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

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

*RM1-E2-3 : EXPLOITATION DU MODELE : HYPOTHESES DU CALCUL
HYDROSEDIMENTAIRE DES OPERATIONS DE DRAGAGE*

ARTELIA Eau & Environnement

Activité MARITIME

6 rue de Lorraine

38130 - Echirolles

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

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



Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Cette étude a bénéficié du soutien financier de :



N° 8 71 3583 - Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde
 Etape 2 : diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins
 RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : modélisation des opérations de clapage et remise en suspension sur une année réelle complète

1	1 ^{ère} diffusion	RWR	FGN	LTT/TSD/SLX	14/03/2016
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

SOMMAIRE

1. PREAMBULE	1
2. RAFFINEMENT DU MODELE SUR LES ZONES D'IMMERSION	2
3. MODELISATION DES PROCESSUS VASEUX	4
3.1. VITESSE DE CHUTE ET FLUX DE DEPOT	4
3.1.1. MESURES DE VITESSE DE CHUTE EN GIRONDE	4
3.1.2. MODELISATION DE LA VITESSE DE CHUTE	7
3.1.3. FLUX DE DEPOT	10
3.2. FLUX D'EROSION	10
3.2.1. CONTRAINTE CRITIQUE D'EROSION	11
3.2.2. CONSTANTE DE PARTHENIADES	13
3.3. TASSEMENT ET CONSOLIDATION DES DEPOTS	14
3.3.1. MODELISATION EN COUCHES DE DEPOT	14
3.3.2. MODELISATION DU TASSEMENT ET DE LA CONSOLIDATION	15
3.3.3. AJUSTEMENT DES PARAMETRES DU MODELE DE TASSEMENT ET CONSOLIDATION	16
4. DESCRIPTION DES FORÇAGES SUR L'ANNEE D'EXPLOITATION 2008-2009 ET METHODE DE MODELISATION ASSOCIEE	20
4.1. CHOIX DE L'ANNEE HYDROLOGIQUE ET DE LA REPRESENTATIVITE DES CLAPAGES SUR CETTE PERIODE	20
4.1.1. ANALYSE DE LA REPRESENTATIVITE DES ANNEES	20
4.1.1.1. Représentativité hydrologique des différentes années	20
4.1.1.2. Représentativité des opérations de dragages-rejets	21
4.1.1.3. Bilan de la représentativité des années 2008, 2009 et 2013 au regard des opérations de dragage/rejet	24
4.1.2. DISPONIBILITES DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE	24
4.1.2.1. Données bathymétriques disponibles	24
4.1.2.2. Données hydrologiques disponibles – données de forçage	26
4.1.2.3. Données disponibles de rejet	27
4.1.3. CONCLUSION	27
4.2. FORÇAGES HYDRO-METEOROLOGIQUES MODELISES	28
4.2.1. FORÇAGE EN DEBIT	28
4.2.2. IMPOSITION DU NIVEAU ET DES VITESSES A LA FRONTIERE MARITIME	28
4.2.3. FORÇAGE EN VENT	29
4.2.4. FORÇAGE EN HOULE	29
4.3. MODELISATION DES CLAPAGES	31
4.3.1. TYPE DE SEDIMENT MODELISES	32

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.3.2. CLAPAGES SUR LES ZONES D'IMMERSION	37
4.3.2.1. ANALYSE DE LA PRATIQUE ET DES DONNEES	37
4.3.2.2. REPARTITION DES MASSES DE SABLE ET VASE POUR CHAQUE CLAPAGE	39
4.3.2.3. MODELISATION D'UN CLAPAGE	42
4.3.3. RELOCALISATION PAR DRAGAGE A INJECTION D'EAU (JETSSED)	45
4.3.3.1. ANALYSE DE LA PRATIQUE ET DES DONNEES	45
4.3.4. REJET PAR CONDUITE AU FIL DE L'EAU	47
4.3.4.1. ANALYSE DE LA PRATIQUE ET DES DONNEES	47

RÉFÉRENCES	49
-------------------	-----------

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques hydrologiques des années 2006 à 2013	20
Tableau 2 : Représentativité des volumes clapés sur les 4 principales zones de clapage pour les années 2008, 2009 et 2013	23
Tableau 3 : Bilan - représentativité des années 2008, 2009 et 2013 au regard des opérations de dragage/rejet	23
Tableau 4 : Fiabilité du modèle pour les années 2008, 2009 et 2013 au regard de la bathymétrie	26
Tableau 5 : Disponibilité des données de forçage	26
Tableau 6 : Disponibilité des données de rejet	27
Tableau 7 – Epures de houle propagées	31

FIGURES

Figure 1 : Visualisation du maillage	2
Figure 2 : Compilation des mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en eau calme (Lan Anh Van et al., 2012 [Ref1.])	4
Figure 3 : Compilation de mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en eau calme (Lan Anh Van et al., 2012 [Ref1.])	5
Figure 4 : Compilation de mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en milieu turbulent (thèse Lan Anh Van, 2013 [Ref.6])	6
Figure 5 : Compilation de mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en milieu turbulent (Thèse Lan Anh Van, 2013 [Ref.6])	7
Figure 6 : Loi de Manning et Dyer (2007)[Ref.7] en fonction de la contrainte tracé sur un graphique de vitesse de chute fonction de la concentration pour plusieurs autres estuaires (complété d'après Verney pour la Seine, 2006)[Ref.8]	8
Figure 7 : Loi de vitesse de chute proposée pour le modèle 3D	9
Figure 8 : Loi de vitesse de chute proposée pour le modèle 3D sur un graphique de vitesse de chute en fonction de la concentration pour plusieurs autres estuaires (complété d'après Verney pour la Seine, 2006)[Ref.8]	9
Figure 9 : Loi de contrainte d'érosion en fonction de la concentration du sédiment	13
Figure 10 : Compilation des mesures de la constante de Partheniades pour une vase de Gironde (Lan Anh Van et al., 2012 [Ref1.])	14
Figure 11 : Schéma du fonctionnement du modèle multicouche	15
Figure 12 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Van Lahn [Ref.6]), Concentration initiale 77g/l, hauteur initiale 0,207m	16
Figure 13 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Migniot (1987) [Ref.11]), Concentration initiale 200g/l, hauteur initiale 0,75m	17
Figure 14 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Migniot (1987) [Ref.11]), Concentration initiale 200g/l, hauteur initiale 0,95m	17
Figure 15 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Migniot (1987) [Ref.11]), Concentration initiale 200g/l, hauteur initiale 1,5m	18
Figure 16 : Vitesse de sédimentation en fonction de la concentration calée pour une vase de Gironde, et mesures de Sanchez et al (2004) [Ref.20] pour une vase de Loire	19
Figure 17 : Volumes annuels dragués, par passe	22
Figure 18 : Volumes annuels clapés, par zone de vidage	23
Figure 19 : Levés bathymétriques réalisés sur les zones de vidage	25
Figure 20. Débit journalier de la Garonne et le Dordogne – octobre 2008 à septembre 2009	28

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Figure 21. Vent (intensité et direction de provenance) – période 2008-2009	29
Figure 22. Position du point 9467 base de donnée Homère	30
Figure 23. Houle au point 9467 Homère – période 2008-2009	30
Figure 24 : Méthodologie de de répartition des 3 classes de sable sur l'exemple de la Passe Ouest aval	33
Figure 25 : Granulométrie de la passe de Cussac et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]	34
Figure 26 : Granulométrie de la passe de Lamena et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]	35
Figure 27 : Granulométrie de la passe de la Chambrette et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]	35
Figure 28 : Granulométrie de la Passe Ouest Aval et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]	36
Figure 29 : Granulométrie de la Passe Ouest Amont et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21] ..	36
Figure 30 : Extrait des données - drague aspiratrice en marche Pierre Lefort	37
Figure 31 : Extrait des données - drague à benne La Macqueline	37
Figure 32 : Extrait des données - drague aspiratrice en marche Samuel de Champlain	38
Figure 33 : Série chronologique des clapages modélisés	38
Figure 34 : Provenance des sables et vases clapées en 2008 - 2009	41
Figure 35 : Masses cumulées de sable et vase draguées en 2008 - 2009	42
Figure 36 : Gauche : bathymétrie modélisée après 18 mois, Droite : comparaison des volumes restés en place [Ref.22]	43
Figure 37 : Gauche : comparaison des profils bathymétriques sur MASED, Droite : comparaison des profils bathymétriques sur MABIO [Ref.22]	43
Figure 38 : Schéma de décomposition d'un clapage et schéma de décomposition d'un clapage modélisé [Ref.22]	44
Figure 39 : Schéma de répartition des masses d'un clapage suivant la vitesse du courant ambiant [Ref.22]	44
Figure 40 : Schéma de la modélisation géométrique d'un clapage [Ref.22]	45
Figure 41 : déplacement temporel du point de rejet modélisé pour simuler les activités de Jetsed	47
Figure 42 : Positionnement du point de rejet modélisé pour simuler les activités de rejet par conduite au fil de l'eau	48

1. PREAMBULE

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

La mission comprend 4 étapes :

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

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

- Rapport RM1-E2-2 qui correspond à la description de la construction, du calage hydraulique et de la validation hydraulique du modèle (14/10/2015) ;
- Rapport RM1-E2-3 qui correspond à la présentation des hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage ;
- Rapport RM1-E2-4 qui correspond à la présentation des résultats du calcul hydrosédimentaire

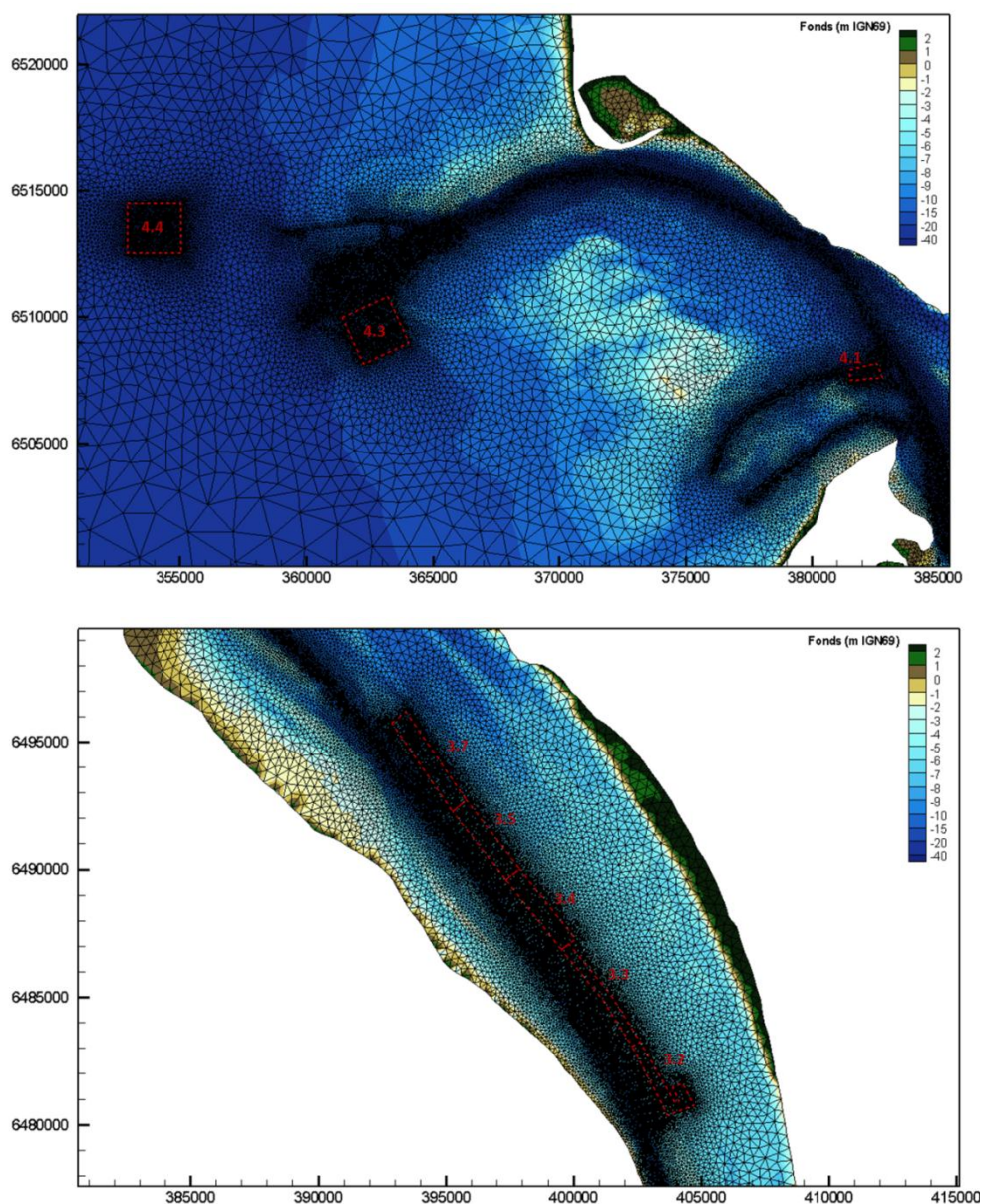
Le présent document correspond au rapport RM1-E2-3. Il est issu de la compilation des différents mémos produits dans le cadre de la construction du modèle. Les hypothèses ont fait l'objet d'une validation des MO et du scientifique Aldo SOTTOLICHIO avant lancement du calcul :

- **Mémo « Exploitation du modèle – Analyse et proposition de choix de l'année modélisée », sept. 2015 ;**
- **Mémo « choix des paramètres pour la modélisation des processus vaseux », oct. 2015 ;**
- **Mémo « Analyse des clapages, des remises en suspension et prise en compte dans la simulation », oct. 2015.**

2. RAFFINEMENT DU MODELE SUR LES ZONES D'IMMERSION

Afin de représenter correctement la dispersion des sédiments et le dépôt des sédiments lors des phases d'immersion, le modèle utilisé pour le calage a été raffiné localement sur les zones d'immersions. La taille de maille est de 50 m sur l'ensemble des zones d'immersion. Le modèle exploité est composé de plus de 102 000 nœuds sur l'horizontal et de 14 plans sur la verticale.

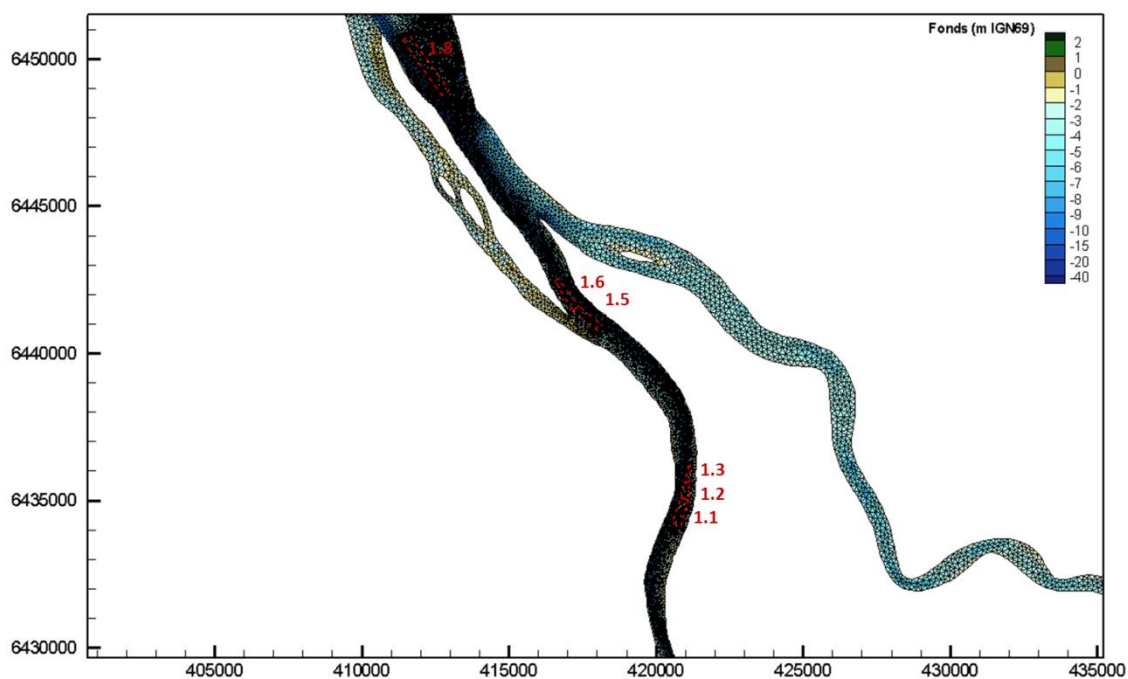
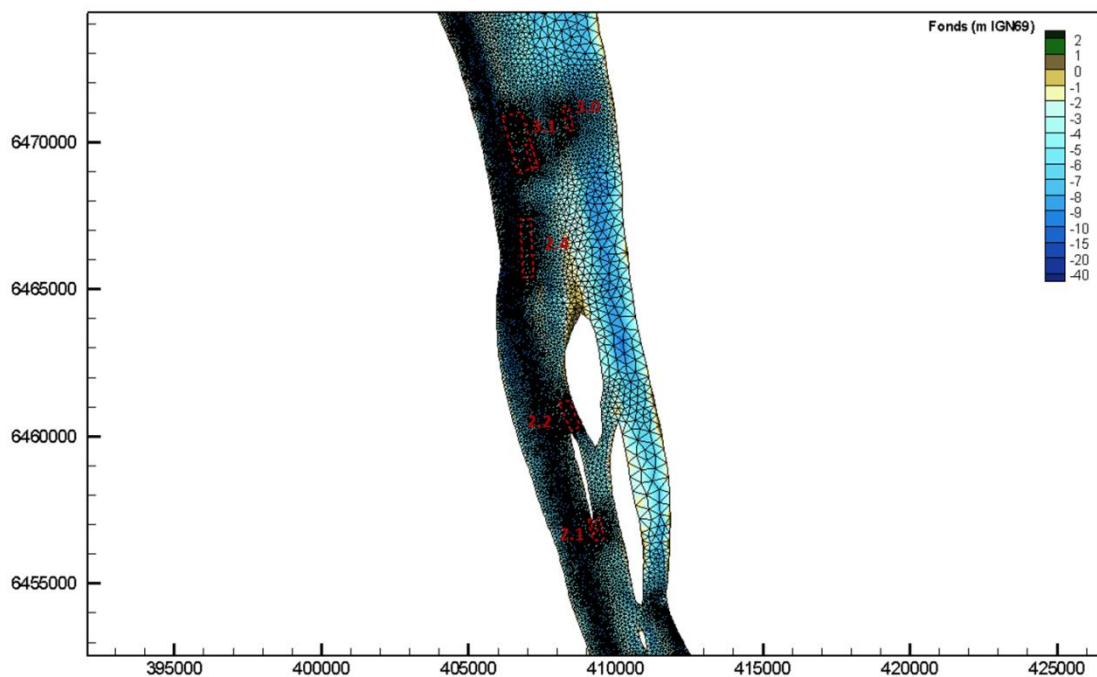
Figure 1 : Visualisation du maillage



Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage



3. MODELISATION DES PROCESSUS VASEUX

Suite au calage hydrodynamique et salinité du modèle 3 D (Rapport RM1-E2-2), la modélisation des processus vaseux a été activée dans le modèle 3D. Les éléments de ce chapitre sont issus du mémo « Plan de gestion des sédiments de dragage de la Gironde – Choix des paramètres pour la modélisation des processus vaseux » (14/10/2015).

Ces processus vaseux répondent de plusieurs lois qui sont empiriques pour la plupart, et pour lesquelles des paramètres dépendant du type de vase sont à renseigner.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer le paramétrage utilisé dans chacune des lois.

Trois processus sont à paramétrer :

- La vitesse de chute (implicitement le flux de dépôt) ;
- Le flux d'érosion (contrainte critique d'érosion et coefficient de Partheniades) ;
- Le tassement. (modèle de tassement)

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur toute la bibliographie qui traite de la rhéologie des vases de la Gironde. Elle a été rassemblée en début de mission.

Rappelons également que les éléments décrits ci-après correspondent à des hypothèses d'entrée pour le calcul hydrosédimentaire représentant les opérations de clapage. Il n'a pas été réalisé de calage hydrosédimentaire du modèle.

3.1. VITESSE DE CHUTE ET FLUX DE DEPOT

3.1.1. MESURES DE VITESSE DE CHUTE EN GIRONDE

Une compilation de données de mesures de vitesses de chute pour une vase de Gironde a été proposée dans la publication Lan Anh VAN et al, 2012 (Figure 2 - [Ref 1]).

