Cependant, une certaine quantité de sédiments peut dévier de ce circuit, et rejoindre une petite vasière au large de la côte médocaine, ou bien atteindre la «mud-line» le long de la côte.

Au-delà de l'intérêt régional, nous rappelons que la Gironde est un exemple d'estuaire macrotidal, où le rôle de la marée est prépondérant sur celui des stratifications de densité. Les concentrations des sédiments en suspension atteignent ici des valeurs très élevées en comparaison à d'autres estuaires européens. Ainsi, il constitue pour la communauté scientifique, un cadre intéressant d'étude sur des thématiques de dynamique sédimentaire en milieu estuarien.

Chapitre II

Application des modèles numériques simulant la dynamique des sédiments en suspension

II.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter, dans l'état actuel de nos connaissances, les modèles tridimensionnels appliqués aux estuaires, et simulant la dynamique sédimentaire des matières en suspension. La présentation de ces modèles repose sur l'énumération des résultats les plus significatifs, l'objectif étant de cerner l'orientation et l'état actuel de la recherche, dans le domaine de la dynamique sédimentaire en milieu estuarien.

Ces modèles 3D résolvent à quelques modifications près, les équations hydrodynamiques de Navier-Stokes, ainsi que l'équation d'advection-dispersion déterminant la concentration des matières en suspension. Cependant, ils peuvent différer sur la modélisation du comportement sédimentaire, notamment, la vitesse de chute des particules, le tassement de la vase ainsi que les seuils d'érosion et de dépôt du sédiment.

La méthode numérique utilisée majoritairement dans ces modèles est la méthode des différences finies, néanmoins on peut présager dans un futur proche, le développement des méthodes des éléments finis et des volumes finis pour leur plus grande finesse.

II.2- Les modèles tridimensionnels en milieu estuarien

II.2.1- Lang et al. (1989)

Lang et al. ont appliqué un modèle tridimensionnel à l'estuaire de la Weser situé en Allemagne. Les résultats essentiels sont :

- Les mesures in-situ ont montré que les gradients de vitesse près du fond, étaient étroitement liés aux stratifications et à la turbulence d'une part, et à la concentration des matières en suspension d'autre part.
- Les comparaisons entre le calcul et les mesures de concentration des matières en suspension, montrent que la paramétrage est adéquat, lorsque la contrainte de cisaillement au fond est calculée, selon la formulation de Reynolds considérant les stratifications.

II.2.2- Cancino et al. (1994)

Cancino et al. ont appliqué un modèle tridimensionnel à l'estuaire Western Scheldt, situé au Sud-ouest des Pays-Bas. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- La concentration des matières en suspension est particulièrement sensible à la constante d'érosion. Ainsi, la diminution de ce paramètre, entraîne l'augmentation de la concentration, qui se rapproche considérablement des mesures.
- Les concentrations obtenues avec des discrétisations verticales de quatre et dix couches sont similaires.

- Les faibles concentrations des matières en suspension sur certaines stations de calcul, sont dues à de forts dépôts et à une consolidation significative du sédiment.

II.2.3- Brenon (1997)

Avant d'être appliqué à l'estuaire de la Gironde, le modèle SIAM-3D a été utilisé dans l'estuaire de la Seine dans le cadre de la thèse d'*Isabelle Brenon (1997)*. Certains de ces travaux ont été édités en article (*Brenon et al., 1999*). Il s'en est suivi une autre application dans l'estuaire de la Seine, effectuée par *Cugier et al. (2002)*. Nous nous contenterons d'aborder les résultats de base obtenus par *Isabelle Brenon*, au cours de sa thèse :

- La diminution des dépôts le long des rives entre Honfleur et La Risle, est liée à de faibles concentrations en surface susceptibles d'alimenter les berges en sédiments.
- Le bouchon vaseux simulé sans effet de densité est très proche de celui obtenu avec ce forçage. Cependant cet effet de densité n'est pas négligeable, et se traduit par la contraction ou au contraire par l'étirement du bouchon vaseux dynamique vers le front salin.
- L'augmentation de la vitesse de chute de 1 à 2 mm s⁻¹ induit le déplacement vers l'amont du bouchon vaseux.
- L'augmentation de la contrainte critique d'érosion de 0.5 à 1 N m⁻² induit l'étalement du bouchon vaseux, et le déplacement de son noyau de 5 à 10 Km en amont.

II.2.4- Le Normant (2000)

Le Normant a appliqué le modèle TELEMAC-3D à l'estuaire de la Loire. Ce modèle utilise la méthode numérique des éléments finis, ce qui le distingue de la majorité des modèles, qui eux reposent sur la méthode classique des différences finies. Voici les résultats fondamentaux obtenus :

- En vives-eaux et en situation d'étiage, l'élévation de la surface libre et la salinité calculées sont en accord avec les mesures.
- Deux simulations qui diffèrent par la distribution initiale du dépôt, ont montré que cette condition, n'influence pas les résultats finaux de simulation.
- Sous des régimes fluviaux faible et moyen, le modèle reproduit la localisation et l'étendue du bouchon vaseux observé in-situ.
- Les simulations effectuées sans la prise en compte du modèle de crème de vase, induisent des dépôts définitifs, aux endroits de l'estuaire où les courants sont très faibles. En revanche, lorsque la crème de vase est prise en compte, les sédiments déposés dévalent les pentes du fond et peuvent contribuer à la formation du bouchon vaseux.
- Sous un régime fluvial moyen, les dépôts simulés se produisent aux étales, principalement dans le chenal de navigation. Ce résultat est confirmé par des observations in-situ. En outre, les dépôts simulés s'effectuent entre Donges et Paimboeuf, ce que reflètent les mesures in-situ

II.2.5- Burchard et al. (2004)

Burchard et al. ont appliqué le modèle GETM (General Estuarine Transport Model) à l'estuaire de l'Elbe, situé au Nord de l'Allemagne. L'étude concerne les courants de marée, la diffusivité turbulente ainsi que le transport des matières en suspension. Les résultats de simulation ont montré les points importants suivants :

- En période de flot, les courants de marée repoussent la pycnocline vers la surface. Cette couche empêche, sur la colonne d'eau au-dessus d'elle, l'augmentation de la diffusivité turbulente.
- En période de jusant, la pycnocline occupe un espace plus important, et induit de facto, par l'effet de ses stratifications stables, une diminution de la diffusivité turbulente.
- Le bouchon vaseux simulé, est situé en amont de l'intrusion saline, et s'étend sur 30 Km. Il correspond en terme de localisation, au principal bouchon vaseux observé dans l'estuaire à débit fluvial moyen.
- La forme du bouchon vaseux varie en fonction de la phase tidale. Il est plus étendu en période de flot, pendant laquelle la vitesse du courant près du fond est plus forte que celle du jusant.

II.2.6- Wang et al. (2005)

Wang et al. ont appliqué leur modèle sur un domaine estuarien fictif, afin d'étudier l'effet des stratifications verticales de concentration des sédiments sur les courants de marée. Les résultats des simulations ont montré que : lorsque les stratifications verticales de concentration sont prises en compte dans la couche limite de fond (bottom boundary layer -BBL-), elles réduisent la viscosité turbulente verticale, ainsi que la contrainte de cisaillement au fond. En réponse à la diminution de ces deux entités physiques, l'intensité des courants de marée augmente dans la colonne d'eau alors qu'elle diminue dans la couche limite de fond. En outre, elles induisent, dans cette couche, des courants déphasés par rapport à ceux, calculés sans tenir compte des stratifications.

II.3- Les modèles tridimensionnels et bidimensionnels appliqués à l'estuaire de la Gironde

II.3.1- Les modèles tridimensionnels

II.3.1.1- Sottolichio (1999)

Le modèle SIAM-3D ancienne version, mais également le modèle SAM-2DH bidimensionnel horizontal, ont été utilisés par *Sottolichio* au cours de sa thèse. L'application du modèle SIAM-3D à l'estuaire de la Gironde a abouti aux résultats principaux suivants :

- Pour un débit de $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et au moment d'une basse mer au Verdon, l'intrusion saline (1‰) et le bouchon vaseux sont situés dans les fleuves. Un maximum secondaire de turbidité apparaît au niveau des îles dans le chenal de navigation.
- Pour un débit de $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en fin de jasant, la salinité est presque partout inférieure à 1‰ et l'intrusion saline est située entre le PK70 et 80. Dans les fleuves, la concentration des matières en suspension est faible hormis une forte turbidité dans le méandre de la Garonne. Le bouchon vaseux est situé en aval des îles et déborde largement du chenal de navigation. Une 'bouffée turbide' se détache du chenal de navigation pour être transportée vers la rive droite. La concentration est supérieure à $0,5 \text{ g l}^{-1}$ dans le chenal de Saintonge qui sert de transit pour l'évacuation des sédiments par la Passe de l'Ouest.

II.3.1.2- Cancino et al. (1999)

Le modèle de *Cancino et al.* présenté dans la partie II.2.5, a été également appliqué à l'estuaire de la Gironde. La période simulée s'étend du 16 au 17 avril 1994.

Les résultats les plus significatifs sont :

- Les courants résiduels simulés, atteignent des valeurs maximales à la sortie de l'estuaire au niveau de la Pointe de Grave.
- En amont du PK70, les courants résiduels simulés sont dirigés vers l'aval sur toute la colonne d'eau.
- Les concentrations des matières en suspension calculées sur toute la colonne d'eau près de la Pointe de Grave, sont proches des mesures effectuées pendant la même période de simulation (du 16 au 17 avril 1994). En outre, la position du bouchon vaseux simulé aux moments de la basse mer et au maximum de flot correspond à celle connue sur le terrain.

II.3.1.3- Vinh Phan (2002)

Le modèle ECOMOD-3D a été développé au cours de la thèse de *Vin Phan*. Voici les principaux résultats obtenus suite à son application dans l'estuaire de la Gironde :

- Les tracés des champs de courant montrent des mouvements transversaux dont l'intensité diminue de l'aval vers l'amont. Au jasant, l'écoulement longe la rive droite et emprunte le chenal de Saintonge, alors qu'en flot, il s'effectue majoritairement dans le chenal de navigation.
- La circulation résiduelle emprunte le chenal de navigation dans la partie amont de l'estuaire jusqu'au PK80, à ce niveau elle dévie vers la droite, et passe par le chenal de Saintonge jusqu'à l'embouchure. La structure de la circulation résiduelle en surface et à mi-profondeur est globalement la même en crue et en étiage. Cependant, l'intensité de la circulation résiduelle dirigée vers l'aval est plus forte en crue qu'en étiage.

- En situation de crue, la salinité près de la rive droite est inférieure à celle près de la rive gauche, du PK80 jusqu'à l'embouchure.
- En général, les stratifications verticales, et les gradients horizontaux de densité dans l'estuaire, augmentent avec le débit fluvial et diminuent avec l'intensité de marée.
- En vive-eau et débit moyen, deux bouchons vaseux apparaissent dans l'estuaire, l'un majeur centré autour du PK60, l'autre mineur est situé aux environs du PK5. Le bouchon vaseux majeur se déplace longitudinalement d'environ 25 Km.
- L'érosion des sédiments est plus forte en flot, cependant, la durée du transport est plus longue en jusant. Les marées à forts coefficients induisent une remise en suspension plus intense des sédiments comparée aux marées à faibles coefficients, où la quasi-disparition du bouchon vaseux fait place à la formation de la crème de vase.
- En condition de crue et de marée moyenne, le bouchon vaseux se déplace vers l'aval par rapport à une situation d'étiage.
- L'effet de la salinité affecte peu la position et la structure du bouchon vaseux.

II.3.2- Les modèles bidimensionnels

II.3.2.1- Du Penhoat et al. (1979)

Du Penhoat et al. ont utilisé un modèle bidimensionnel vertical. Son application à l'estuaire de la Gironde a produit les résultats principaux suivants :

- A marée moyenne (coefficient 70) et à débit moyen (980 m³/s), le modèle reproduit au long de l'estuaire, le décalage progressif des fortes turbidités mesurées par rapport au cycle des courants, depuis l'étale de flot dans la partie amont jusqu'à l'étale de jusant en aval.
- La masse des sédiments en suspension au cours de cette marée et de ce débit, varie de 2.7 à 3.5 millions de tonnes. Cette fourchette est compatible avec l'évaluation de 2 à 5 millions de tonnes au gré des marées et des débits, citée par *Allen (1972)*.

II.3.2.2- Li (1994)

Li a appliqué un modèle 2D vertical à l'estuaire de la Gironde. Les principaux résultats obtenus sont :

- Le modèle a été validé par des observations in-situ, pour sa capacité à simuler, la circulation résiduelle, l'intrusion saline et la dynamique du bouchon vaseux sur une période d'une marée.
- En vives-eaux, le bouchon vaseux est bien développé suite à l'augmentation de la contrainte de cisaillement par rapport à une période de mortes-eaux. Pendant celle-ci, la diminution de la masse du bouchon vaseux fait place à l'accumulation des matières en suspension au fond.
- En période d'étiage, le bouchon vaseux s'étend jusqu'à Bordeaux. Un maximum de concentration est simulé au niveau du Bec d'Ambès, ce qui correspond aux mesures de

Castaing (1981). En période de crue, le bouchon vaseux est situé dans la partie aval de l'estuaire et l'expulsion des sédiments dans l'océan s'effectue au moment des jusants.

- Le déplacement de la limite amont de l'intrusion saline en fonction du débit est bien reproduit par le modèle. Néanmoins la relation entre cette intrusion saline et le point nodal des vitesses résiduelles n'est pas établie. La formation du bouchon vaseux n'est donc pas liée à la circulation résiduelle mais plutôt à l'intensité de l'érosion induite par les courants de marée.

II.3.2.3- Sottolichio (1999)

Le modèle SAM-2DH bidimensionnel horizontal a été utilisé par *Sottolichio* au cours de sa thèse. Son application à l'estuaire de la Gironde a abouti aux résultats principaux suivants :

- A débit moyen, le bouchon vaseux est localisé entre les îles et Ambès au moment de la pleine mer, alors qu'à basse mer, il se situe à l'aval des îles jusqu'à Lamena.
- En situation d'étiage, et à pleine mer, le bouchon vaseux principal s'étend entre le PK15 et l'amont de Bordeaux. Un bouchon vaseux secondaire apparaît en amont des îles. A basse mer, ces deux bouchons vaseux se sont déplacés vers le Nord, le principal étant parvenu à l'aval d'Ambès à cheval sur l'estuaire de la Gironde et la Garonne. Les comparaisons avec les mesures de la campagne libellule à basse mer (mars 1982), montrent que le positionnement des deux bouchons vaseux est correct.
- Le modèle ne prenant pas en charge les gradients de salinité qui sont à l'origine de la circulation de densité, l'auteur conclut que la formation du bouchon vaseux est liée à l'asymétrie de propagation de la marée.

II.4- Conclusion

Les modèles numériques sont devenus des outils à part entière dans l'étude de la dynamique sédimentaire, aux travers des différents forçages hydrologique, hydrodynamique et hydro-sédimentaire. Avec le développement des moyens de calcul, ces modèles seront amenés à intégrer une discrétisation de plus en plus raffinée pour des simulations de longue durée.

Les résultats de leur application que nous avons abordés relèvent du domaine de la recherche fondamentale. Cependant, les applications directes se sont développées concernant le modèle TELEMAC-3D.

Au fil de leur amélioration, certains modèles (notamment SIAM-3D et TELEMAC-3D) suscitent de plus en plus l'intérêt des pouvoirs publics; aussi bien pour la gestion des crises environnementales (simulation de la pollution par exemple) que pour l'aménagement des milieux côtiers et estuariens.

Chapitre III

Le modèle numérique SIAM de la Gironde

III.1- Introduction

Les modèles SIAM-2D (bidimensionnel horizontal) et SIAM-3D (tridimensionnel), ont été développés à l'Ifremer. Ils simulent la hauteur d'eau et les courants de marée, la salinité et la concentration des matières en suspension. La première version de ces modèles a été appliquée à l'estuaire de la Seine (*Brenon et Le Hir, 1999*) afin d'étudier la dynamique du bouchon vaseux sous l'influence du pompage tidal, des gradients de salinité et du paramétrage sédimentaire (érosion et vitesse de chute). Leur utilisation dans le domaine estuarien de la Gironde a été le support des travaux de recherche d'*Aldo Sottolichio (1999)* dont le but était d'étudier la formation et l'évolution du bouchon vaseux sous diverses conditions hydrauliques et marégraphiques. Dans le cadre de notre projet de recherche, nous avons utilisé une version améliorée du modèle SIAM-3D appliquée à l'estuaire de la Gironde. Cette amélioration repose sur :

- l'élargissement de la gamme granulométrique à deux classes de particules au lieu d'une seule ;
- des vitesses de chute fonction de la concentration des matières en suspension, dans l'ancienne version cette vitesse était constante et fixée à 1 mm s^{-1} ;
- une contrainte critique d'érosion fonction de la concentration du sédiment superficiel, initialement cette contrainte était uniforme et fixée à 1 N m^{-2} ;
- la prise en compte du tassement sédimentaire, non pris en compte auparavant.

Dans la mesure où le modèle SIAM-2D se juxtapose dans les grandes lignes à une partie de la nouvelle version SIAM-3D au travers de la résolution des équations hydrodynamiques (équations de Saint-Venant), et, qui plus est, utilise le même paramétrage que l'ancienne version de SIAM-3D cité précédemment, nous nous contenterons de présenter la version améliorée du modèle SIAM-3D.

La présentation de SIAM-3D ci-dessous, est basée sur nos connaissances de son support numérique et en partie sur son descriptif dans les articles de *Cugier et Le Hir. (2002)* et *Brenon et le Hir. (1999)*.

Les valeurs du paramétrage implantées dans le modèle sont données en Annexe I.

III.2- La physique du modèle SIAM-3D

III.2.1- Equations de Navier-Stokes

Le modèle résout les équations différentielles de Navier-Stokes en prenant en compte deux hypothèses : la première suppose que la pression (formulation 4) dépend uniquement du poids du fluide au dessus du niveau considéré, et néglige la variabilité de la pression engendrée par l'accélération verticale (pression hydrostatique), la seconde, connue sous le nom d'approximation de *Boussinesq (1877)*, considère que la masse volumique du fluide exprimée dans les équations de Navier-Stokes est constante (dans notre application, elle vaut celle de l'eau : $\rho_0 = 1000 \text{ kg m}^{-3}$), exception faite à celle énoncée dans la formulation de la pression hydrostatique qui varie avec les

fluctuations spatiale et temporelle de la salinité, température et concentration des matières en suspension.

Les équations de Navier-Stokes sont formulées de la façon suivante :

$$\partial_t u + u \partial_x u + v \partial_y u + w \partial_z u = f.v + \frac{1}{\rho_0} \left[-\partial_x P + \partial_z (\nu_z \partial_z u) + \partial_x (\nu_{xx} \partial_x u) + \partial_y (\nu_{xy} \partial_y u) \right] \quad (1)$$

$$\partial_t v + u \partial_x v + v \partial_y v + w \partial_z v = -f.u + \frac{1}{\rho_0} \left[-\partial_y P + \partial_z (\nu_z \partial_z v) + \partial_x (\nu_{yx} \partial_x v) + \partial_y (\nu_{yy} \partial_y v) \right] \quad (2)$$

avec :

u, w, v : composantes horizontale, verticale et latérale de la vitesse du fluide.

ρ_0 : masse volumique de l'eau.

x, y, z : cordonnées latérale, longitudinale et verticale.

$\nu_{xx}, \nu_{yy}, \nu_{xy}, \nu_{yx}$: viscosités dynamiques du fluide.

ν_z : viscosité turbulente verticale.

P : pression.

f : paramètre de Coriolis.

La résolution des équations de Navier-Stokes s'appuie sur l'équation de continuité (formulation 3) et la loi de la pression hydrostatique (formulation 4):

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (3)$$

$$\partial_z P = -\rho \cdot g \quad \text{d'où} \quad P(z) = P_a + \int_z^\zeta \rho \cdot g \cdot dz \quad (4)$$

avec :

ρ : masse volumique du fluide.

g : accélération de la gravité.

ζ : l'élévation de la surface libre.

P_a : pression atmosphérique.

Ainsi les termes $\partial_x P$ et $\partial_y P$ sont remplacés respectivement par $\partial_x \int_z^\zeta \rho \cdot g \cdot dz$ et $\partial_y \int_z^\zeta \rho \cdot g \cdot dz$

dans les équations de Navier-Stokes (formulations 1 et 2).

La masse volumique du fluide (ρ) est exprimée par une dérivée de l'équation d'état de *Fofonoff* (1962) :

$$\rho = \left[(\rho_0 \cdot (1 + a \cdot S + b \cdot T)) \cdot \left(1 - \frac{C}{mv} \right) \right] + C \quad (5)$$

avec :

a, b : paramètres constants.

T : température

S : salinité.

mv : masse volumique du sédiment.

C : concentration des matières en suspension.

III.2.2- Equations de Saint-Venant

La surface libre introduite par la pression hydrostatique est assortie d'une condition de stabilité numérique très contraignante, liée à une différence notable de propagation entre les ondes internes et externes (ou ondes de surface). Pour s'affranchir de cette contrainte et limiter le risque réel d'instabilité, la surface libre est déterminée en résolvant les équations de Saint-Venant en 2D. Ce module SIAM-3D est appelé mode externe (*Blumberg et al., 1977 ; Lazure and al., 1991 ; Pohlmann, 1991 ; Johnson et al, 1993*). Les équations de Saint-Venant sont obtenues en intégrant sur la verticale les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité, on obtient ainsi :

$$\begin{aligned} \partial_t U + U \partial_x U + V \partial_y U = f.V - g \partial_x \zeta - \frac{1}{\rho_0} \partial_x P_a \\ + \frac{\tau_{sx} - \tau_{fx_2D}}{\rho_0.H} + \nu (\partial_x^2 U + \partial_y^2 U) - Dens_{x_3D} - Dis_{x_3D} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + U \partial_x V + V \partial_y V = -f.U - g \partial_y \zeta - \frac{1}{\rho_0} \partial_y P_a \\ + \frac{\tau_{sy} - \tau_{fy_2D}}{\rho_0.H} + \nu (\partial_x^2 V + \partial_y^2 V) - Dens_{y_3D} - Dis_{y_3D} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\partial_t \zeta + \partial_x H.U + \partial_y H.V = 0 \quad (8)$$

Avec :

U, V : composantes horizontales de la vitesse moyennées sur la verticale.

$$U = \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} u \, dz \quad (9)$$

$$V = \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} v \, dz \quad (10)$$

ζ : l'élévation de la surface libre.

τ_{sx}, τ_{sy} : contraintes de cisaillement en surface suivant les directions x et y .

$\tau_{fx_2D}, \tau_{fy_2D}$: contraintes de cisaillement au fond suivant les directions x et y .

H : hauteur d'eau ($H = \zeta + d$).

ν : viscosité cinématique du fluide.

$Dens_{x_3D}$: gradient de la masse volumique suivant la direction x :

$$Dens_{x_3D} = \frac{g}{H} \int_{-d}^{\zeta} \partial_x \left(\int_{-d}^{\zeta} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) dz \right) dz \quad (11)$$

$Dens_{y_3D}$: gradient de la masse volumique suivant la direction y :

$$Dens_{y_3D} = \frac{g}{H} \int_{-d}^{\zeta} \partial_y \left(\int_{-d}^{\zeta} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) dz \right) dz \quad (12)$$

Dis_{x_3D} : dispersion verticale suivant la direction x :

$$Dis_{x_3D} = \frac{1}{H} \partial_x \int_{-d}^{\zeta} (u(z) - U)^2 dz + \frac{1}{H} \partial_y \int_{-d}^{\zeta} (u(z) - U)(v(z) - V) dz \quad (13)$$

Dis_{y_3D} : dispersion verticale suivant la direction y :

$$Dis_{y_3D} = \frac{1}{H} \partial_y \int_{-d}^{\zeta} (v(z) - V)^2 dz + \frac{1}{H} \partial_x \int_{-d}^{\zeta} (v(z) - V)(u(z) - U) dz \quad (14)$$

L'élévation de la surface libre déterminée par les équations de Saint-Venant est utilisée pour la résolution des équations de Navier-Stokes (résolution de l'hydrodynamique en 3D), ce module de résolution est appelé mode interne (*Blumberg et al., 1977 ; Lazure and al., 1991 ; Pohlmann, 1991 ; Johnson et al, 1993*). Pour plus de clarté, nous distinguerons dans ce qui suit, ce qui relève d'un mode ou de l'autre.

III.2.3- Couplage des équations de Navier-Stokes et de Saint-Venant au travers de la contrainte de cisaillement au fond

En mode interne, la formulation des contraintes de cisaillement au fond est développée à partir du profil logarithmique des vitesses sur la verticale :

$$\tau_{fx_3D} = \frac{\rho \cdot \kappa^2 \cdot \sqrt{u_f^2 + v_f^2} \cdot u_f}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (15)$$

$$\tau_{fy_3D} = \frac{\rho \cdot \kappa^2 \cdot \sqrt{u_f^2 + v_f^2} \cdot v_f}{\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (16)$$

avec :

u_f, v_f : vitesses suivant les directions x et y dans la couche du fond, à une distance z du fond.

κ : constante de Von Karman (=0.4 pour l'eau).

z_0 : longueur de rugosité.

Dans le mode externe, les contraintes de cisaillement au fond sont formulées de la façon suivante:

$$\tau_{fx_2D} = \frac{\rho \cdot \kappa^2 \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \cdot U}{\ln^2\left(\frac{H}{z_0}\right)} \quad (17)$$

$$\tau_{fy_2D} = \frac{\rho \cdot \kappa^2 \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \cdot V}{\ln^2\left(\frac{H}{z_0}\right)} \quad (18)$$

En général, le couplage des deux modes consiste à remplacer, lors de la résolution des équations de Saint-Venant (équations 6 et 7), les contraintes de cisaillement du mode externe (formulations 17 et 18), par celles du mode interne (formulations 15 et 16). Cette modification étant source d'instabilité du mode externe, les concepteurs de SIAM-3D ont opté pour les contraintes de couplage associant les contraintes des deux modes, le gradient de la masse volumique (formulations 11 et 12) ainsi que la dispersion verticale (formulations 13 et 14) calculés par le mode interne :

$$\tau_{fx_2D}^{coupl} = \tau_{fx_2D}^{impl} + coupl(\tau_{fx_3D} - \tau_{fx_2D}^{expl} + Dis_{x_3D} + Dens_{x_3D} + \tau_{lat}) \quad (19)$$

$$\tau_{fy_2D}^{coupl} = \tau_{fy_2D}^{impl} + coupl(\tau_{fy_3D} - \tau_{fy_2D}^{expl} + Dis_{y_3D} + Dens_{y_3D} + \tau_{lat}) \quad (20)$$

avec :

$\tau_{fx_2D}^{coupl}, \tau_{fy_2D}^{coupl}$: contraintes de cisaillement issues du couplage des deux modes.

$\tau_{fx_2D}^{impl}, \tau_{fy_2D}^{impl}$: contraintes de cisaillement calculées par le mode externe (formulation 17 et 18) en adoptant un schéma implicite de la loi logarithmique, suivant les directions x et y .

$\tau_{fx_2D}^{expl}, \tau_{fy_2D}^{expl}$: contraintes de cisaillement calculées par le mode externe (formulation 17 et 18) en adoptant un schéma explicite de la loi logarithmique, suivant les directions x et y .

Dis_{x_3D}, Dis_{y_3D} : dispersions verticales calculées par le mode interne suivant les directions x et y .

$Dens_{x_3D}, Dens_{y_3D}$: gradients de la masse volumique calculés par le mode interne suivant les directions x et y .

$\tau_{fx_3D}, \tau_{fy_3D}$: contraintes de cisaillement calculées au pas de temps précédent par le mode interne suivant les directions x et y .

coupl : constante désignant le degré du couplage entre les deux modes. Par convention, ce paramètre peut varier de 0 à 1, cependant, de faibles valeurs impliquent un gain de calcul substantiel. Dans l'estuaire de la Gironde ce couplage est complet c'est-à-dire que *coupl*=1. Dans le cas des fleuves (Garonne et Dordogne), il est partiel (*coupl*=0.5). Cette différence d'affectation est fondée sur l'existence de structures 3D dans l'estuaire de la Gironde beaucoup plus développées que celles présentes dans les fleuves.

τ_{lat} : contrainte de cisaillement latérale, calculée uniquement dans les fleuves (Garonne et Dordogne) par le mode interne. Elle est formulée par l'expression quadratique de la vitesse locale, pondérée par un coefficient.

III.2.4- le modèle de turbulence

Dans le mode interne, le modèle de turbulence est basé sur la théorie de longueur de mélange, celle-ci détermine la viscosité turbulente verticale par l'expression suivante (théorie de *Prandtl* dans *Rodi, 1993*) :

$$\nu_z = l_m^2 \sqrt{(\partial_x u)^2 + (\partial_y v)^2} \quad (21)$$

avec :

ν_z : viscosité turbulente verticale.

l_m : longueur de mélange représentant l'échelle caractéristique des tourbillons.

($l_m = k \cdot \min(z_f, h - z_f, 0.20h)$) avec k : la constante de von Karman (=0.4), h : la hauteur d'eau et z_f : la distance à partir du fond).

L'effet des stratifications de densité est pris en compte par le nombre de Richardson (Ri), celui-ci représente le rapport entre une entité stabilisatrice, les stratifications ($\partial_z \rho$) et l'entité inverse exprimant l'aptitude au mélange du fluide induite par les vitesses de cisaillement ($\partial_z u$ et

$$\partial_z v) : Ri = -\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial_z \rho}{(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2} \quad (22)$$

avec

g : l'accélération de pesanteur.

ρ : masse volumique du fluide.

L'expression de la viscosité turbulente verticale dans le mode interne est une formulation empirique couplant l'effet des stratifications de densité à la théorie de longueur de mélange :

$$\nu_z = l_m^2 \sqrt{(\partial_x u)^2 + (\partial_y v)^2} \cdot (1 + \alpha_1 Ri)^{\beta_1} \quad (23)$$

α_1, β_1 : paramètres d'atténuation de la viscosité turbulence.

La diffusivité verticale turbulente est exprimée de la même manière :

$$K_z = l_m^2 \sqrt{(\partial_x u)^2 + (\partial_y v)^2} \cdot (1 + \alpha_2 Ri)^{\beta_2} \quad (24)$$

α_2, β_2 : paramètres d'atténuation de la diffusivité turbulente.

III.2.5- Equation de transport

Le modèle résout l'équation de transport, celle-ci découle du développement de l'équation de conservation de la masse en tenant compte des phénomènes de dispersion et d'advection ainsi que les échanges avec le fond (érosion et dépôt). L'équation de transport est appliquée à la salinité et aux concentrations des matières en suspension :

$$\partial_t C + \partial_x(uC) + \partial_y(vC) + \partial_z(wC) = \partial_z(K_z \partial_z C) + \partial_x(K_x \partial_x C) + \partial_y(K_y \partial_y C) + E - D \quad (25)$$

avec :

u, w, v : composantes horizontale, verticale et latérale de la vitesse du fluide.

C : constituant (salinité ou concentration des matières en suspension).

K_z : la diffusivité turbulente verticale.

K_x, K_y : les diffusivités horizontales suivant les directions x et y .

E : le flux d'érosion.

D : le flux du dépôt.

III.2.6- Conditions aux limites

Nous avons distingué les conditions limites des deux modes. Si aucune précision n'est apportée, cela concerne les deux modes ou le module résolvant l'équation de transport.

En surface,

Les contraintes de cisaillement dues au vent sont similaires dans les deux modes, elles sont formulées par la loi quadratique :

$$\tau_{sx} = \rho_a \cdot C_{da} \cdot \sqrt{(W_x - u_s)^2 + (W_y - v_s)^2} \cdot (W_x - u_s) \quad (26)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a \cdot C_{da} \cdot \sqrt{(W_x - u_s)^2 + (W_y - v_s)^2} \cdot (W_y - v_s) \quad (27)$$

avec :

ρ_a : masse volumique de l'air

C_{da} : coefficient de traînée exprimé par la formulation de *Garratt* :

$$C_{da} = \left(0.6 + 0.067 \sqrt{(W_x - u_s)^2 + (W_y - v_s)^2} \right) \times 10^{-6} \quad (\text{Weiyan, 1992}).$$

W_x, W_y : composantes mesurées de la vitesse du vent suivant les directions x et y .

u_s, v_s : vitesses horizontales du courant en surface suivant les directions x et y .

Dans le modèle SIAM-3D, les composantes W_x et W_y ont la valeur nulle, les formules 26 et 27 deviennent alors :

$$\tau_{sx} = -\rho_a \cdot C_{da} \cdot \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \cdot u_s \quad (28)$$

$$\tau_{sy} = -\rho_a \cdot C_{da} \cdot \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \cdot v_s \quad (29)$$

-Les flux de chaleur en surface sont nuls.

-Dans le mode interne, la vitesse verticale est formulée de la façon suivante :

$$w = \partial_t \zeta$$

ζ : l'élévation de la surface libre (m).

Dans le mode externe, il n'y pas de vitesse verticale.

Au fond,

- Les contraintes de cisaillement ont déjà été déterminées ci-dessus (voir formulations 15, 16, 17 et 18).

- La vitesse verticale est nulle dans le mode interne : $w_f = 0$.

Dans le mode externe, il n'y pas de vitesse verticale.

Aux limites fluviales,

- L'eau est dépourvue de teneur en sel (eau douce) ; la température est fixée à 18 °.

- La concentration des matières en suspension vaut, 0.06 g l⁻¹ pour la première classe, et 0.04 g l⁻¹ pour la seconde. Elles sont introduites au niveau de La Réole dans la Garonne, et de Pessac dans la Dordogne.

- Les débits mesurés des fleuves sont introduits.

A la frontière océanique,

- Pendant le flot, la salinité est fixée à 35 PSU et la température à 18°, au jusant, les valeurs calculées à proximité de la bordure sont advectées hors du champ de calcul.

- L'élévation de la surface libre est formulée par une composition de signaux harmoniques :

$$\zeta(t) = A_0 + \sum_i \sum_j b_{ij} \cdot \cos(T_{ij} - \varphi_{ij}) \quad (30)$$

avec :

i : index relatant le type d'onde.

j : index relatant la période des ondes.

b_{ij} :amplitude d'une onde élémentaire.

φ_{ij} :phase d'une onde élémentaire.

A_0 :niveau moyen de la surface libre.

T_{ij} :argument astronomique relatant le temps.

A la frontière terrestre,

- Les composantes normales des vitesses et des viscosités sont nulles.
- La composante normale des diffusivités est nulle.

III.2.7- Conditions initiales

La masse initiale de sédiment introduite dans le modèle est de 3.84 millions de tonnes, elle est déposée au niveau de Pauillac (fig.III.1) où les courants sont assez forts pour une remise en suspension dès les premiers cycles de marée, la masse totale de sédiment a été choisie par rapport aux estimations de *Jouanneau (1979)* qui évalue un bilan total (bouchon vaseux et crème de vase) compris entre 3.5 et 5 millions de tonnes. *Allen (1972)* propose une masse de 6 millions de tonnes.

Des tests ont montré que la salinité s'établit dans l'estuaire au bout d'un temps de simulation relativement long (quelques semaines), pour accélérer cet équilibre, nous avons introduit, une teneur en sel dégressive de l'aval vers l'amont de l'estuaire (fig.III.2).

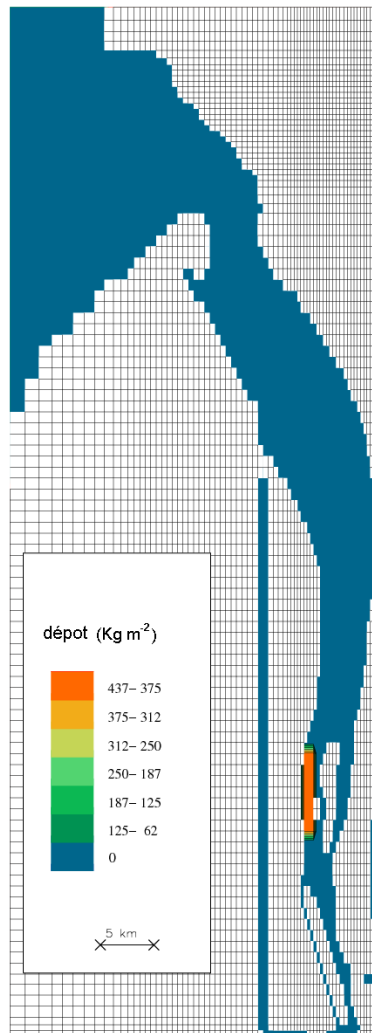


Fig.III.1 – Dépôt initial du sédiment.

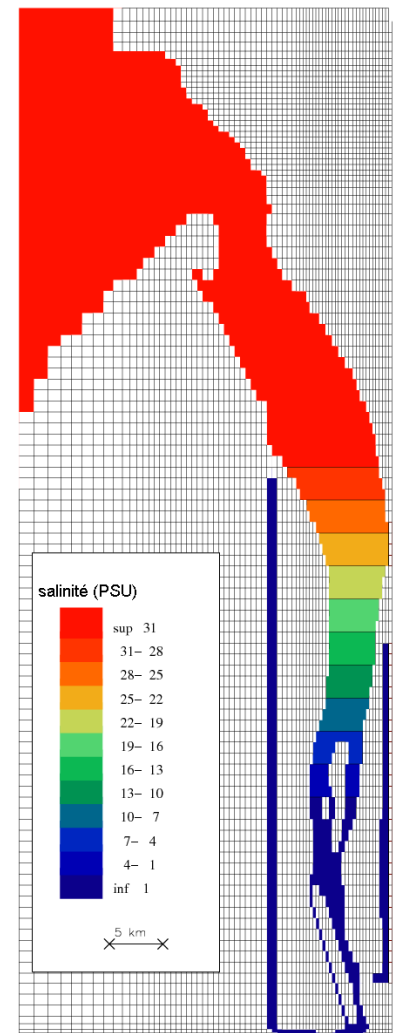


Fig.III.2 – Salinité initiale.

III.2.8- Formulation des processus hydro-sédimentaires

III.2.8.1- Les vitesses de chute des matières en suspension

Il existe deux classes de matières en suspension implantées dans le modèle SIAM-3D, la première classe est dotée d'une vitesse de chute plus élevée que la seconde. Sa masse initiale de 3,84 millions de tonne, augmente avec les apports continus du débit fluvial, en outre, celui-ci introduit dans le domaine de calcul les matières en suspension de seconde classe.

Nous avons détaillé dans cette partie le paramétrage utilisés, afin de clarifier quelques éléments de calcul permettant d'assurer la continuité entre les différentes équations présentées ci-dessous. La formulation des vitesses de chute telle qu'elle est codée dans le module résolvant l'équation de transport, a été proposée par *Le Hir et al. (2001)* :

$$w_s = \max \left(w_{min}; \frac{w_{max}}{2} \times \min(2; C) \right) \quad \text{pour } C \leq C_{W_{max}} \quad (31)$$

$$w_s = w_{max} \left(\max \left(0.05; \frac{1 - \lambda_1 C^{\lambda_2}}{1 - \lambda_1 C_{W_{max}}^{\lambda_2}} \right) \right)^{4.65} \quad \text{pour } C_{W_{max}} < C \leq C_{cr} \quad (32)$$

$$w_s = \gamma_1 C^{\delta_1} \quad \text{pour } C > C_{cr} \quad (33)$$

avec

C : la concentration des matières en suspension.

$C_{W_{max}}$, C_{cr} : les concentrations au début et à la fin de l'entravement.

w_{max} , w_{min} : les vitesses de chute maximale et minimale.

$\lambda_1, \lambda_2, \gamma_1, \delta_1$: des constantes empiriques.

Pour les deux classes de matières en suspension : $C_{W_{max}} = 20 \text{ kg m}^{-3}$, $C_{cr} = 60 \text{ kg m}^{-3}$,

$\lambda_1 = 0.085$, $\lambda_2 = 0.5$.

Pour les matières en suspension de première classe : $w_{max} = 0.002 \text{ m s}^{-1}$, $w_{min} = 0.0005 \text{ m s}^{-1}$.

Pour les matières en suspension de seconde classe : $w_{max} = 0.001 \text{ m s}^{-1}$, $w_{min} = 0.0001 \text{ m s}^{-1}$.

Afin d'assurer la continuité entre la formulation 32 et 33 tout en atteignant le point

$(500 \text{ kg m}^{-3}, 10^{-7} \text{ m s}^{-1})$, γ_1, δ_1 sont déterminées en résolvant l'équation $w_s = \gamma_1 C^{\delta_1}$ en deux points distincts, le premier point est : $(w_{s_{cr}}, C_{cr})$ avec $w_{s_{cr}}$ la valeur de w_s lorsque C est égal à

C_{cr} (formule 32), le seconde point imposé est $w_s = 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ lorsque $C = 500 \text{ kg m}^{-3}$.

Nous obtenons ainsi $\gamma_1 = 120.06$, $\delta_1 = -3.36$ pour les matières en suspension de première classe et $\gamma_1 = 15.74$, $\delta_1 = -3.04$ pour les matières en suspension de seconde classe.

Nous avons tracé l'évolution des vitesses de chute (fig.III.3) telles que formulées par les équations 31, 32 et 33. Pour une meilleure visibilité du champ de variabilité des vitesses, les axes des tracés sont discrétisés en échelle logarithmique.

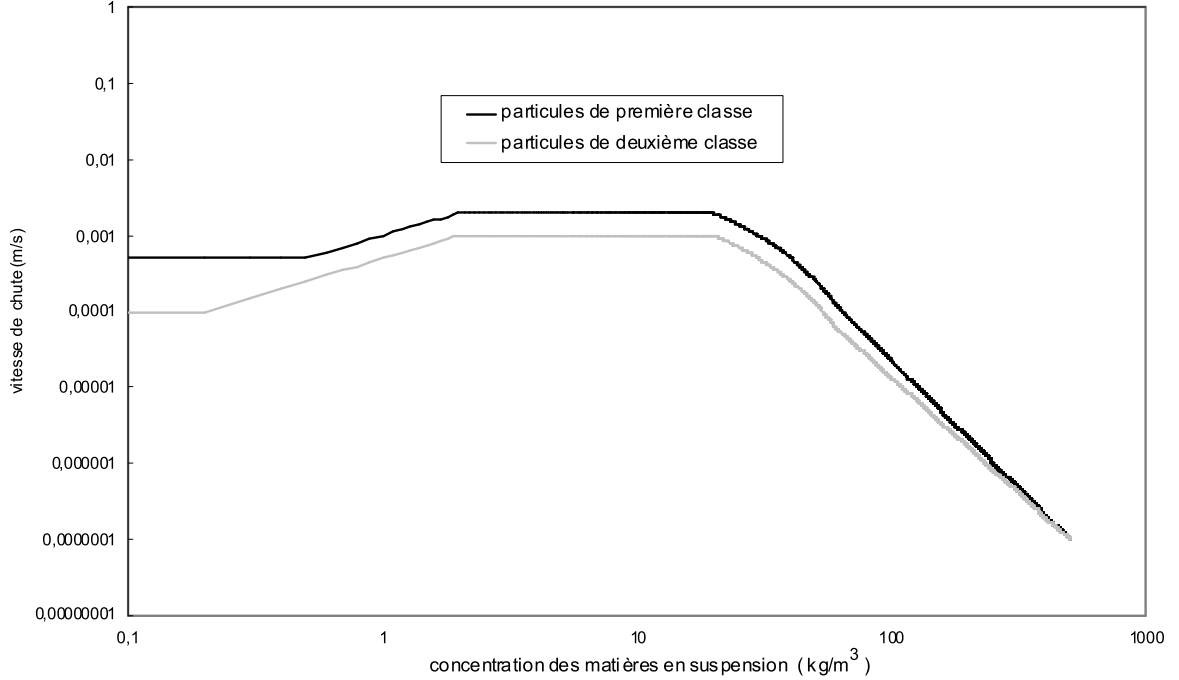


Fig.III.3- Evolution des vitesses de chute en fonction de la concentration des matières en suspension.

III.2.8.2- Flux de dépôt

Le flux de dépôt D est calculé selon la formule de *Krone (1962)* :

$$D = w_{sf} C_f \left(1 - \frac{\tau_{f_3D}}{\tau_{cd}} \right) \quad \text{si } \tau_{f_3D} < \tau_{cd} \quad (34)$$

$$D = 0 \quad \text{si } \tau_{f_3D} \geq \tau_{cd} \quad (35)$$

avec

w_{sf} : vitesse de chute près du fond.

C_f : concentration des matières en suspension près du fond.

τ_{f_3D} : module de la contrainte de cisaillement au fond du mode interne

$$(\tau_{f_3D} = \sqrt{\tau_{fx_3D}^2 + \tau_{fy_3D}^2})$$

τ_{cd} : contrainte de cisaillement critique du dépôt, ce paramètre est constant.

III.2.8.3- Flux d'érosion

L'érosion E est calculée selon la formule de *Partheniades* (1965) :

$$E = E_0 \left(\frac{\tau_{f_3D}}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad \text{si } \tau_{f_3D} > \tau_{ce} \quad (36)$$

$$E = 0 \quad \text{si } \tau_{f_3D} \leq \tau_{ce} \quad (37)$$

E_0 : coefficient d'érosion.

τ_{f_3D} : module de la contrainte de cisaillement au fond du mode interne

$$(\tau_{f_3D} = \sqrt{\tau_{fx_3D}^2 + \tau_{fy_3D}^2})$$

τ_{ce} : contrainte de cisaillement critique d'érosion ($\tau_{ce} = 0.0015 C_{sed}$, avec C_{sed} concentration du sédiment superficiel au fond).

III.3- Résolution numérique

III.3.1- Champ d'application et bathymétrie

Le domaine d'application de SIAM-3D s'étend de la bordure du plateau continental du Golfe de Gascogne située à l'isobathe 200m (fig.III.4) jusqu'aux limites amonts de propagation de la marée en Garonne et en Dordogne situées à La Réole et à Pessac respectivement. Les résultats de simulation sont visualisés uniquement dans le domaine d'application qui nous intéresse à savoir l'étendue allant de l'embouchure de l'estuaire de la Gironde jusqu'à La Réole en Garonne et Pessac en Dordogne. Les relevés bathymétriques utilisés par le modèle datent de 2002 dans l'estuaire et dans les fleuves (Garonne et Dordogne). La bathymétrie dans le système estuarien de la Gironde (estuaire et fleuves) est donnée ci-dessous (fig.III.5). Les mailles à l'entrée de la Dordogne ne sont pas visibles (fig.III.5), illusion qui prêterait à une coupure entre l'estuaire et la Dordogne. L'explication est que le module graphique du logiciel PV-WAVE (logiciel de visualisation des résultats dissocié du modèle SIAM-3D) ne prend pas en charge la visualisation de données (ou mailles) disposées en une dimension.

