



Exploitation du modèle HySQEL pour l'analyse sédimentaire de l'estuaire de la Loire dans le cadre du renouvellement de l'autorisation des opérations de dragage d'entretien et d'immersion en mer des matériaux

Version V4



Exploitation du modèle HySQL pour l'analyse sédimentaire de l'estuaire de la Loire dans le cadre du renouvellement de l'autorisation des opérations de dragage d'entretien et d'immersion en mer des matériaux

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
1	Version initiale	RWR	OBD	09/2023
2	Version mise à jour suite aux commentaires du GIP LE et du GPMNSN	RWR	OBD	10/2023
3	Version mise à jour suite aux commentaires V2 du GIP LE et du GPMNSN	RWR	OBD	21/11/2023
4	Version mise à jour suite aux commentaires V3 du GIP LE et du GPMNSN	RWR	OBD	27/11/2023
Artelia 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles – TEL 04 76 33 43 45				

scénario de référence

SOMMAIRE

OBJET DU DOCUMENT	7
SYNTHÈSE ET CONCLUSION	9
SYSTÈMES DE COORDONNÉES.....	16
1. OBJECTIF DE LA MODÉLISATION	17
2. CONSTRUCTION DU MODÈLE.....	18
2.1. Présentation du modèle existant.....	18
2.2. Modifications apportées au modèle raffiné estuaire externe dans le cadre de cette étude.....	21
2.2.1. Traçage du sédiment immergé sur la Lambarde	21
2.2.2. Prise en compte des opérations des DAS et DIE.....	21
2.3. Comparaison avec la modélisation utilisée jusqu'en 2021 pour les différents dossiers d'autorisation.....	22
3. FORÇAGES ET CONDITIONS AUX LIMITES	24
3.1. Période simulée.....	24
3.2. Débit liquide et solide de la Loire	24
3.3. Marée et niveau moyen	25
3.4. Vent	26
3.5. houle.....	27
3.6. Forçages anthropiques adaptés au scénario de référence.....	28
3.6.1. Clapages par DAM	28
3.6.1.1. Exploitation des données réelles clapées par le GPMNSN sur 2017-2018	28
3.6.1.2. Modélisation d'un clapage	29
3.6.1.3. Facteur correctif pour adaptation au scénario de référence	30
3.6.1.4. Stratégie de clapage dans le scénario de référence	31
3.6.2. Dragages par DAM	32
3.6.3. Remises en suspension par DAS et DIE.....	32
3.6.3.1. Position horizontale du point de rejet	32
3.6.3.2. Position et étendue de la zone de dragage correspondante	33
3.6.3.3. Position verticale du point de rejet dans la colonne d'eau	33

scénario de référence

3.6.3.4.	Débit solide de la masse de vase rejetée	34
3.6.3.5.	Dates et heures de début et durée d'activité d'une opération de dragage	35
3.6.3.6.	Facteur correctif pour adaptation au scénario de référence	35
4.	CONDITIONS INITIALES	37
4.1.	Sur l'ensemble du modèle hors zone Lambarde.....	37
4.2.	Sur la zone de la Lambarde	37
5.	RÉSULTATS DE MODÉLISATION	39
5.1.	Validation du modèle sur le réseau SYVEL	39
5.2.	Evolution de la zone de la lambarde	39
5.3.	Dispersion : profils temporels de concentration moyenne dans les baies et l'estuaire externe	41
5.3.1.	Autour du site de la Lambarde (points 1, 2, 3, 4)	42
5.3.2.	Chenal de navigation et chenal de Mindin (points 5, 6, 7, 8)	44
5.3.3.	Baie de Saint-Michel-Chef-Chef (points 9,10)	46
5.3.4.	Baie de la Baule (point 14)	47
5.3.5.	Entrée de la baie de Bourgneuf (points 11, 12, 13)	47
5.4.	Dispersion : profils temporels de concentration moyenne dans l'estuaire (sections maritime, intermédiaire et endiguée)	49
5.4.1.	Section maritime (point 15, 16 et 17)	50
5.4.2.	Section intermédiaire (point 18 et 19).....	52
5.4.3.	Section endiguée (point 20 et 21)	54
5.5.	Cartographie de la dispersion des sédiments provenant de la lambarde	56
5.6.	Bilan de masse pour les sédiments provenant de la Lambarde	62
5.6.1.	Bilan de masse annuel	62
5.6.2.	Evolution du bilan de masse au cours de l'année simulée.....	64
5.6.3.	Analyse de la stabilité en masse de vase sur le site de la Lambarde et sa zone d'influence	65
5.7.	Analyse des flux de sédiments provenant de la Lambarde.....	66
5.7.1.	Analyse des flux de sédiments en Zone Large	67
5.7.2.	Analyse des flux de sédiments en Zone 6 à 12 (baie de Bourgneuf).....	68
5.7.3.	Analyse des flux de sédiments en Zone 3 (baie de Saint-Michel-Chef-Chef)	69

5.7.4. Analyse des flux de sédiments en Zone 2 (estuaire externe proche de l'embouchure).....	70
5.7.5. Analyse des flux de sédiments en Zone 4 (globalité de l'estuaire interne).	71
5.8. Bilan de masse de l'estuaire pour la totalité des sédiments.....	72
5.8.1. Bilan de masse annuel à l'échelle de l'estuaire.....	72
5.8.2. Bilan de masse annuel à l'échelle de l'estuaire hors estuaire externe	73
5.8.3. Bilans de masse trimestriels par secteurs de dragages	74
5.8.3.1. 1 ^{er} Octobre 2017 au 1 ^{er} janvier 2018.....	75
5.8.3.2. 1 ^{er} janvier 2018 au 1 ^{er} avril 2018.....	76
5.8.3.3. 1 ^{er} avril 2018 au 1 ^{er} juillet 2018	77
5.8.3.4. 1 ^{er} juillet 2018 au 1 ^{er} octobre 2018	78
RÉFÉRENCES	79
ANNEXES	80
ANNEXE A RÉCAPITULATIF DES ETUDES ANTERIEURES SOGREAH/ ARTELIA	81
ANNEXE B VALIDATION DE LA DYNAMIQUE EN SALINITÉ ET MES SUR LES MESURES SYVEL 2017-2018 AVEC MODÉLISATION DES DRAGAGES DAM, DAS ET DIE	84
ANNEXE C NOTE TECHNIQUE SUR LE CHOIX DES ANNÉES DE RÉFÉRENCE POUR LA VALIDATION DU MODÈLE HYSQEL	85

TABLEAUX

Tableau 2-1 : Différences de modélisation hydrosédimentaire et de choix de simulation annuelle entre le précédent modèle (2008-2021) et le modèle HySQEL utilisé dans cette étude	22
Tableau 3-1 : Coordonnées des sections pour la modélisation	33
Tableau 5-1 : Percentiles des MES aux points 1, 2, 3 et 4	43
Tableau 5-2 : Percentiles des MES aux points 5, 6, 7 et 8	45
Tableau 5-3 : Percentiles des MES au point 9 et au point 10.....	46
Tableau 5-4 : Percentiles des MES au point 14.....	47
Tableau 5-5 : Percentiles des MES aux points 11, 12 et 13	48
Tableau 5-6 : Percentiles des MES aux points 15, 16 et 17	51
Tableau 5-7 : Percentiles des MES aux points 18 et 19.....	53
Tableau 5-8 : Percentiles des MES aux points 20 et 21.....	55
Tableau 5-9 : Récapitulatif du bilan de masse de sédiment dans le sol et en suspension.....	63

FIGURES

Figure 1-1 : dépôt calculé entre le 01/10/2032 et le 01/10/2033	10
Figure 1-2 : Bilan de masse à l'horizon 2032-2033 sur l'année hydrologique 2017-2018	10

scénario de référence

Figure 1-3 : Percentile 50 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : Pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 50 des MES.....	12
Figure 1-4 : Percentile 99 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : Pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 99 des MES.....	13
Figure 1-5 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 2.....	14
Figure 1-6 : Bilan de masse (en Mt) de l'estuaire interne et externe sur l'année hydrologique 2017-2018	15
Figure 2-1 : Vue générale du modèle global.....	18
Figure 2-2 : Vue générale du modèle local de stabilité de la Lambarde.....	19
Figure 2-3 : Zoom sur les modifications de maillage apportées au modèle raffiné estuaire externe, par rapport au modèle global	20
Figure 4 : Pratiques de dragage dans l'estuaire avec en rose le dragage par exportation (DAM) modélisée	21
Figure 3-1 : Débit liquide et concentration en MES imposés à l'amont du modèle	25
Figure 3-2 : Variation du niveau moyen due à la variation de pression atmosphérique (pression mesurée à Belle Ile)	26
Figure 3-3 : Position du point d'extraction dénommé Lambarde	26
Figure 3-4 : Variation temporelle du vent au niveau de la Lambarde issue de la base de données HOMERE	27
Figure 3-5 : Variation temporelle de la houle au niveau de la Lambarde	28
Figure 3-6 : Modélisation géométrique d'un dépôt de clapage	30
Figure 3-7 : Volumes à la densité 1.4 et masses clapées pour le scénario de référence	30
Figure 3-8 : Bathymétrie de Mai 2017 et isobathes -21 m CM (en vert) et -18 m CM (en rouge) (Source des données :GPMNSN).....	31
Figure 3-9 : Débit de la Loire à Montjean sur Loire (trait gris) et masse de vase remise en suspension (trait noir) par la DAS dans le scénario de référence	35
Figure 3-10 : Débit de la Loire à Montjean sur Loire (trait gris) et masse de vase remise en suspension (trait noir) par la DIE dans le scénario de référence	36
Figure 4-1 : Bathymétrie initiale au niveau de la Lambarde à la date prospective du 01/10/2032	38
Figure 5-1 : Bathymétrie finale et dépôt à la date prospective du 01/10/2033	40
Figure 5-2 : Position des points de contrôle de la MES dans les baies et l'estuaire externe	41
Figure 5-3 : Concentrations moyennes au point 1 et au point 4. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	42
Figure 5-4 : Concentration moyenne au point 2 et au point 3. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	43
Figure 5-5 : Concentration moyenne au point 5 et au point 6. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	44
Figure 5-6 : Concentration moyenne au point 7 et au point 8. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	45
Figure 5-7 : Concentration moyenne au point 9, au point 10 et au point 14. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire.....	46
Figure 5-8 : Concentration moyenne au point 14. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	47
Figure 5-9 : Concentration moyenne au point 11, au point 12 et au point 13. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	48
Figure 5-10 : Position des points de contrôle de la MES dans l'estuaire	49
Figure 5-11 : Concentrations moyennes au point 15 et au point 16. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	50
Figure 5-12 : Concentrations moyennes au point 17. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	51
Figure 5-13 : Concentrations moyennes au point 18. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	52

Figure 5-14 : Concentrations moyennes au point 19. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	53
Figure 5-15 : Concentrations moyennes au point 20. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	54
Figure 5-16 : Concentrations moyennes au point 21. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire	55
Figure 5-17 : Percentile 25 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 25 des MES.....	57
Figure 5-18 : Percentile 50 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 50 des MES.....	58
Figure 5-19 : Percentile 75 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 75 des MES.....	59
Figure 5-20 : Percentile 99 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 99 des MES.....	60
Figure 5-21 : Percentile 99 des masses de sédiment provenant de la Lambarde retranscrite en épaisseur de dépôt.....	61
Figure 5-22 : Emprise des zones de cubature	62
Figure 5-23 : Bilan de masse à l'horizon 2032-2033 sur l'année hydrologique 2017-2018.....	63
Figure 5-24 : Répartition des masses au cours du temps pour les baies et l'estuaire externe	64
Figure 5-25 : Répartition des masses au cours du temps dans les secteurs de l'estuaire.....	65
Figure 5-26 : Evolution de la masse de vase sur la zone 1, des clapages effectués et de la stabilité la zone 1 en masse de vase.....	66
Figure 5-27 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone Large.....	67
Figure 5-28 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 6 à 12.....	68
Figure 5-29 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 3	69
Figure 5-30 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 2	70
Figure 5-31 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 2	71
Figure 5-32 : Bilan de masse (en Mt) de l'estuaire interne et externe sur l'année hydrologique 2017-2018	72
Figure 5-33 : Bilan de masse (en Mt) de l'estuaire (hors estuaire externe) sur l'année hydrologique 2017-2018	73
Figure 5-34 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (automne) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018.....	75
Figure 5-35 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (hiver) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018.....	76
Figure 5-36 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (printemps) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018.....	77
Figure 5-37 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (été) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018.....	78

OBJET DU DOCUMENT

Le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (ci-après GPMNSN) réalise des dragages d'entretien de son chenal de navigation, des souilles qui lui sont adjacentes et des zones d'évitage dans le but de garantir un accès suffisamment aisé et sûr aux navires qui assurent son trafic.

Aujourd'hui, le GPMNSN bénéficie, d'un point de vue réglementaire, d'une autorisation pour les opérations de dragage d'entretien et d'immersion en mer des matériaux par arrêté inter-préfectoral Loire-Atlantique – Vendée du 24 avril 2013 pour une durée de 10 ans avec la rédaction d'un bilan intermédiaire à mi-parcours. L'arrêté inter-préfectoral du 28 avril 2022 a renouvelé l'autorisation de 2013 modifiée (par les arrêtés du 25 janvier 2017 et du 31 décembre 2020) jusqu'au 31 décembre 2024.

Le bilan à mi-parcours été finalisé en mai 2019. Il s'appuie sur des suivis de terrain, des analyses de laboratoire et de bureau ainsi que sur différentes modélisations numériques hydrosédimentaires concernant notamment l'impact des dragages par DAS (dragage par aspiration en stationnaire) et DIE (dragage par injection d'eau) dans l'estuaire sur les matières en suspension (MES), la stabilité du dépôt d'immersion de la Lambarde et la dispersion des sédiments instables sur ce dépôt.

Dans ses conclusions, le GPMNSN réaffirme qu'il poursuivra, jusqu'en 2023, la mise en œuvre des suivis et des acquisitions de connaissances associées pour continuer à évaluer, partager et réduire les incidences de ses opérations de dragage et d'immersion sur l'environnement.

Dans un document intitulé : « Evolutions envisagées des pratiques de dragage du GPMNSN, nouvelles optimisations des moyens de dragage » mis en annexe, le GPMNSN propose 3 scénarios de dragage alternatifs au scénario de dragage de référence.

A l'échéance de 5 à 10 ans, il est envisagé que la DAS André Gendre soit sortie du parc d'engins de dragage du GPMNSN et qu'un redimensionnement des moyens soit opéré, en prenant en compte le renouvellement des dragues du GIE Dragages-Ports et la maîtrise du GPM sur la DIE Milouin.

Ainsi, trois scénarios sont envisagés :

- scénario n°1 : maintien de la DAM Champlain pour un volume dragué légèrement réduit (< 10%) ; maintien de la DIE Milouin armée 12 heures/jour pour un volume dragué identique ; armement d'une petite DAM pour un volume dragué équivalent à celui dragué par la DAS dans le scénario de référence ;
- scénario n°2 : maintien de la DAM Champlain, mais pour un volume dragué sensiblement réduit (-45%) par rapport au scénario de référence ; armement de la DIE Milouin 24 heures/jour, doublant le volume annuel dragué ; armement d'une petite DAM pour un volume dragué équivalent à celui dragué par la DAS dans le scénario de référence (idem scénario n°1) ;
- scénario n°3 : une DAM de volume puits intermédiaire est mobilisée pour un volume annuel réduit de 50% par rapport au scénario de référence ; armement de la DIE Milouin 24 heures/jour (idem scénario n°2).

scénario de référence

Les volumes dragués par type de drague et par scénario sont récapitulés dans le tableau ci-après.

Volumes dragués en m ³	Scénario de référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
DAM ¹ de capacité 8 500 m ³	3 640 000	3 300 000	1 800 000	-
DAS ²	300 000	-	-	-
DIE ³ (h12 ouh24)	1 500 000	1 500 000	3 000 000	3 000 000
DAM de capacité 1800 m ³	-	300 000	300 000	-
DAM de capacité 2800 m ³	-	-	-	2 100 000
Total (m³)	5 440 000	5 100 000	5 100 000	5 100 000

Un nouveau modèle hydrosédimentaire et d'oxygène dissous HySQL a été développé et finalisé en 2023 pour le compte du GIP Loire Estuaire. Celui-ci est ici utilisé afin de simuler la dispersion du scénario de référence sur une année hydrologique moyenne et sur une bathymétrie du site de la Lambarde estimée à la fin de l'autorisation, soit 2034.

Cette étude vise ainsi à affiner la connaissance sur l'analyse et le bilan sédimentaire de l'estuaire de la Loire. Elle a été menée pour le besoin du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire, pour la constitution de son dossier de demande de renouvellement de l'autorisation pour ses opérations de dragage d'entretien et d'immersion en mer des matériaux de dragages. Les hypothèses étudiées de mise en œuvre de ces dragages ont donc été établies par le GPMNSN. Cette étude contribuant aux travaux du GIP Loire Estuaire (GIP LE) et mobilisant son modèle HySQL, le GPMNSN et le GIP LE ont suivi cette étude, selon le cadre conventionnel signé entre eux.

¹ DAM : Drague aspiratrice en marche

² DAS : Drague aspiratrice stationnaire

³ DIE Drague par Injection d'eau

SYNTHESE ET CONCLUSION

Afin de suivre la dispersion des sédiments immergés sur la Lambarde tout au long d'une année le modèle HySQL raffiné estuaire externe [5], a été utilisé. Des développements supplémentaires ont été apportés afin :

- de tenir compte de l'ensemble des dragages par DAM, DAS, DIE et des clapages par DAM ;
- de pouvoir différencier les sédiments clapés à la Lambarde de ceux issus de la dynamique estuarienne au cours de la période simulée.

L'année hydrologique 2017-2018 représentative d'une année dite « moyenne » (bien que plusieurs particularités saisonnières sont spécifiques à cette année) a été simulée, avec une bathymétrie initiale du site de la Lambarde qui est considérée à l'échéance d'octobre 2032 (fin de remplissage de la sous-zone 27 qui est censée rendre le site plus dispersif du fait de sa cote moyenne plus élevée et de sa position proche du chenal). **Ces conditions pour le site de la Lambarde ont été choisies pour maximiser la dispersion.**

Les dragages et clapages simulés sont ceux de l'année 2017-2018 (afin d'avoir une cohérence entre les opérations de dragages et les forçages hydro-météorologiques, seules les quantités clapées et draguées sont pondérées pour obtenir les objectifs du scénario de dragage de référence que l'on cherche à simuler :

Volumes dragués en m ³	Scénario de référence
DAM de capacité 8500 m ³	3 640 000
DAS	300 000
DIE (h12 ouh24)	1 500 000
Total (m³)	5 440 000

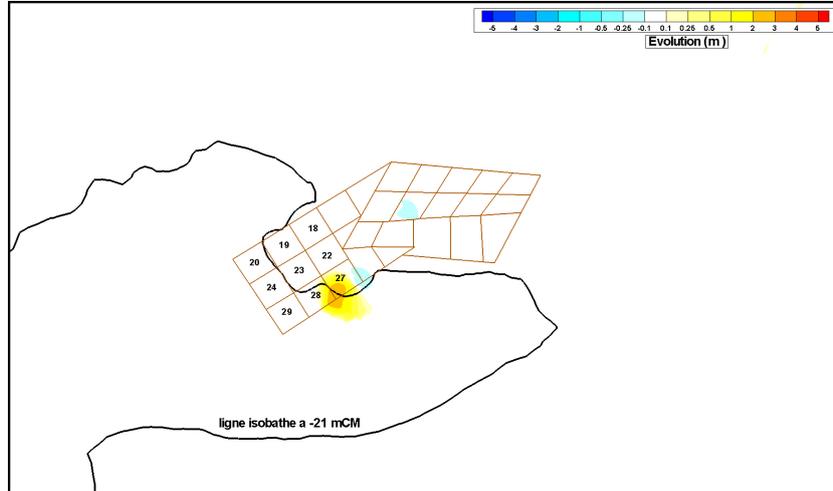
Grâce à la différenciation et le traçage des sédiments de la Lambarde et de l'estuaire naturel, il est possible de quantifier les concentrations en suspension et les dépôts suivant leur provenance, à tous les instants et en tout lieu.

Cette étude présente et analyse :

- les dépôts sur le site de la Lambarde ;
- la dispersion avec des courbes temporelles de MES pour des points spécifiques (§ 5.3 et §5.4) ;
- une cartographie de la dispersion des sédiments provenant de la Lambarde (§ 5.5) ;
- un bilan de masse des sédiments provenant de la Lambarde (§ 5.6) ;
- une analyse des flux des sédiments provenant de la Lambarde (§ 5.7) ;
- des bilans de masse annuels et trimestriels à l'échelle de l'estuaire pour l'ensemble des sédiments (sédiments clapés et sédiments estuariens ; §5.8).

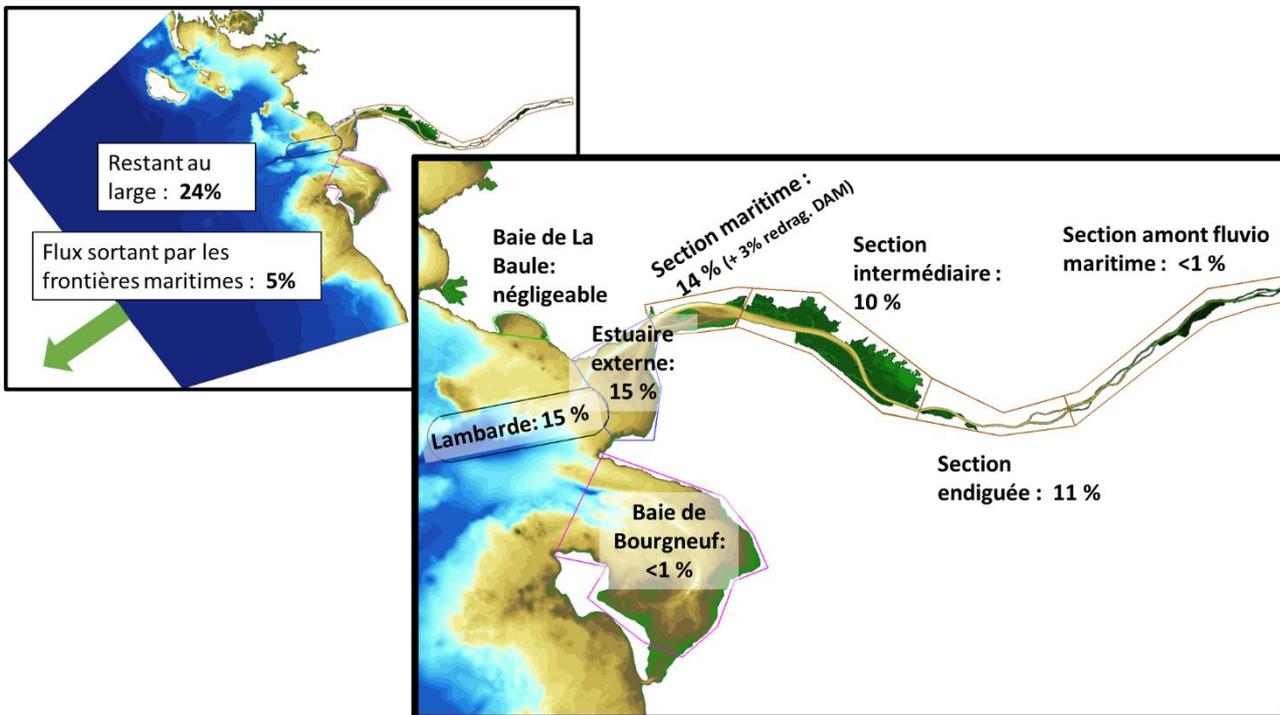
Stabilité sur le site de la Lambarde

Sur la période du 1^{er} octobre 2032 au 1^{er} octobre 2033, soit la fin de remplissage de la sous-zone 27, les taux de stabilité sont en volume de 19,2% (pour un volume clapé de 3,64 Mm³). Les évolutions au droit du site sont reportées sur la Figure 1-1 ci-après.



Bilan de masse des sédiments clapés à la Lambarde

Le bilan général des sédiments clapés à la Lambarde en fin de simulation de l'année hydrologique 2017-2018 donne une répartition des sédiments issus des clapages à la Lambarde (% de masse par rapport à la masse clapée sur la même période) qui est résumée sur les deux cartographies suivantes.



scénario de référence

Il est à noter que ce bilan n'est représentatif que de la période hydrologique (vent, houle et débit) oct. 2017 à oct. 2018 avec une temporalité des clapages issus de la même période et une sous-zone 27 quasi-remplie. Chacun de ces paramètres exerçant une influence sur ce bilan. Cette combinaison de paramètres donne des conditions de site très dispersives au vu des résultats obtenus en moyenne entre 2021 et 2034 sur le modèle de stabilité : 27% de stabilité en volume[3]. Le scénario retenu pour maximiser la dispersion conduit à **déstabiliser 8% supplémentaires de sédiments clapés par rapport à des clapages effectués entre 2021 et 2034 (scénario pour lequel les forçages et les sous-zones sont différents)**.

Il faut aussi signaler que la période prise pour effectuer le bilan de masse a une importance, notamment pour les sédiments se situant à l'intérieur de l'estuaire. En effet, ceux-ci ne font que suivre la dynamique estuarienne naturelle, et ils se retrouvent en grande partie au niveau de la position du bouchon vaseux et de la crème de vase qui sont fortement reliés au débit de la Loire. Un bilan de masse effectué d'hiver à hiver n'aura donc pas le même résultat qu'un bilan de masse effectué d'été à été pour l'intérieur de l'estuaire. Dans notre cas, les faibles débits de début et fin de simulation favorisent une répartition vers l'amont des sédiments de l'estuaire.

Il n'existe donc pas de bilan universel, cependant ce type de résultat annuel peut permettre de comparer différents scénarios de clapages/dragages.

Participation des sédiments clapés à la Lambarde dans la MES générale

La participation des sédiments provenant de la Lambarde dans la MES générale a été étudiée au travers de courbes temporelles de MES pour des points spécifiques (§ 5.3) et a été synthétisée par des cartes de percentile (25, 50, 75 et 99) qui permettent de donner un aperçu plus synthétique puisqu'intégrateur dans le temps. Il ne s'agit donc en aucun cas d'une vue d'un panache réel à un instant donné. Sont présentés à chaque fois la carte pour le sédiment provenant de la Lambarde et la carte pour le sédiment provenant de l'estuaire. Une carte supplémentaire présente le pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile de la MES totale (borné à une valeur de 5mg/l pour les MES provenant de la Lambarde).

Pour le percentile 50 (les concentrations de MES qui ne sont pas dépassées la moitié du temps ou les concentrations de MES qui sont dépassées la moitié du temps), la localisation des MES issues des sédiments de la Lambarde qui sont couramment dépassées pour de faibles valeurs (< à 40mg/l) se situe dans la zone aval de l'estuaire (jusque dans la baie de Bourgneuf et la limite Est du site de la Lambarde), là où les sédiments ont tendance à se concentrer et à osciller avec la dynamique estuarienne. Les plus importants percentiles 50 de la concentration ne sont pas observés sur le site de clapage comme on pourrait l'imaginer, car les clapages ne sont que temporaires. La dynamique estuarienne est toujours prépondérante dans ce cas-là. Le ratio de concentration des percentiles est toujours inférieur à 50%, même dans l'estuaire externe et la dynamique estuarienne reste toujours prépondérante. L'influence des sédiments provenant de la Lambarde est en proportion plus importante en estuaire externe et en baie de Bourgneuf, même si cela ne concerne pas des valeurs importantes de concentrations (Figure 1-3).

Il faut préciser pour l'estuaire interne qu'il ne s'agit pas d'un surplus de concentration : sans sédiment clapé sur la Lambarde, l'estuaire (de par sa capacité de transport et du fait de ressources en sédiment disponibles) se serait chargé de manière équivalente à la somme des concentrations des deux sédiments modélisés.

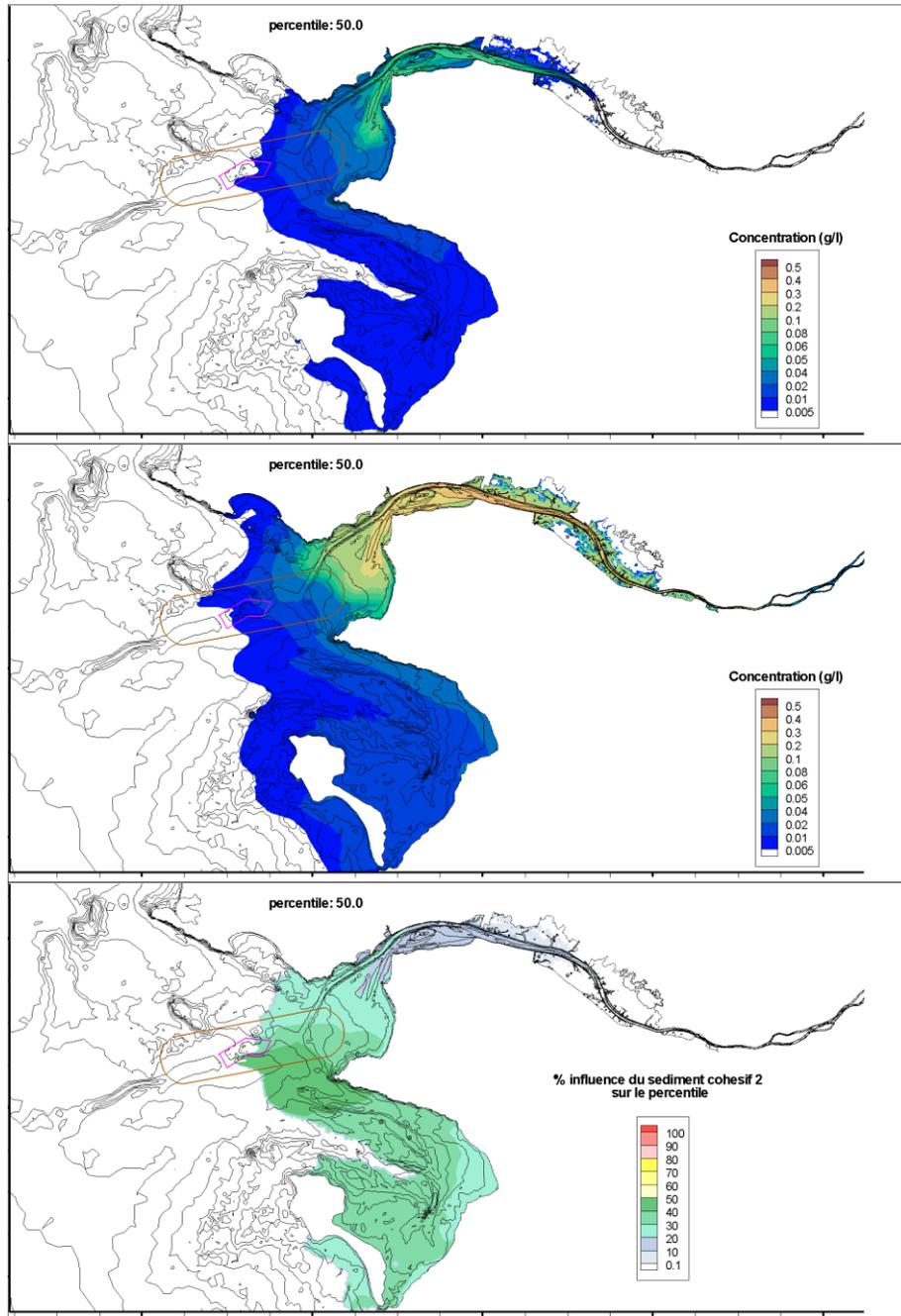


Figure 1-3 : Percentile 50 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : Pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 50 des MES

Les cartes de percentile 99 de MES (valeur qui n'est pas dépassée 99% du temps ; ce qui ne représente pas un panache réel, mais quasiment un maximum observé sur la durée totale de la simulation en chaque point du modèle) montrent sur la figure du haut les MES provenant de la Lambarde et sur la figure du milieu les sédiments issus de la dynamique estuarienne. Il est alors possible (figure du bas) de déterminer l'influence de la MES provenant de la Lambarde sur le percentile étudié (Figure 1-4).

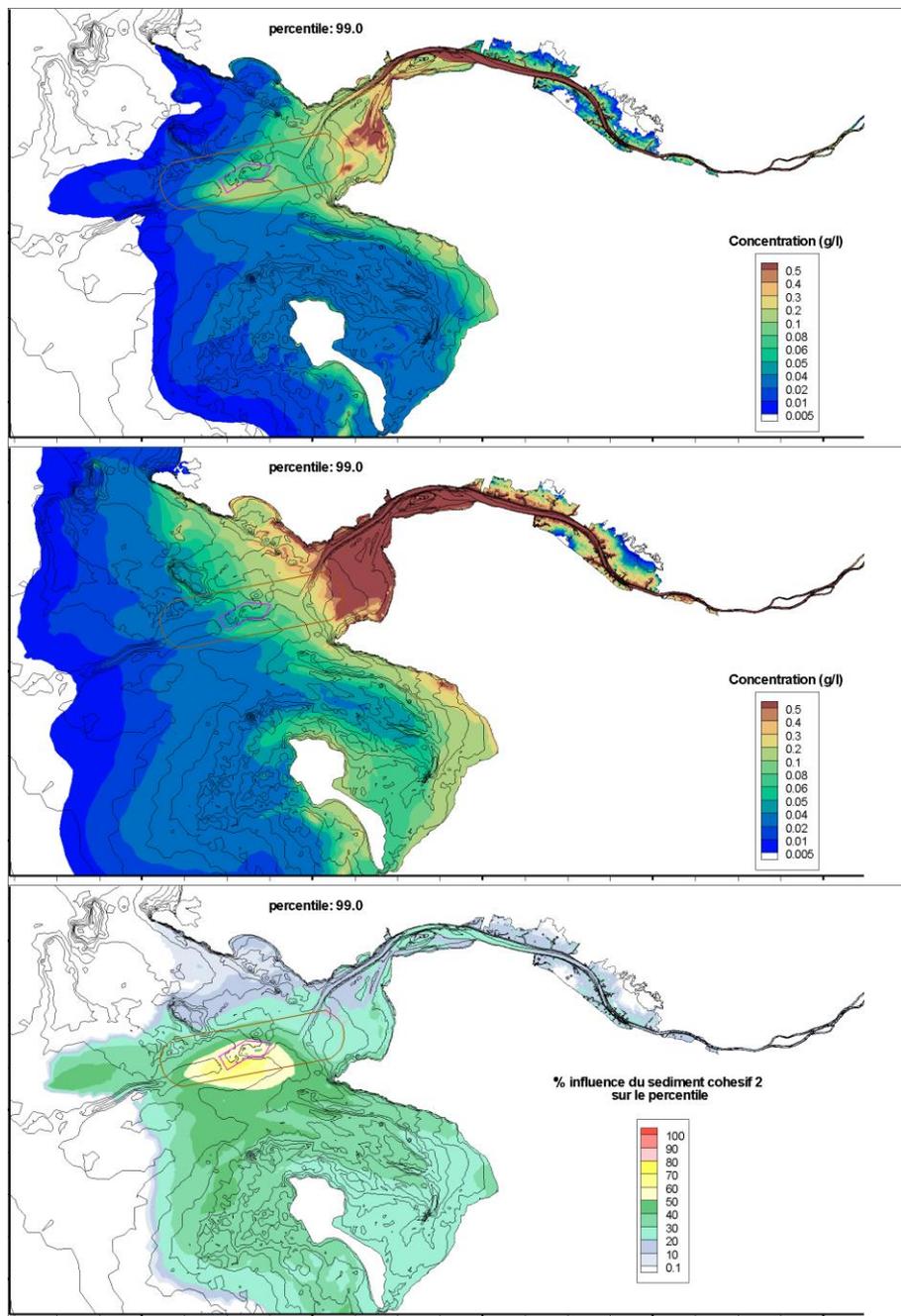


Figure 1-4 : Percentile 99 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : Pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 99 des MES

Analyse de flux de sédiment provenant de la Lambarde

Une analyse des flux de sédiments (sédiments provenant de la Lambarde et sédiments provenant naturellement de l'estuaire) a été effectuée sur plusieurs sections. A l'interface de l'estuaire externe et de la section maritime de l'estuaire, il est montré que 52,6 Mtonnes de sédiment cohésif provenant de l'estuaire passent par cette interface contre 11,6 Mtonnes pour le sédiment cohésif provenant de la Lambarde (le sédiment entrant et sortant pouvant être le même, par oscillation). Les sédiments clapés à la Lambarde participent donc à environ 18% des entrées/sorties sur cette section.