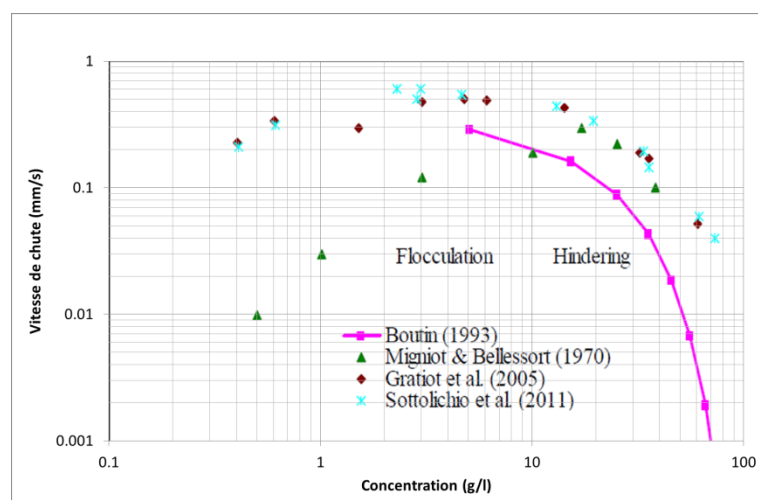


Figure 2 : Compilation des mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en eau calme (Lan Anh Van et al., 2012 [Ref1.]

La vitesse de chute d'une vase de Gironde en milieu calme a été mesurée par divers chercheurs utilisant différents procédés ou dispositifs de préparation. Elle est principalement déterminée par

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

l'analyse de la distribution verticale des concentrations de sédiment dans des dispositifs de laboratoire.

Boutin (1993) [ref.2] a utilisé des sédiments traités avec du permanganate de potassium afin de stopper l'influence de la fraction organique et a examiné la sédimentation en régime entravé. Dans les anciennes études expérimentales (par exemple Migniot & Bellessort, 1970 [Ref.3]), les auteurs n'ont pas fourni suffisamment d'informations sur les expériences (traitement préliminaire de sédiments, dispositif de test ou procédure). Les différences dans les procédures expérimentales (propriétés physiques de l'eau, provenance de la vase, traitement préliminaire des sédiments, ...) pourraient expliquer la grande variabilité dans les résultats de mesure. Migniot & Bellessort (1970) [Ref.2] ont obtenu une vitesse de chute comprise entre 0 et 0,3 mm/s pour des concentrations inférieures à 17 g/l et ont souligné la grande sensibilité de la vitesse de chute en fonction de la salinité qui affecte fortement les caractéristiques des floccs.

Dans les études expérimentales récentes telles que Gratiot et al. (2005) [Ref.4] et Sottolichio et al. (2011) [Ref.5], la vitesse de chute a été mesurée en utilisant de nouvelles technologies de mesure (Système vidéo INSSEV et OBS turbidimètre respectivement).

Dans Gratiot et al. (2005) [Ref.4], le sédiment a été traité chimiquement pour limiter les effets de matières organiques, alors que dans Sottolichio et al. (2011) [Ref.5], le sédiment naturel a été utilisé. Cependant, tous les deux donnent des résultats similaires.

Nous avons choisi de caler une première loi de vitesse de chute dite « en eau calme » (tracée en tirets bleu sur la Figure 3 ci-après) sur les mesures les plus récentes (Gratiot, 2005 [Ref.4] et Sottolichio, 2011 [Ref.5]) qui semblent être très cohérentes entre elles :

- $W_s = 0.38 \times C^{0.45}$ pour $C < 3\text{g/l}$;
- $W_s = 0.68 \times (1 - 0.008 \times C)^4$ pour $C > 3\text{g/l}$.

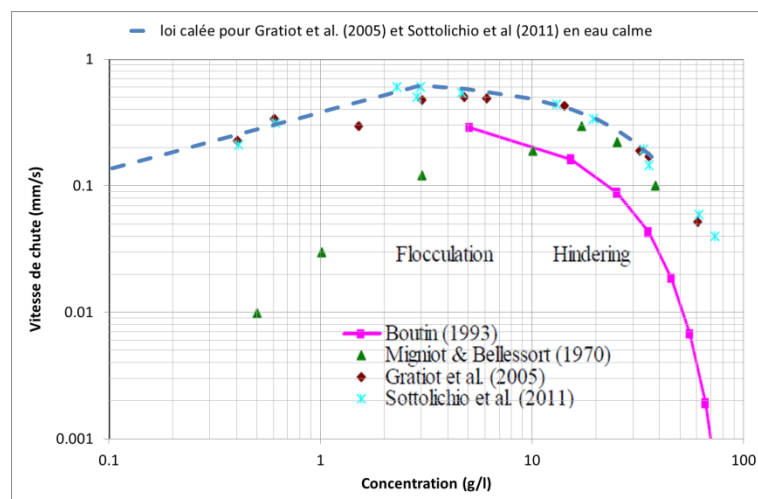


Figure 3 : Compilation de mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en eau calme (Lan Anh Van et al., 2012 [Ref1.])

La loi calculée s'arrête à 40g/l car au-dessus de cette concentration le sédiment modélisé passe dans le modèle de tassement qui sera explicité ultérieurement.

Cependant, nous savons que les caractéristiques d'un milieu dit en « eau calme » n'est que temporaire en milieu naturel, car le plus souvent il s'agit d'un milieu turbulent. Utiliser directement cette loi dans le modèle ne serait pas réaliste. Cette loi correspond plutôt à la vitesse de chute minimum à intégrer pour une concentration donnée.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Les nouvelles études expérimentales permettent justement d'étudier la vitesse de chute en milieu turbulent. L'effet de la turbulence permet généralement de former des floccs plus importants et d'augmenter la vitesse de chute (une trop forte turbulence peut par contre avoir l'effet inverse et détruire les floccs).

D'autre part, les nouvelles méthodes de mesure de la vitesse de chute des vases à l'aide d'enregistrements vidéos ultra-rapide in-situ, et les analyses menées ensuite par des logiciels de traitement d'images capables de repérer chaque flocc et d'en mesurer la dimension représentative ainsi que sa vitesse de chute (système INSEEV par exemple) fournissent également un nouvel éclairage sur l'évolution de la taille des floccs dans un estuaire. Des comparaisons faites en particulier avec des mesures in-situ réalisées au tube d'Owen montrent que les mesures à l'INSEEV conduisent à des vitesses de chute estimées d'un ordre de grandeur supérieur à celles estimées au tube d'Owen pour des tailles de floccs supérieures à 160 microns, dénommés macrofloccs.

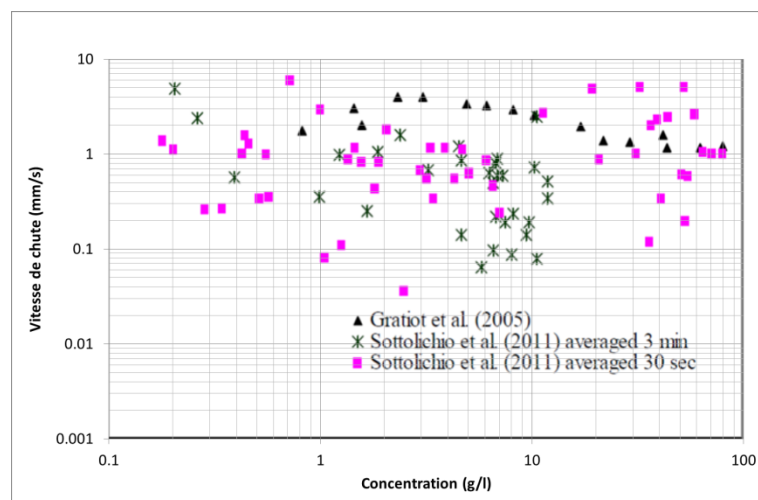


Figure 4 : Compilation de mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en milieu turbulent (thèse Lan Anh Van, 2013 [Ref.6])

Dans le graphique suivant, la loi de vitesse de chute « en eau calme » a été retracée pour avoir une référence ; ensuite, nous avons tracé une loi de vitesse de chute sur les mesures de Gratiot et al. (2005) [Ref.4] qui semblent donner une forme de loi assez classique en comparaison de celles de Sottolichio et al. (2011) [Ref.5] qui semblent plus diffuses (les méthodes entre les 2 approches sont différentes).

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

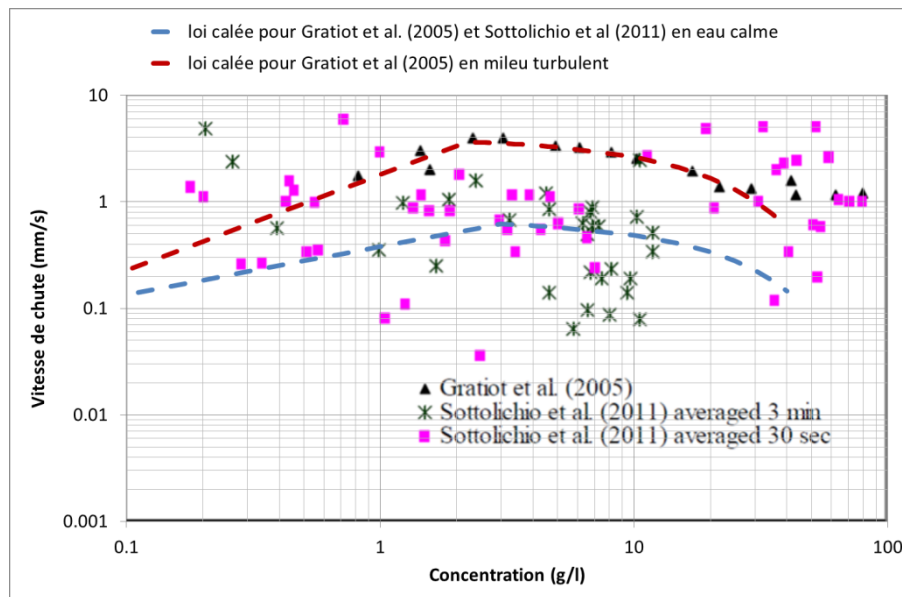


Figure 5 : Compilation de mesures de vitesse de chute pour une vase de Gironde en milieu turbulent (Thèse Lan Anh Van, 2013 [Ref.6])

La loi proposée en « milieu turbulent » (courbe en tiret rouge sur la Figure 5) est de la forme :

- $W_s = 1.8 \times C^{0.9}$ pour $C < 2 \text{ g/l}$;
- $W_s = 4.0 \times (1 - 0.008 \times C)^5$ pour $C > 2 \text{ g/l}$.

Nous estimons donc que suivant l'état turbulent du milieu, la vitesse de chute se trouve entre ces deux courbes (tiret rouge et tiret bleu).

3.1.2. MODELISATION DE LA VITESSE DE CHUTE

Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour représenter la vitesse de chute :

1. Le modèle le plus simple est celui d'une vitesse de chute moyenne constante fixée généralement entre 0,5 et 1,5 mm/s. Ces modèles sont simples mais peuvent donner de très bons résultats en termes de bouchon vaseux, si la vitesse de chute correspond en moyenne à celle observée dans ce dernier. Pour les concentrations plus faibles (étendues de panaches, etc...), les concentrations sont par contre généralement sous estimées car les vitesses de chute sont importantes.
2. Un second modèle consiste à faire varier la vitesse de chute en fonction de la concentration en MES. Cette méthode nécessite le calage d'une loi $W_s = \text{fct}(C)$ sur des mesures et permet souvent de palier aux désavantages relevés dans la première méthode.
3. Un troisième modèle (le plus physique) consiste à relier la vitesse de chute à la turbulence, en calculant un paramètre local de turbulence G qui est utilisé pour décrire l'état de floculation. Ce paramètre s'écrit: $G = \sqrt{U_z^2 / \vartheta \times \left(\frac{dU}{dz} \right)}$

avec $u(z)$ la vitesse locale calculée,

$u^*(z)$ la vitesse locale de cisaillement,

ϑ la viscosité moléculaire.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Mais il faut alors un ensemble de mesures in-situ de G , C et W_s pour établir une loi, ce qui est très peu courant sur en milieu estuarien.

- Une quatrième méthode consiste à utiliser les formules empiriques de Manning et Dyer (2007) [Ref.7] issues de mesures effectuées dans plusieurs estuaires européens à l'aide d'INSEEV qui permettent de simuler deux populations de floes (les macrofloes et les microflocs) dont la vitesse de chute varie avec la concentration en MES et la contrainte de cisaillement turbulente. La limite entre micro et macrofloes est fixée par ces auteurs à un diamètre de 160 microns. Cette méthode est une méthode générale (car calée sur plusieurs mesures de différents estuaires) et ne dépend donc plus de la vase de l'estuaire modélisée.

La Figure 6 ci-après fournit les ordres de grandeurs des vitesses de chute mesurées dans plusieurs estuaires. Les courbes en trait plein et en couleurs illustrent les formules de Manning et Dyer (2007)[Ref.7] pour différentes contraintes de cisaillement entre 0,2 et 10 N/m^2 .

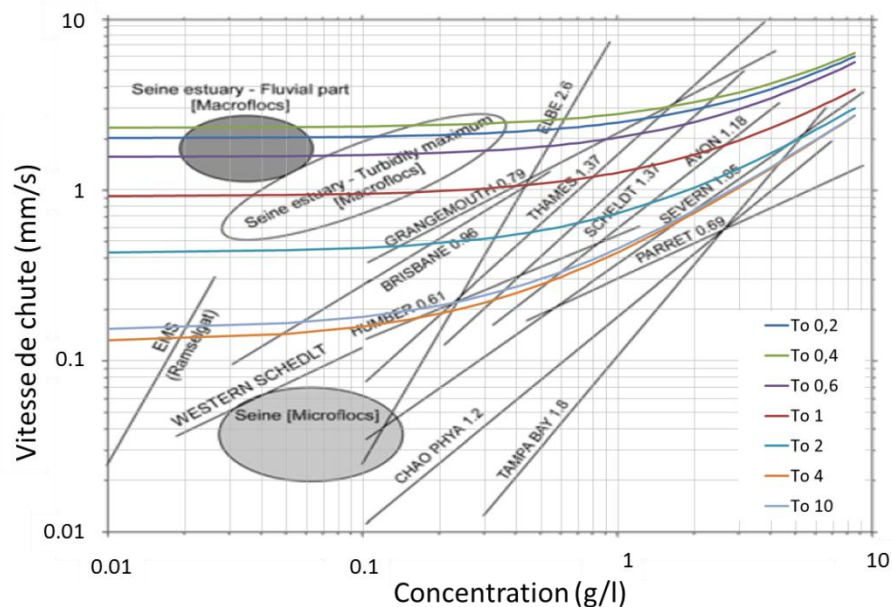


Figure 6 : Loi de Manning et Dyer (2007)[Ref.7] en fonction de la contrainte tracé sur un graphique de vitesse de chute fonction de la concentration pour plusieurs autres estuaires (complété d'après Verney pour la Seine, 2006)[Ref.8]

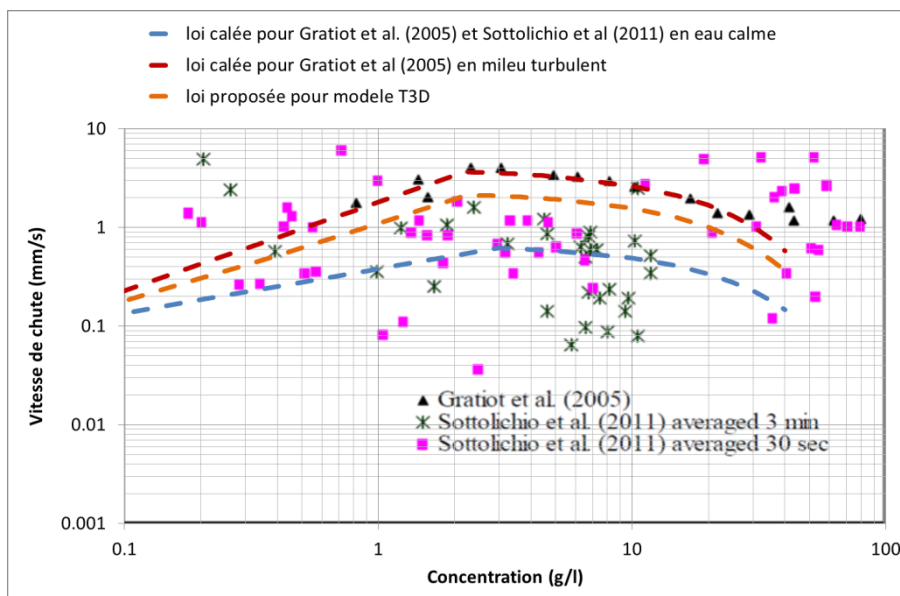
Dans le domaine de la recherche, les méthodes utilisées augmentent le nombre de classes de floes modélisé comme par exemple dans le projet FLUMES (Verney et al., 2011 [Ref.9]). Un tel raffinement dépasse cependant le cadre de la présente étude.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons d'utiliser la deuxième méthode étant données les mesures disponibles. N'ayant pas trouvé de relation claire entre milieu turbulent ou calme (en fonction de G ou de la contrainte), nous proposons d'utiliser une loi de la vitesse de chute moyenne en fonction de la concentration (courbe orange - Figure 7 et Figure 8) qui est la moyenne des deux lois établies « en milieu calme » et en « milieu turbulent ».

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

**Figure 7 : Loi de vitesse de chute proposée pour le modèle 3D**

Nous avons replacé ces trois lois sur le graphique suivant qui regroupe des ordres de grandeurs des vitesses de chute mesurées dans plusieurs estuaires :

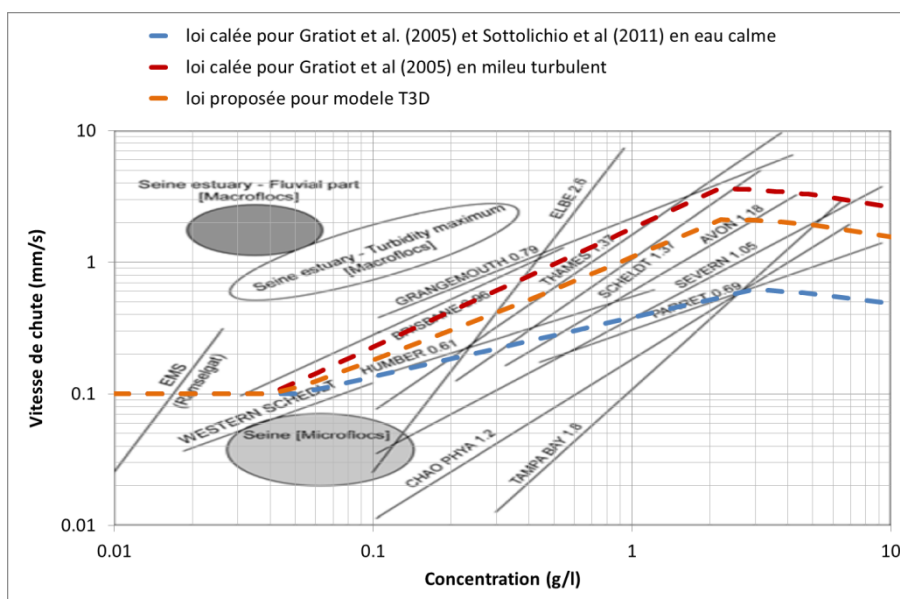


Figure 8 : Loi de vitesse de chute proposée pour le modèle 3D sur un graphique de vitesse de chute en fonction de la concentration pour plusieurs autres estuaires (complété d'après Verney pour la Seine, 2006)[Ref.8]

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

3.1.3. FLUX DE DEPOT

Le terme de flux de dépôt est simplement calculé via l'équation :

$$\frac{dD}{dt} = W_s \times C_b$$

W_s : Vitesse de chute de la vase (m/s),

C_b : Concentration de la vase en suspension près du fond (kg/m³).

Nota :

En chaque point de la colonne d'eau (dans le modèle 3D), $W_s \times C$ est le flux de sédiment traduisant l'effet descendant de la gravité qui s'oppose à $\left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$, le flux ascendant de sédiment induit par le mouvement turbulent.

Au niveau du sol, le fait de conserver le flux de dépôt égal à $W_s \times C$ permet d'être cohérent avec les flux verticaux qui existent dans les couches d'altitude supérieure. Le flux ascendant $\left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$ qui n'est pas calculable au niveau du sol est remplacé par une loi d'érosion que nous décrirons dans un autre paragraphe.

Les lois classiques de type Krone utilisées pour calculer le flux de dépôt (et utilisant une contrainte critique de dépôt et une probabilité de dépôt) ont été originellement créées dans un concept 1D ou 2DH car le flux ascendant $\left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$ n'est pas résolu dans ce cas ; il fallait donc pouvoir atténuer voire stopper le flux de dépôt lorsque l'écoulement était trop turbulent ce que l'on peut évaluer en 1D ou 2DH avec la contrainte ou la vitesse de cisaillement. Ce type de loi a été abusivement implanté dans de nombreux modèles 3D, mais elle n'a pas lieu d'être, étant donné que les flux ascendant sont modélisés. Nous n'avons donc pas besoin de définir de contrainte critique de dépôt pour notre modèle.