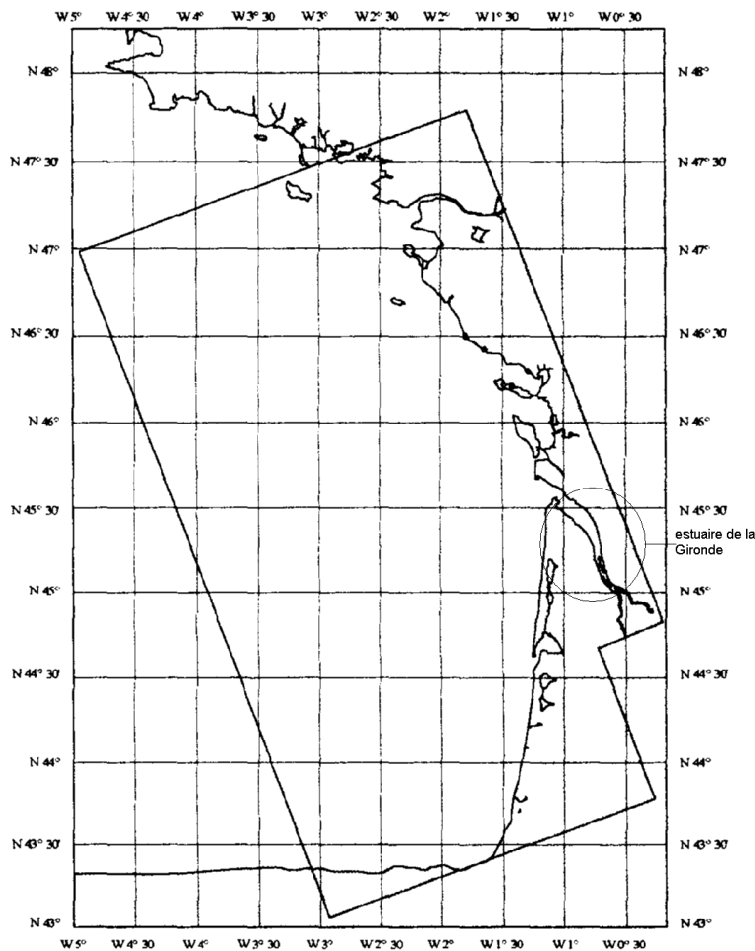


Fig.III.4- Domaine d'application du modèle SIAM-3D (Sottolichio, 1999, modifié).

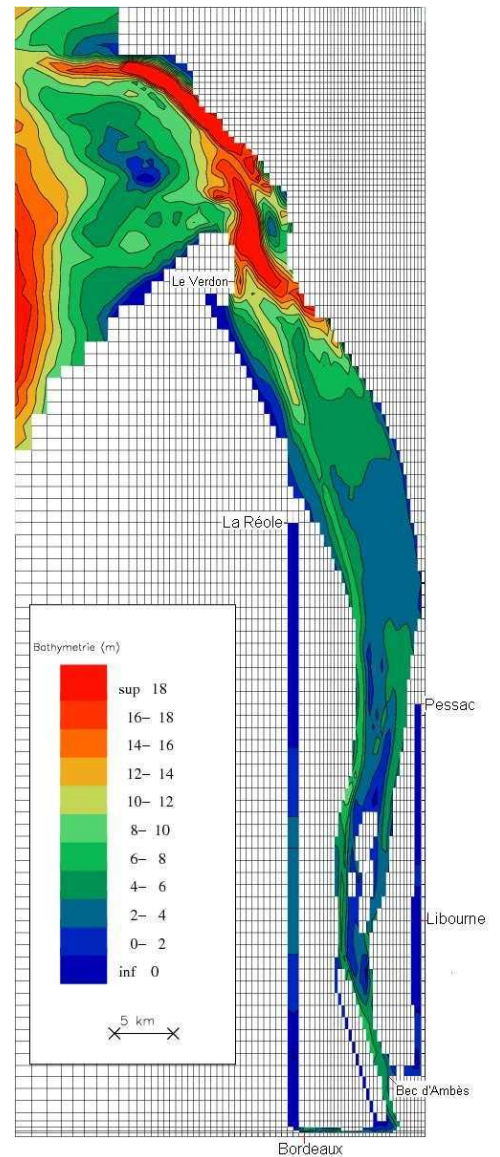


Fig.III.5- Bathymétrie.

II.3.2- Méthode numérique

La résolution numérique est basée sur la méthode des différences finies, la discrétisation repose sur la technique de splitting. Dans le cadre de notre application, elle permet de résoudre les équations de Navier-Stokes et de transport avec un pas de temps différent de celui de la propagation de l'onde de surface.

III.3.3- Schémas numériques

La résolution de l'équation de transport se déroule en deux étapes. La première consiste à calculer, par un schéma explicite, les flux horizontaux à chaque pas de temps et dans tout le domaine. L'algorithme utilisé est celui de Bott (1989) dont la construction fait appel à la technique polynomiale développée par Crowley (1968) et qui consiste à normaliser et limiter le champs de variabilité des flux advectifs

par deux bornes, l'une supérieure, l'autre inférieure. La seconde étape, associée à la première, résout l'intégralité de l'équation de transport dont la dimension verticale est solutionnée par un schéma implicite.

Le schéma des directions alternées (ADI : Alternating Direction Implicit) est utilisé pour la résolution des équations de Saint-Venant (*Leenderste et Gritton, 1971*). Le principe de ce schéma est de déterminer, à chaque demi pas de temps, la composante latérale de la vitesse grâce à la vitesse longitudinale (et inversement), calculée au pas de temps précédent. Pour la résolution 3D, des schémas implicite et explicite sont appliqués sur la verticale et l'horizontale respectivement.

III.3.4- Maillage

Le type de maillage utilisé est celui d'Arakawa (*Arakawa et Lamb, 1977*). Cela consiste à affecter pour chaque maille deux profondeurs, h_x et h_y afin de calculer les flux suivant les directions x et y (fig.III.6). Selon *Cheng et al. (1993)*, ce procédé permet d'obtenir une résolution topographique de 30% supérieure à celle qui définit la profondeur aux coins des mailles. Les composantes des vitesses moyennées sur la verticale (vitesses dans les équations de Saint-Venant) ainsi que les vitesses suivant les directions x et y sur les profils verticaux, sont calculées au niveau des h_x et h_y .

L'élévation de la surface libre est calculée au centre des mailles, la vitesse verticale est déterminée au centre de la face supérieure des mailles (fig.III.6). En ce qui concerne la discrétisation horizontale, le maillage est rectangulaire non uniforme (ou irrégulier), afin de respecter les sections réelles de l'écoulement. Il est possible de modifier l'espacement Δx et Δy sur des mailles dont une ou plusieurs arêtes délimitent le contour du calcul (figure III.7). La dimension longitudinale des mailles est en moyenne de 1 Km dans l'estuaire proprement dit, de 1 à 2 Km en Garonne et de 4 Km sur une grande partie de la Dordogne. Le nombre de mailles varie de 1 à 3 sur la section de chaque fleuve. L'axe vertical est divisé en 12 couches de cotes et d'épaisseurs fixes, des extrapolations sont toutefois effectuées sur la couche du fond et de surface lors du calcul pour tenir compte de l'élévation de la surface libre et de la cote du fond. La hauteur d'eau soumise à la marée détermine le nombre de couches intervenant dans le calcul ainsi que le numéro de la couche superficielle (ou de surface).

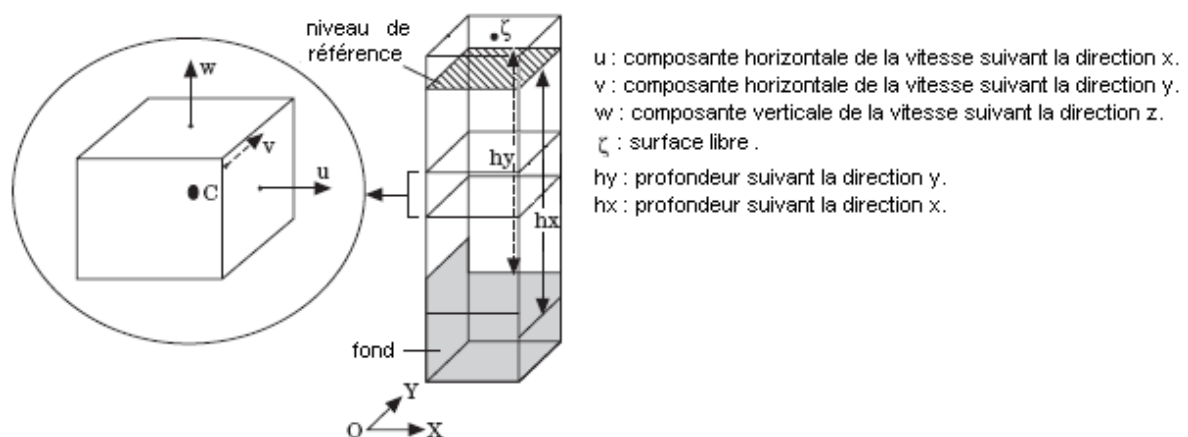
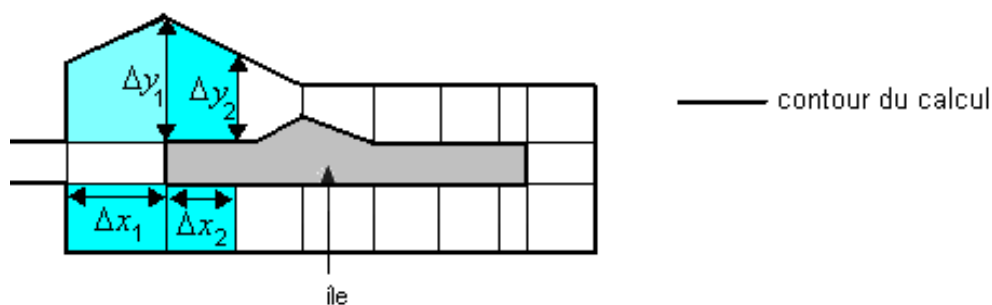


Fig.III.6- Profondeurs h_x et h_y et position des vitesses (*Cugier et al., 2002, modifié*).



exemple de mailles (en bleu) délimitant le contour du calcul

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2$ sont choisis de façon à préserver la section de l'écoulement

Fig.III.7- Exemple de maillage non uniforme.

III.3.5- Cadre de simulation

Les simulations sont effectuées sous le système d'exploitation Linux. Elles sont lancées sur un serveur, à partir de mon poste de travail via une interface.

Le pas de calcul est de 200 secondes pour le transport, et de 50 secondes pour l'hydrodynamique. Cependant, les solutions, codées en binaire, sont enregistrées tout les 20 mn.

Une simulation de 3 mois et demi par exemple, dure environ 24 heures.

Les résultats finaux se présentent sous forme de fichiers binaires. Ils sont exploités sur mon poste de travail afin d'être visualisés grâce au logiciel PV-WAVE. Cette dernière étape a nécessité un lourd travail de programmation.

III.4- Conclusion

Le modèle SIAM-3D simule la hauteur d'eau et les courants de marée, la salinité et la concentration des matières en suspension dans le système estuarien de la Gironde. L'amélioration de cette nouvelle version repose essentiellement sur l'utilisation de lois hydro-sédimentaires développées.

En terme numérique, nous allons aborder quelques différences majeures qui peuvent exister entre SIAM-3D et certains modèles numériques 3D.

La méthode des différences finies est largement utilisée dans les modèles 3D simulant la dynamique sédimentaire dans les estuaires. Cependant, certains modèles, comme TELEMAC-3D développé par EDF-DRD, sont basés sur la méthode des éléments finis.

Le maillage horizontal dans SIAM-3D est rectangulaire non uniforme (ou irrégulier). Cette discrétisation offre la possibilité d'une meilleure représentation des zones à forts gradients au travers d'un maillage plus raffiné. Néanmoins, le transfert d'une structure d'une zone grossièrement discrétisée vers une autre plus raffinée peut engendrer de la dispersion.

La discrétisation verticale dans SIAM-3D est en coordonnées cartésiennes. Ainsi, le nombre de couches intervenant dans le calcul dépend de la hauteur d'eau. Des modèles 3D contournent cet inconvénient en discrétisant en coordonnées sigma. Néanmoins, ce type de maillage peut induire une instabilité numérique lorsque la bathymétrie présente de fortes irrégularités (*Deleersnijder et Becker, 1992*). Une autre discrétisation verticale est connue sous le nom de coordonnées isopycnes (*Bleck et Smith, 1990*) où l'épaisseur des couches représente une hauteur d'eau d'égale densité.

Chapitre IV

**Mise au point du modèle numérique SIAM-3D,
ajustement de l'hydrodynamique
et comparaison des salinités**

L'objectif de ce chapitre est de calibrer la marée calculée par le modèle SIAM-3D, mais aussi d'étudier l'hydrodynamique (courants de marée) et la salinité dans l'estuaire de la Gironde.

IV.1- Implantation de la nouvelle bathymétrie des fleuves (Garonne et Dordogne)

Le code numérique SIAM-3D lit en entrée les données bathymétriques de l'estuaire et des fleuves.

Ces données dataient de 2002 pour l'estuaire, et de 1959 pour les fleuves.

L'extraction massive de granulats et les travaux d'approfondissement du chenal de navigation en aval de Bordeaux depuis les années 60 jusqu'aux années 80, ont engendré des changements significatifs du fond fluvial. Pour tenir compte de cette évolution, de nouveaux relevés bathymétriques des fleuves, effectués par le Port Autonome de Bordeaux en 2002, ont été introduits dans le modèle (fig.IV.1 et IV.2).

Chaque relevé récent des fleuves (2002) représente la moyenne des mesures topographiques sur leur largeur, que nous avons affectée de façon identique à chaque maille sur section. Les relevés anciens des fleuves (1959) représentent, qu'en à eux, la moyenne des valeurs topographiques sur section souvent différentes, déjà implantées dans SIAM-3D. Les discrétisations longitudinales du maillage numérique (en moyenne de 1 à 2 Km en Garonne et de 4 Km sur une grande partie de la Dordogne) sont différentes du pas de mesure (tous les 500 mètres en Garonne et en Dordogne).

L'ancienne largeur des fleuves (1959) lue par le modèle a été conservée pour cause d'une très faible variation de cette grandeur entre 1959 et 2002.

Les valeurs des points kilométriques (PK) que nous utiliserons, ont pour origine le pont de Pierre à Bordeaux (PK0), elles sont négatives en amont de ce point et positives en aval.

Nous ne disposons pas, entre le Bec d'Ambès et le Marquis (5 km), de relevés récents (2002), en cohérence avec la structure numérique des données bathymétriques dans le modèle SIAM-3D; c'est-à-dire des couples de données bathymétriques en x et y pour chaque maille, permettant de tenir compte de l'écoulement bidimensionnel entre ces deux stations. Nous conserverons, par conséquent, les anciens relevés (1959) entre le Bec d'Ambès et le Marquis, dans la simulation avec la nouvelle bathymétrie. Cet inconvénient n'existe pas pour le reste de la Garonne et pour la Dordogne, l'écoulement étant unidimensionnel (suivant x ou y), une seule mesure suffit pour chacune des mailles sur section.

L'analyse des deux courbes bathymétriques de la Garonne nous permet d'identifier trois tendances concernant l'évolution du fond fluvial : la première zone s'étend de Bordeaux (PK0) jusqu'à Marquis (PK20), elle est caractérisée par une pente moyenne de faible inclinaison bien que nous enregistrons de fortes fluctuations bathymétriques. La deuxième, se distingue par une surélévation abrupte du fond en amont de Bordeaux ($\approx$ PK-1), et une raideur de pente de même ordre de grandeur que la première zone jusqu'au alentour du PK-23 en amont de Langoiran (PK-20). Et enfin la troisième zone qui s'étend jusqu'à La Réole (PK-70), aisément identifiable par une forte pente et un rehaussement régulier du fond fluvial.

La comparaison entre l'ancienne et la nouvelle bathymétrie de la Garonne, montre l'approfondissement du fond entre Castets et La Réole (fig.IV.1 et IV.3).

Cette érosion est due en grande partie aux extractions massives de granulats dans cette région depuis les années 60 (*Castaing, Etcheber, Sottolichio, Coppé, 2006*).

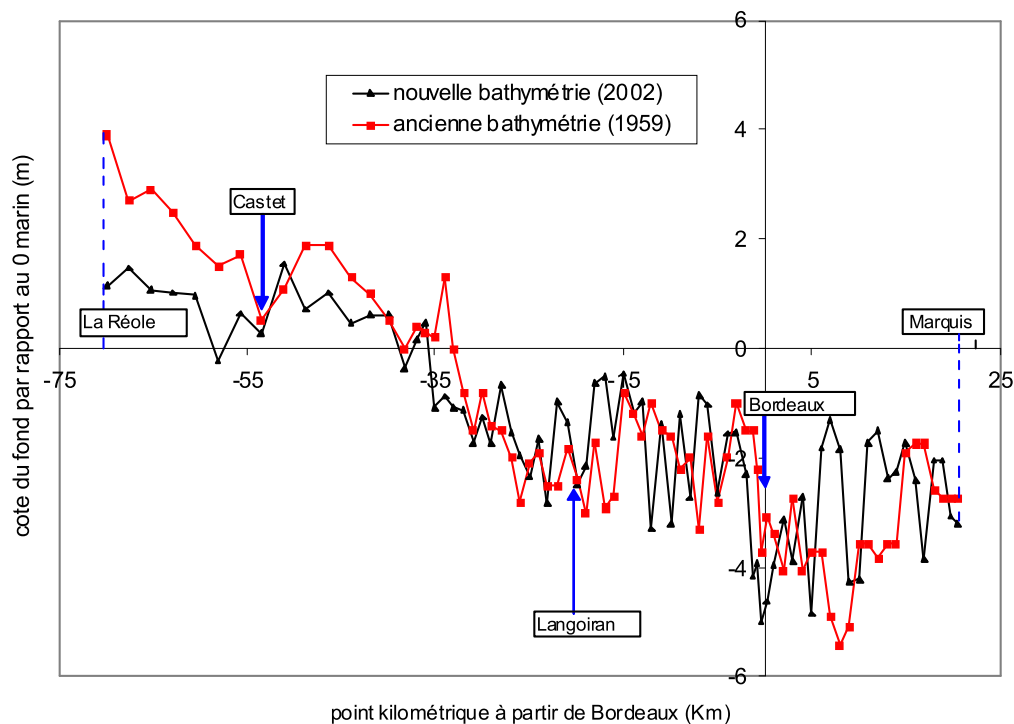


Fig.IV.1 - Bathymétrie moyenne sur section de la Garonne.

En Dordogne, l'approfondissement du fond se situe entre St-Gervais (PK35) et Ségransan (PK9) (Fig.IV.2 et IV.3)

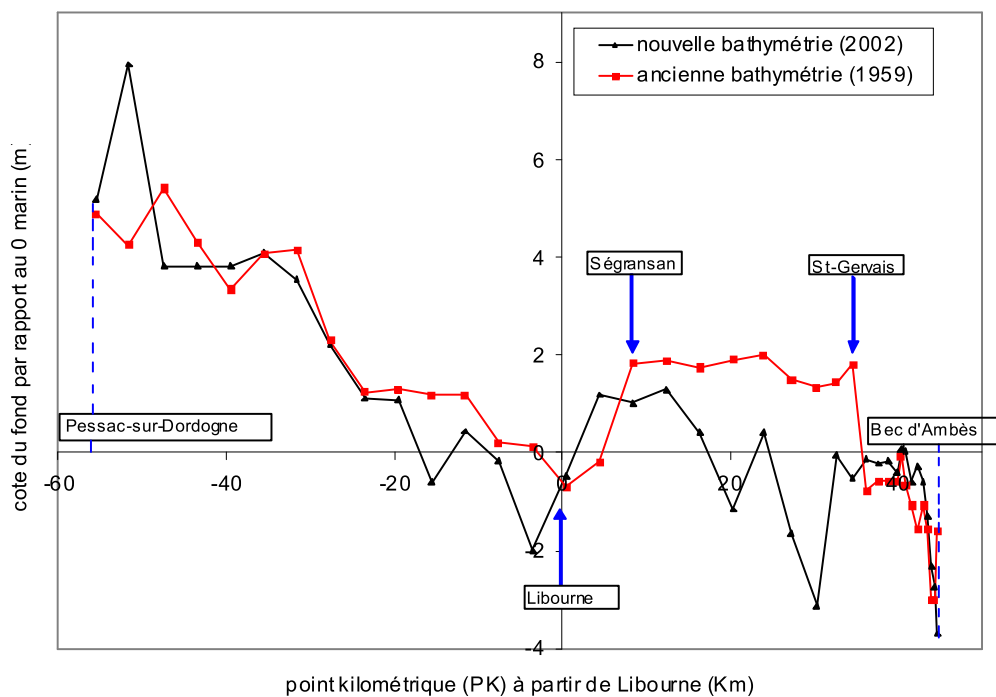


Fig.IV.2 - Bathymétrie moyenne sur section de la Dordogne.

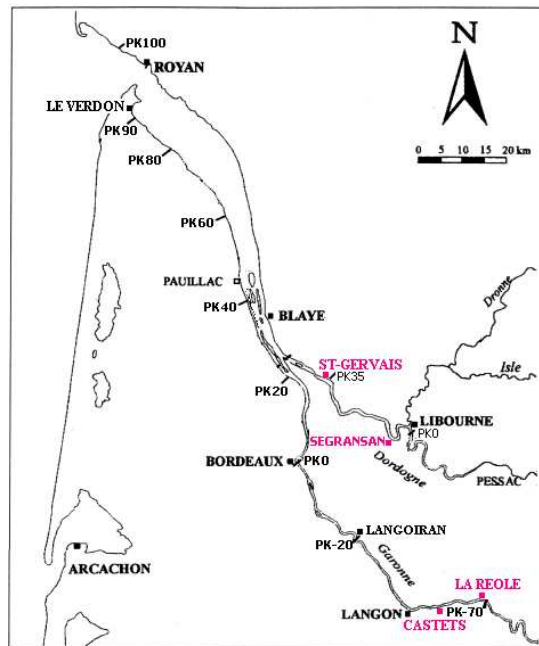


Fig.IV.3- Approfondissement du fond fluvial entre les stations représentées en rouge.

IV.2- Calibration hydrodynamique du modèle

La calibration hydrodynamique du modèle consiste à ajuster au mieux la marée calculée par le mode externe sur celle mesurée. Dans notre application, le paramètre d'ajustement est la rugosité au fond. Celle-ci ainsi que la viscosité turbulente sont les plus communément utilisées pour la calibration hydrodynamique des modèles.

Selon la disponibilité des mesures, nous avons étendu nos comparaisons aux courants de marée.

Nous avons introduit dans le modèle les débits mesurés (La Réole, en Garonne, et Pessac, en Dordogne), lus comme données d'entrée lors des simulations.

IV.2.1- La marée

IV.2.1.1- Généralités

Pour la calibration, nous avons choisi, parmi les stations de mesure disponibles, celles représentant une bonne couverture spatiale de l'estuaire et des fleuves: Le Verdon et Trompeloup dans l'estuaire, Bordeaux, Langoiran et Langon dans la Garonne, Cavernes et Branne dans la Dordogne (fig.IV.4).

Nous utiliserons les mesures provenant du Port Autonome de Bordeaux aux stations de Trompeloup, Le Verdon, Bordeaux, Langoiran, Langon et du laboratoire EPOC aux stations de Cavernes et Branne.

La durée et la date des campagnes de mesure nous imposent la période de calibration.

Lorsque les mesures s'étalent sur plusieurs cycles saisonniers, nous avons privilégié les périodes recouvrant des débits d'étiage, c'est le cas pour Bordeaux, Langoiran, Langon, Le Verdon et Trompeloup.

La période de calibration s'étend du 1^{er} au 31 août 2002 pour Bordeaux, Langoiran, Pauillac et Le Verdon, du 08 au 31 août 2002 pour Langon, du 16 au 17 septembre 2001 pour Branne et du 18 au 19 septembre 2001 pour Cavernes.

La fréquence d'échantillonnage est de cinq minutes pour Branne et Cavernes, d'une heure pour Le Verdon, Trompeloup, Bordeaux, Langoiran, et fluctuante pour Langon de 21 mn à 194 mn.

L'agrandissement des graphiques sur quelques cycles de marée (fig.IV.6, IV.8, IV.10, IV.12, IV.17 et IV.19) nous permet d'évaluer l'ajustement en phase entre les mesures et le calcul.

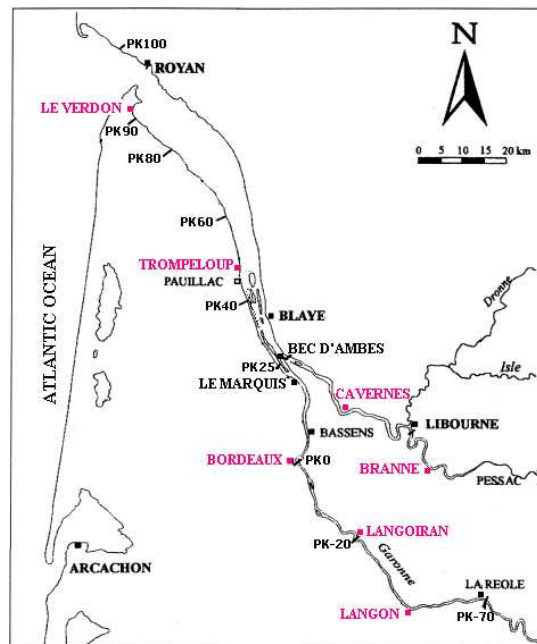


Fig.IV.4 - Les stations de calibration sont représentées en rouge.

IV.2.1.2- Comparaison entre la marée calculée et la marée mesurée

A Bordeaux (fig.IV.5 et IV.6) et Langoiran (fig.IV.7 et IV.8) l'amplitude de la marée calculée est très faible par rapport à celle mesurée, le différentiel est de l'ordre de 1 mètre au niveau des basses mers.

A Langon (fig.IV.9 et IV.10) l'inverse se produit : la marée calculée est trop forte par rapport à celle mesurée. Au Verdon (fig.IV.11 et IV.12) et à Trompeloup (fig.IV.13 et IV.14), la phase est correcte néanmoins le niveau de la surface libre à l'étale de pleine mer est plus élevée que la mesure, et la raideur de la courbe étant plus forte à l'approche de l'étale, il s'ensuit l'antériorité d'une heure de la pleine mer calculée par rapport à celle mesurée. On note également sur cette station, que la marée calculée à basse mer atteint des valeurs de plus en plus faibles de celle mesurée au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité de marée. A Branne (fig.IV.15) et à Cavernes (fig.IV.16), nous constatons une bonne correspondance en amplitude et en phase.

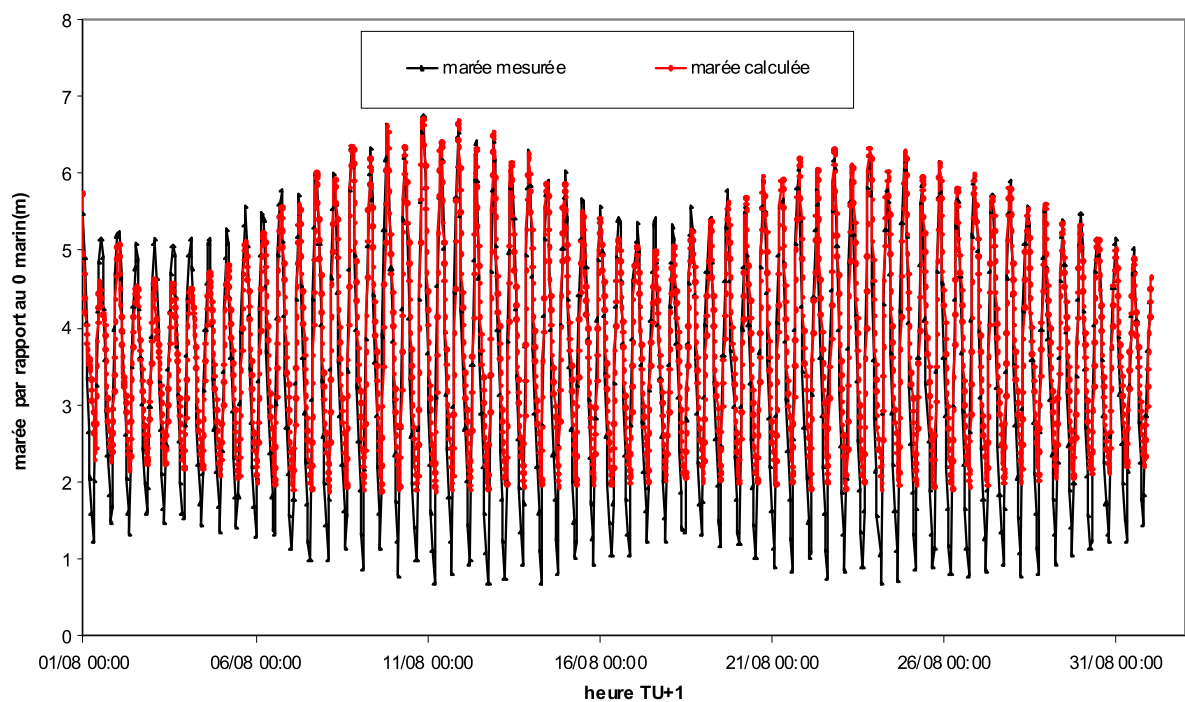


Fig.IV.5- Marée à Bordeaux du 01 au 31 août 2002.

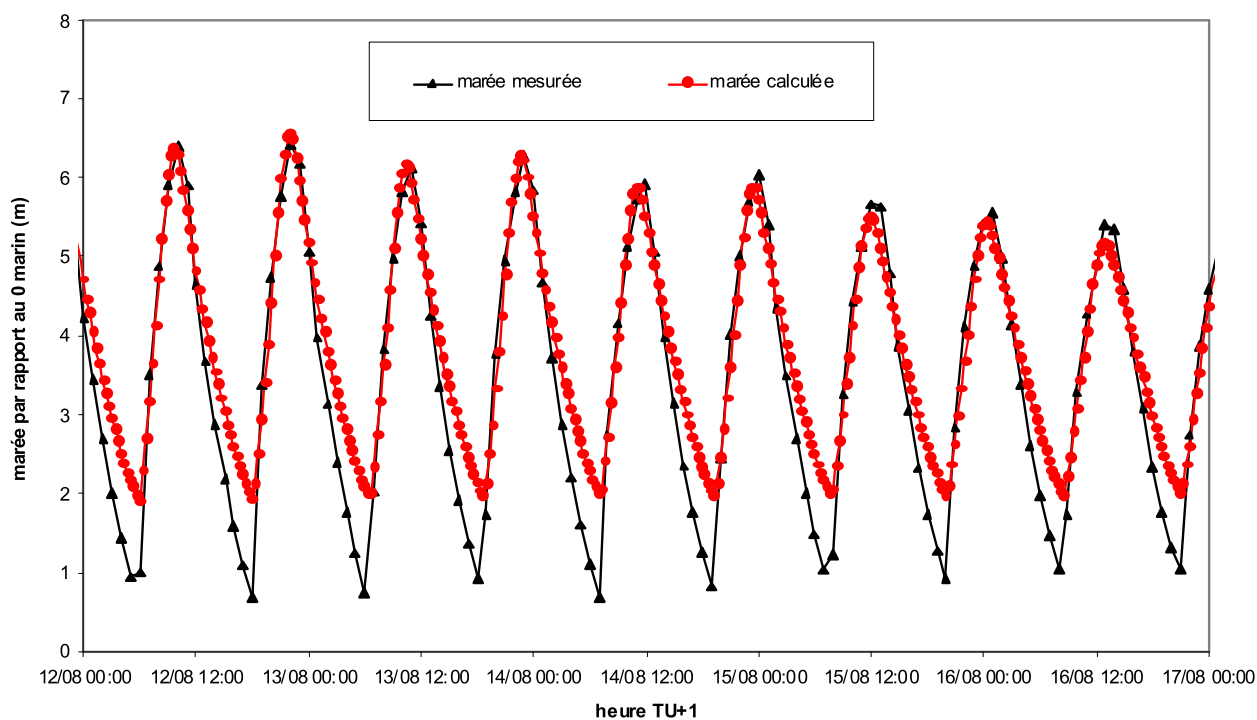


Fig.IV.6- Marée à Bordeaux du 12 au 17 août 2002.

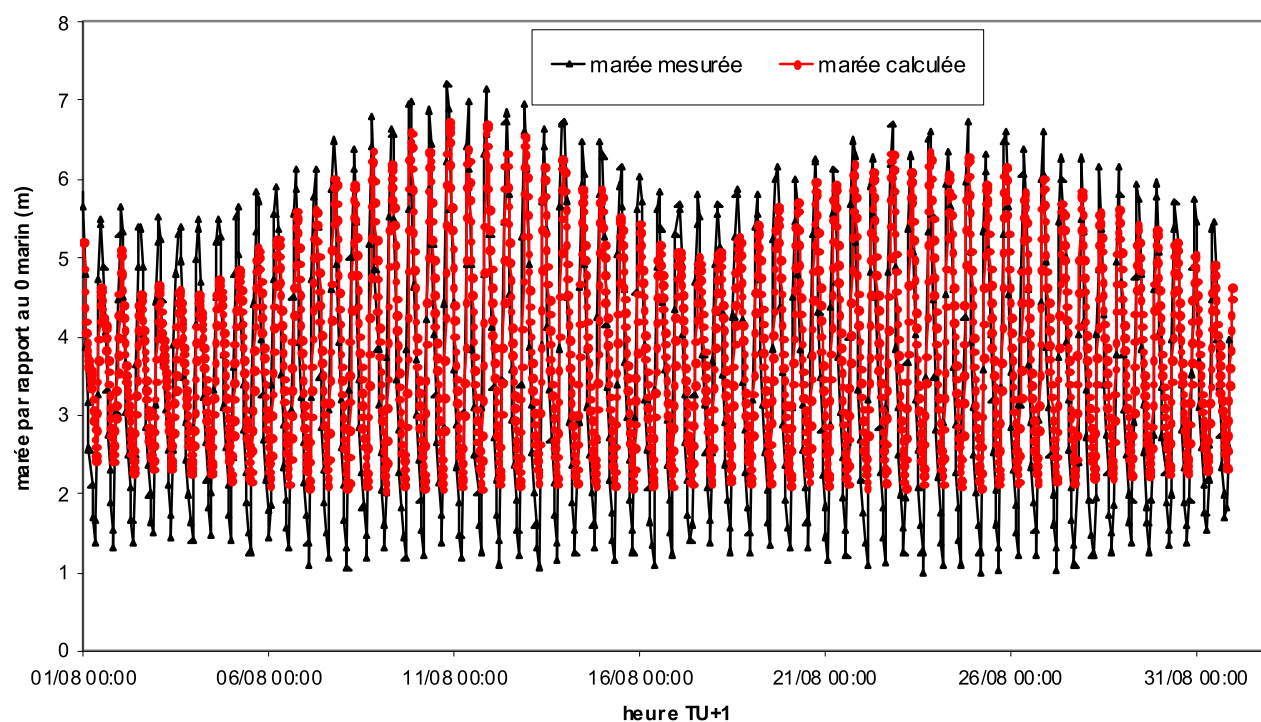


Fig.IV.7- Marée à Langoiran du 01 au 31 août 2002.

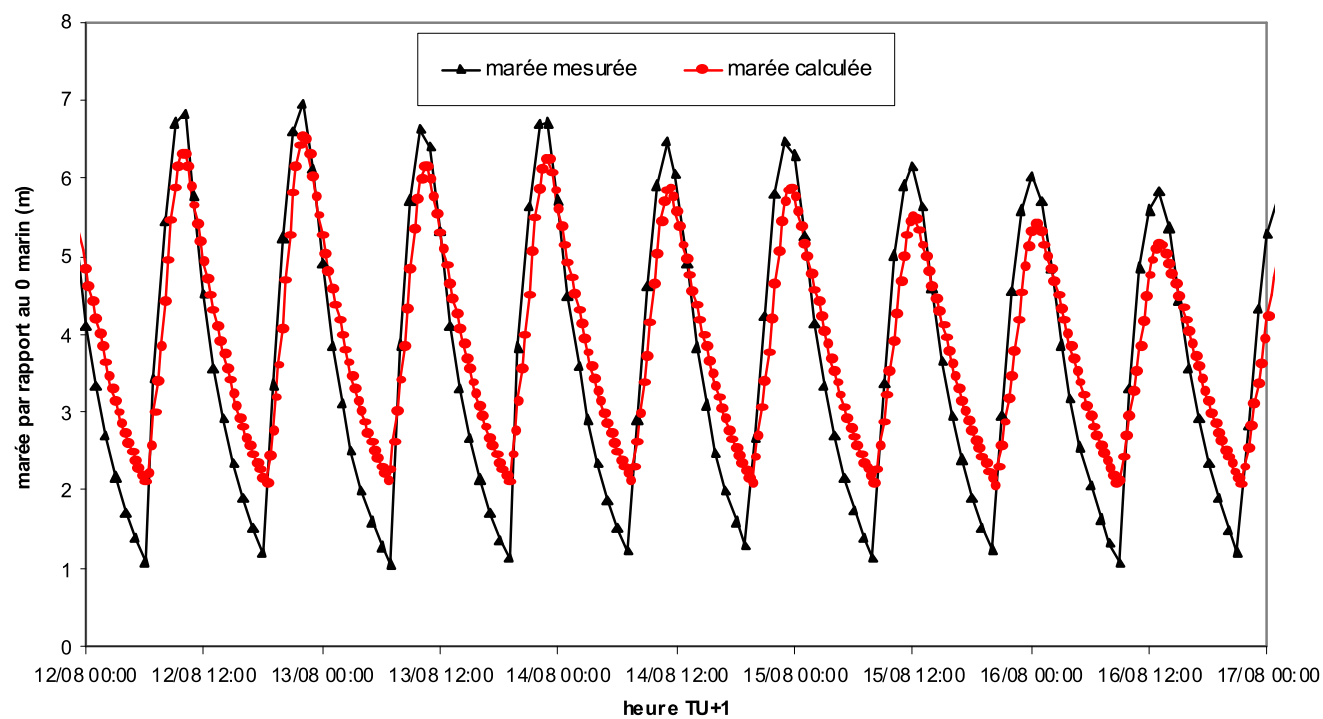


Fig.IV.8- Marée à Langoiran du 12 au 17 août 2002.

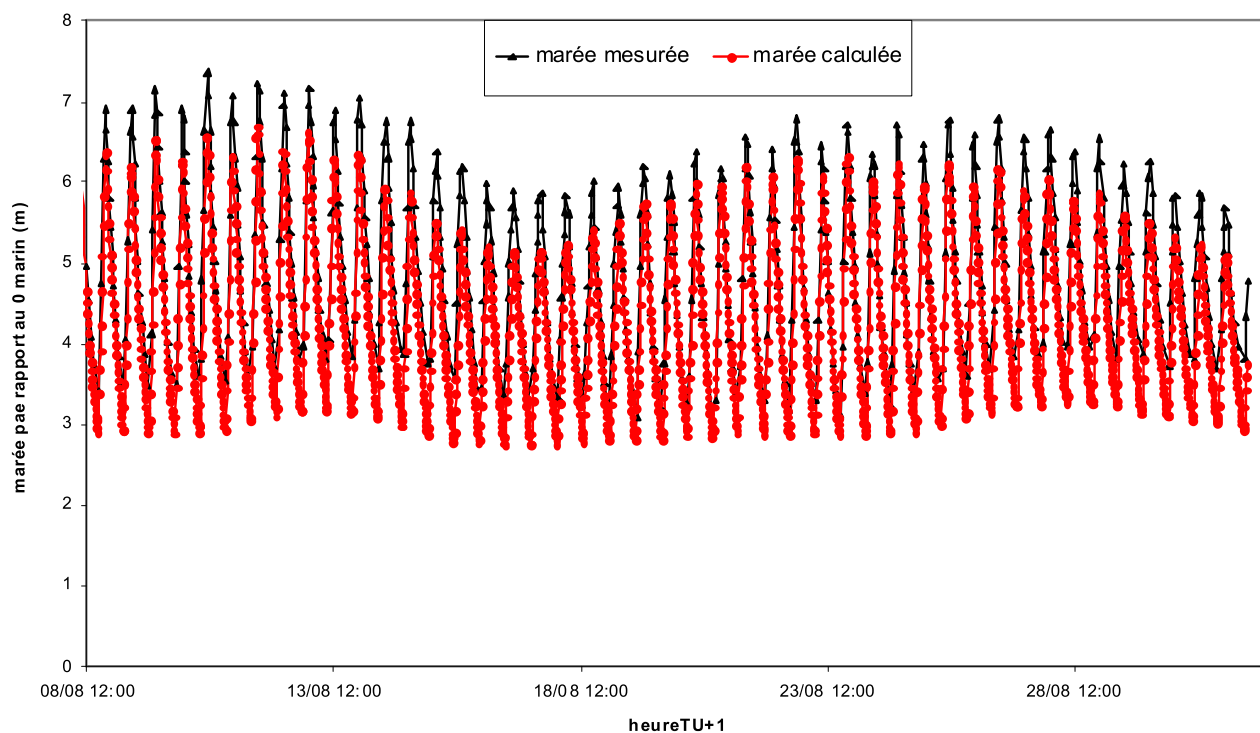


Fig.IV.9- Marée à Langon du 08 au 31 août 2002.

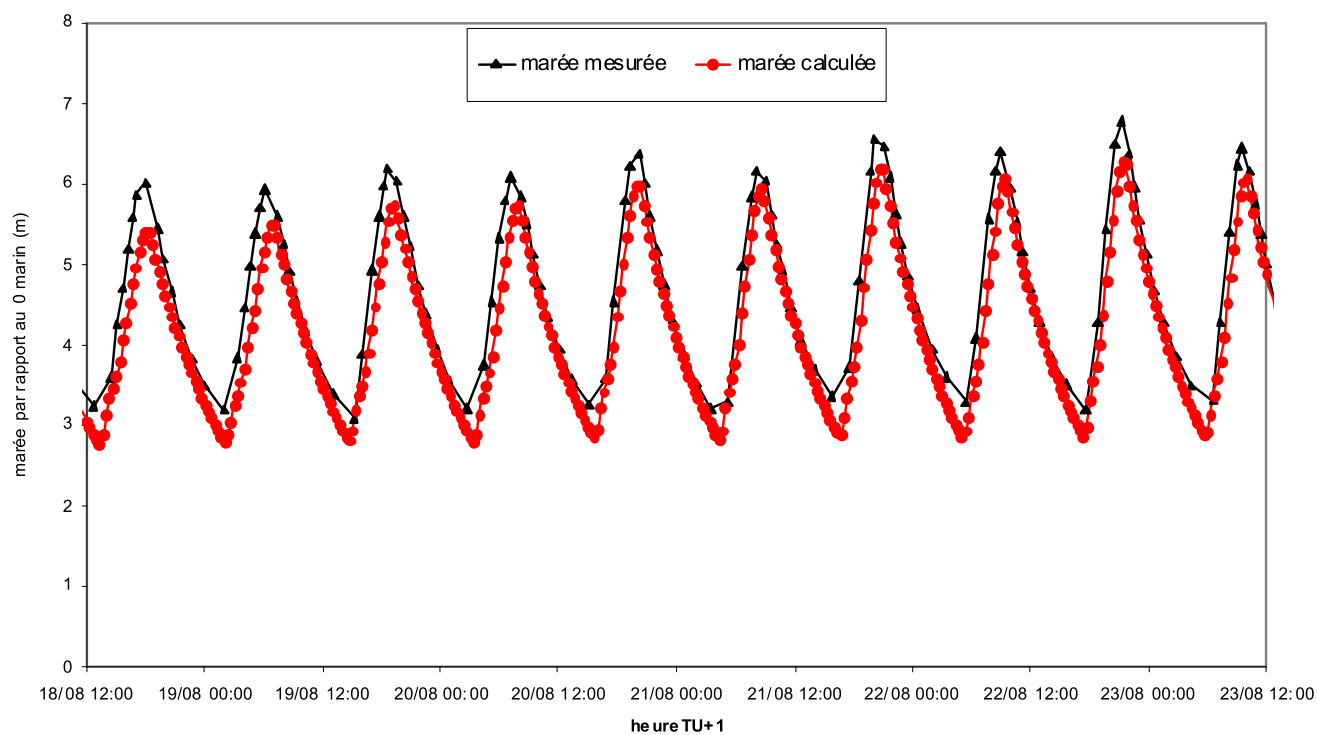


Fig.IV.10- Marée à Langon du 18 au 23 août 2002.

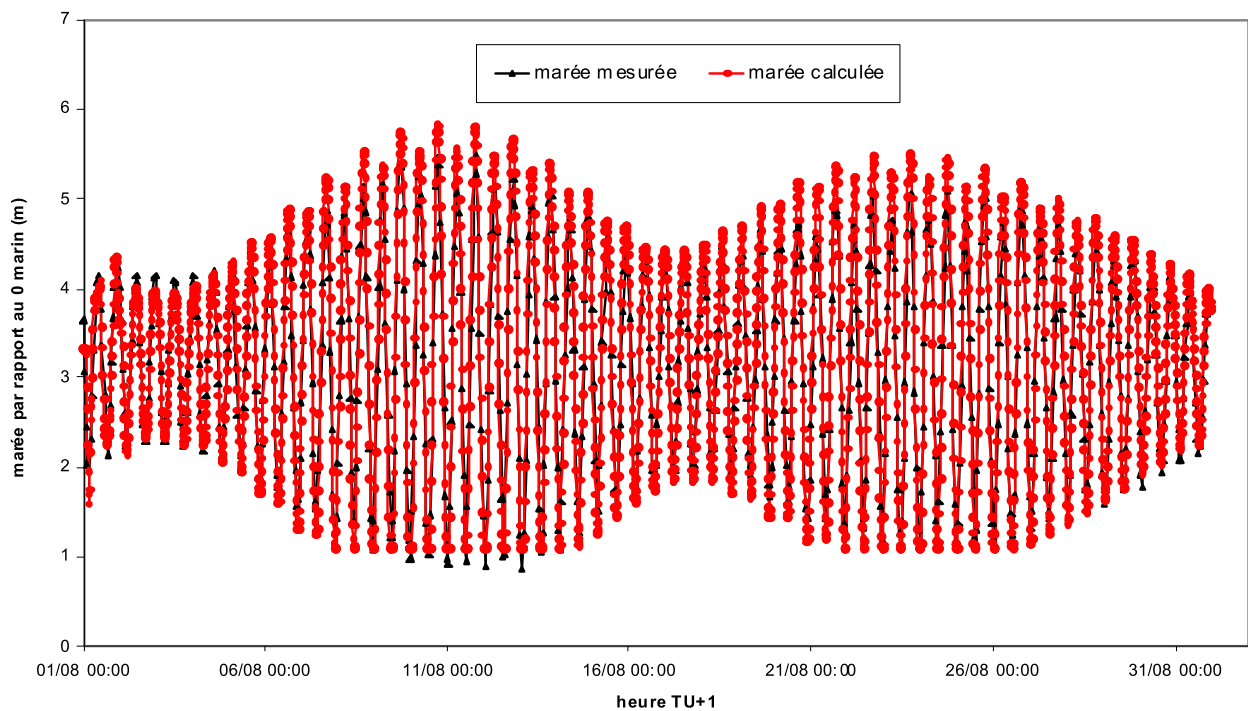


Fig.IV.11- Marée au Verdon du 01 au 31 août 2002.