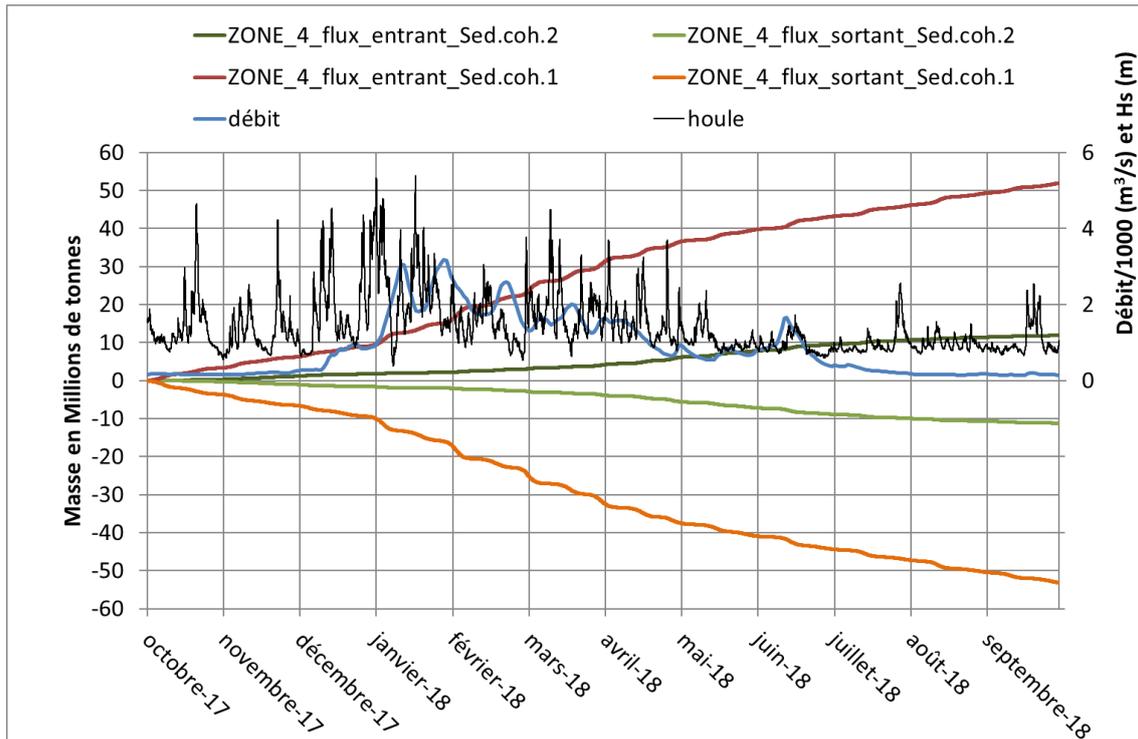


Figure 1-5 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 2

Tentative de bilans de masse à l'échelle de l'estuaire pour l'ensemble des sédiments (sédiments clapés et sédiments estuariens)

Afin de comparer les taux de dragages aux déplacements de sédiments naturels dans l'estuaire un bilan de masse complet de l'estuaire est réalisé.

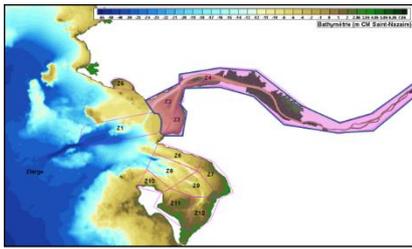
Un schéma synthétique du bilan de masse a été effectué à l'échelle des estuaires externe et interne (Figure 1-6).

Les principaux flux y sont indiqués :

- apports amont : 1,78 Mt ;
- sédiments remobilisés par DIE et DAS : 3,44 et 0,85 Mt (ces flux sont à titre indicatif et ne participent pas au bilan puisque ces remobilisations restent en interne à la zone de bilan) ;
- sédiments dragués par DAM et exportés à la Lambarde : 1,78 Mt (il faut noter que ces dragages sont automatiques dans le modèle et l'égalité avec le flux amont n'a aucune relation directe, cela pourrait être différent sur une autre année modélisée) ;
- apports aval net : +0,6 Mt qui est le résidu de 39,4 Mt de sédiments qui sont sortis par la frontière aval contre 40,0 Mt qui sont entrés par cette même frontière (le sédiment entrant et sortant pouvant être le même) ;

scénario de référence

- le bilan net de la zone globale des estuaires interne et externe sur la période est de +0,61 Mt.



Bilan annuel 01/10/2017 à 01/10/2018
Estuaire interne + externe (en Mt)

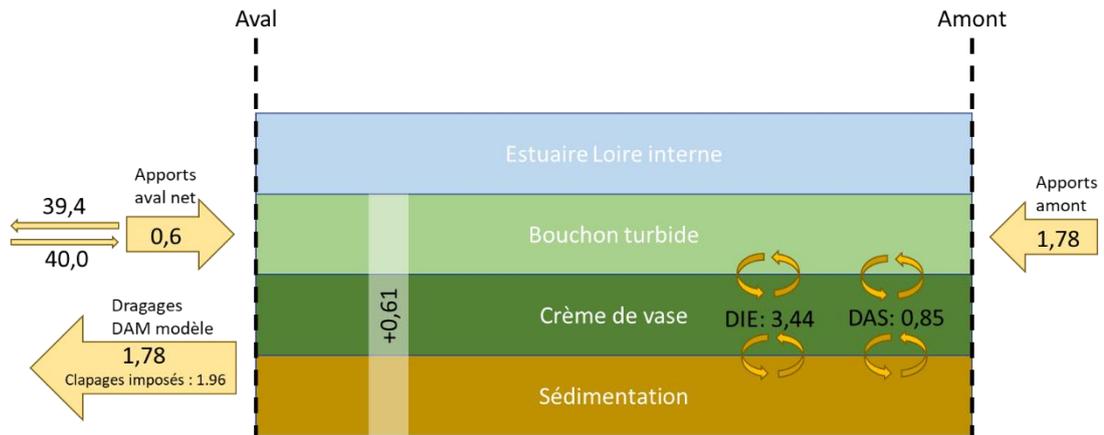


Figure 1-6 : Bilan de masse (en Mt) de l'estuaire interne et externe sur l'année hydrologique 2017-2018

Afin d'évaluer la sensibilité d'un tel bilan de masse à la localisation de la frontière en aval, il a été fait le même travail en considérant l'estuaire à partir de la section maritime au lieu de l'estuaire externe (§5.8.2).

Les principaux flux indiqués sont les mêmes que précédemment mis à part le flux aval net qui devient négatif, avec la perte de -0,5 Mt. Le bilan net de l'estuaire hors estuaire externe sur la période est de -0,52 Mt, cela signifie que la longue période de fort débit a permis d'accumuler du sédiment en estuaire externe et que le pompage tidal permet de faire remonter du sédiment, mais pas encore suffisamment à la date de fin de simulation pour rééquilibrer le bilan de l'estuaire interne.

Ces bilans présentés sont très enrichissants et permettent de pousser les analyses, mais ils ne sont représentatifs que d'une période définie par une date de fin de simulation, en regard d'une date initiale. Ces bilans dépendent donc notamment d'un historique hydrosédimentaire, d'un forçage hydro-météorologique et d'une position géographique de frontière aval.

Afin de mieux appréhender les déplacements saisonniers de masse dans l'estuaire, il est présenté (§5.8.3) le même type de bilan avec 6 sous-secteurs géographiques basés sur les sections de dragage du GPMNSN par périodes trimestrielle.

SYSTEMES DE COORDONNEES

Le système de coordonnées utilisé dans le modèle et ses sorties graphiques est le Lambert RGF93 (code EPSG 2154).

Le référentiel altimétrique utilisé est le **Zéro des Cartes Marines (CM)** défini au port de Saint-Nazaire.

Les Références Altimétriques (RAM) 2022 du SHOM fournissent les relations suivantes entre le zéro de référence terrestre (IGN69) et le zéro de référence maritime (ZH/CM) au port de Saint-Nazaire :

$$0 \text{ m ZH/CM} = -3,16 \text{ m IGN69}$$

1. OBJECTIF DE LA MODELISATION

Le but de cette modélisation et de simuler à la fois :

- la dynamique estuarienne sur une année hydrologique moyenne ;
- les opérations de dragages et d’immersions de sédiment d’un scénario de référence avec, pour le site de la Lambarde, un remplissage qui correspond à la fin d’autorisation actuelle et qui **maximise les dispersions**.

Techniquement, l’année moyenne hydrologique choisie est celle d’octobre 2017-2018 et la date de remplissage de la Lambarde est prise à octobre 2032 (fin de remplissage de la sous-zone 27 qui est censée rendre le site plus dispersif du fait de sa cote moyenne plus élevée et de sa localisation sur le site) à l’instant initial de la modélisation.

Ce modèle permet de suivre tout au long du calcul les sédiments issus des immersions et de les distinguer des sédiments provenant de la dynamique estuarienne. Cette distinction permet alors d’établir des bilans de masse des sédiments dispersés depuis le site sur cette année hydrologique et pour ce scénario de référence.

2. CONSTRUCTION DU MODELE

2.1. PRESENTATION DU MODELE EXISTANT

Un modèle hydrosédimentaire et de qualité des eaux (HySQEL) opérationnel a été élaboré par ARTELIA à partir de septembre 2021 pour le compte du GIP LE. Il constitue une amélioration par rapport au précédent modèle de l'estuaire avec un raffinement plus important, une emprise étendue et une prise en compte des processus sédimentaires via le module GAIA de TELEMAC.

Il a été construit à l'aide du système de modélisation TELEMAC-3D développé par EDF-R&D. Ce code de calcul résout, sur des maillages prismatiques à base triangulaire, les équations de Reynolds (équations de Navier-Stokes moyennées) régissant les écoulements tridimensionnels à surface libre. Pour la courantologie, les résultats sont les hauteurs d'eau et les 3 composantes du courant.

Le modèle est couplé avec TOMAWAC, un module permettant la gestion de la propagation de la houle et les interactions houle-courant et GAIA, un module permettant de représenter la dynamique sédimentaire de l'estuaire (transport en suspension, dépôt, consolidation...).

Le **modèle global [1]** a été calé sur les nombreux processus qui régissent le comportement hydrodynamique et hydrosédimentaire de l'estuaire : calage des niveaux sur l'ensemble de l'estuaire, calage de la salinité (représentation des courants de densité notamment), calage de la dynamique sédimentaire (transport de MES et dynamique de la crème de vase).

L'emprise du modèle global est visible sur la Figure 2-1 ci-dessous.

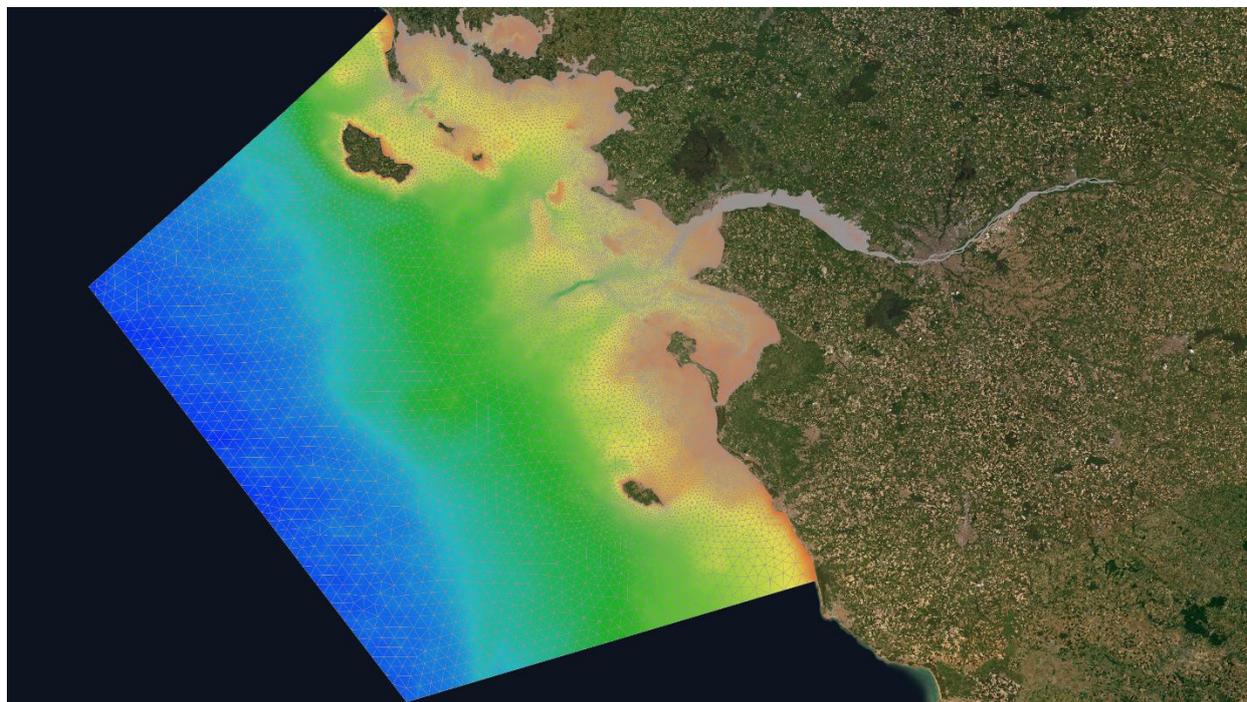


Figure 2-1 : Vue générale du modèle global

Le **modèle local de stabilité de la Lambarde [2]**, est un sous modèle centré sur la zone de clapage de la Lambarde. Il vise à reproduire les processus d'immersion sur cette zone et à représenter de manière cohérente la stabilité de la zone (rapport entre le volume clapé par la DAM et le volume consolidé sur place) sur plusieurs années. Ce modèle opérationnel du site de clapage de la Lambarde a permis d'étudier la stabilité du dépôt sur le long terme. Dans le cadre de

scénario de référence

l'exploitation du modèle [3], celui-ci a déjà simulé la stabilité du site sur la période 2021 à 2034 avec une stratégie définie par le GPMNSN.

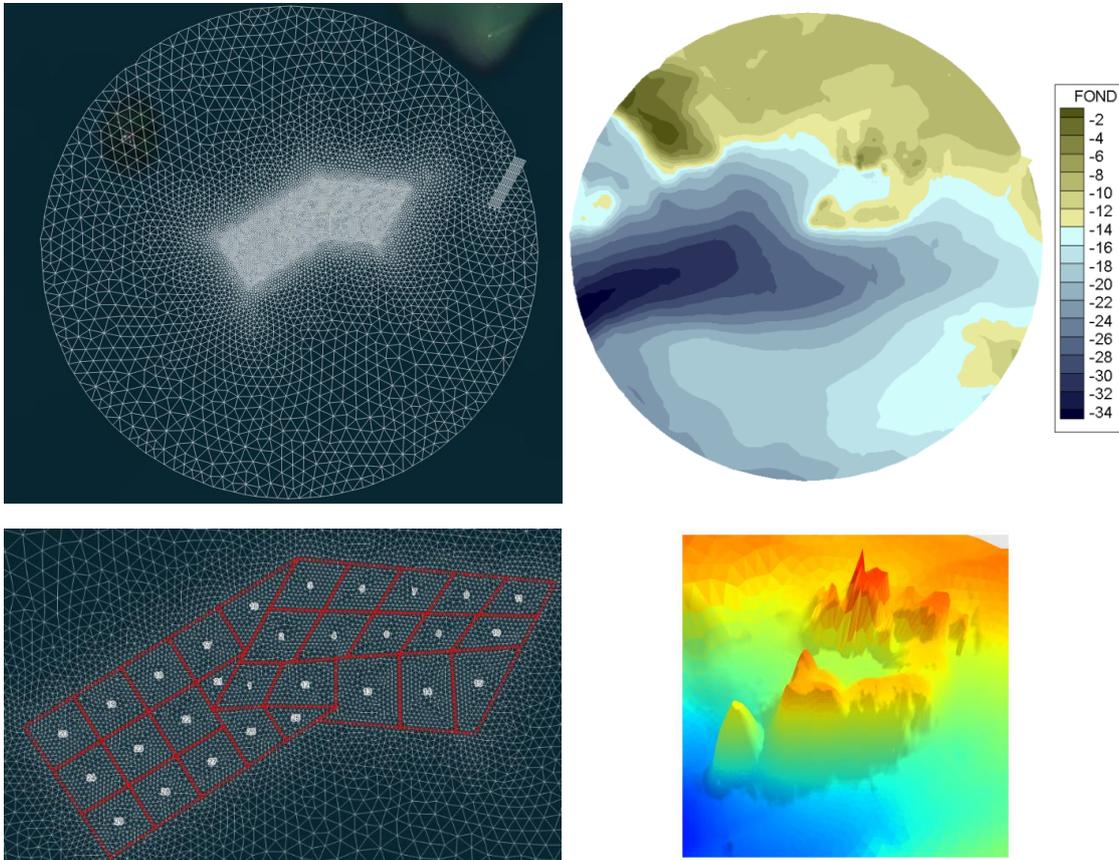


Figure 2-2 : Vue générale du modèle local de stabilité de la Lambarde

Le modèle **raffiné estuaire externe** [5] est basé sur le maillage du modèle global [1], auquel est incorporé le maillage raffiné à 50m du modèle de stabilité de la Lambarde [2].

De plus, un raffinement (100m) sur le littoral (présenté sur la figure ci-dessous) situé à l'Est du site d'immersion est pris en compte afin de mieux appréhender les courants littoraux qui exercent une influence non négligeable sur la reprise des dépôts dans cette zone.

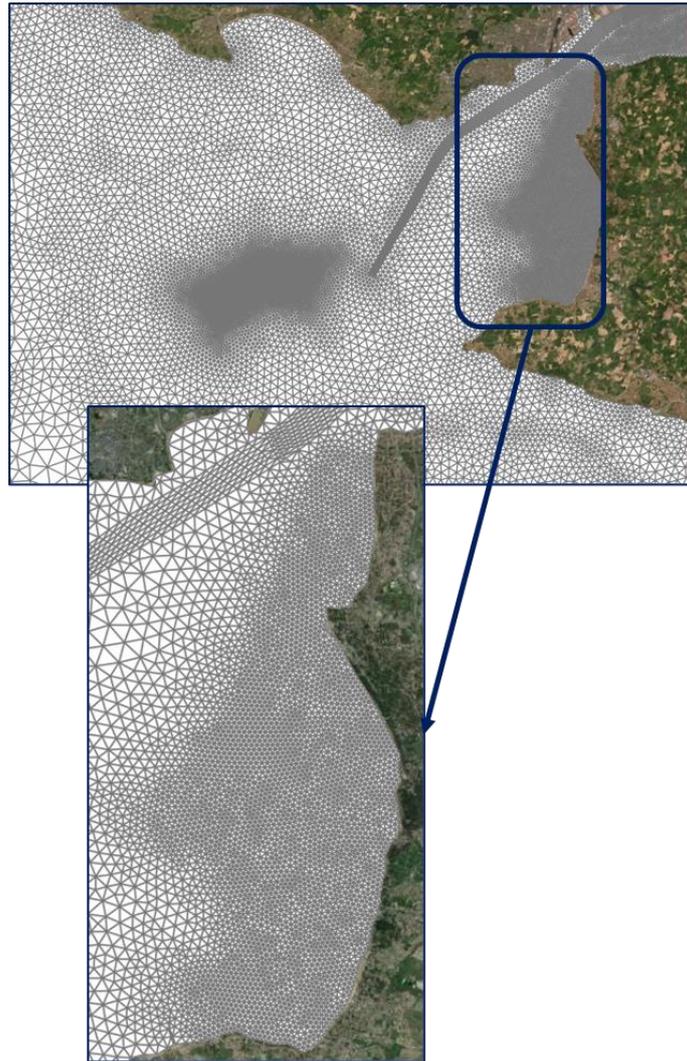


Figure 2-3 : Zoom sur les modifications de maillage apportées au modèle raffiné estuaire externe, par rapport au modèle global

Ce modèle permet de reproduire les dragages par DAM dans les sections 1 à 6 et de reproduire les immersions en mer sur le site de la Lambarde (même raffinement que le modèle de stabilité sur le site de la Lambarde). Ce modèle est totalement couplé avec la houle et permet de tenir compte des courants de déferlement sur la côte Sud de l'estuaire externe.

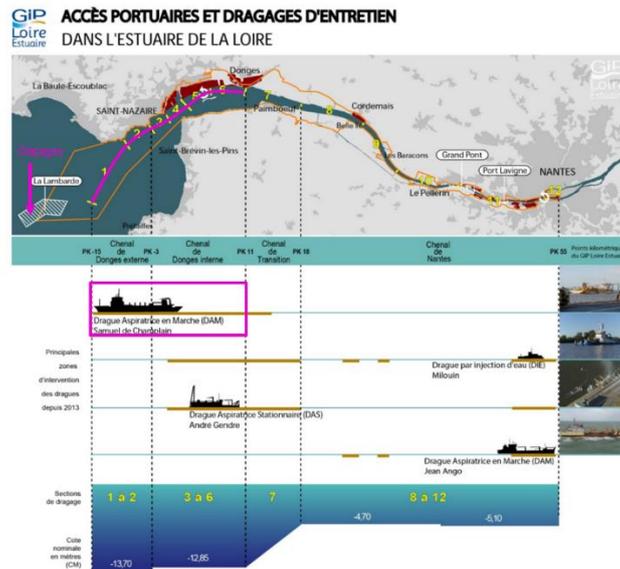


Figure 4 : Pratiques de dragage dans l'estuaire avec en rose le dragage par exportation (DAM) modélisée

2.2. MODIFICATIONS APPORTEES AU MODELE RAFFINE ESTUAIRE EXTERNE DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE

Afin de suivre la dispersion des sédiments immergés sur la Lambarde tout au long d'une année, le modèle raffiné estuaire externe est exploité avec les développements supplémentaires qui sont décrits ci-dessous.

2.2.1. Traçage du sédiment immergé sur la Lambarde

Afin de pouvoir différencier les sédiments immergés de ceux issus de la dynamique estuarienne au cours de la simulation, un sédiment cohésif est ajouté. Il a les mêmes caractéristiques (contrainte d'érosion, consolidation, vitesse de chute...) que le sédiment cohésif de l'estuaire (c'est donc le même sédiment) mais il permet de tracer le sédiment clapé au cours du temps, que ce soit dans la colonne d'eau ou dans le sol. Cela demande bien sûr de résoudre un sédiment supplémentaire (principalement convection/diffusion) et par conséquent plus de temps de calcul et de stockage de résultats.

Le sédiment cohésif n°1 permet ainsi de suivre la dynamique estuarienne et le sédiment cohésif n°2 permet de suivre les sédiments immergés à la Lambarde.

2.2.2. Prise en compte des opérations des DAS et DIE

Il est ajouté dans la modélisation les opérations de la DAS et de la DIE (qui ont déjà été modélisées en phase 2 de l'étude *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Exploitation du modèle global – modélisations de l'oxygène dissous sur 3 à 4 mois d'étiage (2018)*, GIP Loire Estuaire., rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 2 [6]) afin d'avoir un calcul complet de référence en termes de pratiques. Les sédiments rejetés par DAS ou DIE (donc non exportés mais remis en suspension localement) ne sont pas tracés par un nouveau sédiment (ils restent donc dans le sédiment cohésif n°1 ou n°2 en fonction de la présence en pourcentage de chaque type de sédiment déposé et mobilisé localement par les opérations de dragage). Ce choix a été retenu pour des raisons de temps de calcul et de stockage de résultats.

scénario de référence

2.3. COMPARAISON AVEC LA MODELISATION UTILISEE JUSQU'EN 2021 POUR LES DIFFERENTS DOSSIERS D'AUTORISATION

Le même type de simulations annuelles de dispersion des sédiments issus de la Lambarde tel que présenté dans ce présent rapport a été réalisé à plusieurs reprises pour les différents dossier d'autorisation ou de mi-parcours. Toutes ces études étaient basées sur le modèle hydrosédimentaire 3D développé entre 2008 et 2012 pour le compte du GIP Loire estuaire et exploité pour les besoins du GPMNSN jusqu'en 2021.

Une avancée importante a eu lieu entre 2021 et 2023 avec la reprise complète du modèle 3D (nommé actuellement HySQEL) pour le compte du GIP LE. Ce modèle contient de nouveaux développements et sa calibration a pu être améliorée par l'exploitation de nombreuses données de mesures additionnelles, notamment sur des zones où peu de connaissances étaient disponibles auparavant. Des différences apparaissent donc forcément dans les résultats par rapport à ce qui a déjà été diffusé du fait de ces améliorations de modélisation, mais aussi du fait d'un changement de méthodologie notamment sur les durées et périodes de forçages choisies de la simulation.

Afin d'éclairer au mieux, les possibles écarts de résultat, une liste des principales différences pouvant entrer en jeu entre les deux types de modélisation et de choix de simulation est effectuée ici.

Tableau 2-1 : Différences de modélisation hydrosédimentaire et de choix de simulation annuelle entre le précédent modèle (2008-2021) et le modèle HySQEL utilisé dans cette étude

Différences de modélisation	Modèle 3D hydrosédimentaire (2008-2021)	Modèle 3D HySQEL (présent rapport)
Calibration et validation en MES	<p><u>Estuaire interne :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ réseau Syvel : <ul style="list-style-type: none"> • Le Pellerin • Paimboeuf 	<p><u>Estuaire interne :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Réseau Syvel : <ul style="list-style-type: none"> • Donges (2 niveaux) • Paimboeuf • Cordemais • Le Pellerin • Trentemoult • Bellevue • Mauves ▪ Profils hydrologiques amont (sept 2019) <p><u>Estuaire externe :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Campagne de mesures GPMNSN (nov . 2018 à sept. 2019) : <ul style="list-style-type: none"> • Lambarde (fond et surface) • Chatelier (fond et surface) <p>Le calage du modèle sur cette campagne de mesures a amené à rendre plus mobile le sédiment en estuaire externe</p>

scénario de référence

Type de sédiments modélisé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une vase issue des clapages de la Lambarde 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une vase issue des clapages de la Lambarde ▪ Une vase présente initialement dans l'estuaire ▪ Un sable et un gravier (faisant partie de la composition du sol et participant aux flux d'érosion/dépôt, mais non transportés à ce stade)
Pompage tidal	<p>La frontière maritime se trouve à environ 40 km des côtes. Une partie des sédiments exportée par l'estuaire sort par cette frontière et ne peut revenir. Afin que le bilan de masse de l'estuaire ne soit pas déficitaire, les sédiments sortants sont redéposés artificiellement en estuaire externe pour permettre au pompage tidal de les récupérer si besoin et de reformer un bouchon vaseux après expulsion.</p> <p>Dans ce cas, où seul le sédiment de la Lambarde est simulé, aucun recyclage des sédiments sortant n'est effectué</p>	<p>La frontière maritime a été fortement éloignée (environ 80 km des côtes) afin de limiter ces pertes de sédiments. De plus un nouveau schéma numérique moins diffusif a été implémenté et permet de reproduire de manière réaliste le pompage tidal et la recombinaison du bouchon vaseux après expulsion sans avoir recours à aucun artefact.</p>
Houle et météorologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forçage en vent par un point de mesure ▪ Bibliothèque de houle pré-propagée puis interpolation en fonction du houlogramme au large et du niveau d'eau (mer de vent locale non représentée) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forçage par un champ de vent (issu des données Homère) ▪ Couplage du modèle hydrodynamique, avec le modèle de génération et de propagation de houle forcé par les données Homère
Différences de choix de simulation	Modèle 3D hydrosédimentaire (2008-2021)	Modèle 3D HySQL (présent rapport)
Période de simulation	8 mois basés sur une période hivernale de 2007 et 2008 et une période estivale de 2009 (résultats sont multipliés par un coefficient 1,5 pour avoir une correspondance annuelle sur les bilans de masse)	Année hydrologique complète (oct.2017-oct.2018) choisie pour sa représentativité annuelle moyenne (des particularités saisonnières sont cependant toujours présentes)

3. FORÇAGES ET CONDITIONS AUX LIMITES

3.1. PERIODE SIMULEE

L'année hydrologique octobre 2017 à octobre 2018 a été retenue dans l'étude [5] comme représentative de conditions moyennes pour les raisons suivantes :

- les clapages réalisés cette année hydrologique sont d'environ 3,9 Mm³ ce qui est proche du volume moyen clapé sur la dernière décennie : moyenne 2012-2020 : 3,64 Mm³ (on notera une tendance à la décroissance au fur et à mesure des années : moyenne sur 2013-2022 : 3,21 Mm³ et moyenne sur 2017-2022 : 2,75 Mm³) ;
- il s'agit d'une année hydrologique avec 867 m³/s de débit moyen soit une hydraulité de 1.1 de la Loire (rapport du débit moyen annuel par rapport à celui de 1963-2022 à Montjean-sur-Loire), composée d'un étiage estival, de crues hivernales avec des débits journaliers dépassant les 3000 m³/s.

Bien que les conditions hydrologiques soient moyennes sur l'année, certaines particularités saisonnières restent spécifiques à 2017-2018 :

- les hautes eaux du mois de juin 2018, sont inhabituelles sur la période 1900 - 2021. En comparaison des moyennes mensuelles des autres mois de juin, celui-ci est très humide ;
- l'étiage est sévère pour les mois d'octobre, novembre 2017, août et septembre 2018, avec un débit moyen mensuel inférieur à 200 m³/s.

La note technique sur le choix de cette année de référence est reportée en Annexe C.

Les forçages hydrométéorologiques pour la simulation sont : marée astronomique, pression, vent, houle, salinité, débit liquide (Erdre, Sèvre, Evre et Loire) et les apports solides (sédiments) de la Loire sont aussi ceux de l'année hydrologique octobre 2017 - octobre 2018.

3.2. DEBIT LIQUIDE ET SOLIDE DE LA LOIRE

Les débits cumulés de la Loire à Montjean-sur-Loire et de l'Èvre sont imposés sur la frontière amont du modèle. Une concentration amont est appliquée selon une loi établie [1] en fonction du débit journalier à Montjean :

- crue ($Q_{\text{journalier}} > Q_{\text{moyen des 5j précédents}} + 100 \text{ m}^3/\text{s}$) : $\text{MES (g/l)} = 180/2000 * (Q_j - 500) + 10$
- décrue ($Q_{\text{journalier}} < Q_{\text{moyen des 5j précédents}} - 100 \text{ m}^3/\text{s}$) : $\text{MES (g/l)} = 80/5000 * (Q_j - 500) + 10$
- état intermédiaire : $\text{MES (g/l)} = 120/3000 * (Q_j - 500) + 10$

Ces 3 lois sont bornées en limite supérieure pour les débits importants par la loi : $\text{MES (g/l)} = 70/3500 * (Q_j - 2000) + 180$

et bornées en limite inférieure à une concentration minimum de 10 mg/l pour un débit inférieur à 500 m³/s.

Les MES entrantes dans le modèle par la condition amont sont mises dans le sédiment cohésif n°1.

Les variations temporelles des débits liquides et solides sur cette période sont présentées dans la figure suivante :

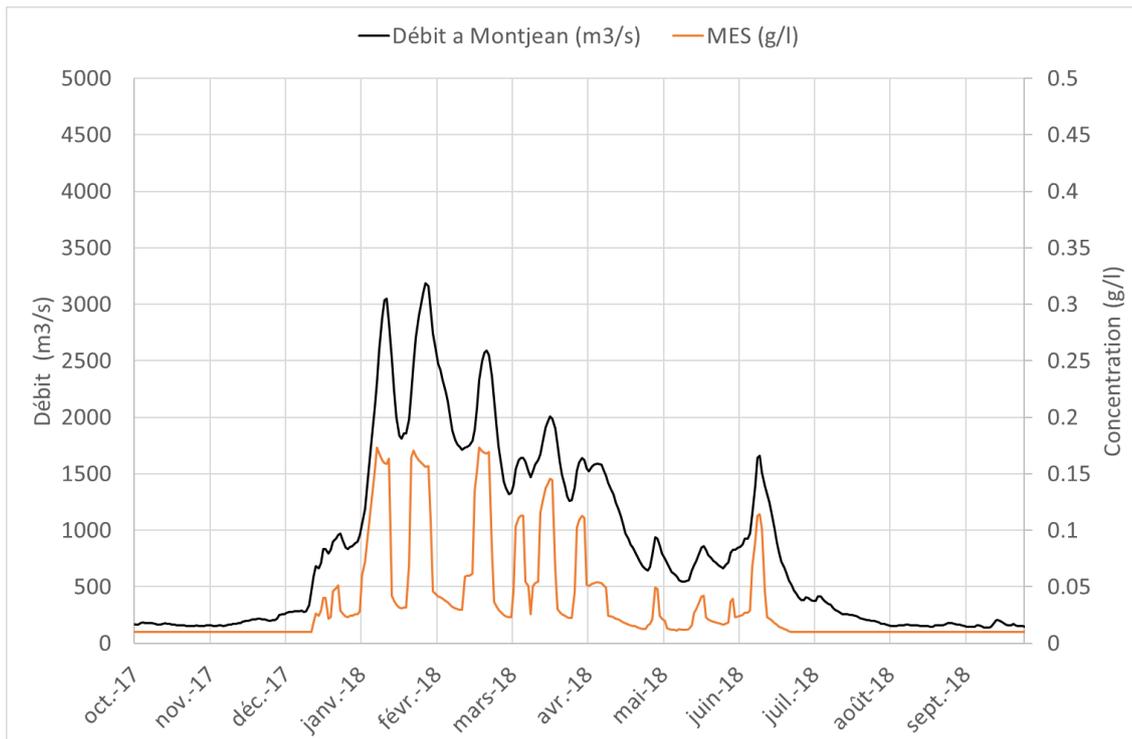


Figure 3-1 : Débit liquide et concentration en MES imposés à l’amont du modèle

3.3. MAREE ET NIVEAU MOYEN

Au large, le modèle est forcé par la marée astronomique. Niveaux et vitesses sont imposés par reconstitution d’un signal de marée à partir des composantes harmoniques extraites depuis le modèle global FES 2012. Au total, 32 ondes sont utilisées pour ce forçage. FES 2012 est développé par Noveltis, Legos et CLS Space Oceanography Division et est distribué par Aviso, avec le soutien du Cnes.