3.2. FLUX D'EROSION

Le terme de flux d'érosion est calculé via l'équation de Partheniades :

$$\frac{dE}{dt} = M \left[\left(\frac{\tau_{cw}}{\tau_{ce}} \right) - 1 \right] \quad \text{pour } \tau_{cw} > \tau_{ce}$$

τ_{cw} : contrainte courant + houle (N/m²) calculée via le modèle TRANSPOR2004 [Ref.10] de Van Rijn,

τ_{ce} : contrainte critique d'érosion qui dépend de la concentration de la couche de sédiment érodée (N/m²) comme indiqué au paragraphe précédent,

M : constante de Partheniades.

Les deux termes τ_{ce} et M sont caractérisés par le type de vase et sont donc à définir.

3.2.1. CONTRAINTES CRITIQUE D'ÉROSION

Nous cherchons à établir une loi de contrainte critique d'érosion d'une vase pure de la Gironde (au sens dépourvue de sable). En effet, notre modélisation de mélange sable-vase inclut la modification de la contrainte critique du mélange sable-vase en fonction du pourcentage de chacun des sédiments. Nous devons ici rechercher l'ensemble des mesures ou synthèses des mesures qui ont été effectuées avec des vases contenant au maximum 20% de sable.

Nous avons principalement retrouvé 4 études ou documents de synthèse (qui parfois s'appuient sur les mêmes jeux de mesures) :

- [Ref.11] Synthèse des connaissances sur le tassement et la Rhéologie des vases, Migniot, LCHF, 1987 ;
- [Ref.12] Caractéristiques des vases et de la crème de vase du système fluvio-estuarien de la Gironde, A.Ferral, M.Villerot, Port Autonome de Bordeaux, 1984 ;
- [Ref.13] Vases Gironde, Seuils de navigabilité, Viguié, Galichon, LCHF pour le PAB, 1987 ;
- [Ref.14] G8M mast2 Project4 topic B/C, Flume measurements of mud processes under steady and unsteady currents, 52184 R3, Galissaire, De Crouette, Hamm, SOGREAH, 1994.

Ces travaux mesurent généralement la rigidité initiale d'une vase. Les lois obtenues sont citées ci-après :

- Migniot (1968, « mesures classiques LCHF » [Ref.11]) :

$$\tau_y = 8,9 \times 10^{-9} \times C_s^{3.196} \quad \text{Pour } C_s < 300 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau_y = 6,76 \times 10^{-13} \times C_s^{4.833} \quad \text{Pour } C_s > 300 \text{ kg/m}^3$$

- PAB 1984, synthèse mesures 1968, 1970, 1980, 1982 [Ref.12]:

$$\tau_y = 1,7 \times 10^{-13} \times C_s^{4.982}$$

- Etude seuil de navigabilité 1987 [Ref.13] (chenaux envases 5% sable) :

$$\tau_y = 2,61 \times 10^{-11} \times C_s^{4.01} \quad \text{Pour } C_s < 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau_y = 2,04 \times 10^{-18} \times C_s^{6.81} \quad \text{Pour } C_s > 350 \text{ kg/m}^3$$

- Etude seuil de navigabilité 1987 [Ref.13] (Passe By Goulée 0% sable) :

$$\tau_y = 1,42 \times 10^{-8} \times C_s^{3.18} \quad \text{Pour } C_s < 460 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau_y = 1,08 \times 10^{-15} \times C_s^{5.86} \quad \text{Pour } C_s > 460 \text{ kg/m}^3$$

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

- Etude seuil de navigabilité 1987 [Ref.13] (Passe de Pauillac vase naturelle <1% sable) :

$$\tau_y = 2,65 \times 10^{-8} \times C_s^{2.74} \quad \text{Pour } C_s < 345 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau_y = 3,51 \times 10^{-21} \times C_s^{8.21} \quad \text{Pour } C_s > 345 \text{ kg/m}^3$$

- Etude seuil de navigabilité 1987 [Ref.13] (Passe du Caillou 20% sable) :

$$\tau_y = 9,89 \times 10^{-6} \times C_s^{1.99} \quad \text{Pour } C_s < 370 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau_y = 2,18 \times 10^{-25} \times C_s^{9.64} \quad \text{Pour } C_s > 370 \text{ kg/m}^3$$

- Etude seuil de navigabilité 1987 [Ref.13] (Saint Christoly eau douce <5% sable) :

$$\tau_y = 11,6 \times 10^{-10} \times C_s^{3.58}$$

- G8M Mast2, 1994 [Ref.14] (vase de Bassens) :

$$\tau_y = 3,4 \times 10^{-22} \times C_s^{8.1} \quad \text{Pour } C_s < 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau_y = 8 \times 10^{-10} \times C_s^{3.5} \quad \text{Pour } C_s > 500 \text{ kg/m}^3$$

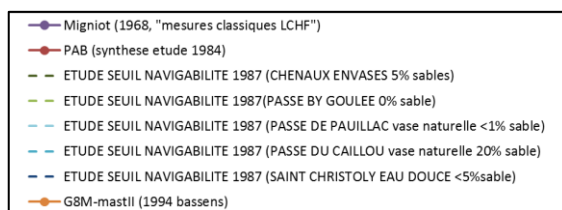
Le passage de la rigidité initiale à la contrainte critique d'érosion est effectué via la relation établie par Migniot, 1981 [Ref.15] :

- Si $\tau_y < 1,5 \text{ N/m}^2$ $u_{*ce} = 0.017 \tau_y^{0.25}$

- Si $\tau_y > 1,5 \text{ N/m}^2$ $u_{*ce} = 0.013 \tau_y^{0.5}$

$$\text{Avec } \tau_{ce} = \rho (u_{*ce})^2$$

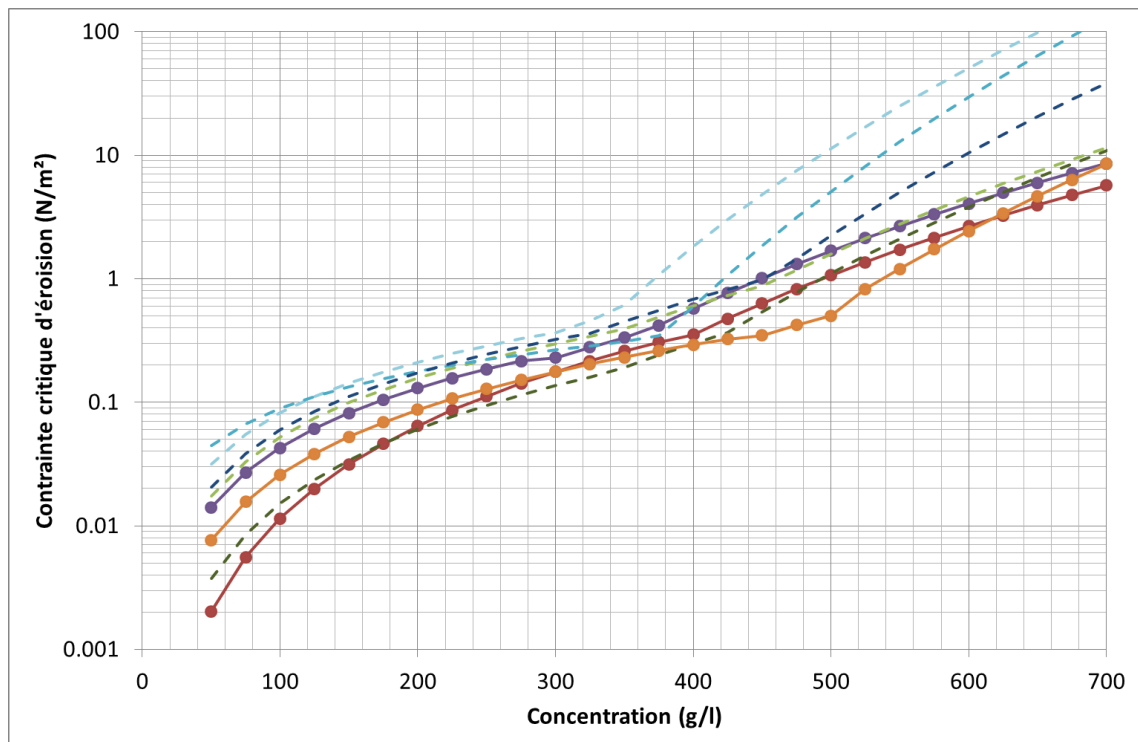
En traçant l'ensemble de ces lois, nous obtenons alors le graphique ci-après (Figure 9) :



Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

**Figure 9 : Loi de contrainte d'érosion en fonction de la concentration du sédiment**

Les résultats ne sont pas toujours très homogènes et dépendent beaucoup du type et du lieu de sédiment prélevé.

Pour les courbes en tirets bleus, les mesures ont rarement dépassé 500g/l ce qui peut expliquer ces formes de lois qui donnent des contraintes critiques d'érosion très importantes (par extrapolation) pour des concentrations plus fortes.

Nous suggérons d'utiliser dans le modèle la loi de Migniot (1968) [Ref.11] qui semble être un bon compromis entre l'ensemble de ces lois et convient aussi avec la vase (0% de sable) de la passe de Goulée [Ref.13].

3.2.2. CONSTANTE DE PARTHENIADES

La constante de Partheniades permet d'amplifier ou diminuer le flux d'érosion à partir du moment où la contrainte hydraulique est supérieure à la contrainte critique du sédiment érodé.

Cette constante varie avec le type de sédiment considéré. Ariathurai et al. (1978) [Ref.16], ont trouvé à partir d'une étude réalisée sur plus de 200 échantillons de matériaux cohésifs naturels et préparés, des valeurs de M comprises entre 0,0005 kg/m²/s et 0,005 kg/m²/s.

Très peu de mesures sur ce paramètre pour un site donné sont généralement disponibles. Cependant, en Gironde, un certain nombre d'auteurs s'y sont intéressés.

Lan Anh VAN et al, 2012 [Ref 1] a répertorié les mesures disponibles, et a pu tracer le graphique suivant :

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

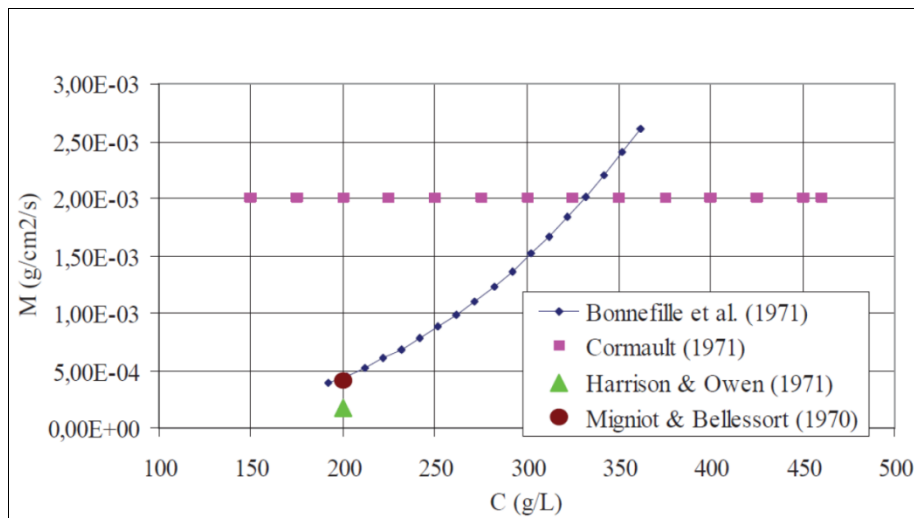


Figure 10 : Compilation des mesures de la constante de Partheniades pour une vase de Gironde (Lan Anh Van et al., 2012 [Ref1.])

Ce graphique présente la relation entre le coefficient d'érosion et la concentration du sédiment C. Parmi les quatre auteurs, seul Bonnefille et al. (1971) [Ref.17] mesure une variation de M en fonction de C, les autres ne déterminent une valeur de M que pour une valeur unique de C (Harrison & Owen, 1971 [Ref.18], Migniot & Bellessort, 1970 [Ref.3]). Cormault, 1971 [Ref.19] n'a pas précisé la gamme de concentration des sédiments.

On peut observer que les deux valeurs de M données par Harrison & Owen [Ref.18], et Migniot & Bellessort [Ref.3] sont en accord avec la courbe fournie par Bonnefille et al. (1971) [Ref.17]. De plus, il a été confirmé par de nombreux auteurs que M varie en fonction de la concentration.

Par conséquent, la loi proposée par Bonnefille et al. (1971) [Ref.17] semble être actuellement la plus réaliste pour une utilisation dans la modélisation de l'estuaire de la Gironde.

3.3. TASSEMENT ET CONSOLIDATION DES DEPOTS

3.3.1. MODELISATION EN COUCHES DE DEPOT

La stratification des dépôts est modélisée ici par un modèle constitué de 14 couches superposées numérotées de 1 à 14, sachant que la couche n°1 correspond à celle qui est en contact avec l'écoulement et la couche n°14 est la plus profonde. Ces 14 couches incluent 12 couches de teneur variable en sédiments secs (n°1 à 12) représentant le modèle de tassement et de consolidation des dépôts : les dépôts frais se déposent dans la première couche. Ils passent ensuite dans les 11 couches inférieures suivantes par tassement (crème de vase) puis par consolidation (vase consolidée).

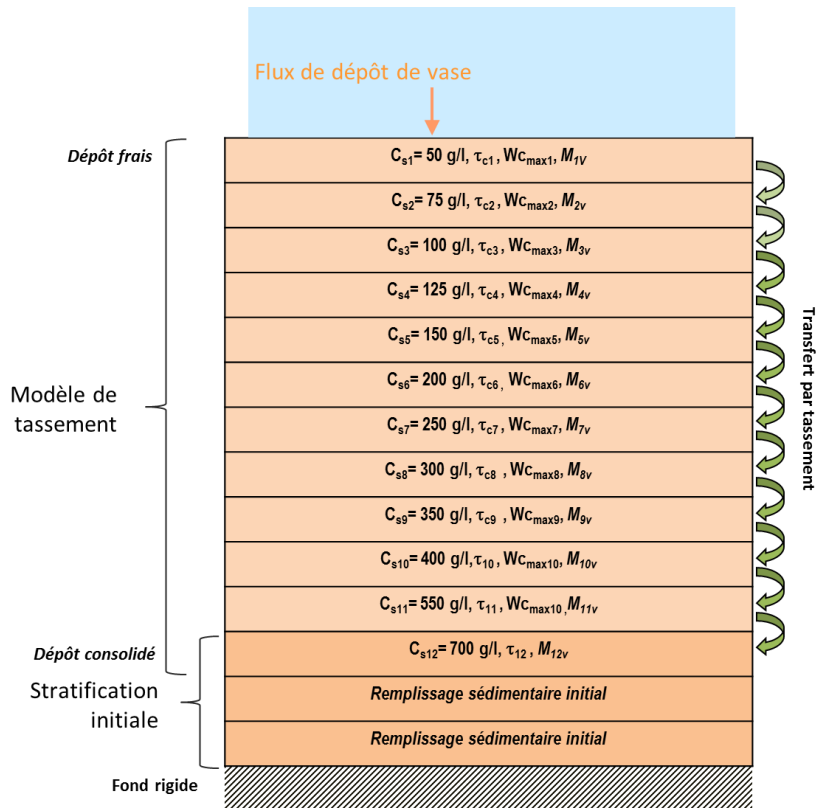
Les trois couches du bas permettent de définir le remplissage initial en sédiments. La première couche (n°12) correspond également à la couche de consolidation finale des dépôts. (Les deux autres couches (n°13 et 14) peuvent permettre de définir un remplissage sédimentaire initial, ce qui ne sera pas le cas dans cette modélisation).

La figure suivante présente le fonctionnement du modèle de couche. Les paramètres fixes de chaque couche (concentration, contrainte critique et taux de transfert de chaque couche) sont à préciser et donc à caler sur des mesures. La variable (en temps et en espace) pour chaque couche, représentée en italique sur la figure, est la masse de sédiment vaseux.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

**Figure 11 : Schéma du fonctionnement du modèle multicouche****3.3.2. MODELISATION DU TASSEMENT ET DE LA CONSOLIDATION**

Dans le modèle, chacune des couches est définie par :

- 3 paramètres fixes : la concentration (C_s), la contrainte critique d'érosion (τ_c) et la vitesse de tassement (W_{cmax}) ;
- un paramètre variable qui est la masse m des sédiments stockée dans cette couche à un instant t , dont on déduit l'épaisseur h de la couche grâce à la connaissance de la concentration en vase ($m = C_s \cdot h$).

Le tassement se traduit par un transfert de masse d'une couche supérieure vers une couche inférieure, via une fonction du type :

- $dm/dt = W_{cmax}/h_{max} \cdot m$ pour $h < h_{max}$
- $dm/dt = W_{cmax} \cdot C_s$ pour $h > h_{max}$

Ces équations peuvent également s'écrire en fonction de l'épaisseur h du dépôt :

- $dh/dt = W_{cmax} \cdot h/h_{max}$ pour $h < h_{max}$
- $dh/dt = W_{cmax}$ pour $h > h_{max}$

Le paramètre W_{cmax} est une vitesse de tassement en m.j-1 qui normalement respecte une forme du type : $W_{cmax} = A \cdot \exp(-B \cdot C_s)$

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Cette forme de loi a été définie par Sanchez et al. (2004) [Ref.20], grâce à des expériences effectuées sur une vase de Loire.

Le paramètre h_{\max} (en mètre), introduit par Artelia, correspond à la hauteur maximale de la couche qui limite la vitesse de transfert de masse à $W_{c_{\max}}$, fixé actuellement à 0,01m pour éviter des problèmes lors de dépôts très faibles.

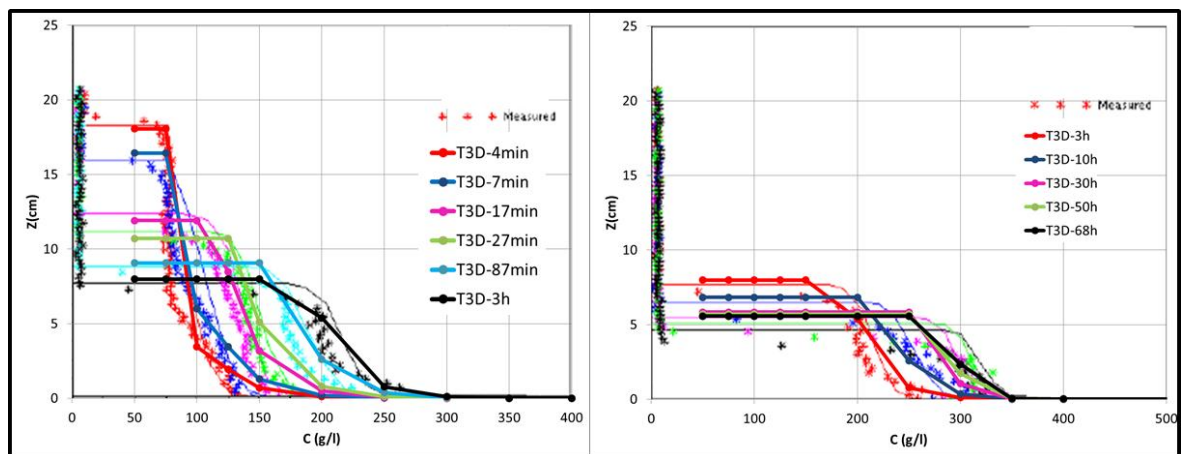
3.3.3. AJUSTEMENT DES PARAMETRES DU MODELE DE TASSEMENT ET CONSOLIDATION

Une série de 12 concentrations a été retenue incluant :

- deux couches de crème de vase liquide à 50 et 75 g/l ;
- huit couches de crème de vase à 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350 et 400 g/l ;
- deux couches de vase consolidée à 550 et 700 g/l ;

Le paramétrage empirique de $W_{c_{\max}}$ fonction de la concentration a été calé sur des expériences pouvant retranscrire le profil vertical de concentration (étant donnée la difficulté pour mesurer les profils de concentration, beaucoup d'expériences ne retranscrivent que la concentration moyenne de la colonne de tassement par déduction de la diminution de hauteur du culot) :

- les essais de Van Lahn (thèse, 2013) [Ref.6] d'une colonne de sédimentation X-ray (CEA/DRT/LIST, Saclay) ;



**Figure 12 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Van Lahn [Ref.6]),
Concentration initiale 77g/l, hauteur initiale 0,207m**

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Puis validée sur :

- les essais de tassement de Migniot (rapport de synthèse, 1987) [Ref.11] au moyen de la sonde JTD3 (Figure 13, Figure 14 et Figure 15) ;