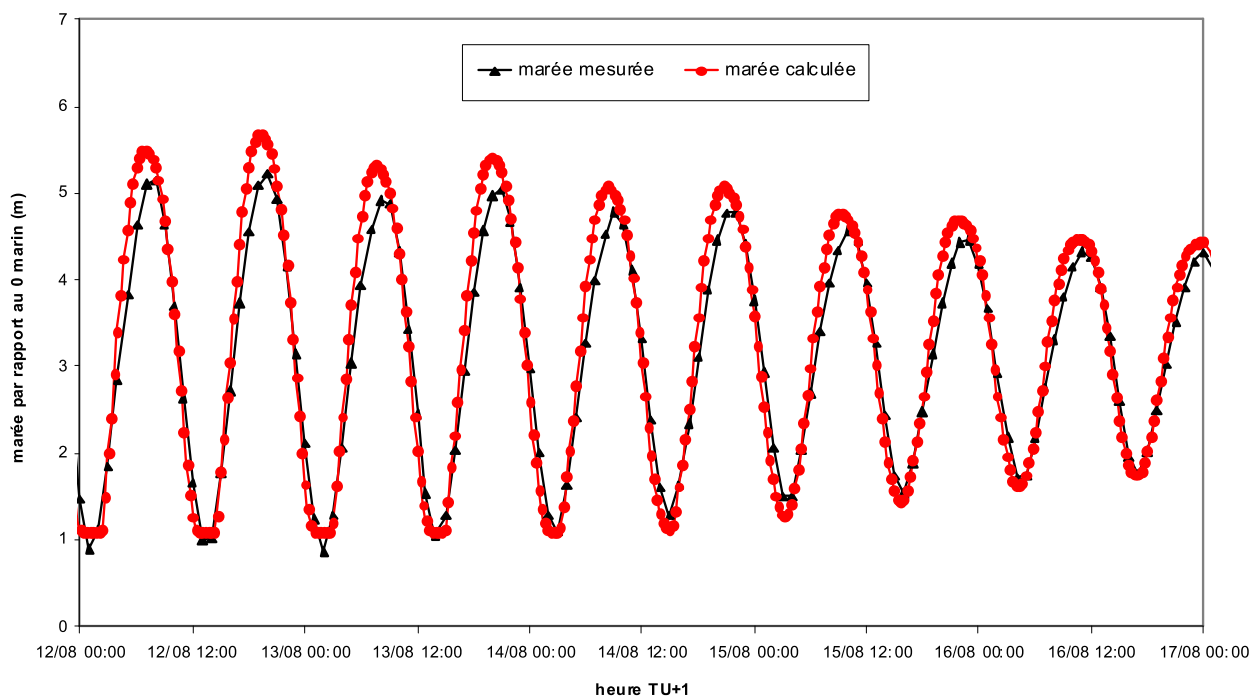


Fig.IV.12- Marée au Verdon du 12 au 17 août 2002.

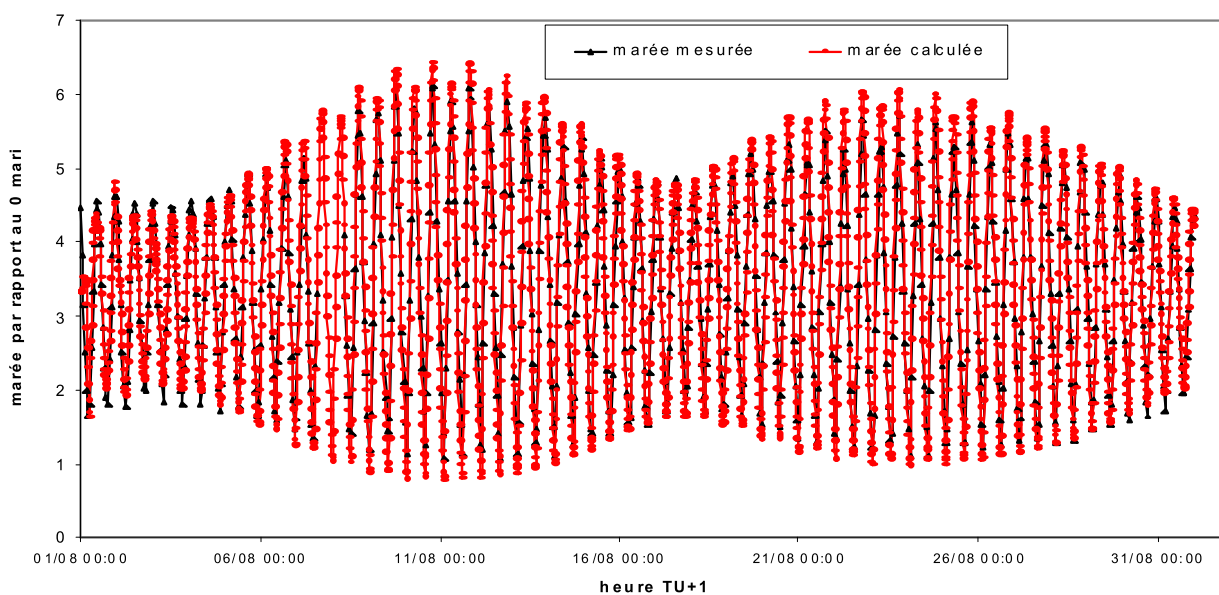


Fig.IV.13- Marée à Trompeloup du 01 au 31 août 2002.

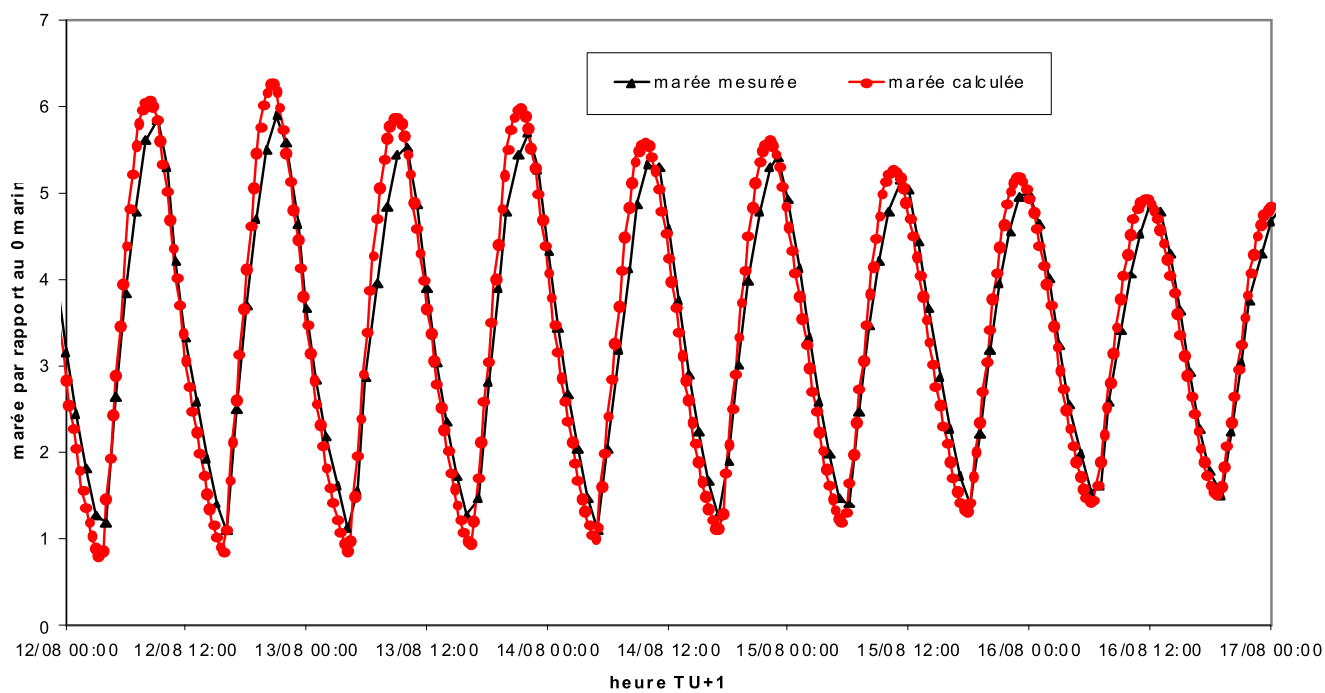


Fig.IV.14- Marée à Trompeloup du 12 au 17 août 2002.

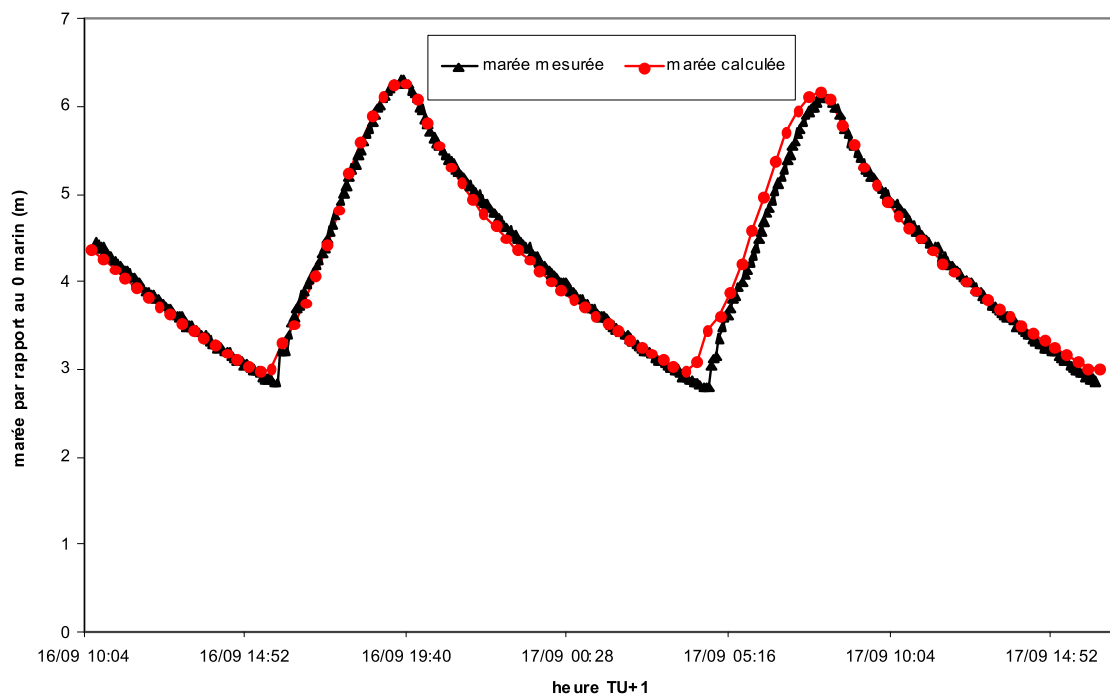


Fig.IV.15- Marée à Branne du 16 au 17 septembre 2001.

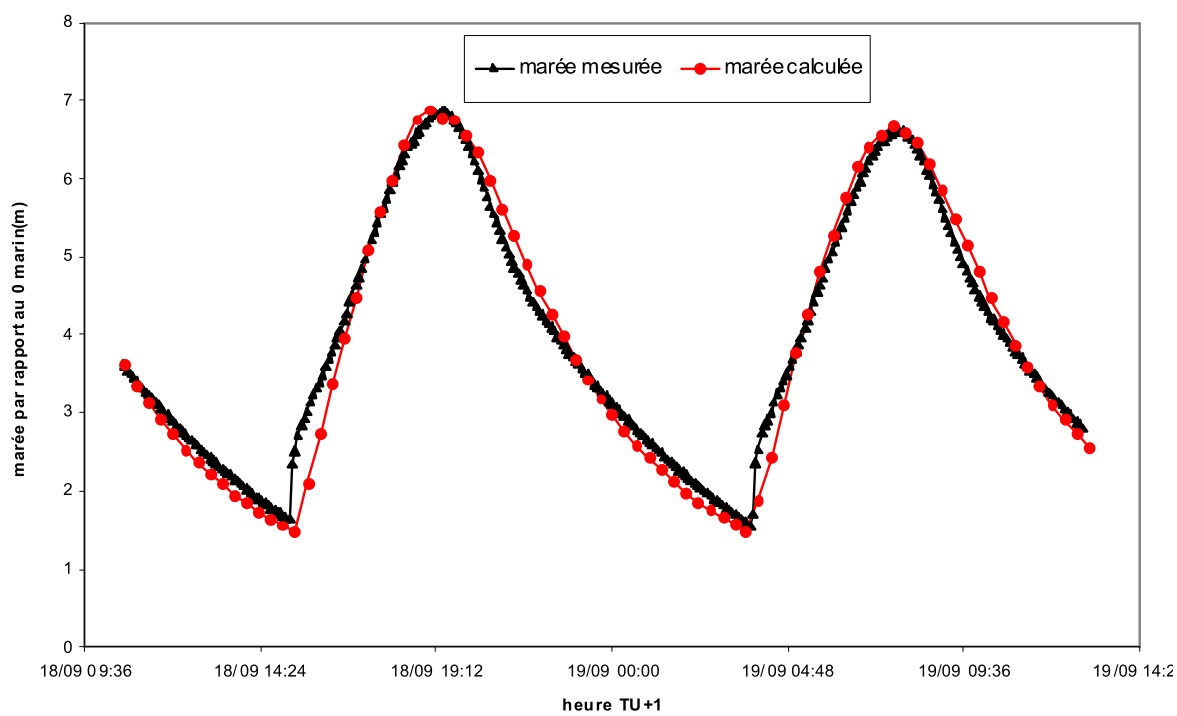


Fig.IV.16- Marée à Cavernes du 18 au 19 septembre 2001.

Nous avons considéré que les résultats marégraphiques aux stations de Trompeloup, Le Verdon, Branne et Cavernes étaient corrects et ne nécessitaient pas d'ajustement paramétrique contrairement aux stations situées dans la Garonne. Pour amplifier la marée calculée à Bordeaux et Langoiran, nous avons diminué le paramètre de rugosité au fond entre Le Marquis et Langoiran (voir fig.IV.3 pour localiser les stations représentées sur la fig.IV.17). Ce paramètre prend en compte la granulométrie des sédiments au fond. Il intervient dans la formulation de la contrainte de cisaillement au fond :

$$\tau = \rho \frac{k^2 \bar{u}^2}{\ln^2(h/z_0)}$$

Avec :

τ : la contrainte de cisaillement au fond (N m^{-2})

k : la constante de Von Karman ($\approx 0,4$)

ρ : la masse volumique de l'eau (Kg m^{-3})

$\bar{u}$: la vitesse moyenne horizontale sur la verticale (m s^{-1})

h : la hauteur d'eau (m)

z_0 : la rugosité (m)

Après avoir testé différents paramétrages et comparé la marée résultante avec celle mesurée, la modification la mieux à même de produire une amplification de marée proche de celle mesurée consiste à introduire une rugosité : de 10^{-6} m constante entre Le Marquis et Bordeaux, variant, de 10^{-6} m à 2×10^{-6} m de Bordeaux à Langoiran, de 6×10^{-4} m à 7.8×10^{-3} m à l'amont de Langoiran jusqu'à Langon et de 0,1 m à 0,5 m à l'amont de Langon jusqu'à La Réole (fig.IV.17). Nous adopterons dorénavant cette modification pour les simulations suivantes.

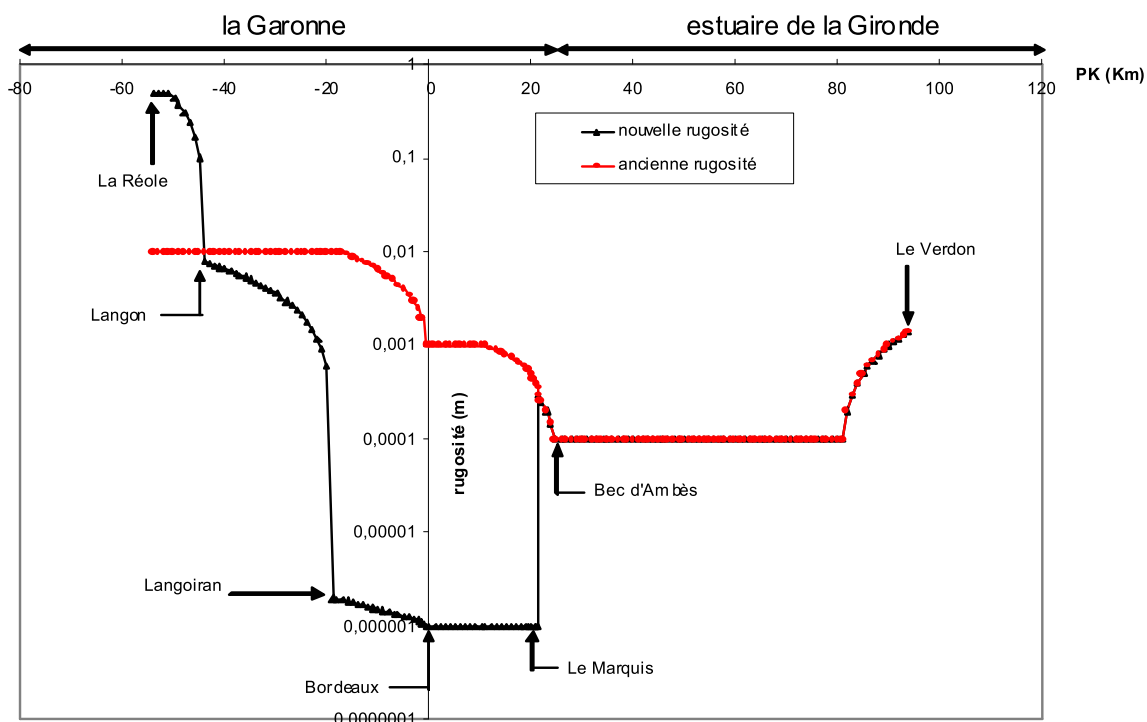


Fig.IV.17- Valeurs de rugosité adoptées pour l'estuaire de la Gironde et de la Garonne en échelle logarithmique.

Nous obtenons ainsi après l'ajustement paramétrique de la rugosité, une meilleure représentativité en amplitude des mesures à Bordeaux (fig.IV.18 et IV.19) et Langoiran (fig.IV.20 et IV.21), on observe néanmoins, un léger décalage sur certains cycles d'environ 40 mn tantôt à pleine mer (à Bordeaux et Langoiran) tantôt à basse mer (à Bordeaux). On note, en outre, à Bordeaux, l'apparition d'un différentiel entre pleines et basses mers qui visuellement prêterait à un rehaussement des courbes marégraphiques (fig.IV.18). A Langoiran, des basses mers surélevées peuvent atteindre par endroit 0.5 m au dessus des basses mers mesurées (fig.IV.18). A Langon, la marée est bien représentée en phase et en amplitude (fig.IV.22 et IV.23). Aucune répercussion n'est constatée sur le reste des stations (Troupeloup, Le Verdon, Cavernes et Branne) après cet ajustement paramétrique.

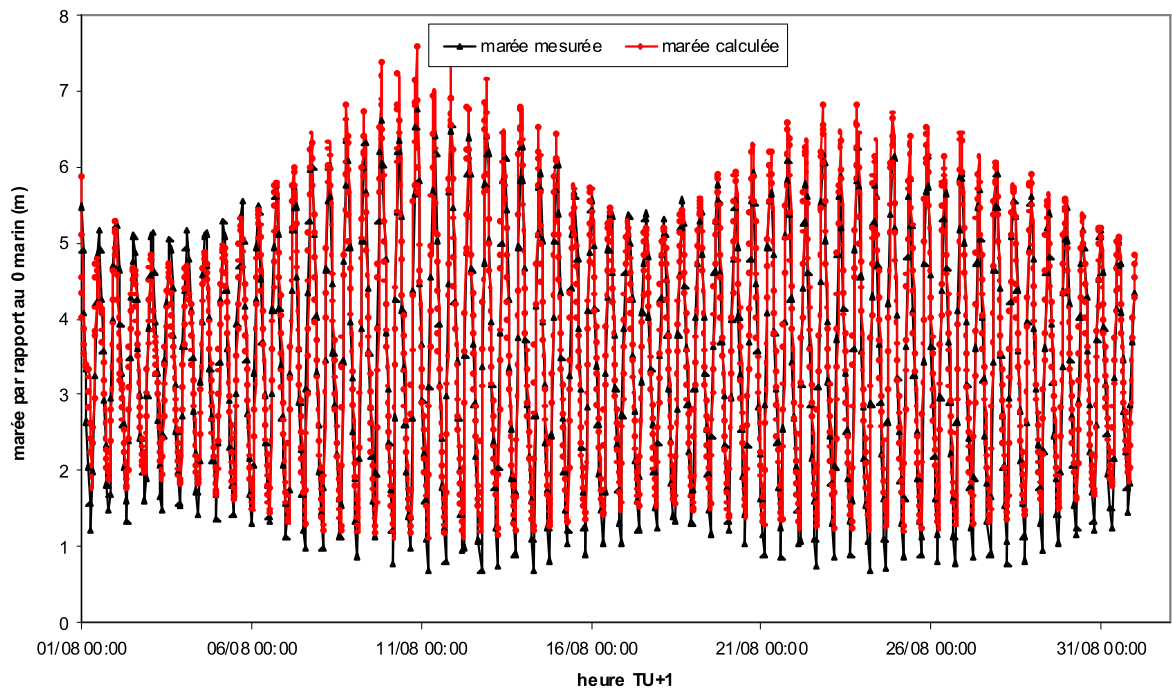


Fig.IV.18- Marée à Bordeaux du 01 au 31 août 2002.

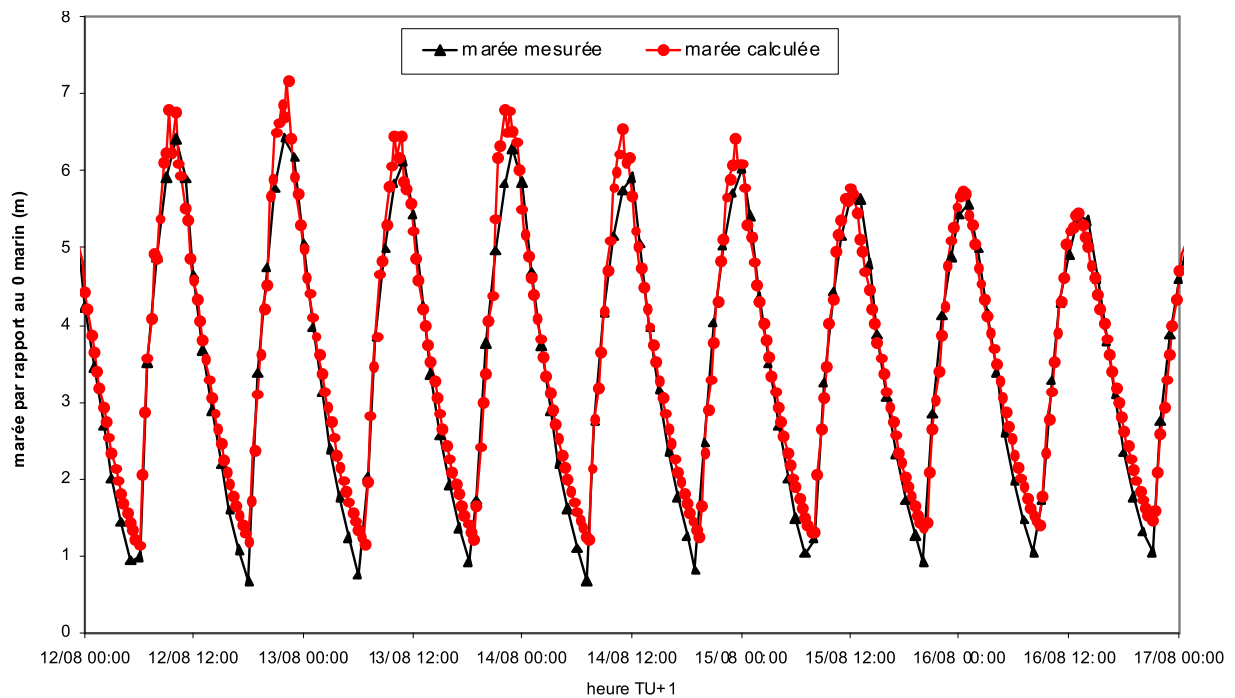


Fig.IV.19- Marée à Bordeaux du 12 au 17 août 2002.

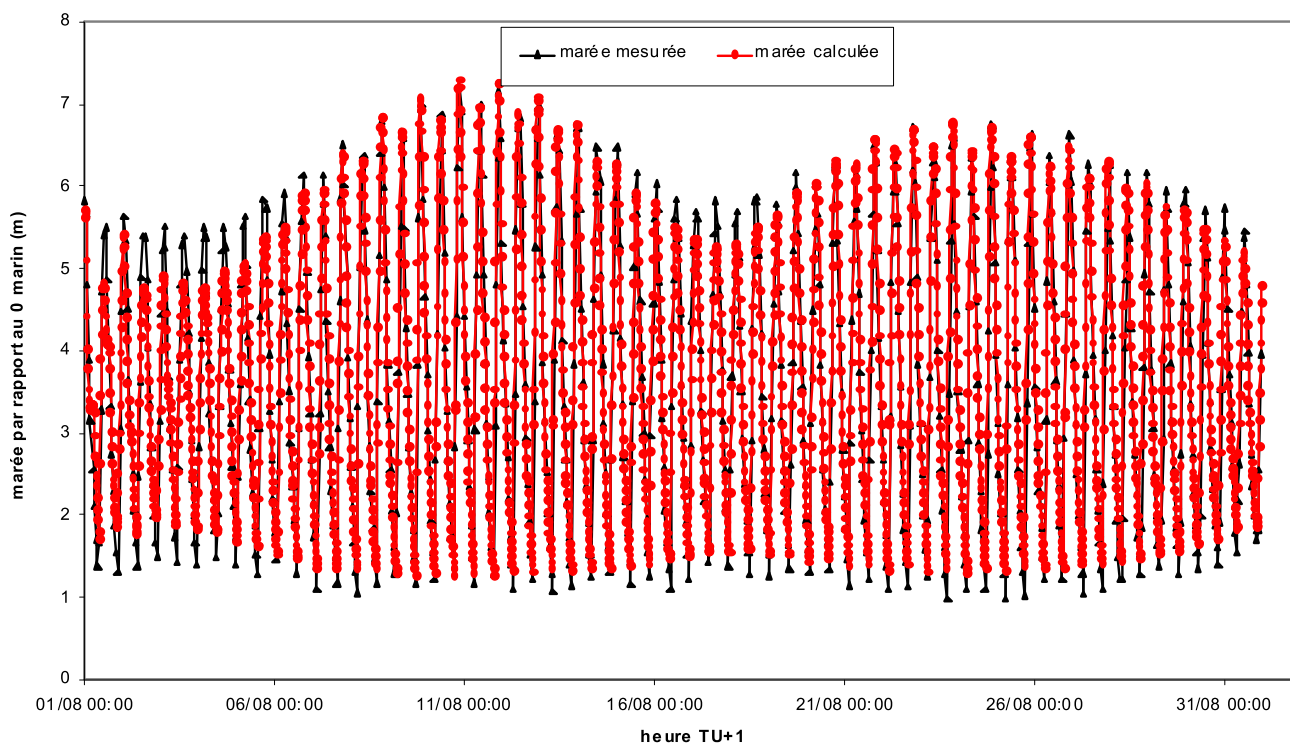


Fig.IV.20- Marée à Langoiran du 01 au 31 août 2002.

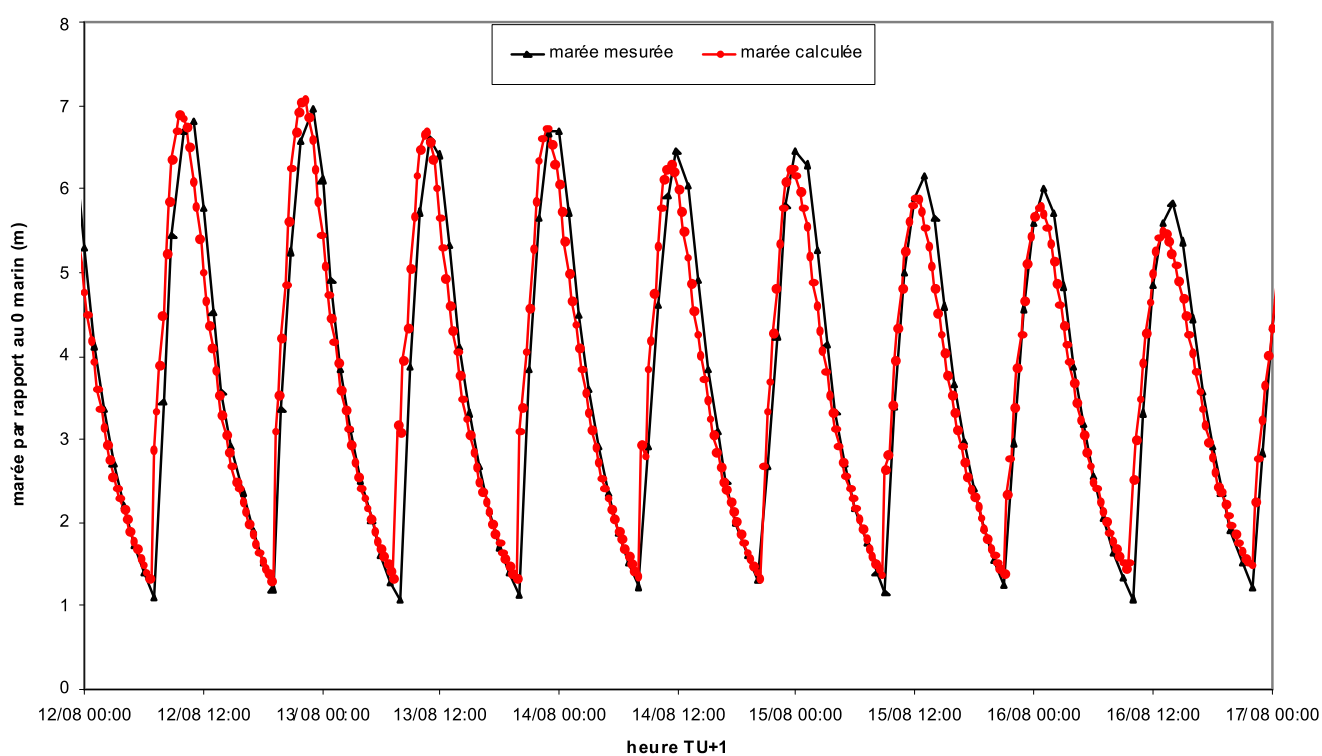


Fig.IV.21- Marée à Langoiran du 12 au 17 août 2002.

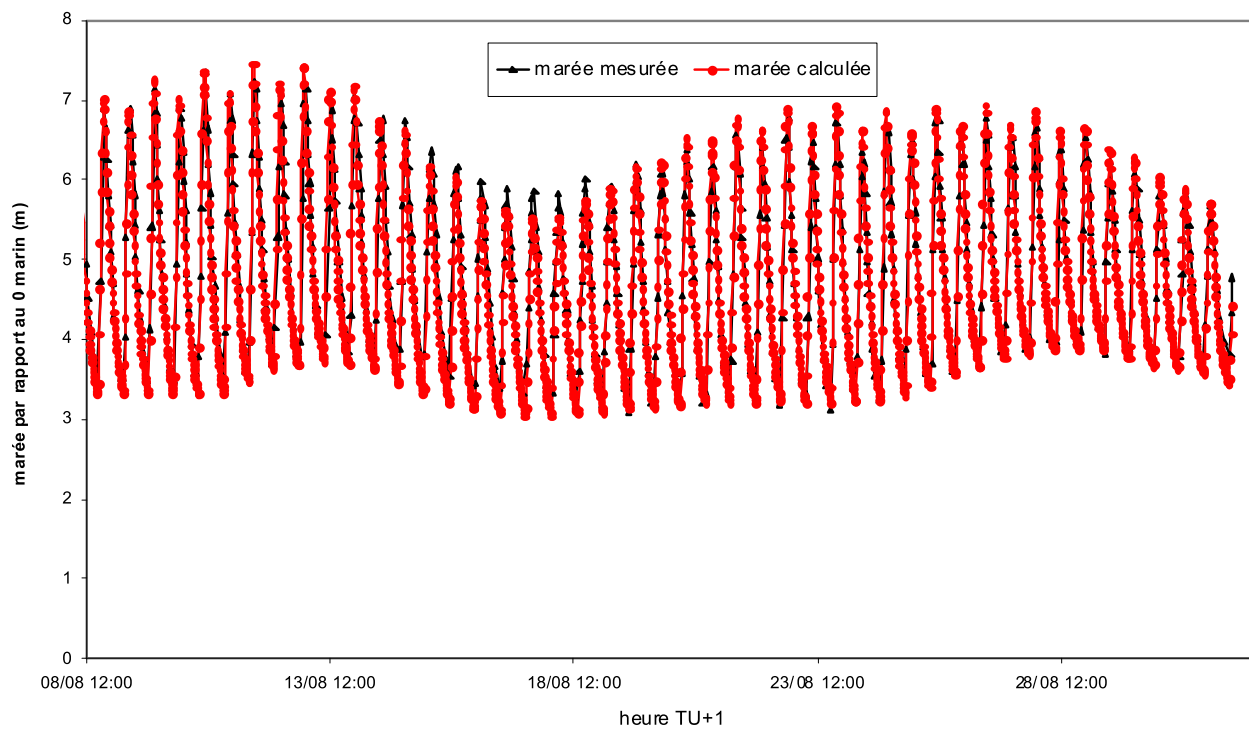


Fig.IV.22- Marée à Langon du 08 au 31 août 2002.

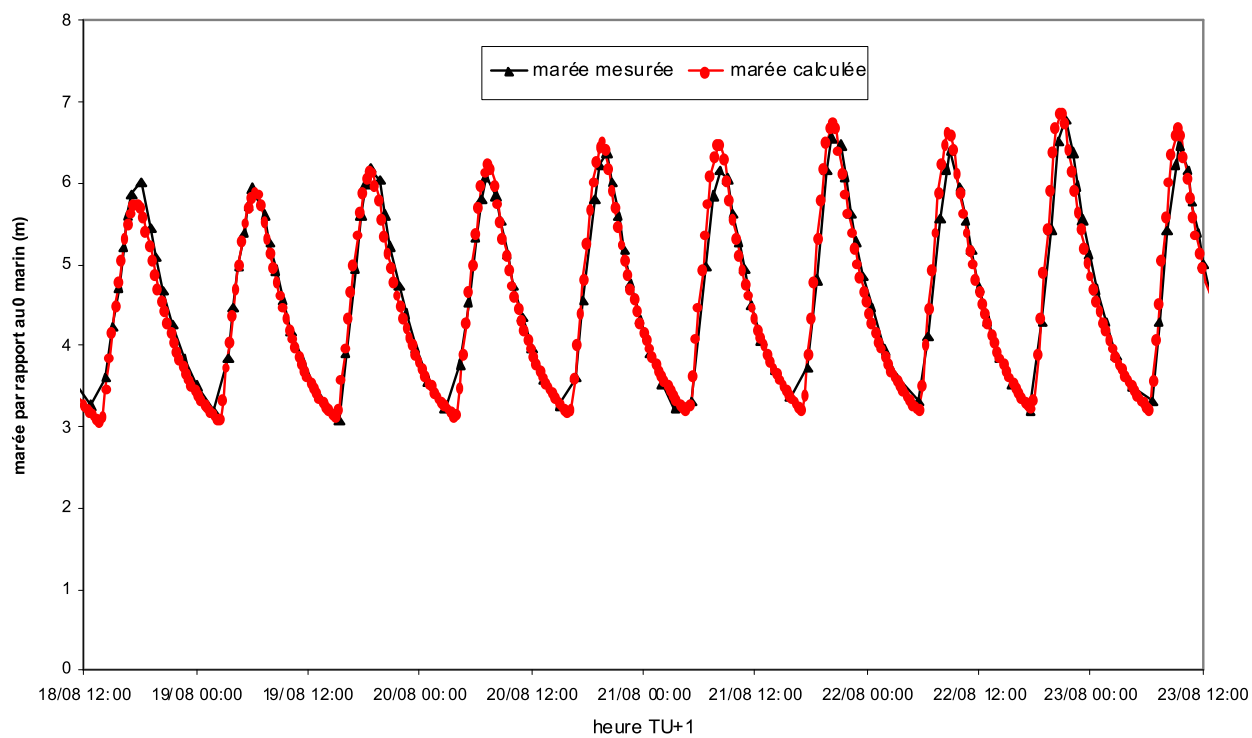


Fig.IV.23- Marée à Langon du 18 au 23 août 2002.

IV.2.2- Les courants de marée

IV.2.2.1- Station de Château-Montrose (PK48) : mesures du LNHE

IV.2.2.1.1.- Généralités

Nous avons utilisé les mesures fournies par le Laboratoire National d'Hydraulique (2006).

Nous disposons pour ces mesures de plus amples informations concernant l'appareillage et la localisation des mesures. Les trois stations de mesures placées dans les chenaux de navigation, médian et de rive droite, sont situées sur une section transversale de l'estuaire (fig.IV.24).

L'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire étant plus significatives dans le chenal de navigation, nous nous sommes intéressés uniquement aux mesures de la station 2 située au niveau de chateau-Montrose à 3 Km à l'aval de Pauillac. La campagne de mesure dure 22 jours, du 03/08/2006 au 24/08/2006.

La comparaison avec les résultats du modèle sera limitée au choix de deux périodes, l'une représentant des vives-eaux (du 10/08/2006 au 13/08/2006), l'autre des mortes-eaux (du 17/08/2006 au 20/08/2006).

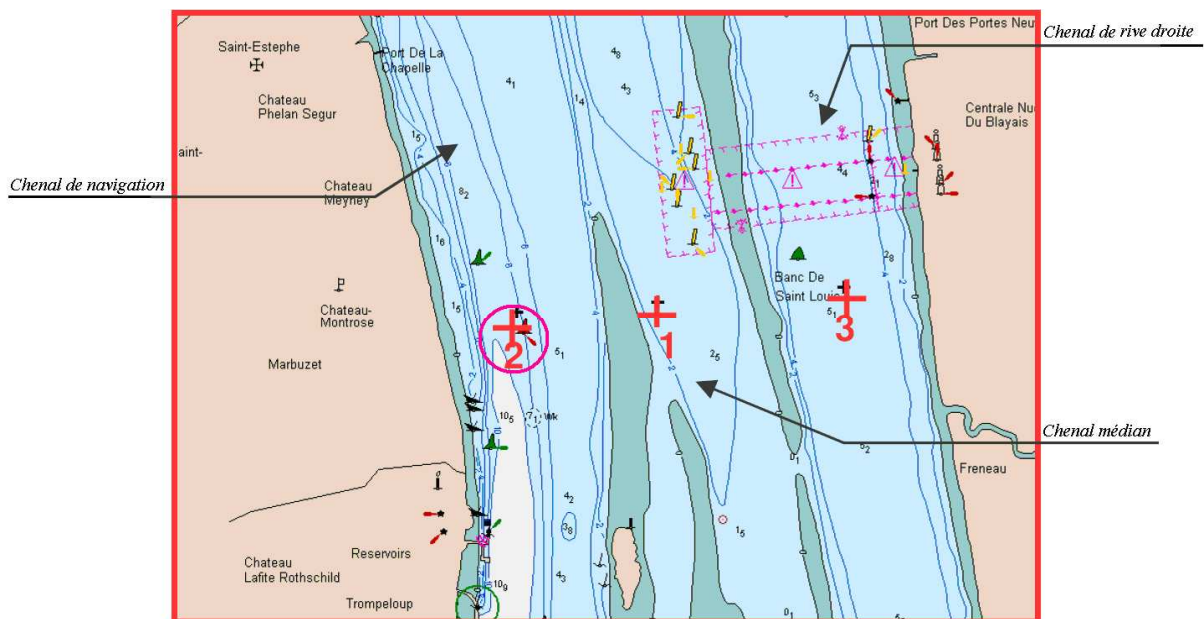


Fig.IV.24- Position des points de mesure.

IV.2.2.1.2- Description sommaire sur l'acquisition des données

L'appareil, un Aquadopp Profileur (de 1 Mhz pour la station 2 située dans le chenal de navigation, voir fig.IV.24), mesure l'intensité du courant ainsi que sa direction sur toute la colonne d'eau.

Dans le cas de cette campagne de mesure, l'appareil est fixé sur le fond.

Les mesures de courant sont effectuées dans plusieurs tranches (ou couches) uniformes représentant la colonne d'eau. Dans chaque tranche, la résultante du courant est déterminée (intensité et direction) à partir des différents points de mesure.

Il existe deux zones blanches dans lesquelles les mesures ne sont pas valides, l'une au niveau du capteur, l'émission et la réception étant assurées par le même transducteur, l'autre au niveau de la surface de l'eau à cause des échos.

Les maillages temporel et spatial, programmés dans l'appareil sont présentés dans le tableau suivant :

Station 2				
Capteur	Intervalle entre 2 mesures	Epaisseur des couches	Zone blanche	Nombre de couches
Aquadopp profileur 1 Mhz	600 s	1 m	0.4 m	15

La station 2 est localisée par les paramètres ci-dessous :

Station 2			
Situation	Latitude	Longitude	Immersion du capteur
Chenal de navigation au niveau du château-Montrose	45°14.672' N	000°43.489' E	8.4 m

La comparaison avec le calcul, portera uniquement sur la couche de surface, et la couche inférieure située à 1.6 m du fond.

IV.2.2.1.3- Conformité de la marée calculée avec celle mesurée

La marée a été mesurée pendant les deux périodes de vives-eaux et mortes-eaux. Nous n'aborderons comme cité précédemment que les mesures de la station 2 située dans le chenal de navigation à proximité de Château-Montrose.

Nous avons comparé les deux marées (calculée et mesurée) afin de vérifier la pertinence de la marée restituée par le modèle. En mortes-eaux (fig.IV.25), la marée est en phase, cependant à pleine mer, le niveau de la surface libre calculée est plus élevé que la mesure et précède celle-ci de 40 mn sur certains cycles de marée. On note également une raideur de courbe plus forte à l'approche de l'étale de flot. Le constat en mortes-eaux sur la raideur de la courbe et l'avance à pleine mer est aussi valable en vives-eaux, cependant la marée calculée à basse mer, en vives-eaux, est plus faible que celle mesurée (fig.IV.26). Cette comparaison souligne ce qui a été déjà mis en lumière lors de la calibration de la marée notamment à Trompeloup.

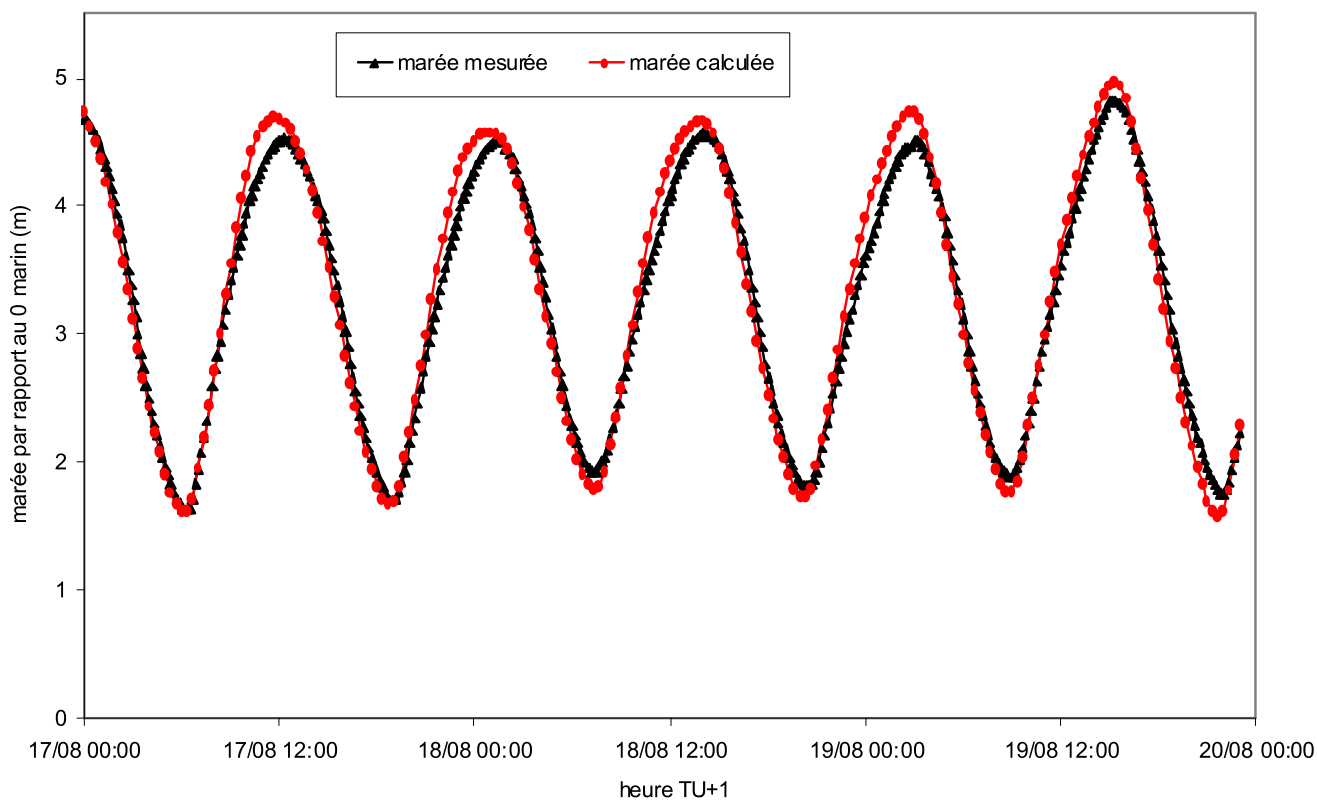


Fig.IV.25 - Marée de mortes-eaux à Château-Montrose du 17 au 20 août 2006.