Ce signal de marée est recomposé autour d’un niveau moyen qui varie avec la pression atmosphérique. Les variations temporelles de pression sont imposées à la limite maritime, par le biais d’une variation du niveau moyen. Cette variation du niveau moyen est reconstituée à partir des données de pression disponibles à Belle-île, complétées ponctuellement (lorsque indisponibles) par les données de Nantes. Ces données sont produites par Météo France et récupérées sur le site InfoClimat.

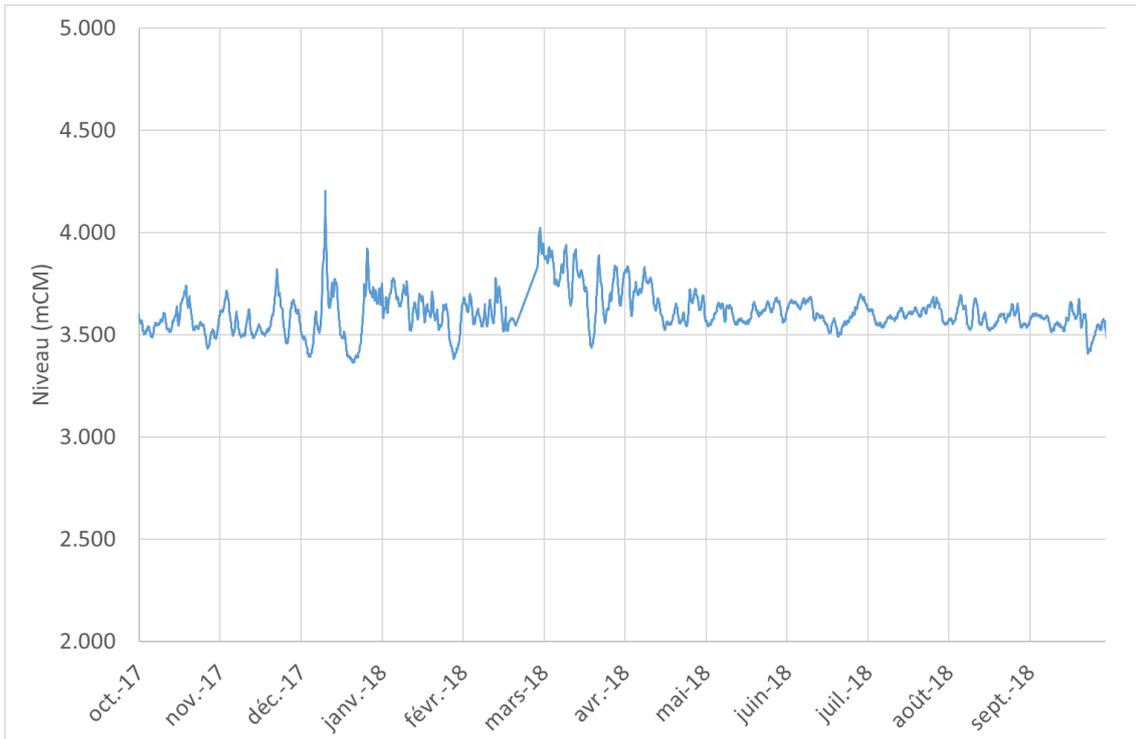


Figure 3-2 : Variation du niveau moyen due à la variation de pression atmosphérique (pression mesurée à Belle ile)

3.4. VENT

Les variations temporelles et spatiales du vent sont prises en compte dans le modèle. Les composantes du vent (valeurs d'intensité selon x (l'Est) et y (le Nord)) sont extraites depuis la base de données HOMERE (Ifremer). Une interpolation est ensuite réalisée afin d'attribuer à chaque point du maillage une valeur de vitesse selon x et selon y, avec un pas de temps horaire. Des grilles de vent sur les nœuds du modèle sont ainsi construites et utilisées lors des simulations.

Une extraction de ces données (recomposées en intensité et direction) au point dénommé Lambarde (lors de la campagne de mesure GPMNSN de 2019) est présentée en Figure 3-4 .

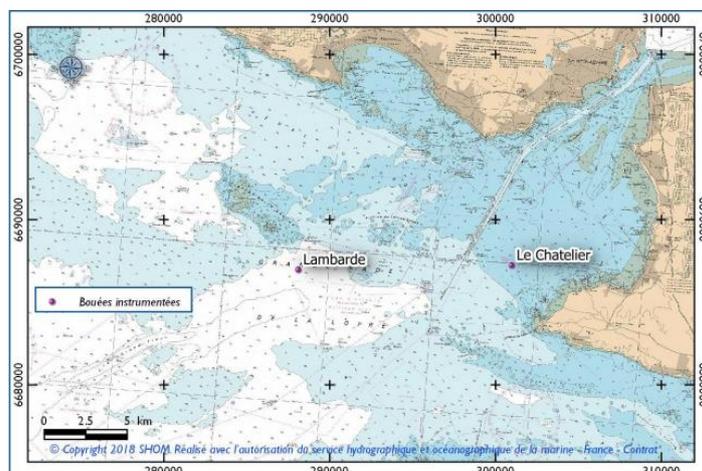


Figure 3-3 : Position du point d'extraction dénommé Lambarde

scénario de référence

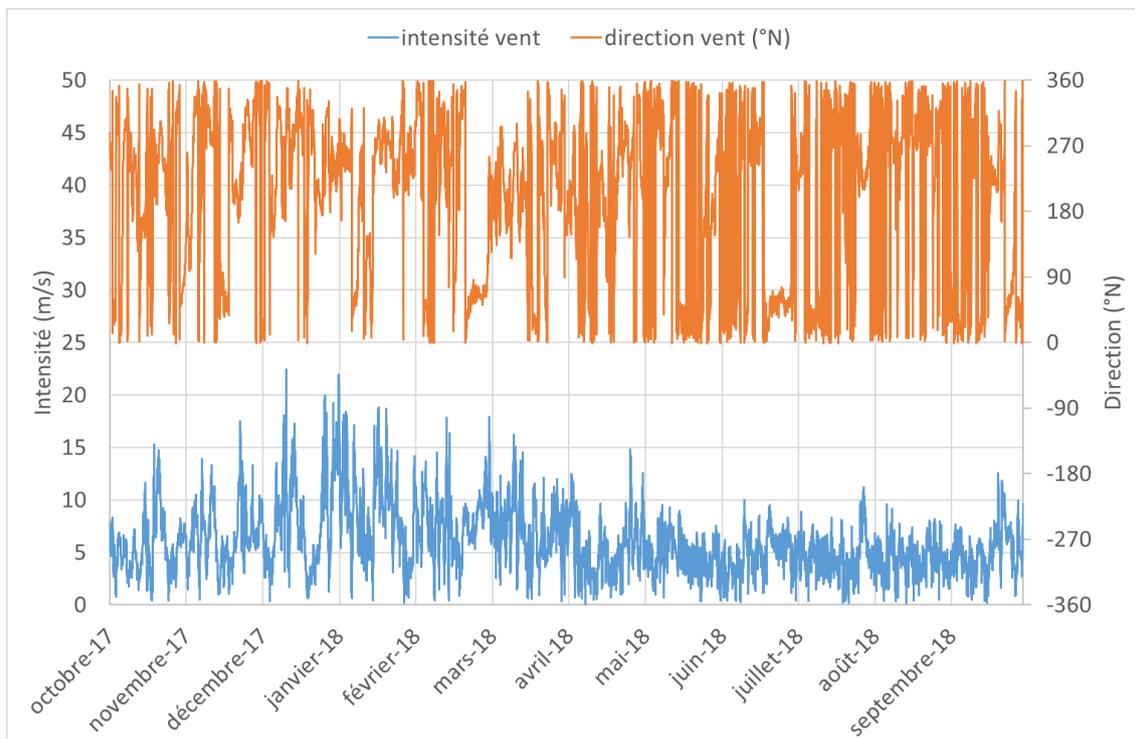


Figure 3-4 : Variation temporelle du vent au niveau de la Lambarde issue de la base de données HOMERE

3.5. HOULE

Le modèle de houle est forcé en chaque point de sa frontière maritime par les résultats de modélisation HOMERE (Ifremer) en hauteur de houle (H_m0), période de pic (T_p), direction de pic ($Dirp$) et étalement directionnel (Spd). Ces forçages permettent le calcul de la propagation des houles à l'intérieur du domaine.

Le modèle de houle est aussi forcé à sa surface sur l'ensemble des points du maillage, par les champs de vent provenant des mêmes modélisations HOMERE. Ce forçage permet en plus de la propagation de tenir compte de la génération des états de mer à l'intérieur du domaine.

Une extraction des caractéristiques de la houle au niveau de la Lambarde est présentée ci-dessous.

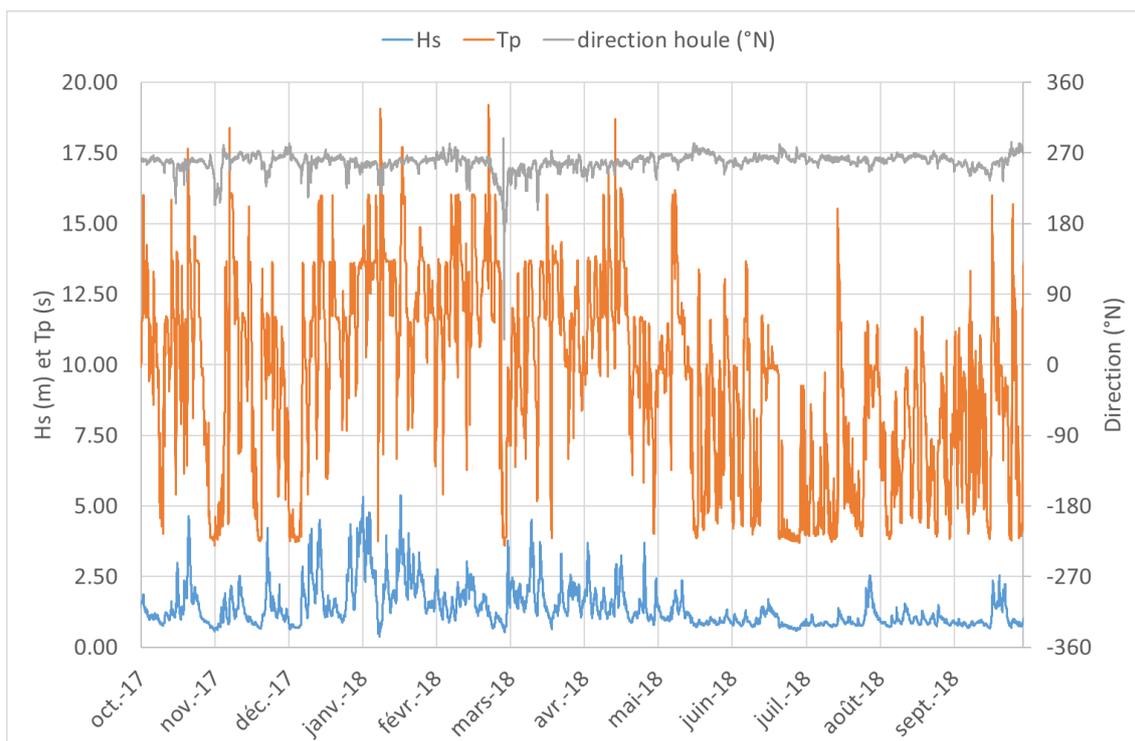


Figure 3-5 : Variation temporelle de la houle au niveau de la Lambarde

3.6. FORÇAGES ANTHROPIQUES ADAPTES AU SCENARIO DE REFERENCE

3.6.1. Clapages par DAM

3.6.1.1. Exploitation des données réelles clapées par le GPMNSN sur 2017-2018

Les clapages par la DAM sont effectués un par un dans le modèle en suivant leur ordre chronologique sur la période octobre 2017- octobre 2018 selon les données fournies par le GPMNSN en date, volume en puits dans la drague et densité.

Ces données ont d'abord été converties en volume équivalent clapé en utilisant la densité en puits de 1,4 (correspondant en moyenne à la densité du dépôt stabilisé) pour établir le bilan des immersions.

Ces volumes sont ici également convertis en masse pour les besoins de la modélisation numérique qui résout l'équation de conservation de la masse en sédiments, en séparant sable et vase. Cette conversion s'effectue à l'aide des formules classiques de mécanique des sols qui s'écrivent :

$$M \text{ (kg)} = V \text{ (m}^3\text{)} * C \quad \text{et} \quad C = \rho_{sed} * \frac{(\rho_{hum} - \rho_{eau})}{(\rho_{sed} - \rho_{eau})}$$

Avec :

C : concentration en sédiments (g/l ou kg/m³)

$\rho_{hum} = \frac{M_{tot}}{V_{tot}}$: masse volumique humide (kg/m³) ; ρ_{sed} : masse volumique des grains solides à 2650 kg/m³ ; ρ_{eau} : masse volumique de l'eau salée qui varie selon les sections de dragages entre 1010 kg/m³ (Donges) et 1025 kg/m³ (Saint-Nazaire).

La masse volumique humide se calcule à partir de la densité en puits (d) par la formule :

$$\rho_{hum} = 1000 * (d - \rho_{eau}/1000)$$

Ce qui conduit à la formule suivante pour la concentration en sédiments :

$$C = 1000 * \rho_{sed} * \frac{(d - \frac{\rho_{eau}}{1000})}{(\rho_{sed} - \rho_{eau})}$$

3.6.1.2. Modélisation d'un clapage

Le principe de modélisation d'un clapage a été calibré sur la période 2011-2021 et est présenté dans le rapport : Construction et calage du modèle 3D hydrosédimentaire local de stabilité du site de clapage de la Lambarde [2].

Le paramétrage retenu est le suivant :

- répartition uniforme dans le temps de la masse sur 10 minutes ;
- répartition des masses en forme (champ proche) : répartition des vases et des sables dans la colonne d'eau et dans le sol suite à la convection en masse (cette phase n'étant pas résolue car pas à l'échelle temporelle et spatiale du modèle). La répartition des masses est fixée à 55% en suspension et 45% en dépôt pour la vase, 100% en dépôt pour le sable ;
- la partie mise en suspension est verticalement répartie uniformément sur l'ensemble de la colonne d'eau ;
- la partie déposée au sol directement (convection de masse) est répartie dans les couches de concentration: 160 g/l, 180 g/l, 200 g/l, 225 g/l ;
- angle limite de glissement sur la zone : 0.75° (1.3%) ;
- la géométrie au sol est paramétrée directement sous forme de cratère dépendant de trois rayons (R1, R2 et R3) cf Figure 3-6 . R1= 75 m, R2= 600 m et R3= 1000 m.

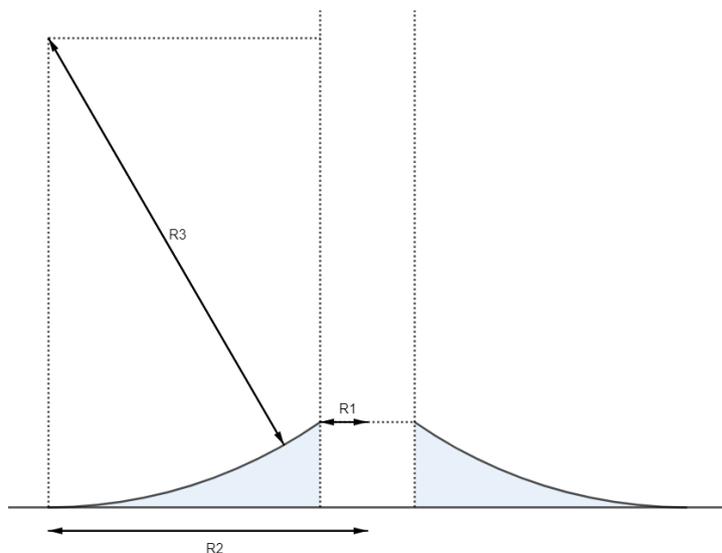


Figure 3-6 : Modélisation géométrique d'un dépôt de clapage

Les sédiments cohésifs initialement clapés dans la colonne d'eau (55%) et initialement déposés au sol (45%) sont mis dans le sédiment cohésif n°2.

3.6.1.3. Facteur correctif pour adaptation au scénario de référence

La série temporelle de clapage utilisée correspond à ce qui a été réellement immergé entre le 01/10/2017 et le 01/10/2018. Un facteur de pondération de 0.93 est alors appliqué afin d'arriver à l'objectif de 3,64 Millions de m³ correspondant au scénario de référence.

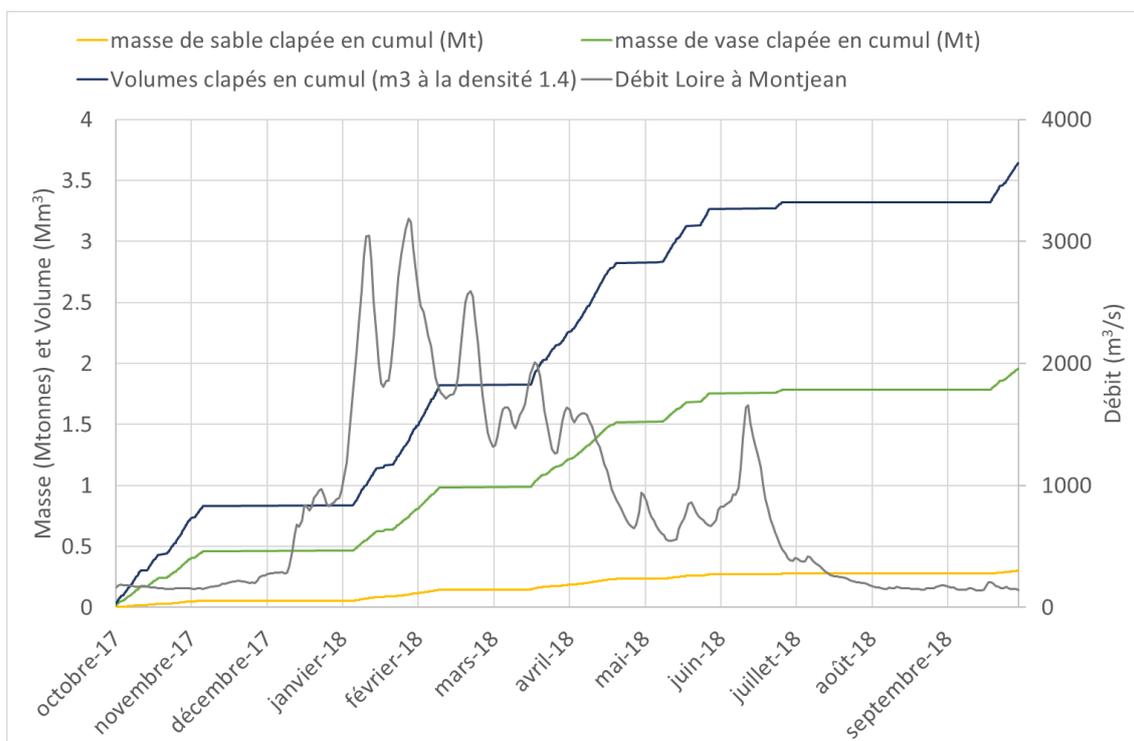


Figure 3-7 : Volumes à la densité 1.4 et masses clapées pour le scénario de référence

scénario de référence

3.6.1.4. Stratégie de clapage dans le scénario de référence

Les études précédentes (Annexe A) sur le secteur de la Lambarde ont mis en évidence une réduction de la stabilité sur les sous-zones qui semble corrélée à l'atteinte d'une cote moyenne sur la sous-zone autour de -18 m CM. La stratégie de clapage mise en œuvre s'appuie donc sur cette observation, avec un changement de sous zone dès lors que la cote moyenne dépasse la valeur de -18m CM.

En réel, ce dépassement de cote moyenne ne permet pas de piloter les opérations de clapage, puisqu'il nécessiterait des levés bathymétriques fréquents et analysés en temps réel. Le dépassement de cote moyenne a donc été rapporté à un dépassement de cote locale (sous le bateau, au niveau du point d'immersion).

Cette cote limite locale est fixée à -21 m CM et a été déterminée à partir des observations sur le levé bathymétrique de mai 2017. À cette date, la cote moyenne de la sous-zone 18 dépasse pour la première fois la valeur de -18m CM et il est observé que ponctuellement, la cote de -21 m CM est dépassée sur la totalité de la sous-zone (Figure 1 1).

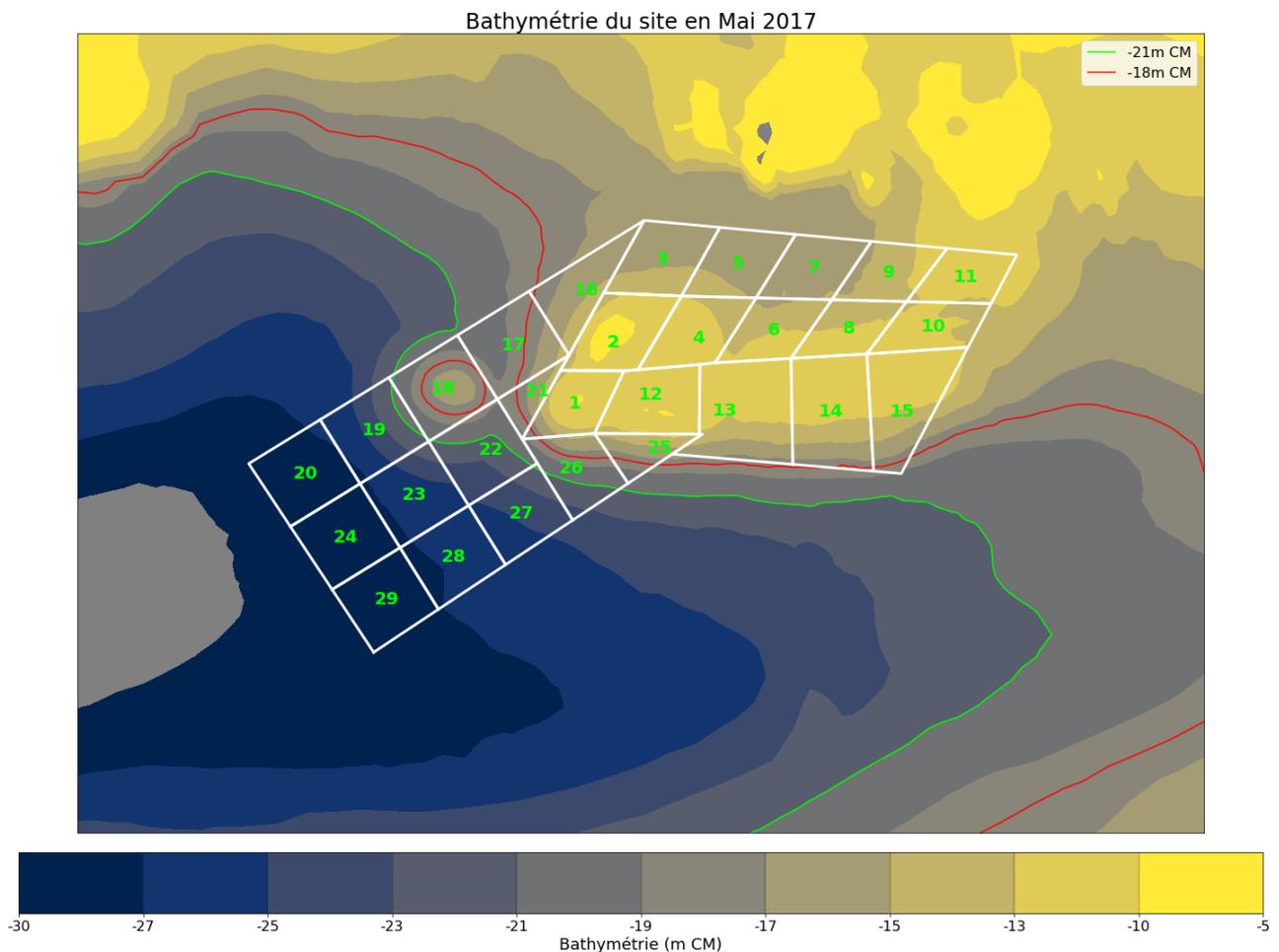


Figure 3-8 : Bathymétrie de Mai 2017 et isobathes -21 m CM (en vert) et -18 m CM (en rouge) (Source des données :GPMNSN)

Concernant le choix exact du point de clapage dans la sous-zone (parmi les points dont la cote est inférieure à -21 m CM), la stratégie retenue est de remplir les zones d'Est en Ouest. Cette stratégie a été mise en place à partir de 2021 dans le modèle de stabilité prospectif 2021-2034 [3].

3.6.2. Dragages par DAM

La méthodologie de dragage par DAM sur les sections 1 à 6 a été calibrée sur cette même année hydrologique (cf rapport Construction, calage et validation du modèle raffiné estuaire externe [5]).

Le principe de dragage semi-automatisé retenu consiste :

- à tenir compte d'une cote d'exploitation et d'une cote nominale. Un dragage n'est effectué que si la cote d'exploitation est dépassée. Le dragage permet alors de revenir à la cote nominale de dragage ;
 - sections 1 et 2 : cote d'exploitation -13,2m CM et cote nominale de dragage : -13,70 m CM
 - sections 3 à 6 : cote d'exploitation -12,4m CM et cote nominale de dragage : -12,85 m CM
- à effectuer, un dragage journalier limité à un taux maximal de 36 000 m³/jour ;
- à limiter temporellement la modélisation des dragages aux périodes effectives des campagnes de dragage correspondant à l'année hydrologique considérée.

3.6.3. Remises en suspension par DAS et DIE

La méthodologie de dragage et remise en suspension par DAS et DIE a été mise en place sur la période estivale 2018 (cf rapport : Exploitation du modèle global – modélisations de l'oxygène dissous sur 3 à 4 mois d'étiage (2018)[6]).

Une opération de dragage par DAS ou DIE est simulée dans le modèle par un ou plusieurs « points sources » rejetant un débit solide de vase (les deux types de drague remobilisent localement les sédiments, il n'y a pas d'exportation vers la Lambarde comme pour la DAM). Les sédiments remis en suspension sont donc remis dans le sédiment cohésif n°1. La même quantité de vase est alors enlevée (dragage) dans le sol sur une étendue définie afin d'avoir une conservation de la masse. Une opération de dragage doit donc être définie en entrée sous forme de 5 données :

- position horizontale X, Y du point de rejet ;
- position verticale Z dans la colonne d'eau du point de rejet ;
- position et étendue X, Y de la zone de dragage correspondante ;
- débit solide de la masse de vase rejetée ;
- date et heure de début d'activité et durée du dragage.

3.6.3.1. Position horizontale du point de rejet

La position des dragages par DAS et DIE est issue des fichiers fournis par le GPMNSN, les coordonnées fournies ont directement été utilisées et reportées sur le nœud du modèle le plus proche et suffisamment en eau. Lorsque les positions sont définies par des noms de zone ou section, une position centrale du point de rejet par rapport à la zone affectée a été attribuée pour la simulation. Les coordonnées correspondantes pour les sections 3 à 9 sont fournies dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Coordonnées des sections pour la modélisation

	X_RGF93 (m)	Y_RGF93 (m)
Section 3	306514.695	6697237.163
Section 4	308581.164	6698955.887
Section 5	311433.822	6701064.711
Section 6	315312.461	6701679.229
Section 7	320654.982	6700278.052
Section 8	328755.638	6698223.722
Section 9	333695.574	6694484.105

3.6.3.2. Position et étendue de la zone de dragage correspondante

La position du point de rejet de dragage étant représentative d'une zone de dragage, l'emprise où le sédiment correspondant doit être prélevé dans le sol doit être plus étendue qu'uniquement sous le point de rejet, afin notamment d'assurer la présence suffisante de sédiment. Il a été effectué le choix de draguer une zone comprise dans un **rayon de 1000 mètres** autour du point de rejet, dans le chenal de navigation.

3.6.3.3. Position verticale du point de rejet dans la colonne d'eau

La méthodologie de modélisation d'un rejet de DAS et DIE a été développée lors d'une étude d'évaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE), effectuée pour le GPMNSN [8]. Les méthodologies ont d'abord été calées sur un ensemble de mesures disponibles ce qui a conduit à mettre en œuvre une modélisation spécifique séparée du champ proche dont les résultats sont ensuite introduits sous forme de points sources dans le modèle de l'estuaire. Ces mêmes méthodologies sont reprises ici.

3.6.3.3.1. Rejet par DIE

Les campagnes expérimentales de dragages par injection d'eau en Loire ont été systématiquement accompagnées, entre 2006 et 2012, par un suivi environnemental. Ce suivi portait sur les incidences du DIE sur la qualité de l'eau et notamment la MES et la crème de vase. Plusieurs périodes de campagnes expérimentales ont permis de calibrer les paramètres de modélisation propres à une opération de dragage par DIE [8]. Sur la base de ces éléments, le rejet est effectué par un point source se situant à 0,5 m au-dessus du fond, soit pour notre modèle sur le 2^{ème} plan au-dessus du fond.

3.6.3.3.2. Rejet par DAS

Le rejet de dragage de la DAS André Gendre, s'effectue selon la verticale, en sub-surface (-1m sous la surface), dans le chenal de navigation soumis aux courants de marée. Ce jet, de densité plus importante que le milieu ambiant, va évoluer rapidement en descendant la colonne d'eau en fonction du débit, de la densité de la mixture, du courant ambiant et de la hauteur d'eau. Une analyse de jets plongeants à forte densité par des mesures expérimentales en laboratoire [8] et une modélisation simple du champ proche par le logiciel Cormix [8] a permis de montrer que l'épaisseur de la couche de mixture en sortie de champ proche représente entre 23 et 46 % de la hauteur d'eau suivant les cas (courants, hauteur,

scénario de référence

différence de densité). Il a été retenu de rejeter la mixture sur 40% de la colonne d'eau. En effet, les cas où les pourcentages de hauteur d'eau sont plus faibles correspondent à des vitesses de courant faibles pour lesquelles le modèle 3D simule le dépôt sous forme de crème de vase liquide dès la sortie du rejet.

Pour la DAS, le rejet est donc effectué par **des points sources sur les plans qui se situent dans les 40 % du bas de la colonne d'eau** (variable donc suivant le moment de la marée).

3.6.3.4. Débit solide de la masse de vase rejetée

L'analyse quantitative des pratiques de dragages par DAS et DIE a été étudiée lors d'une étude d'évaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par DAS et par DIE, effectuée pour le GPMNSN. D'après les conclusions du rapport « Analyse quantitative des pratiques [7] :

- un chantier typique de dragage par **DAS** mènerait à une remise en suspension de 34 680 t de vase sur une durée d'activité de 8 jours (à raison de 7,5h effectives/jour). Ceci mène donc à un débit solide moyen de remise en suspension de **581 t/h**, lorsque le dragage est effectif ;
- un chantier typique de dragage par **DIE** mènerait à une remise en suspension de 31 266 t de vase sur une durée d'activité de 12h sur la zone Donges-poste 6. Ceci conduit donc à un débit solide moyen de remise en suspension de **2 605 t/h**.

Ces tonnages moyens par heure de remises en suspension pour chaque type de chantier ont été appliqués.

Il est à noter que ces quantités sont généralement plus importantes que les estimations effectuées par le GPMNSN, ce qui est expliqué par l'étude [7] (mise en Annexe pour plus de détail) ; ci-dessous un rappel des conclusions de cette étude.

Originellement, les quantités draguées sont estimées de différentes manières selon les techniques :

- pour la DAS, les volumes « efficaces », associés à un objectif de cote du plafond des souilles à respecter, sont estimés à partir d'un rendement moyen estimé de 350 m³/s de sédiments en place à la densité 1,4, multiplié par le nombre d'heures d'activité de la drague ;
- les quantités draguées par la DIE sont également estimées par des volumes « efficaces », estimés par comparaison de deux levés bathymétriques effectués avant puis après l'opération.

Une analyse quantitative détaillée d'une opération de dragage par drague aspiratrice stationnaire est présentée au chapitre 2 du rapport [7]. L'analyse d'un chantier de dragage, effectué à l'aval sur la souille de Donges 6 en novembre 2016, met en évidence un écart important entre le rendement de la drague estimé à partir du débit de la pompe et de la densité de la mixture et son rendement « efficace » obtenu par comparaison entre deux levés bathymétriques effectués avant et après l'opération. Un travail complémentaire a donc été effectué pour déterminer les facteurs pouvant influencer les volumes refoulés par la DAS lorsque les dragues sont en activité. Il a permis de quantifier les écarts existant entre un volume de dragage efficace, qui rend compte de l'évolution bathymétrique avant et après dragage et un volume effectivement dragué et refoulé dans l'estuaire que ce soit par DAS ou par DIE.

Les facteurs analysés rendant compte de cette différence sont les suivants :

- écart entre les heures opérationnelles de dragage et les heures de refoulement effectif ;
- influence des conditions de site (amont, aval) sur les rendements ;
- volumes de sur-dragage nécessaires pour atteindre la cote d'exploitation ;
- apports de sédiments pendant la durée du chantier (présence du bouchon vaseux) ;
- réajustement de la pente du talus en bord de chenal.

Pour la DAS, l'étude a montré en particulier que les heures effectives de dragages étaient de l'ordre de 7,5h par jour et qu'un refoulement avec un débit de 3 500 m³/h et une densité de mixture de 1,1 permettait d'expliquer les chiffres avancés.

Cette analyse a ensuite été conduite pour le dragage par injection d'eau en prenant pour base le même volume efficace dragué comme cela est décrit au chapitre 3 du rapport [7]. Les facteurs de sécurité pris sur le positionnement vertical de la barre conduit à des sur-dragages qui peuvent être importants.

scénario de référence

3.6.3.5. Dates et heures de début et durée d'activité d'une opération de dragage

Les dates et heures de début d'activité ainsi que la durée effective du dragage sont issues directement des fichiers du GPMNSN. Il s'agit donc de l'activité réelle réalisée sur la période simulée.