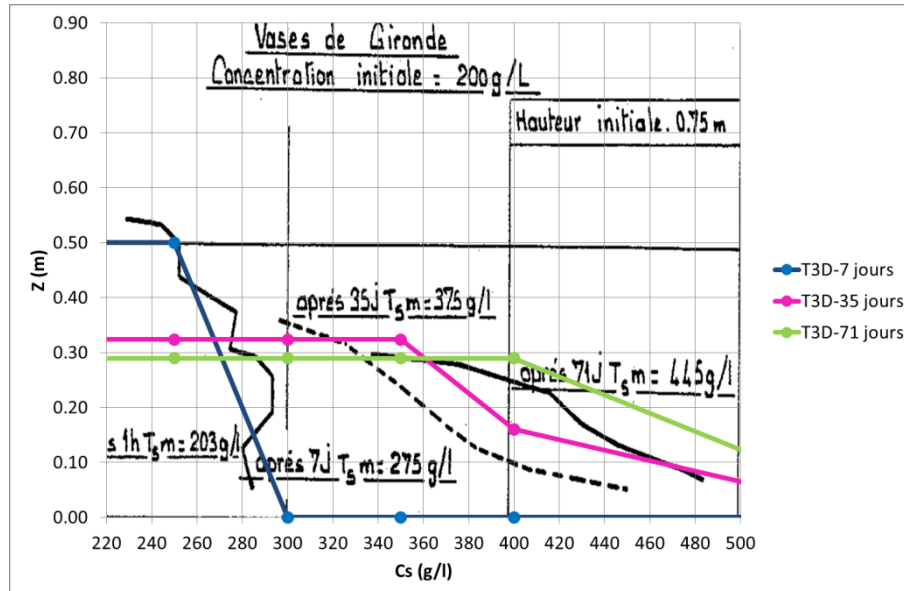


Figure 13 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Migniot (1987) [Ref.11], Concentration initiale 200g/l, hauteur initiale 0,75m

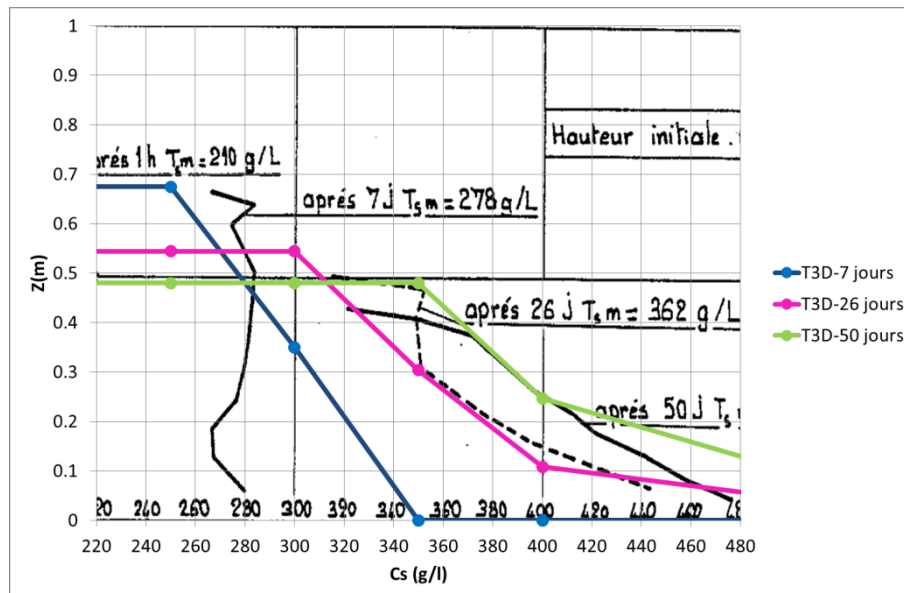


Figure 14 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Migniot (1987) [Ref.11], Concentration initiale 200g/l, hauteur initiale 0,95m

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

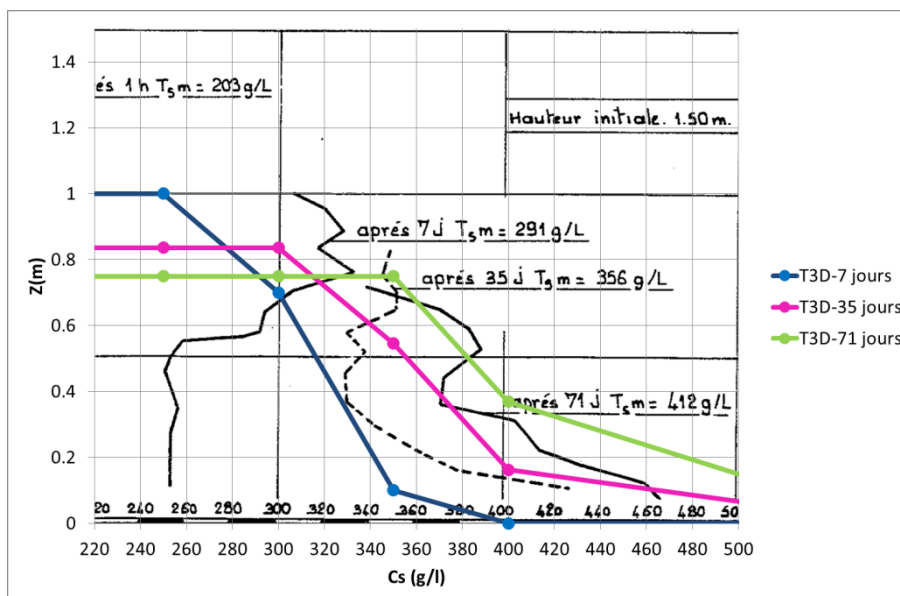


Figure 15 : Calage du modèle de tassement sur les essais de Migniot (1987) [Ref.11]), Concentration initiale 200g/l, hauteur initiale 1,5m

Le paramétrage qui a permis d'obtenir ces résultats est présenté dans le tableau suivant :

Cs	Wcmax (m.j ⁻¹)
50	7600
75	2000
100	1000
125	350
150	60
200	8
250	1
300	0.02
350	0.007
400	0.001
550	0.0005
700	0

En traçant $W_{c_{max}}$ en fonction de C_s la Figure 16 est obtenue :

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

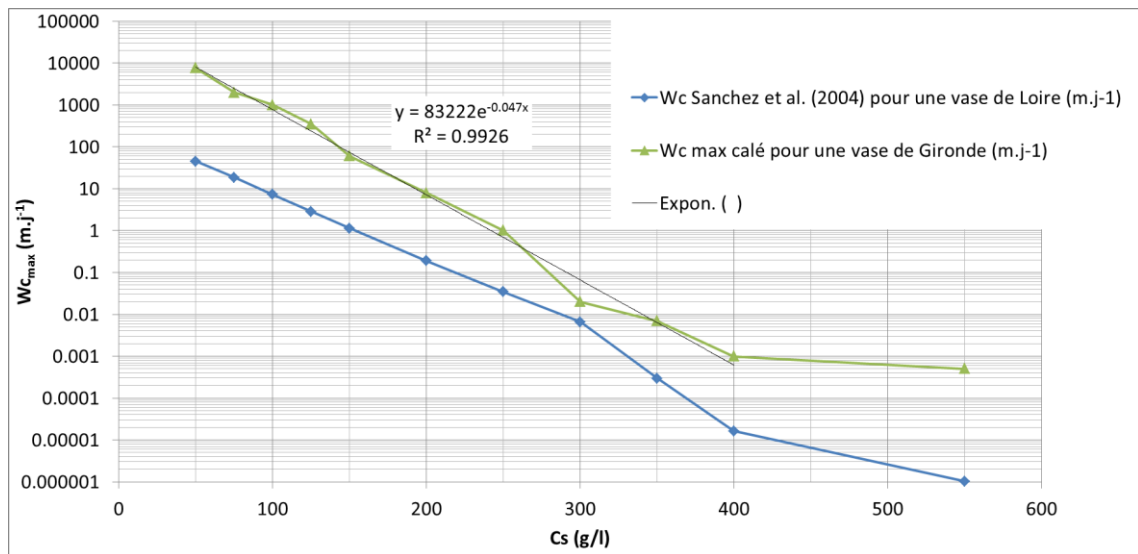


Figure 16 : Vitesse de sédimentation en fonction de la concentration calée pour une vase de Gironde, et mesures de Sanchez et al (2004) [Ref.20] pour une vase de Loire

Entre 50 et 400 g/l les valeurs de $W_{c_{max}}$ en fonction de C_s respectent quasiment une loi de type exponentielle avec un $R^2 = 0.9926$:

- $W_{c_{max}} = 83222 \exp(-0.047 C_s)$ pour $C_s < 400$ g/l ;

Ce paramétrage respecte donc le type de loi définie par Sanchez et al. (2004) [Ref.20].

4. DESCRIPTION DES FORÇAGES SUR L'ANNEE D'EXPLOITATION 2008-2009 ET METHODE DE MODELISATION ASSOCIEE

4.1. CHOIX DE L'ANNEE HYDROLOGIQUE ET DE LA REPRESENTATIVITE DES CLAPAGES SUR CETTE PERIODE

Ce chapitre est issu du mémo réalisé en septembre 2015 : « Plan de gestion des sédiments de dragage de la Gironde – Exploitation du modèle – Analyse et proposition de choix de l'année modélisée ».

4.1.1. Analyse de la représentativité des années

4.1.1.1. Représentativité hydrologique des différentes années

Au cours des discussions lors de la seconde réunion du COTECH (22 avril, cf. CR), il a été proposé de se porter sur une année avec des caractéristiques saisonnières marquées (étiage – crues) afin d'analyser la dispersion des sédiments clapés dans différentes conditions hydrodynamiques et hydrologiques.

Au regard de ce critère, ARTELIA a analysé les conditions hydrologiques de ces dernières années (cf. détails étape 1, Rapport RM1-E1-1). Il ressort :

Tableau 1 : Principales caractéristiques hydrologiques des années 2006 à 2013

Année	Caractéristiques	Compatibilité avec les critères de représentativité souhaités par le COTECH (22/04/2015)
2006	Année plutôt sèche	Non compatible
2007	L'année 2007 correspond à une année sans crue marquée. L'analyse des enregistrements de turbidité montre que les pics de turbidité sont associés à une mise en suspension de dépôts de vases locaux, toujours présents au cours des hivers et du printemps. Ce n'est qu'au mois de mai de ces années « sèches » que les dépôts sont totalement évacués de Bordeaux.	Non compatible
2008	Les années 2008 et 2009 ont été caractérisées par des crues assez marquées ; l'analyse des enregistrements de turbidité permet de conclure que les pics de turbidité sont associés à des apports amont et non à des resuspensions de dépôts locaux, ce qui signifie également qu'il n'y a plus de dépôt locaux de vases dans le secteur de Bordeaux dès le début des hivers 2008 et 2009.	Compatible
2009		Compatible
2010	Déficit pluviométrique, étiage modéré (nombre de jours d'étiage faible)	Non compatible
2011	Année la plus sèche (absence de crues significatives et faibles débits automnaux), avec un été plutôt humide ;	Non compatible
2012	Année plutôt sèche (absence de crue biennale), semblable à l'année 2007 (cf. année 2007)	Non compatible
2013	Année la plus humide avec un épisode de canicule en juillet	Compatible

Source : d'après Article de Jalon-Rojas et al, 2015 et rapport scientifique MAGEST, 2013

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Nota : afin de ne pas couper les évènements hivernaux (meilleure représentation des phénomènes de crues), la modélisation représente une année hydrologique, soit de septembre année N-1 à septembre année N.

Au regard des critères de représentativité de l'année d'exploitation souhaitée par le COTECH, l'analyse portera sur les trois années suivantes : 2008 (soit sept. 2007 à sept. 2008), 2009 (soit sept. 2008 à sept. 2009), et 2013 (sept. 2012 à sept. 2013).

Notons cependant que l'année 2009 présente des évènements de crues les plus importants.

4.1.1.2. Représentativité des opérations de dragages-rejets

Lors des échanges que nous avons eus avec le GPMB, ce dernier a expliqué que les années 2002 à 2011 avaient été particulières du point de vue de l'hydrologie. Ces conditions n'ont pas permis au service Dragages de planifier leurs interventions de manière « classique », ni de suivre une planification « théorique ». Les interventions ont été réalisées « au jour le jour », selon les besoins.

Aussi, sur les dernières années (2002-2011), il n'y a pas d'année représentative de la planification actuelle théorique des dragages du GPMB.

Par conséquent, nous avons analysé la représentativité des opérations de dragage-rejets pour les années hydrologiques intéressantes, à savoir 2008, 2009 et 2013. Les éléments analysés ont été les suivants :

- Pratiques de dragage et d'immersion ;
- Volumes dragués et clapés.

4.1.1.2.1. Pratiques de dragage et immersion

Le GPMB utilise les techniques de dragages suivantes sur la Gironde :

- Dragues aspiratrices en marche (DAM) ;
- Dragage mécanique (à benne) ;
- Dragage à injection d'eau (DIE).

L'essentiel du dragage est effectué par une drague aspiratrice en marche (Le Pierre-Lefort jusqu'en juillet 2013, puis Anita Conti). Depuis 2000, en moyenne, près de 85% du volume total est dragué par ce type d'engin.

Le dragage mécanique effectué par La Maqueline représente environ 6-7% du volume total.

Le reste des dragages est réalisé par des engins n'appartenant pas au GPMB (dragage mécanique, injection d'eau...).

D'un point de vue des moyens utilisés, les années 2008, 2009 et 2013 sont semblables. Il n'y a pas de paramètre qui permette de discriminer une année par rapport à une autre (pourcentage de volume dragué par la DAM et moyen mécanique identiques pour les trois années).

4.1.1.2.2. Volumes dragués et clapés

A partir des données brutes fournies par le GPMB, nous avons analysé les volumes dragués et clapés en fonction des zones dans l'estuaire. Nous avons comparé les données des années 2008, 2009 et 2013 (rappel : années intéressantes du point de vue de l'hydrologie) à la moyenne sur la période (2000-2013). Les résultats sont présentés ci-après.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

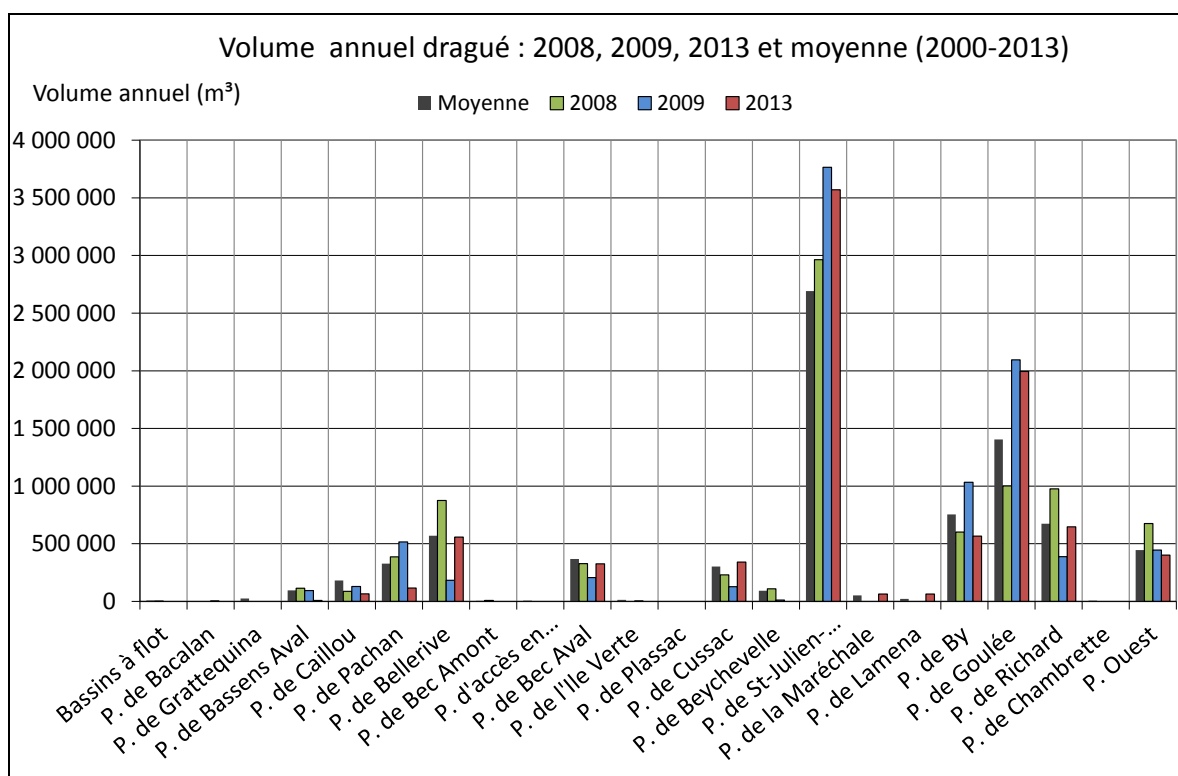
RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

A. Opérations de dragage

Au cours des 3 années ciblées, le volume annuel dragué a été légèrement supérieur au volume moyen dragué entre 2000 et 2013 :

- 2008 : volume total dragué 9,0 Mm³, soit 3% de plus que la moyenne 2000-2013 ;
- 2009 : volume total dragué 9,5 Mm³, soit 8% de plus que la moyenne 2000-2013 ;
- 2013 : volume total dragué 9,2 Mm³, soit 5% de plus que la moyenne 2000-2013.

Pour ces trois années, les volumes supplémentaires ont été dragués sur les passes de Saint-Julien, Pauillac et Goulée.

Figure 17 : Volumes annuels dragués, par passe

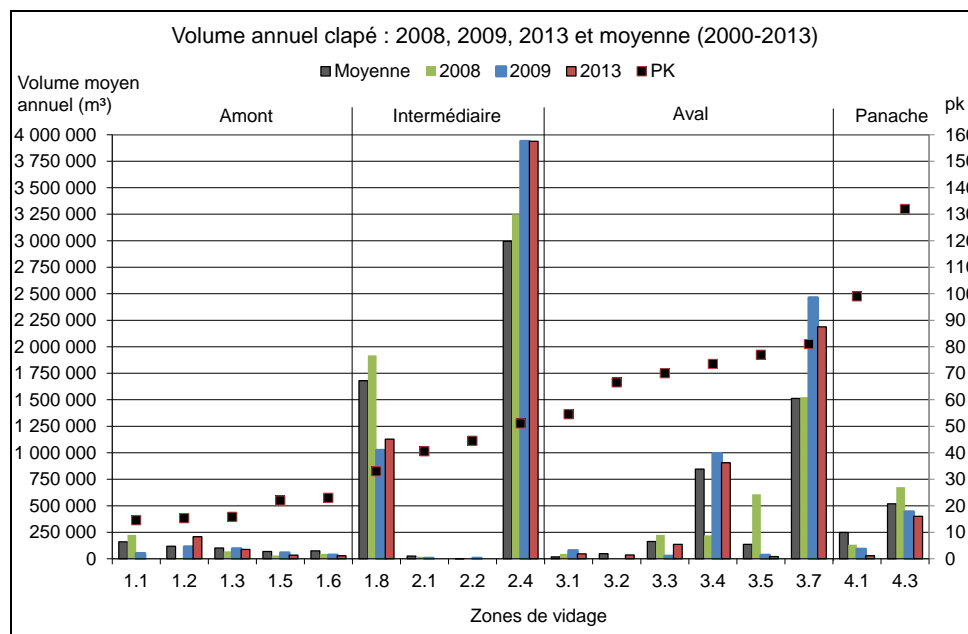
Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

B. Opérations de rejet/clapage

La figure ci-dessous représente le volume de matériaux de dragage clapés sur les différentes zones de rejet, ceci pour les années 2008, 2009 et 2013.

Figure 18 : Volumes annuels clapés, par zone de vidage.

Le tableau précise les quantités rejetées au niveau des 4 zones principales de rejet (n°1.8, 2.4, 3.4 et 3.7) pour les trois années, au regard de moyenne des dernières années :

Tableau 2 : Représentativité des volumes clapés sur les 4 principales zones de clapage pour les années 2008, 2009 et 2013

Année	Volume clapé			
	Zone 1.8	Zone 2.4	Zone 3.4	Zone 3.7
2008	≈ moyenne	≈ moyenne	< moyenne	≈ moyenne
2009	< moyenne	> moyenne	≈ moyenne	> moyenne
2013	< moyenne	> moyenne	≈ moyenne	> moyenne

Sur le critère de volume clapé, l'année 2008 semble la plus pertinente, car la plus proche des moyennes observées ces dernières années.

4.1.1.2.3. Bilan de la représentativité des années 2008, 2009 et 2013 au regard des opérations de dragage/rejet

Le tableau suivant récapitule les principaux éléments de représentativité de ces trois années :

Tableau 3 : Bilan - représentativité des années 2008, 2009 et 2013 au regard des opérations de dragage/rejet

Année	Représentativité	
	Méthode de dragage utilisé	Volume dragués / rejetés
2008	+	++
2009	+	+
2013	+	+

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.1.1.3. Bilan de la représentativité des années 2008, 2009 et 2013 au regard des opérations de dragage/rejet

La représentativité de l'année a été analysée en tenant compte des paramètres suivants :

- Représentativité des conditions hydrologiques ;
- Représentativité des opérations de dragage/rejet.

Il ressort qu'il n'existe pas d'éléments véritablement discriminant une année parmi 2008, 2009 et 2013. Cependant, l'année 2009 présente des événements hivernaux avec des crues importantes, donc intéressants.

Par conséquent, le choix de l'année pourrait être effectué en fonction des données d'entrée du modèle disponibles (soit si elles existent ou non) : bathymétrie, données de forçages hydrologiques, données des opérations de dragage/rejet.