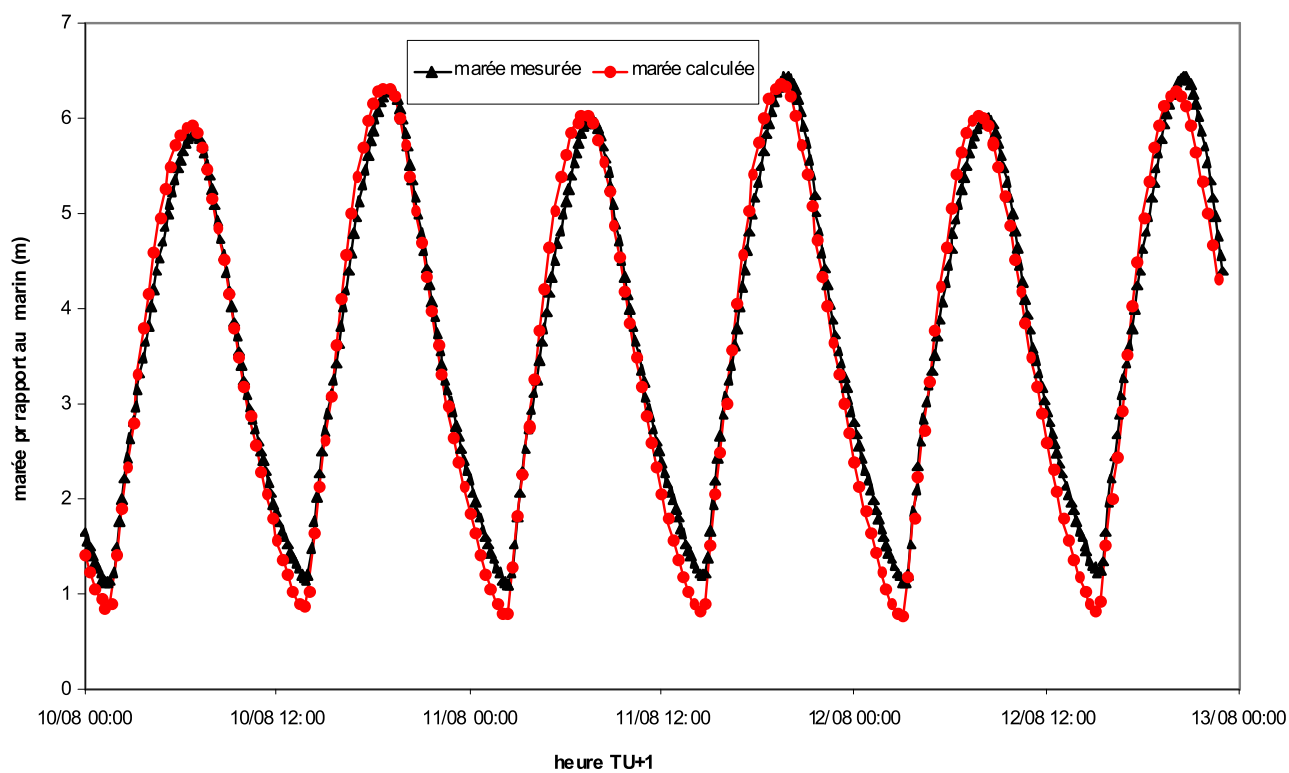


Fig.IV.26- Marée de vives-eaux à Château-Montrose du 10 au 13 août 2006.

IV.2.2.1.4- Comparaison entre les intensités des courants calculées et mesurées

Nous nous limiterons aux mesures de la station 2 près du fond et en surface.

Comme nous l'avons déjà précisé précédemment, la couche inférieure, d'épaisseur 1 m, est située à 1.6 m du fond. Dans le modèle, cette couche est délimitée par le fond, son épaisseur dépend donc du relevé bathymétrique au point de mesure.

En mortes-eaux : près du fond (fig.IV.27), un déphasage d'environ 20 minutes est relevé, alors qu'en surface (fig.IV.28), ce décalage varie de 20 à 40 minutes.

En vives-eaux : Près du fond (fig.IV.29), on note un retard d'environ 20 à 40 minutes au moment de l'étalement de flot. En surface (fig.IV.30), le déphasage est semblable à celui observé en mortes-eaux.

En mortes-eaux et vives-eaux : nous constatons une assez bonne correspondance en amplitude près du fond et en surface.

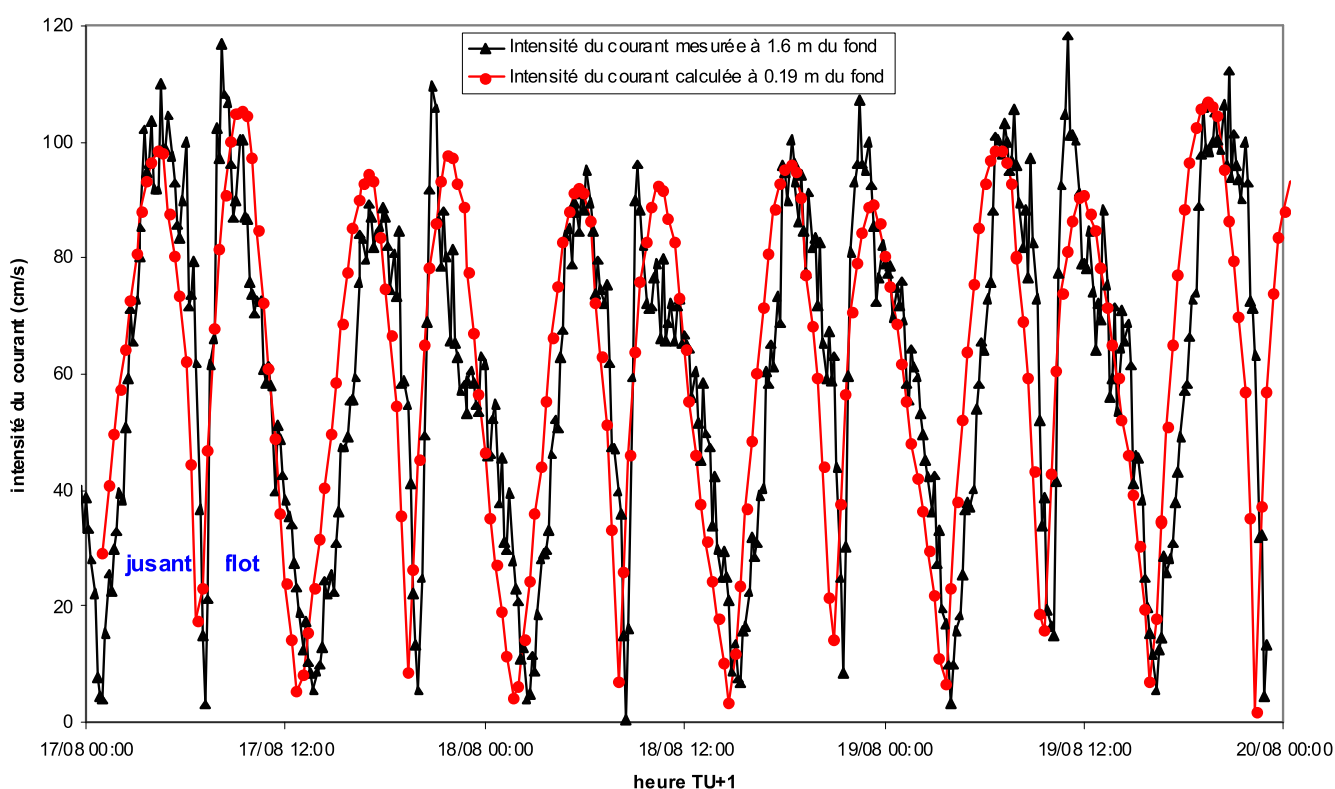


Fig.IV.27- Intensité du courant près du fond à Château-Montrose du 17 au 20 août 2006 (mortes-eaux).

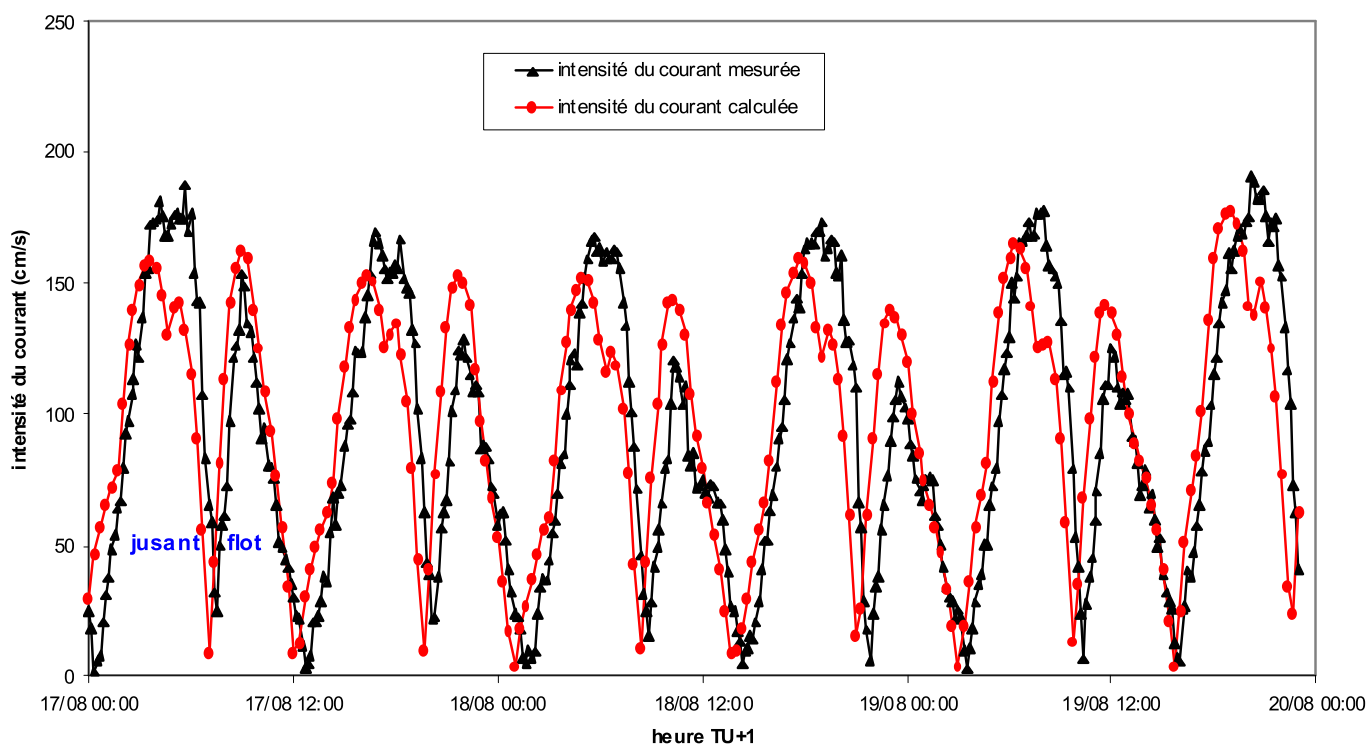


Fig.IV.28- Intensité du courant en surface à Château-Montrose du 17 au 20 août 2006 (mortes-eaux).

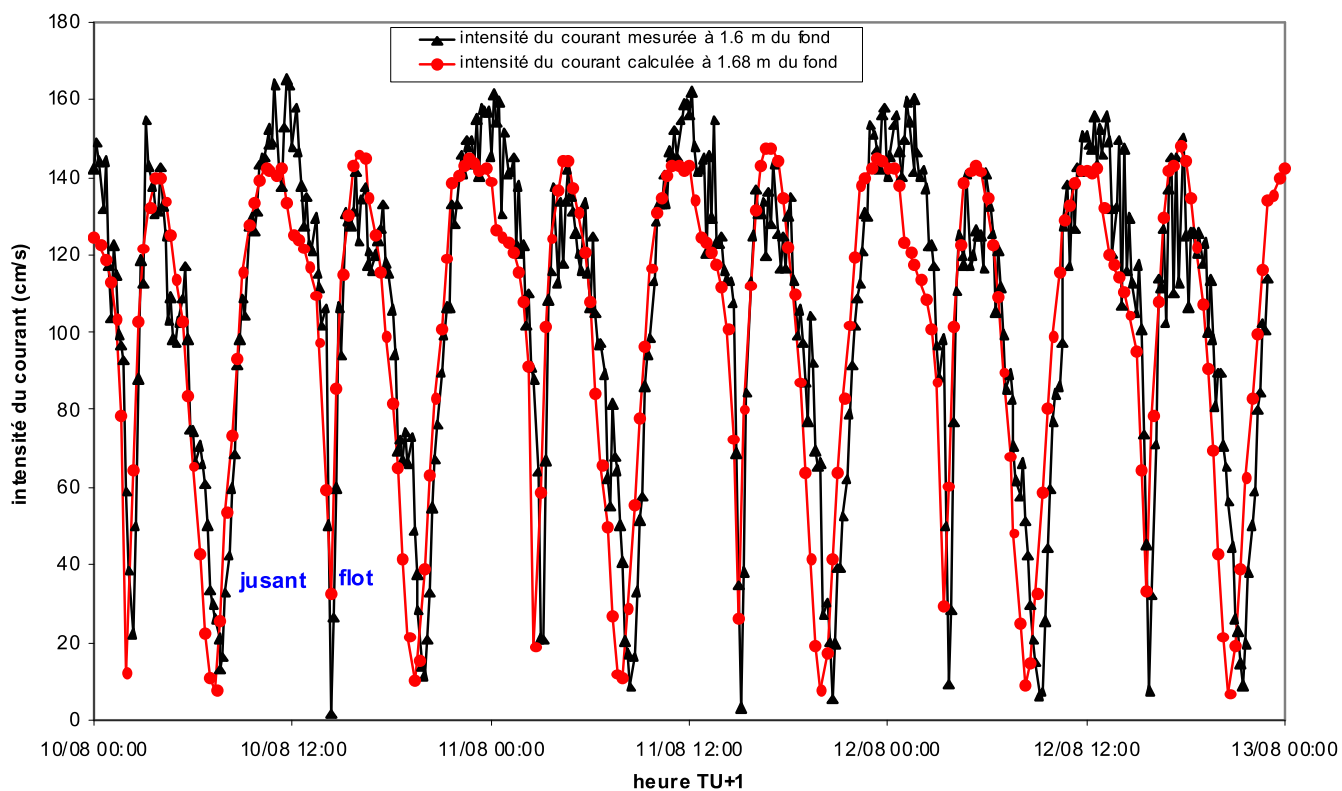


Fig.IV.29- Intensité du courant près du fond à Château-Montrose du 10 au 13 août 2006 (vives-eaux).

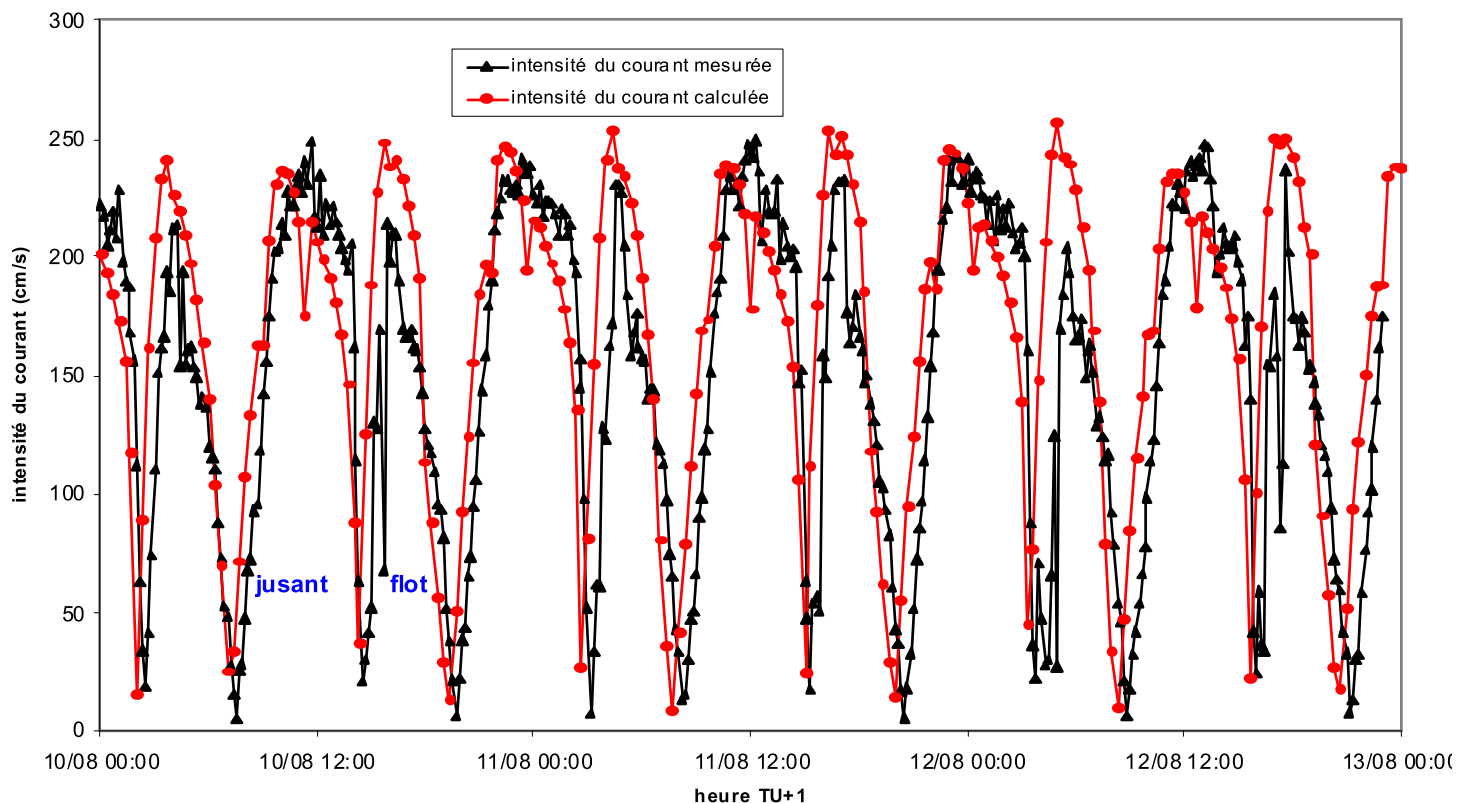


Fig.IV.30- Intensité du courant en surface à Château-Montrose du 10 au 13 août 2006 (vives-eaux).

IV.2.2.2- Stations de Lormont (PK6) et Cérons (PK-34) : mesures du laboratoire EPOC

IV.2.2.2.1- Généralités

Les mesures du laboratoire EPOC ont été effectuées à Lormont et Cérons dans la Garonne (fig.IV.31) en période de faibles débits fluviaux. Les courantomètres de type enregistreurs Aaderaa sont situés à 2 m du fond.

La période des mesures s'étend du 14 septembre au 18 octobre 1988. On se limitera aux comparaisons des intensités du courant les plus fortes et les plus faibles qu'on notera comme étant des périodes de vives et de mortes-eaux respectivement. Les tracés sont signés comme précédemment, afin de distinguer le flot du jasant.

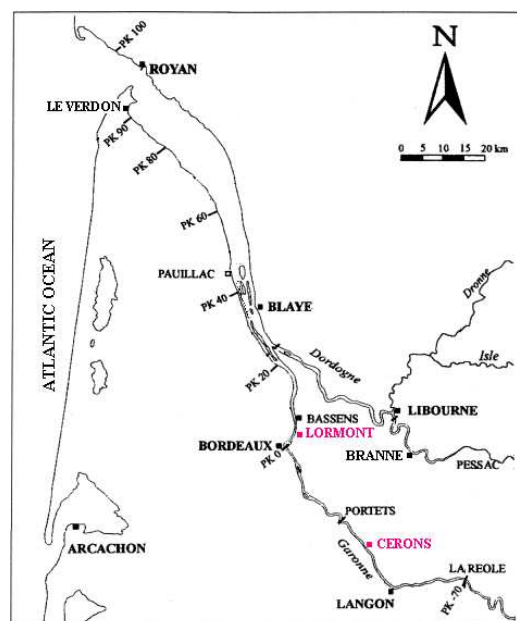


Fig.IV.31- position des stations de mesure.

IV.2.2.2.2- Comparaison entre les intensités des courants calculées et mesurées

A Lormont, en mortes-eaux : En raison de la localisation du point de mesure sur le bord de la Garonne, le courant mesuré en jusan ne reflète pas le courant moyen à cet endroit de la Garonne (fig.IV.32) (voir explication, chapitre I paragraphe I.3.3). Par conséquent, la comparaison du courant mesuré en jusan avec le calcul n'est pas appropriée.

En flot, le courant mesuré est relativement régulier et atteint des valeurs assez élevées. Ainsi, nous considérons cette mesure représentative du courant in-situ pendant le flot. La comparaison, pendant cette période, montre que le courant calculé est en avance d'environ 20 mn par rapport aux mesures, à l'étale de flot et sur certains cycles de marée (fig.IV.32). L'amplitude du courant calculé est assez semblable à celle du courant mesuré.

A Lormont, en vives-eaux : même commentaire qu'en mortes-eaux concernant le courant mesuré en jusan.

A l'étale de flot, l'avance du courant calculée atteint au plus 40 mn (premier et deux derniers cycles) (fig.IV.33). On note également une assez bonne correspondance de l'amplitude en flot.

A Cérons, en mortes-eaux : Le courant calculé est en avance de 50 mn au plus (avant dernier cycle) à l'étale de flot (fig.IV.34). L'amplitude est correcte en jusan mais l'évolution du plateau de chaque courbe est très différente. En flot, l'amplitude calculée ($\approx 60 \text{ cm s}^{-1}$) est deux fois plus élevée que la mesure ($\approx 30 \text{ cm s}^{-1}$).

A Cérons, en vives-eaux : on note un déphasage d'environ 40 mn entre les deux courbes (fig.IV.35). Au jusan, l'amplitude est correcte et l'évolution des deux plateaux est similaire. En flot, l'amplitude calculée ($> 100 \text{ cm s}^{-1}$) est beaucoup plus élevée que la mesure ($\approx 70 \text{ cm s}^{-1}$).

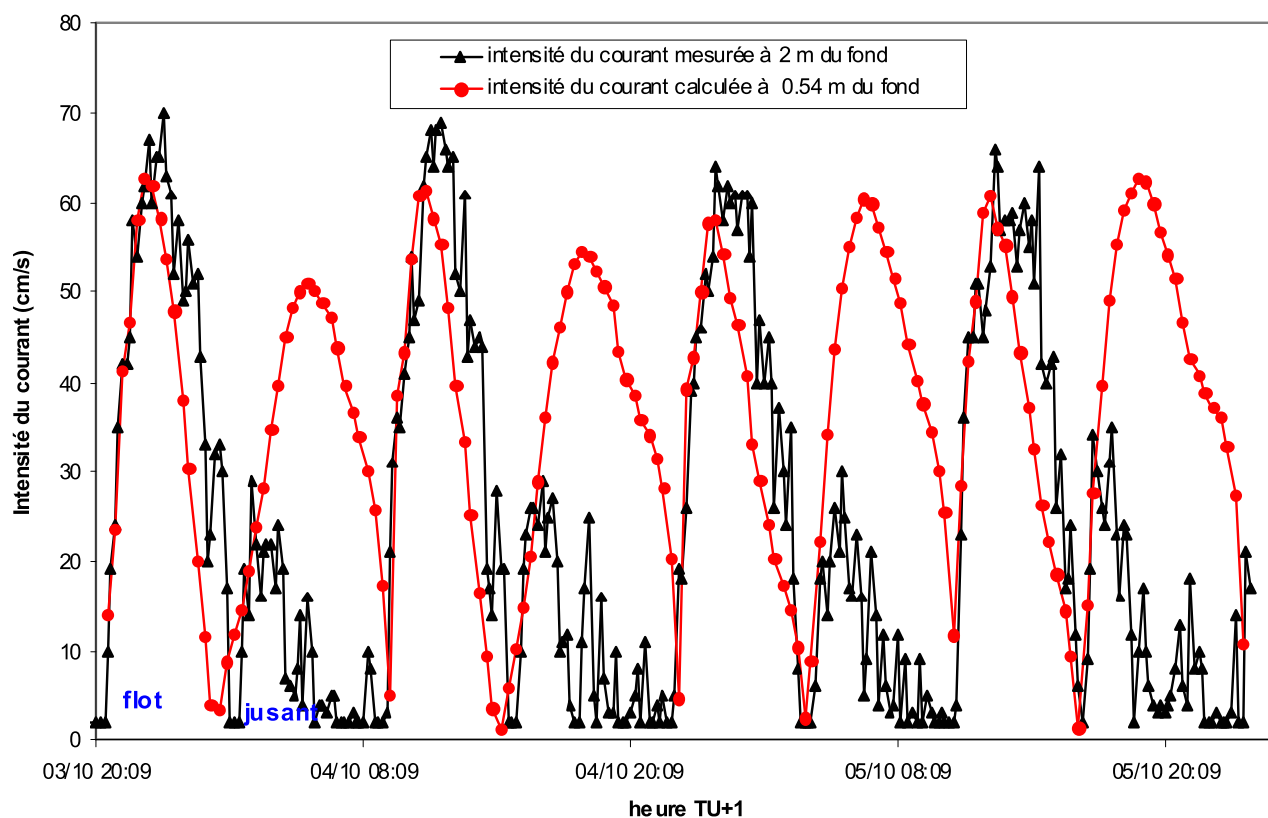


Fig.IV.32- Intensité du courant près du fond à Lormont du 03 au 05 octobre 1988 (mortes-eaux).

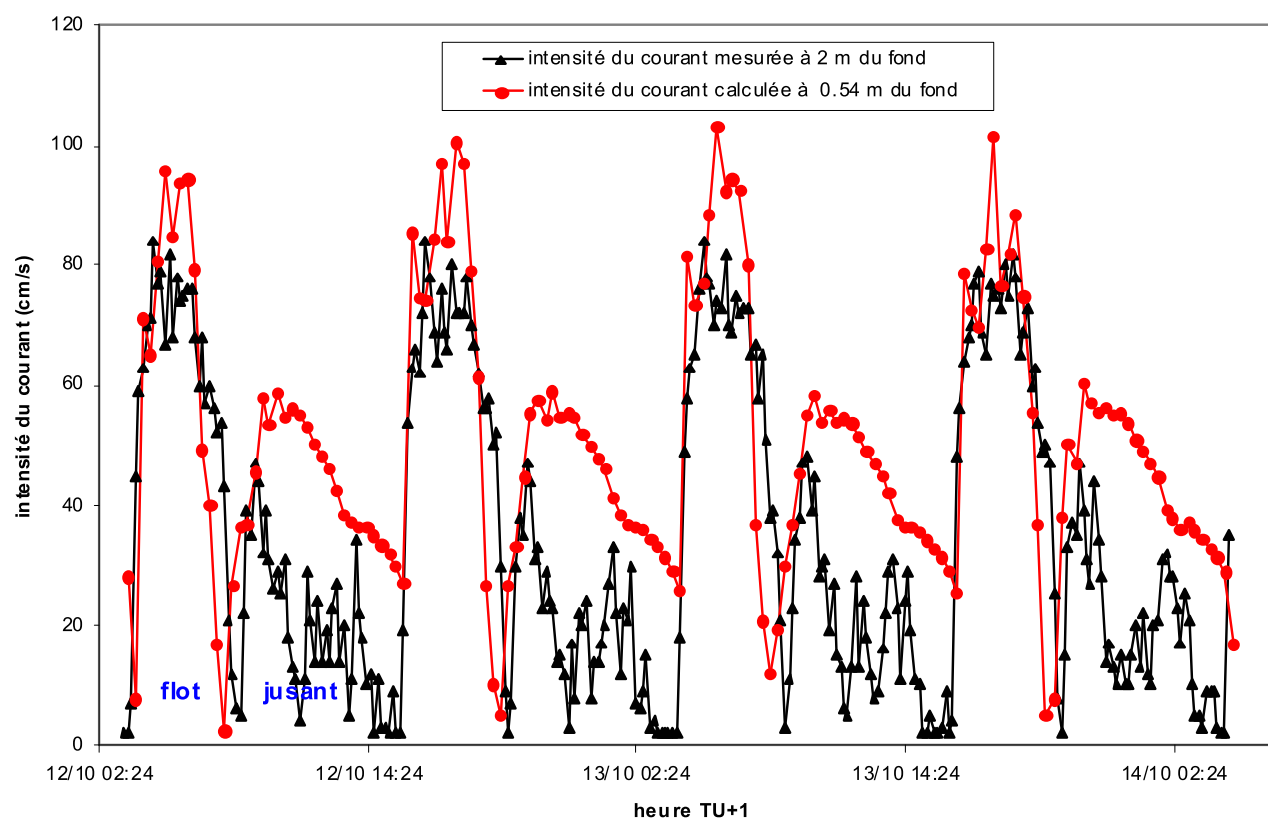


Fig.IV.33- Intensité du courant près du fond à Lormont du 12 au 14 octobre 1988 (vives-eaux).

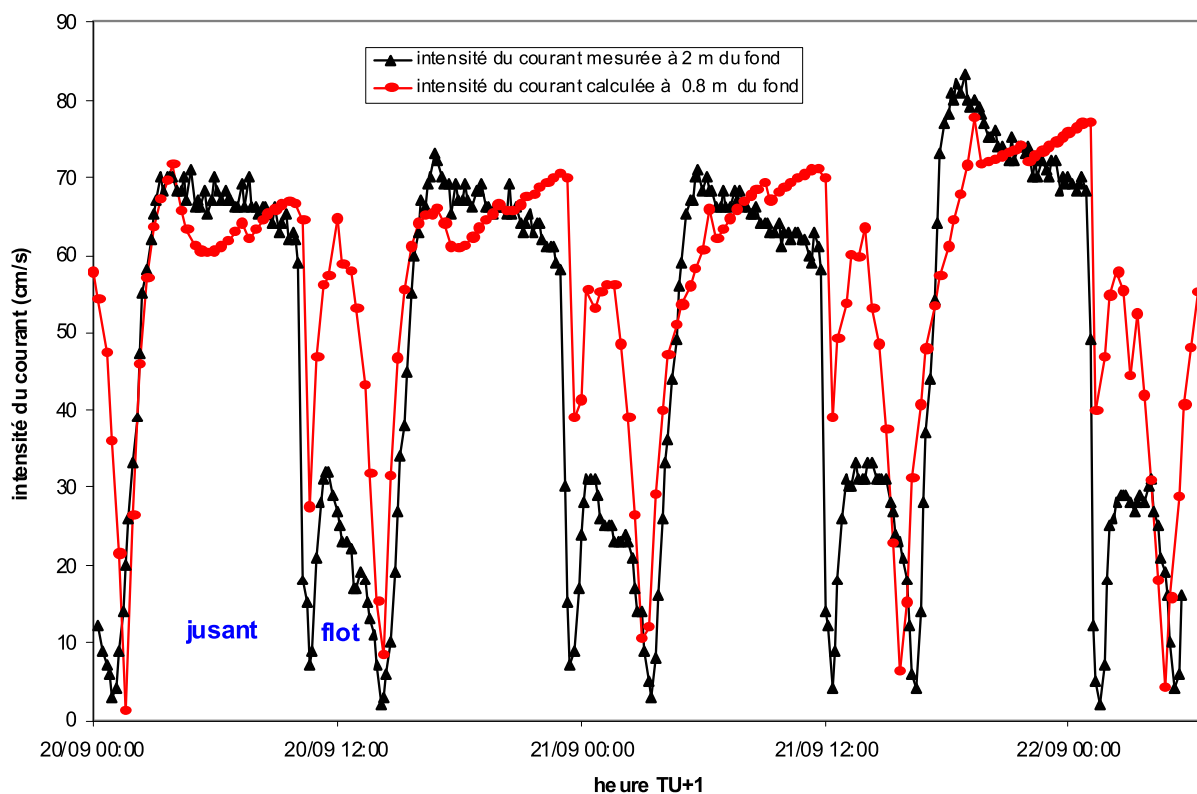


Fig.IV.34- Intensité du courant près du fond à Cérons du 20 au 22 septembre 1988 (mortes-eaux).

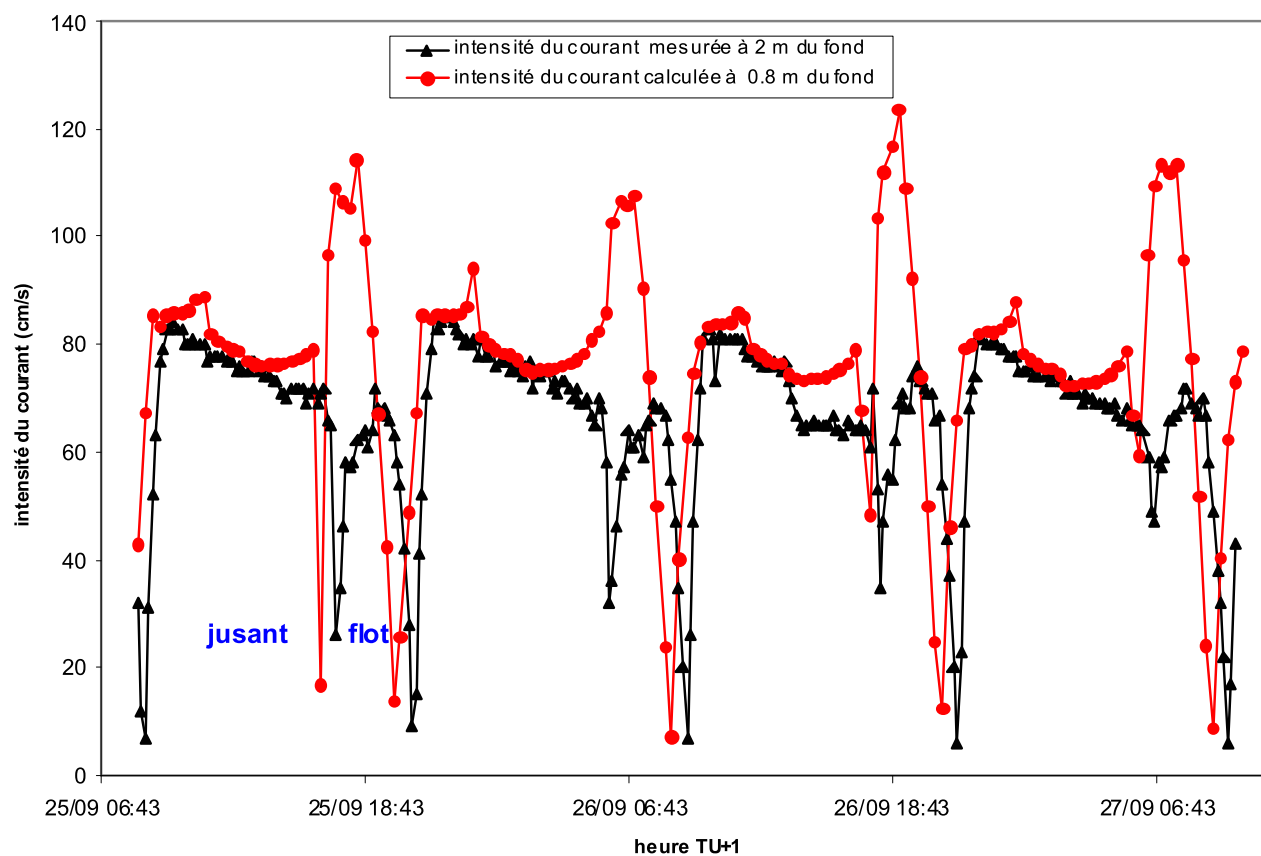


Fig.IV.35- Intensité du courant près du fond à Cérons du 25 au 27 septembre 1988 (vives-eaux).

IV.3- La salinité dans le système estuarien de la Gironde

IV.3.1- Les stations de mesure (stations MAREL)

Quatre stations autonomes de mesures en continu ont été installées en 2004, à Pauillac, Bordeaux, Portets et Libourne.

Cette implantation, portée par les pouvoirs publics, s'inscrit dans un programme de surveillance du système estuarien, dont l'objectif est d'évaluer la qualité de l'eau dans l'estuaire de la Gironde. Cette évaluation, s'appuie sur la mesure de paramètres physico-chimiques, permettant d'acquérir une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques liés au bouchon vaseux.

Les données recueillies sont : la marée, la concentration des matières en suspension (turbidité), l'oxygène dissous, la salinité et la température.

Ces mesures, situées entre 1 et 2 mètres de la surface libre, sont effectuées à haute fréquence (10 mn) et transmises automatiquement, par téléphonie, à une station de gestion installée dans les locaux du laboratoire EPOC. L'accès aux données est libre, elles sont utilisées principalement par les chercheurs du laboratoire EPOC chargés de les exploiter et de les valoriser.

IV.3.2- Comparaison entre les salinités calculées et mesurées

IV.3.2.1- Généralités

La période de comparaison s'étend du 1^{er} juin au 15 septembre 2005 à Pauillac et du 7 juin au 15 septembre 2005 à Bordeaux. Des interruptions de mesures émaillent le tracé à Pauillac tout au long de la période de comparaison (fig.IV.37). D'autres mesures effectuées par le laboratoire EPOC (mesures du Blayais) le 1^{er} juillet 2005, sont disponibles au fond et en surface. Les mesures des stations MAREL (Bordeaux et Pauillac) sont effectuées près de la surface, par conséquent, les comparaisons se limiteront à ce niveau de la colonne d'eau. Nous n'avons pas abordé les comparaisons à Libourne et Portets, la précision du modèle n'étant pas assez fine pour reproduire des salinités aussi faibles que celles enregistrées par ces stations de mesure. Lors de la comparaison ci-dessous, les valeurs évoquées à pleine et basse mers correspondent aux valeurs limites supérieures et inférieures respectivement, délimitant les courbes concernées. La figure IV.36 représente les stations de mesure sur lesquelles nous effectuerons les comparaisons avec le calcul.

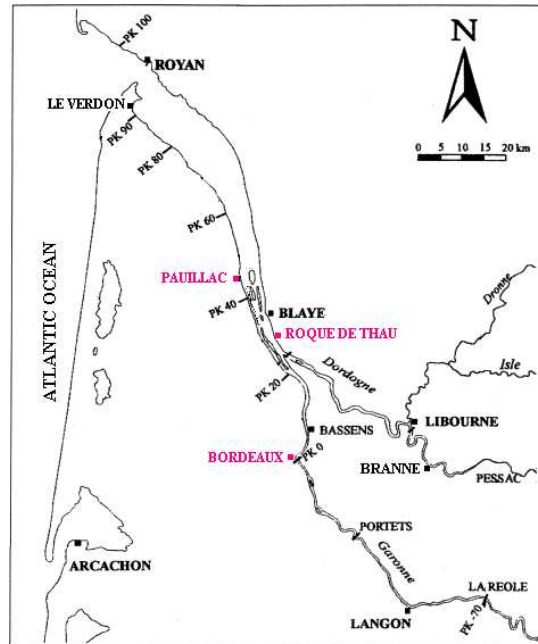


Fig.IV.36- position des stations de mesure.

IV.3.2.2- Salinité à Pauillac (PK45)

La salinité calculée correspond assez bien à celle mesurée à pleine mer (fig.IV.37), on note sur le dernier mois de simulation, environ 3 PSU de différence à basse mer. La phase est correcte à basse mer, cependant on note l'avance de la salinité calculée de l'ordre de 40 mn à pleine mer sur certains cycles (fig.IV.38).

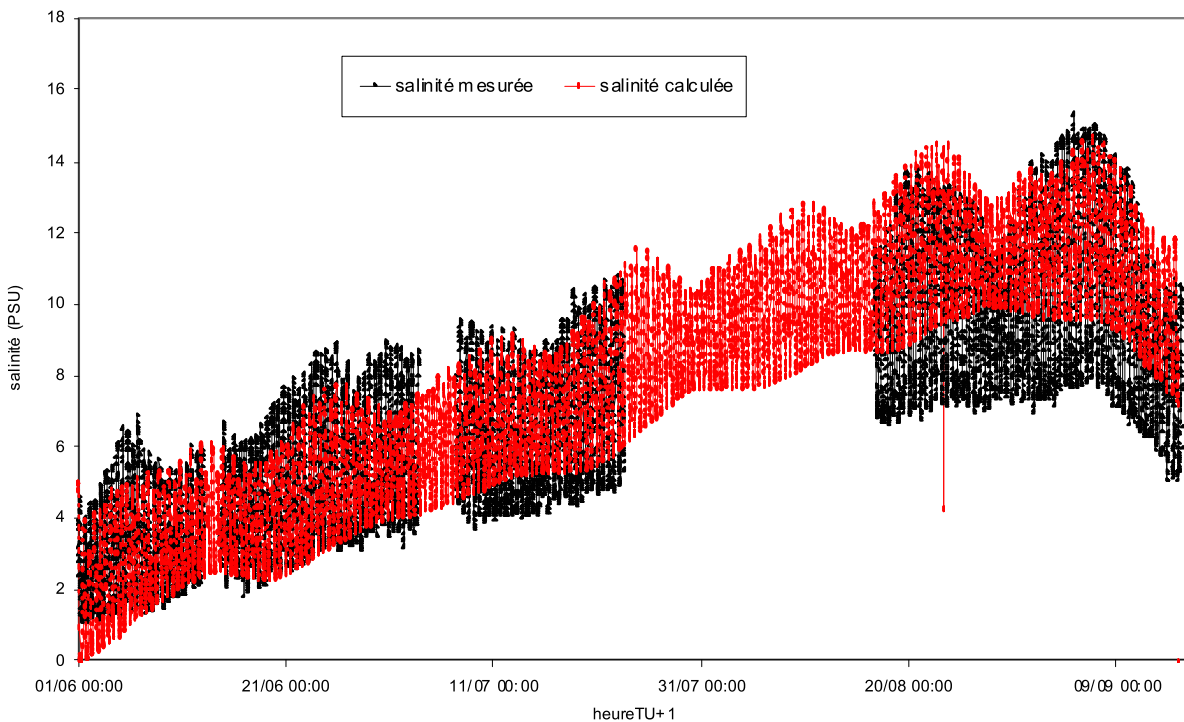


Fig.IV.37- Salinité en surface à Pauillac du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

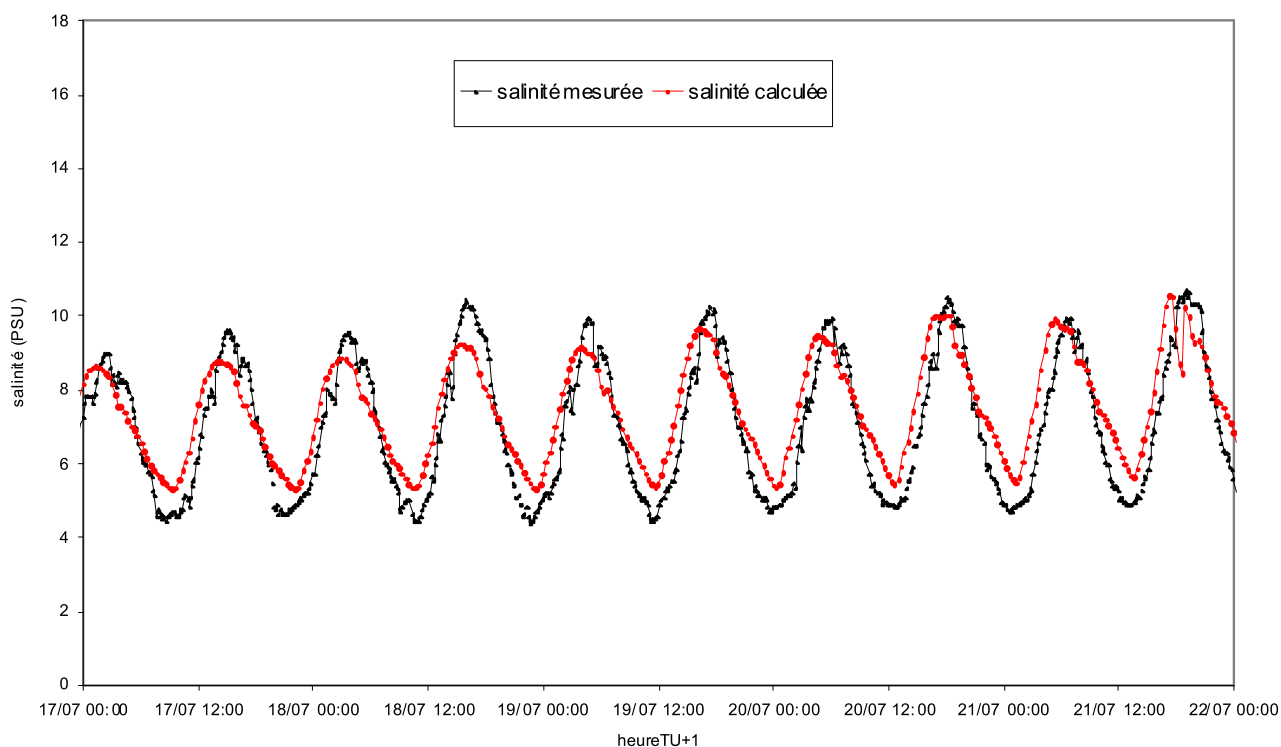


Fig.IV.38- Salinité en surface à Pauillac du 17 au 22 juillet 2005.

IV.3.2.3- Salinité à Bordeaux (PK0)

Les valeurs calculées sont faibles par rapport à celles mesurées (fig.IV.39), l'écart à pleine mer peut atteindre 1.5 PSU en fin de simulation. Les deux courbes de salinité sont en phase (fig.IV.40).