3.6.3.6. Facteur correctif pour adaptation au scénario de référence

Les séries temporelles de dragage par DAS et DIE utilisées correspondent donc à ce qui a été réellement opéré entre le 01/10/2017 et le 01/10/2018 :

- avec un facteur de pondération de 1.11 sur les durées de dragage par DAS afin d'arriver à l'objectif de 300 000 m³ annuels correspondant au scénario de référence, le passage en tonnes de sédiments remobilisés est calculé en fonction du nombre d'heures de dragage effectif avec un rejet de 581 t/heure (cf 3.6.3.4) ;

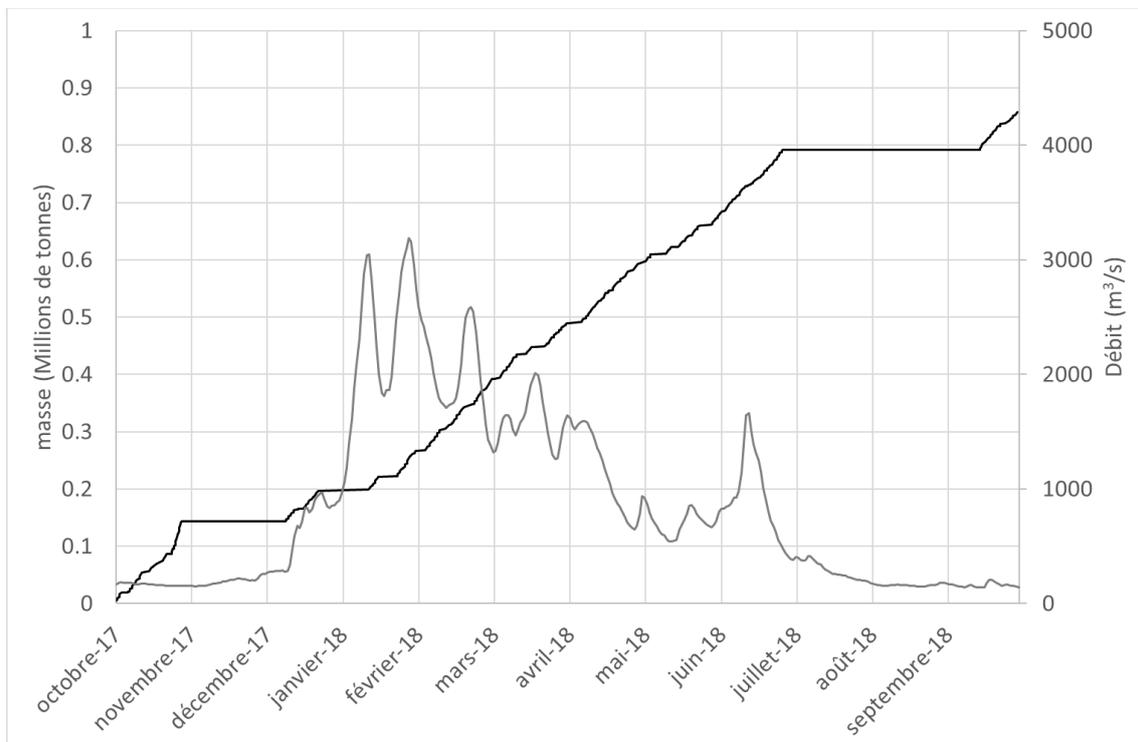


Figure 3-9 : Débit de la Loire à Montjean sur Loire (trait gris) et masse de vase remise en suspension (trait noir) par la DAS dans le scénario de référence

- avec un **facteur de pondération de 0,98 sur les durées de dragage par DIE** afin d'arriver à l'objectif de 1 500 000 m³ annuels correspondant au scénario de référence, le passage en tonnes de sédiments remobilisés est calculé en fonction du nombre d'heures de dragage effectif avec un rejet de 2605 t/heure (cf 3.6.3.4).

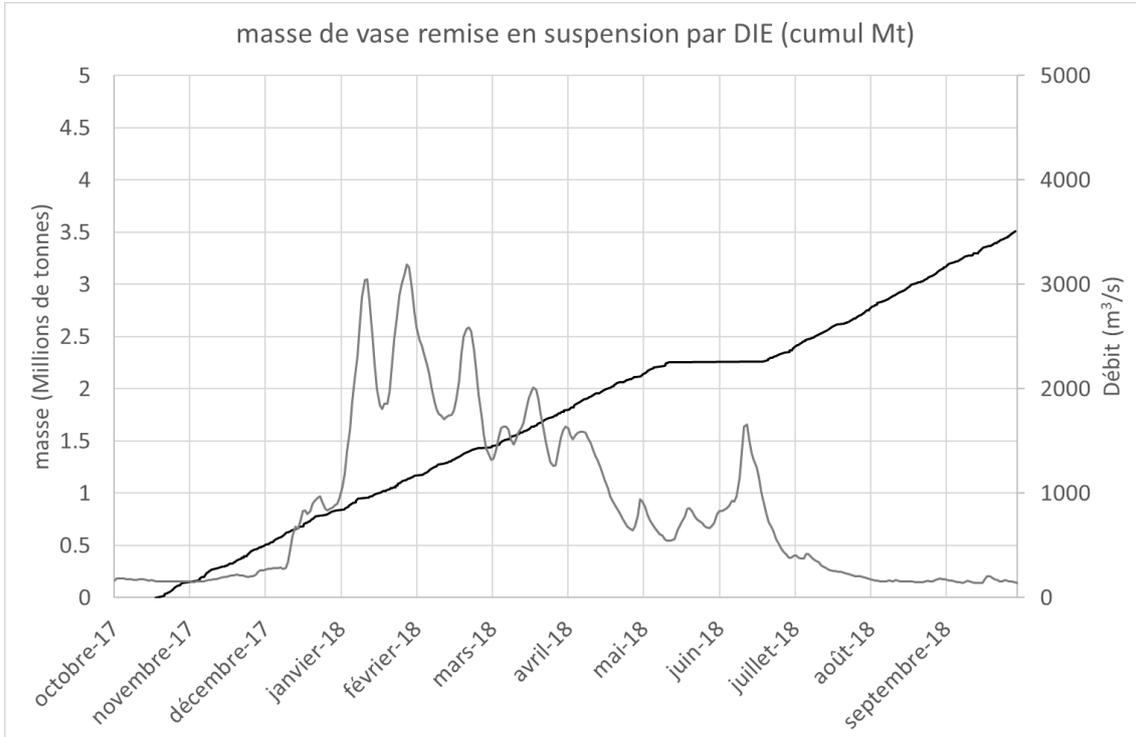


Figure 3-10 : Débit de la Loire à Montjean sur Loire (trait gris) et masse de vase remise en suspension (trait noir) par la DIE dans le scénario de référence

4. CONDITIONS INITIALES

4.1. SUR L'ENSEMBLE DU MODELE HORS ZONE LAMBARDE

Les conditions initiales sont extraites au 01/10/2017, du calcul décrit dans le rapport « Construction, calage et validation du modèle raffiné estuaire externe » [5], après 2 mois d'initialisation. Les variables initialisées sont :

- la cote de fond ;
- la hauteur d'eau ;
- les vitesses 3D ;
- la salinité ;
- la MES ;
- les masses de sédiments (vases et sables) dans le sol (de chaque couche du modèle de consolidation et du remplissage sédimentaire).

La MES et la vase dans le sol sont mises dans le sédiment cohésif n°1 correspondant à la dynamique estuarienne.

4.2. SUR LA ZONE DE LA LAMBARDE

Les conditions initiales sont extraites au 01/10/2032, du calcul décrit dans le rapport : exploitation du modèle local du site de la Lambarde– modélisations hydrosédimentaires de la stabilité du dépôt sur 13 ans (2021-2034) [4], après 11 ans d'initialisation. Cette bathymétrie permet d'arriver sur la dernière année de remplissage de la sous-zone 27 (fin prévue au 06/11/2033 d'après le modèle de stabilité) ce qui permet d'être normalement dans des conditions les plus dispersives.

Les variables initialisées sont :

- la cote de fond ;
- les masses de sédiments (vases et sables) dans le sol (de chaque couche du modèle de consolidation et du remplissage sédimentaire).

La vase est alors mise dans le sédiment cohésif n°1, afin de tracer les sédiments clapés lors de la nouvelle année simulée dans le sédiment cohésif n°2.

La bathymétrie initiale sur la zone de la Lambarde au 01/10/2032 est présentée sur la figure ci-dessous :

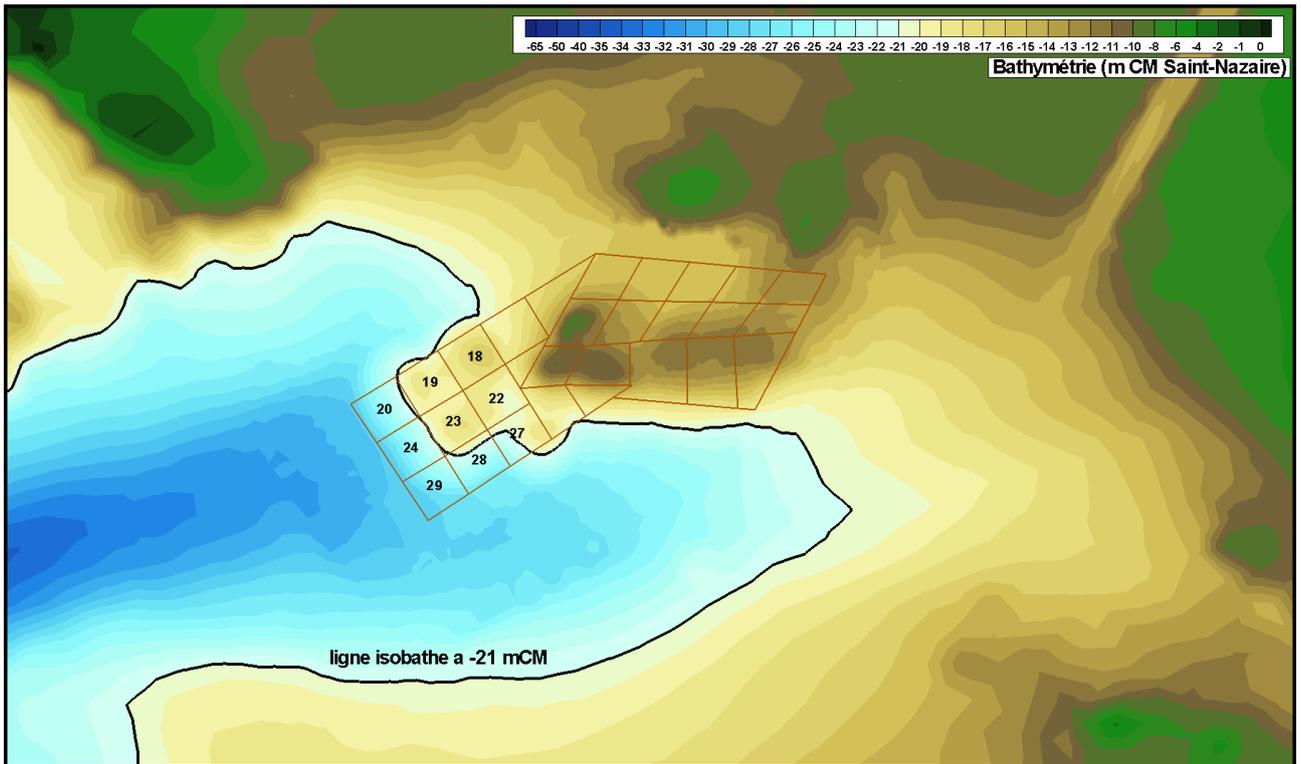


Figure 4-1 : Bathymétrie initiale au niveau de la Lambarde à la date prospective du 01/10/2032

5. RESULTATS DE MODELISATION

5.1. VALIDATION DU MODELE SUR LE RESEAU SYVEL

Les résultats du modèle en termes de MES et de salinité ont été comparés aux mesures du Réseau SYVEL sur cette année hydrologique 2017-2018. Les résultats sont présentés en Annexe B. Comme dans le rapport [5], pour cette même année hydrologique, les résultats du modèle sont comparables en MES et salinité à la dynamique estuarienne mesurée sur le réseau SYVEL. L'introduction des dragages par DAS et DIE dans cette nouvelle simulation ainsi que la modélisation des deux types de sédiments cohésifs ne dégradent donc pas la qualité de la validation déjà obtenue.

5.2. EVOLUTION DE LA ZONE DE LA LAMBARDE

Sur la période du 1^{er} octobre 2032 au 1^{er} octobre 2033, soit la fin du remplissage de la sous-zone 27, le modèle de stabilité [3] prévoyait une stabilité de 21,7% en volume et 12,4% en masse de vase (pour un volume clapé de 4,14 Mm³ et pour une année hydrologique différente à celle simulée ici). Dans le modèle de dispersion présenté ici, les taux de stabilité sont assez proches et les écarts peuvent s'expliquer par les différences de forçages : stabilité en volume de 19,2% et de 13,9% en masse (pour un volume clapé de 3,64 Mm³). La carte de bathymétrie en fin de simulation et la carte de dépôt en volume sont présentées à la suite en (Figure 5-1).

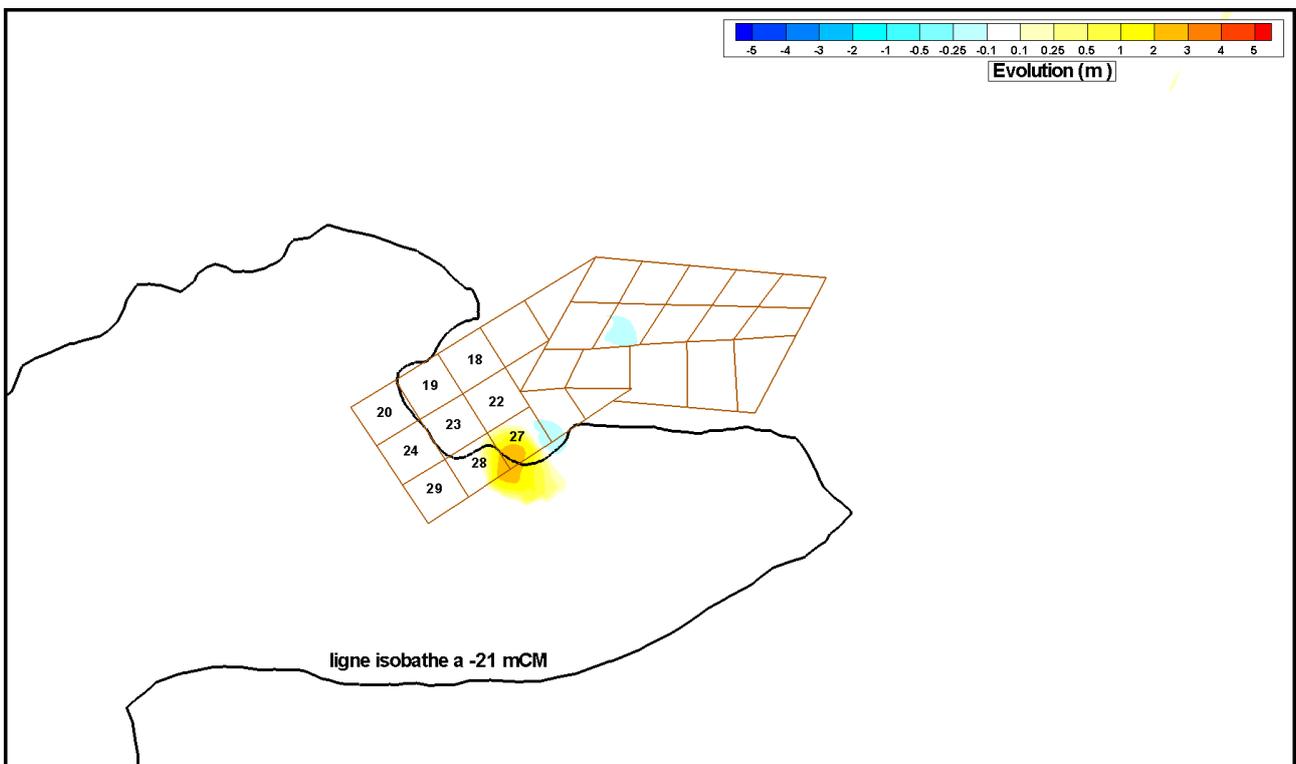
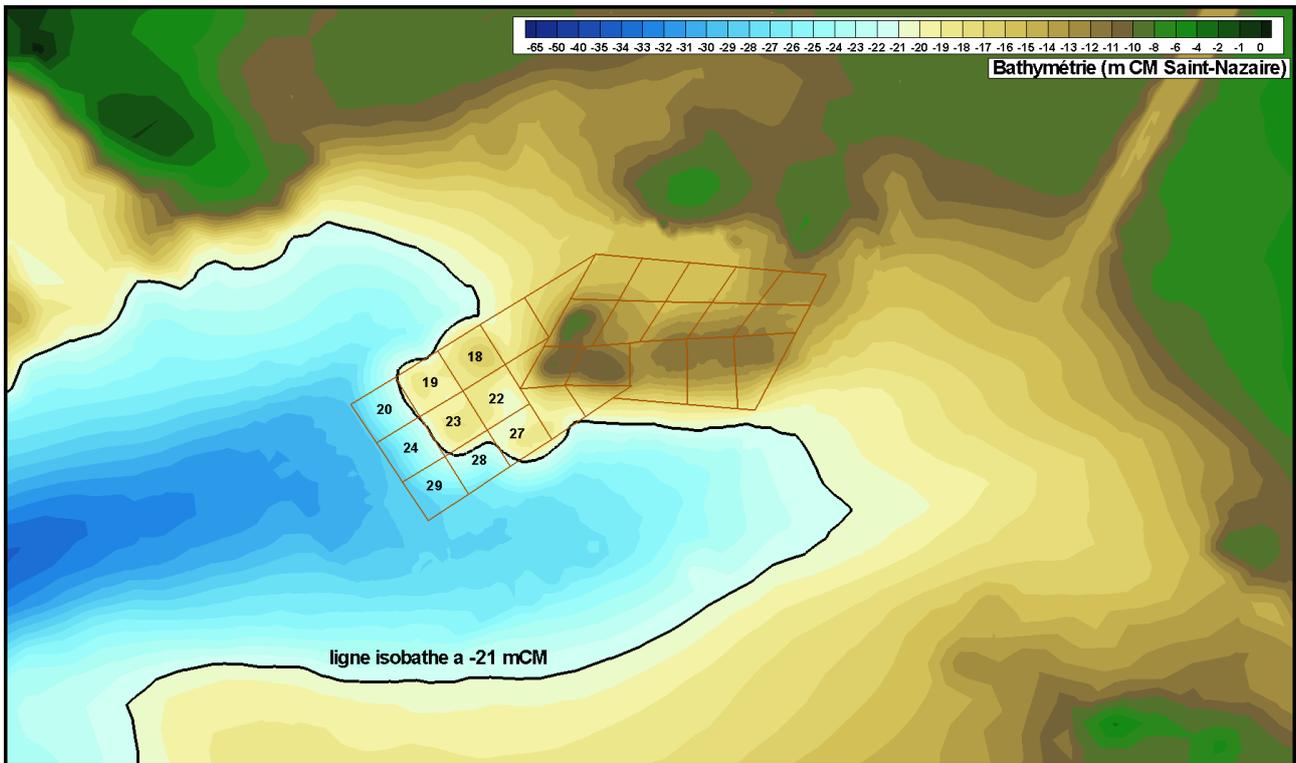


Figure 5-1 : Bathymétrie finale et dépôt à la date prospective du 01/10/2033

Cette période de fin de remplissage de la sous-zone 27, combinée à l'année hydrologique 2017-2018 peut être qualifiée de très dispersive au vu des résultats obtenus en moyenne entre 2021 et 2034 : 27% de stabilité en volume [3].

scénario de référence

5.3. DISPERSION : PROFILS TEMPORELS DE CONCENTRATION MOYENNE DANS LES BAIES ET L'ESTUAIRE EXTERNE

Les profils temporels de concentration pour les baies et l'estuaire externe sont fournis en 14 points dont la position a été fixée en 2012 et confirmée en 2018. Ces points sont placés stratégiquement pour rendre compte de l'impact de la dispersion sur les différents secteurs de l'estuaire externe.

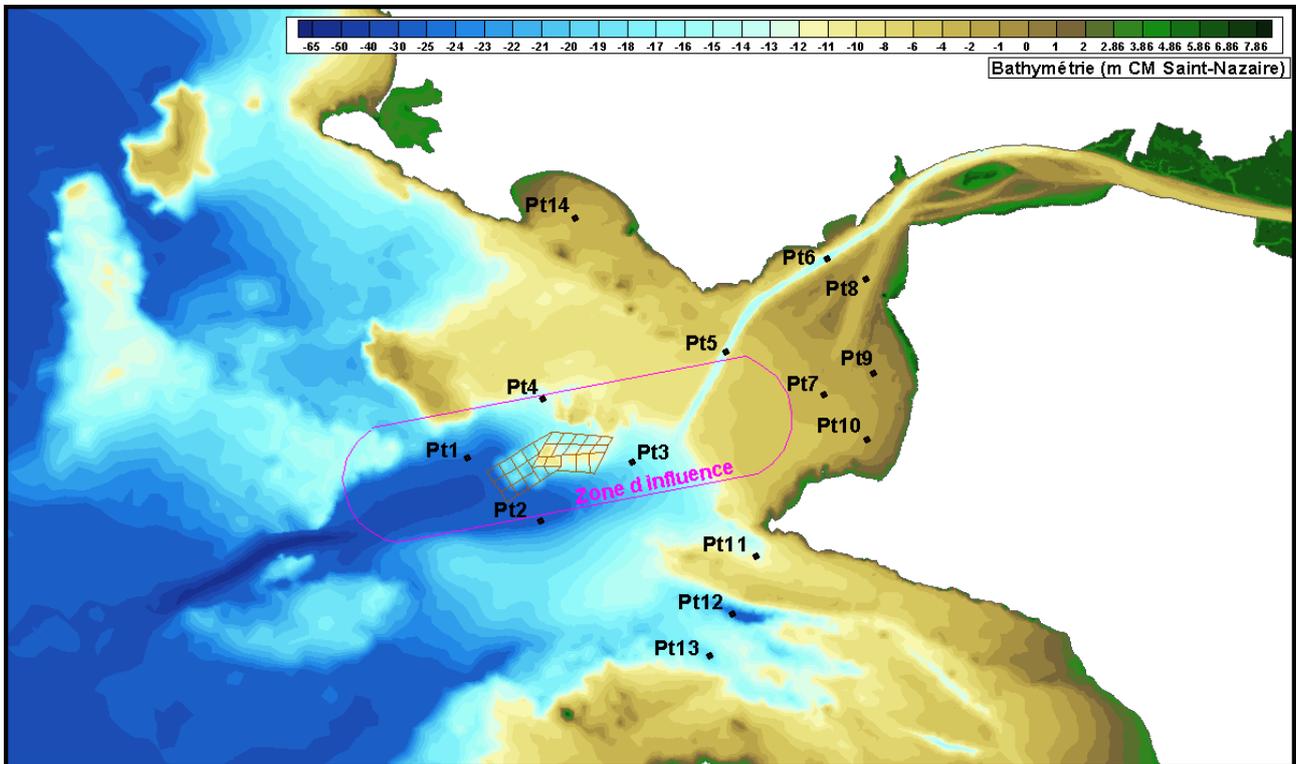


Figure 5-2 : Position des points de contrôle de la MES dans les baies et l'estuaire externe

5.3.1. Alentours du site de la Lambarde (points 1, 2, 3, 4)

Au niveau du site de la Lambarde, les points 2 et 3 restent sur l'axe privilégié de dispersion des panaches et des remises en suspension, mais aussi sur l'axe privilégié des sédiments issus de la dynamique estuarienne. De plus, les immersions se font sur la sous-zone 27 qui se situe en bord de zone d'immersion au plus proche de l'axe compris entre le point 2 et 3. Les points 1 et 4, plus au Nord sont donc moins impactés.

Les évolutions de la concentrations issues des sédiments provenant de la Lambarde aux points 2 et 3 sont quasiment synchrones avec les clapages ; dès que ceux-ci s'arrêtent, les concentrations deviennent minimales dans les 15 jours qui suivent. Les concentrations issues de la dynamique estuarienne suivent plutôt les cycles de marées et l'évolution du débit de la Loire.

Les graphiques ci-dessous présentent les évolutions temporelles de MES aux différents points. Le graphique du haut représente la MES provenant des immersions à la Lambarde, le graphique du bas présente la MES provenant de la dynamique estuarienne.

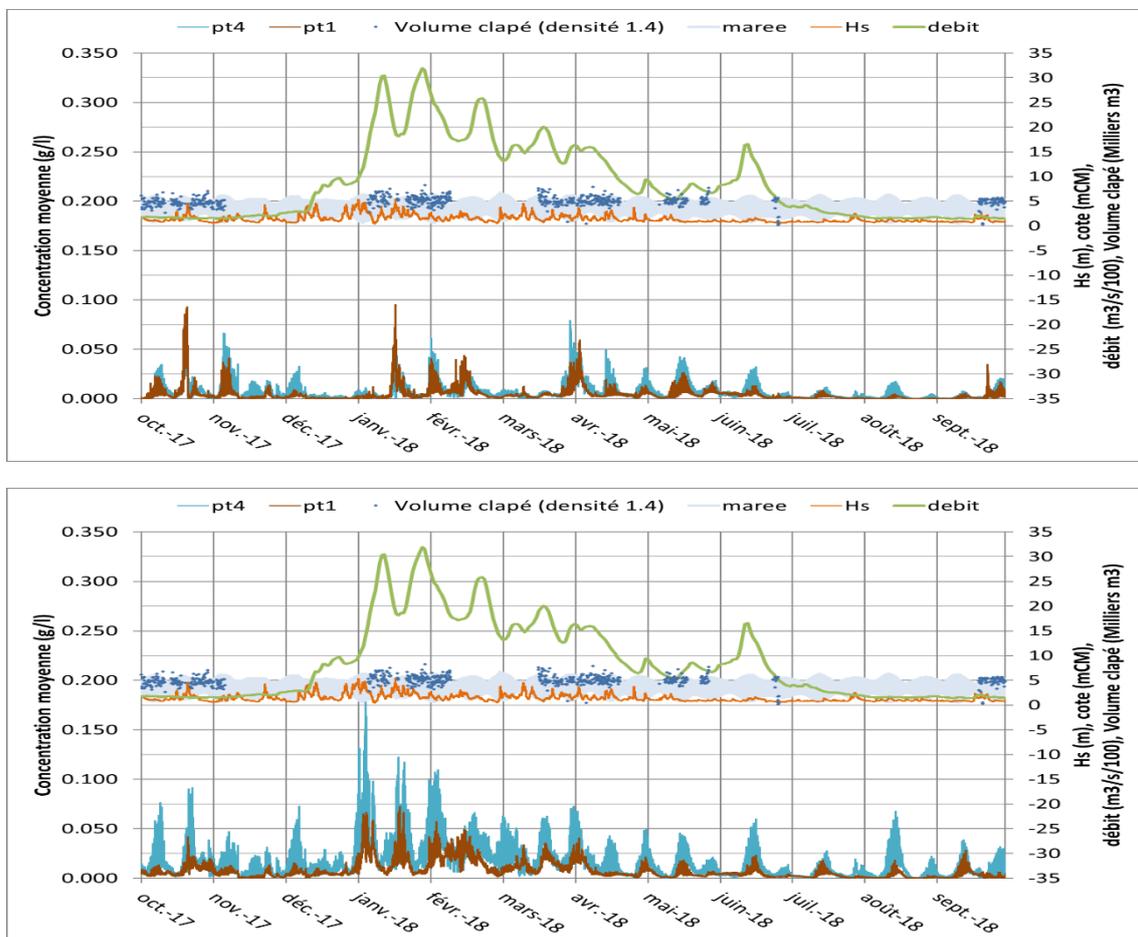


Figure 5-3 : Concentrations moyennes au point 1 et au point 4. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

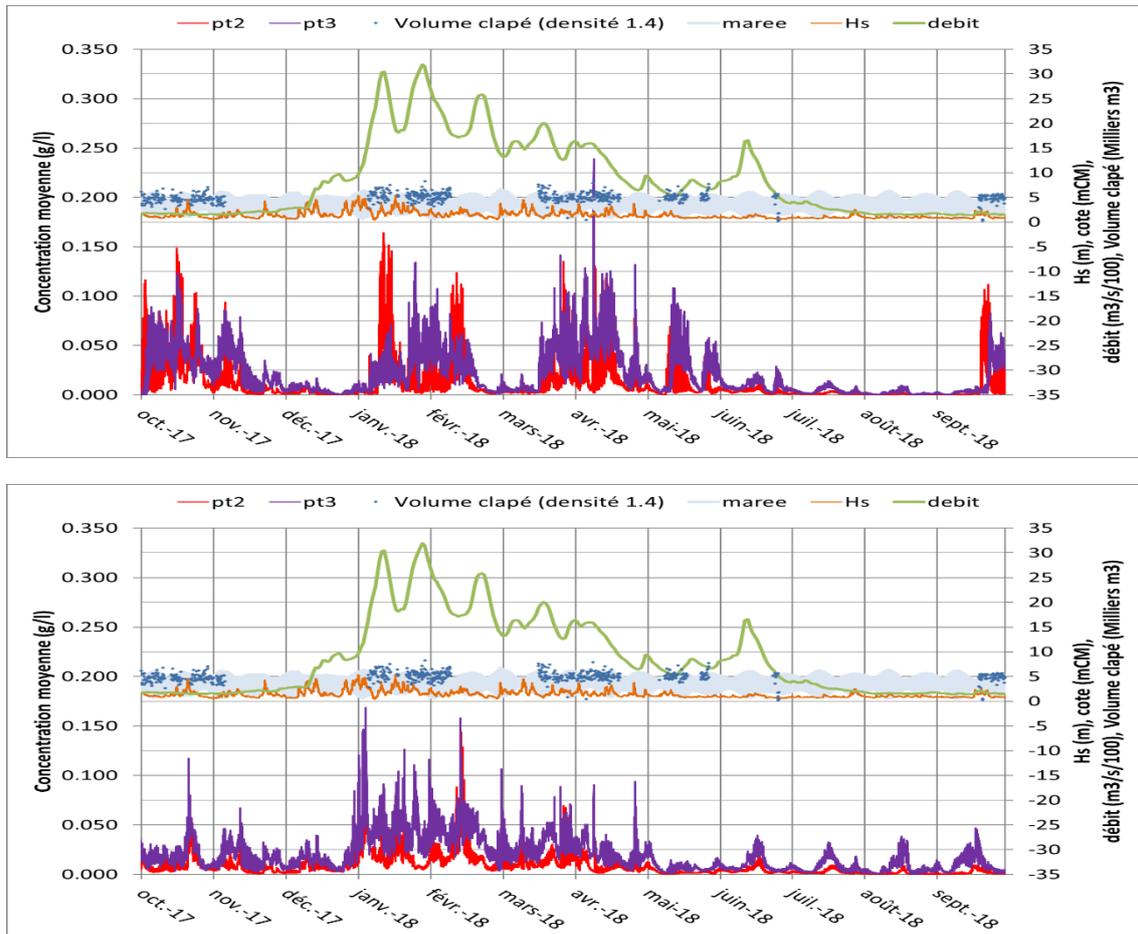


Figure 5-4 : Concentration moyenne au point 2 et au point 3. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES d'environ 43% aux points 2 et 3 et d'environ 30% aux points 1 et 4.

Tableau 5-1 : Percentiles des MES aux points 1, 2, 3 et 4

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde				MES (g/l) provenance estuaire				% du percentile MES provenance Lambarde			
	PT1	PT2	PT3	PT4	PT1	PT2	PT3	PT4	PT1	PT2	PT3	PT4
25	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002	0.002	0.006	0.004	28.6	41.6	38.1	28.9
50	0.002	0.004	0.010	0.004	0.005	0.005	0.014	0.010	33.7	43.2	42.3	28.6
75	0.005	0.012	0.034	0.008	0.009	0.010	0.027	0.020	34.9	55.1	56.1	27.5
99	0.034	0.095	0.098	0.038	0.039	0.047	0.080	0.079	47.1	66.9	55.0	32.6

5.3.2. Canal de navigation et chenal de Mindin (points 5, 6, 7, 8)

Au niveau du chenal de navigation et du chenal de Mindin, on retrouve une dynamique complètement estuarienne (pompage tidal, reflux dans l'estuaire externe) même pour les sédiments provenant de la Lambarde. Une partie des sédiments provenant de la Lambarde remonte dans l'estuaire et recharge le bouchon vaseux (notamment suite à la période de fort débit). Cette partie des sédiments issus des immersions reprend alors une dynamique complètement estuarienne, avec possiblement des remontées dans la Loire, des redragages et des re-expulsions dans l'estuaire externe.

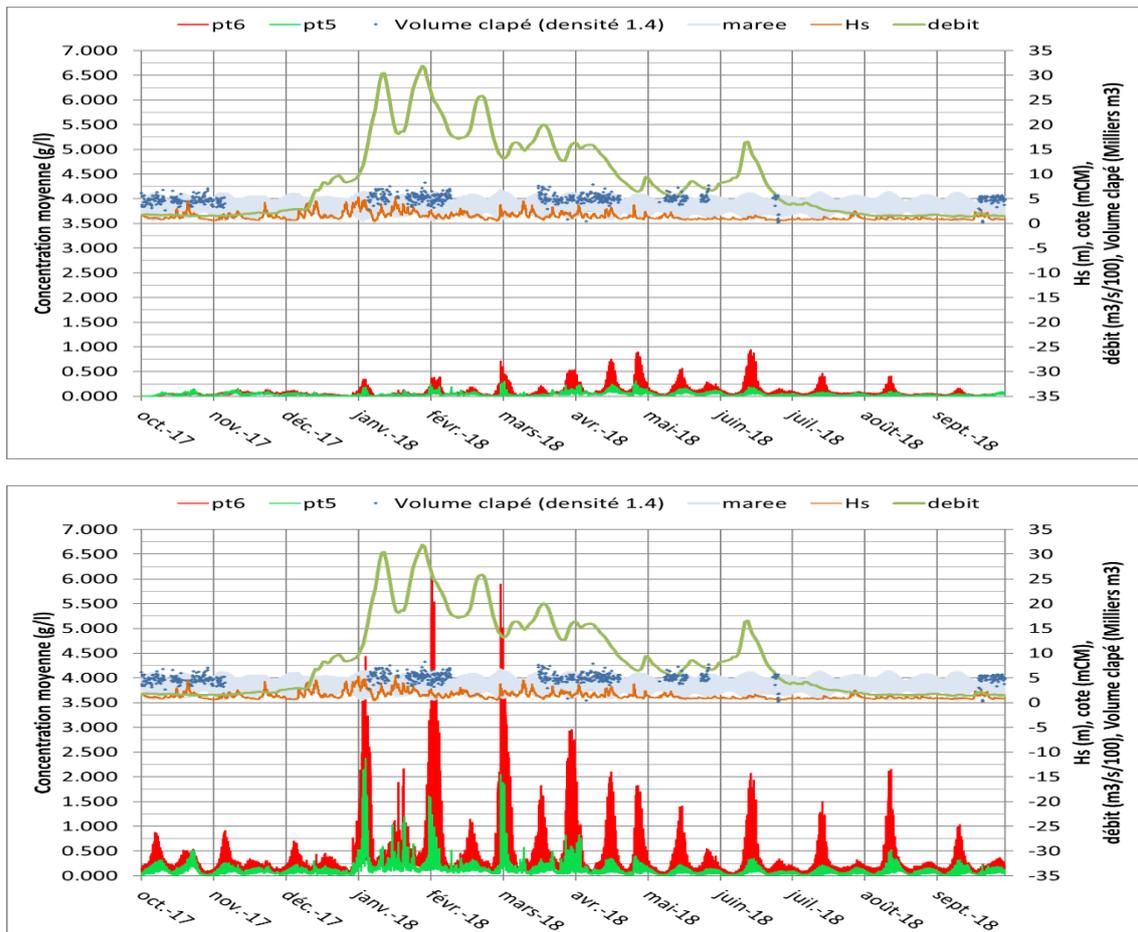


Figure 5-5 : Concentration moyenne au point 5 et au point 6. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

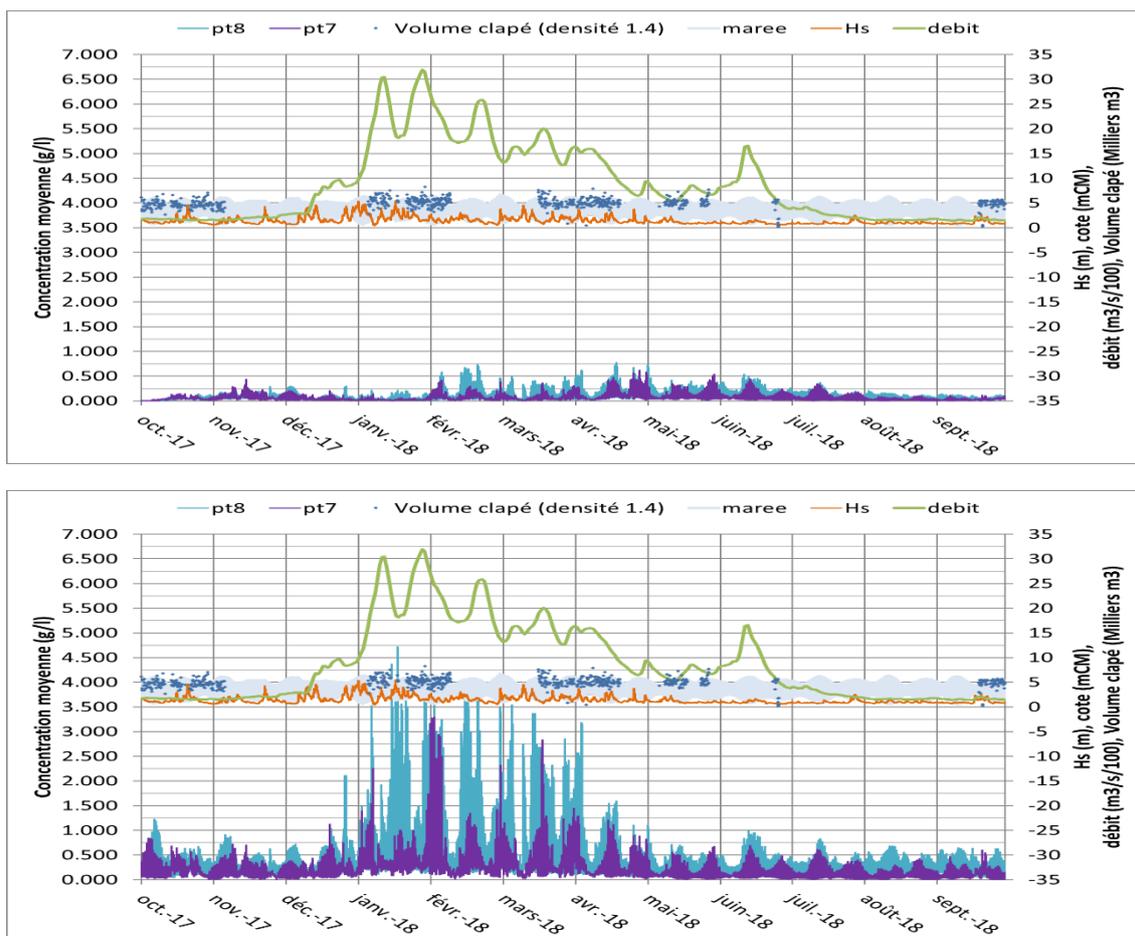


Figure 5-6 : Concentration moyenne au point 7 et au point 8. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES d'environ 24% aux points 5 et 6 dans le chenal de navigation et d'environ 22% aux points 7 et 8 dans le chenal de Mindin.