4.1.2. Disponibilités des données d'entrée du modèle**4.1.2.1. Données bathymétriques disponibles**

La bathymétrie utilisée pour le modèle est essentiellement la bathymétrie comprise entre 2005 et 2009 (seule période sur laquelle des données bathymétriques de l'ensemble de l'estuaire existent).

Cependant, pour l'année d'exploitation, il est envisagé d'intégrer sur les zones de vidage la bathymétrie de l'année retenue. L'idéal pour la modélisation serait de disposer de levés bathymétriques sur les zones de vidage, encadrant la période d'exploitation, dans le but :

- D'intégrer la bathymétrie initiale dans le modèle ;
- De pouvoir, à partir des levés, déterminer le taux de stabilité des zones de vidage.

La figure ci-dessous présente les levés disponibles, autour des périodes d'exploitation envisagées. Ainsi, pour les 4 zones de vidage les plus importantes (1.8, 2.4, 3.4 et 3.7), on constate :

- Année 2008 : il existe des données bathymétriques avant et après, ceci pour les 4 zones ;
- Année 2009 : il existe des données bathymétriques avant et après, ceci pour trois zones ; néanmoins, les levés réalisés avant datent au plus tard de juillet 2008 ;
- Année 2013 : il existe des données bathymétriques avant et après, ceci pour deux zones. Pour les zones 1.8 et 2.4, ces levés n'encadrent pas totalement l'année d'exploitation.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Figure 19 : Levés bathymétriques réalisés sur les zones de vidage

	Date des levés	PK N° ZV	15 1.1	15 1.2	16 1.3	22 1.5	23 1.6	33 1.8	41 2.1	45 2.2	51 2.4	54 3.1	67 3.2	70 3.3	74 3.4	77 3.5	81 3.7	99 4.1	125 4.3	125 4.4
	janv-07																			
	févr-07		x	x	x															
	mars-07								x											
	oct-07										x	x	x					x		
	nov-07		x	x	x			x	x	x						x	x			
	déc-07													x	x					
2008	janv-08																			
	juin-08		x	x	x			x			x						x			
	juil-08					x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		
	sept-08																			
2009	févr-09											x								
	mars-09						x				x									
	août-09				x															
	sept-09		x	x	x															
	oct-09										x									
	déc-09							x												
	janv-10								x	x						x	x			
	mars-10				x	x														
	août-10																	x		
	sept-10							x		x				x	x					
	oct-10										x									
	janv-11															x	x			
	mars-11				x	x					x									
	mai-11				x	x												x		
	sept-11		x	x	x								x							
	oct-11							x			x									
	nov-11																			
	janv-12																			
	févr-12		x	x	x												x			
	avr-12											x	x							
	mai-12				x	x	x	x	x	x	x			x						
	juil-12														x	x				
	oct-12																			
	déc-12																			
2013	avr-13		x	x	x	x	x	x	x	x	x									
	mai-13																	x		
	août-13																		x	x
	sept-13											x	x		x		x			
	oct-13																			

Ainsi, il existe quelques différences de base de données concernant les levés bathymétriques sur les zones de vidage. Cependant, ceci n'est pas discriminant dans le choix de l'année d'exploitation.

Cependant, comme précisé précédemment, les données bathymétriques utilisées pour la construction du modèle (patchwork réalisé à partir des données disponibles fournies par le GPMB) correspondent essentiellement aux années 2005-2009. Par conséquent, les années 2008 et 2009 présentent l'avantage de limiter les biais dans le modèle liés au décalage entre bathymétrie et conditions hydrologiques. En effet, modéliser l'année 2013 comme année d'exploitation signifie représenter les conditions hydrauliques de 2013 sur une bathymétrie de 2005-2009, soit inévitablement des inexactitudes dans le modèle.

Aussi, d'un point de vue de la bathymétrie, il est préférable d'utiliser les années 2008 et 2009.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Tableau 4 : Fiabilité du modèle pour les années 2008, 2009 et 2013 au regard de la bathymétrie

Année	Fiabilité du modèle
2008	+
2009	+
2013	-

4.1.2.2. Données hydrologiques disponibles – données de forçage

Les données de forçages utilisées pour la phase de calage sont les suivantes :

- Le signal de marée réel issu du modèle global de marée FES2012 ;
- L'évolution temporelle de la houle sur la base d'un point de calcul représentatif situé à l'extérieur de l'estuaire de la Gironde et issu de la base de données existante HOMERE ;
- Une chronique temporelle de vent issue de la base de données HOMERE ;
- La série temporelle du niveau moyen au Verdon afin de prendre en compte les différents phénomènes météorologiques locaux (surcote dépressionnaire ou décote anticyclonique ...) – données fournies par le GPMB ;
- Les débits de la Garonne et de la Dordogne à l'amont.

Tous ces forçages sont sur une année réelle. Les bases de données utilisées sont les plus complètes et précises.

Ce sont exactement les mêmes types de forçages (sources identiques) qui sont utilisés pour la phase de calage et la phase d'exploitation.

Il a été vérifié l'existence des données de forçages pour les années 2008, 2009 et 2013 :

- Le signal de marée réel issu du modèle global FES2012 est disponible pour les années 2008, 2009 et 2013 ;
- Les débits de la Garonne et de la Dordogne sont également disponibles pour les années 2008, 2009 et 2013. A noter qu'il manque ponctuellement quelques données (sans conséquence pour la modélisation) ;
- La série temporelle du niveau moyen au Verdon est disponible pour les années 2008 et 2009. En revanche, certaines données sont manquantes ou incohérentes (valeurs « 888 » ou « 999 ») pour les mois de juin, de juillet et de décembre 2013 ;
- La chronique temporelle de vent issue de la base de données HOMERE n'est pas disponible en 2013. La base de données HOMERE ne fournit des données que jusqu'à fin 2012 ;
- La chronique temporelle de houle issue de la base de données HOMERE n'est pas disponible en 2013. La base de données HOMERE ne fournit des données que jusqu'à fin 2012.

Tableau 5 : Disponibilité des données de forçage

Année	Disponibilité des données hydrologiques de forçage
2008	Oui
2009	Oui
2013	Non

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.1.2.3. Données disponibles de rejet

Le modèle sera exploité sur une année réelle complète. Cela signifie que chaque chantier réalisé (clapage du puits de drague sur une zone de vidage) sera représenté.

Les chantiers seront effectués un à un dans le modèle, en suivant leur ordre chronologique selon les données fournies par le GPMB.

D'après les échanges avec le GPMB, l'ensemble de ces éléments est disponible. Cet élément n'est donc pas discriminant dans le choix de l'année à retenir.

Tableau 6 : Disponibilité des données de rejet

Année	Disponibilité des données de rejet – A confirmer
2008	Oui
2009	Oui
2013	Oui

4.1.3. Conclusion

D'un point de vue hydrologique, les années 2008, 2009 et 2013 sont intéressantes afin d'avoir des événements d'étiage et de crues. L'année 2009 présente des événements de crues très importants. Concernant la représentativité des opérations de dragage/rejet, il n'existe pas d'élément discriminant pour ces trois années.

Cependant, un certain nombre de données de forçage, indispensable pour le modèle, ne sont pas disponibles pour l'année 2013.

Par conséquent, il a été proposé et validé en réunion du 4 septembre de retenir l'année hydrologique 2009 (sept-2008 à sept-2009) comme année d'exploitation.

4.2. FORÇAGES HYDRO-METEOROLOGIQUES MODELISES

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

4.2.1. Forçage en débit

Les débits journaliers de la Dordogne et de la Garonne sont imposés à chaque limite amont du modèle. L'évolution temporelle de ces débits est présentée sur la **Figure 20**. Ces données ont été fournies par le GPMB.

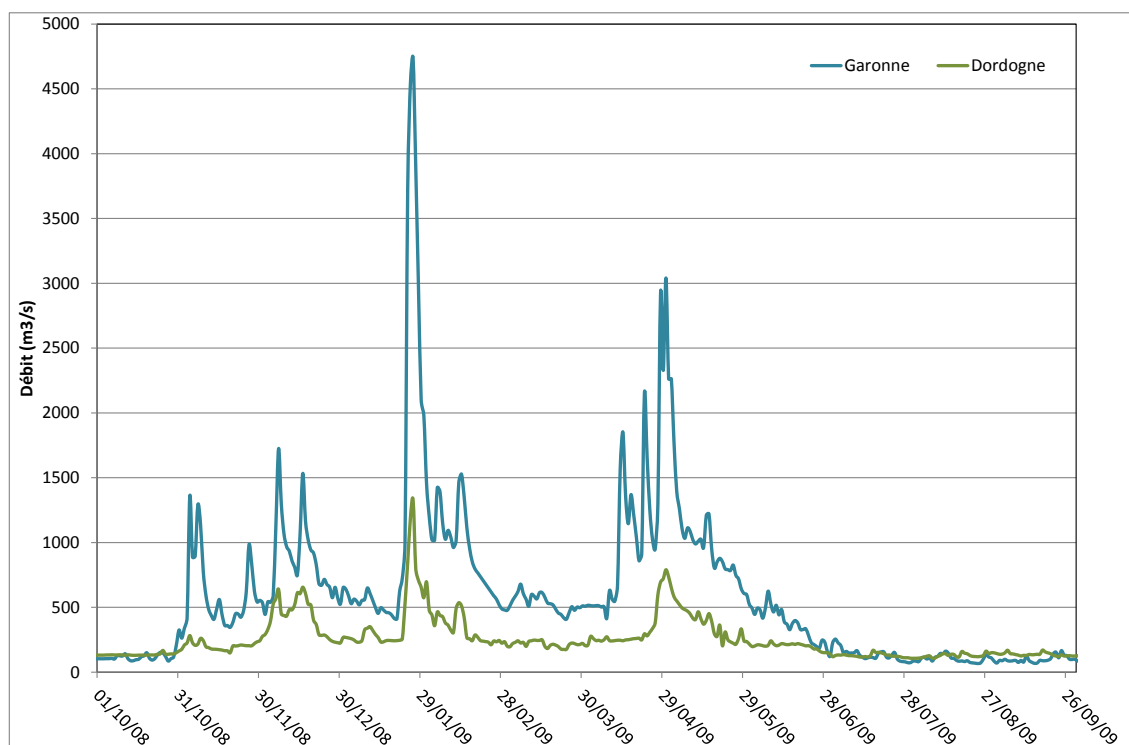


Figure 20. Débit journalier de la Garonne et le Dordogne – octobre 2008 à septembre 2009

4.2.2. Imposition du niveau et des vitesses à la frontière maritime

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

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

Afin de prendre en compte les différents phénomènes météorologiques locaux (surcote dépressionnaire ou décote ...), le niveau moyen au marégraphe du Verdon est calculé sur la période de calage puis ajouté sous forme de série temporelle à l'ensemble des points frontières, s'ajoutant ainsi au niveau d'eau lié à la marée.

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

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.2.3. Forçage en vent

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

Ces données sont imposées sur l'ensemble du modèle.

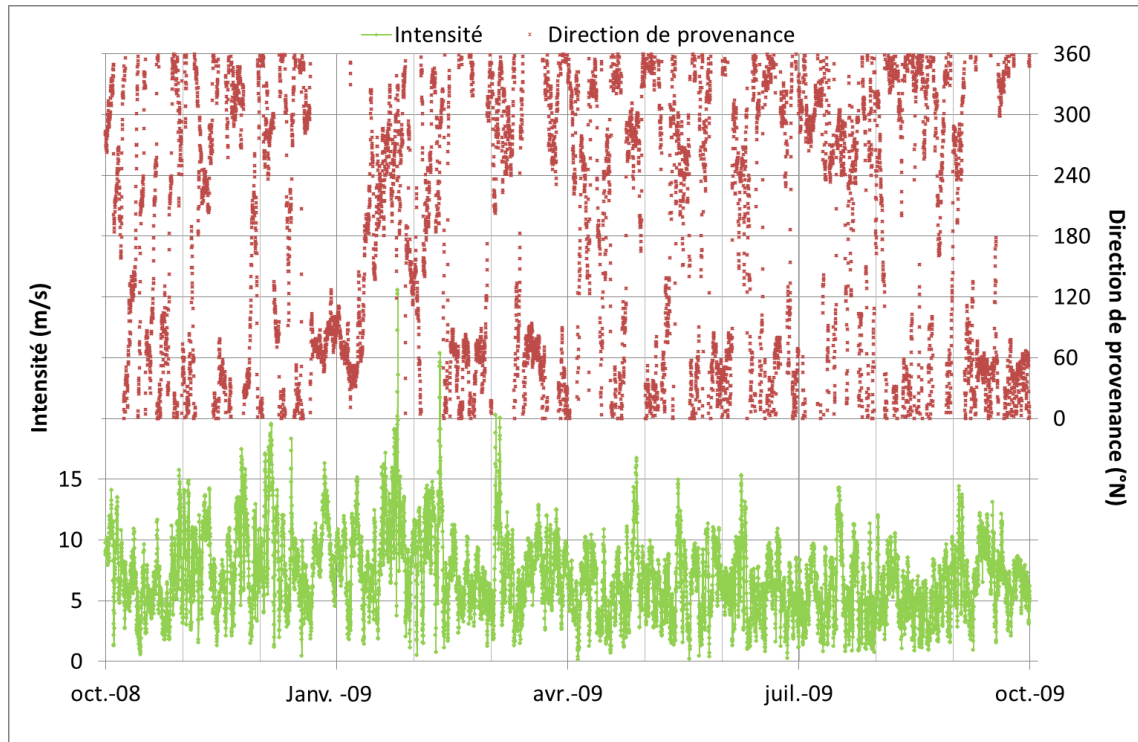


Figure 21. Vent (intensité et direction de provenance) – période 2008-2009

4.2.4. Forçage en houle

Les données de houle au large ont été extraites de la base de données HOMERE³ (zone Manche – Golfe de Gascogne) au point 9467 au large de l'embouchure au niveau de la condition aux limites du modèle :

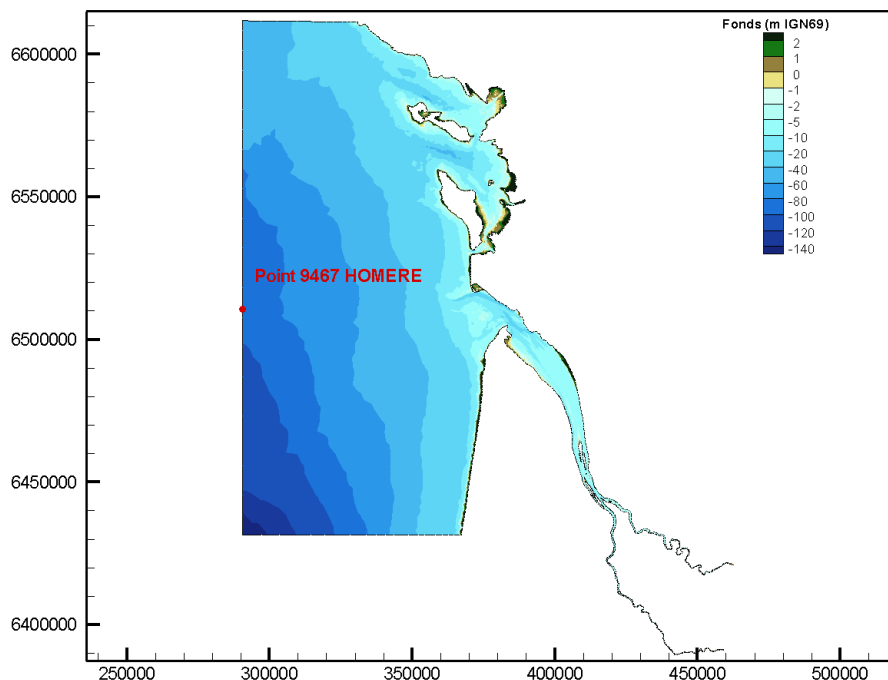
² Développée par Ifremer

³ Développée par Ifremer

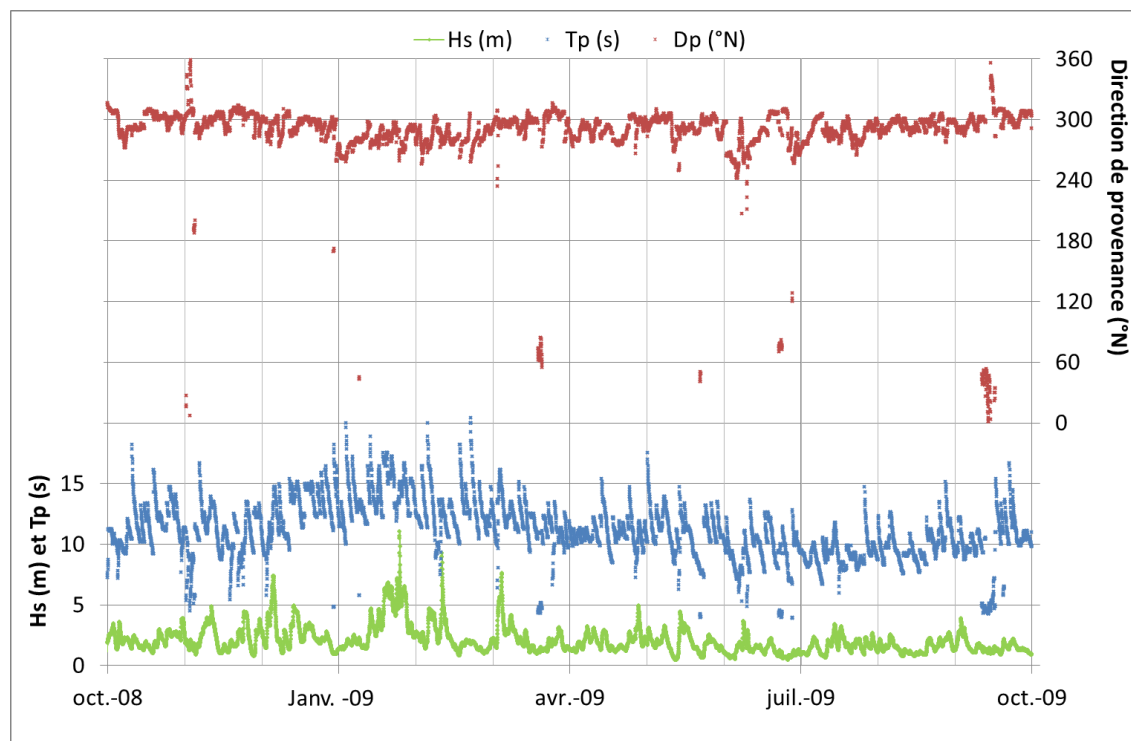
Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

**Figure 22. Position du point 9467 base de donnée Homère**

Les résultats fournis se présentent sous la forme d'une série chronologique de Hmo, Tp et Direction de pic. Le point P9467 sert de conditions aux limites du modèle d'agitation de l'estuaire.

**Figure 23. Houle au point 9467 Homère – période 2008-2009**

Du fait du temps de calcul de propagation et de génération des houles, il n'est pas possible d'effectuer des calculs en parallèle de l'agitation et de l'hydro-sédimentaire 3D.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

L'idée est donc de créer une bibliothèque d'agitation en début de calcul pour différentes périodes, directions d'agitation et niveaux d'eau. A chaque pas de temps du calcul hydro-sédimentaire, et en chaque nœud, la houle sera interpolée dans la bibliothèque, à partir du niveau d'eau au point concerné et des conditions de houle au temps donné au point incident. Notons que le transfert est effectué de façon linéaire en hauteur significative sauf dans les petits fonds où le déferlement est pris en compte par écrêtage de la hauteur significative à 0,6 fois la hauteur d'eau locale.

Afin de créer cette bibliothèque, il est nécessaire de transférer les données d'agitation fournies au point P9467 en tout point du modèle. Pour cela, un modèle d'agitation (logiciel Tomawac de la chaîne Telemac) de l'estuaire basé sur le même maillage que le modèle hydro-sédimentaire a été mis en place

La matrice de propagation unitaire des houles a été calculée pour 10 classes de période et 11 classes de direction ainsi que pour des niveaux d'eau allant de -3 à +6 m IGN69 avec un pas de 0,25 m soit au total 4070 épures qui sont stockées dans la bibliothèque.

Tableau 7 – Epures de houle propagées

Hs_1m Tp/N°	180	200°	220°	240°	260°	270°	280°	300°	320°	340°	360°
3s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11s				x	x	x	x	x	x		
13s				x	x	x	x	x	x		
15s				x	x	x	x	x	x		
17s				x	x	x	x	x	x		
19s				x	x	x	x	x			
21s				x	x	x	x				

En chaque pas de temps et chaque point du modèle, une houle est interpolée à partir de cette bibliothèque de propagation de houle.

4.3. MODELISATION DES CLAPAGES

Ce chapitre est issu du mémo « Plan de gestion des sédiments de dragage de la Gironde – Analyse des clapages, des remises en suspension et prise en compte dans la simulation » (26/10/2015).