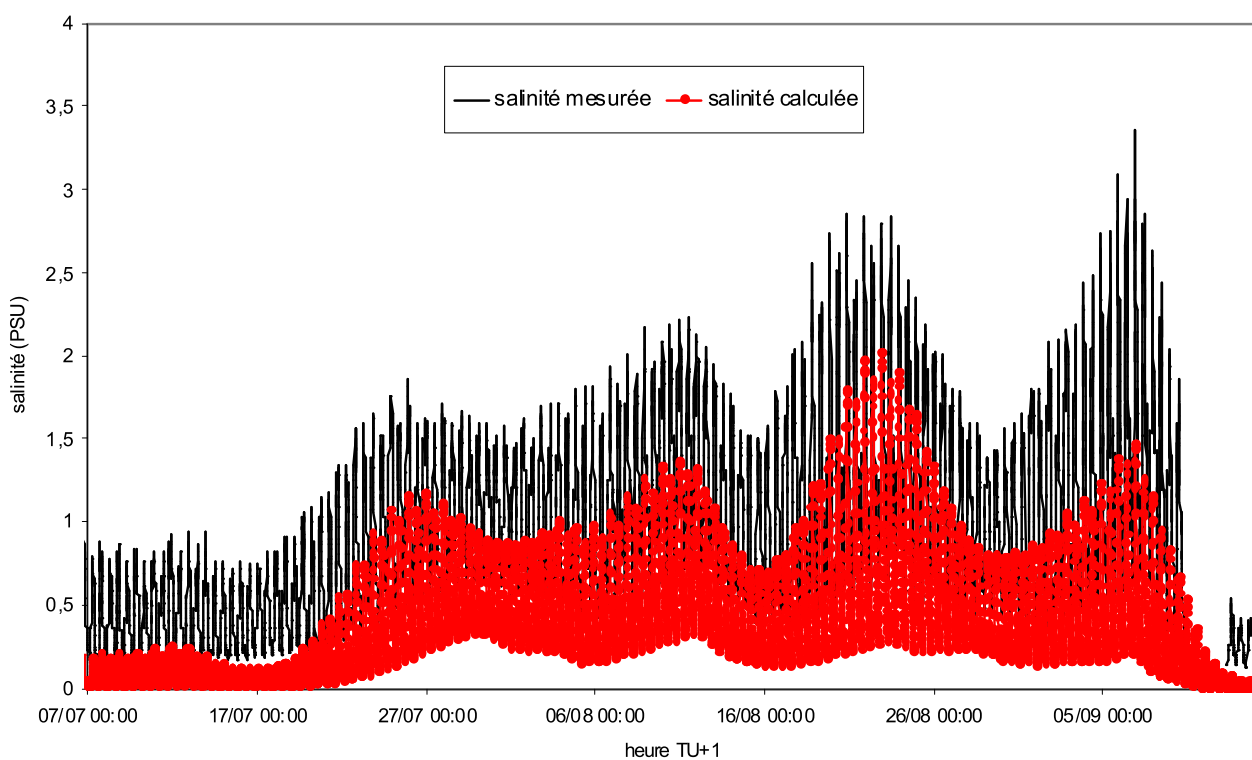


Fig.IV.39- Salinité en surface à Bordeaux du 7 juillet au 15 septembre 2005.

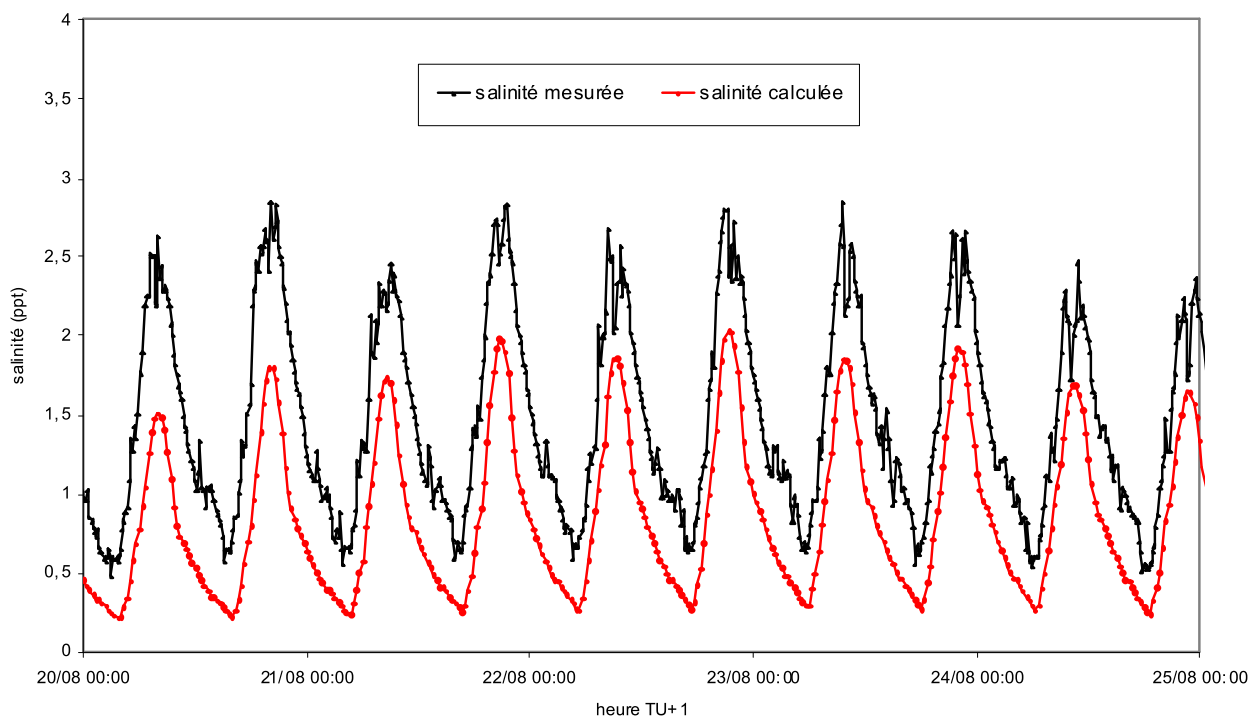


Fig.IV.40- Salinité en surface à Bordeaux du 20 au 25 août 2005.

IV.3.2.4- Salinité à Roque de Thau (PK31)

Ces mesures ont été effectuées par le laboratoire EPOC (mesures du Blayais). Les valeurs calculées correspondent assez bien en amplitude et en phase aux valeurs mesurées, aussi bien en surface qu'au fond (fig.IV.41 et IV.42). On note également que les valeurs en surface mesurées et calculées sont proches de celles du fond.

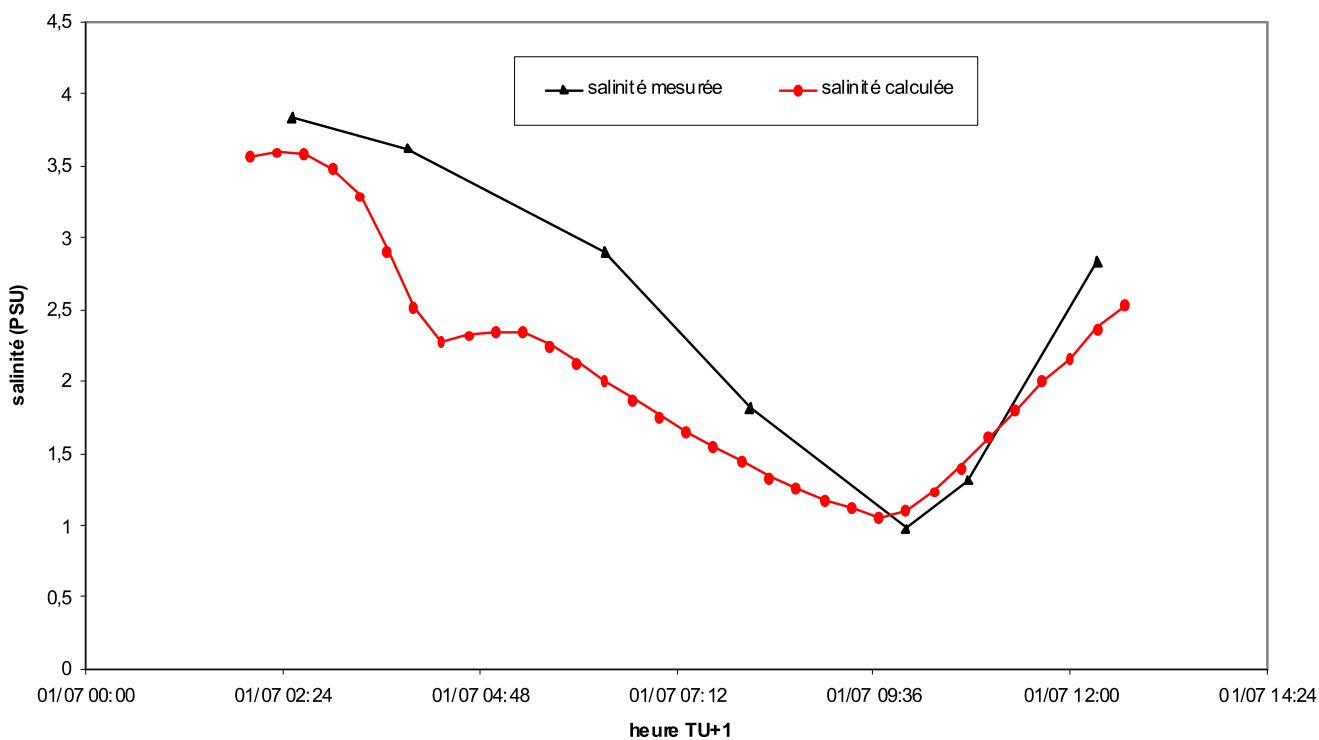


Fig.IV.41- Salinité en surface à Roque de Thau le 1^{er} juillet 2005.

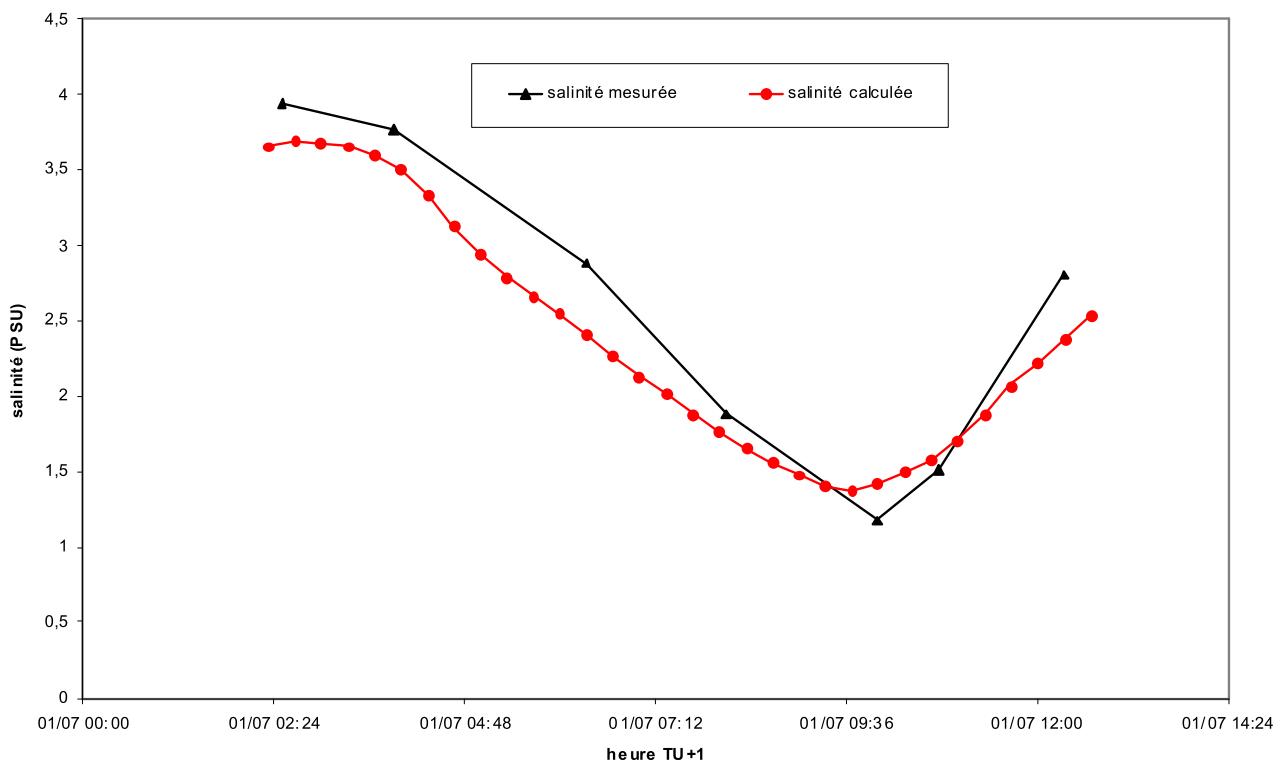


Fig.IV.42- Salinité près du fond à Roque de Thau le 1^{er} juillet 2005.

IV.4- Conclusion

La marée : Après avoir implanté une nouvelle bathymétrie des fleuves (année 2002) dans le modèle SIAM-3D, nous avons calibré celui-ci grâce à l'ajustement paramétrique de la rugosité au fond. Ce paramètre prend en compte la granulométrie des sédiments au fond. Ainsi, les valeurs de rugosité choisies correspondent en terme d'évolution à la nature des sédiments tapissant le fond fluvial tel que cela existe sur le terrain, à savoir des silts et des argiles en aval de Langoiran jusqu'au Bec d'Ambès, des graviers et du sable en amont de Langoiran. Cette discontinuité granulométrique est sans doute liée à la limite dynamique du bouchon vaseux à Langoiran, dont le dépôt, impose une différence de granulométrie de part et d'autre de cette station. En suivant l'évolution de la marée le long de la Garonne, on remarque que l'amortissement de la marée mesurée entre Bordeaux (fig.IV.18) et Langoiran (fig.IV.20) est faible par rapport à celui enregistré entre Langoiran (fig.IV.20) et Langon (fig.IV.22), bien que Langoiran se trouve approximativement à mi-distance entre Bordeaux et Langon. Nous expliquons cette différence par l'évolution granulométrique (et donc de rugosité) telle que nous l'avons expliqué précédemment mais aussi, et surtout par le rehaussement progressif et rapide du fond en amont de Langoiran (fig.IV.1).

L'absence de mesures destinées à évaluer la rugosité mise à part, il est difficile dans l'état actuel des connaissances de trancher sur la validité des valeurs choisies tant la détermination empirique de cette

grandeur est elle-même sujette à deux hypothèses peu vérifiables sur le terrain (You, 2006). La première suppose la régularité temporelle du profil logarithmique des vitesses du courant. A titre d'exemple Collins *et al.* (1981) ont constaté que les vitesses moyennes mesurées dans l'estuaire du Wash au Royaume-Uni, ne suivaient pas une distribution logarithmique pendant 44% du flot. La seconde hypothèse consiste à imposer un fond fixe, autrement dit une rugosité constante dans le temps, supposition forte face à la nature variable du fond dans le système estuarien de la Gironde. En tout état de cause, les résultats marégraphiques obtenus après cet ajustement paramétrique sont satisfaisants. Par conséquent, nous avons validé, grâce à des comparaisons entre les mesures et le calcul, la capacité du modèle à reproduire correctement en amplitude et en phase la marée dans l'estuaire de la Gironde et dans les fleuves (en tout cas jusqu'à la limite Langon en Garonne et Branne en Dordogne).

Les courants : Les comparaisons se sont étendues aux courants de marée, cette grandeur étant très fluctuante, il est difficile d'avoir une aussi bonne correspondance que celle obtenue pour la marée.

Nous avons observé lors des comparaisons, l'avance des courants calculés par rapport à ceux mesurés. Pour expliquer ce phénomène, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Wang *et al.* (2005) qui ont constatés un décalage entre les courants calculés avec stratifications de concentration des sédiments en suspension (et donc avec réduction de la viscosité turbulence), et ceux calculés sans stratifications. Nous supposons donc que le décalage observé entre le calcul et les mesures du courant pourrait provenir d'une disparité entre les stratifications de concentration simulées par le modèle et celles présentes in-situ.

Néanmoins, l'évaluation du décalage et de l'amplitude nous a permis de cerner la précision du modèle. Prenant en compte ces limitations, nous avons validé, la capacité du modèle à simuler des courants de marée de même ordre de grandeur que ceux mesurés sur le terrain.

La salinité : La salinité calculée est mieux représentée dans l'estuaire que dans la Garonne. La faiblesse de la salinité calculée en Garonne peut s'expliquer par « baroclinicité » de l'eau (à travers les gradients horizontaux de salinité) différente de celle effective sur le terrain reflétant ainsi des courants de densité éloignés de la réalité. Ceux-ci influenceraient par la suite le taux de salinité de l'eau. Le poids de cet impact reste cependant à prouver.

Chapitre V

Impact du paramétrage hydro-sédimentaire dans SIAM-3D sur la simulation de la dynamique sédimentaire

V.1 - Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact des processus hydro-sédimentaires sur la dynamique du bouchon vaseux en modifiant le paramétrage dans le modèle SIAM-3D. Nous utiliserons un paramétrage hydro-sédimentaire d'origine pour les comparaisons, et nous efforcerons, par la suite, d'analyser les résultats afin d'apporter une meilleure compréhension du rôle de ces processus sur le comportement sédimentaire à grande échelle.

La période des simulations s'étend du 1^{er} juin au 15 septembre 2005. Nous donnons ci-dessous les débits mesurés pendant cette période (La Réole, en Garonne, et Pessac, en Dordogne), lus comme données d'entrée lors des simulations (fig.V.1).

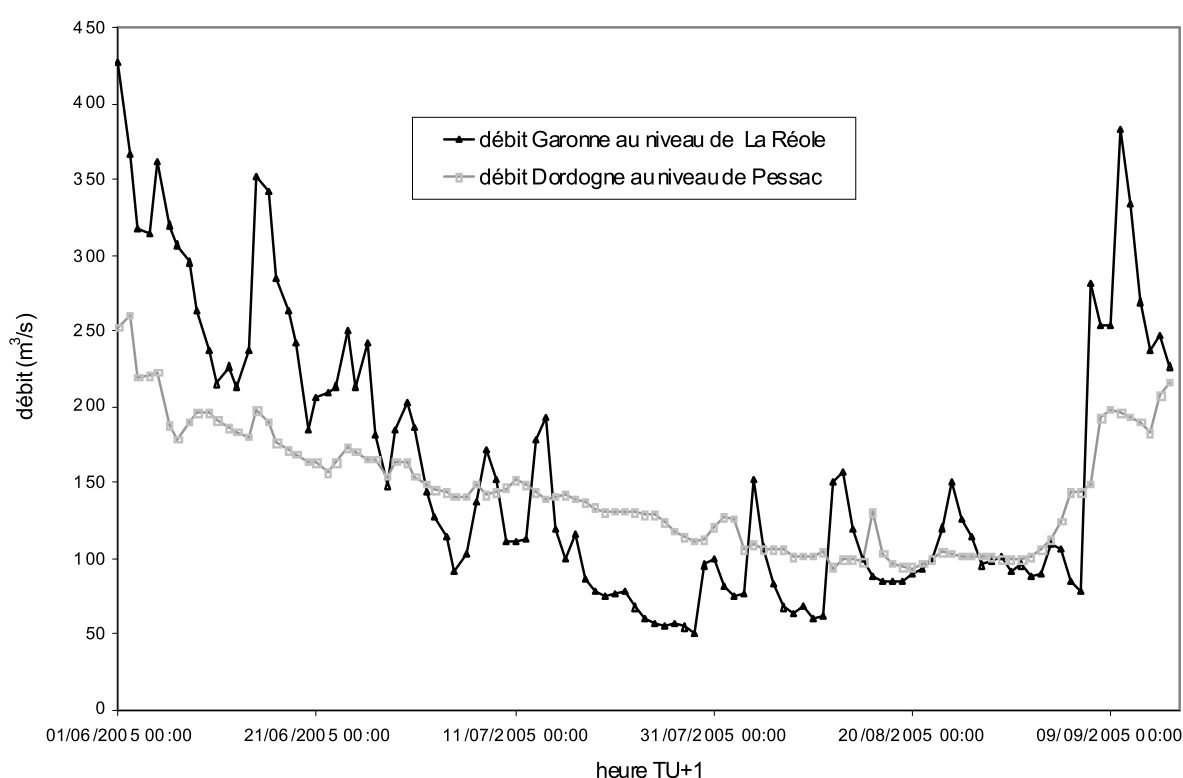


Fig.V.1- Débits mesurés en Garonne et en Dordogne du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

V.2 - Paramétrage sédimentaire d'origine

Au début de ce travail, les valeurs du paramétrage sédimentaire étaient déjà choisies et implantées dans le code numérique (voir annexe I), nous avons utilisé ces valeurs d'origine comme référence pour les simulations que nous comparerons à celles obtenues après modifications de certains paramètres (voir annexe II). Nous donnons ci-dessous le paramétrage d'origine soumis aux modifications :

Le paramétrage utilisé dans la formulation de la contrainte critique d'érosion : $k_{ce} = 0.0015 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$,

La constante d'érosion : $E = 0.002 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,

Le paramétrage utilisé dans la formulation de la vitesse de chute :

$$W_{min1}=0.0005\text{ m s}^{-1}, W_{max1}=0.002\text{ m s}^{-1}, W_{min2}=0.0001\text{ m s}^{-1}, W_{max2}=0.001\text{ m s}^{-1}.$$

Comme nous l'avons abordé au chapitre III, la masse sédimentaire des particules de deuxième classe est négligeable face à la première, par conséquent, nous nous consacrerons uniquement à l'étude de cette dernière.

V.3- Simulation de la dynamique du bouchon vaseux avec le paramétrage d'origine

V.3.1 – Concentration des matières en suspension à Pauillac et Bordeaux

Nous avons choisi de comparer les concentrations calculées (même période et même simulation que la salinité) et mesurées (stations MAREL) en surface du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

Avec des valeurs maximales de l'ordre de 0.4 g l⁻¹ à Bordeaux (fig.V.2) et 0.5 g l⁻¹ à Pauillac (fig.V.3), la concentration des matières en suspension calculée est très faible par rapport à celle mesurée atteignant jusqu'à 10 g l⁻¹ à Bordeaux et avoisinant en moyenne 2 g l⁻¹ à Pauillac. On note une variabilité similaire entre le calcul et les mesures à Pauillac, mais avec une certaine nuance concernant Bordeaux.

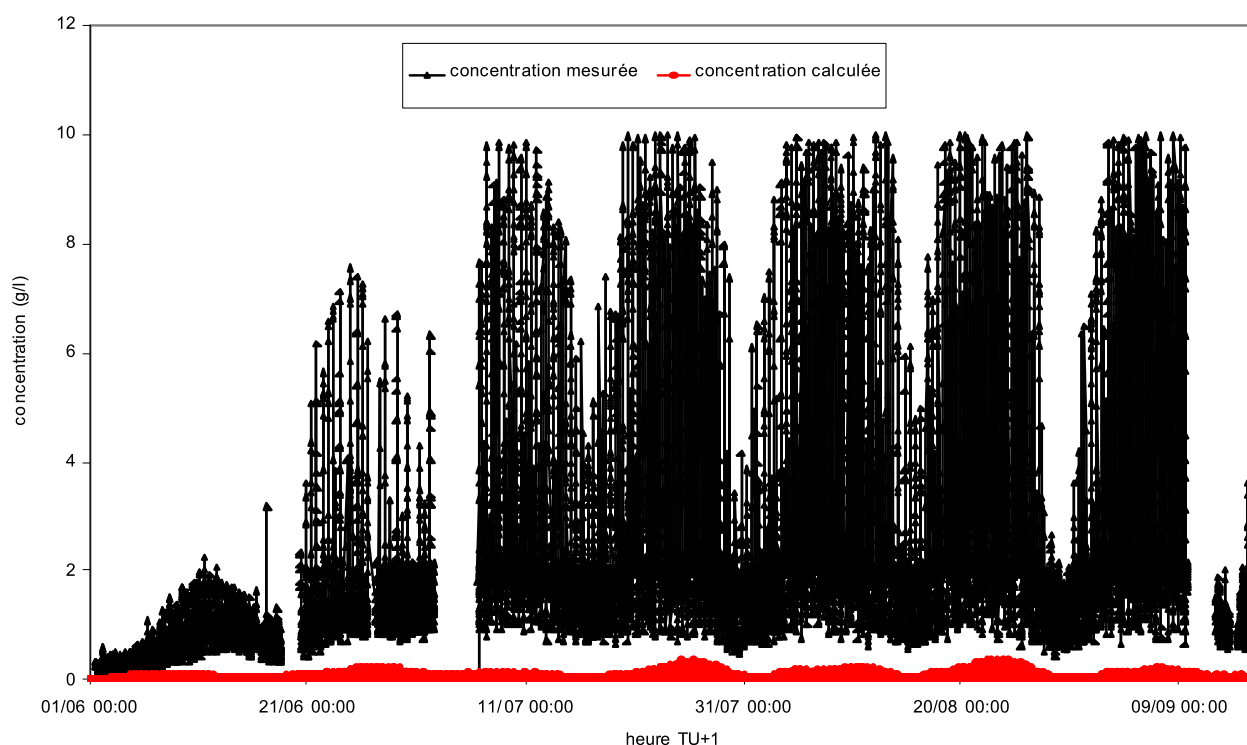


Fig.V.2- Concentration des matières en suspension en surface à Bordeaux du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

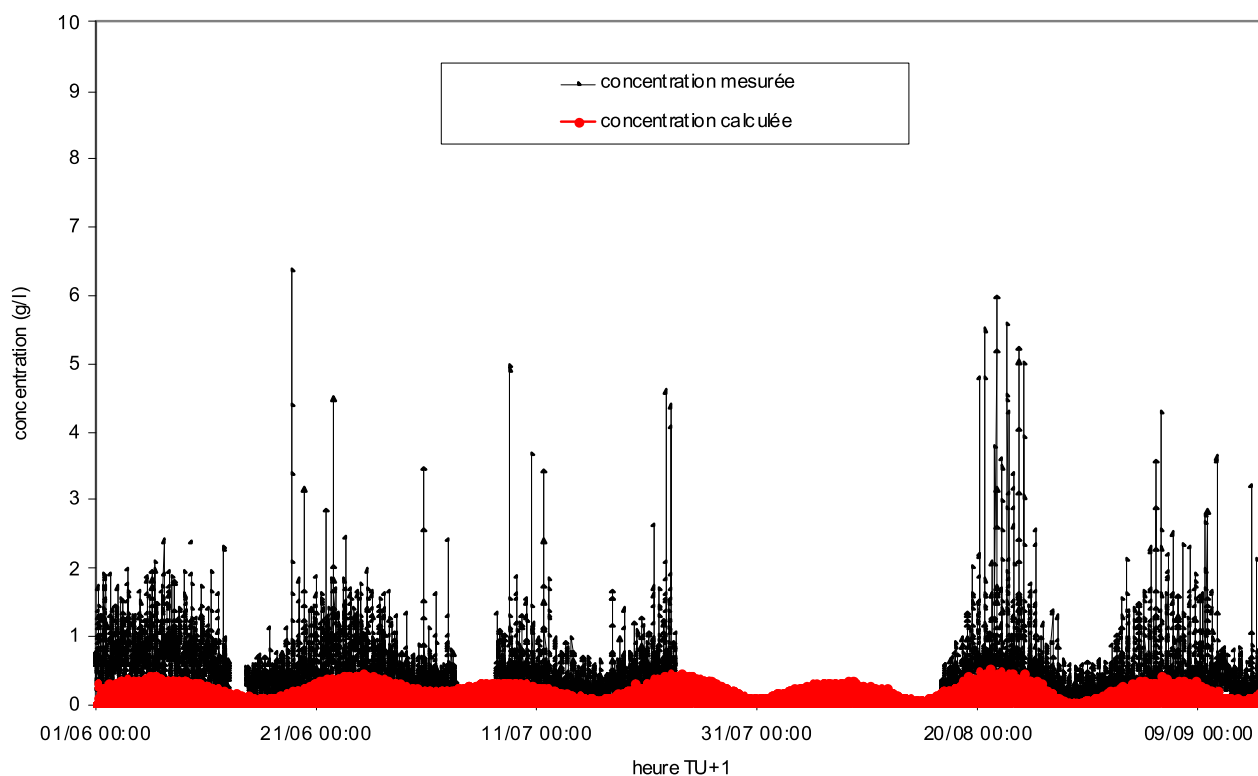


Fig.V.3- Concentration des matières en suspension en surface à Pauillac du 1^{er} juin au 15 septembre

Nous avons superposé l'intensité du courant calculée à Pauillac aux concentrations mesurée et calculée durant quelques cycles de marée (fig.V.4), afin d'appréhender son influence sur l'évolution de la concentration.

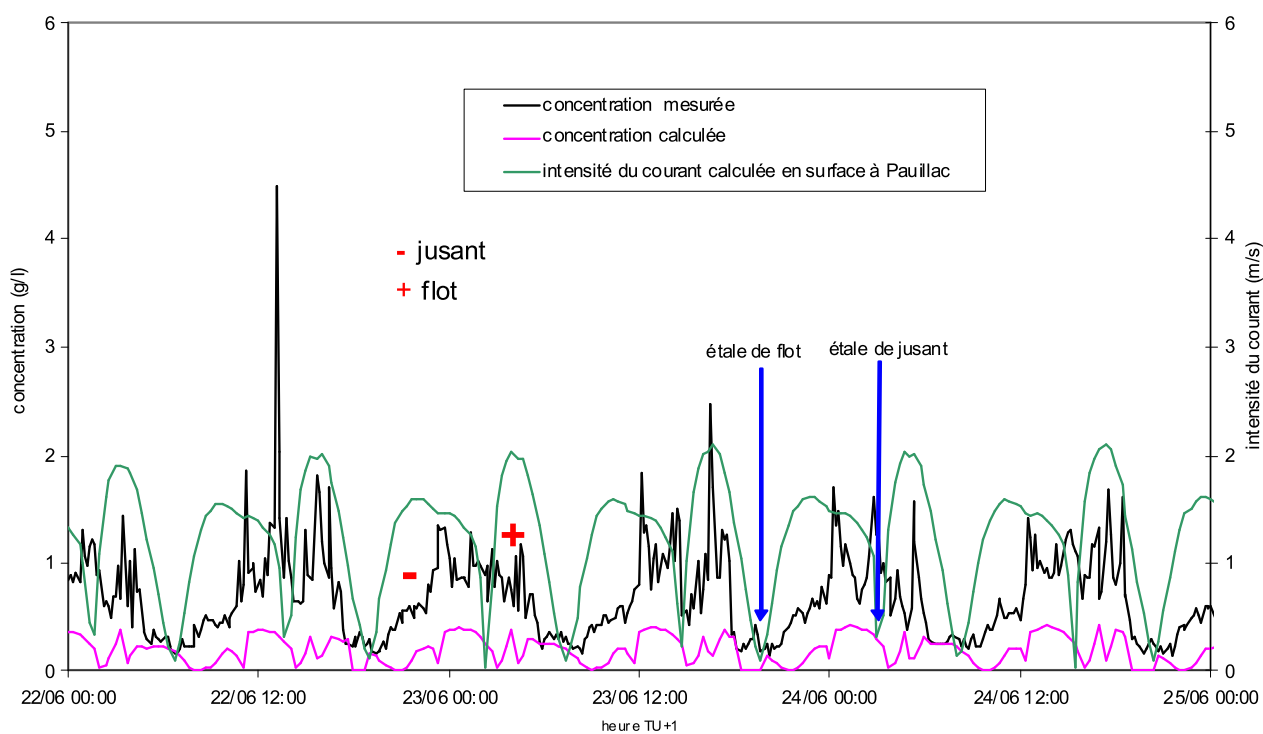


Fig.V.4- Superposition de l'intensité du courant aux concentrations en surface à Pauillac du 22 au 25 juin 2005.

On observe que la concentration mesurée ne diminue pas de façon significative à l'étale du jusan. Cela est dû vraisemblablement à la brièveté de ce laps de temps tel que le montrent les fortes décélérations et accélérations du jusan et du flot respectivement (fig.V.4). Inversement, l'étale du flot est plus long, comme l'indiquent les décélérations du flot et les accélérations du jusan, respectivement plus faibles que celles du jusan et du flot (fig.V.4). La durée de l'étale du flot permet ainsi la décantation des matières en suspension, d'où la chute nette de la concentration.

Quant à la concentration calculée, on note que la diminution de celle-ci s'amorce à l'étale de flot et à l'étale de jusan. Cependant, cette phase de diminution dure beaucoup moins longtemps pendant l'étale de jusan.

V.3.2 - Les bilans sédimentaires

Nous nous sommes intéressés au devenir de la masse sédimentaire tout au long de la simulation, les masses en suspension et déposées font l'objet d'une attention toute particulière. Leurs tracés (fig.V.5) indiquent une diminution de la quantité des sédiments en suspension et une augmentation du dépôt. En superposant la marée à Pauillac, on observe que les phases de dépôt et d'érosion se produisent en mortes-eaux et vives-eaux respectivement. Le déséquilibre quantitatif entre ces deux phases induit l'accumulation du dépôt au fil des cycles vives-eaux/mortes-eaux. Le tracé du bilan total nous permet de vérifier la conservation de la masse totale des sédiments (3.8 millions de tonnes) introduite initialement dans le modèle ; les apports fluviaux nous renseignent sur la quantité de sédiments apportée par les fleuves alors que le flux au Verdon nous informe sur le rejet des sédiments à l'océan ou leur maintien dans l'estuaire. Étant donné, la faiblesse du flux aux Verdon, la nécessité de retenir les sédiments dans l'estuaire en période d'étiage est satisfaite (ce qui n'est pas le cas dans le modèle SIAM-2D horizontal), néanmoins la finalité de stabiliser, au fil de la simulation, la masse des matières en suspension n'est pas atteinte. Nous verrons dans la partie V.4.2.2 comment y remédier en supprimant des mailles pièges à sédiment.

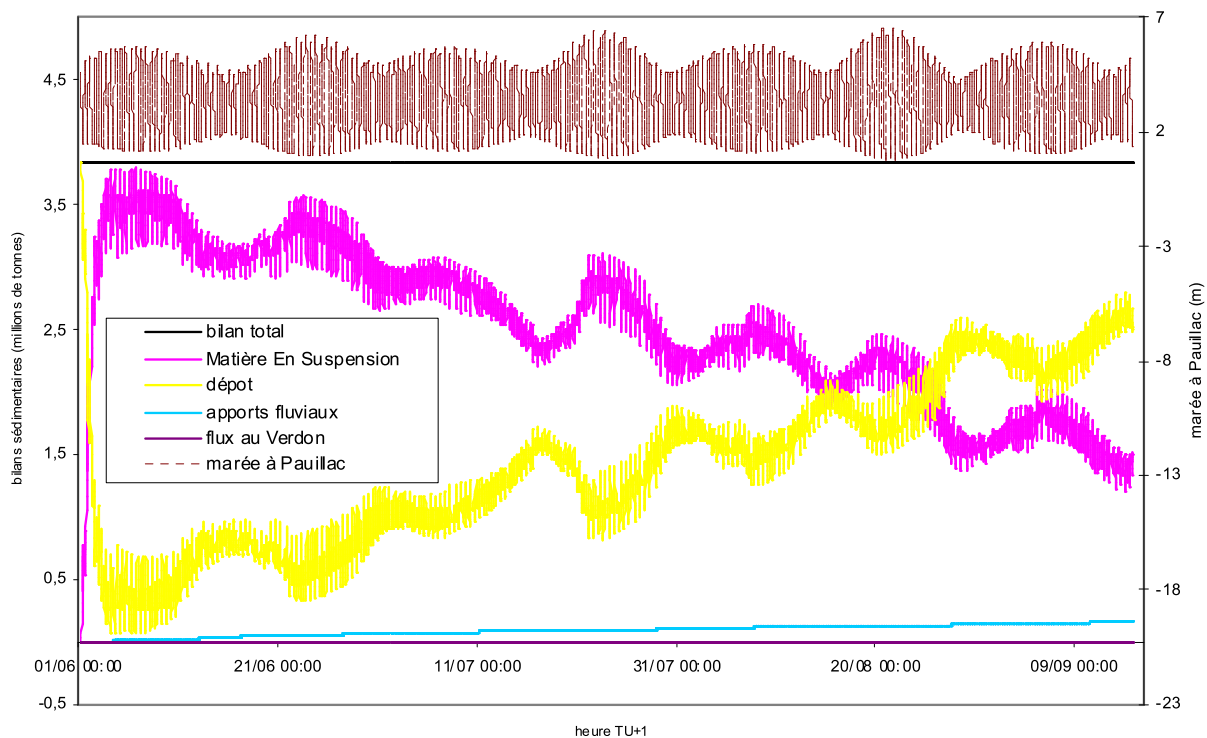


Fig.V.5- Bilans sédimentaires dans le système estuarien de la Gironde du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

V.3.3 - Piégeage des sédiments

Pour repérer les zones du dépôt définitif du sédiment, nous avons tracé la carte représentant la vase en fin de simulation (fig.V.6). Cette figure montre le piégeage des sédiments dans des zones ponctuelles recouvrant, une ou deux mailles situées à la frontière terre-eau. Le dépôt dans ces zones montre l'accumulation des sédiments de façon linéaire tout au long de la simulation sans contrepoids du flux érosif (fig.V.7). A l'entrée de la Dordogne (mailles 1 et 2) le taux des sédiments déposés est particulièrement élevé par rapport aux autres pièges, ainsi la masse déposée atteint plus de 2000 kg m^{-2} pour la maille 1 et avoisine les 1500 kg m^{-2} pour la maille 2 (fig.V.7). On distingue d'autres zones d'accumulation réversible ou l'érosion cette fois-ci contrebalance le dépôt et évite de facto le piégeage des sédiments sur l'étendue de ces mailles (fig.V.8). A titre d'exemple la maille 12 atteint un pic de 1400 kg m^{-2} , cette masse déposée diminue aussitôt jusqu'à des valeurs résiduelles lors de la phase d'érosion (fig.V.8).

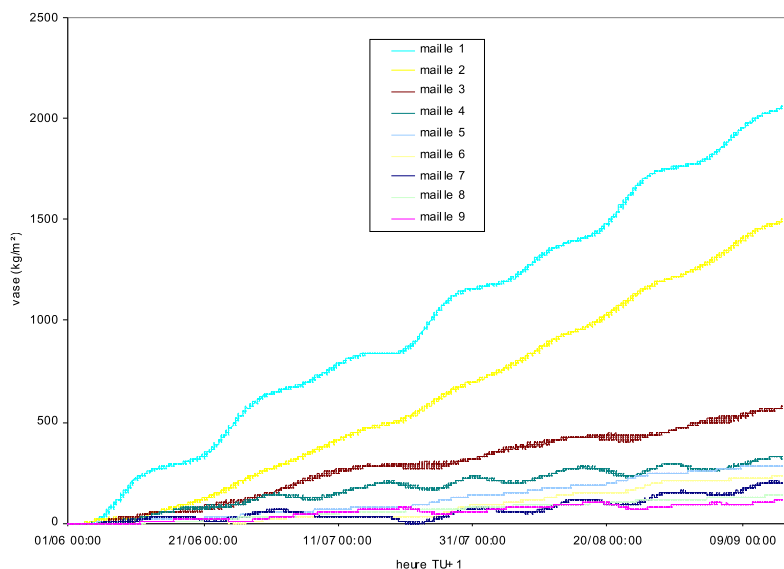


Fig.V.7- Piégeage des sédiments (vase) dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.6 pour repérer les mailles).

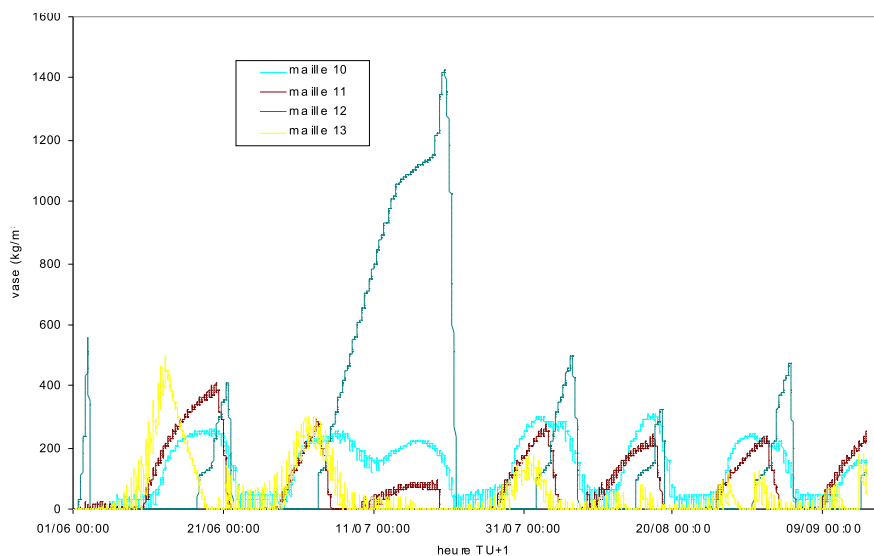


Fig.V.8- dépôt réversible des sédiments dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.6 pour repérer les mailles).

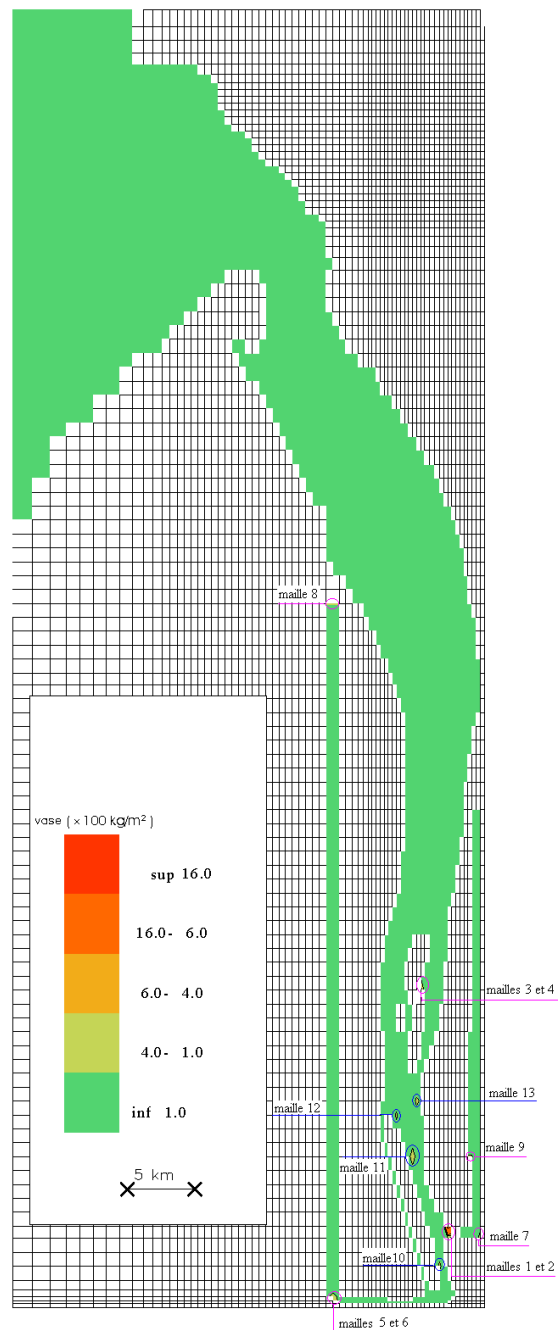


Fig.V.6- Carte du dépôt des sédiments en fin de simulation (le 15/09/2005 à 00 :00).

V.3.4 - Distribution de la concentration des matières en suspension

V.3.4.1 – Généralités

Le bouchon vaseux simulé dans le système estuarien de la Gironde est représenté par le calcul de la concentration des matières en suspension qu'on visualise sous forme de cartes. Nous avons tracé les profils horizontaux et verticaux de la concentration en vive-eau et en morte-eau, au moment des deux phases de la marée, flot et jusant maximaux à Pauillac (station référentielle pour l'étude de la dynamique sédimentaire). L'intensité du courant calculée à Pauillac nous renseigne sur la puissance des marées et sur les périodes alternatives flot-jusant (fig.V.9). Nous avons représenté la concentration lors d'une grande vive-eau et d'une petite morte-eau. Les saisies instantanées des profils horizontaux et verticaux sont indiquées sur la figure V.10. Les profils verticaux sont tracés à la même échelle de concentration que les profils horizontaux en surface. La section des profils verticaux représente le chenal de navigation, et s'étend du Bec d'Ambès jusqu'à Talmont (fig.V.11).