Tableau 5-2 : Percentiles des MES aux points 5, 6, 7 et 8

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde				MES (g/l) provenance estuaire				% du percentile MES provenance Lambarde			
	PT5	PT6	PT7	PT8	PT5	PT6	PT7	PT8	PT5	PT6	PT7	PT8
25	0.015	0.028	0.022	0.039	0.043	0.108	0.063	0.164	25.6	20.5	26.0	19.1
50	0.028	0.045	0.041	0.067	0.079	0.162	0.128	0.259	26.4	21.9	24.2	20.6
75	0.049	0.072	0.073	0.115	0.133	0.252	0.252	0.400	26.9	22.2	22.4	22.3
99	0.150	0.401	0.304	0.366	0.669	2.372	1.010	2.316	18.3	14.5	23.2	13.6

5.3.3. Baie de Saint-Michel-Chef-Chef (points 9,10)

Au niveau des points 9 et 10 qui sont dans la zone de la baie de Saint-Michel-Chef-Chef, les concentrations de MES provenant de la Lambarde sont plus importantes au point 9 par rapport au point 10, mais sont bien moins intenses que la dynamique estuarienne dans cette zone.

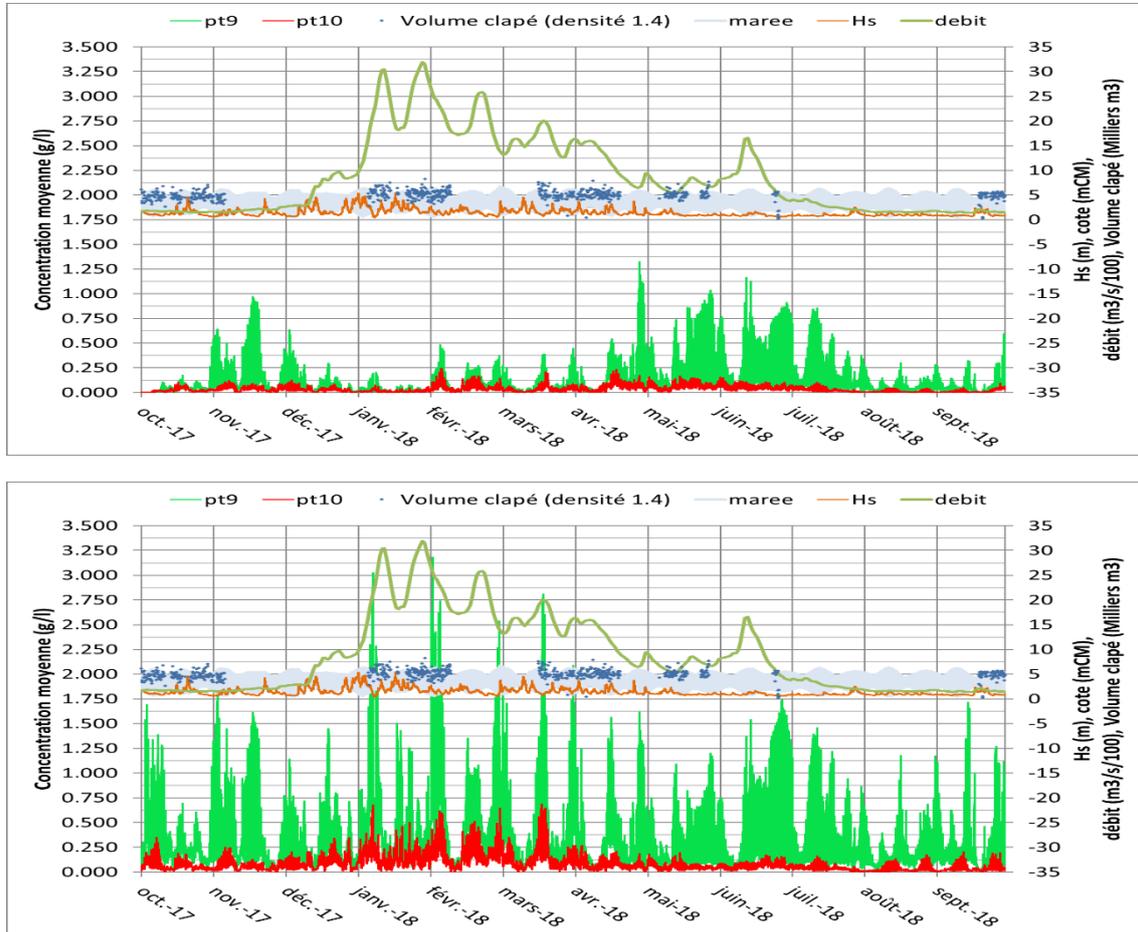


Figure 5-7 : Concentration moyenne au point 9, au point 10 et au point 14. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES d'environ 24% au point 9, 32% au point 10.

Tableau 5-3 : Percentiles des MES au point 9 et au point 10

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde		MES (g/l) provenance estuaire		% du percentile MES provenance Lambarde	
	PT9	PT10	PT9	PT10	PT9	PT10
25	0.030	0.010	0.109	0.028	21.5	27.2
50	0.060	0.025	0.187	0.053	24.3	32.0
75	0.113	0.048	0.354	0.100	24.2	32.3
99	0.740	0.131	1.531	0.366	32.6	26.4

5.3.4. Baie de la Baule (point 14)

Au niveau du site de la Baule (point 14) les concentrations provenant des sédiments issus des immersions à la Lambarde sont très faibles.

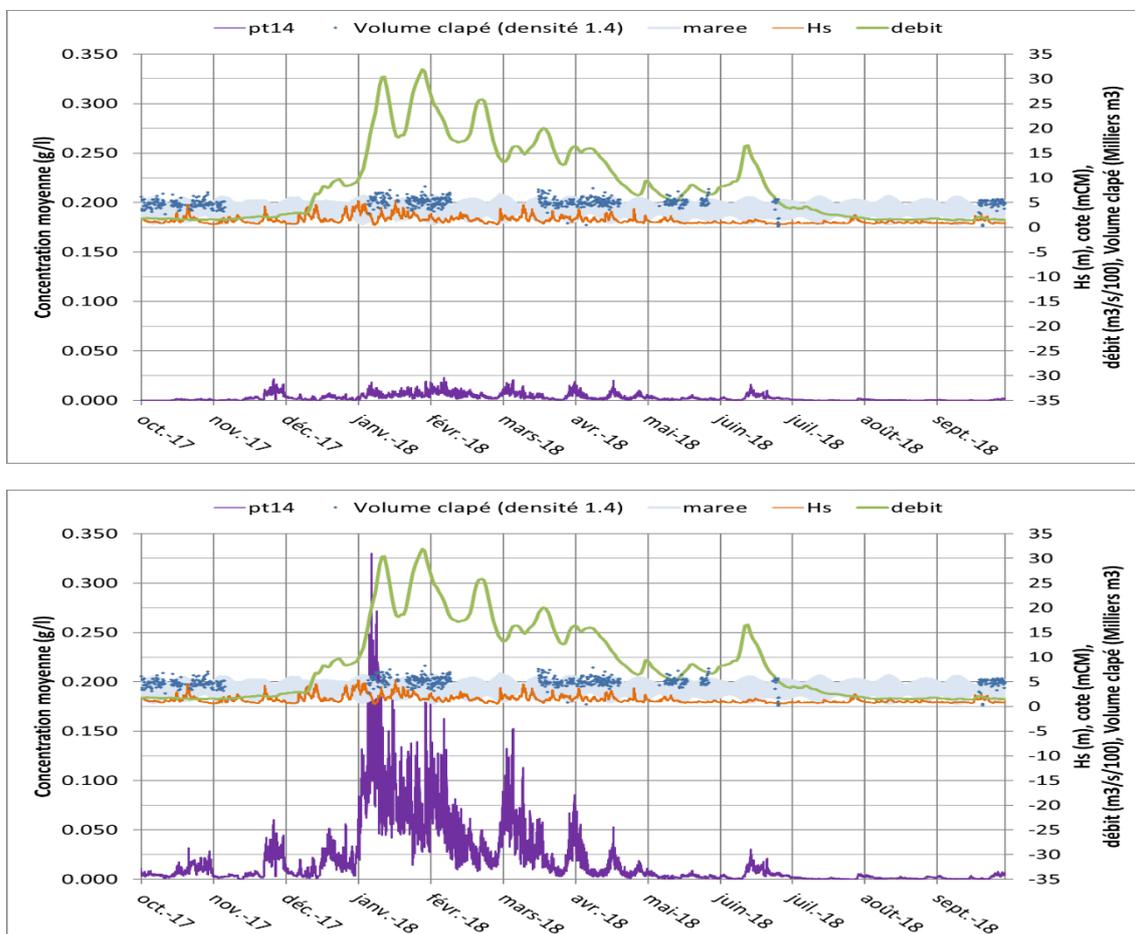


Figure 5-8 : Concentration moyenne au point 14. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES d'environ 23 % au point 14.

Tableau 5-4 : Percentiles des MES au point 14

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde	MES (g/l) provenance estuaire	% du percentile MES provenance
	PT14	PT14	PT14
25	0.000	0.002	18.2
50	0.001	0.005	22.9
75	0.004	0.020	16.1
99	0.014	0.139	9.0

5.3.5. Entrée de la baie de Bourgneuf (points 11, 12, 13)

Dans l'entrée de la baie de Bourgneuf, les concentrations provenant des immersions sont liées temporellement aux périodes de clapage. Les concentrations en jeu sont du même ordre de grandeur voire inférieures à celles qui proviennent de la dynamique estuarienne lorsque la Loire est en crue.

scénario de référence

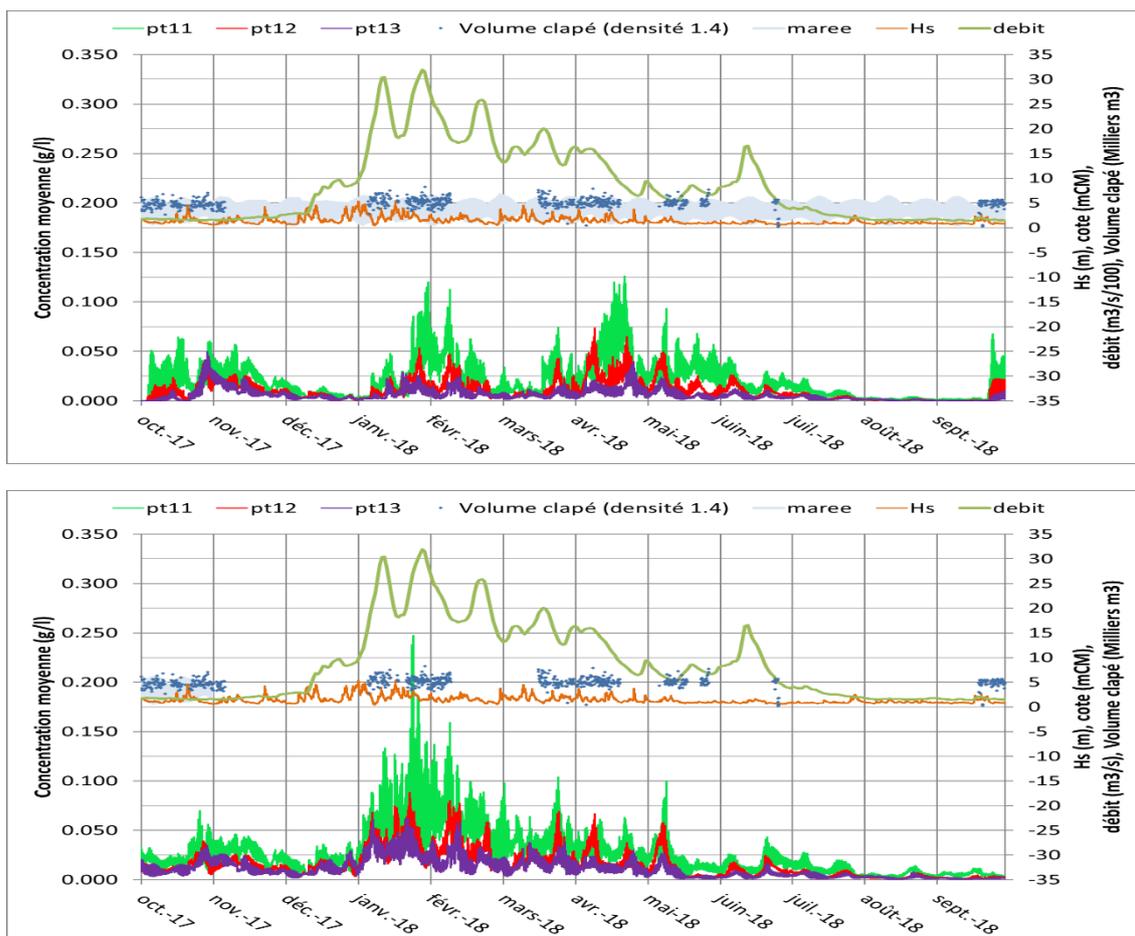


Figure 5-9 : Concentration moyenne au point 11, au point 12 et au point 13. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES de 45% à 36% du point 11 au point 13.

Tableau 5-5 : Percentiles des MES aux points 11, 12 et 13

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde			MES (g/l) provenance estuaire			% du percentile MES provenance Lambarde		
	PT11	PT12	PT13	PT11	PT12	PT13	PT11	PT12	PT13
25	0.006	0.003	0.002	0.010	0.004	0.003	37.1	41.9	39.2
50	0.016	0.008	0.004	0.020	0.011	0.008	44.8	40.0	35.9
75	0.030	0.015	0.008	0.034	0.020	0.015	46.9	43.3	34.2
99	0.085	0.044	0.028	0.109	0.063	0.042	43.9	41.4	40.0

5.4. DISPERSION : PROFILS TEMPORELS DE CONCENTRATION MOYENNE DANS L'ESTUAIRE (SECTIONS MARITIME, INTERMEDIAIRE ET ENDIGUEE)

Sept nouveaux points d'analyse des profils temporels de concentration ont été ajoutés dans la section maritime, section intermédiaire et section endiguée de l'estuaire.

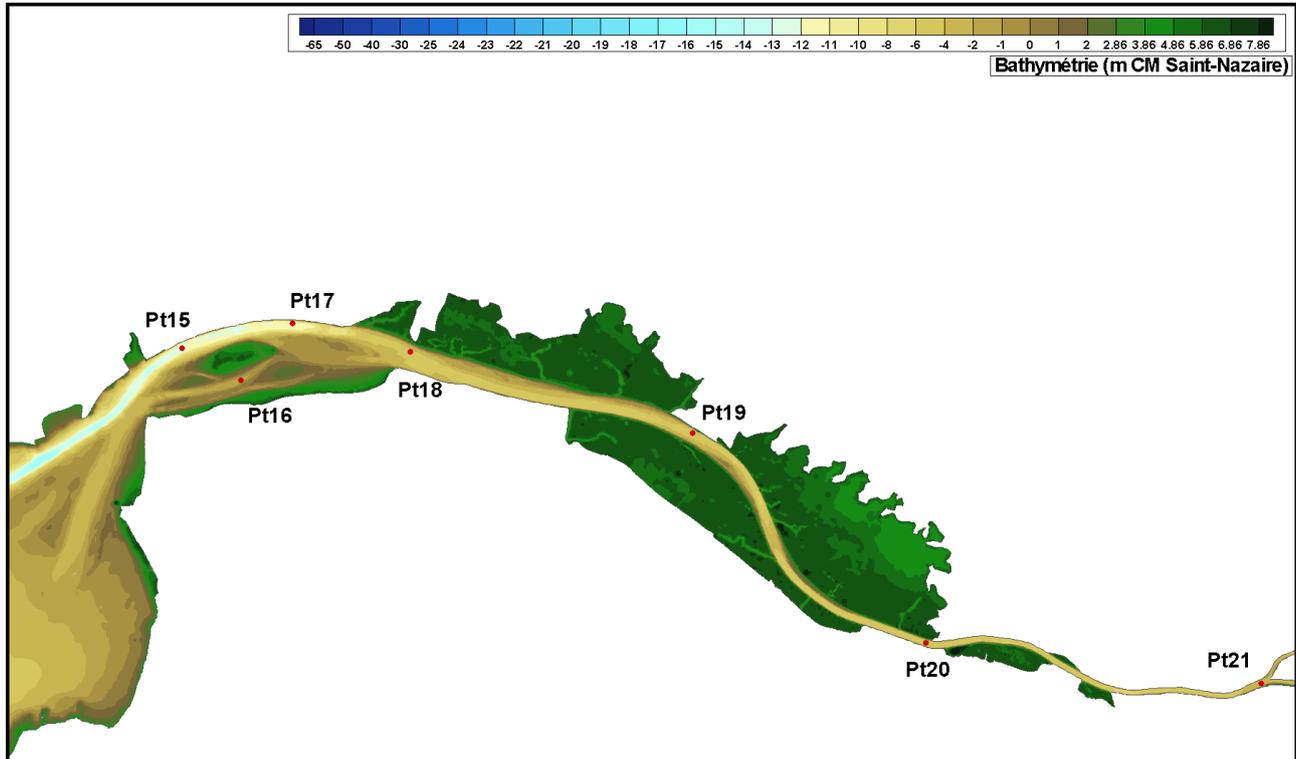


Figure 5-10 : Position des points de contrôle de la MES dans l'estuaire

5.4.1. Section maritime (point 15, 16 et 17)

Dans la section maritime, les MES provenant de la Lambarde suivent la dynamique estuarienne naturelle et ne sont plus du tout liées aux périodes de clapages. Ces concentrations ont tendance à augmenter au fur et à mesure du temps les neufs premiers mois, puisque le pompage tidal permet d'importer des MES disponibles en estuaire externe et qu'en même temps il y a des apports par clapages. Les mois suivants il est noté une diminution des MES, due cette fois à un déplacement du bouchon vaseux vers l'amont. Les concentrations simulées sont inférieures à celles des MES provenant naturellement de l'estuaire. Il faut préciser ici qu'il ne s'agit pas d'un surplus de concentration : sans sédiment n°2 clapé sur la Lambarde, l'estuaire (de par sa capacité de transport et du fait de ressources en sédiment disponibles) se serait chargé de manière équivalente à la somme des concentrations des deux sédiments modélisés.

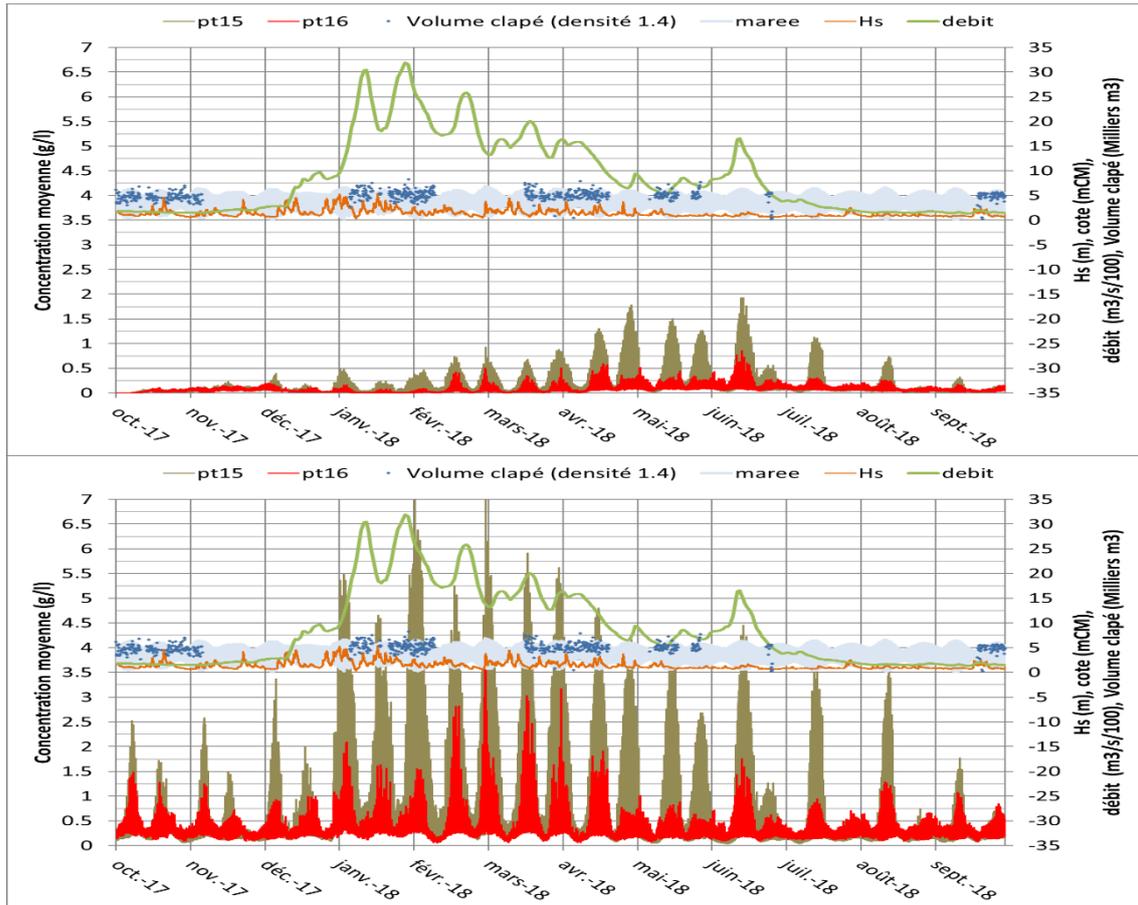


Figure 5-11 : Concentrations moyennes au point 15 et au point 16. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

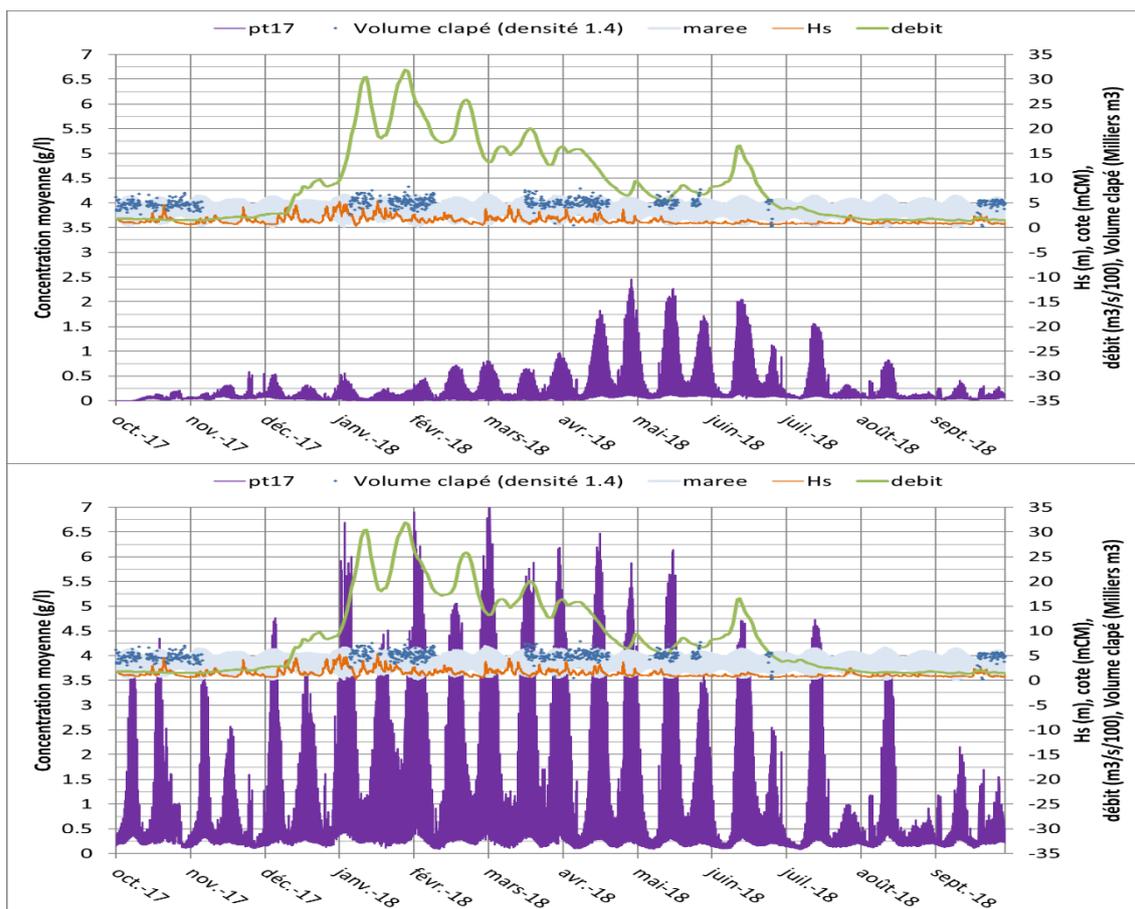


Figure 5-12 : Concentrations moyennes au point 17. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES de 20% à 18% du point 15 au point 17.

Tableau 5-6 : Percentiles des MES aux points 15, 16 et 17

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde			MES (g/l) provenance estuaire			% du percentile MES provenance Lambarde		
	PT15	PT16	PT17	PT15	PT16	PT17	PT15	PT16	PT17
25	0.036	0.030	0.045	0.156	0.200	0.221	18.6	13.0	16.8
50	0.060	0.060	0.076	0.236	0.270	0.347	20.2	18.1	17.9
75	0.107	0.095	0.144	0.480	0.376	0.758	18.2	20.2	16.0
99	1.109	0.260	1.411	4.168	1.034	4.632	21.0	20.1	23.4

5.4.2. Section intermédiaire (point 18 et 19)

Comme précédemment, sur la section intermédiaire, représentée par Paimboeuf (point 18) et Cordemais (point 19), les concentrations simulées les plus fortes en sédiment provenant de la Lambarde se situent à la période où les débits permettent d'avoir le bouchon vaseux au droit de ces positions géographiques. Les concentrations sont inférieures à celles des MES provenant naturellement de l'estuaire. Il faut préciser ici aussi qu'il ne s'agit pas d'un surplus de concentration : sans sédiment n°2 clapé sur la Lambarde, l'estuaire (de par sa capacité énergétique de transport et du fait de ressources en sédiment disponibles) se serait chargé de manière équivalente à la somme des concentrations des deux sédiments modélisés.

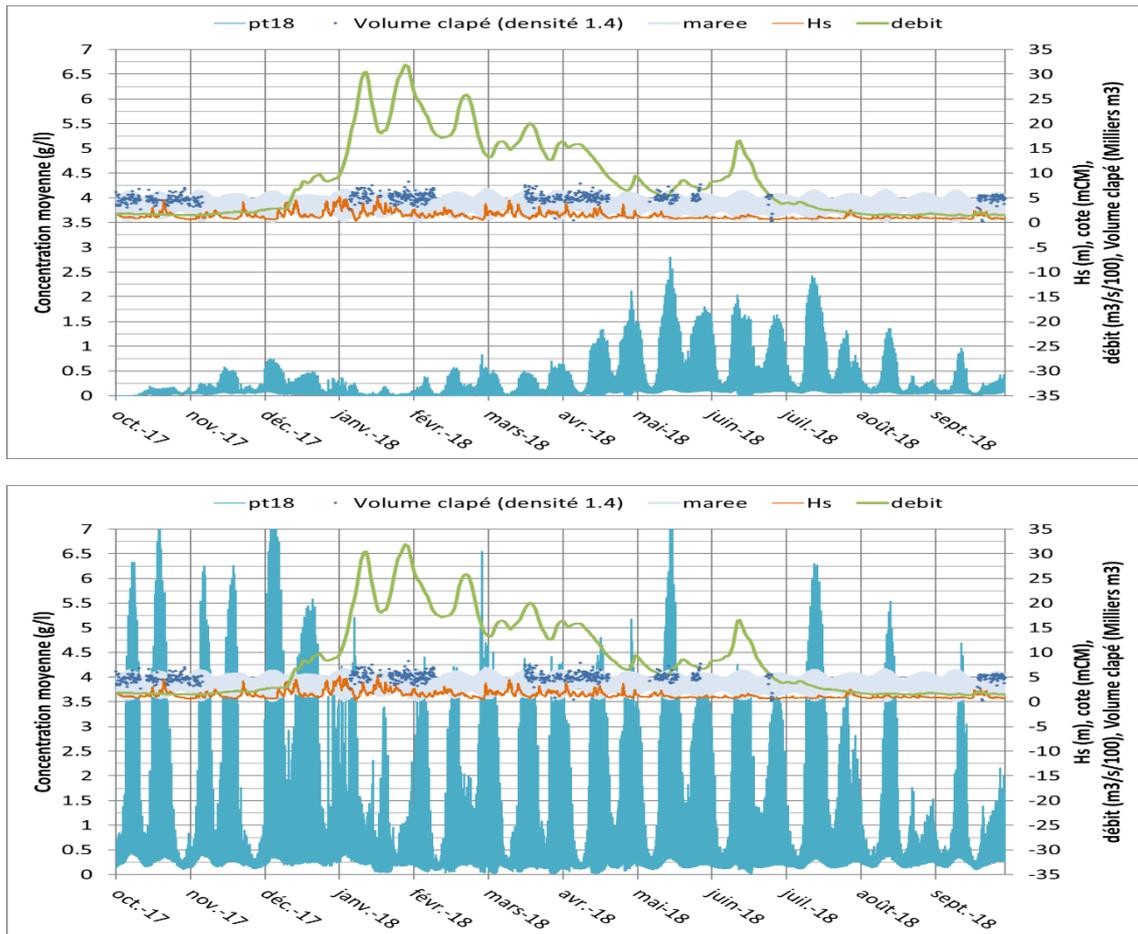


Figure 5-13 : Concentrations moyennes au point 18. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

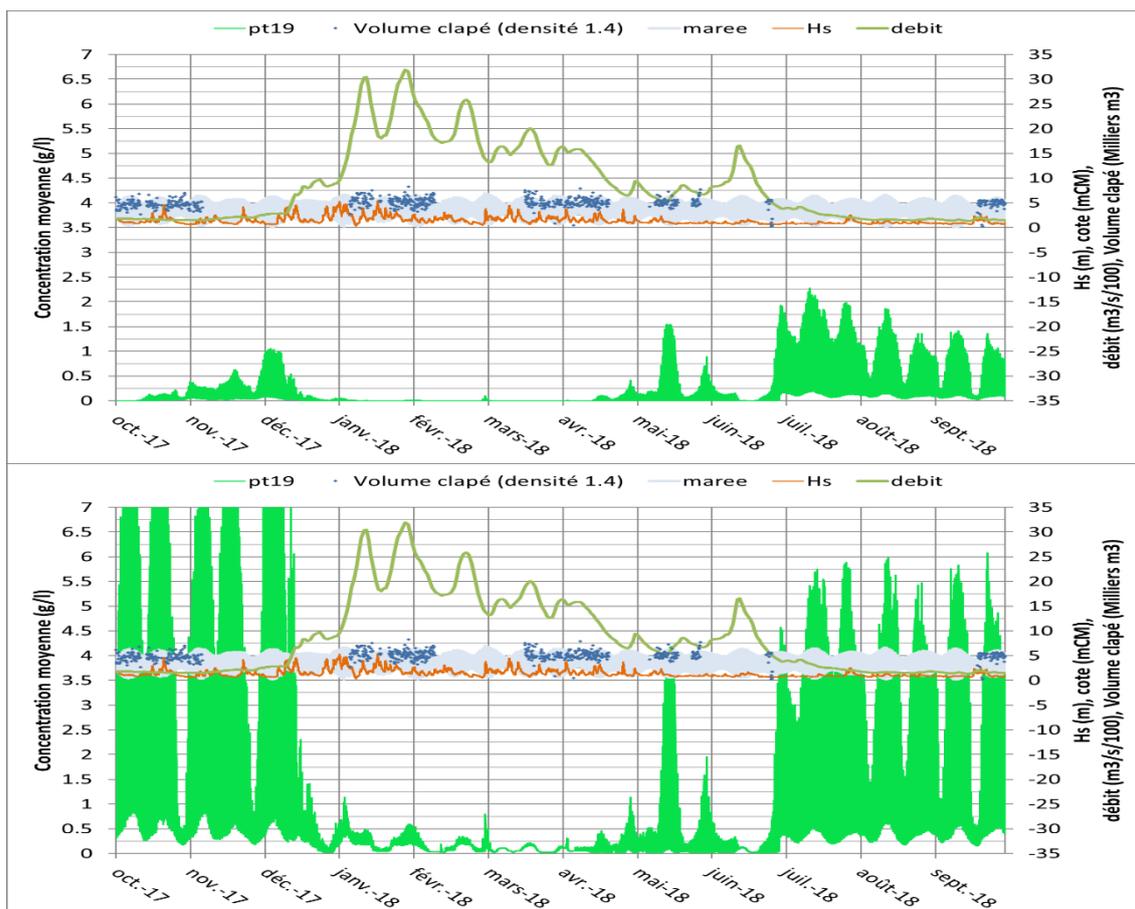


Figure 5-14 : Concentrations moyennes au point 19. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES de 16,5% à Paimboeuf et 9% à Cordemais.