Dans un premier temps, il est nécessaire de comprendre que chaque pratique de dragage ou remise en suspension doit être transcrite pour le modèle sous forme de 11 données :

- Position X, Y de l'activité
- Temps de début d'activité
- Durée de l'activité
- Masse rejetée : Masse de vase, Masse de sable 1, Masse de sable 2, Masse de sable 3
- Pour chaque type de sédiment : pourcentage déposé au sol, pourcentage en suspension
- Cote Z dans la colonne d'eau où la masse en suspension est rejetée

Ces paramètres vont bien sûr varier suivant les 3 pratiques relevées en 2008-2009 :

- Clapages (vidages des puits de dragues sur les zones d'immersions) ;
- Dragage par injection d'eau (expérimentation par la Jetsed par la société Sodranord) ;
- Rejet par conduite au fil de l'eau (dragage de la forme 3 à Bassens).

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Mais aussi en fonction du lieu de clapage, puisque la nature du sédiment dragué diffère selon la zone de dragage, notamment pour la répartition sable et vase.

Il convient de préciser que seuls les chantiers réalisés dans l'estuaire et pris en charge par le GPMB (et pour lesquels nous avons récupéré toutes les informations, transmises par le GPMB) ont été considérés.

Les informations concernant l'activité dragage des petits ports est trop imprécise pour la prendre en compte : volumes inférieurs à un certain seuil, densité non connue, période de dragage non précisée... Il faut rappeler que les volumes générés par le dragage de ces petits ports sont beaucoup moins importants que ceux du GPMB.

4.3.1. TYPE DE SEDIMENT MODELISES

La modélisation 3D proposée permet de simuler un sédiment de type cohésif (vase) et trois sédiments de type non-cohésifs (sables).

Le sédiment de type cohésif est caractérisé par un ensemble de paramètres (vitesse de chute, contrainte d'érosion, modèle de tassement), ce qui a fait l'objet d'un memo spécifique.

Les sédiments non-cohésifs sont plus simplement caractérisés par leur diamètre, ce qui permet de calculer directement une contrainte critique d'érosion correspondante. L'important est donc de cibler les diamètres les plus représentatifs des sables qui sont clapés.

D'après la « Demande d'autorisation pour l'entretien du chenal et des ouvrages portuaires » de 2004 effectuée par le PAB [Ref.21], l'étude de la granulométrie des zones draguée montre :

Entre Bordeaux et Ambes:

- Dans les mélanges vaso-sableux (à dominante vase): 3 à 16% de sables fins (entre 63 à 200 µm)

Entre Ambes et Pauillac:

- Dans les mélanges vaso-sableux (à dominante vase): 7 et 12% de sables fins (entre 63 µm et 200 µm).
- Sur la passe sableuse de Cussac : D50 : 260-450 µm Dmoy : 350µm

Entre Pauillac et Le Verdon:

- Dans les mélanges vaso-sableux (à dominante vase): 4 et 11% de sables fins (entre 63 µm et 200 µm).
- Sur la passe sableuse de Lamena : D50 : 240-500 µm Dmoy : 400µm
- Sur la passe sableuse de la Chambrette : D50 : 300-550 µm Dmoy : 450µm

Dans l'embouchure de la Gironde:

- Sur la passe de l'ouest aval : D50 : 220-280 µm Dmoy : 250µm
- Sur la passe de l'ouest amont : D50 : 220-450 µm Dmoy : 380µm

Nous avons donc choisi 3 classes granulométriques qui nous permettent de représenter au mieux l'ensemble des sables observé dans les dragages le long de l'estuaire :

Sable 1 (sable fin) : d=150 microns

Sable 2 (sable moyen inf): d= 300 microns

Sable 3 (sable moyen sup): d= 500 microns

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Nous avons replacé ces 3 classes, sur les courbes granulométriques effectuées sur les zones draguées afin d'attribuer un pourcentage de chaque classe de sable (à l'intérieur de la fraction sableuse) suivant la zone draguée :

Méthode employée : (Exemple sur la granulométrie mesurée sur la Passe Ouest aval):

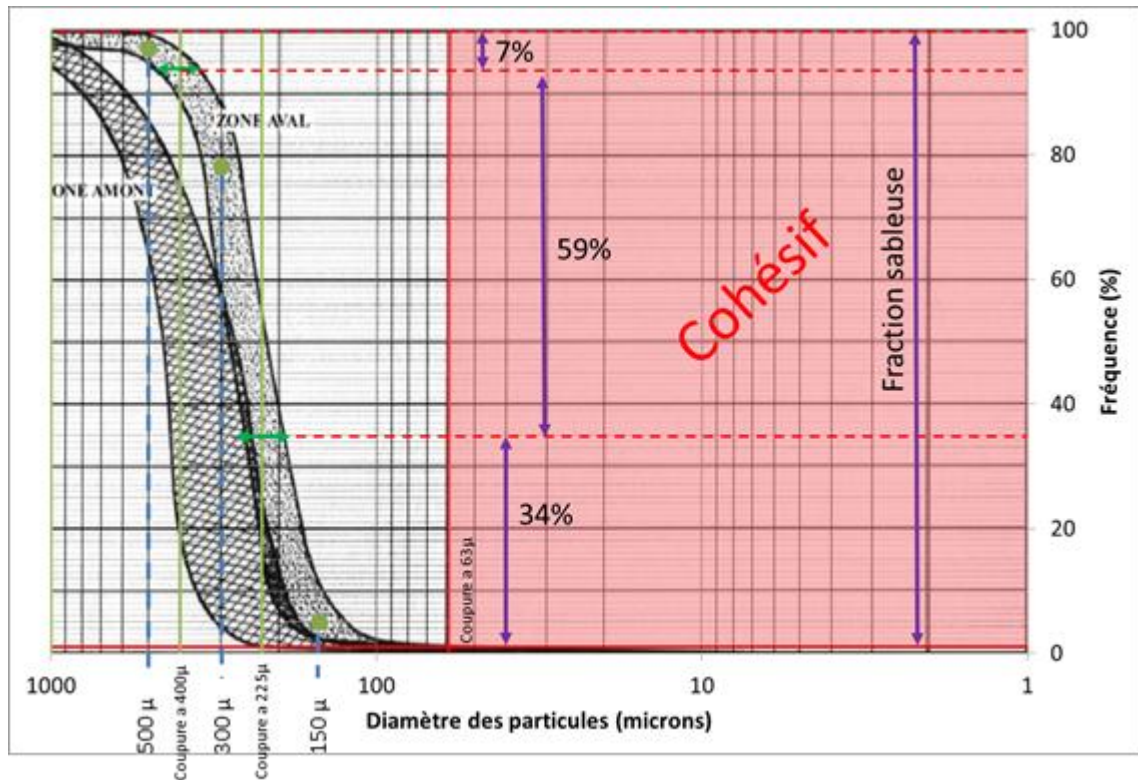


Figure 24 : Méthodologie de répartition des 3 classes de sable sur l'exemple de la Passe Ouest aval

Dans un premier temps on enlève la partie de sédiment inf. à 63 microns qui représente la partie cohésive.

Dans un second temps sont placées les coupures entre chaque classe granulométriques choisies :

- Les classes 150 et 300 microns sont séparées à 225 microns $\{ (150+300)/2 \}$
- Les classes 300 et 500 microns sont séparées à 400 microns $\{ (300+500)/2 \}$

On regarde à quelle ordonnée correspond l'intersection de chaque coupure et le milieu du fuseau de granulométrie mesuré (flèches vertes horizontales). On peut alors lire verticalement le % de sédiment correspondant à cette classe. On recalcule alors pour chaque classe un pourcentage en enlevant la partie inférieure à 63 microns (très faible dans cet exemple), puisque l'on cherche une répartition des classes dans la fraction sableuse.

On trouve dans ce cas :

- sables fins $d= 150 \mu m$: 34%
- sables moyen inf. $d=300 \mu m$: 59%
- sables moyen sup. $d=500 \mu m$: 7%

Les points 150, 300 et 500 microns sont simplement placés sur le fuseau pour montrer la représentativité de ces trois classes par rapport à l'échantillon étudié.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Résultat entre Bordeaux et Ambes:

- Dans les mélanges vaso-sableux (à dominante vase):

sables fins d= 150 μm	100%
sables moyen inf. d=300 μm	0%
sables moyen sup. d=500 μm	0%

Résultat entre Ambes et Pauillac:

- Dans les mélanges vaso-sableux (à dominante vase):

sables fins d= 150 μm	100%
sables moyen inf. d=300 μm	0%
sables moyen sup. d=500 μm	0%
- Sur la passe sableuse de Cussac :

sables fins d= 150 μm	15%
sables moyen inf. d=300 μm	49%
sables moyen sup. d=500 μm	36%

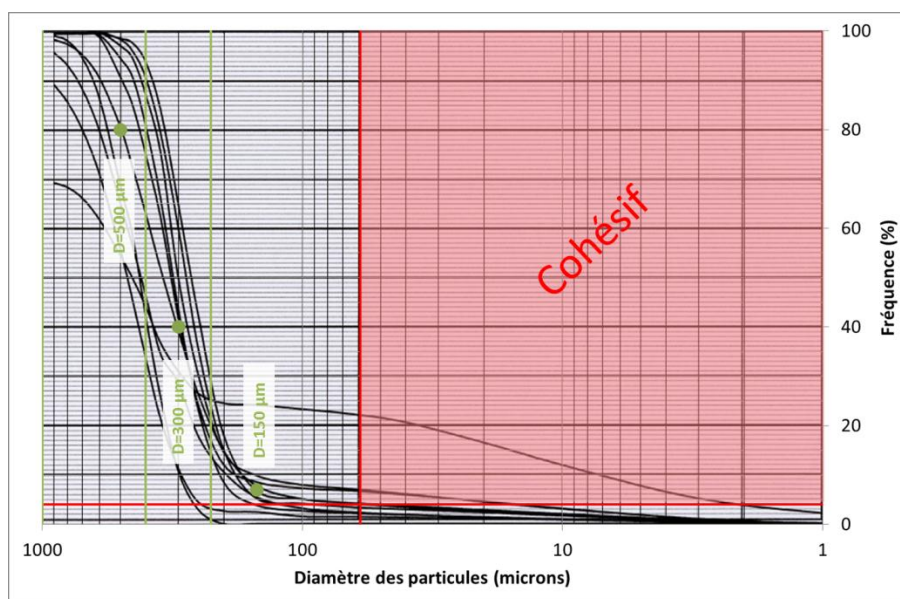


Figure 25 : Granulométrie de la passe de Cussac et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]

Résultat entre Pauillac et Le Verdon:

- Dans les mélanges vaso-sableux (à dominante vase):

sables fins d= 150 μm	100%
sables moyen inf. d=300 μm	0%
sables moyen sup. d=500 μm	0%
- Sur la passe sableuse de Lamena :

sables fins d= 150 μm	5%
sables moyen inf. d=300 μm	28%
sables moyen sup. d=500 μm	67%

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

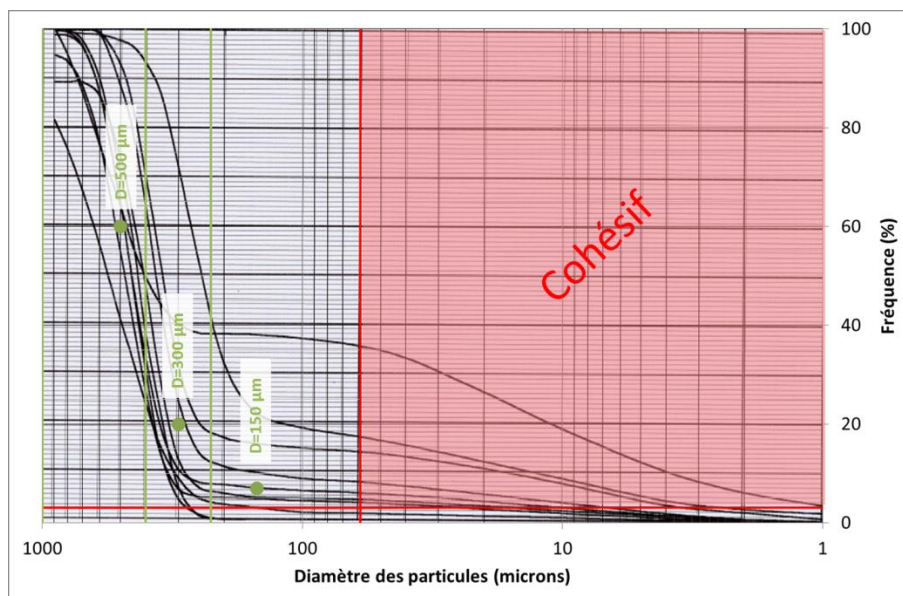


Figure 26 : Granulométrie de la passe de Lamena et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]

- Sur la passe sableuse de la Chambrette :

sables fins $d = 150 \mu\text{m}$	4%
sables moyen inf. $d = 300 \mu\text{m}$	51%
sables moyen sup. $d = 500 \mu\text{m}$	45%

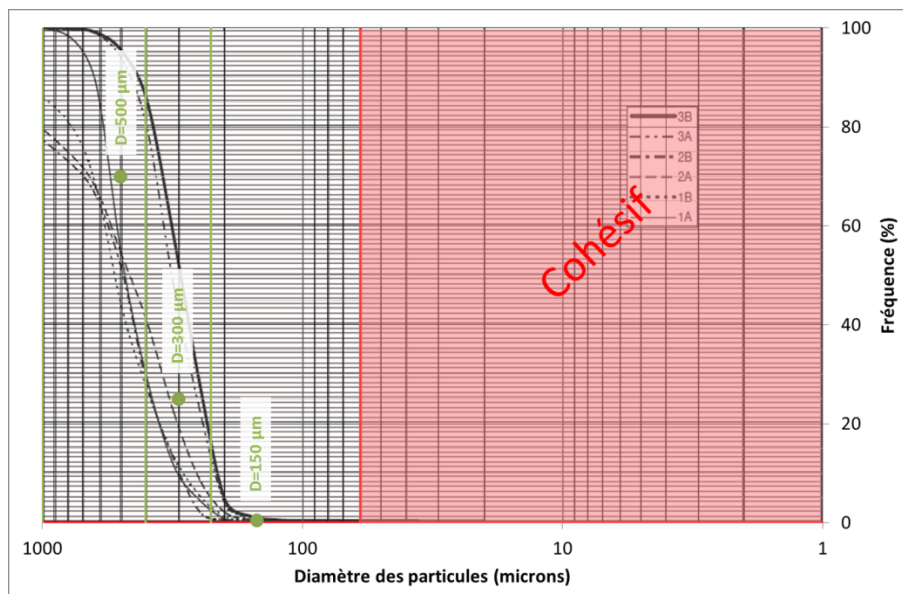


Figure 27 : Granulométrie de la passe de la Chambrette et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]

Résultat dans l'embouchure de la Gironde:

- Sur la passe de l'ouest aval :

sables fins $d = 150 \mu\text{m}$	34%
sables moyen inf. $d = 300 \mu\text{m}$	59%
sables moyen sup. $d = 500 \mu\text{m}$	7%

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

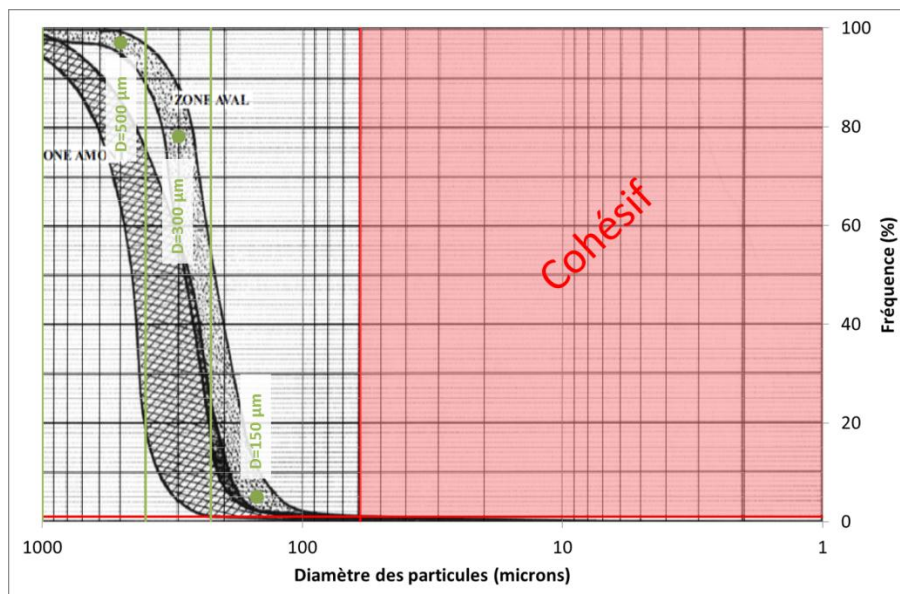


Figure 28 : Granulométrie de la Passe Ouest Aval et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]

- Sur la passe de l'ouest amont :

sables fins $d = 150 \mu\text{m}$	1%
sables moyen inf. $d = 300 \mu\text{m}$	63%
sables moyen sup. $d = 500 \mu\text{m}$	36%

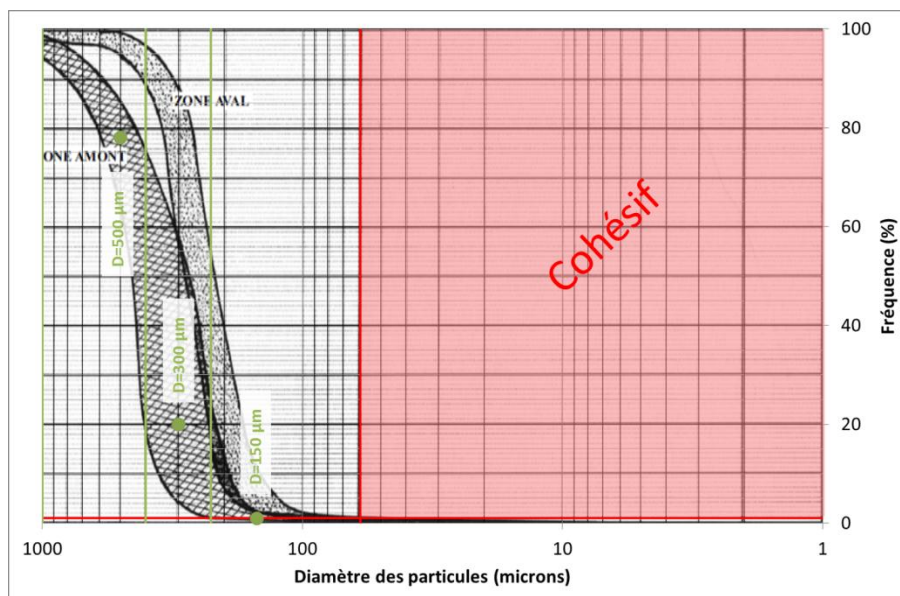


Figure 29 : Granulométrie de la Passe Ouest Amont et discrétisation granulométrique modélisée [Ref.21]

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.3.2. CLAPAGES SUR LES ZONES D'IMMERSION**4.3.2.1. ANALYSE DE LA PRATIQUE ET DES DONNEES**

Sur l'année d'exploitation, deux dragues du GPMB ont entretenu les chenaux, accès et postes, et clapé leur chargement sur les zones d'immersion de l'estuaire :

- la drague *La Maqueline*, drague à benne porteuse automotrice ;
- la drague *P. Lefort*, drague aspiratrice en marche.

La drague aspiratrice en marche *Samuel de Champlain*, appartenant au GIE Dragages Ports, est intervenue en renfort de la *P. Lefort* du 28 juin au 10 juillet 2009 sur la période d'exploitation.

Les données relatives aux chantiers (cycles de dragage-immersion) ont été récupérées par le GPMB et transmises à Artelia sous forme de feuilles de calcul Excel. Les figures suivantes présentent un extrait du type de données collectées.