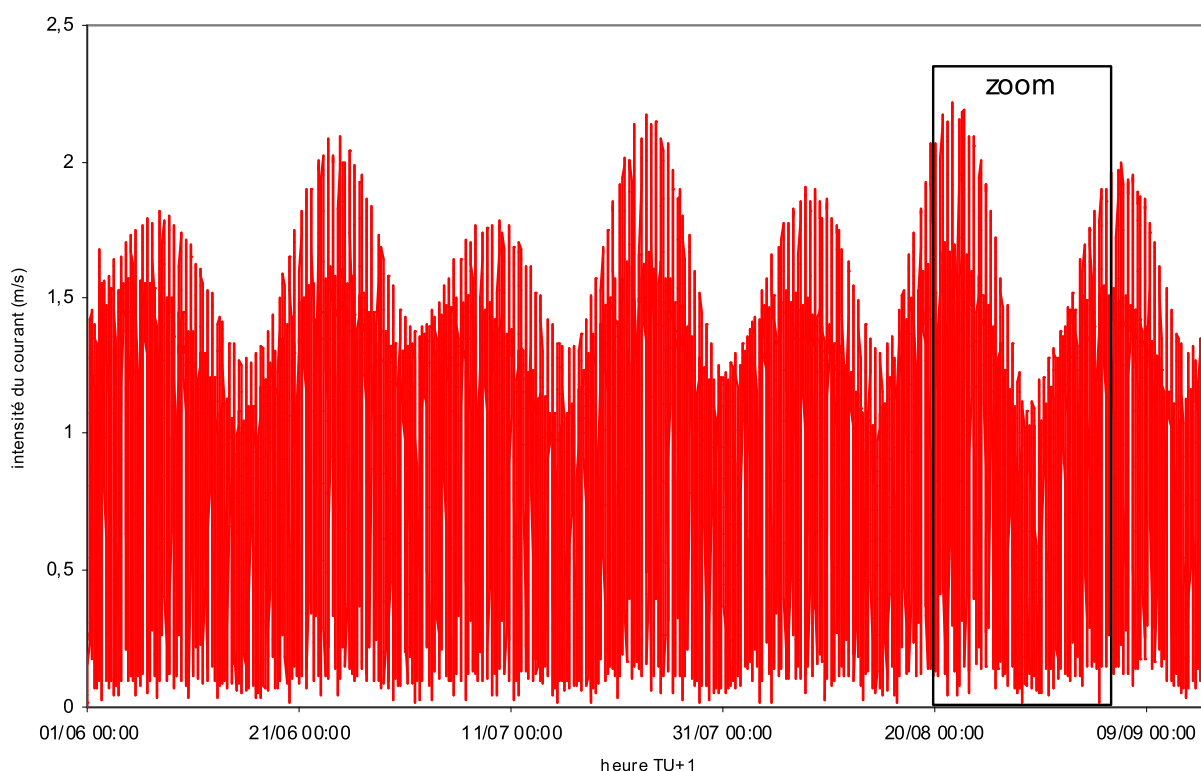


Fig.V.9- Intensité du courant calculée en surface à Pauillac du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

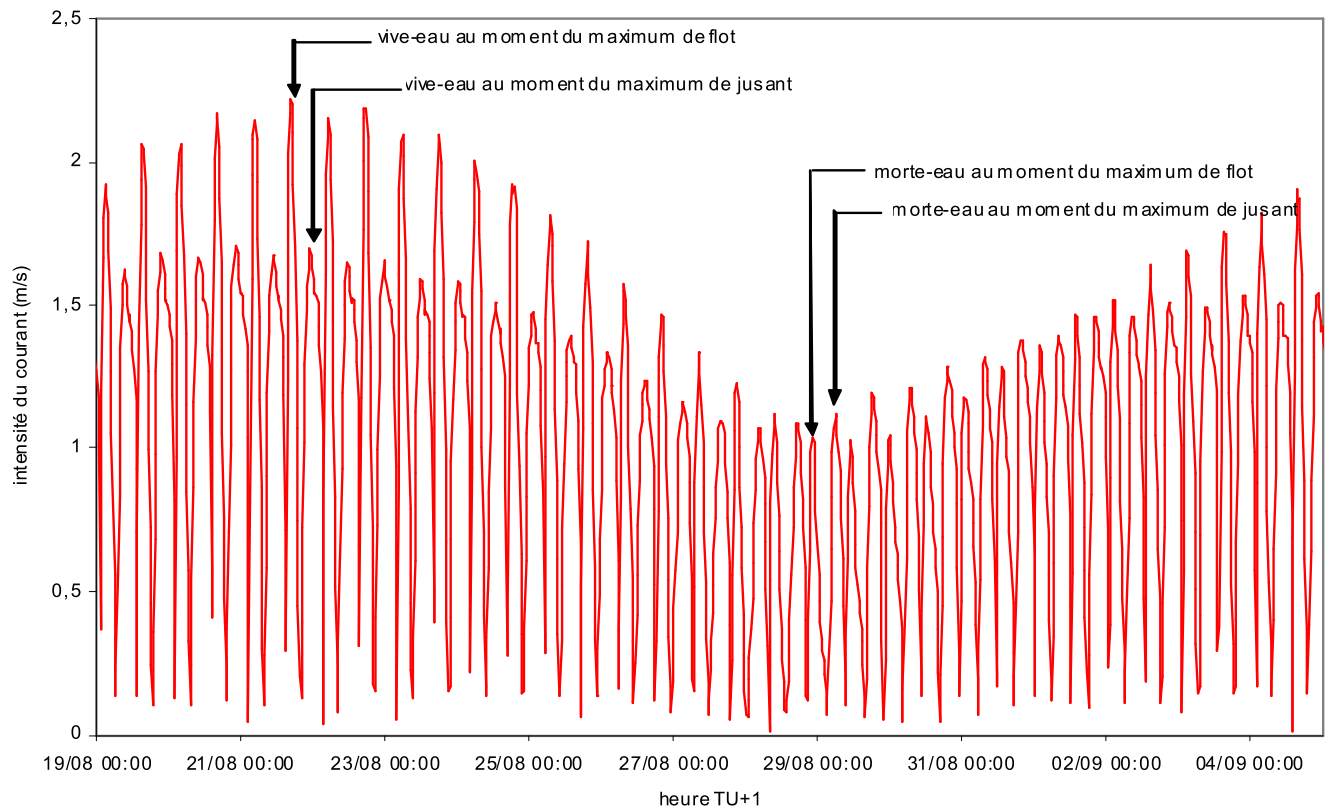


Fig.V.10- Zoom sur l'intensité du courant calculée en surface à Pauillac (voir fig.V.9) ; saisies instantanées des profils.

V.3.4.2 - Commentaires sur la distribution de la concentration

Vive-eau au moment du flot et jusant maximaux : la vitesse élevée du courant en flot favorise la mise en suspension des sédiments, d'où une plus forte concentration en surface (fig.V.12) (étendues turbides en amont et en aval des îles pouvant atteindre plus de 0.4 g l^{-1}) par rapport à celle du jusant (fig.V.14). Près du fond, la concentration est moins homogène avec l'apparition de zones, dans l'estuaire et la Garonne, à fort taux de sédiments de plus de 8 g l^{-1} (fig.V.13 et V.15). Les profils verticaux montrent des stratifications de concentration bien établies (fig.V.16 et V.17).

Morte-eau au moment du flot et jusant maximaux : en morte-eau, la vitesse du courant étant plus faible, entraîne une diminution manifeste de la concentration en surface ($< 0.2 \text{ g l}^{-1}$ sur une grande partie de l'estuaire) (fig.V.18 et V.20) et sur la quasi-totalité de la colonne d'eau (fig.V.22 et V.23) par rapport à celle obtenue en période de vive-eau (fig.V.16 et V.17). Près du fond, la concentration est hétérogène, les zones à fort taux de sédiments ($> 8 \text{ g l}^{-1}$) sont plus restreintes (fig.V.19 et V.21) qu'en vive-eau (fig.V.13 et V.15). En flot et en jusant, les distributions de la concentration

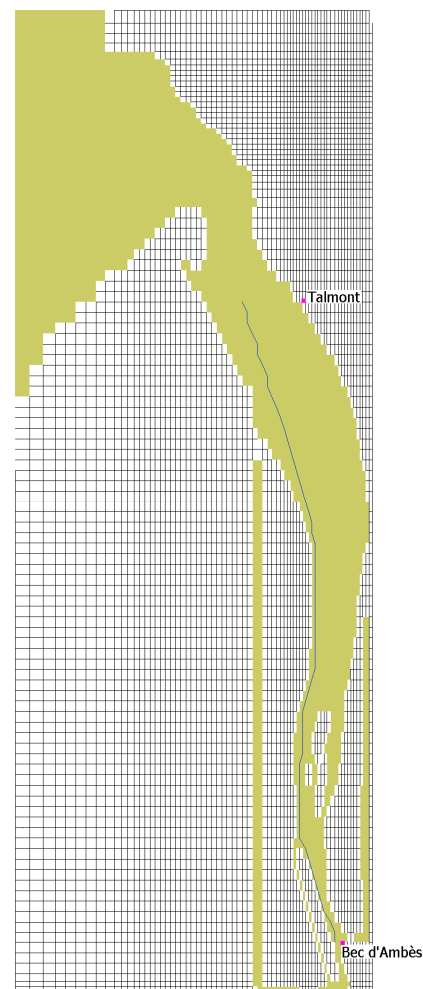


Fig.V.11- Tracé de la section des profils verticaux.

sont très proches, cela est vraisemblablement lié à des vitesses de courant de même ordre de grandeur à ces deux instants (voir fig.V.10).

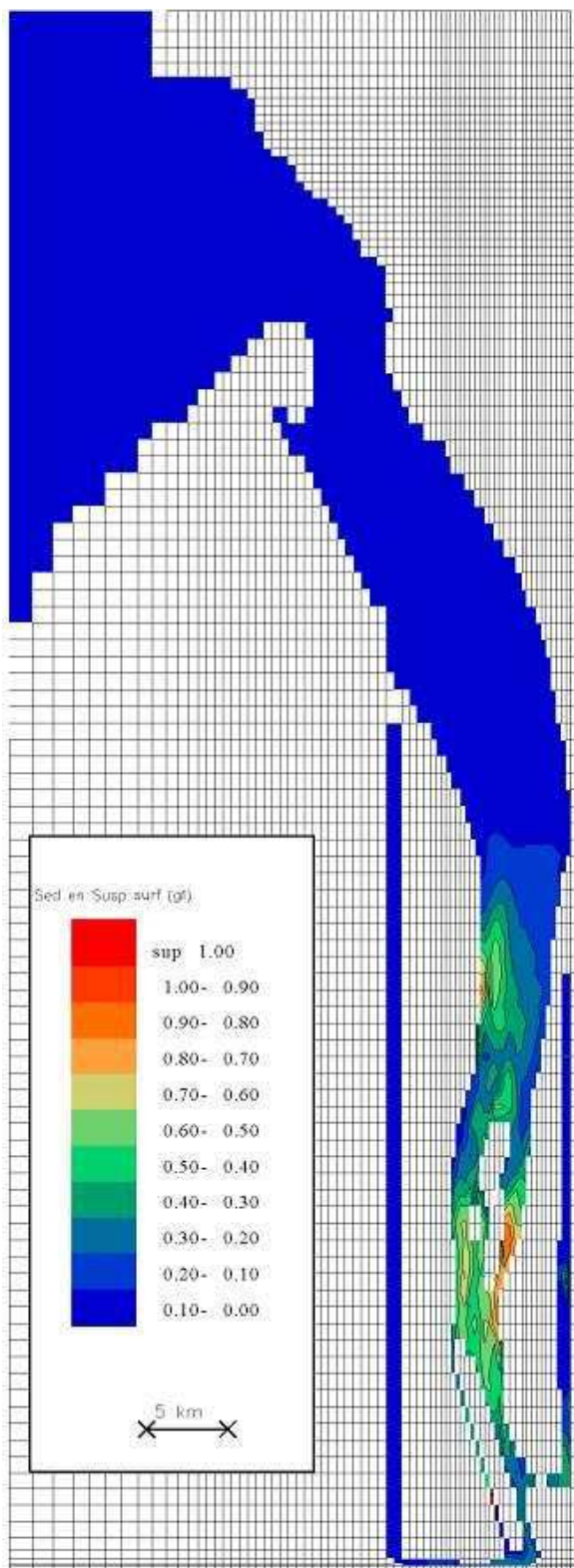


Fig.V.12- Concentration des matières en suspension en surface (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40.

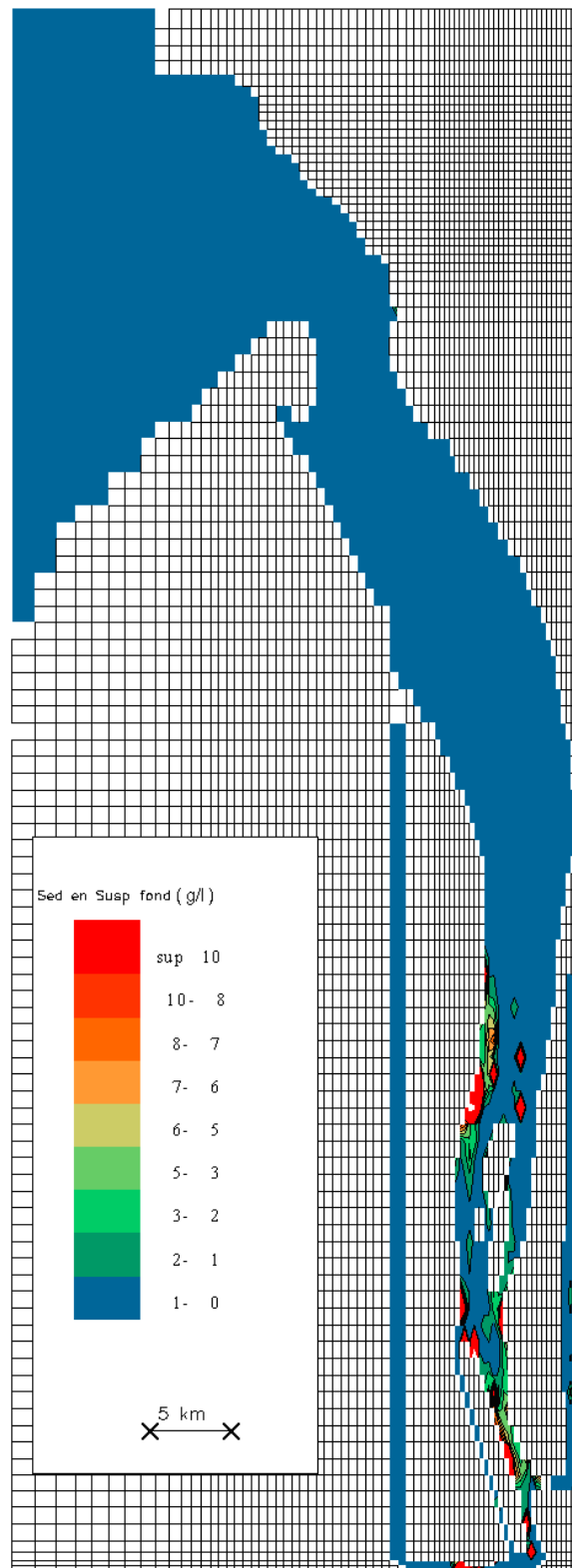


Fig.V.13- Concentration des matières en suspension près du fond (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40.

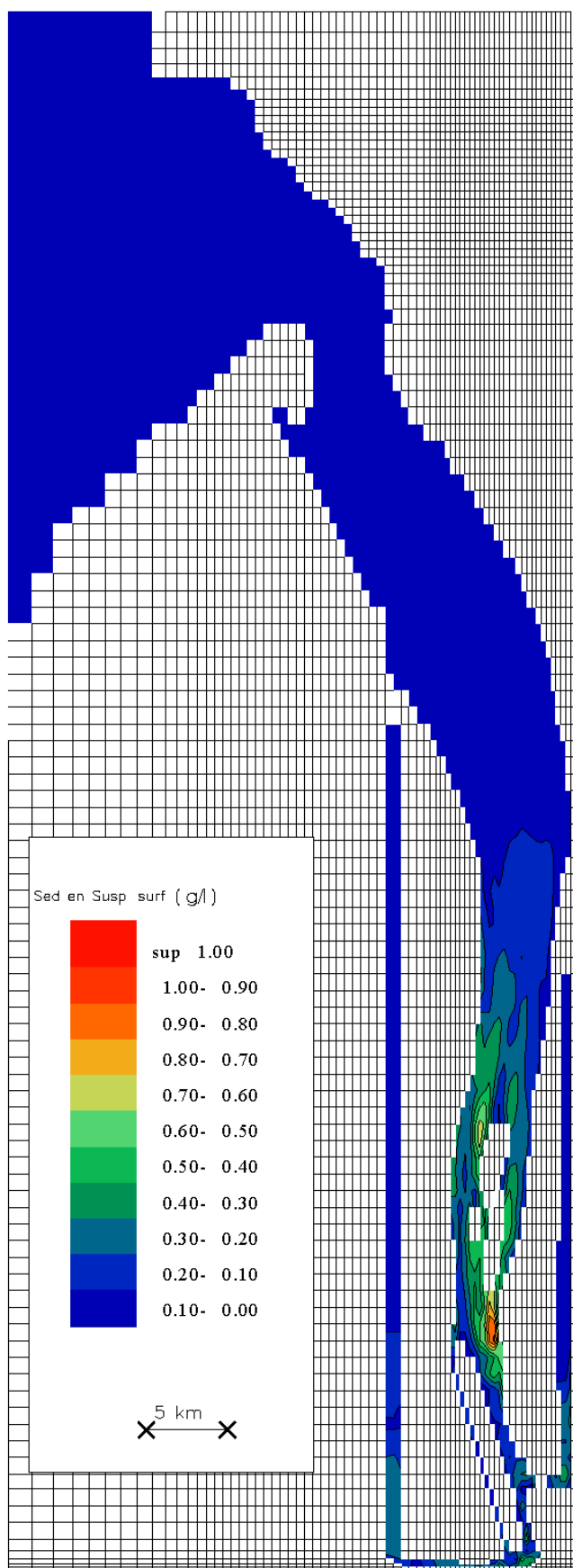


Fig.V.14- Concentration des matières en suspension en surface (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de jusan à Pauillac.
Date : 21/08/2005 à 23:00.

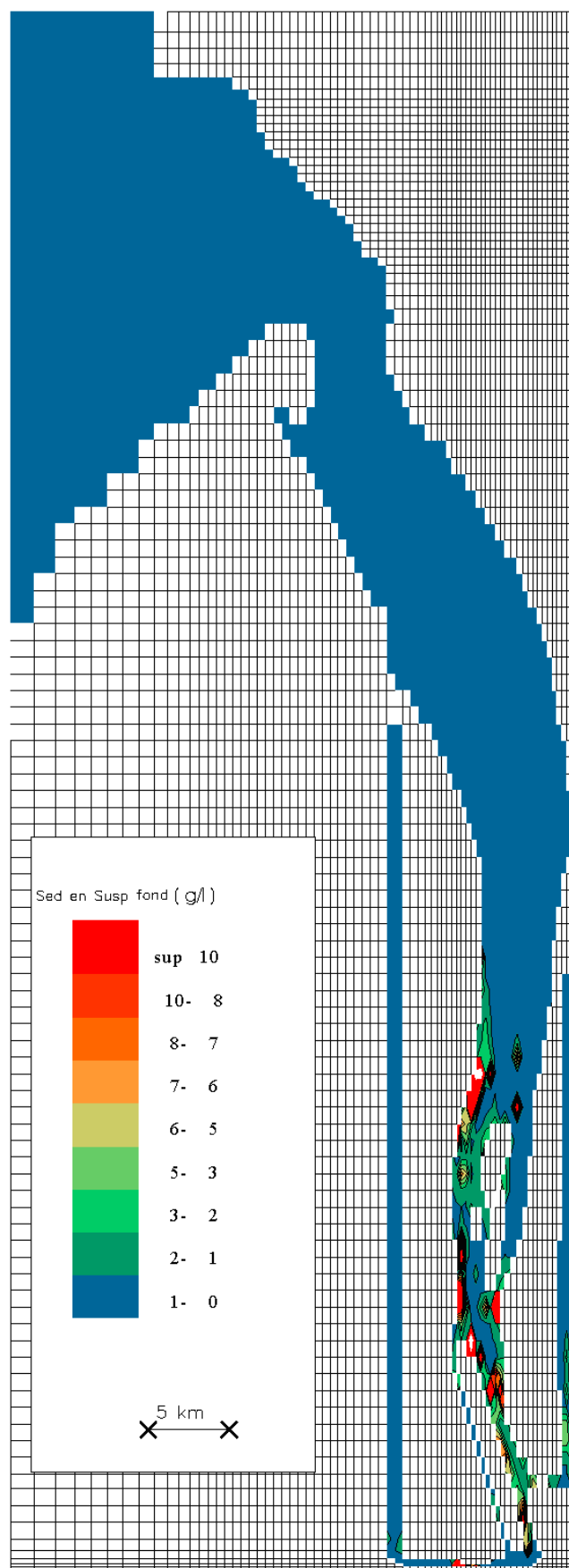


Fig.V.15- Concentration des matières en suspension près du fond (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de jusan à Pauillac.
Date : 21/08/2005 à 23:00.

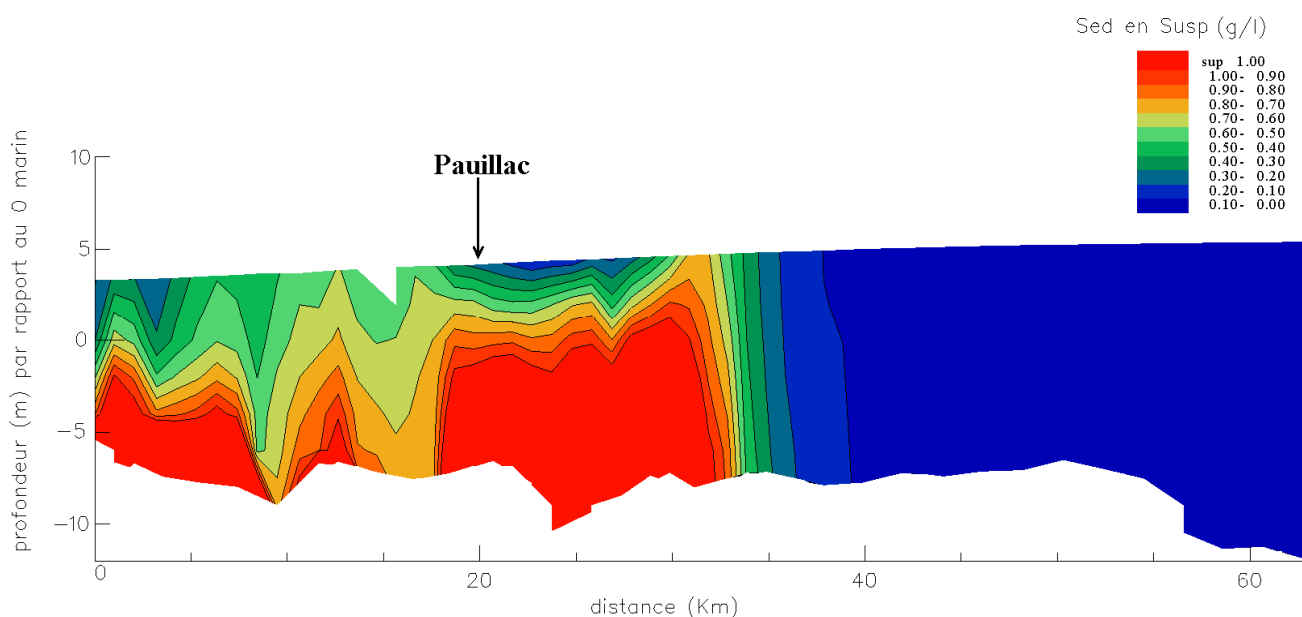


Fig.V.16- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont (Bec d'Ambès) vers l'aval (Talmont) de l'estuaire (voir fig.V.11) (unité g/l). Echelle correspondant à la carte de concentration en surface. Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40.

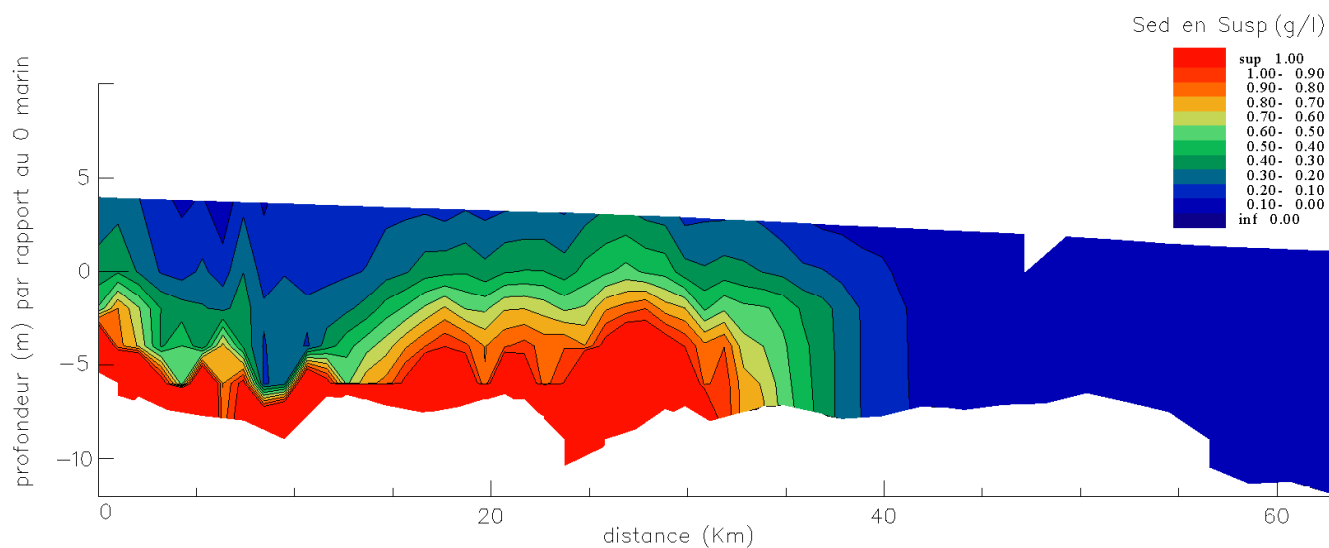


Fig.V.17- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont vers l'aval de l'estuaire (unité g/l). Echelle correspondant à la carte de concentration en surface. Période de vive-eau au moment du maximum de jusant à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 23:00.

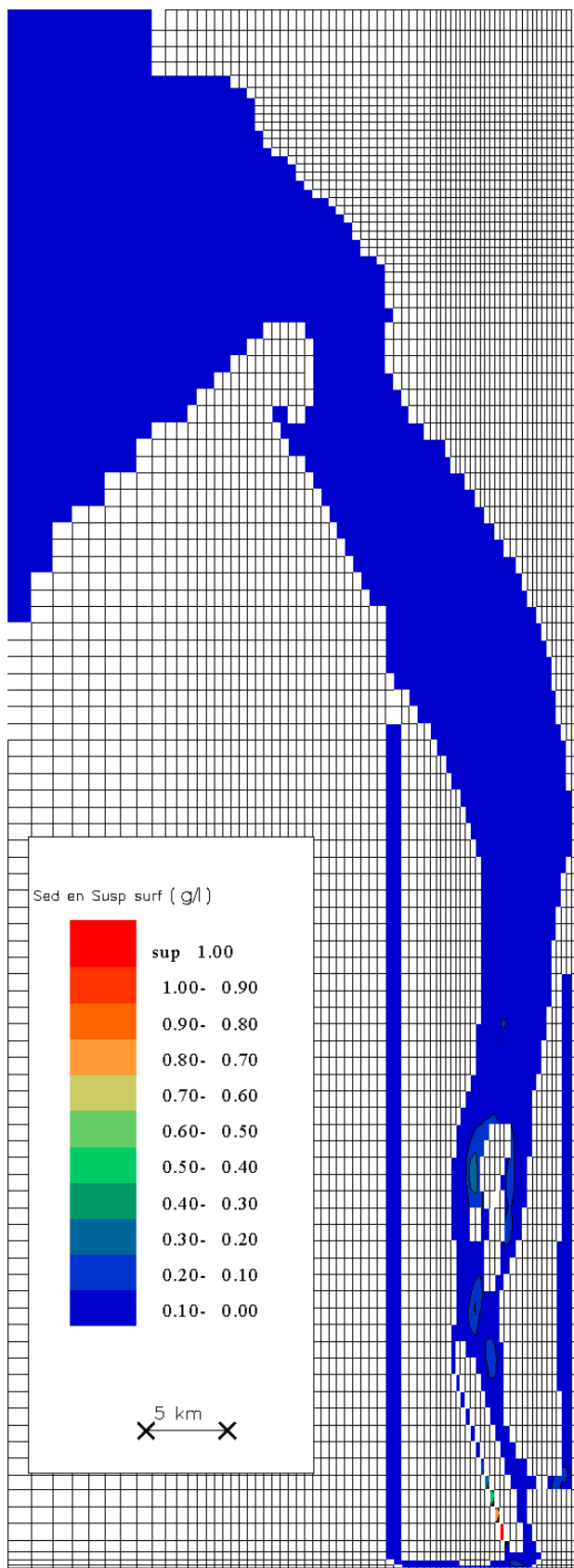


Fig.V.18- Concentration des matières en suspension en surface (unité g/l). Période de morte-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 28/08/2005 à 22:20.

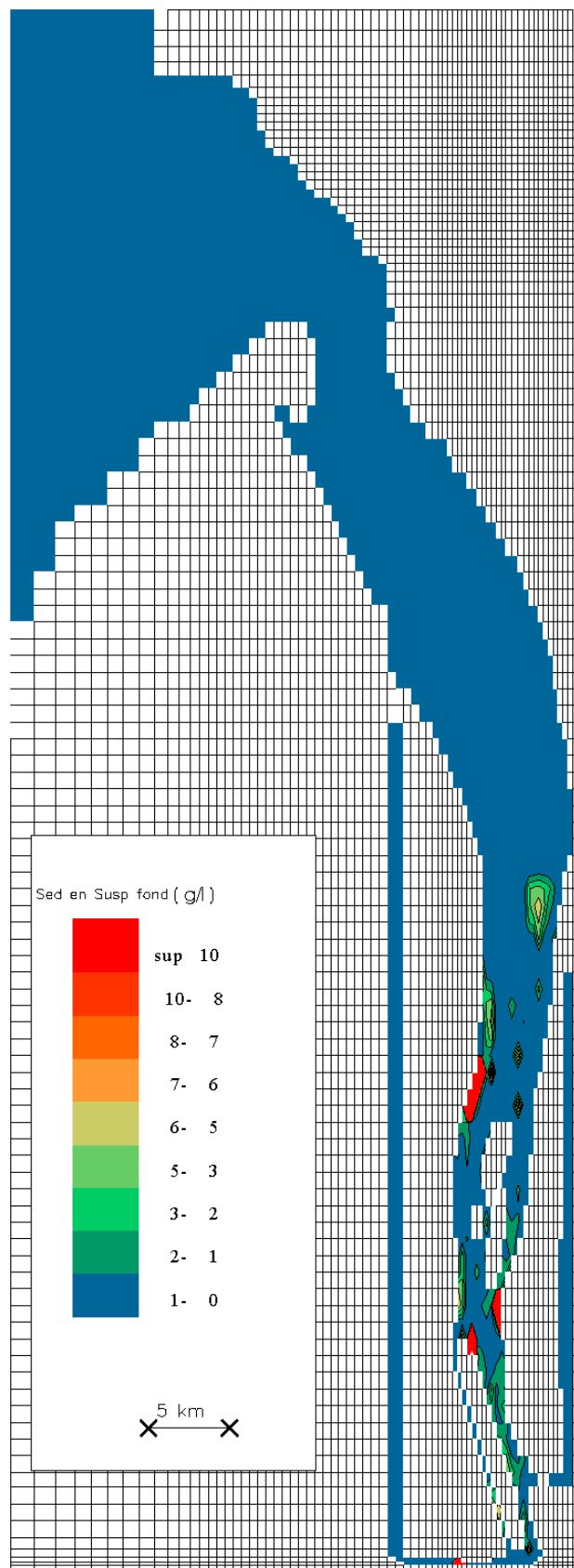


Fig.V.19- Concentration des matières en suspension près du fond (unité g/l). Période de morte-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 28/08/2005 à 22:20.

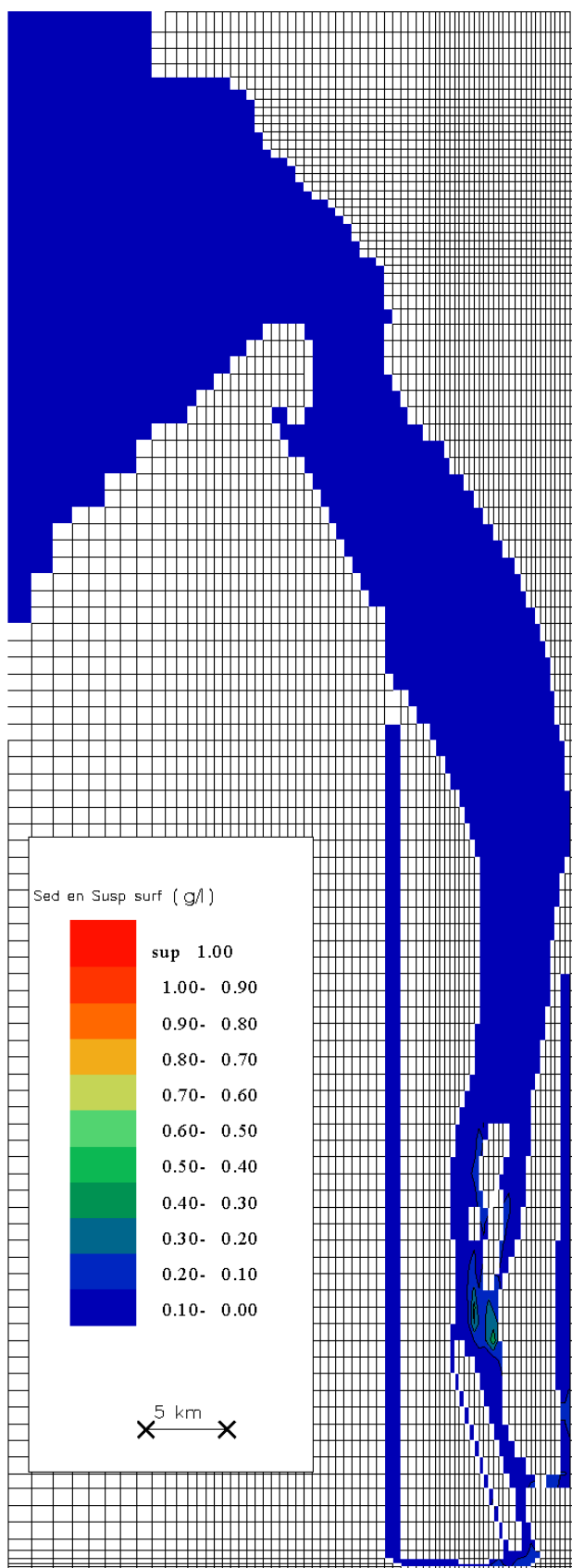


Fig.V.20- Concentration des matières en suspension en surface (unité g/l). Période de morte-eau au moment du maximum de jusant à Pauillac. Date : 29/08/2005 à 06:00.

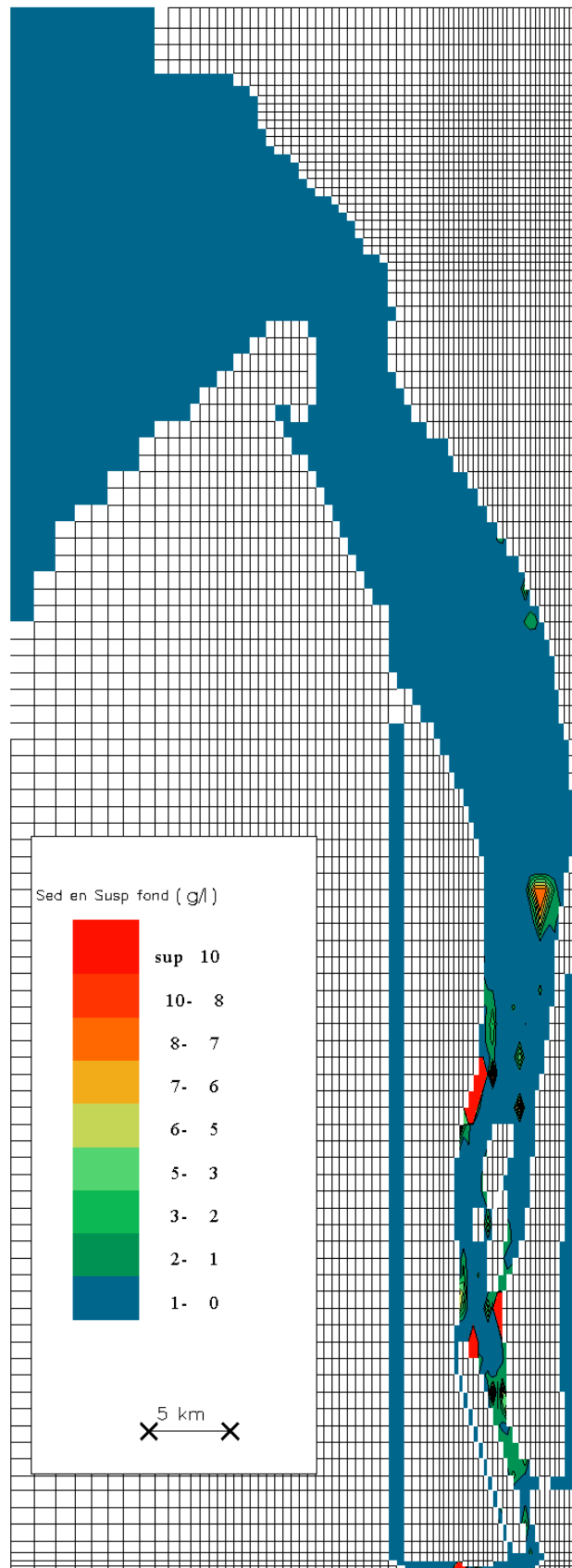


Fig.V.21- Concentration des matières en suspension près du fond (unité g/l). Période de morte-eau au moment du maximum de jusant à Pauillac. Date : 29/08/2005 à 06:00.

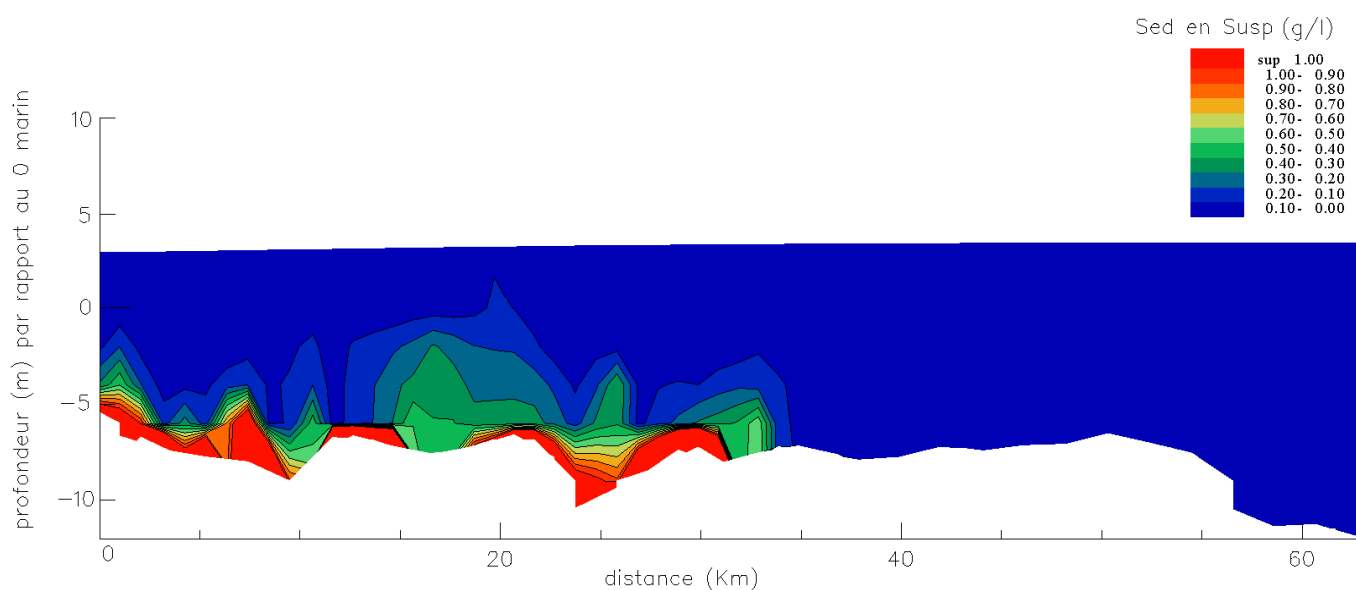


Fig.V.22- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont vers l'aval de l'estuaire (unité g/l). Echelle correspondant à la carte de concentration en surface. Période de morte-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 28/08/2005 à 22:20.

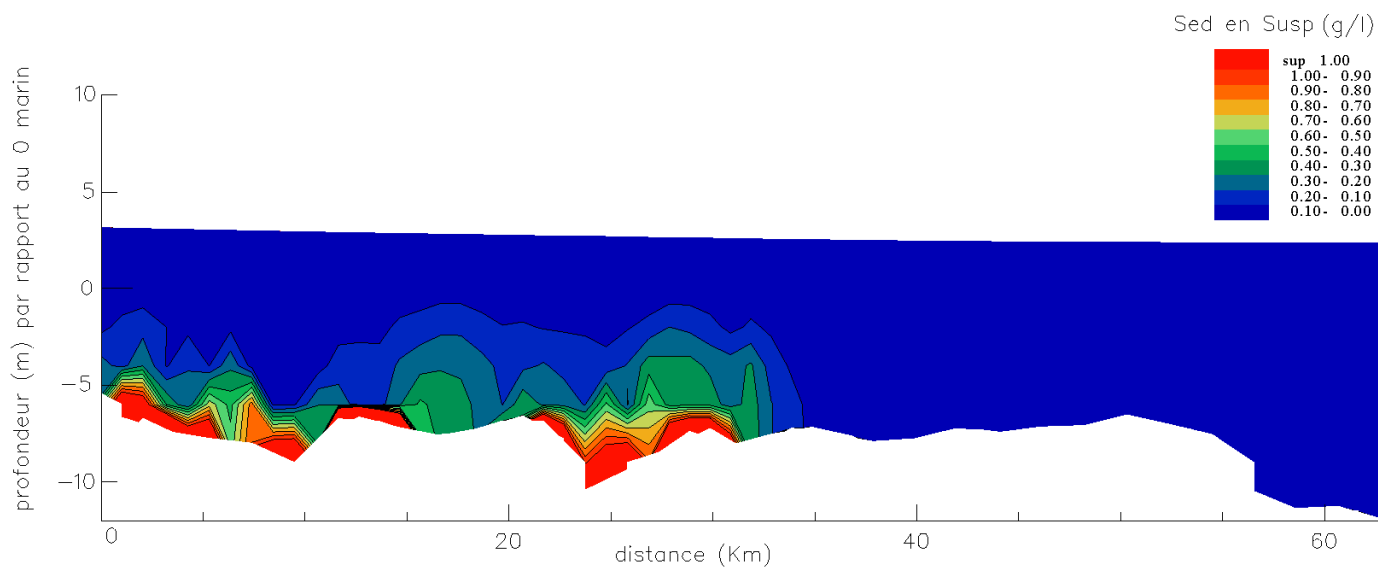


Fig.V.23- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont vers l'aval de l'estuaire (unité g/l). Echelle correspondant à la carte de concentration en surface. Période de morte-eau au moment du maximum de jusant à Pauillac. Date : 29/08/2005 à 06:00.

V.3.5- Conclusion

Nous venons de voir que le paramétrage d'origine permettait de simuler correctement la dynamique sédimentaire. En effet, la variabilité de la concentration par l'alternance de valeurs fortes et faibles pendant les vives et mortes-eaux respectivement, reflète l'évolution de la concentration in-situ. Néanmoins, la concentration calculée en surface est sous évaluée, et la masse sédimentaire déposée au bout de trois mois et demi de simulation est particulièrement élevée par rapport à celle effective sur le terrain.

V.4 – Impact du paramétrage hydro-sédimentaire sur la dynamique du bouchon vaseux simulé

V.4.1 – Généralités

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence du paramétrage hydro-sédimentaire sur l'évolution de la concentration et du dépôt des matières en suspension. Dans les parties « la constante d'érosion » et « simulation avec une bathymétrie modifiée », nous nous référons aux résultats précédents pour les comparaisons. Comme nous le constaterons dans la partie « simulation avec une bathymétrie modifiée », l'évolution de la masse des matières en suspension, après modification de la bathymétrie, représente une meilleure stabilité que celle obtenue avec la première version bathymétrique. Nous adopterons cette modification pour le reste des simulations (parties « la contrainte critique d'érosion », « la vitesse de chute des matières en suspension », « la diffusivité turbulente »). Par conséquent, les résultats de simulation obtenus avec cette nouvelle bathymétrie (partie « simulation avec une bathymétrie modifiée ») deviennent de facto le repère pour les comparaisons, et seront reproduits en tant que référence dans les parties suivantes (« la contrainte critique d'érosion », « vitesse de chute des matières en suspension », « la diffusivité turbulente »). La production de cartes est corrélée à l'intérêt des résultats obtenus par rapport à ceux développés dans la simulation avec le paramétrage d'origine. Par conséquent nous reproduirons les cartes en vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac (les cartes en vive-eau au moment du maximum de jusant à Pauillac sont données en annexe III).

V.4.2 - Paramétrage du flux érosif et modification de la bathymétrie

V.4.2.1 - La constante d'érosion

V.4.2.1.1 – Choix du paramétrage

Cormault (1971) a établi, dans l'estuaire de la Gironde, une formulation qui lie la constante d'érosion

à la concentration des dépôts frais :
$$M_{se} = 0.55 \left(\frac{\rho_b}{1000} \right)^3 .$$

Avec M_{se} : la constante d'érosion ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

ρ_b : la concentration des dépôts frais (g l^{-1} ou kg m^{-3}).

Il a proposé, dans l'estuaire de la Gironde, une constante d'érosion moyenne de $0.002 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Celle-ci est utilisée comme paramétrage d'origine dans SIAM-3D.

Les résultats de simulation avec cette valeur seront comparés à ceux obtenus avec la valeur $0.0025 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Cette dernière a été choisie eu égard aux premiers résultats de simulation satisfaisants avec ce paramétrage (*Castaing et al., 2002*).

V.4.2.1.2 - Bilans sédimentaires

La masse totale des matières en suspension simulée avec la valeur $0.0025 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ diminue (fig.V.24) de façon similaire à celle observée précédemment avec la constante d'érosion de $0.002 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (fig.V.5). Les courbes du dépôt et des matières en suspension sont davantage lissées pour la simulation effectuée avec la valeur $0.0025 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Cela se manifeste par l'atténuation du différentiel entre la quantité des sédiments déposée pendant les mortes-eaux et celle érodée en période de vives-eaux. Nous verrons dans la partie « piégeage des sédiments », la nature des mailles soumises à cette dynamique sédimentaire. En fin de simulation, la convergence des deux courbes indique, que la quantité des sédiments déposés équilibre la masse totale des matières en suspension. Le gain en matière en suspension suite à cette augmentation de la constante d'érosion, est d'environ 0.55 millions de tonnes à la fin de la simulation.

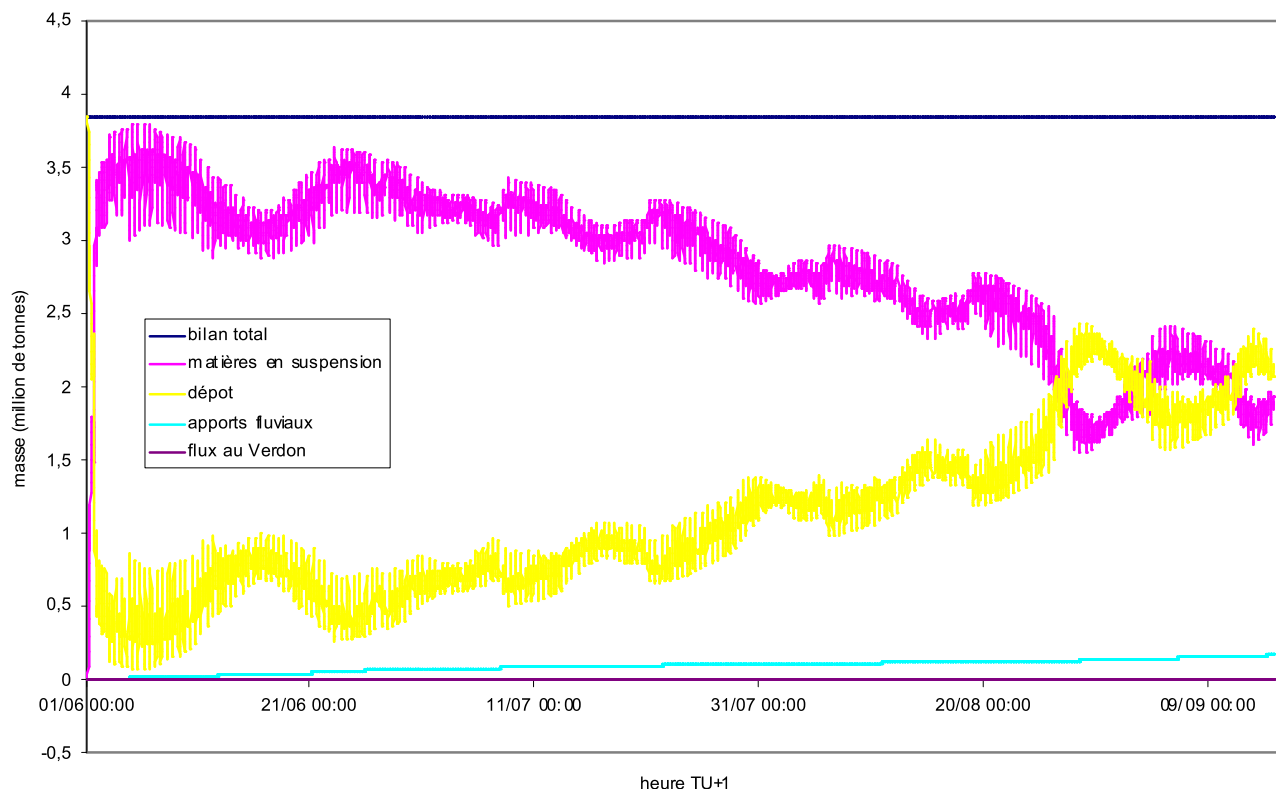


Fig.V.24- Bilans sédimentaires dans le système estuarien de la Gironde du 1^{er} juin au 15 septembre 2005.