Tableau 5-7 : Percentiles des MES aux points 18 et 19

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde			MES (g/l) provenance estuaire			% du percentile MES provenance Lambarde		
	PT18	PT19		PT18	PT19		PT18	PT19	
25	0.034	0.000		0.226	0.096		13.2	0.1	
50	0.075	0.030		0.376	0.319		16.5	8.6	
75	0.160	0.158		0.812	1.091		16.4	12.6	
99	1.487	1.565		4.769	8.097		23.8	16.2	

5.4.3. Section endiguée (point 20 et 21)

Comme pour les deux sections précédentes, sur la section endiguée, représentée par Le Pellerin (point 20) et Trentemoult (point 21), les concentrations simulées les plus fortes en sédiment provenant de la Lambarde se situent à la période où les débits permettent d'avoir le bouchon vaseux au droit de ces positions géographiques, donc en période estivale. Les concentrations sont inférieures à celles des MES provenant naturellement de l'estuaire. Il faut préciser ici aussi qu'il ne s'agit pas d'un surplus de concentration : sans sédiment n°2 clapé sur la Lambarde, l'estuaire (de par sa capacité énergétique de transport et du fait de ressources en sédiment disponibles) se serait chargé de manière équivalente à la somme des concentrations des deux sédiments modélisés.

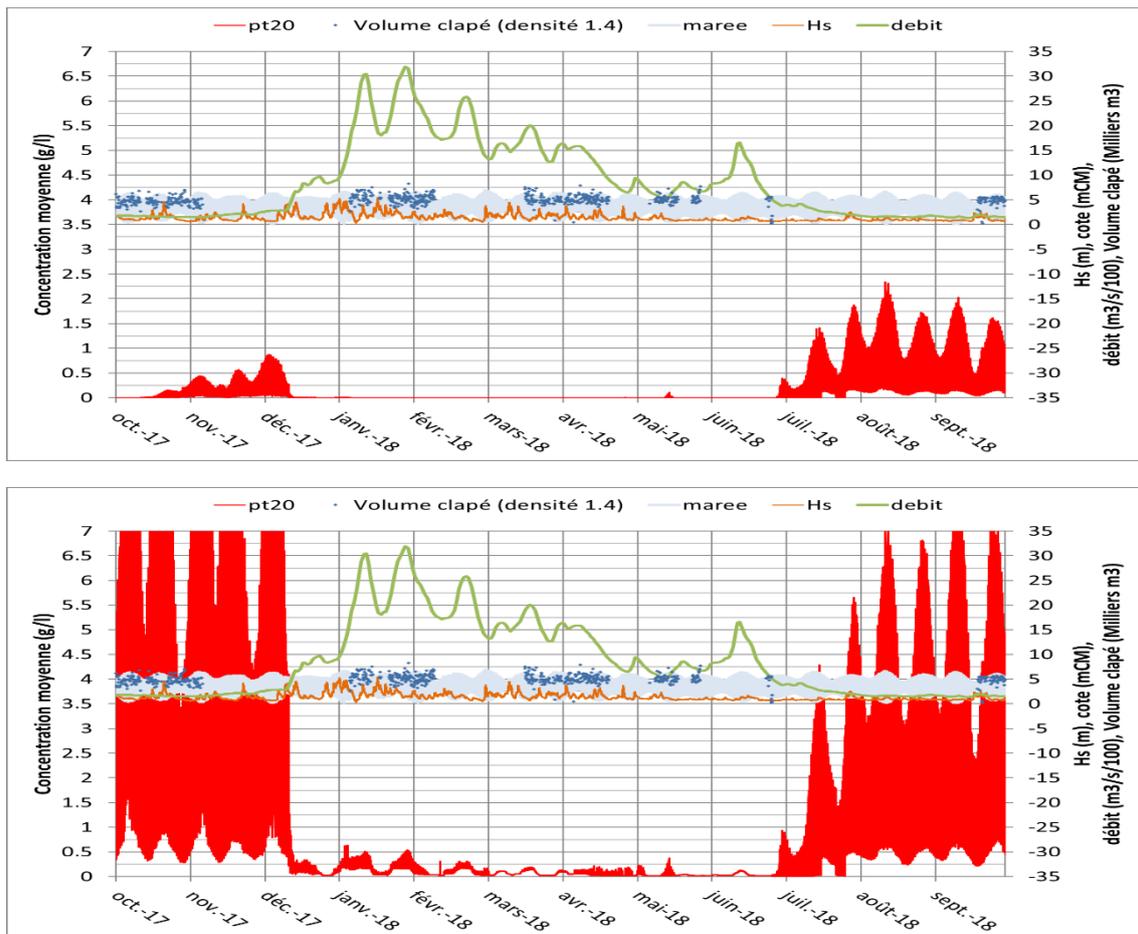


Figure 5-15 : Concentrations moyennes au point 20. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

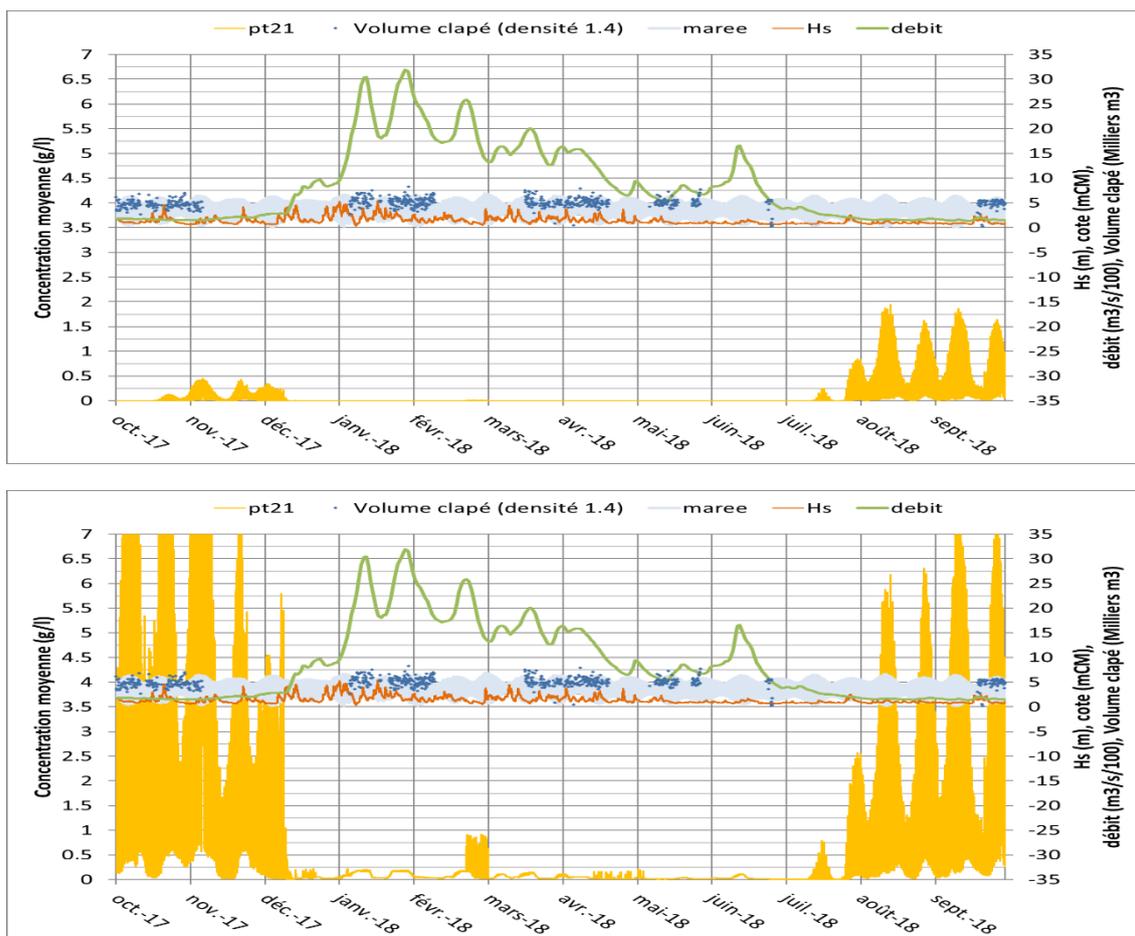


Figure 5-16 : Concentrations moyennes au point 21. En haut : MES provenant de la Lambarde. En bas : MES provenant de l'estuaire

Le tableau des percentiles indique pour le percentile 50 (valeur qui n'est pas dépassée 50% du temps), une contribution des immersions à la Lambarde à la concentration globale en MES de 0,2% à Le Pellerin et 0% à Trentemoult.

Tableau 5-8 : Percentiles des MES aux points 20 et 21

percentile	MES (g/l) provenance Lambarde			MES (g/l) provenance estuaire			% du percentile MES provenance Lambarde		
	PT20	PT21		PT20	PT21		PT20	PT21	
25	0.000	0.000		0.038	0.025		0.0	0.0	
50	0.000	0.000		0.195	0.088		0.2	0.0	
75	0.194	0.050		2.499	0.775		7.2	6.1	
99	1.660	1.386		9.615	9.162		14.7	13.1	

5.5. CARTOGRAPHIE DE LA DISPERSION DES SEDIMENTS PROVENANT DE LA LAMBARDE

Les Figure 5-17, Figure 5-18, Figure 5-19 et Figure 5-20 fournissent les cartes de percentile (concentration en MES qui n'est pas dépassée un certain pourcentage du temps) : 25, 50, 75 et 99 sur une année et en chaque point. Il ne s'agit donc en aucun cas d'une vue d'un panache réel à un instant donné. Sont présentés à chaque fois la carte pour le sédiment provenant de la Lambarde (en haut) et la carte pour le sédiment provenant de l'estuaire (au milieu). En bas a été ajouté le pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile de la MES totale (borné à une valeur de 5mg/l pour les MES provenant de la Lambarde)

Les concentrations maximales peuvent être associées au percentile 99 de la Figure 5-20. Elles sont souvent reliées à des remises en suspension dues à des événements hydro-météorologiques.

Pour le percentile 25 (les concentrations de MES qui ne sont pas dépassées 25% du temps ou les concentrations de MES qui sont dépassées 75% du temps), la localisation des MES issues des sédiments de la Lambarde qui sont couramment dépassées pour de faibles valeurs (< à 40mg/l) se situe dans la zone aval de l'estuaire, là où les sédiments ont tendance à se concentrer et à osciller avec la dynamique estuarienne. Ce n'est pas sur le site de clapage comme on pourrait l'imaginer, car les clapages ne sont que temporaires. Pour le même critère, la dynamique estuarienne donne une emprise bien plus grande en amont et aval, avec des valeurs aussi beaucoup plus importantes de l'ordre de plusieurs centaines de grammes par litre. La dynamique estuarienne est toujours prépondérante dans ce cas-là. Le ratio de concentration des percentiles est toujours inférieur à 50%, même dans l'estuaire externe.

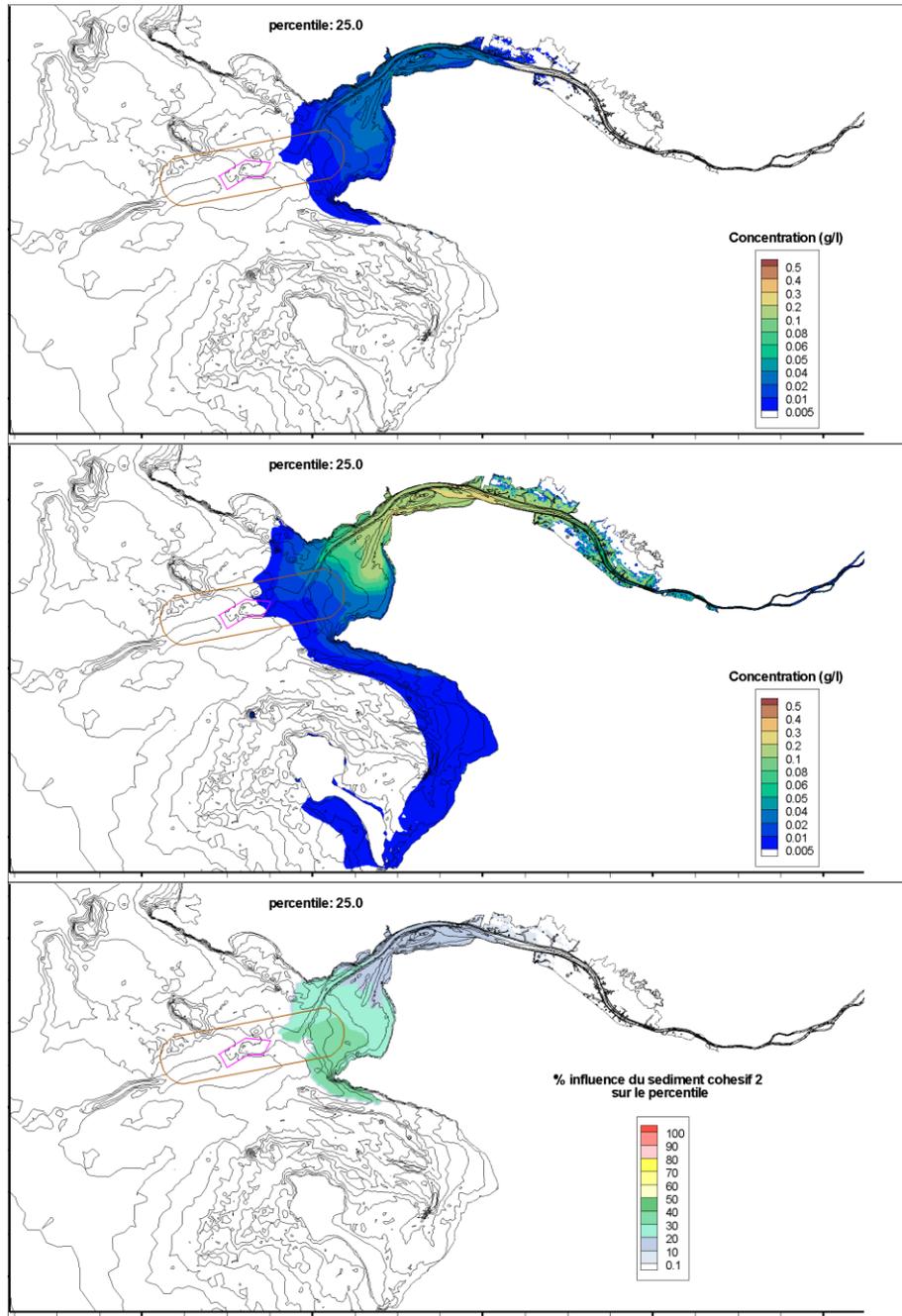


Figure 5-17 : Percentile 25 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 25 des MES

Pour le percentile 50 (les concentrations de MES qui ne sont pas dépassées la moitié du temps ou les concentrations de MES qui sont dépassées la moitié du temps), le même type d'analyse que précédemment peut être effectué avec une extension de la zone pour les faibles concentrations vers la baie de Bourgneuf et le site de la Lambarde. La dynamique estuarienne reste toujours prépondérante. L'influence des sédiments provenant de la Lambarde est en proportion plus importante en estuaire externe et en baie de Bourgneuf, même si cela ne concerne pas des valeurs importantes de concentrations.

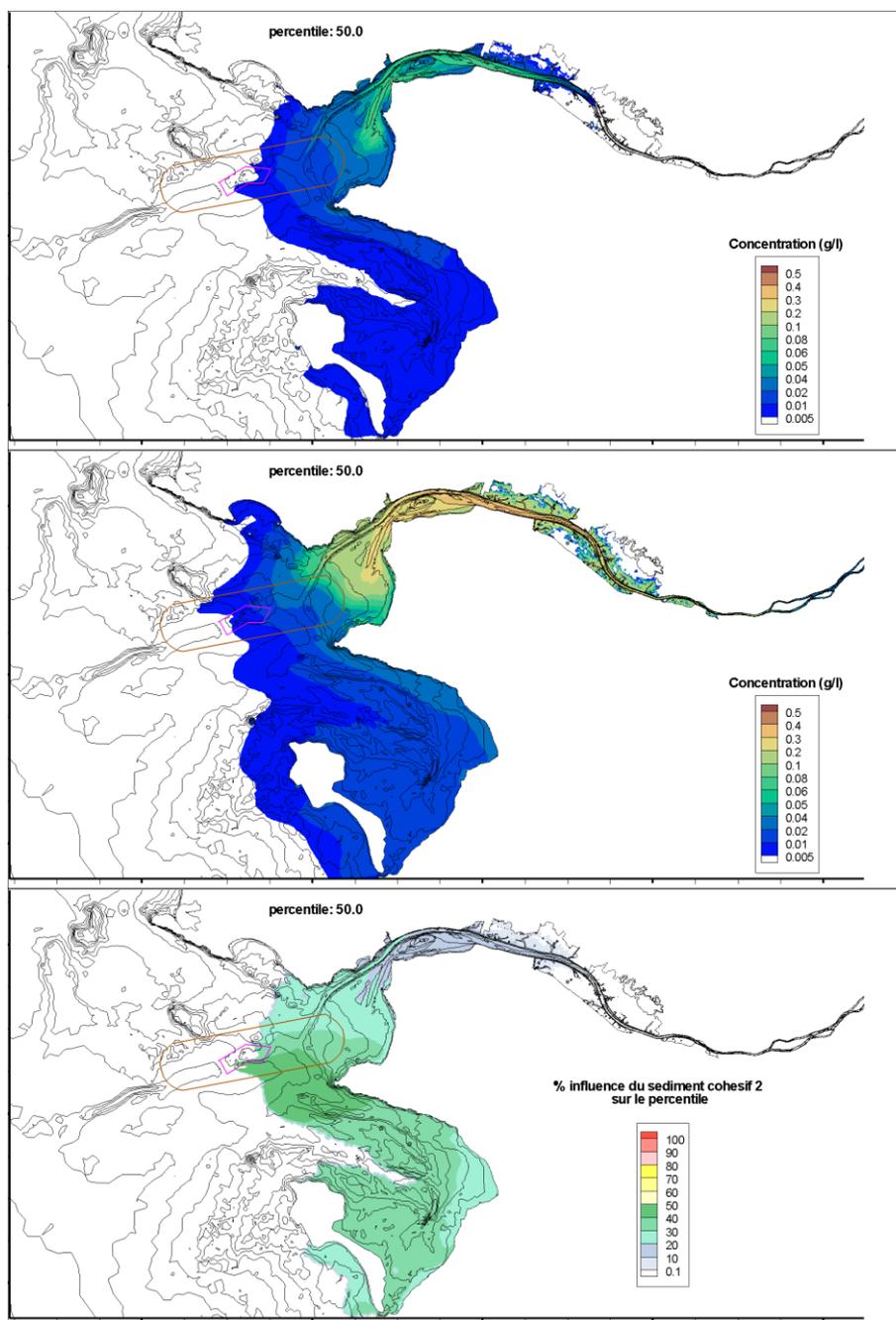


Figure 5-18 : Percentile 50 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 50 des MES

Pour le percentile 75 (les concentrations de MES qui ne sont pas dépassées 75% du temps ou les concentrations de MES qui sont dépassées 25% du temps), il s'agit donc de MES moins couramment observées et qui correspondent à des valeurs hautes dans les séries temporelles. Il est possible de commencer à observer la zone directe impactée par les panaches lors des clapages. Les directions préférentielles des sédiments issus de la Lambarde sont partagées entre un retour vers l'estuaire externe et la baie de Bourgneuf avec une forte prépondérance pour le retour vers l'estuaire externe.

La dynamique estuarienne reste toujours prépondérante sur l'ensemble de la carte sauf localement à proximité de la zone de clapage où la proportion des MES du percentile 75 provenant de la Lambarde peut devenir supérieure à 50%.

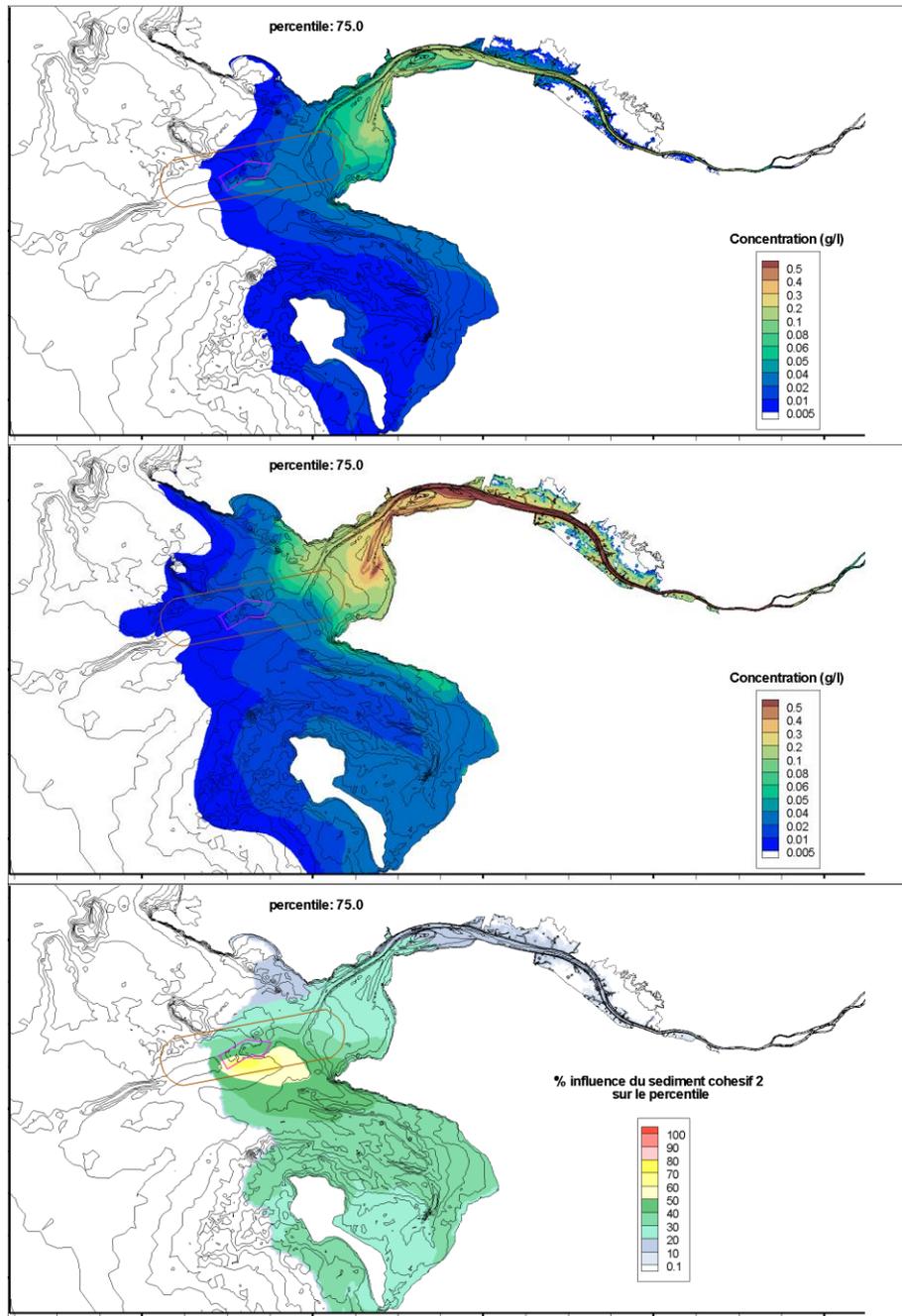


Figure 5-19 : Percentile 75 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 75 des MES

Pour le percentile 99 (les concentrations de MES qui ne sont pas dépassées 99% du temps ou les concentrations de MES qui sont dépassées 1% du temps), il s'agit donc de MES qui correspondent quasiment aux maxima observés sur les séries temporelles. Les concentrations des MES provenant de la Lambarde retrouvées en estuaire interne peuvent sembler importantes, cependant elles ne participent qu'à moins de 20% et localement 30% du percentile total, ce qui est en adéquation avec l'analyse effectuée sur les flux précédemment.

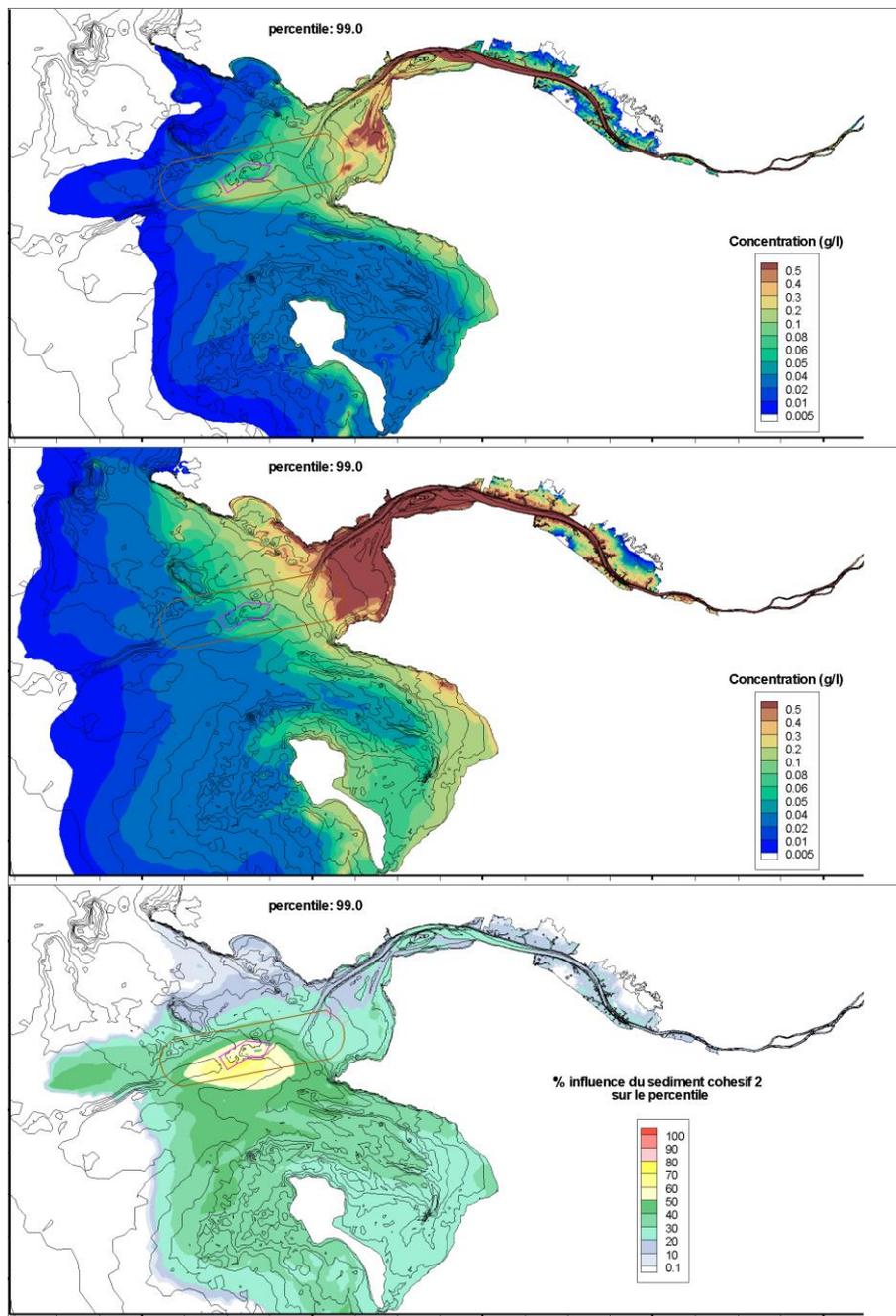


Figure 5-20 : Percentile 99 des MES en chaque point (en haut : sédiment provenant de la Lambarde ; au milieu : sédiment provenant de l'estuaire) et en bas : pourcentage d'influence des sédiments provenant de la Lambarde sur le percentile 99 des MES

Le même type d'analyse est proposé (Figure 5-21) sur la masse de sédiment au sol qui est déposée au cours du calcul pour chaque nœud. La notion de masse par m² étant une notion un peu abstraite, elle a été retranscrite en épaisseur de sédiment avec une hypothèse de concentration de 300g/l ce qui correspond à un sédiment après consolidation. Le percentile 99 est présenté et correspond plutôt au dépôt maximal (pas forcément pérenne) observé en chaque point du modèle au cours de la période simulée. Une partie des sédiments stabilisés restent sur le site de la Lambarde et une partie dans la fosse plus profonde qui jouxte la zone de la Lambarde. Les sédiments qui ont pu être exportés jusque dans les estuaire externe et interne se retrouvent majoritairement dans le chenal de navigation et dans le chenal de Mindin.

Seulement 3% des sédiments provenant de la Lambarde sont redragués par la DAM (principalement sections 5 et 6 des zones de dragages) alors que la carte du percentile 99 montre des dépôts. Ce constat s'explique par le fait que la majorité des sédiments provenant de la Lambarde sont remontés dans l'estuaire après les importantes campagnes de dragage d'hiver. Ces sédiments seront alors principalement dragués sur les campagnes suivantes, donc à plus long terme. De plus, dans les premiers temps, ces sédiments ne se trouvent pas dans les couches consolidées qui sont draguées.

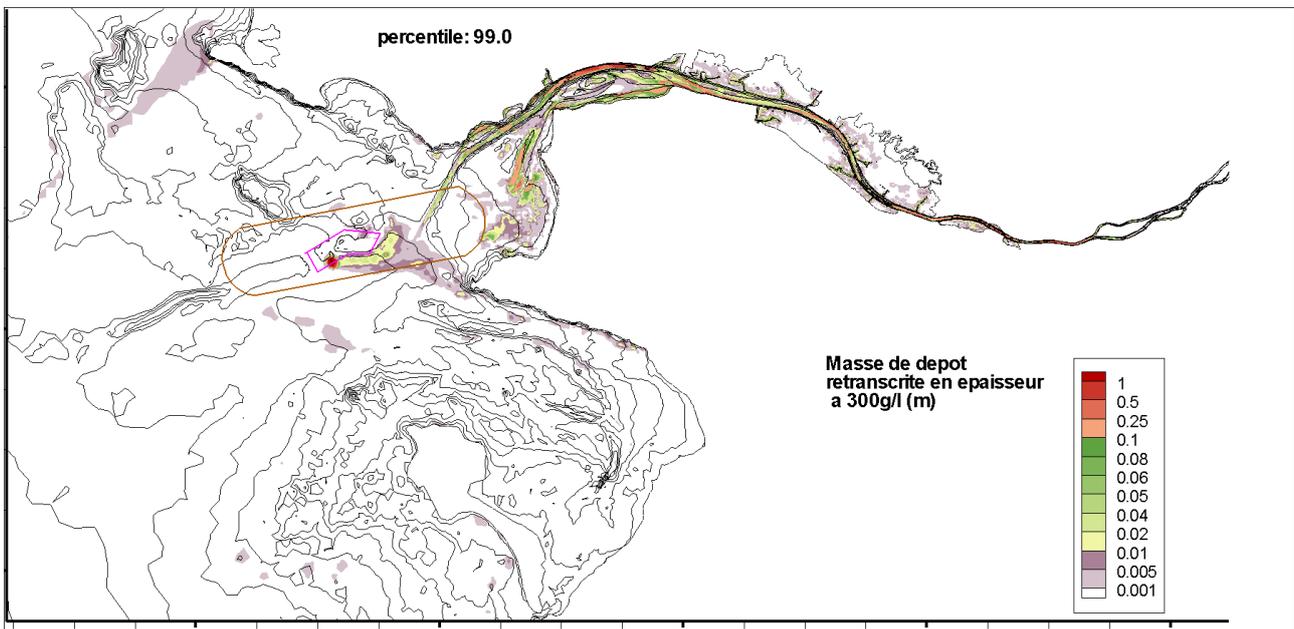


Figure 5-21 : Percentile 99 des masses de sédiment provenant de la Lambarde retranscrite en épaisseur de dépôt

5.6. BILAN DE MASSE POUR LES SEDIMENTS PROVENANT DE LA LAMBARDE

5.6.1. Bilan de masse annuel

Un bilan de masse a été effectué à partir du sédiment qui a été immergé à La Lambarde sur cette année hydrologique 2017-2018, en suivant la masse totale (en suspension et dans le sol) au cours du temps et pour 17 zones de cubatures (Z1 à Z12 et Zlarge, avec Z4 sous-divisée en 4 sous-zones 4a, 4b, 4c et 4d) présentées sur la figure suivante.

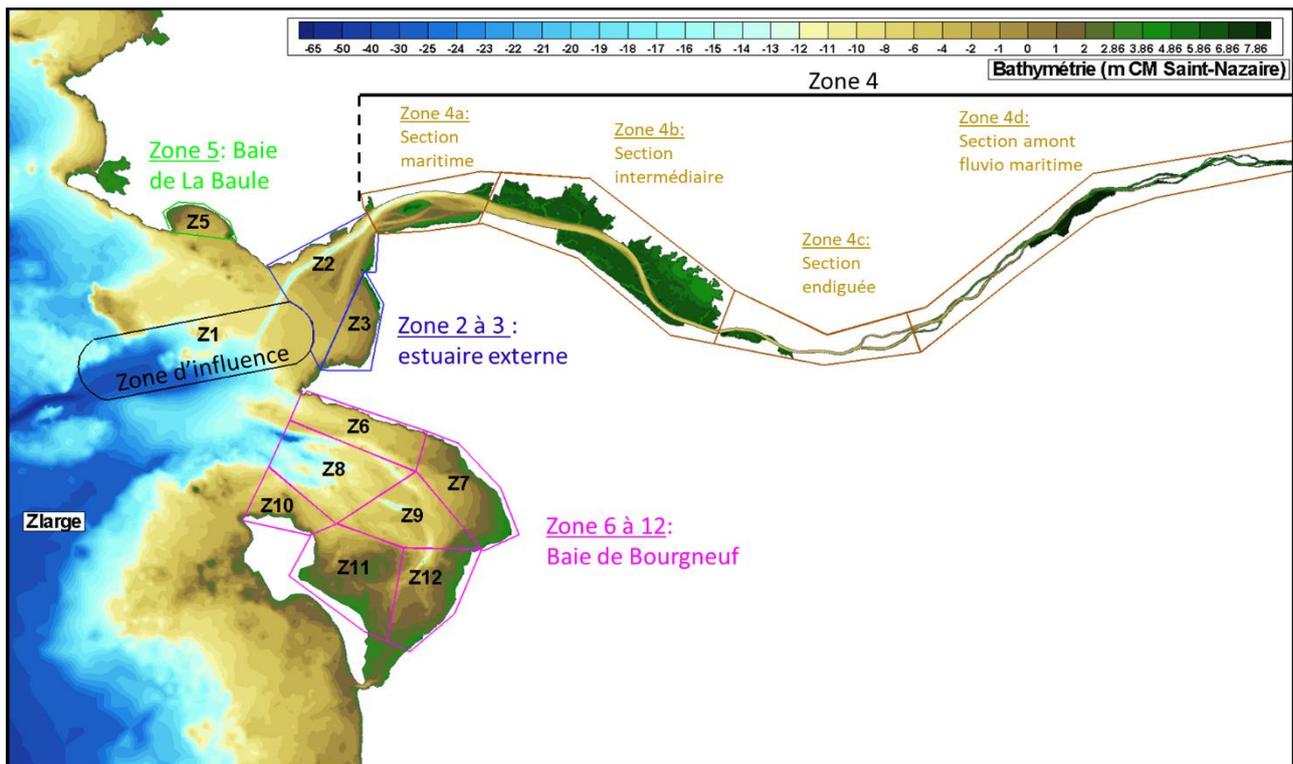


Figure 5-22 : Emprise des zones de cubature

Le bilan en fin de simulation est reporté sur le tableau ci-dessous.