ENGIN_ID	JOUR	N_SEQ	C_GESTION	C_CHANTIER	C_VIDAGE	V_PUIT	TE_DEB	TE_FIN	MATERIAUX	V_PIGE	DENS_EAU	TEMP_S	TON_MIXT	DENS_MIXT	MAT_SECHE	DATE_EPOCH	DEPL_L	DEPL_LEGE	FLAGNC	COMMENTS
PL	01/10/2008 00:00	1	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	25	0	0	0	1222804800	0	0	1	
PL	01/10/2008 00:00	1				0	0	0	0	0	1	25	0	0	0	1222804800	0	0	1	
PL	01/10/2008 00:25	2	DR	SJPAU	24	2221	3.53	5.62	V	0	1	28	3193	1	1561	1222806300	6927	3734	1	
PL	01/10/2008 00:53	3	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	47	0	0	0	1222807980	0	0	1	
PL	01/10/2008 01:40	4	DR	SJPAU	24	2223	3.53	5.65	V	0	1	33	3234	1	1623	1222810800	6967	3734	1	
PL	01/10/2008 02:13	5	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	47	0	0	0	1222812780	0	0	1	
PL	01/10/2008 03:00	6	DR	SJPAU	24	2224	3.53	5.63	V	0	1	27	3207	1	1578	1222815600	6940	3734	1	
PL	01/10/2008 03:27	7	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	53	0	0	0	1222817220	0	0	1	
PL	01/10/2008 04:20	8	DR	SJPAU	24	2224	3.53	5.62	V	0	1	23	3193	1	1556	1222820400	6927	3734	1	
PL	01/10/2008 04:43	9	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	42	0	0	0	1222821780	0	0	1	
PL	01/10/2008 05:25	10	DR	SJPAU	24	2231	3.53	5.76	V	0	1	24	3382	2	1849	1222824300	7116	3734	1	
PL	01/10/2008 05:49	11	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	43	0	0	0	1222825740	0	0	1	
PL	01/10/2008 06:32	12	DR	SJPAU	24	2203	3.53	5.76	V	0	1	20	3382	2	1894	1222828320	7116	3734	1	
PL	01/10/2008 06:52	13	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	42	0	0	0	1222829520	0	0	1	
PL	01/10/2008 07:34	14	DR	SJPAU	24	2224	3.53	5.65	V	0	1	19	3234	1	1622	1222832040	6967	3734	1	
PL	01/10/2008 07:53	15	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	44	0	0	0	1222833180	0	0	1	
PL	01/10/2008 08:37	16	DR	SJPAU	24	2221	3.53	5.6	V	0	1	21	3166	1	1518	1222835820	6900	3734	1	
PL	01/10/2008 08:58	17	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	36	0	0	0	1222837080	0	0	1	
PL	01/10/2008 09:34	18	DR	SJPAU	24	2228	3.53	5.66	V	0	1	24	3247	1	1637	1222839240	6981	3734	1	
PL	01/10/2008 09:58	19	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	58	0	0	0	1222840680	0	0	1	
PL	01/10/2008 10:56	20	DR	SJPAU	24	2227	3.53	5.68	V	0	1	25	3274	1	1682	1222844160	7008	3734	1	
PL	01/10/2008 11:21	21	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	44	0	0	0	1222845660	0	0	1	
PL	01/10/2008 12:05	22	DR	SJPAU	24	2220	3.53	5.61	V	0	1	41	3180	1	1541	1222848300	6913	3734	1	
PL	01/10/2008 12:46	23	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	46	0	0	0	1222850760	0	0	1	
PL	01/10/2008 13:32	24	DR	SJPAU	24	2225	3.53	5.68	V	0	1	37	3274	1	1685	1222853520	7008	3734	1	
PL	01/10/2008 14:09	25	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	47	0	0	0	1222855740	0	0	1	
PL	01/10/2008 14:56	26	DR	SJPAU	24	2210	3.53	5.66	V	0	1	21	3247	1	1666	1222858560	6981	3734	1	
PL	01/10/2008 15:17	27	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	47	0	0	0	1222859820	0	0	1	
PL	01/10/2008 16:04	28	DR	SJPAU	24	2232	3.53	5.79	V	0	1	22	3423	2	1913	1222862640	7157	3734	1	
PL	01/10/2008 16:26	29	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	40	0	0	0	1222863960	0	0	1	
PL	01/10/2008 17:06	30	DR	SJPAU	24	2227	3.53	5.74	V	0	1	25	3355	2	1812	1222866360	7089	3734	1	
PL	01/10/2008 17:31	31	VI	SJPAU	24	0	0	0	0	0	1	42	0	0	0	1222867860	0	0	1	
PL	01/10/2008 18:13	32	DR	SJPAU	24	2224	3.53	5.65	V	0	1	21	3234	1	1622	1222870380	6967	3734	1	

Figure 30 : Extrait des données - drague aspiratrice en marche Pierre Lefort

ENGIN_ID	JOUR	N_SEQ	C_GESTION	C_CHANTIER	C_VIDAGE	V_PUIT	TE_DEB	TE_FIN	MATERIAUX	V_PIGE	DENS_EAU	TEMP_S	TON_MIXT	DENS_MIXT	MAT_SECHE	DATE_EPOCH	DEPL_L	DEPL_LEGE	FLAGNC	COMMENTS
LM	01/06/2009 00:00:00	1	DE			0	0	0	0	0	1.0	20.01667	0	0	0	1243800000	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 07:00:00	4	AT			0	0	0	0	0	1.0	20.00000	0	0	0	1243825200	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 07:20:00	5	RL	P 418	11	0	0	0	0	0	1.0	17.00000	0	0	0	1243828400	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 07:37:00	6	DR	P 418	11	450	2.21	3.42	V	0	1.0	60.00000	653.165	1.5	326	1243827420	1621	967.6617	1	
LM	01/06/2009 08:37:00	7	VI	P 418	11	0	0	0	0	0	1.0	68.00000	0	0.0	0	1243831020	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 09:45:00	8	AR			0	0	0	0	0	1.0	75.00000	0	0.0	0	1243835100	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 11:00:00	9	DR	P 418	11	450	2.21	3.43	V	0	1.0	78.00000	658.665	1.5	335	1243839600	1626	967.6617	1	
LM	01/06/2009 12:18:00	10	VI	P 418	11	0	0	0	0	0	1.0	67.00000	0	0.0	0	1243844280	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 13:25:00	11	RL	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	74.00000	0	0.0	0	1243848300	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 13:29:00	12	DR	P 415	11	450	2.21	3.37	V	0	1.0	63.00000	625.669	1.4	282	1243848540	1593	967.6617	1	
LM	01/06/2009 14:52:00	13	VI	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	70.00000	0	0.0	0	1243853520	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 16:02:00	14	DR	P 415	11	450	2.21	3.42	V	0	1.0	72.00000	653.165	1.5	326	1243857720	1621	967.6617	1	
LM	01/06/2009 17:14:00	15	VI	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	61.00000	0	0.0	0	1243862040	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 18:15:00	16	RL	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	51.00000	0	0.0	0	1243865700	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 18:46:00	17	AT			0	0	0	0	0	1.0	14.00000	0	0.0	0	1243867560	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 19:00:00	18	DE			0	0	0	0	0	1.0	300.00000	0	0.0	0	1243868400	0.00	0	1	
LM	01/06/2009 24:00:00	17	DE			0	0	0	0	0	1.0	0	0	0.0	0	1243889999	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 00:00:00	1	DE			0	0	0	0	0	1.0	20.01667	0	0	0	1243888400	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 07:00:00	4	AT			0	0	0	0	0	1.0	28.00000	0	0.0	0	1243911600	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 07:28:00	5	RL	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	26.00000	0	0.0	0	1243913280	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 07:54:00	6	DR	P 415	11	450	2.21	3.35	V	0	1.0	130.00000	614.67	1.4	264	1243914840	1582	967.6617	1	
LM	02/06/2009 10:04:00	7	VI	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	62.00000	0	0.0	0	1243922640	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 11:26:00	8	DR	P 415	11	450	2.21	3.36	V	0	1.0	105.00000	620.17	1.4	273	1243927560	1588	967.6617	1	
LM	02/06/2009 13:11:00	9	VI	P 415	11	0	0	0	0	0	1.0	75.00000	0	0.0	0	1243933860	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 14:26:00	10	DR	P 415	11	450	2.21	3.34	V	0	1.0	95.00000	609.171	1.4	256	1243938360	1577	967.6617	1	
LM	02/06/2009 14:35:00	11	RI			0	0	0	0	0	1.0	4.00000	0	0.0	0	1243938900	0.00	0	1	
LM	02/06/2009 14:36:00	12	AR			0	0	0	0	0	1.0	60.00000	0	0.0	0	1243939140	0.00	0	1	

Figure 31 : Extrait des données - drague à benne La Macqueline

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.3.2.2. REPARTITION DES MASSES DE SABLE ET VASE POUR CHAQUE CLAPAGE**4.3.2.2.1. Méthode**

Les fiches de données d'immersions des 3 dragues fournissent le tonnage de matière sèche correspondant à chaque chargement. Cette masse est celle représentée dans le modèle. Les 4 703 clapages modélisés représentent une masse totale d'environ 6,57 Mtonnes de sédiments dont la très grande majorité provient de la drague aspiratrice en marche pierre Lefort. Sur cette masse, il est nécessaire de répartir dans un premier temps les pourcentages de vase et sable correspondant.

La densité en puits des dragues n'a pas été utilisée pour effectuer cette répartition car celle-ci n'a pas été jugée représentative du sédiment transporté : en effet, la densité en puits diffère selon si la drague pratique ou non la surverse pour optimiser le chargement. Par exemple, la densité en puits moyenne des chargements en provenance des passes ouest (correspondant en majorité à du sable) est de 1.34, ce qui est du même ordre de grandeur que des chargements en provenance de postes à quai (majoritairement vaseux).

Les analyses granulométriques réalisées sur les passes et postes de l'estuaire entre 2010 et 2014 sont alors utilisées afin d'associer à chaque chargement de drague, un pourcentage de répartition entre sable et vase. Pour chaque chargement de drague, nous connaissons le lieu de dragage et associons l'échantillon de sédiment le plus proche. Nous privilégions les analyses réalisées durant les années 2010-2011, années hydrologiques plus proches de 2009.

Cette méthode est appliquée pour les 4 703 clapages modélisés et le tableau suivant présente la correspondance entre les différents chargements de drague inventoriés en 2008 et 2009 et le point d'analyse granulométrique considéré.

Lieu de chargement de la drague	Nom du/des échantillons de sédiment pour l'analyse granulométrique	% de sable dans le / les échantillons
PW1, PW2, PW3, PW4 PW5&6	PW1 – PW2	99%
P 805, AC 805	P 805	43%
P 806	P 806	58%
Richard	RICHARD 1 – RICHARD 2	51%
Goulée	GOULEE 1 – GOULEE 2	12%
BY..	BY	10%
P 700	P. 700	7%
SJPAU	SJP 1 – SJP 2	14%
BEYCH	BEYCHEVELLE 1 - BEYCHEVELLE 2	12%
Cussa	CUSSAC 1 – CUSSAC 2	64%
ILEVE	CUSSAC 1 – CUSSAC 2 – ROQUE THAU	54%
P.600, P.601	P 600	17%
ACBAV, BECAV	BEC AVAL	9%
P.501, P.511, AC511	Poste 511	12%
P.512	Poste 512	10%
BELRI	BELLERIVE	8%
PACHA	PACHAN	14%
CAILL	CAILLOU	13%
BASAV	BASSENS AVAL	14%
P.413, P.414, P.415, P.416, P.417, P.418, P.421	Poste 415	9%
P.43., P.431, P.432, P.433, P.434	Poste 434	12%
P.435, P.436, P.449	Poste 435	4%
P.241, P.243, P.245	BAF 1 – BAF 2	6%
EDFNA., CNB., LEST., PHOBS	Pas de données	Hypothèse : 10% de sable et 90% de vase

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.3.2.2. Résultats

Les tableaux suivants présentent les masses associées aux différentes dragues pour les années 2008 et 2009.

Drague Pierre LEFORT – 2008 / 2009			
Lieux	Masse sable (t)	Masse vase (t)	Somme (en t)
Verdon - postes	18 356	24 332	42 688
Richard	13 813	13 271	27 083
Goulée	94 978	696 503	791 480
By	43 531	391 776	435 306
Pauillac - St Julien	445 026	2 733 733	3 178 759
Beychevelle	4 988	36 576	41 563
Cussac	153 816	86 522	240 338
Ile Verte	2 744	2 338	5 082
Bec Aval	23 904	241 693	265 597
Ambes - postes	1 069	7 838	8 907
Bellerive	16 192	186 206	202 398
Caillou / Pachan	46 979	293 618	340 597
Bassens aval	12 285	75 465	87 750
Bassens - postes	261	2 188	2 448

Drague La Macqueline – 2008 / 2009			
Lieux	Masse sable (t)	Masse vase (t)	Somme (en t)
Verdon - postes	9 949	8 680	18 629
Pauillac - St Julien	194	2 578	2 773
Beychevelle	1 624	11 913	13 537
Blaye - postes	981	4 790	5 772
Ambes - postes	5 497	43 420	48 917
Bassens - postes	13 106	152 651	165 758
Bordeaux	615	14 764	15 379
Autres	4 599	41 394	45 993

Drague Samuel de Champlain – 2008 / 2009			
Lieux	Masse sable (t)	Masse vase (t)	Somme (en t)
Passes ouest	178 996	1 808	180 804
Richard	92 042	88 432	180 474
Goulée	29 010	212 743	241 754

Total – Rejet par immersion des trois dragues – 2008 / 2009			
	Masse sable (t)	Masse vase (t)	Somme (en t)
Total	1 210 000	5 360 000	6 570 000

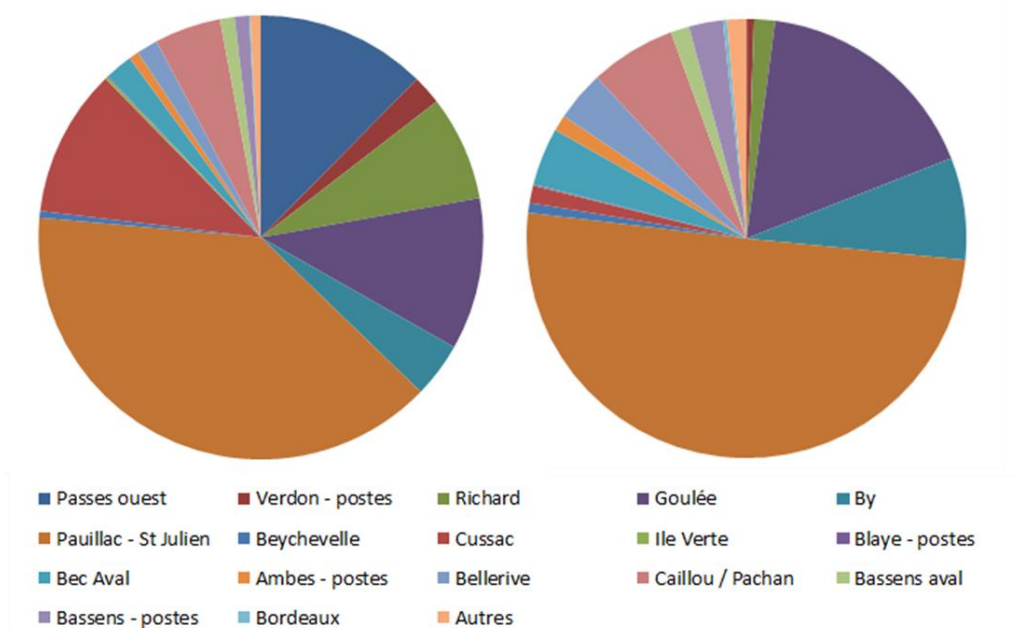
Au total sur les 3 dragues, ce sont 6,57 Mt de sédiments qui ont été dragués sur la période d'étude, avec une répartition de 18% de sable et 82% de vase en moyenne.

La figure suivante présente la provenance des sables et des vases pour les trois dragues confondues.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Provenance des sables (2008-2009) Provenance des vases (2008-2009)**Figure 34 : Provenance des sables et vases clapés en 2008 - 2009**

Dans un second temps, il est nécessaire d'attribuer un diamètre moyen à chaque chargement de sable. Pour cela, nous considérons les hypothèses réalisées au paragraphe 2 concernant la répartition des masses entre les 3 catégories de sables modélisées. Ceci correspond à appliquer la répartition suivante pour les secteurs répertoriés dans le tableau précédent :

Embouchure aval (en violet clair dans le tableau) :

- 34% de sable fin,
- 59% de sable moyen inf.
- 7% de sable moyen sup.

Embouchure amont (en jaune clair dans le tableau) :

- 1% de sable fin,
- 63% de sable moyen inf.
- 36% de sable moyen sup.

Passes de Cussac (en rose clair dans le tableau) :

- 15% de sable fin,
- 49% de sable moyen inf.
- 36% de sable moyen sup.

Tous les autres secteurs (en bleu clair dans le tableau):

- 100% de sable fin.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Sur la totalité des sables clapés, ces répartitions représentent 80% de sable fin, 14% de sable moyen inférieur, et 6% de sable moyen supérieur. Au final, les masses de vase et sable intégrées dans le modèle au titre des clapages d'entretien par les 3 dragues étant intervenues en 2008 et 2009, sont les suivantes :

Le graphique suivant montre les masses cumulées de chaque classe de sédiment intégrées dans le modèle :

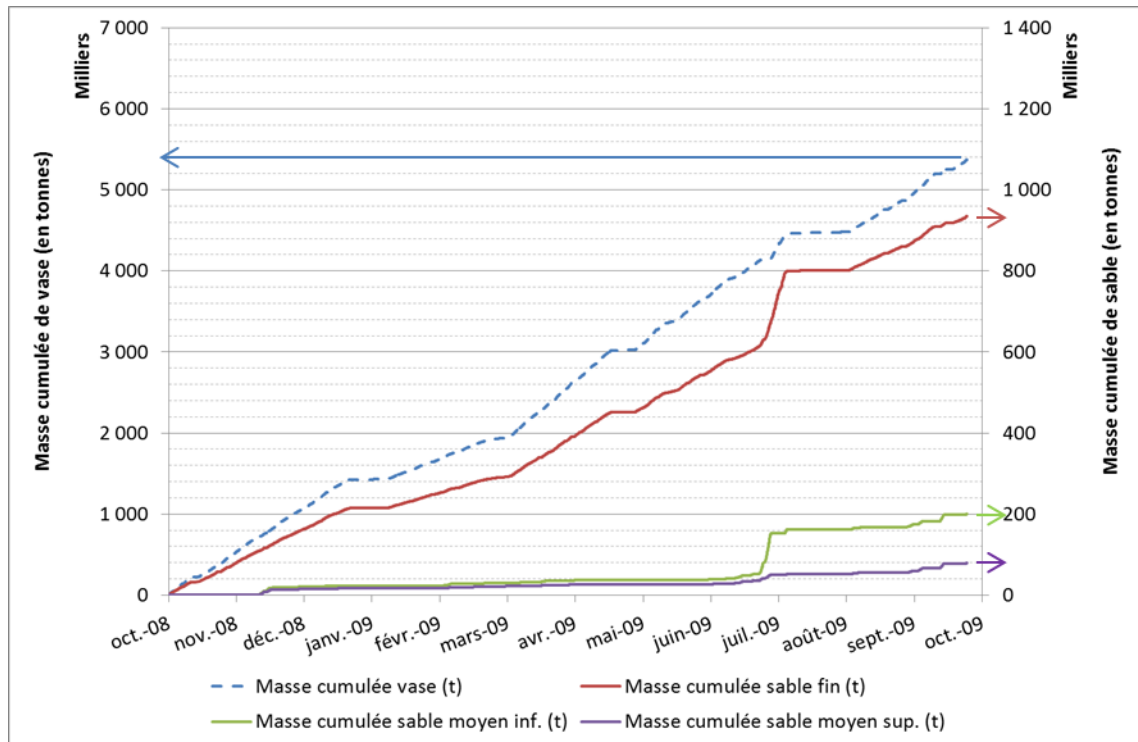


Figure 35 : Masses cumulées de sable et vase draguées en 2008 - 2009

4.3.2.3. MODELISATION D'UN CLAPAGE

La modélisation des clapages a été calée et validée sur des expériences in-situ sur le site de Machu en baie de Seine [Ref.22]. Il a été déversé en 6 mois 1,2 millions de tonnes de sédiments sur deux zones expérimentales: MASED et MABIO, pour lesquelles les méthodes de déversement ont différées (étalement ou concentration du déversement). Un suivi des deux sites a été effectué sur 2 ans et demi. Le modèle a été calé et validé sur ce suivi.

4.3.2.3.1. CALAGE ET VALIDATION DE LA MODELISATION DES CLAPAGES SUR LE SITE DE MACHU

Les chronologies, la composition sédimentaire et les positionnements exacts des clapages réalisés ont été simulés avec les forçages réels (houle, vent, débit).

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

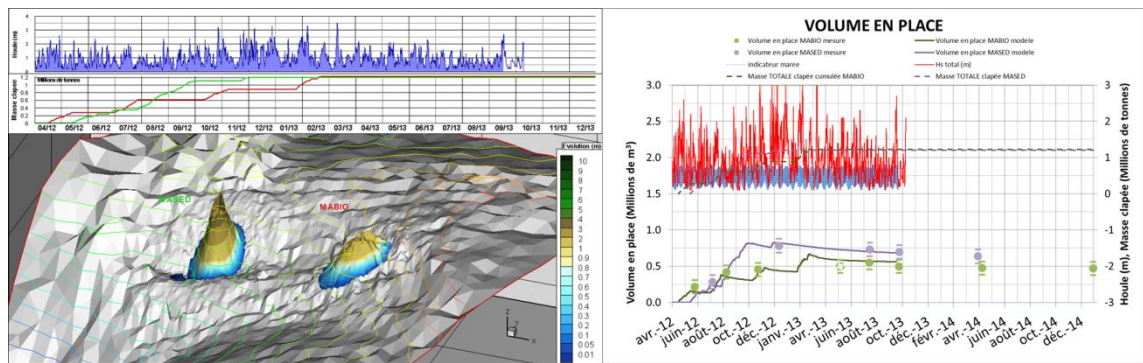


Figure 36 : Gauche : bathymétrie modélisée après 18 mois, Droite : comparaison des volumes restés en place [Ref.22]

Le modèle a permis de reproduire sur chacune des expériences l'évolution en masse et volume des dépôts observés. Le taux de stabilité en masse était de 60% et 71% respectivement sur MABIO et MASED.