V.4.2.1.3 - Piégeage des sédiments

L'augmentation de la constante d'érosion induit la suppression de quelques pièges (mailles 3, 4, 7 et 9) d'autres persistent, notamment ceux situés à l'entrée de la Dordogne (mailles 1 et 2) (fig.V.25). La masse de vase déposée à l'entrée de la Dordogne (maille 1 et 2, fig.V.26) reste élevée malgré l'augmentation la constante d'érosion, avec des valeurs de plus de 2000 kg m⁻² pour la maille 1 et avoisinant les 1000 kg m⁻² pour la maille 2.

Les dépôts réversibles d'importance (fig.V.27) qui assurent la conservation de la cyclicité entre l'érosion et le dépôt se sont réduits à deux mailles, d'où l'atténuation du différentiel entre quantité déposée et érodée observé précédemment (fig.V.24).

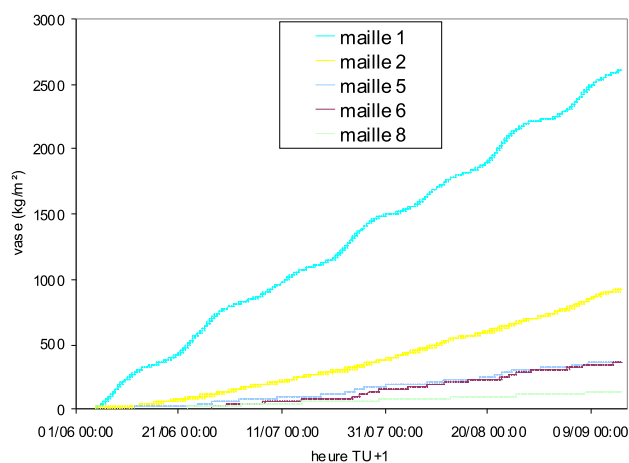


Fig.V.26- Piégeage des sédiments (vase) dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.25 pour repérer les mailles).

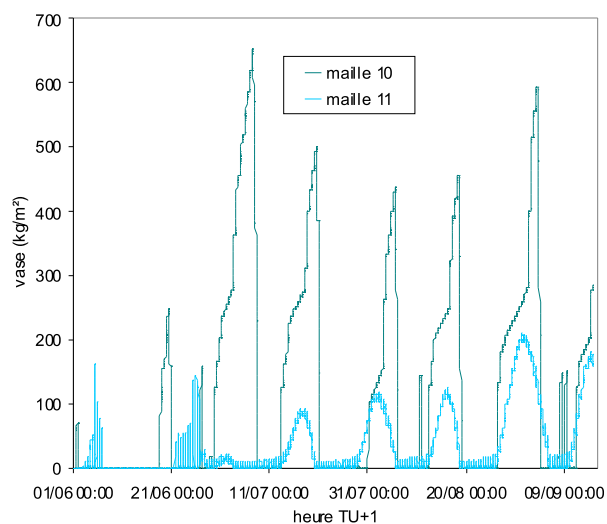


Fig.V.27- dépôt réversible des sédiments dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.25 pour repérer les mailles).

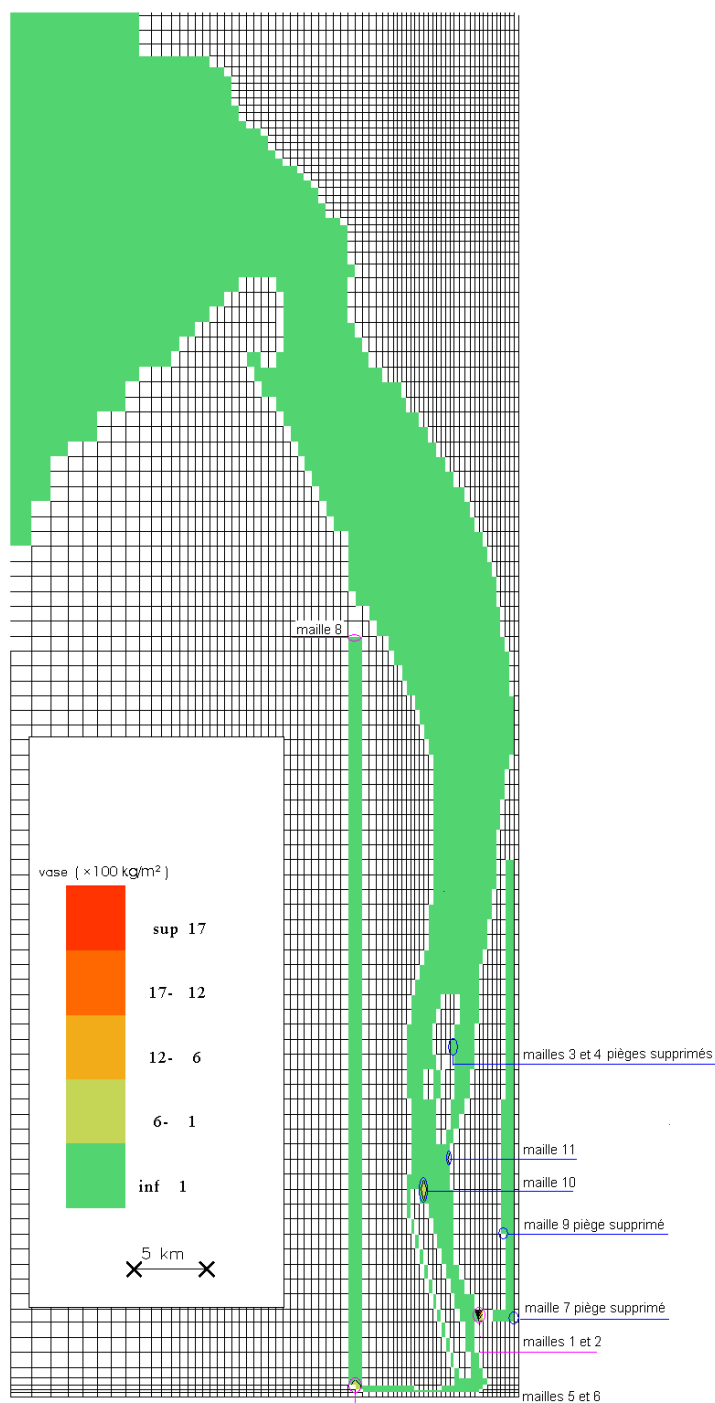


Fig.V.25- Carte du dépôt des sédiments en fin de simulation (le 15/09/2005 à 00 :00).

V.4.2.1.4 - Distribution de la concentration des matières en suspension

Nous avons tracé les cartes en vive-eau au moment du flot maximal à Pauillac (cartes vive-eau au moment du jusant maximal à Pauillac, voir annexe III). Près du fond et en surface, la distribution des matières en suspension après augmentation de la constante d'érosion (fig.V.28, V.29 et V.30) reste assez similaire aux résultats initiaux (voir fig.V.12, V.13 et V.16). Cependant quelques différences subsistent, ainsi lorsque la constante d'érosion augmente, on note entre autre: la diminution de la concentration en surface à droite des îles ($<0.7 \text{ g l}^{-1}$) (fig.V.28 et V.12); l'augmentation de la concentration près du fond en amont du Bec d'Ambès dans la Garonne ($>8 \text{ g l}^{-1}$) (fig.V.29 et V.13), ou encore la diminution de la concentration dans la colonne d'eau entre 10 et 18 Km à l'aval du Bec d'Ambès (fig.V.30 et V.16).

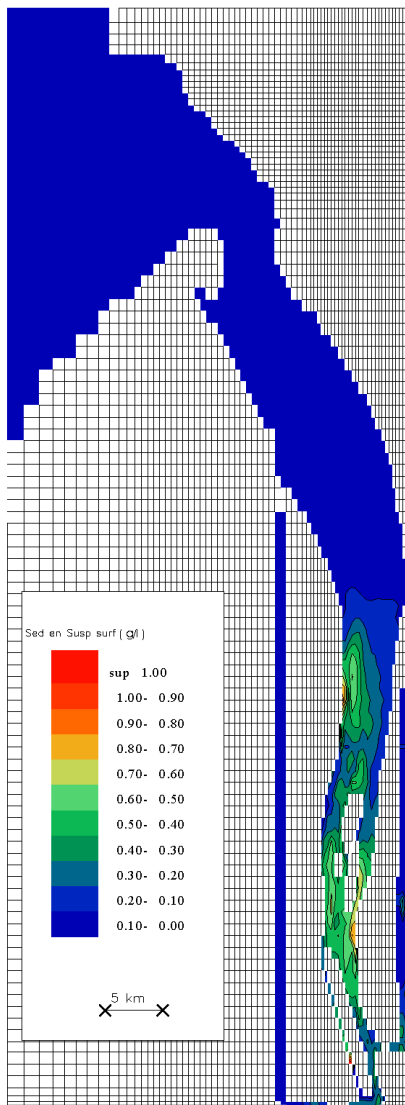


Fig.V.28- Concentration des matières en suspension en surface (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40. Valeur de la constante d'érosion : $0.0025 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

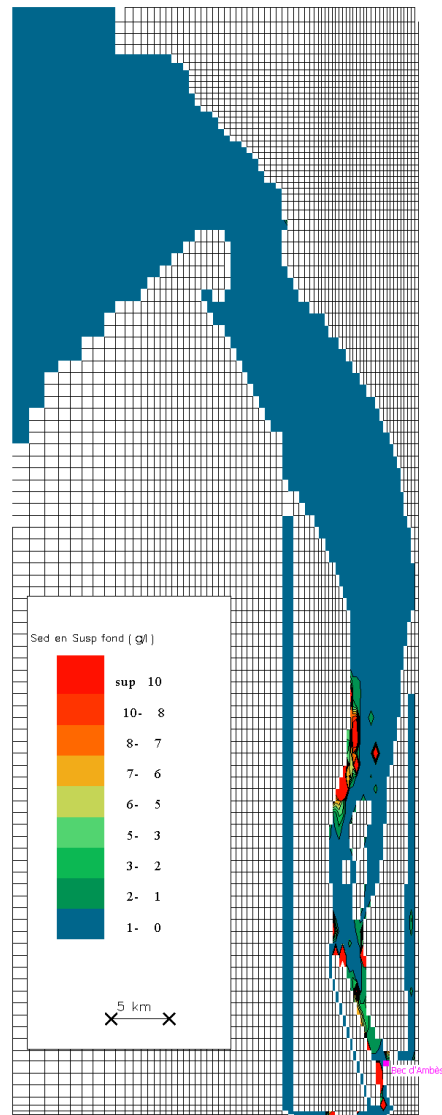


Fig.V.29- Concentration des matières en suspension près du fond (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40. Valeur de la constante d'érosion : $0.0025 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

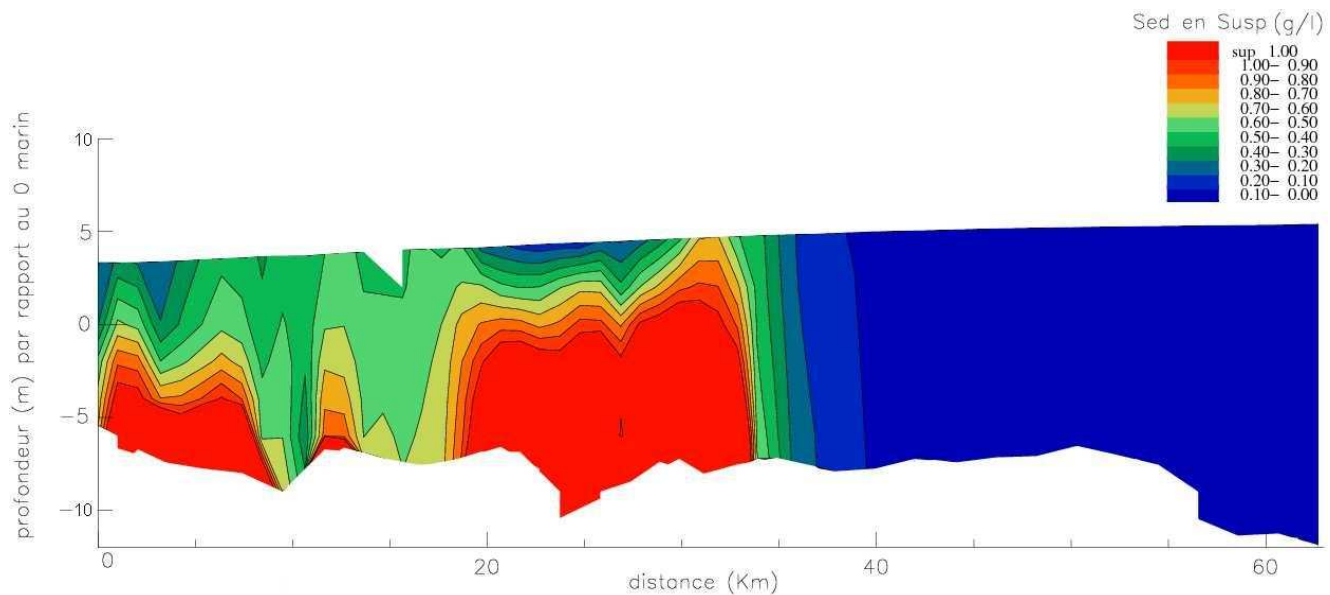


Fig.V.30- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont vers l'aval de l'estuaire (unité g/l). Echelle correspondant à la carte de concentration en surface. Période de vive-eau au moment du maximum de flot maximal à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40. Valeur de la constante d'érosion : $0.0025 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

V.4.2.2 – Simulation avec une bathymétrie modifiée

Nous conservons le paramétrage d'origine présenté au début du chapitre. Les comparaisons s'effectueront donc par rapport aux résultats présentés dans la partie « simulation de la dynamique du bouchon vaseux avec le paramétrage d'origine ».

V.4.2.2.1 - Suppression de certaines mailles pièges à sédiment

Pour éliminer les pièges à l'entrée de la Dordogne, nous avons supprimé les mailles concernées du champ de calcul en modifiant la bathymétrie (maille 1, 2, 3 et 4, voir fig.V.32). Les mailles en dessous de celles supprimées, à l'entrée de la Dordogne, ne sont pas visibles. L'explication est que le module graphique de PV-WAVE (comme nous l'avons expliqué au chapitre III, paragraphe « champ d'application et bathymétrie ») ne prend pas en charge la visualisation de données (ou mailles) disposées en une dimension.

V.4.2.2.2 - Bilans sédimentaires

Les bilans sédimentaires calculés suite à cette modification sont présentés sur la figure V.31. On note une stabilisation accrue de la courbe des matières en suspension dont la masse augmente de façon significative. Le gain en fin de simulation par rapport à celle de référence est d'environ 1.04 millions de tonnes.

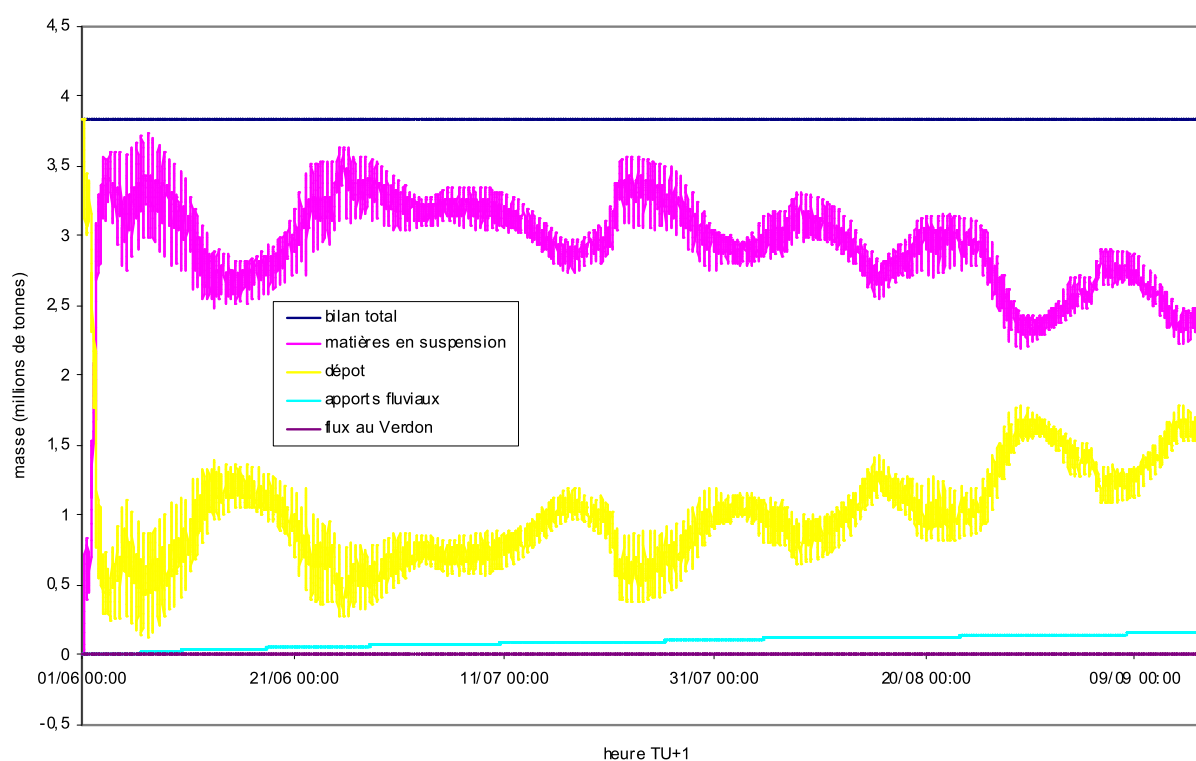


Fig.V.31- Bilans sédimentaires après modification de la bathymétrie.

V.4.2.2.3 - Piégeage des sédiments

La carte (fig.V.32) et le tracé de la vase (fig.V.33) montrent l'apparition de nouveaux pièges (mailles 6 et 10) et le maintien d'autres déjà existants (mailles 5, 7, 8, 9 et 11). L'emplacement du dépôt réversible des sédiments (fig.V.32 et V.34) est conservé pour les mailles 12 et 14.

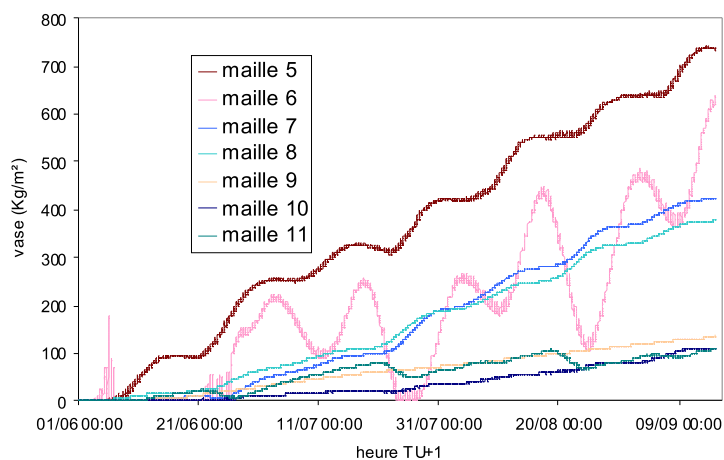


Fig.V.33- Piégeage des sédiments (vase) dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.32 pour repérer les mailles).

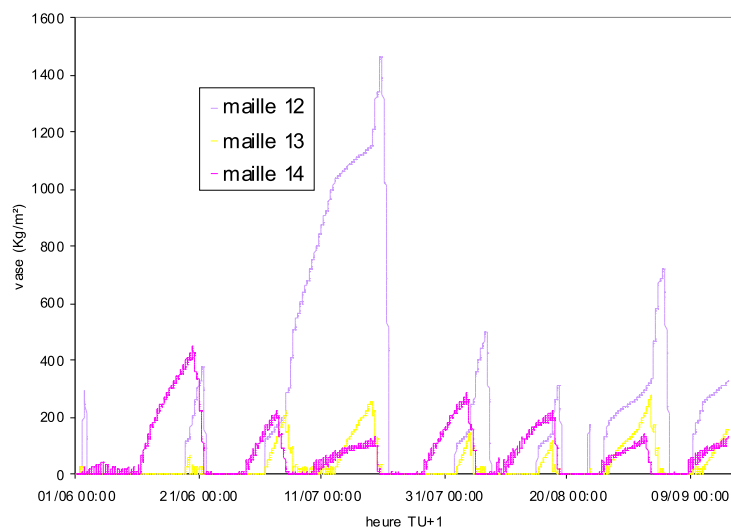


Fig.V.34- dépôt réversible des sédiments dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.32 pour repérer les mailles).

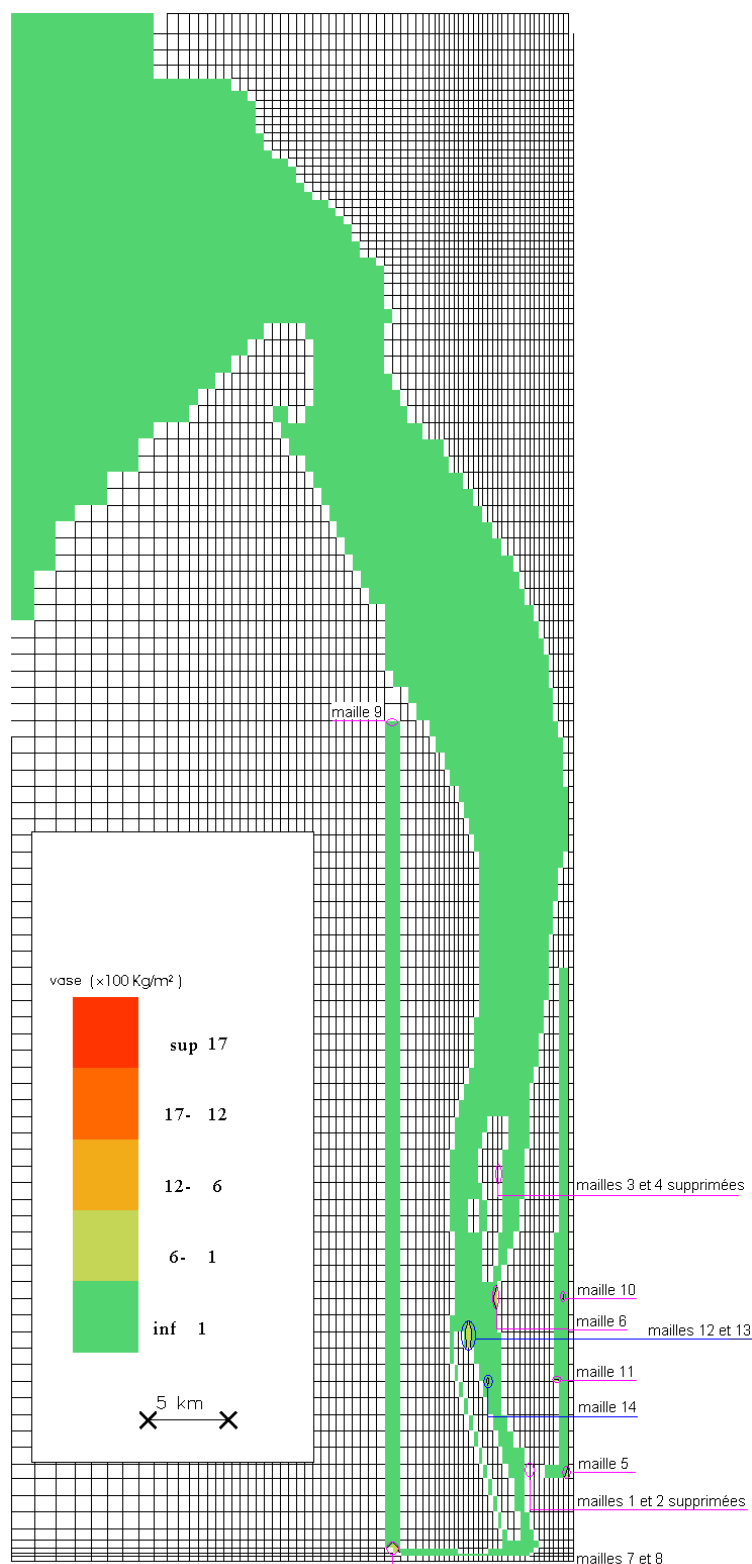


Fig.V.32- Carte du dépôt des sédiments en fin de simulation (le 15/09/2005 à 00 :00).

V.4.2.2.4 - Distribution de la concentration des matières en suspension

La concentration des matières en suspension en surface (fig.V.35), est proche de celle constatée avec la bathymétrie initiale, cependant, elle diminue à droite des îles ($< 0.7 \text{ g l}^{-1}$). La concentration près du fond subit des changements conséquents, matérialisés par une baisse de la concentration en aval des îles ($< 3 \text{ g l}^{-1}$), et son augmentation à l'entrée de la Garonne ($> 8 \text{ g l}^{-1}$) (voir cercles sur fig.V.36). Ces observations sont valables en vive-eau au moment du maximum de jusant à Pauillac (voir annexe III).

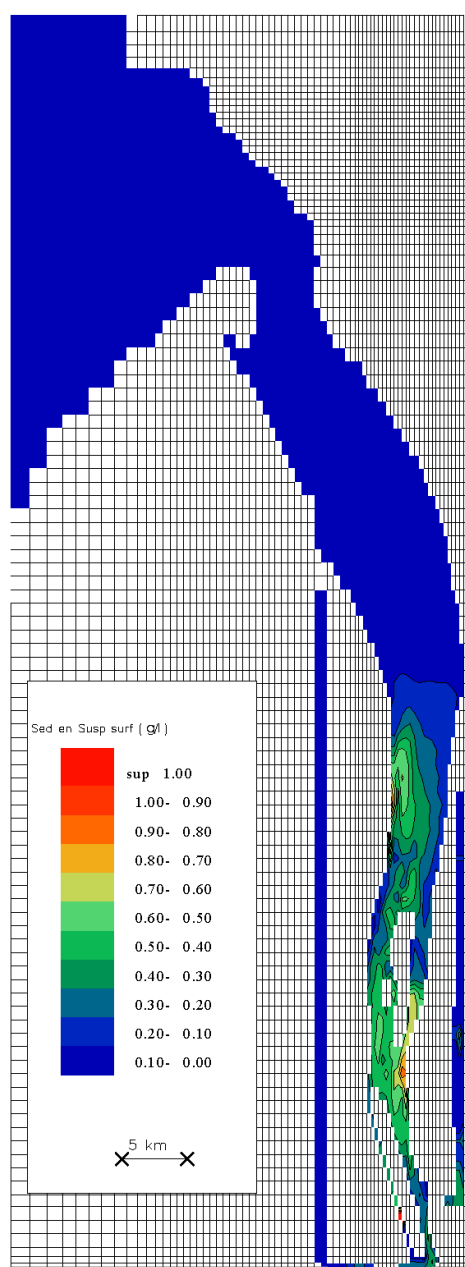


Fig.V.35- Concentration des matières en suspension en surface après modification de la bathymétrie (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40.

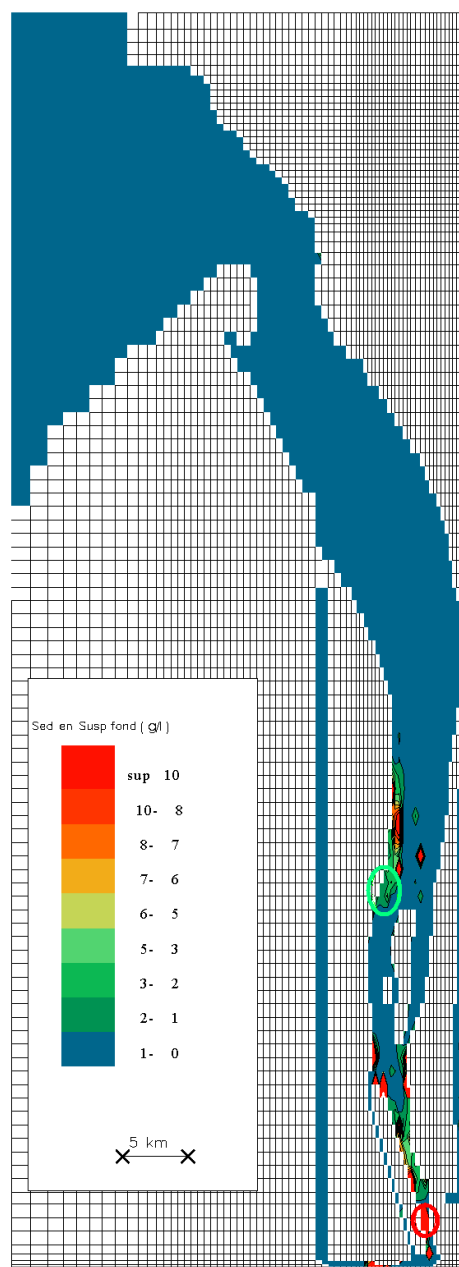


Fig.V.36- Concentration des matières en suspension près du fond après modification de la bathymétrie (unité g/l). Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40. Cercle vert : diminution de la concentration ; cercle rouge : augmentation de la concentration.

Le profil vertical montre une diminution de la concentration sur la colonne d'eau entre le PK 10 et le PK 20 (fig.V.47) par rapport à la simulation avec la bathymétrie initiale.

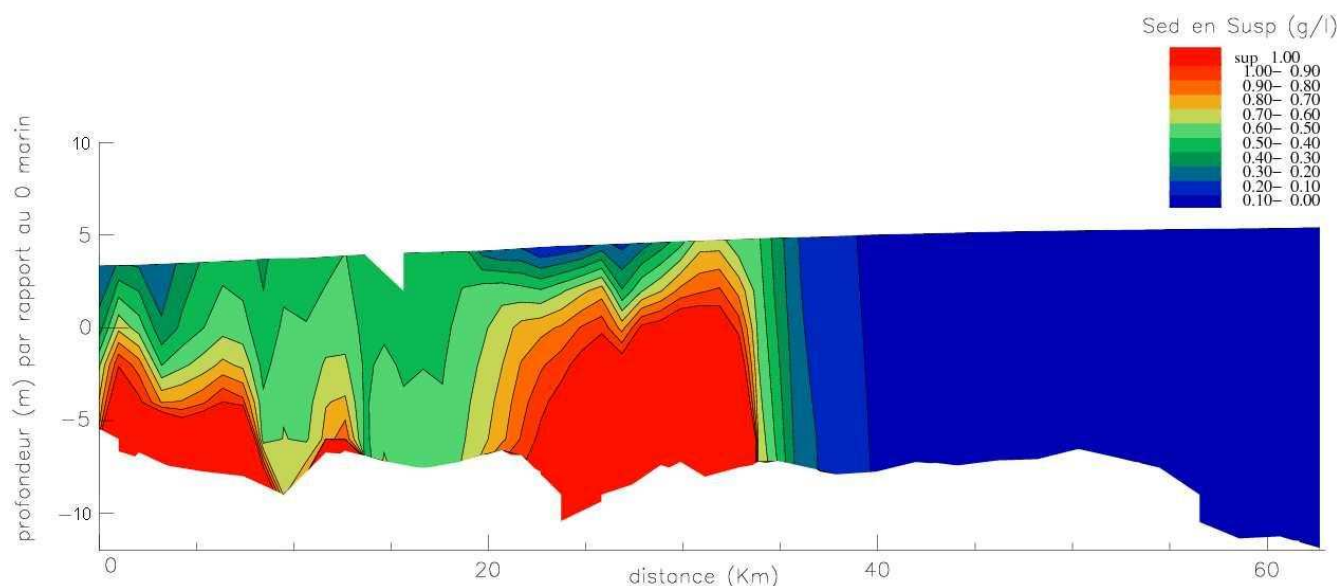


Fig.V.37- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont vers l'aval de l'estuaire après modification de la bathymétrie (unité g/l). Echelle correspondant à la carte de concentration en surface. Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40.

V.4.2.3 –La contrainte critique d'érosion

V.4.2.3.1 –Choix du paramétrage

La contrainte critique d'érosion est formulée de la façon suivante : $\tau_{ce} = k_{ce} \cdot C_{sed}$

Avec k_{ce} : une constante ($m^2 s^{-2}$)

C_{sed} : la concentration des sédiments superficiels au fond ($kg m^{-3}$)

La constante d'origine k_{ce} ($0.0015 m^2 s^{-2}$) a été proposée par *Le Hir* en 2002. Nous l'avons diminuée à $0.0012 m^2 s^{-2}$, de façon à augmenter la masse des matières en suspension par érosion du sédiment déposé. Nous présenterons dans ce qui suit les résultats de simulation avec le paramétrage modifié et nous reproduirons à titre de comparaison les résultats avec le paramétrage d'origine.

V.4.2.3.2 – Bilans sédimentaires

La diminution du paramétrage atténue le différentiel entre les phases d'érosion et de dépôt (fig.V.38 et V.39). En fin de simulation, le gain en masse de matières en suspension est d'environ 0.25 millions de tonnes.

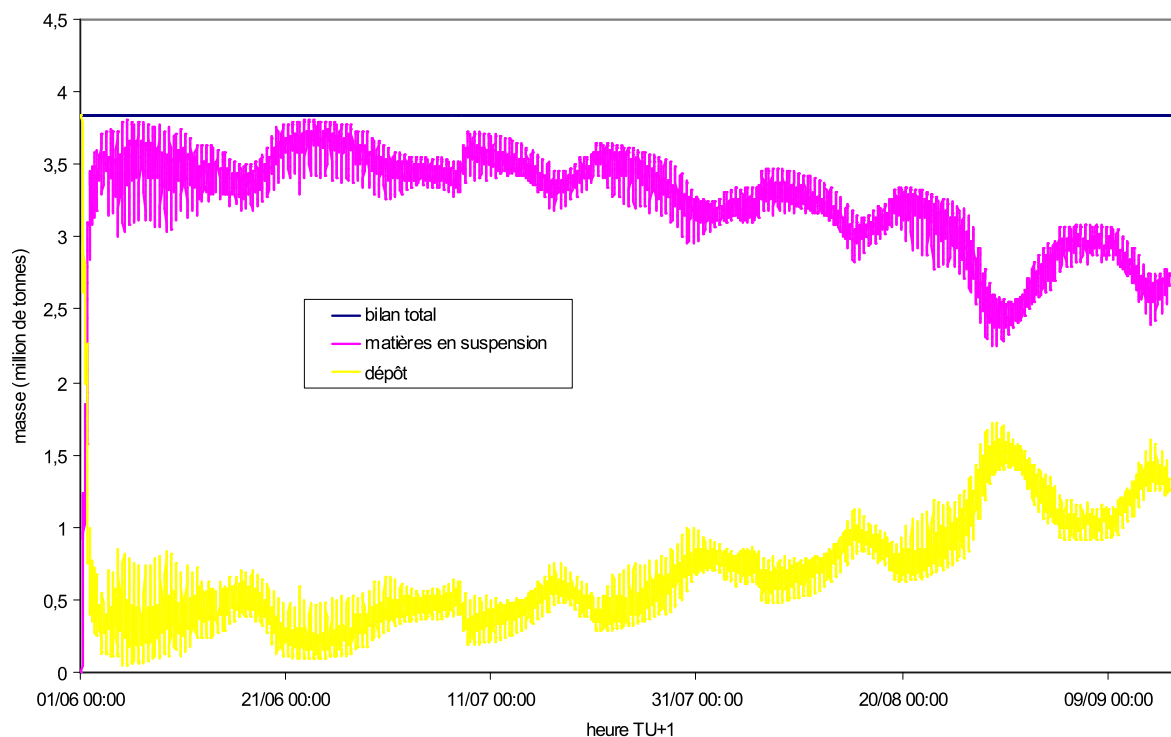


Fig.V.38- Bilans sédimentaires dans le système estuarien de la Gironde du 1^{er} juin au 15 septembre 2005. Valeur du paramétrage $k_{ce} = 0.0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

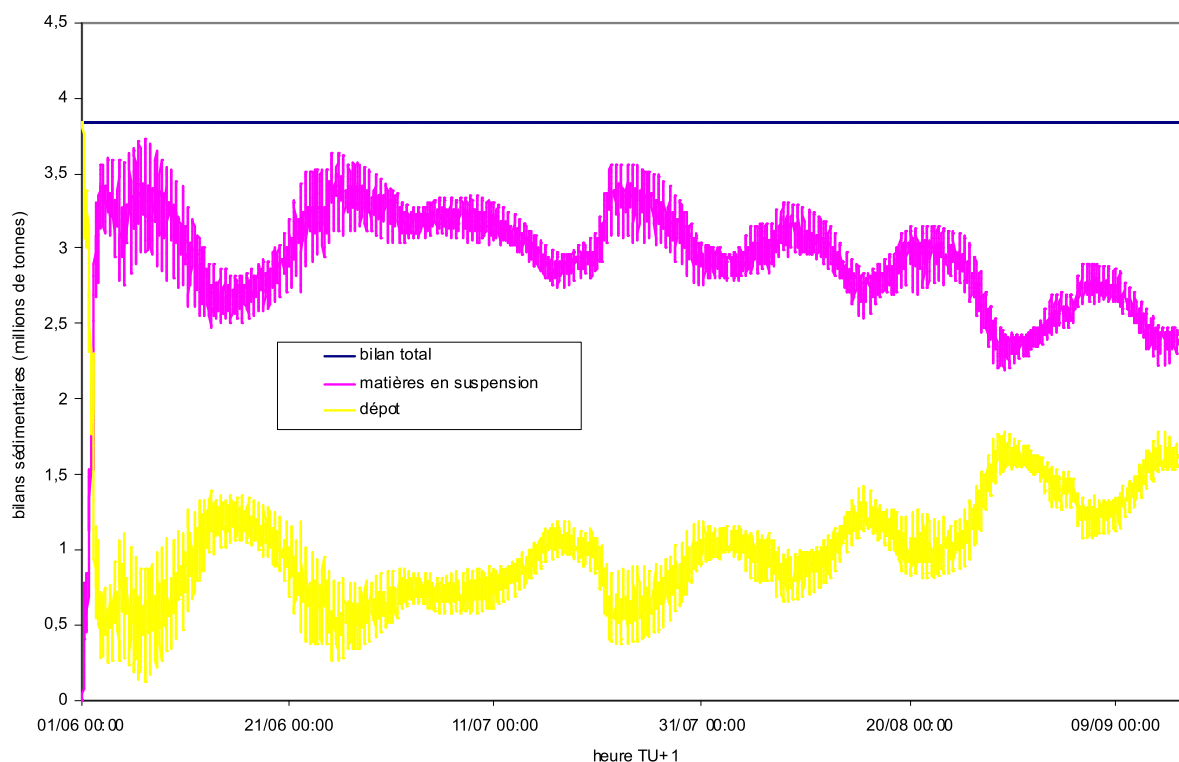


Fig.V.39- Bilans sédimentaires de référence. Valeur d'origine du paramétrage $k_{ce} = 0.0015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

V.4.2.3.3 – Piégeage des sédiments

Les mailles à piège identiques ont été affectées de la même couleur et de la même numérotation pour les deux simulations. Les zones à fort dépôt restent quasiment identiques (fig.V.40, V.41, V.44

et V.45), néanmoins on note une diminution significative de la masse des sédiments au niveau des mailles 5 (de 736 kg m^{-2} à 580 kg m^{-2}) en Dordogne et 6 (de 635 kg m^{-2} à 280 kg m^{-2}) en bas des îles lorsque le paramétrage k_{ce} diminue. En ce qui concerne le dépôt réversible des sédiments, la maille 12 est la seule à conserver un taux de remplissage-vidage important (fig.V.42, V.43, V.44 et V.45), avec néanmoins une baisse plus ou moins forte des sédiments déposés lors des remplissages.

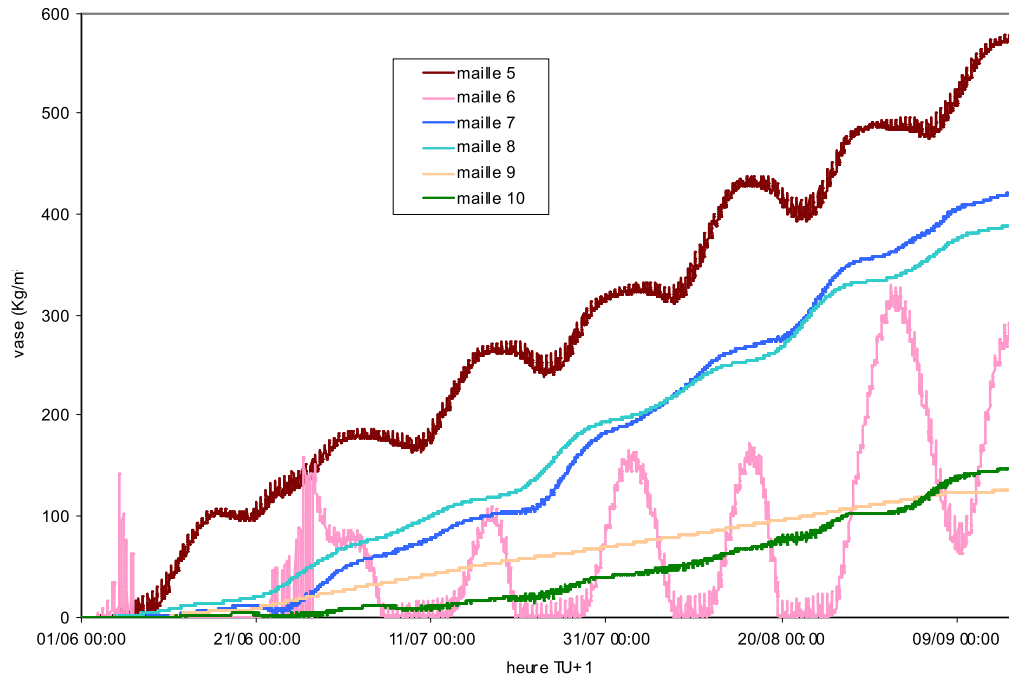


Fig.V.40- Piégeage des sédiments (vase) dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.44 pour repérer les mailles). Valeur du paramétrage $k_{ce} = 0.0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

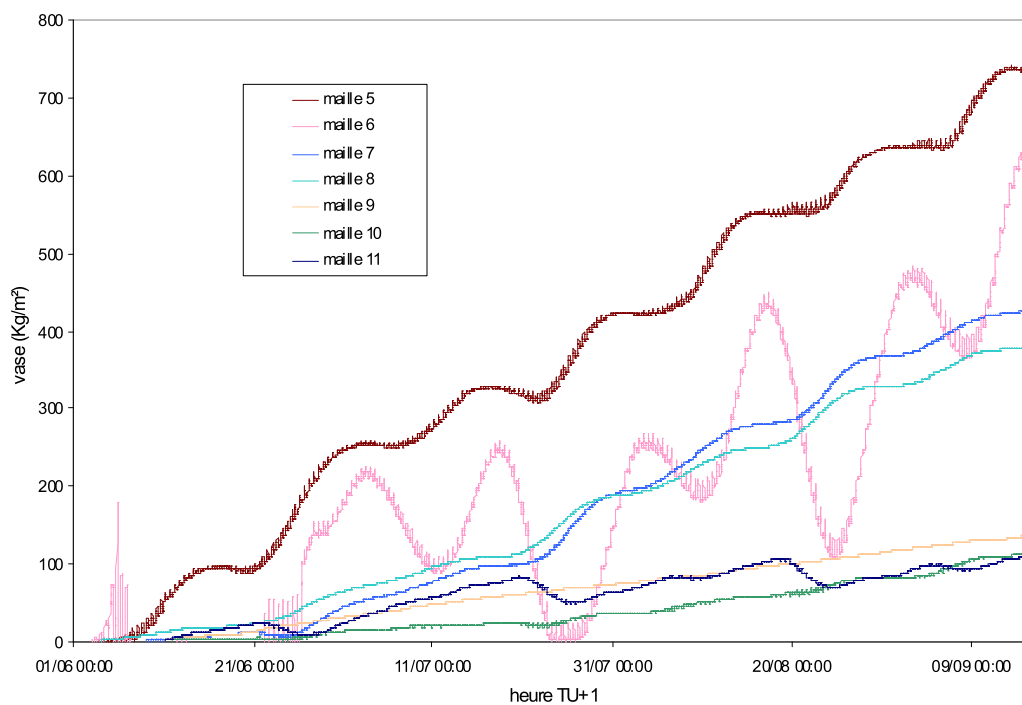


Fig.V.41- Simulation de référence (valeur d'origine du paramétrage $k_{ce} = 0.0015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$) : piégeage des sédiments (vase) dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.45 pour repérer les mailles).