Il est à noter que ce bilan n'est représentatif que de la période hydrologique (caractérisée par des vents, houles et débits) 2017-2018 avec une temporalité des clapages issus de la même période et une sous-zone 27 sur le site de la Lambarde quasi-remplie, chacun de ces paramètres exerçant une influence sur ce bilan. Ces conditions ont été retenues pour maximiser la dispersion sur le site de la Lambarde.

Cette combinaison de paramètres donne des conditions de site très dispersives au regard des résultats obtenus en moyenne entre 2021 et 2034 sur le modèle de stabilité [3] : 27% de stabilité en volume (contre 19,2% dans ce calcul, cf. chapitre 5.2) soit environ un tiers en moins de stabilité par rapport à la stabilité moyenne sur les 10 ans prospectifs simulés.

Il faut aussi signaler que la date finale prise pour effectuer le bilan de masse a une importance, notamment pour les sédiments se situant à l'intérieur de l'estuaire. En effet, ceux-ci ne font que suivre la dynamique estuarienne naturelle, et ils se retrouvent en grande partie au niveau de la position du bouchon vaseux et de la crème de vase qui sont fortement reliés au débit de la Loire. Un bilan de masse effectué d'hiver à hiver n'aura donc pas le même résultat qu'un bilan de masse effectué d'été à été pour l'intérieur de l'estuaire. Dans notre cas, les faibles débits de début et fin de simulation favorisent une répartition vers l'amont des sédiments de l'estuaire.

scénario de référence

Tableau 5-9 : Récapitulatif du bilan de masse de sédiment dans le sol et en suspension

Scénario de référence 2032-2033	Mtonnes de vase	% par rapport à la masse de vase clapée
Clapé à la Lambarde	1.956 Mt	
Sortie par la frontière maritime	0.104 Mt	5%
Lambarde et zone d'influence (zone 1)	0.337 Mt	17%
Restant au large (hors zones)	0.469 Mt	24%
Estuaire externe (Zones 2 et 3)	0.291 Mt	15%
Estuaire Section maritime (Zone 4a)	0.275 Mt	14%
Redragué (DAM)	0.054 Mt	3%
Estuaire section intermédiaire (Zone 4b)	0.191 Mt	10%
Estuaire section endiguée (Zone 4c)	0.219 Mt	11%
Estuaire section amont fluvio-maritime (Zone 4d)	0.007 Mt	<1%
Baie de Bourgneuf (Zones 6 à 12)	0.008 Mt	<1%
Baie de la Baule (Zone 5)	négligeable	négligeable

Une représentation graphique de ces résultats est reportée sur la Figure 5-23 ci-dessous.

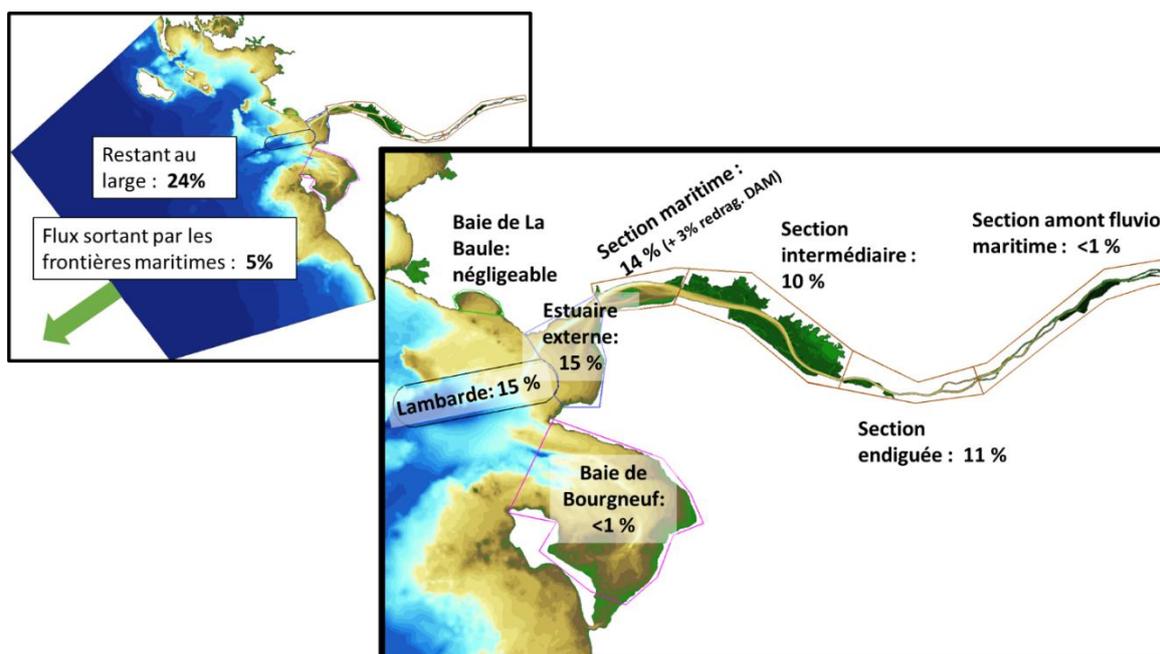


Figure 5-23 : Bilan de masse à l'horizon 2032-2033 sur l'année hydrologique 2017-2018

scénario de référence

5.6.2. Evolution du bilan de masse au cours de l'année simulée

Les courbes temporelles des cubatures sont présentées pour les secteurs principaux externes à l'estuaire (Figure 5-24). Il est à noter principalement :

- une évolution de la zone 1 (Lambarde et zone d'influence) en cohérence avec les périodes de clapages pour les dépôts et les périodes d'agitation pour les érosions ;
- un rechargement assez important de l'estuaire externe en période post-crue, de sédiment provenant de l'estuaire externe et donc de sédiment provenant aussi de la Lambarde ;
- une évolution des sédiments provenant de la Lambarde dans la baie de Bourgneuf (zone 6 à 12) synchronisée avec les périodes de clapage, mais qui ne se stabilise pas en dépôt pérenne ;
- une sortie des sédiments par les frontières du large concentrée sur les périodes de crue et de tempêtes.

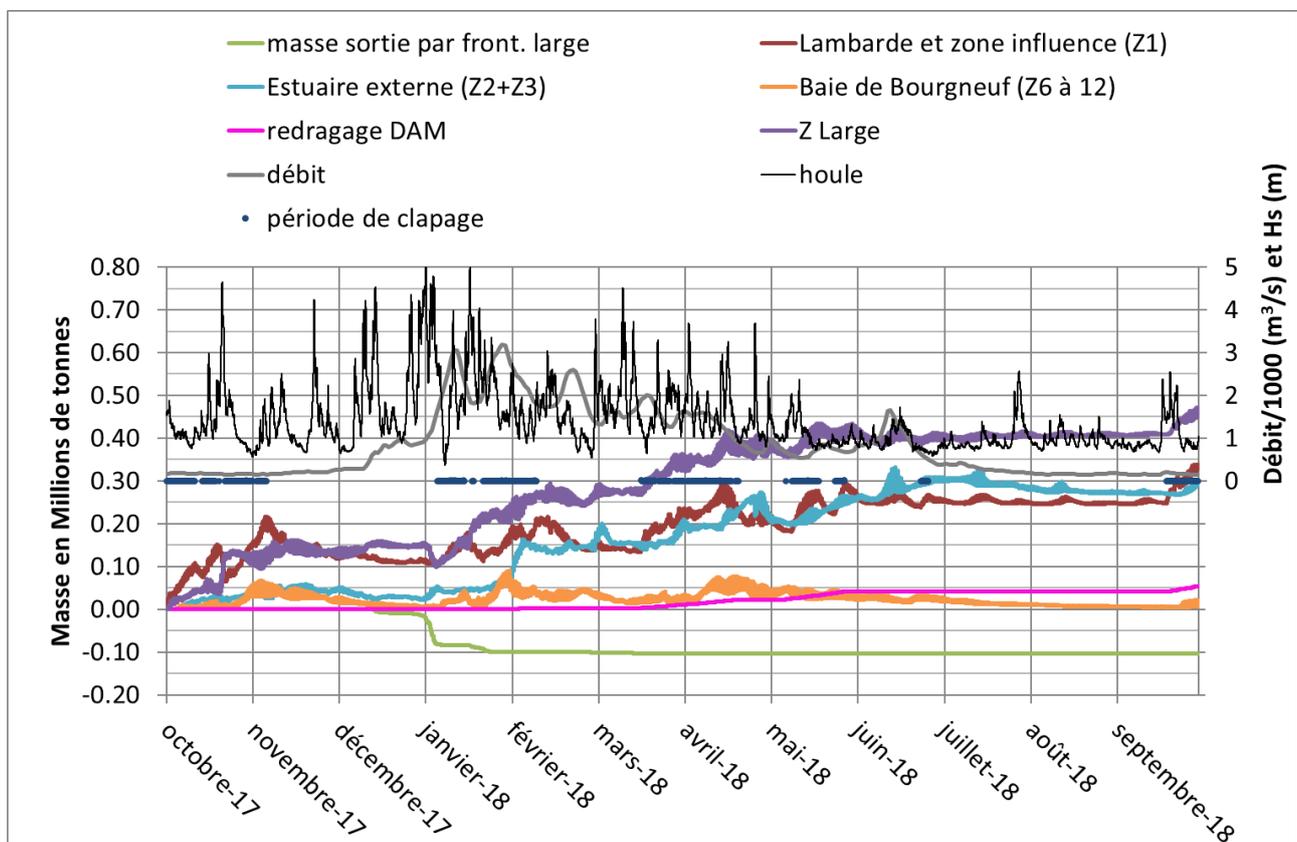


Figure 5-24 : Répartition des masses au cours du temps pour les baies et l'estuaire externe

Les courbes temporelles des cubatures sont présentées (Figure 5-25) pour les secteurs se situant dans l'estuaire. Il est à noter principalement :

- une évolution importante dans la section de l'estuaire maritime en période post-crue, qui par pompage tidal fait remonter le sédiment se trouvant en estuaire externe ;
- à partir du moment où les débits sont inférieurs à 1000 m³/s (mai 2018), la dynamique estuarienne érode naturellement la section maritime pour faire remonter le sédiment en section intermédiaire, puis en section endiguée lors des débits d'étiage.

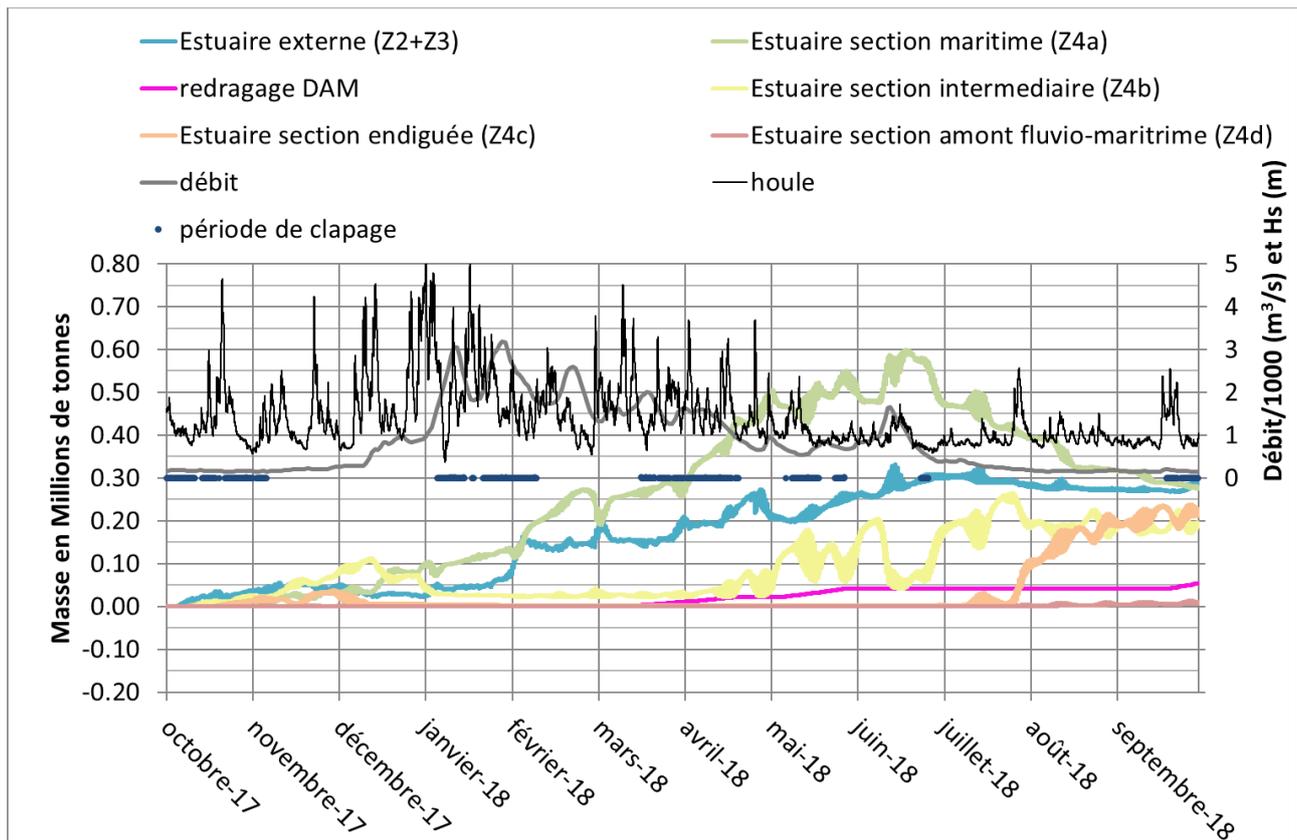


Figure 5-25 : Répartition des masses au cours du temps dans les secteurs de l'estuaire

5.6.3. Analyse de la stabilité en masse de vase sur le site de la Lambarde et sa zone d'influence

Il s'agit ici d'une stabilité en masse de vase sur la Zone 1 dite zone d'influence. Il ne faut pas confondre cette stabilité en masse avec les stabilités en volumes présentées dans les rapports du modèle de stabilité qui eux tiennent compte d'une densité de sédiment fixée à 1,4 dans les clapages et du volume de sable clapé. Sur le site même de la Lambarde une stabilité en masse de vase de 13,9% sur ce calcul correspond à une stabilité en volume de 19,2% (cf § 5.2).

Sur la zone d'influence, la stabilité en masse calculée en fin de simulation sur la période octobre 2017-2018 est de 17% (soit 0.337 Mt).

La Figure 5-26 présente l'évolution temporelle des clapages, de la masse en suspension et dans le sol de la zone 1 et de la stabilité de cette zone au cours du temps.

Durant la première campagne de clapage d'environ 1 mois, il est observé une forte stabilité due aux conditions de houle clémentes de début octobre. Dès les premières tempêtes de mi-octobre, la stabilité décroît jusqu'à environ 25% à fin décembre alors que les clapages sont stoppés depuis début novembre.

Les seconde et troisième campagnes de clapage de janvier-février et mars-avril se situent dans des périodes d'agitation assez intenses alors que la cote moyenne de la sous-zone 27 est déjà assez élevée. Sur ces périodes, la zone 1 conserve peu de masse en comparaison des quantités clapées. Le taux de stabilité continue donc à décroître, même si la zone 1 continue tout de même à stocker de la masse.

Seules les deux dernières campagnes de clapages en périodes plus calme permettent de faire remonter le taux de stabilité.

Comme vu dans les études précédentes, la stabilité du site est très dépendante de la cote de la sous-zone exploitée pour le clapage (le cas le plus défavorable est simulé ici), aux forçages de l'année (notamment en houle) et à la temporalité des clapages notamment au regard des périodes d'agitation.

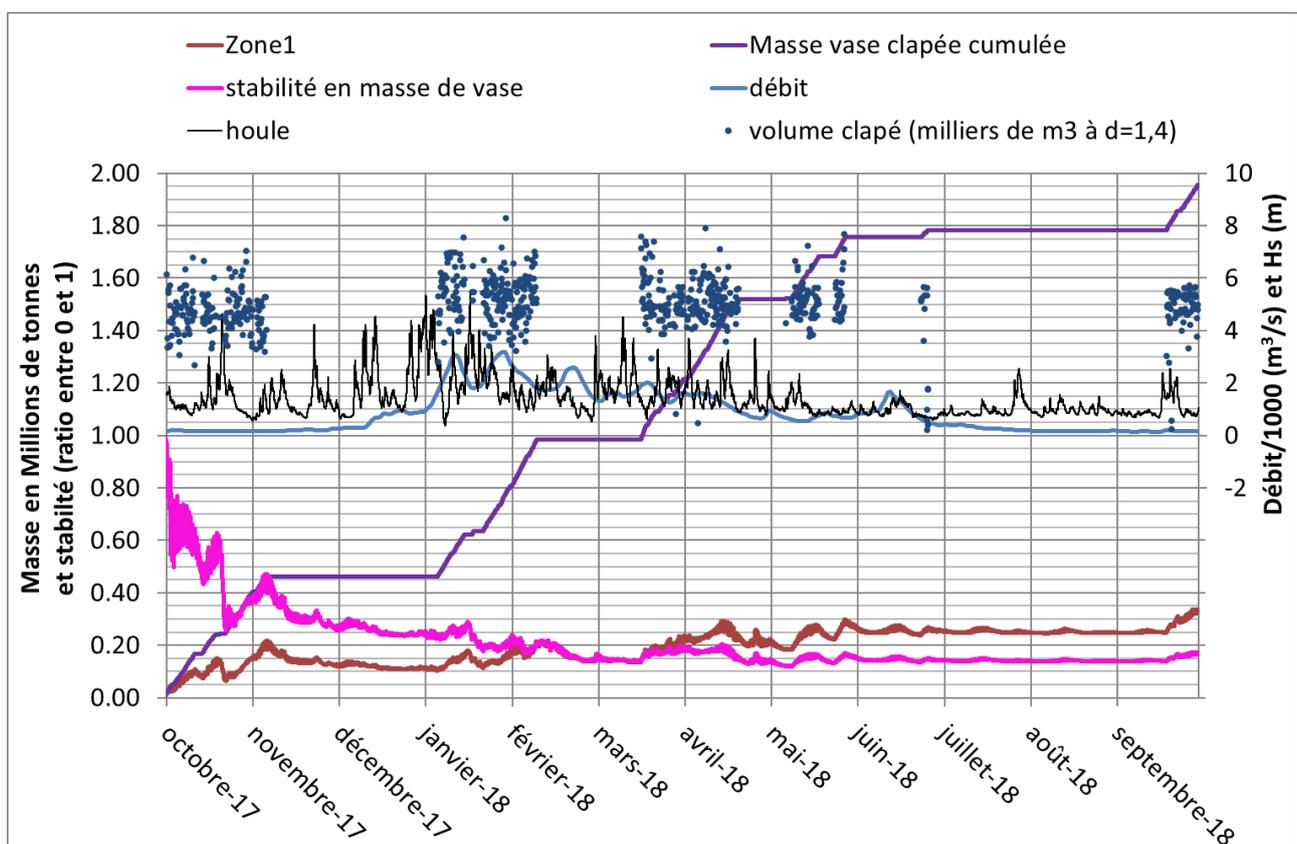


Figure 5-26 : Evolution de la masse de vase sur la zone 1, des clapages effectués et de la stabilité la zone 1 en masse de vase

5.7. ANALYSE DES FLUX DE SEDIMENTS PROVENANT DE LA LAMBARDE

Pour chaque zone il a été présenté un bilan de masse final du sédiment clapé à la Lambarde (cf § 5.6.3). Ces quantités représentent les masses (en suspension ou au sol) se trouvant dans chaque zone en fin de simulation. Cela est aisément compréhensible du fait que l'on démarre la simulation avec une quantité nulle de sédiment cohésif n°2.

Pour comparer ces quantités aux quantités déplacées par l'estuaire, il n'est pas opportun d'utiliser le même type d'analyse pour le sédiment cohésif n°1. En effet, l'estuaire va exporter énormément de sédiment vers l'aval en hiver, en faire remonter énormément au printemps pour finalement avoir un bilan net assez faible.

Pour avoir une comparaison des quantités de sédiments déplacés, il a donc été calculé la variation de cubature de chaque zone tous les ¼ d'heure (pas de temps de sortie graphique du modèle), ce qui donne un flux net de sédiment entrant ou sortant sur ce quart d'heure. Ces flux entrant ou sortant sont alors cumulés séparément (le net étant très faible comme expliqué) sur chaque zone pour chaque type de sédiment. La comparaison de ces flux pour chaque type de sédiment peut alors donner une idée du ratio de sédiment n°2 mobile entrant ou sortant dans chaque zone par rapport à la totalité des sédiments entrant ou sortant.

5.7.1. Analyse des flux de sédiments en Zone Large

La figure suivante montre que sur la Zone Large environ 28,3 Mtonnes de sédiment cohésif n°1 rentrent et sortent de la zone contre 11,6 Mtonnes pour le sédiment cohésif n°2.

Les sédiments clapés à la Lambarde participent donc à environ 29% des entrées/sorties de cette zone.

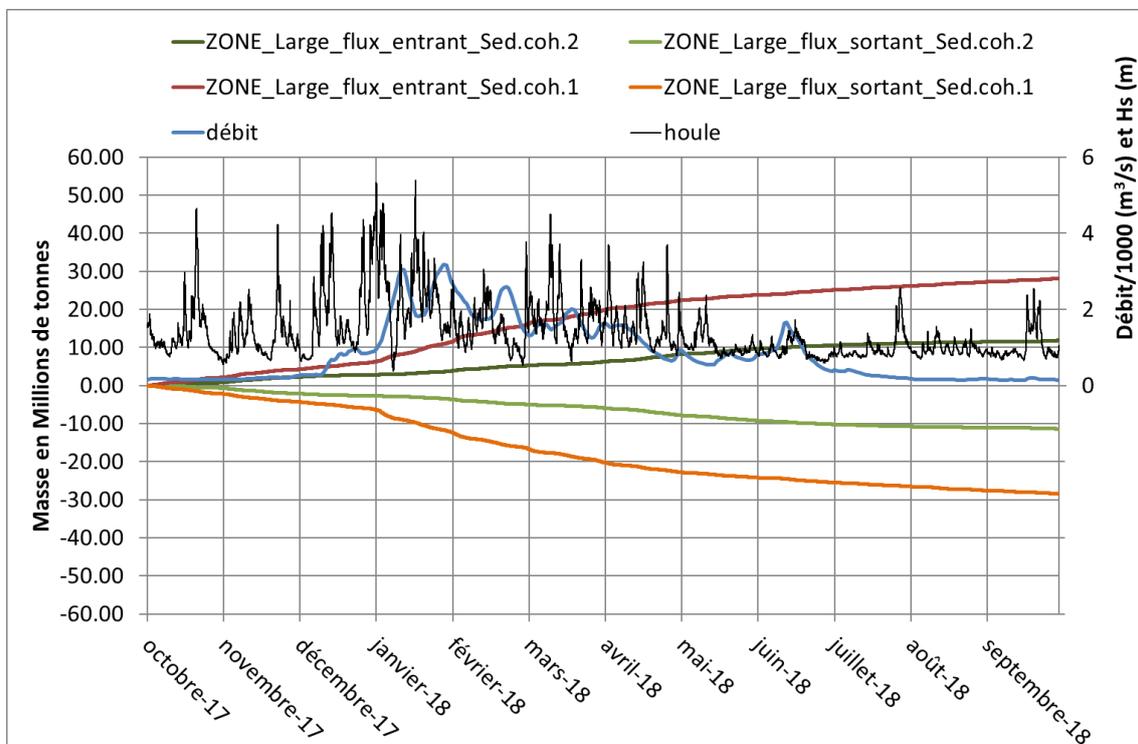


Figure 5-27 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone Large

5.7.2. Analyse des flux de sédiments en Zone 6 à 12 (baie de Bourgneuf)

La figure suivante montre que sur les zones 6 à 12 environ 12,0 Mtonnes de sédiment cohésif n°1 rentrent et sortent de la zone contre 7,5 Mtonnes pour le sédiment cohésif n°2.

Les sédiments clapés à la Lambarde participent donc à environ 38% des entrées/sorties de cette zone

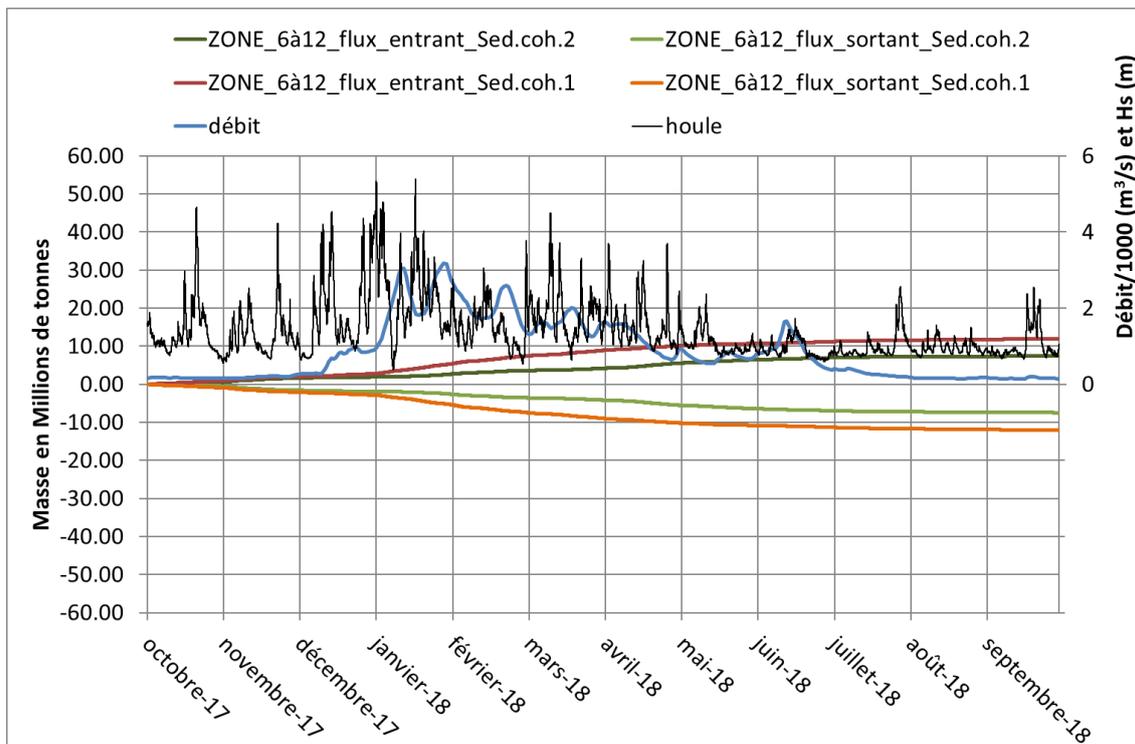


Figure 5-28 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 6 à 12

5.7.3. Analyse des flux de sédiments en Zone 3 (baie de Saint-Michel-Chef-Chef)

La figure suivante montre que sur la zone 3, environ 5,6 Mtonnes de sédiment cohésif n°1 rentrent et sortent de la zone contre 1,9 Mtonnes pour le sédiment cohésif n°2.

Les sédiments clapés à la Lambarde participent donc à environ 25% des entrées/sorties de cette zone

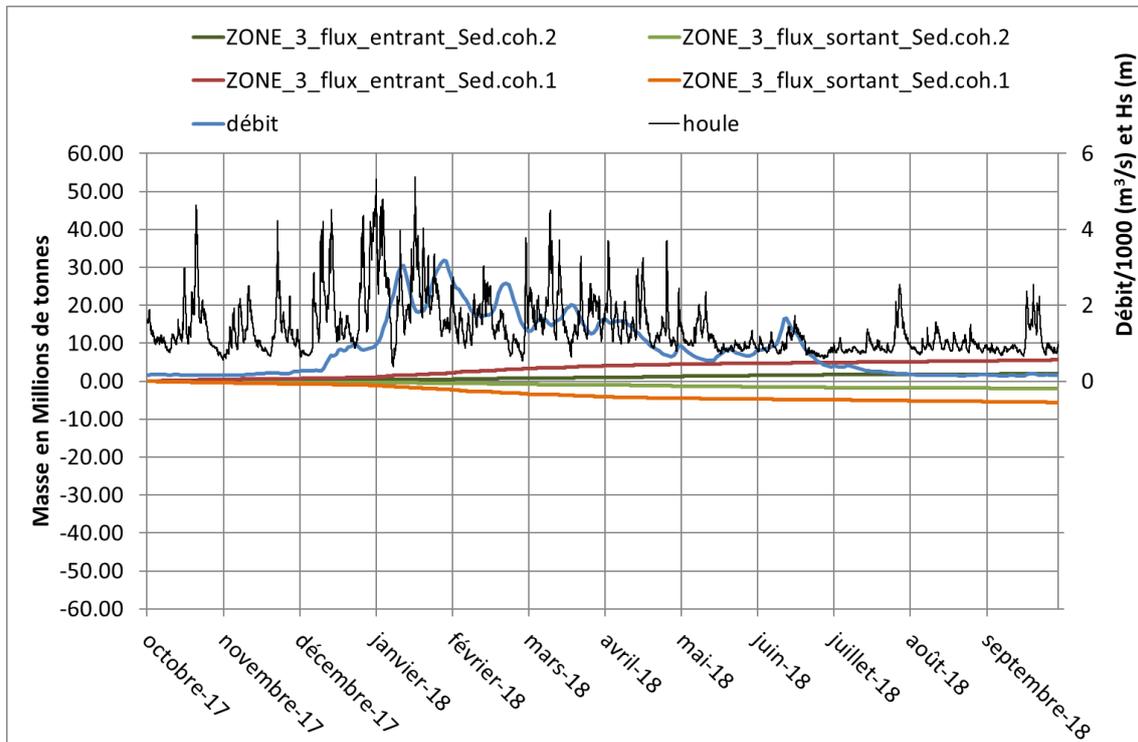


Figure 5-29 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 3

5.7.4. Analyse des flux de sédiments en Zone 2 (estuaire externe proche de l'embouchure)

La figure suivante montre que sur la Zone 2 environ 28.0 Mtonnes de sédiment cohésif n°1 rentrent et sortent de la zone contre 5,6 Mtonnes pour le sédiment cohésif n°2.

Les sédiments clapés à la Lambarde participent donc à environ 17% des entrées/sorties de cette zone

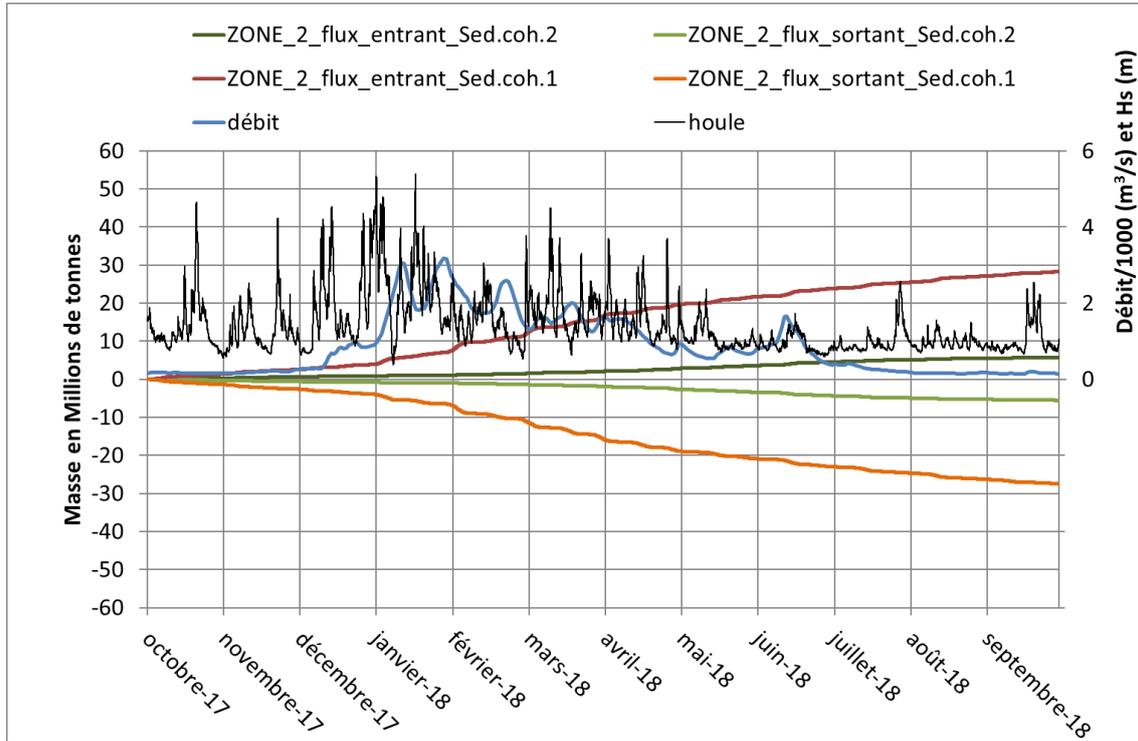


Figure 5-30 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 2

5.7.5. Analyse des flux de sédiments en Zone 4 (globalité de l'estuaire interne)

La figure suivante montre que sur la Zone 4 environ 52,6 Mtonnes de sédiment cohésif n°1 rentrent et sortent de la zone contre 11,6 Mtonnes pour le sédiment cohésif n°2.