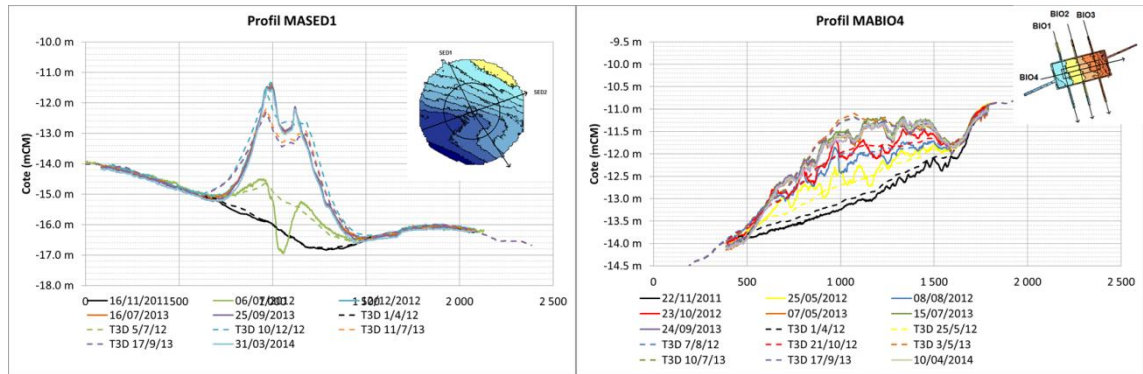


Figure 37 : Gauche : comparaison des profils bathymétriques sur MASED, Droite : comparaison des profils bathymétriques sur MABIO [Ref.22]

La géométrie des dépôts a pu aussi être calibrée et validée sur des profils bathymétriques réguliers.

4.3.2.3.2. MODELISATION DES CLAPAGES EN GIRONDE

Faute de mesures spécifiques suffisante pour pouvoir recalculer un tel modèle de stabilité, nous allons réutiliser le paramétrage utilisé sur le site de Machu présenté précédemment.

La masse de chaque clapage est répartie à chaque pas de temps (10 secondes) de façon uniforme sur une durée totale de 5 minutes.

A. REPARTITION DES MASSES

Le clapage peut de manière générale être divisé en 3 phases :

- La suspension dans la totalité de la colonne d'eau,
- Le panache turbide de fond,
- La partie déposée sur le fond

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

Techniquement, dans le modèle, les parties 'suspension' et 'panache turbide' sont réunies dans la colonne d'eau au point de clapage. La partie dynamique de descente en masse, n'est pas modélisée, cependant la seule descente par vitesse de chute permet d'obtenir un panache de fond plus réaliste que si l'on impose un panache turbide de fond avec une forme géométrique préétablie. En effet, le panache de fond calculé, après convection par vitesse de chute, tient compte du courant ambiant et de la morphologie locale des fonds.

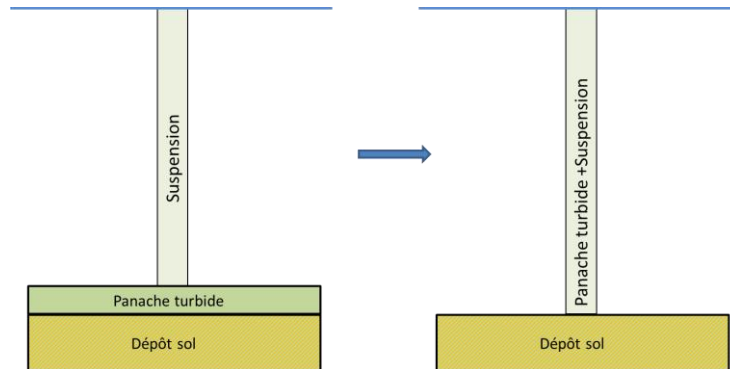


Figure 38 : Schéma de décomposition d'un clapage et schéma de décomposition d'un clapage modélisé [Ref.22]

Pour chaque clapage, la répartition des masses dans les deux phases se fait selon la vitesse du courant ambiant. Les mesures en nature d'IMDC (sur le site de Machu et de la Lambarde) viennent conforter les expériences en laboratoire de Boutin :

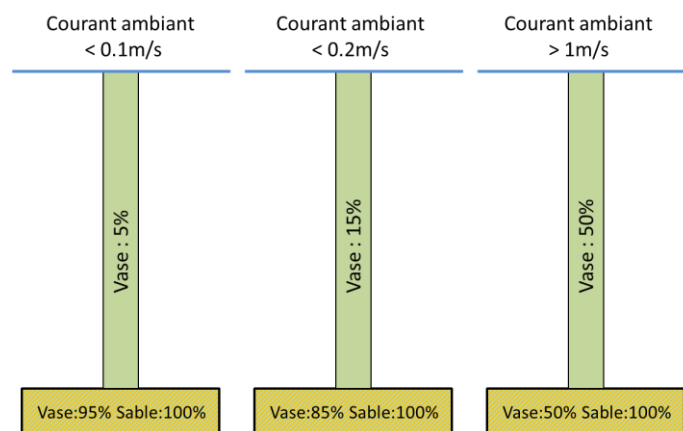


Figure 39 : Schéma de répartition des masses d'un clapage suivant la vitesse du courant ambiant [Ref.22]

Ces répartitions sont par contre établies pour des clapages effectués à l'arrêt. Le calage sur Machu a montré qu'un pourcentage minimum en suspension due au clapage en marche doit être appliqué du fait de la vitesse relative de la drague. La vitesse de la drague au moment du clapage, dépasse généralement la vitesse moyenne de 1m/s, ce qui ramène à imposer un pourcentage en suspension de 50% de la masse vaseuse.

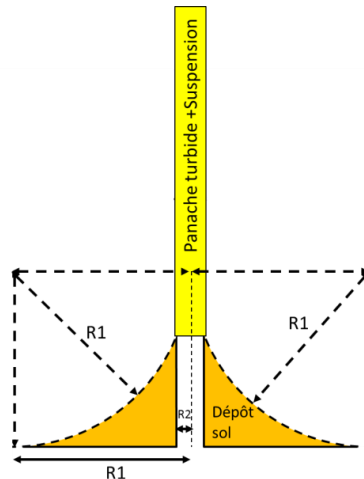
B. GEOMETRIE DES DEPOTS AU SOL

Les mesures bathymétriques ont montré que les dépôts au sol ont une forme de cratère. La partie dynamique du clapage n'étant pas modélisée, les dépôts au sol modélisés auront directement une forme géométrique de cratère dépendant de deux rayons (R1 et R2) dans le modèle :

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

**Figure 40 : Schéma de la modélisation géométrique d'un clapage [Ref.22]****4.3.2.3.3. Paramètres retenus pour les clapages**

Tous ces paramètres ont été calés sur les expériences in-situ du site de Machu:

- Minimum de masse de vase en suspension lors du clapage : 50%
- Rayon R1 : 500m
- Rayon R2 : 100m
- Concentration de la vase mise dans la partie dépôt : 600g/l (pour la vase de Seine)

La concentration du pourcentage de vase déposé au sol par descente en masse (50%) a été calibrée avec une concentration de 600g/l pour une vase de Seine. Cela correspond à une vase qui a consolidée une centaine de jours. Nous proposons d'utiliser le même ordre de grandeur pour la Gironde ce qui correspondrait dans le modèle de tassement à la couche de consolidation : 550 g/l.

- Glissement vase liquide : 1%
- Glissement mixture sur le site : 2%

4.3.3. RELOCALISATION PAR DRAGAGE A INJECTION D'EAU (JETSSED)**4.3.3.1. ANALYSE DE LA PRATIQUE ET DES DONNEES**

Du 14 au 25 septembre 2009, le GPMB a expérimenté une nouvelle technique de dragage qui consiste à fluidifier le sédiment en y injection de l'eau à basse pression, afin que cette mixture soit naturellement évacuée par les courants sur les fonds. C'est le dragage par injection d'eau (DIE).

Les opérations de dragage ont été réalisées par la société Sodranord avec l'engin *Jetsed*.

Le GPMB nous a fourni les documents suivants :

- Les bilans journaliers d'exploitation de Sodranord, avec les heures et temps passés sur les chantiers de dragage (essentiellement Bellerive ainsi que Bec aval et P.512.),
- Les données du service hydrographique du GPMB, à savoir les bathymétries avant, pendant et après dragage, le résultat de la cubature donnant le volume « en érosion » entre les deux bathymétries,
- Les rapports de suivi de l'expérimentation (Ginger [Ref.23] et Geo-Transert [Ref.24]).

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

4.3.3.1.1. METHODE

La quantification des volumes dragués par dragage à injection d'eau est délicate car elle ne peut pas être réalisée directement : il n'y a pas de volumes extraits / prélevés du milieu.

L'évaluation des opérations de dragage par injection d'eau est donc réalisée à partir d'un contrôle bathymétrique réalisé avant et après dragages. Le différentiel de ces deux bathymétries permet de calculer un volume « érodé », que l'on suppose correspondant et égal un volume « dragué » et rejeté dans le milieu ambiant.

Ces volumes sont les suivants :

- 404 022 m³ sur le secteur de Bellerive et P.512 ;
- 10 688 m³ sur le secteur du Bec aval.

Nous considérons comme hypothèse que le sédiment érodé correspond à de la vase et que ces volumes correspondent à un poids volumique humide moyen de la vase en place de 1,4 t/m³ (valeur issue de la demande d'autorisation de 2004- 3eme partie- Dragage d'entretien du chenal de navigation et des ouvrages portuaires). La teneur en sédiment sec résultante est égale à 0,65 t/m³.

Ceci correspond à l'introduction dans le modèle d'une masse de vase de :

- 262 614 t sur le secteur de Bellerive et P.512 ;
- 6 947 t sur le secteur de Bec Aval.

Etant données les heures de dragages effectuées, nous calculons un débit solide moyen de remise en suspension par Jetsed.

Secteur	Masse de vase remise en suspension (en t)	Heures de chantier (h)	Débit solide moyen de remise en suspension
Bellerive et P.512	262 614	123	2135 t/h soit 593 kg/s
Bec Aval	6 947	12,5	555,8 t/h soit 154 kg/s

Ce débit solide calculé est introduit dans le modèle pour représenter les activités de dragages par injection d'eau.

4.3.3.1.2. MODELISATION DE LA REMISE EN SUSPENSION PAR JETSED

Le débit solide calculé dans le chapitre précédent (kg/m³/s) sera imposé dans la colonne d'eau sur le premier point de maillage se situant au-dessus du fond soit 0,45 m au-dessus du fond dans l'estuaire.

Spatialement, ce point de rejet se déplacera graduellement de l'aval vers l'amont de la zone draguée (position centrale latéralement) durant la période de chaque campagne.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

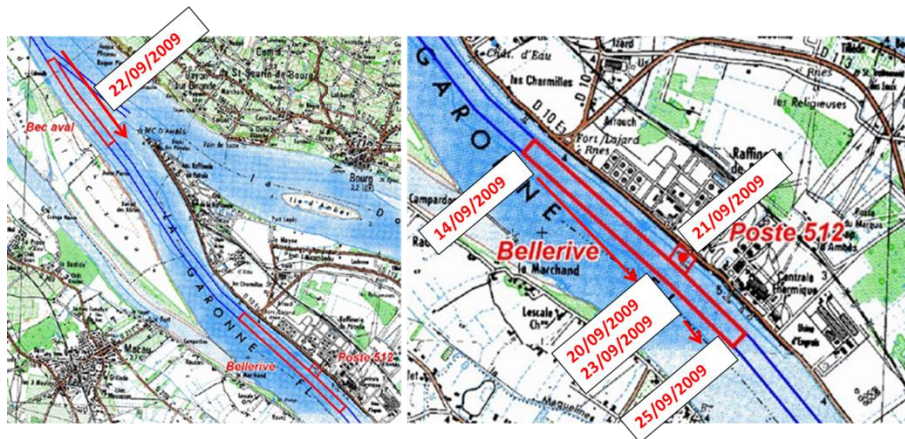


Figure 41 : déplacement temporel du point de rejet modélisé pour simuler les activités de Jetsed

4.3.4. REJET PAR CONDUITE AU FIL DE L'EAU

4.3.4.1. ANALYSE DE LA PRATIQUE ET DES DONNEES

En mars-avril 2009, le GPMB a procédé au dragage de la forme 3 de Bassens avec la drague stationnaire *Baltimore*.

A l'issue de 40 jours de dragage (du 18 mars au 26 avril 2009), 46 870 m³ de sédiments ont été dragués in situ.

LE GPMB nous a transmis un fichier ODS avec la durée des chantiers de dragage, le nombre de jours de dragage et le volume total dragué à l'issue de l'opération.

4.3.4.1.1. Méthode

A partir des données reçues, nous calculons :

- le rendement moyen de la drague aspiratrice stationnaire : de l'ordre de 170 m³/h.
- la durée moyenne du chantier journalier : de l'ordre de 7 heures.

A partir de ces hypothèses, nous arrivons à $170 \times 7 \times 40 = 47\,600 \text{ m}^3$ (surestimation de 730 m³).

Nous faisons l'hypothèse que le matériau rejeté est vaseux. Le poids volumique humide moyen de la vase en place est posé comme hypothèse : 1,40 t/m³ (valeur issue de la demande d'autorisation de 2004- 3eme partie- Dragage d'entretien du chenal de navigation et des ouvrages portuaires); la teneur en sédiment sec résultante est égale à 0,65 t/m³.

La masse de sédiment rejetée en suspension dans la Gironde par la conduite de refoulement sera de 110 t en une heure ($= 0,65 \text{ t/m}^3 \times 170 \text{ m}^3/\text{h}$), pendant 7 heures.

Soit un débit solide de vase $Q_v = 30.7 \text{ kg/s}$ considéré rejeté dans la Gironde par la conduite de refoulement.

4.3.4.1.2. MODELISATION D'UN REJET PAR CONDUITE AU FIL DE L'EAU

Le débit solide calculé dans le chapitre précédent ($Q_v = 30.7 \text{ kg/s}$) sera imposé dans la colonne d'eau sur un point de maillage se situant environ 1 mètre au-dessus du fond.

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

A défaut de connaître l'heure de démarrage de chaque chantier journalier de dragage, nous posons l'hypothèse que le dragage (et rejet) démarre à 9h et se termine à 16h (soit 7h/jour). Cela signifie que les opérations peuvent se dérouler au jusant comme au flot.

En l'absence d'information sur le point de rejet (extrémité de la conduite de refoulement), nous faisons l'hypothèse qu'il se situe à l'aval de la forme, en bordure du chenal, aux environs du point de coordonnées X : 420995 et Y : 6428554 (cf. figure ci-dessous). Nous déplacerons ce point légèrement à l'intérieur du chenal si besoin, afin de vérifier que ce point est toujours en eau tout au long de la marée.

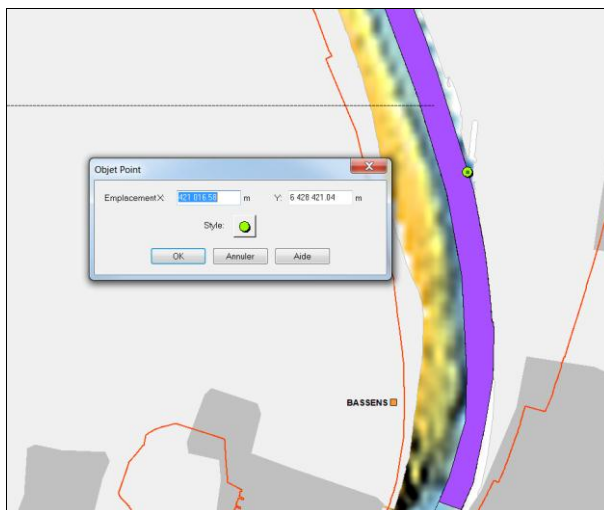


Figure 42 : Positionnement du point de rejet modélisé pour simuler les activités de rejet par conduite au fil de l'eau

RÉFÉRENCES

- [Ref.1]: Lan Anh VAN, Catherine VILLARET, Damien PHAM VAN BANG, Holger SCHUETTRUMPF, Erosion and deposition of the Gironde mud, ICSE6 Paris - August 27-31, 2012
- [Ref.2]: Boutin, R. (1993). Etude et caractérisation des processus de dépôt, tassement et consolidation d'une vase de Gironde. D.E.A Report, Ecoles Nationale des Travaux Maritimes, 104 p.
- [Ref.3]: Migniot, C., Bellessort, B., (1970). - Etude des propriétés physiques de la vase de la Gironde - Tassement et rigidité initiale - Laboratoire Central d'Hydraulique de France – 1970
- [Ref.4]: Gratiot N., Michallet H, Mory M. (2005) On the determination of the settling flux of cohesive sediments in a turbulent fluid. Journal of Geophysical Research, Vol. 110, C06004
- [Ref.5]: Sottolichio A., Hurther D., Gratiot N., Bretel P. (2011) Acoustic turbulence measurements of near-bed suspended sediment dynamic in highly turbid waters of a macrotidal estuary. Continental Shelf Research 31S36-S49
- [Ref.6]: Lan Anh VAN, Thèse : Modélisation du transport des sédiments mixtes sable-vase et application à la morphodynamique de l'estuaire de la Gironde, Laboratoire d'Hydraulique Saint – Venant, Université Paris-Est, 2013
- [Ref.7]: Manning, A.J. et K.R. Dyer, 2007. Mass settling flux of fine sediments in northern european estuaries: measurements and predictions. Marine Geology, 245, 107-122
- [Ref.8]: Verney, R., 2006. Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, soutenue en avril 2006
- [Ref.9]: Verney, R., R ; Lafite, J.C. Brun-Cottan et P. Le Hir, 2011. Behaviour of a floc population during a tidal cycle : laboratory experiments and numerical modelling. Continental Shelf Research, 31 (10), supplement 1, S64-S83
- [Ref.10]: Van Rijn, L. C, 2007. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE
 Part I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport, 133(6), 649-667
 Part II: suspended Transport, 133(6), 668-689
 Part III: Graded beds, 133(7), 761-775
 Part IV: application of Morphodynamic Model, 133(7), 776-793
- [Ref.11] Migniot, Synthèse des connaissances sur le tassement et la Rhéologie des vases, LCHF, 1987
- [Ref.12] A.Ferral, M.Villerot, Caractéristiques des vases et de la crème de vase du système fluvio-estuarien de la Gironde, Port Autonome de Bordeaux, 1984 ;
- [Ref.13] J.Viguié, P.Galichon, Vases Gironde, Seuils de navigabilité, LCHF pour le PAB, 1987 ;

Elaboration du plan de gestion des sédiments de dragage de l'estuaire de la Gironde

Etape 2 : Diagnostic opérationnel – définition des enjeux et des besoins

RM1-E2-3 : Exploitation du modèle : hypothèses du calcul hydrosédimentaire des opérations de dragage

-
- [Ref.14] Galissaire, De Crouette, Hamm, G8M mast2 Project4 topic B/C, Flume measurements of mud processes under steady and unsteady currents, 52184 R3, SOGREAH, 1994.
 - [Ref.15] Migniot C., Erosion et sédimentation en mer et rivière, La pratique des sols et des fondations, éditions le moniteur 1981, 103p.
 - [Ref.16] Ariathurai, K.Arulanandan, Erosion rate of cohesive soils, J. Hydraul. Div., ASCE, 104, HY2, 279-283,1978
 - [Ref. 17] Bonnefille, R., Cormault, P., Kovacs, J. (1971). - Etude expérimentale de la dynamique des sédiments fins.Rapport no. 2 (Rapport HCO42/25 de LNH, EDF).
 - [Ref. 18] Harrison and Owen, 1971, Siltation of fine sediments in estuaries, IAHR XIVCongress.
 - [Ref. 19] Cormault, P. (1971). - Determination experiment du debit solide d'érosion des sediments fins cohésifs. IAHR XIV Congress.
 - [Ref. 20] Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., 2004. Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire. , VIII journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004
 - [Ref.21] : Port Autonome de Bordeaux, 2004. Demande d'autorisation pour l'entretien du chenal et des ouvrages portuaires - Etude d'impact, Troisième partie
 - [Ref.22] :Artelia, 2015. Clapages expérimentaux sur le site de Machu. Développement d'un modèle 3D de stabilité et d'un modèle 3D de dispersion pour le GPMR.
 - [Ref.23] : Ginger, 2010. Suivi de l'incidence de la technique de remobilisation des sédiments par injection d'eau - essai 2009. Rapport GEI 8346-002, Février 2010.
 - [Ref.24] : Geo-Transfert, 2010. Etude d'incidence de la technique de remobilisation des sédiments par injection d'eau - essai 2009. Mesures du courant et de la turbidité par les techniques OBS et ADCP. Février 2010.

oOo