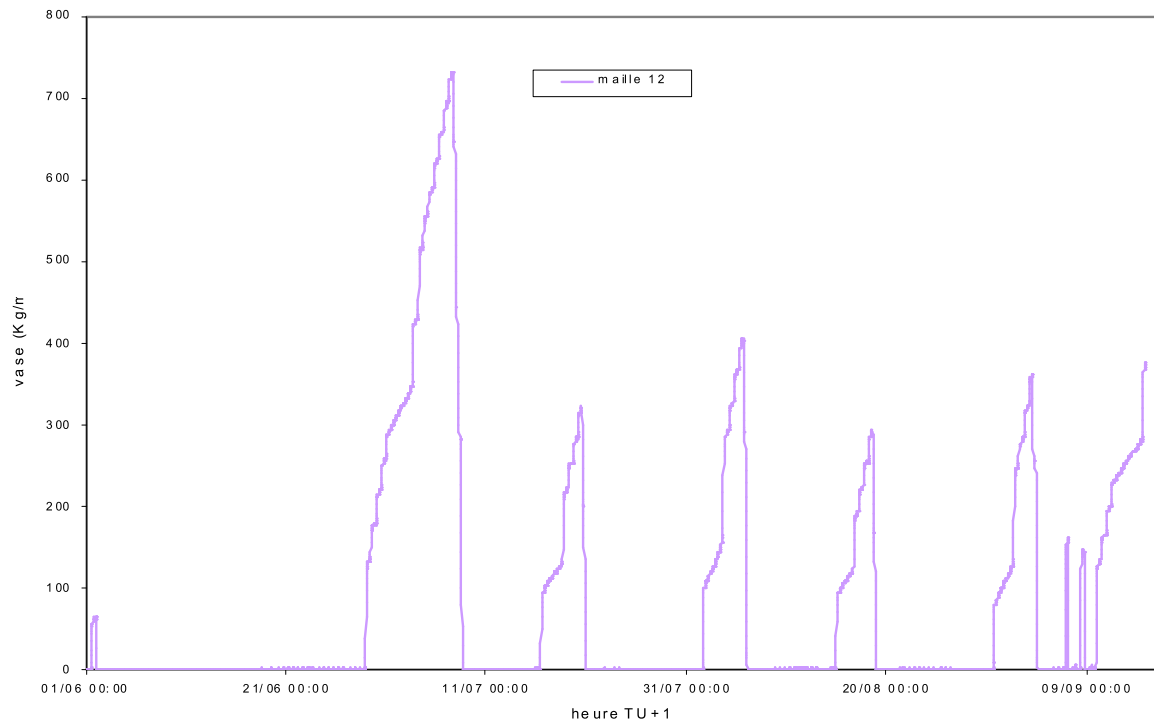


Fig.V.42- Dépôt réversible des sédiments dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.44 pour repérer les mailles). Valeur du paramétrage $k_{ce}=0.0012\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$.

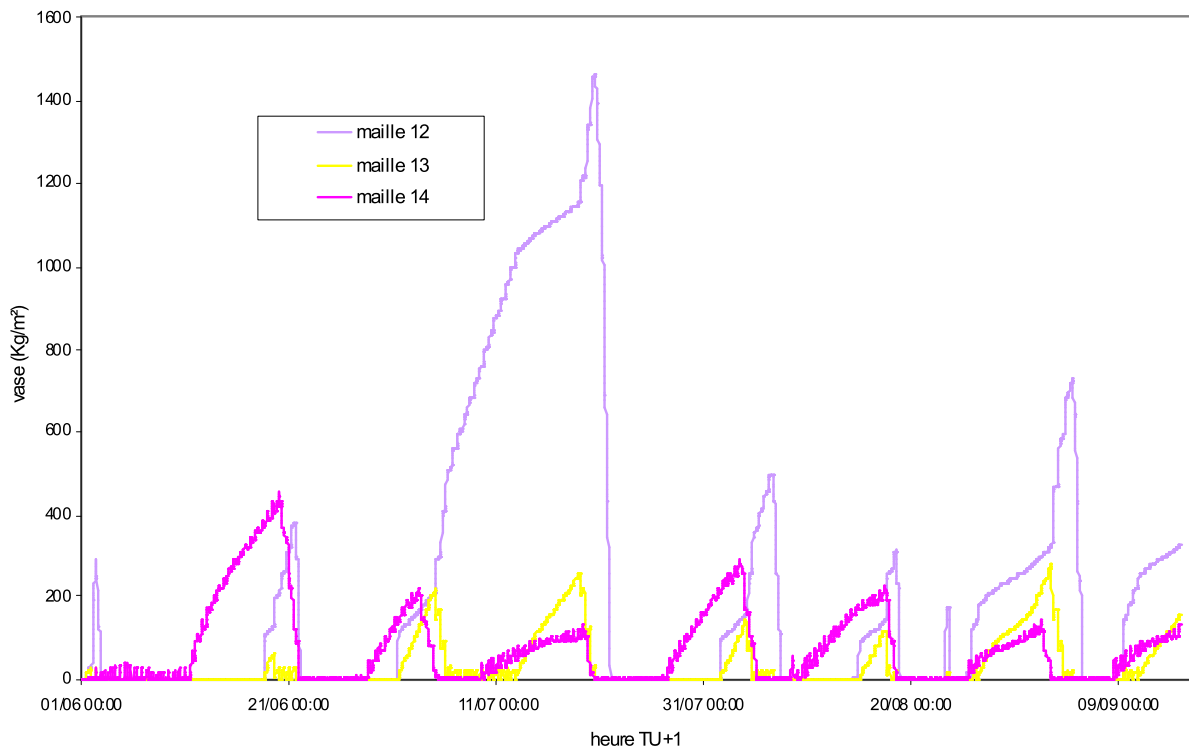


Fig.V.43- Simulation de référence (valeur d'origine du paramétrage $k_{ce}=0.0015\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$) : dépôt réversible des sédiments dans le système estuarien de la Gironde (voir carte fig.V.45 pour repérer les mailles).

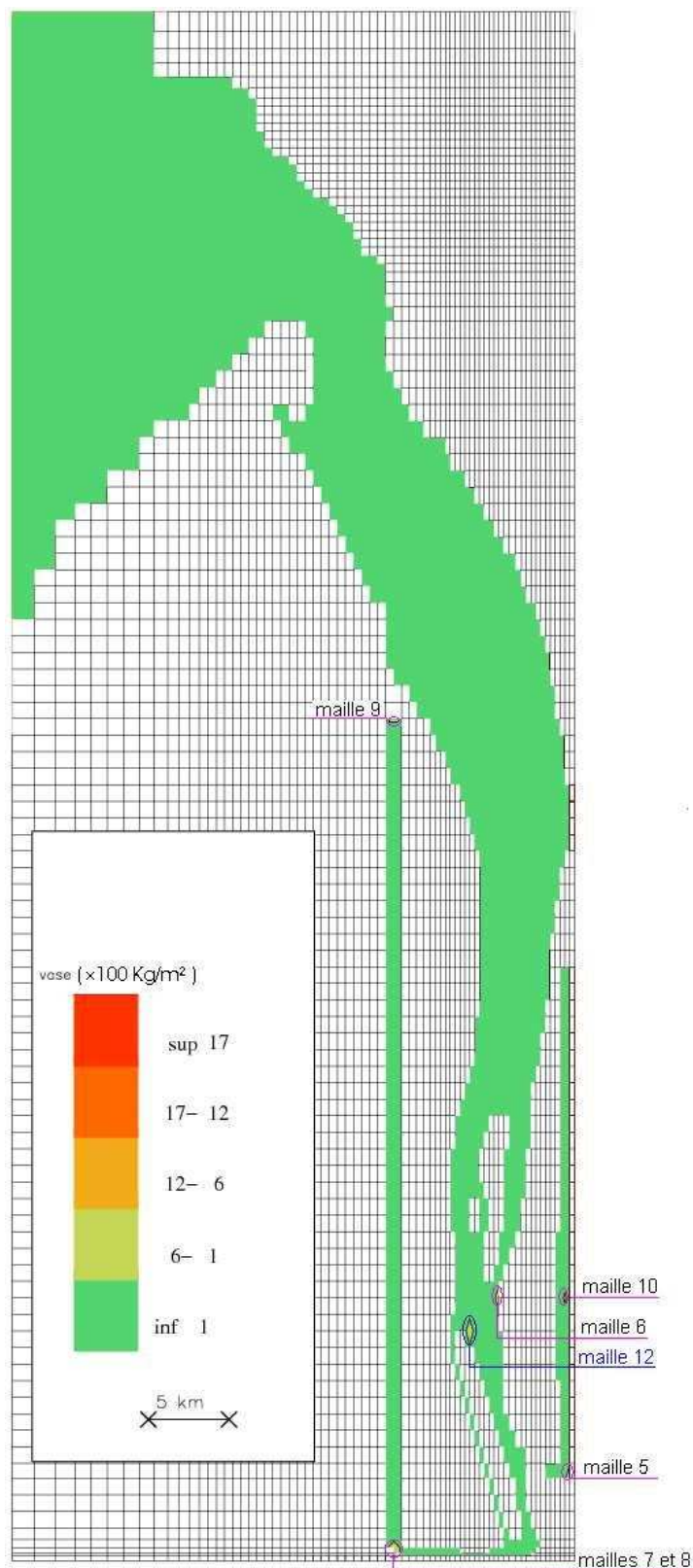


Fig.V.44- Carte du dépôt des sédiments en fin de simulation (le 15/09/2005 à 00 :00). Valeur du paramétrage $k_{ce} = 0.0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

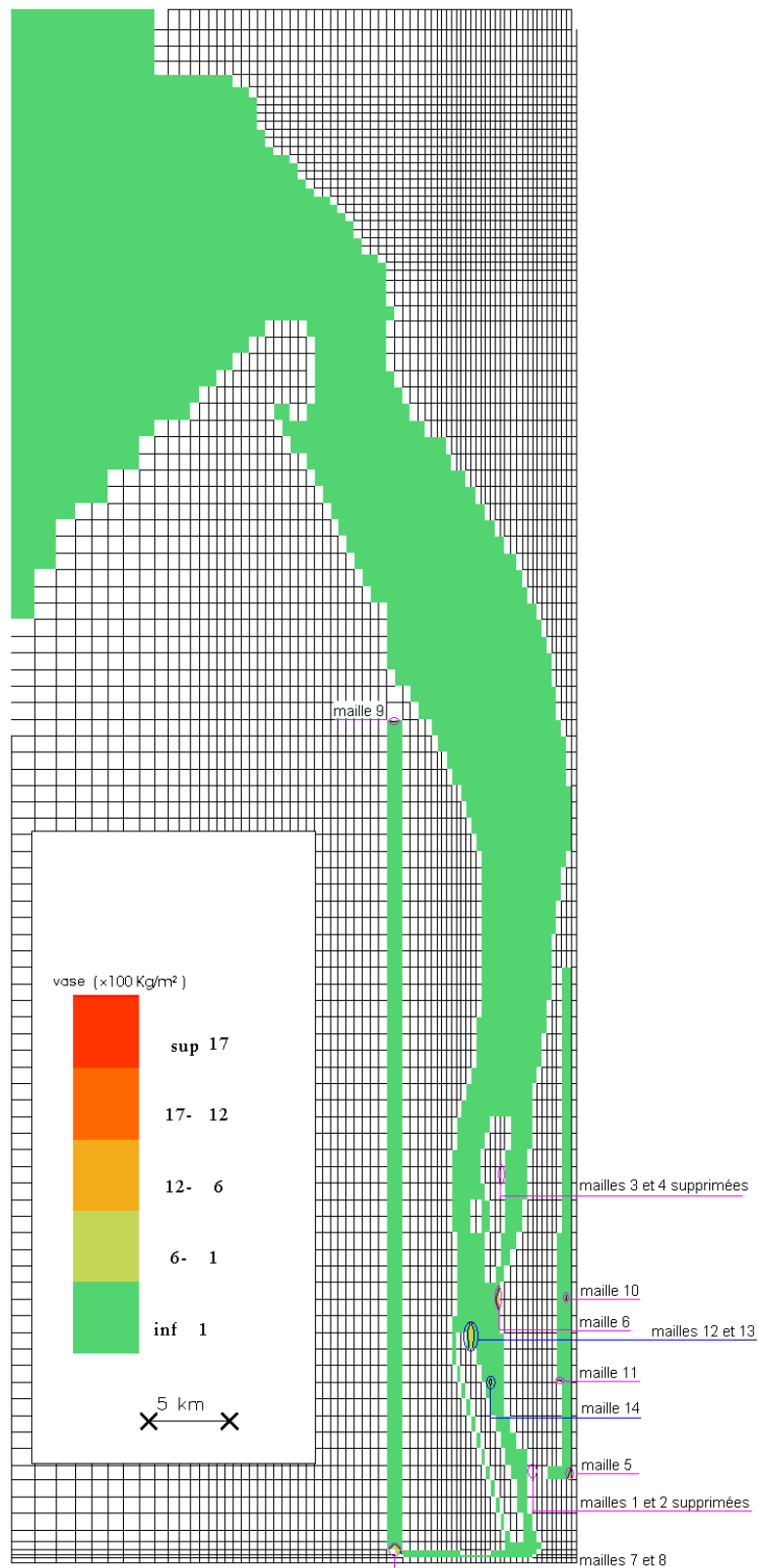


Fig.V.45- Simulation de référence au même moment. Valeur d'origine du paramétrage $k_{ce} = 0.0015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

V.4.2.3.4 – Distribution de la concentration des matières en suspension

Près du fond, la concentration des matières en suspension augmente au niveau de Pauillac (> 8 g l⁻¹) (cercle rouge sur la figure V.46) lorsque k_{ce} diminue (fig.V.46 et V.47).

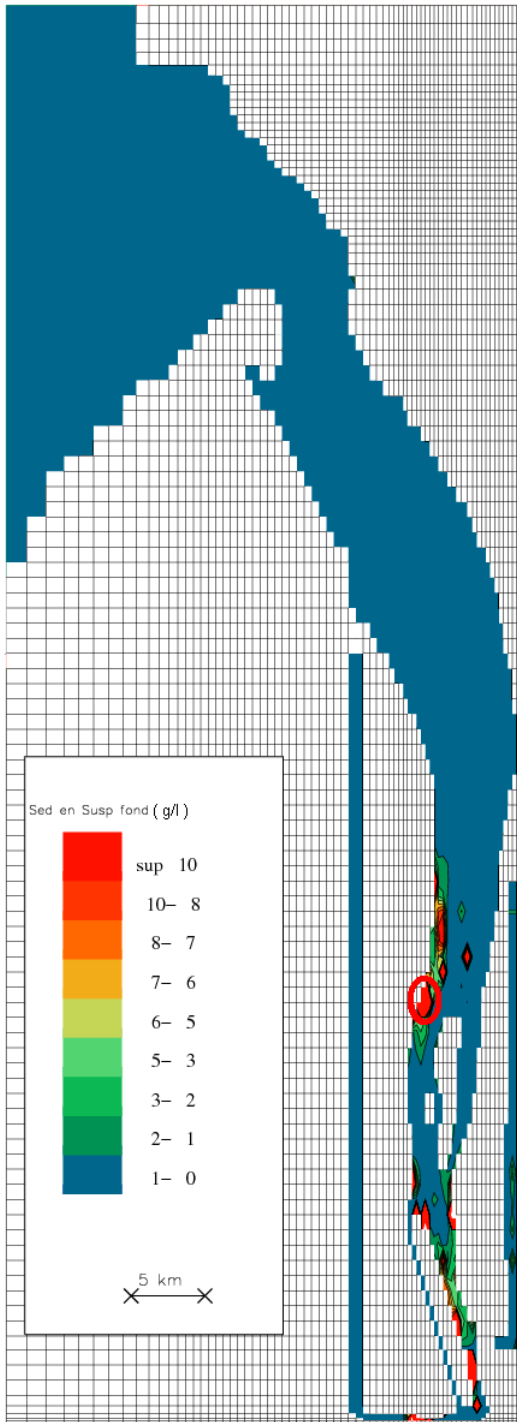


Fig.V.46- Concentration des matières en suspension près du fond. Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16 :40. Valeur du paramétrage $k_{ce}= 0.0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

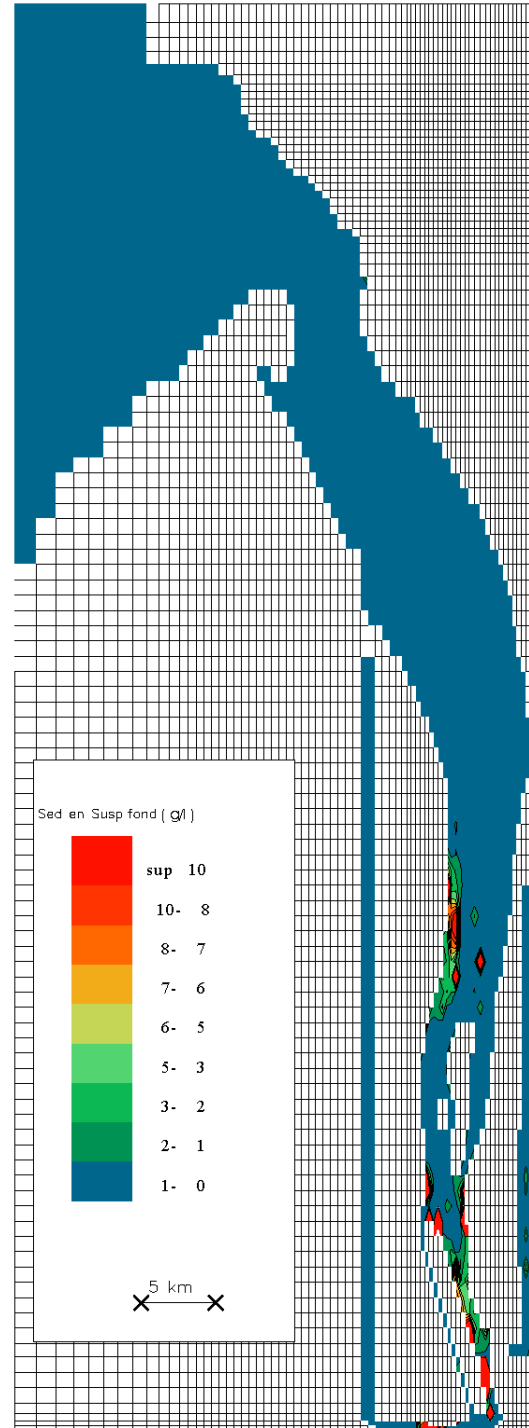


Fig.V.47- Simulation de référence au même moment. Valeur d'origine du paramétrage $k_{ce}= 0.0015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En surface, la diminution du paramètre k_{ce} n'a pas d'effet palpable sur la concentration des matières en suspension (fig.V.48 et V.49).

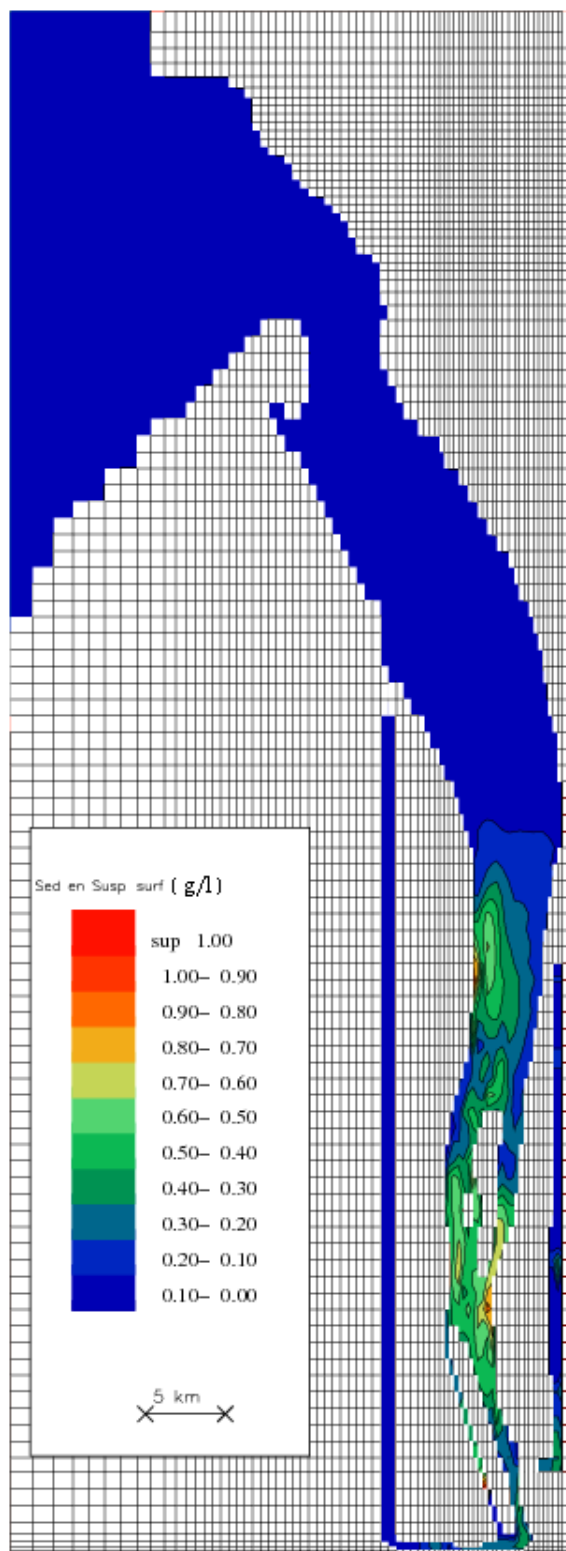


Fig.V.48- Concentration des matières en suspension en surface. Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16 :40. Valeur du paramétrage $k_{ce}= 0.0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

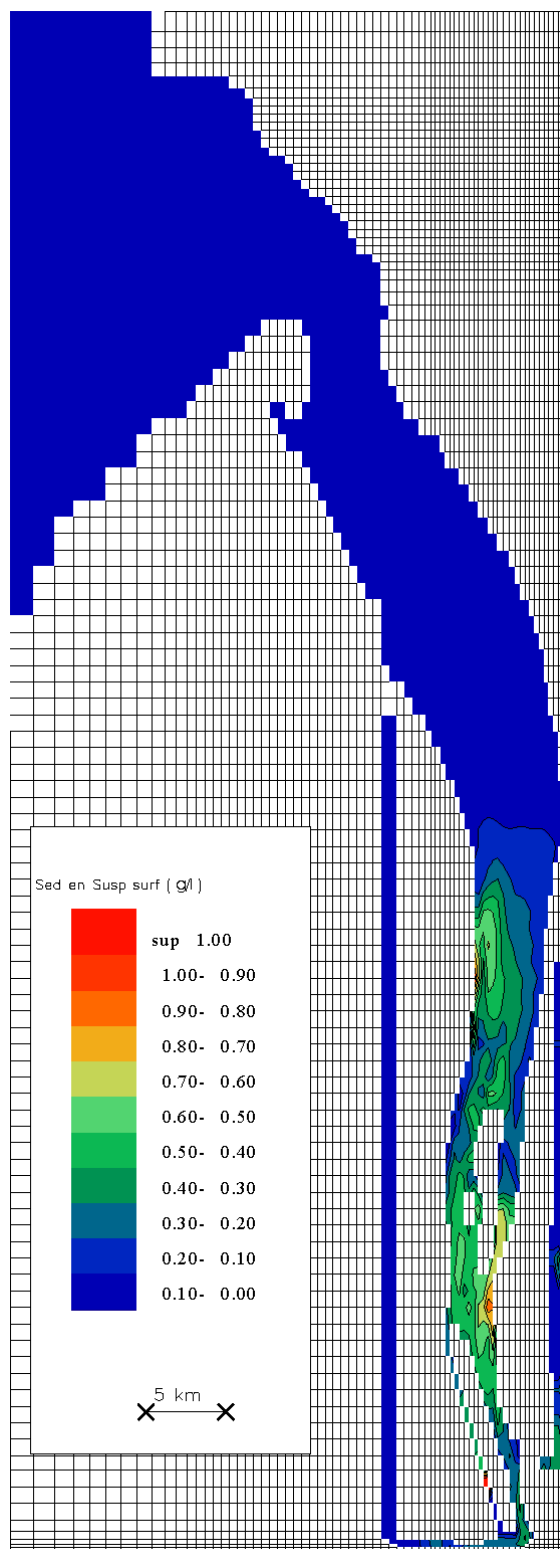


Fig.V.49- Simulation de référence au même moment. Valeur d'origine du paramétrage $k_{ce}= 0.0015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Les profils verticaux montrent une augmentation de la concentration d'une gamme sur la colonne d'eau entre le PK 12 et le PK 22 lorsque k_{ce} diminue (fig.V.50, V.51).

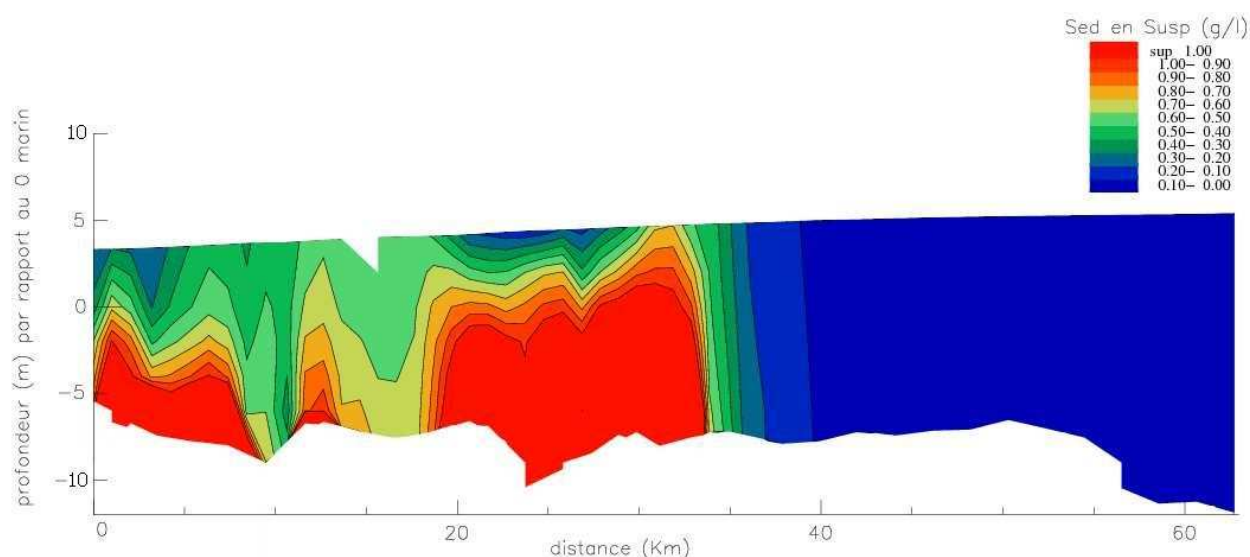


Fig.V.50- Profil vertical de la concentration des matières en suspension de l'amont vers l'aval de l'estuaire (unité g/l). Echelle correspondant à la concentration des matières en suspension en surface. Période de vive-eau au moment du maximum de flot à Pauillac. Date : 21/08/2005 à 16:40. Valeur du paramétrage $k_{ce} = 0.0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

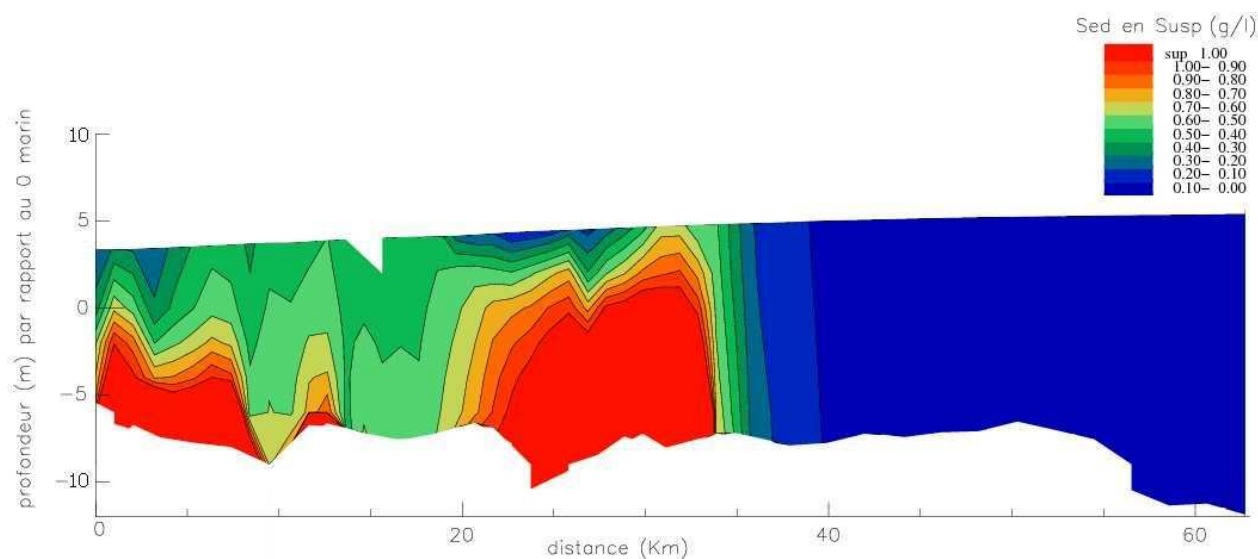


Fig.V.51- Simulation de référence au même moment. Valeur d'origine du paramétrage $k_{ce} = 0.0015 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

V.4.3 – Les vitesses de chute des matières en suspension

V.4.3.1 – Choix du paramétrage

Nous rappelons la présentation des vitesses de chute abordée au chapitre III.

Il existe deux classes de matières en suspension implantées dans le modèle SIAM-3D. La première classe dotée d'une vitesse de chute plus élevée que la seconde, a une masse initiale de 3.84 millions de tonnes. Celle-ci augmente avec les apports continus du débit fluvial définis par une concentration fixe de 0.06 g l^{-1} . En outre, le débit fluvial introduit dans le domaine de calcul, les matières en suspension de deuxième classe d'une concentration de 0.04 g l^{-1} .

La formulation des vitesses de chute telle qu'elle est codée dans le modèle SIAM-3D, a été proposée par *Le Hir et al. (2001)* :

$$w_s = \max \left(w_{\min}; \frac{w_{\max}}{2} \times \min(2; C) \right) \quad \text{pour } C \leq C_{W_{\max}} \quad [1]$$

$$w_s = w_{\max} \left(\max \left(0.05; \frac{1 - \beta_1 C^{\beta_2}}{1 - \beta_1 C_{W_{\max}}^{\beta_2}} \right) \right)^{4.65} \quad \text{pour } C_{W_{\max}} < C \leq C_{cr} \quad [2]$$

$$w_s = \gamma_1 C^{\delta_1} \quad \text{pour } C > C_{cr} \quad [3]$$

avec

C : la concentration des matières en suspension.

$C_{W_{\max}}$, C_{cr} : les concentrations au début et à la fin de l'entravement.

$w_{\max}, w_{\min}$: les vitesses de chute maximale et minimale.

$\beta_1, \beta_2, \gamma_1, \delta_1$: des constantes empiriques.

Pour les deux classes de matières en suspension : $C_{W_{\max}} = 20 \text{ kg m}^{-3}$, $C_{cr} = 60 \text{ kg m}^{-3}$,

$\beta_1 = 0.085$, $\beta_2 = 0.5$.

Pour les matières en suspension de première classe : $w_{\max} = 0.002 \text{ m s}^{-1}$, $w_{\min} = 0.0005 \text{ m s}^{-1}$.

Pour les matières en suspension de deuxième classe : $w_{\max} = 0.001 \text{ m s}^{-1}$, $w_{\min} = 0.0001 \text{ m s}^{-1}$.

Les vitesses $w_{\max}$, $w_{\min}$ représentent l'intervalle d'évolution de la vitesse de chute.

γ_1, δ_1 sont déterminées en résolvant l'équation $w_s = \gamma_1 C^{\delta_1}$ en deux points distincts, le premier point est : $(w_{s_{cr}}, C_{cr})$ avec $w_{s_{cr}}$ la valeur de w_s lorsque C est égal à C_{cr} (formule 2), le deuxième point imposé est $w_s = 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ lorsque $C = 500 \text{ kg m}^{-3}$.

Nous obtenons ainsi, $\gamma_1 = 120.06$, $\delta_1 = -3.36$ pour les matières en suspension de première classe,

et $\gamma_1 = 15.74$, $\delta_1 = -3.04$ pour les matières en suspension de deuxième classe.

Les valeurs évoquées ci-dessus représentent le paramétrage d'origine de la vitesse de chute.

Nous avons tracé l'évolution de la vitesse de chute (fig.V.52) telle que formulée par les équations 1, 2 et 3. Pour une meilleure visibilité du champ de variabilité des vitesses, les axes des tracés sont discrétisés en échelle logarithmique.

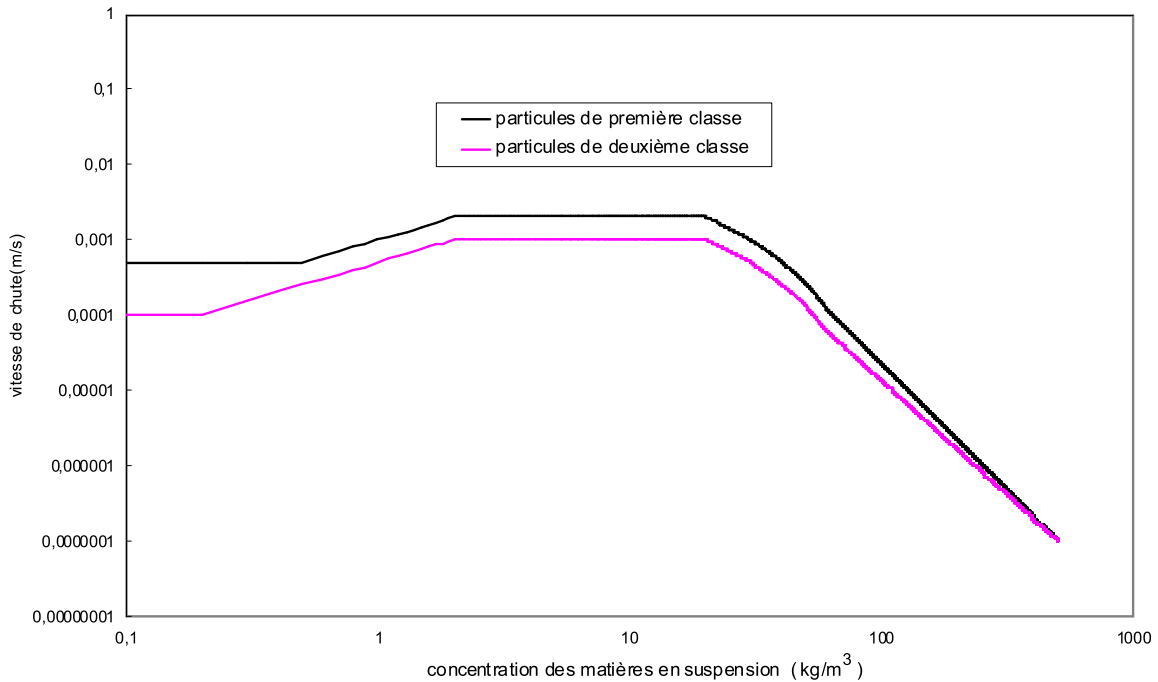


Fig.V.52- Evolution des vitesses de chute en fonction de la concentration des matières en suspension.

Afin d'étudier l'impact de la vitesse de chute sur la dynamique sédimentaire, nous projetons de réduire la vitesse de chute de la première classe de particule, dans le but d'augmenter la concentration des matières en suspension en surface. La masse totale des particules de deuxième classe étant négligeable face à la première, nous n'aborderons que cette dernière. De nombreux tests sur le modèle, ont montré l'importance de la vitesse de chute sur la dynamique sédimentaire en terme de capacité de transport et de répercussion sur la concentration des matières en suspension. Afin de reproduire au mieux les concentrations mesurées à Pauillac (mesures MAREL, voir paragraphe «V.3.1»), nous avons effectué plusieurs tests qui nous ont permis de choisir, à postériori, les vitesses limites suivantes :

$$w_{max} = 0.00038 \text{ m s}^{-1}, w_{min} = 0.000095 \text{ m s}^{-1}.$$

Afin de saisir la dimension des particules soumises à ces vitesses de chute, nous allons calculer leur

diamètre en utilisant la loi de Stokes :
$$w = \frac{g(\rho_p - \rho_e)D^2}{18\eta}$$

Avec :

w : la vitesse de chute des particules (m s^{-1})

g : l'accélération de pesanteur égale à 9.81 m s^{-2}

ρ_p : la masse volumique des particules (kg m^{-3})

ρ_e : la masse volumique de l'eau égale à 1000 kg m^{-3}

D : le diamètre des particules (m)

η : la viscosité dynamique de l'eau égale à 10^{-3} Pas.s

Nous en déduisons le diamètre :
$$D = \sqrt{\frac{18\eta w}{g(\rho_p - \rho_e)}}$$

Cependant, pour déterminer ce paramètre, il nous faut choisir la masse volumique des particules qui se présentent sous forme d'agrégats dans le milieu naturel.

Il n'existe pas de mesures de la masse volumique de ces agrégats dans l'estuaire de la Gironde, par conséquent nous avons pris la valeur mesurée de 1060 kg m^{-3} dans l'estuaire de la Tamar (*Sternberg et al., 1999 ; Fennessy et al., 1994*)

Nous donnons ci-dessous, sous forme de tableau, les diamètres calculés (après conversion en micron) en fonction des différentes vitesses de chute limites (w_{max}, w_{min}) d'origines et modifiées :

	$w_{max} (\text{m s}^{-1})$		$w_{min} (\text{m s}^{-1})$	
	0.002	0.00038	0.0005	0.000095
$D (\mu)$	247	108	124	54

Ainsi, les diamètres de 247μ et 124μ rentrent dans la catégorie des macroflocs (*Verney, 2006*).

Cela étant dit, le calcul des diamètres nous donne un ordre de grandeur acceptable de la taille des agrégats qui de facto valide le choix du paramétrage des vitesses de chute d'origines ou modifiées.

Nous allons voir maintenant, dans quelle mesure la baisse des vitesses de chute influence le transport sédimentaire, et par conséquent, quelles retombées cela induit sur la concentration des matières en suspension.

Nous aborderons, en premier, les comparaisons entre les concentrations mesurées et celles calculées avec les deux paramétrages, d'origine et modifié. Nous verrons ensuite, comment analyser ces résultats au travers des bilans sédimentaires et des distributions de concentration.

Nous proposerons, enfin, deux hypothèses afin d'expliquer l'étalement du bouchon vaseux et l'évacuation progressive des sédiments constitutifs de celui-ci.

V.4.3.2 – Concentration des matières en suspension à Pauillac

Nous avons constaté précédemment (paragraphe « V.3.1 ») que la concentration des matières en suspension calculée en surface est faible par rapport aux mesures. Nous rappelons ci-dessous

(fig.V.53), le graphique de comparaison entre calcul et mesures. Avec une vitesse de chute plus faible (fig.V.54), nous avons essayé de caler la concentration calculée sur celle mesurée, ce qui est le cas jusqu'aux environs du 24 juillet. Au delà, la concentration calculée diminue progressivement et atteint des valeurs de l'ordre de 0.6 g l^{-1} en fin de simulation. Nous allons voir au point suivant comment expliquer cette diminution.

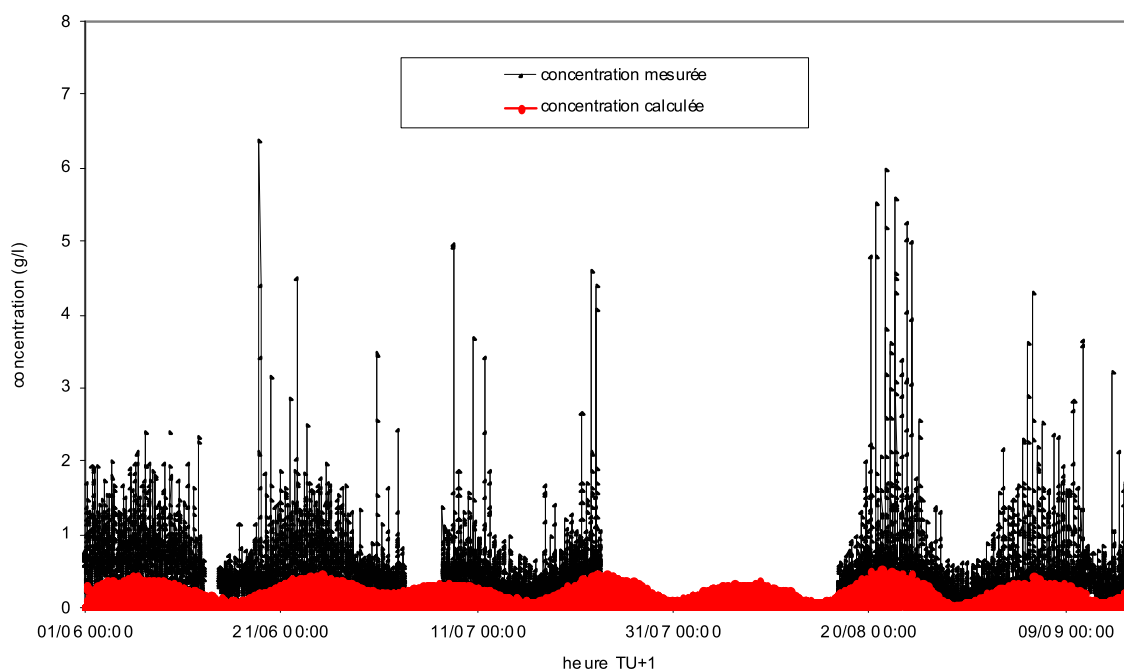


Fig.V.53- Concentration des matières en suspension en surface à Pauillac du 1^{er} juin au 15 septembre 2005. Valeurs d'origines du Paramétrage : $w_{max} = 0.002 \text{ m s}^{-1}$, $w_{min} = 0.0005 \text{ m s}^{-1}$.

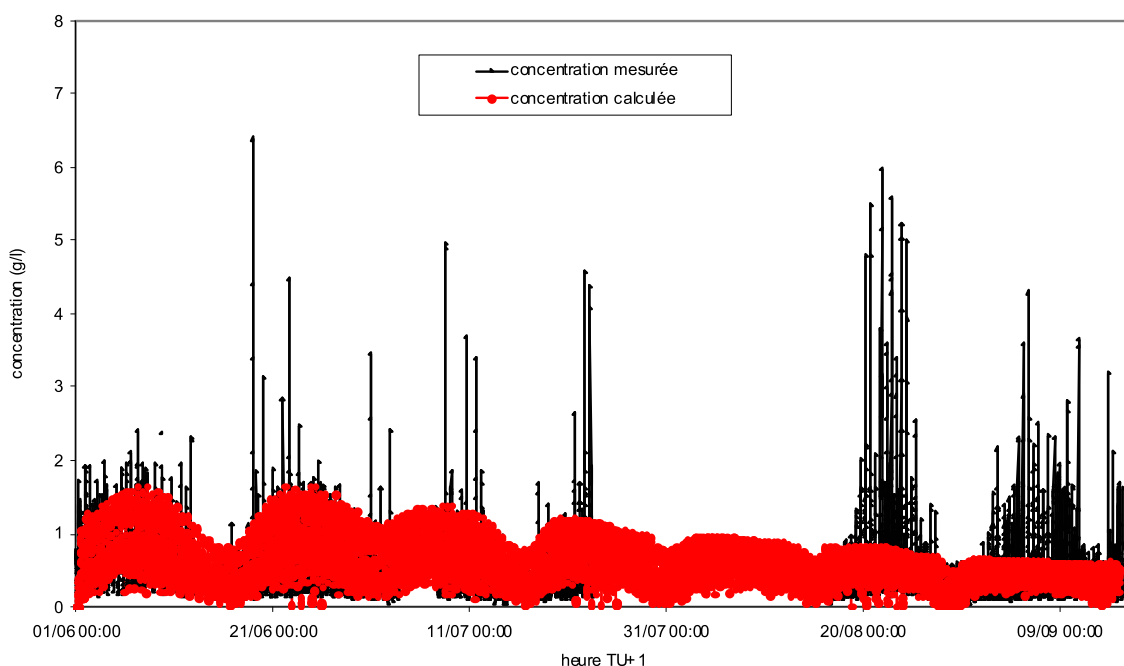
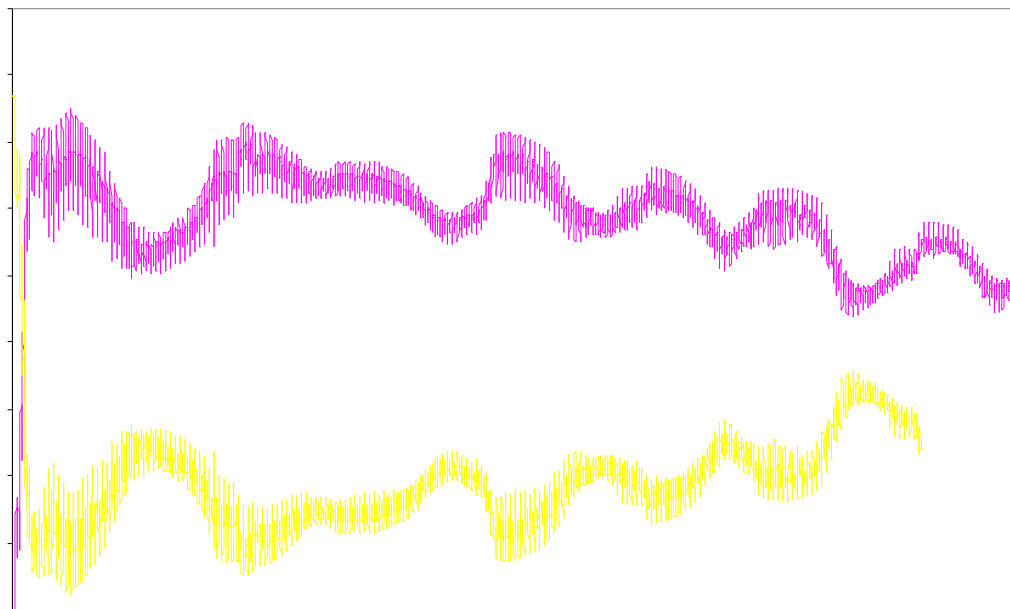


Fig.V.54- Concentration des matières en suspension en surface à Pauillac du 1^{er} juin au 15 septembre 2005. Valeurs du Paramétrage : $w_{max} = 0.00038 \text{ m s}^{-1}$, $w_{min} = 0.000095 \text{ m s}^{-1}$.

V.4.3.3 – Bilans sédimentaires

Avec le paramétrage d'origine (fig.V.55), la chute de la masse des matières en suspension est due au dépôt des sédiments dans l'estuaire, les flux au Verdon et sur le plateau continental restent faibles (< 0.045 millions de tonnes).



La diminution de la vitesse de chute (fig.V.56) entraîne l'évacuation hors de l'estuaire (flux au Verdon) d'une masse importante de matières en suspension (2.5 millions de tonnes), et qui plus est atteint le large (flux sur le plateau) en grande quantité (1.8 millions de tonnes) ; le flux au Verdon étant de même ordre de grandeur que le dépôt avec une évolution similaire, prouve que celui-ci est situé hors de l'estuaire.

ERROR: syntaxerror
OFFENDING COMMAND: %ztokenexec_continue

STACK:

/GpPBeg
-dictionary-
3
false