Les sédiments clapés à la Lambarde participent donc à environ 18% des entrées/sorties de cette zone

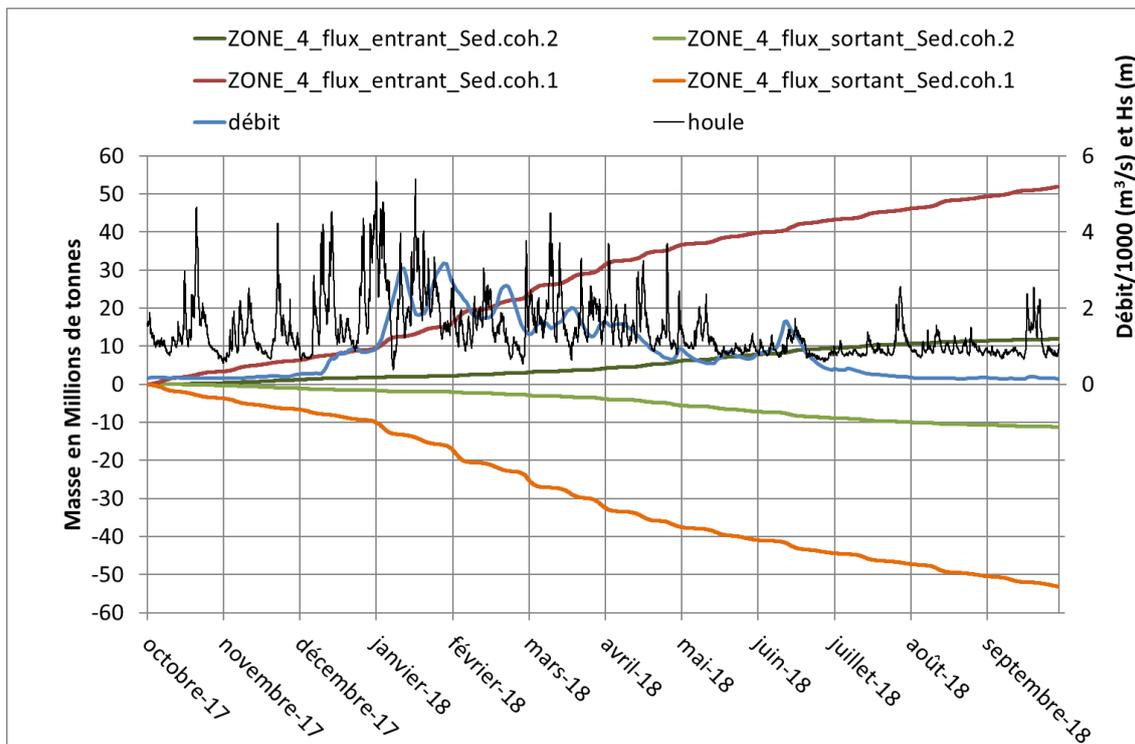


Figure 5-31 : Evolution des flux nets par quart d'heure cumulés positifs et négatifs pour le sédiment cohésif 1 (provenance de l'estuaire) et pour le sédiment cohésif 2 (provenance des clapages de la Lambarde) sur la Zone 2

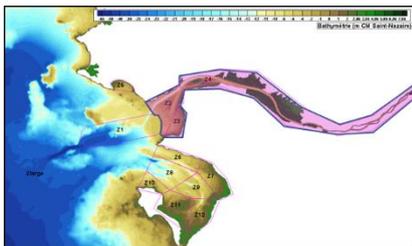
5.8. BILAN DE MASSE DE L'ESTUAIRE POUR LA TOTALITE DES SEDIMENTS

5.8.1. Bilan de masse annuel à l'échelle de l'estuaire

Un schéma synthétique du bilan de masse a été effectué à l'échelle des estuaires externe et interne (Figure 5-32).

Les principaux flux y sont indiqués :

- apports amont : 1,78 Mt ;
- sédiments remobilisés par DIE et DAS : 3,44 et 0,85 Mt (ces flux sont à titre indicatif et ne participent pas au bilan puisque ces remobilisations restent en interne à la zone de bilan) ;
- sédiments dragués par DAM et exportés à la Lambarde : 1,78 Mt (il faut noter que ces dragages sont automatiques dans le modèle et l'égalité avec le flux amont n'a aucune relation directe, cela pourrait être différent sur une autre année modélisée) ;
- apports aval net : +0,6 Mt qui est le résidu de 39,4 Mt de sédiments qui sont sortis par la frontière aval contre 40,0 Mt qui sont entrés par cette même frontière (le sédiment entrant et sortant pouvant être le même) ;
- le bilan net de la zone globale des estuaires interne et externe sur la période est de +0,61 Mt.



Bilan annuel 01/10/2017 à 01/10/2018
Estuaire interne + externe (en Mt)

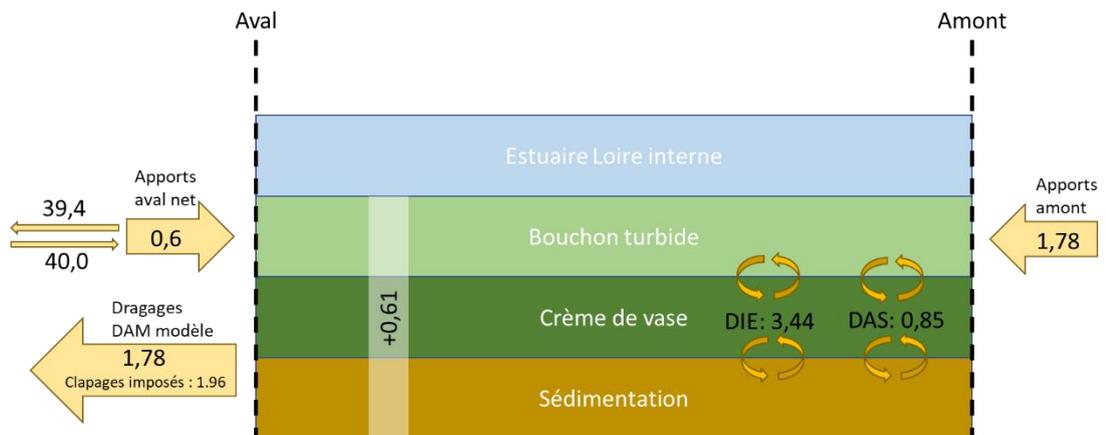


Figure 5-32 : Bilan de masse (en Mt) de l'estuaire interne et externe sur l'année hydrologique 2017-2018

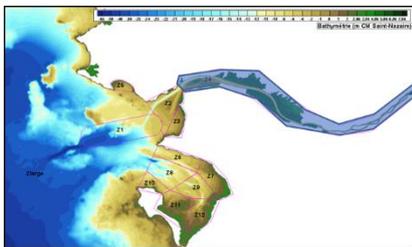
5.8.2. Bilan de masse annuel à l'échelle de l'estuaire hors estuaire externe

Afin d'évaluer la sensibilité d'un tel bilan de masse à la localisation de la frontière en aval, il a été fait le même travail en considérant l'estuaire à partir de la section maritime au lieu de l'estuaire externe.

Les principaux flux indiqués sont les mêmes que précédemment mis à part le flux aval net qui devient négatif, avec la perte de -0,5 Mt qui est le résidu de 64,7 Mt de sédiments qui sont sortis par la nouvelle frontière aval contre 64,2 Mt qui sont entrés par cette même frontière (le sédiment entrant et sortant pouvant être le même).

Le bilan net de l'estuaire hors estuaire externe sur la période est de -0,52 Mt, cela signifie que la longue période de fort débit a permis d'accumuler du sédiment en estuaire externe et que le pompage tidal permet de faire remonter du sédiment, mais pas encore suffisamment à la date de fin de simulation pour rééquilibrer le bilan de l'estuaire interne.

Ces bilans présentés sont très enrichissants et permettent de pousser les analyses, mais ils ne sont représentatifs que d'une période définie par une date de fin de simulation, en regard d'une date initiale. Ces bilans dépendent donc notamment d'un historique hydrosédimentaire, d'un forçage hydro-météorologique et d'une position géographique de frontière aval.



Bilan annuel 01/10/2017 à 01/10/2018
Estuaire (hors estuaire externe) en Mt

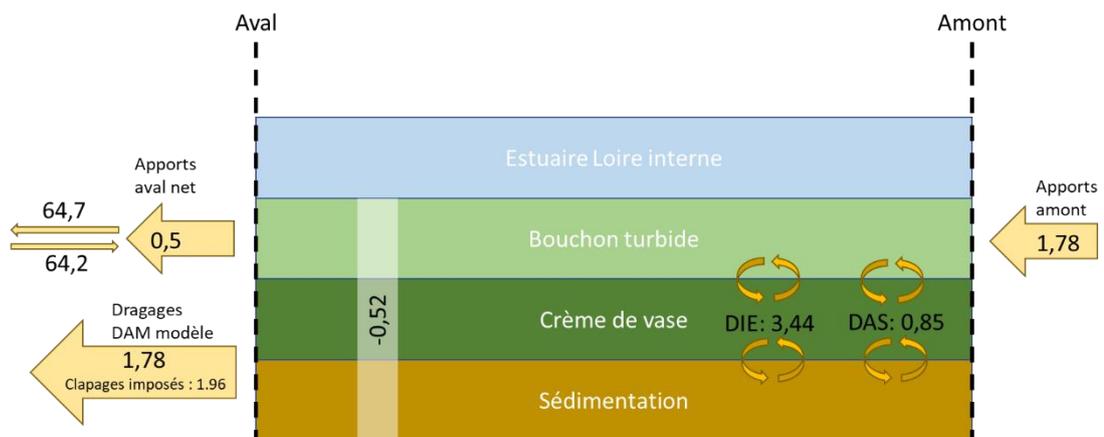


Figure 5-33 : Bilan de masse (en Mt) de l'estuaire (hors estuaire externe) sur l'année hydrologique 2017-2018

5.8.3. Bilans de masse trimestriels par secteurs de dragages

Afin de mieux appréhender les déplacements de masse dans l'estuaire, il a été effectué le même travail de bilan avec 6 sous-secteurs géographiques basés sur les sections de dragage du GPMNSN. Soit, en partant de l'aval vers l'amont :

- Large + estuaire externe (dont sections 1, 2 et 3 de dragage) ;
- Sections 4, 5 et 6 de dragage ;
- Sections 7 et 8 de dragage ;
- Sections 9 et 10 de dragage ;
- Sections 11 et 12 de dragage ;
- Section amont.

De plus, le travail a été effectué à l'échelle trimestriel afin de qualifier la dynamique saisonnière.

Les flux sont spécifiés en italique aux frontières des zones. Les évolutions sur la zone et pour la période considérée sont indiquées dans les rectangles (avec la convention + : accumulation, - : érosion)

5.8.3.1. 1^{er} Octobre 2017 au 1^{er} janvier 2018

Le bilan de masse sur cette période trimestrielle est majoritairement représentatif de ce qu'il se passe sur le dernier mois, soit décembre. L'augmentation du débit aux environs de 1000 m³/s permet à la masse de sédiments remontée en amont (sections 11 et 12) durant la période d'étiage précédent de redescendre vers les sections 4, 5 et 6. Sur cette période, cette accumulation est quasiment compensée par les dragages (environ 80%)

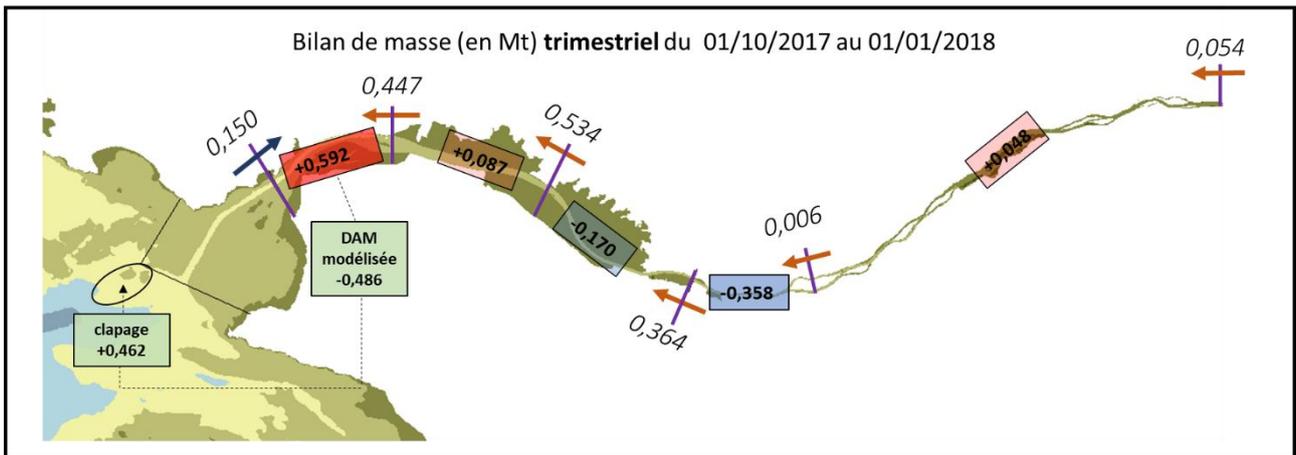
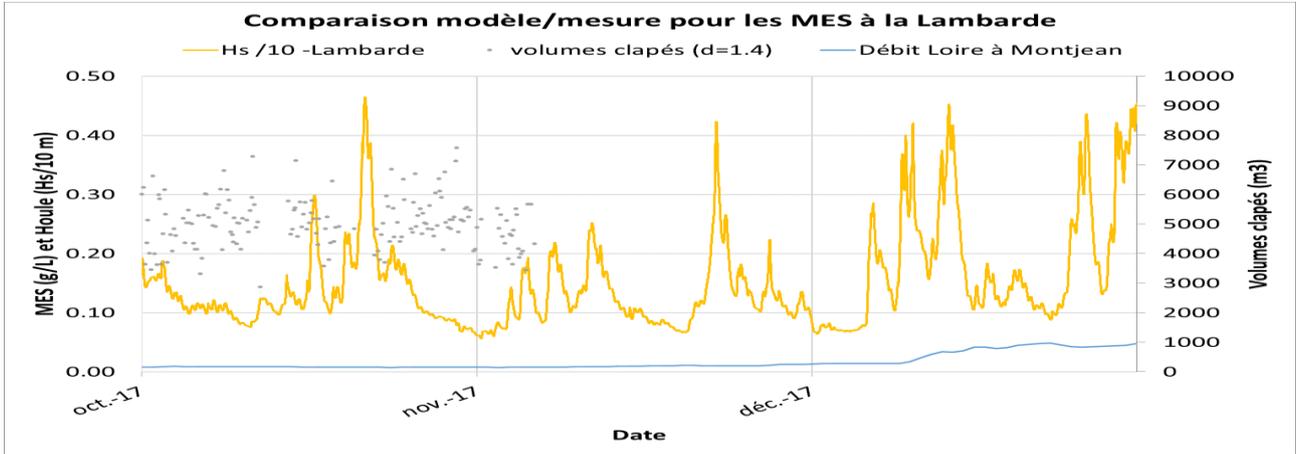


Figure 5-34 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (automne) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018

5.8.3.2. 1^{er} janvier 2018 au 1^{er} avril 2018

En période hivernale, avec des débits importants sur une longue période, la masse accumulée à l'amont, en section intermédiaire ainsi que les forts apports amont (spécifiques à cette année) sont exportés vers l'aval de l'estuaire en sections 4,5 et 6 ou expulsés à minima en estuaire externe (répartition dans l'ordre :64% et 36%). Les dragages par DAM en sections 4, 5 et 6 ne sont alors plus en capacité de compenser les apports (34% des sédiments accumulés en section 4,5 et 6 sont dragués).

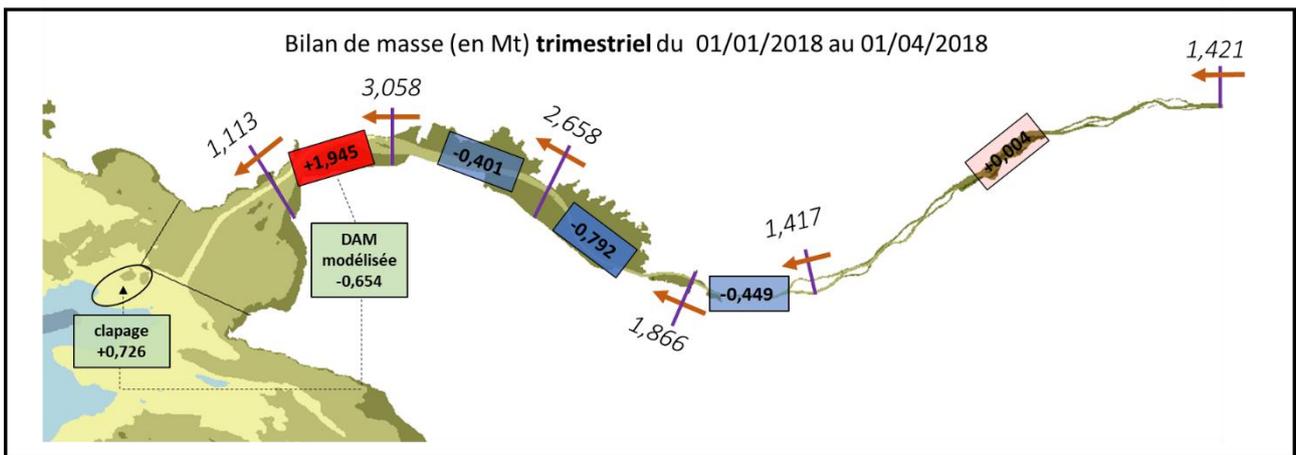
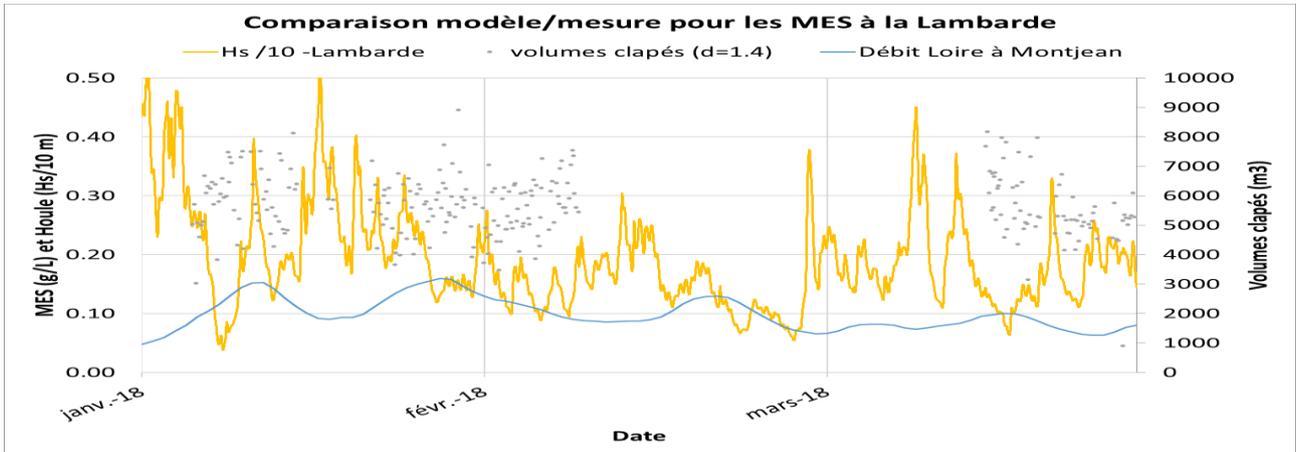


Figure 5-35 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (hiver) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018

5.8.3.3. 1^{er} avril 2018 au 1^{er} juillet 2018

En période printanière, la réduction des forts débits vers des débits moyens permet de remonter par pompage tidal les sédiments stockés en estuaire externe. Le sédiment se retrouve piégé dans les sections maritime et intermédiaire. Les dragages dépassent alors les apports sur les sections 4, 5 et 6 pour rattraper le retard pris sur la période précédente.

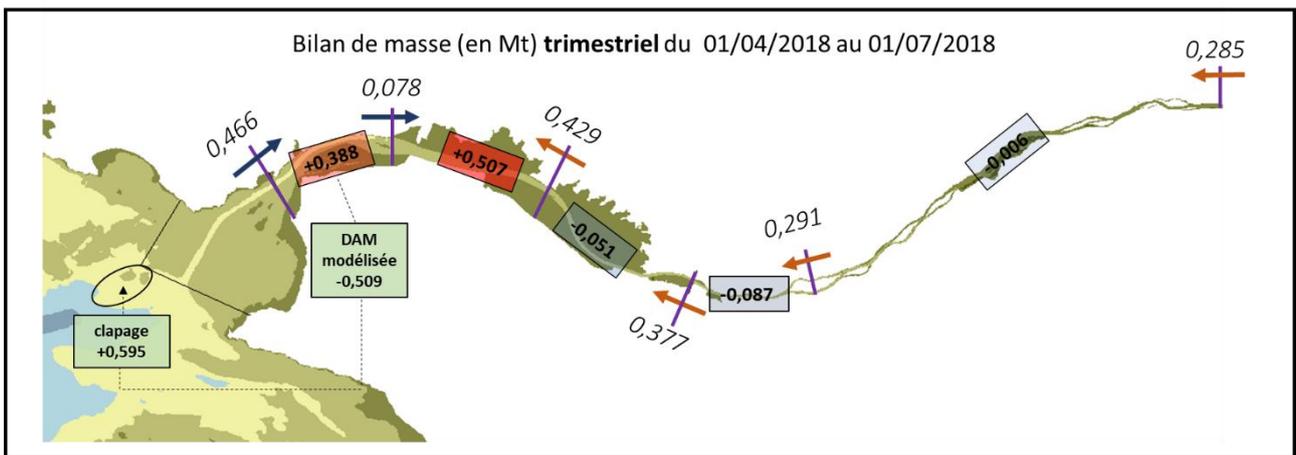
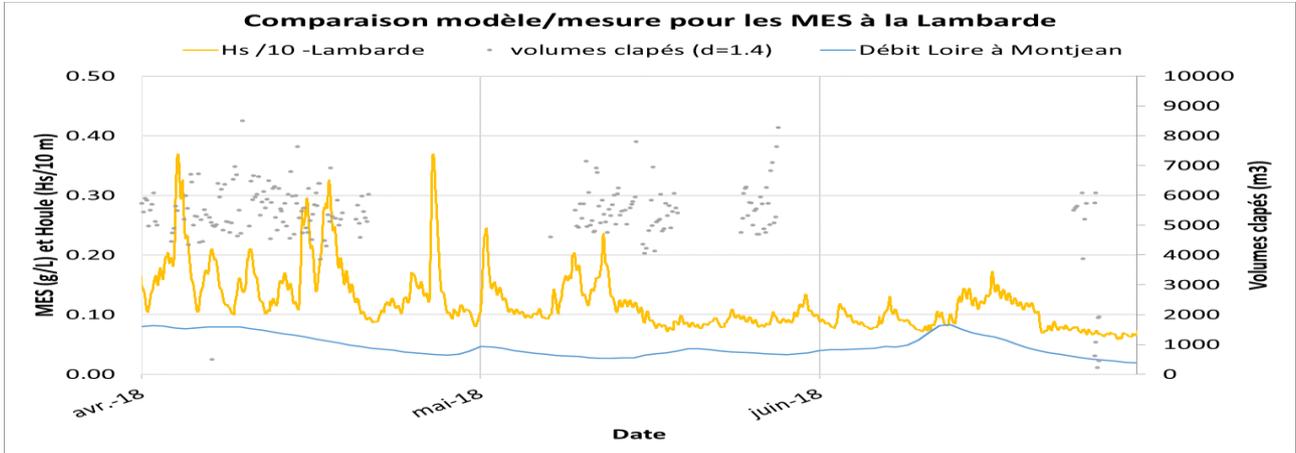


Figure 5-36 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (printemps) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018

5.8.3.4. 1^{er} juillet 2018 au 1^{er} octobre 2018

En période estivale, les débits d'étiage permettent une forte remontée des sédiments stockés en sections 4, 5 et 6 vers l'amont en sections 9-10 et sections 11-12 et légèrement plus en amont, pour se retrouver quasiment dans la situation initiale de ce calcul.

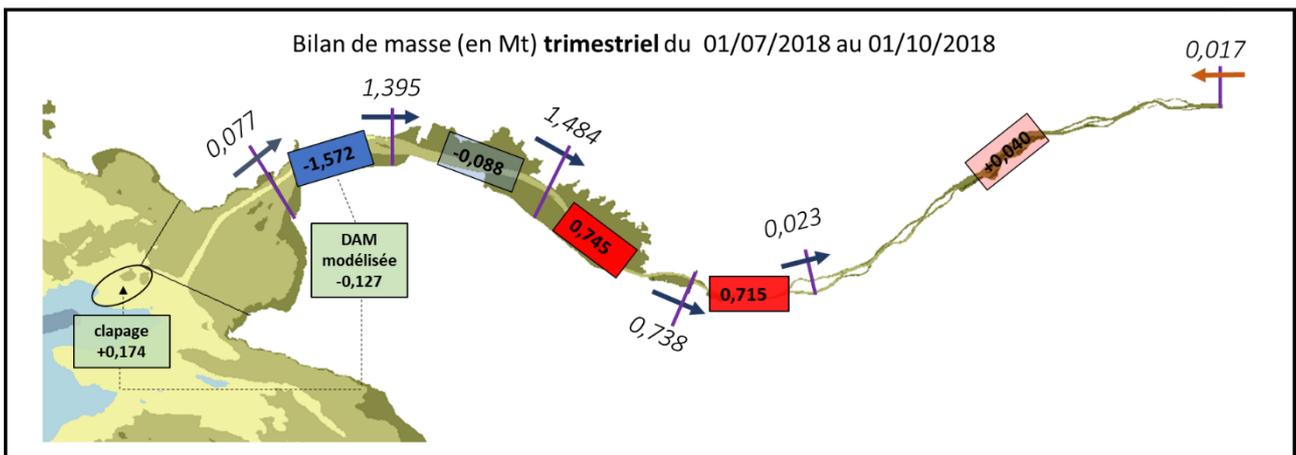
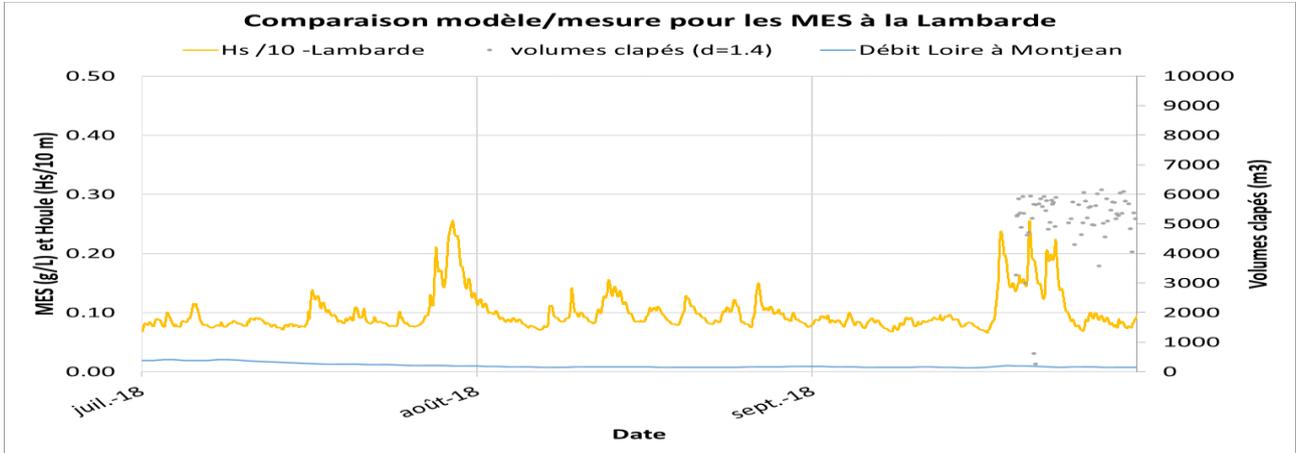


Figure 5-37 : Bilan de masse (en Mt) trimestriel (été) de l'estuaire par zones de dragage sur l'année hydrologique 2017-2018

REFERENCES

- [1] Artelia, juin 2023. *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Construction, calage et validation du modèle global 3d hydrosédimentaire et d'oxygène dissous*. Rapport V3 de Phase 1, GIP Loire Estuaire, rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 1
- [2] Artelia, juin 2023. *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Construction et calage du modèle 3D hydrosédimentaire local de stabilité du site de clapage de la Lambarde*, Rapport de Phase 1 – version V3, GIP Loire Estuaire., rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 1
- [3] Artelia, juin 2023. *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : exploitation du modèle local du site de la Lambarde– modélisations hydrosédimentaires de la stabilité du dépôt sur 13 ans (2021-2034)*, Rapport de phase 2 – version V2, GIP Loire Estuaire., rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 2
- [4] Artelia, juin 2023. *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : exploitation du modèle local du site de la Lambarde– modélisations hydrosédimentaires de la stabilité du dépôt sur 13 ans (2021-2034)*, Rapport de phase 2 – version V2, GIP Loire Estuaire., rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 2
- [5] Artelia, juin 2023. *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Construction, calage et validation du modèle raffiné estuaire externe*, Rapport de phase 1 – version 2, GIP Loire Estuaire., rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 1
- [6] Artelia, juin 2023. *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Exploitation du modèle global – modélisations de l'oxygène dissous sur 3 à 4 mois d'étiage (2018)*, Rapport de phase 2 – version V2, GIP Loire Estuaire., rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 2
- [7] Rapport 8 71 3791 R1, Artelia : *Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE), analyse quantitative des pratiques*, Décembre 2017
- [8] Rapport 8 71 3791 R2, Artelia : *Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE), évaluation comparée par modélisation numérique*, mars 2018

ANNEXES



ANNEXE A **RECAPITULATIF DES ETUDES ANTERIEURES SOGREAH/ ARTELIA**

scénario de référence

Etape 1 (2008-2010)

- Analyse du contexte hydrodynamique régional autour de la Lambarde et son effet sur la dynamique de MES à l'embouchure (rapport Sogreah 171 1728 R1 de juin 2008),
- Préparation d'une campagne de mesures en nature (rapports Sogreah 171 1728 R2 et R3) confiée à IMDC et supervision des deux campagnes réalisées en septembre 2009 et mai 2010,
- Etude préliminaire de recherche de sites alternatifs (rapport Sogreah 171 1903 R1 de mai 2009)

Etape 2 (2011-2012) : Devenir des sédiments clapés sur le site de la Lambarde

- Recueil et analyse des données sédimentaires disponibles. Bilan des activités d'immersion de 2004 à 2011 et analyse de la stabilité du dépôt (rapport 171 3106 R1)
- Développement d'un modèle 3D régional hydrodynamique calé sur les mesures effectuées (rapport 171 3106 R2)
- Développement d'un modèle 3D local de stabilité du site de la Lambarde calé sur les données collectées (rapport 171 3106 R3)
- Définition et suivi d'une campagne supplémentaire de mesures en nature réalisée par IMDC du 29 mars au 9 juin 2011 : cahier des charges fonctionnel (rapport non numéroté)
- Etude des évolutions en nature de la baie de Bourgneuf : Rapports 171 3168 R1 et R2 d'avril 2012
- Développement d'un modèle 3D de dispersion MES (rapport 171 3106 R4)
- Application de ces 3 modèles aux différents scénarios d'immersion étudiés (rapport 171 3106 R5)
- Synthèse générale des études hydrosédimentaires (rapport 171 3106 R6)

Etape 3 (2012): Etablissement des dossiers règlementaires (en groupement avec CREOCEAN)

- Dossier Loi sur l'eau (rapport 171 3187)
- Dossier Natura 2000 (rapport 171 3187)
- Analyse comparative des scénarios d'immersion (rapport 171 3187 R3)

Etape 4 (2018-2019) : Etablissement du bilan des suivis à mi-parcours des autorisations (BSMA)

Rapports n° 871 3109

- R1 : Bilan détaillé des activités d'immersion et de leur suivi hydrosédimentaire
- R2 : Modélisation régionale du bruit de fond en MES
- R3 : amélioration du modèle de dispersion en zone littorale
- R4 : Rejeu des modèles de stabilité et dispersion
- R5 : dossier thématique hydrosédimentaire

Rapports 871 3791

- R1 : Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE) : Analyse quantitative des pratiques
- R2 : Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE) : Evaluation comparée par modélisation numérique

Etape 6 (2021) : partie hydrosédimentaire du dossier de renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Rapports 871 6311

- R1 : Stratégie et pratique de dragages

scénario de référence

- R2 : Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN : Etude hydro-sédimentologique - Stratégie et pratique de clapages sur le site de la Lambarde
- R2 : Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN : Etude hydro-sédimentologique - Annexe 4 : Suivi hydro-sédimentaire de la Lambarde
- R2 : Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN : Etude hydro-sédimentologique - Annexe 5 : rejeu du modèle de stabilité de la Lambarde
- R2 : Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN : Etude hydro-sédimentologique - Annexe 6 : Dispersion des sédiments instables sur la Lambarde

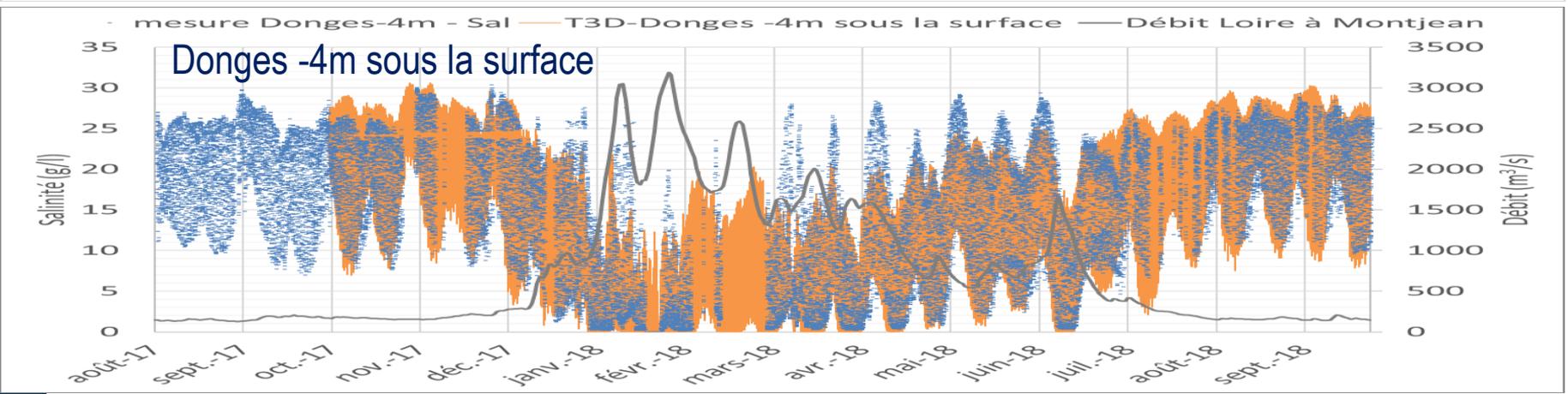
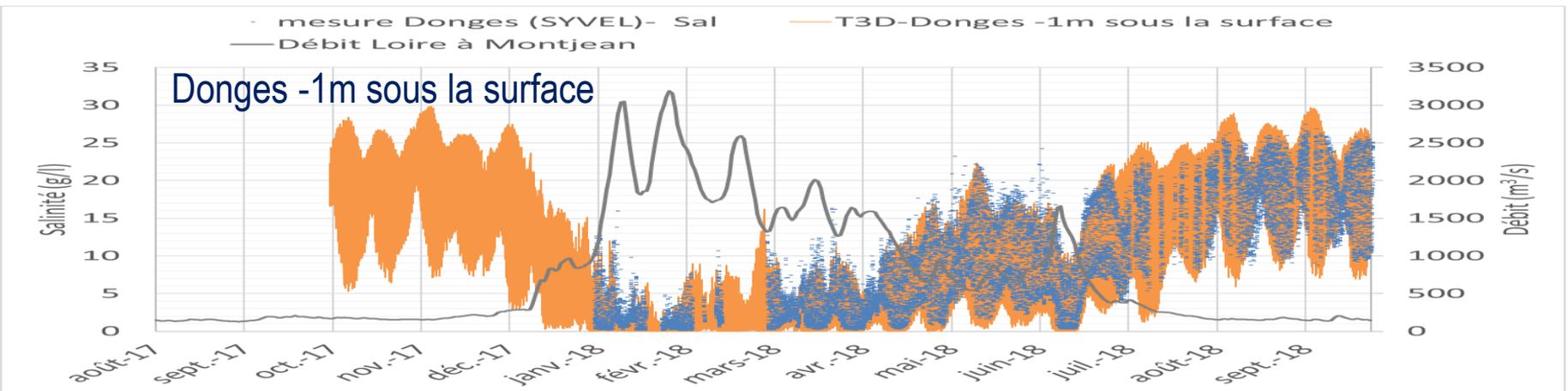
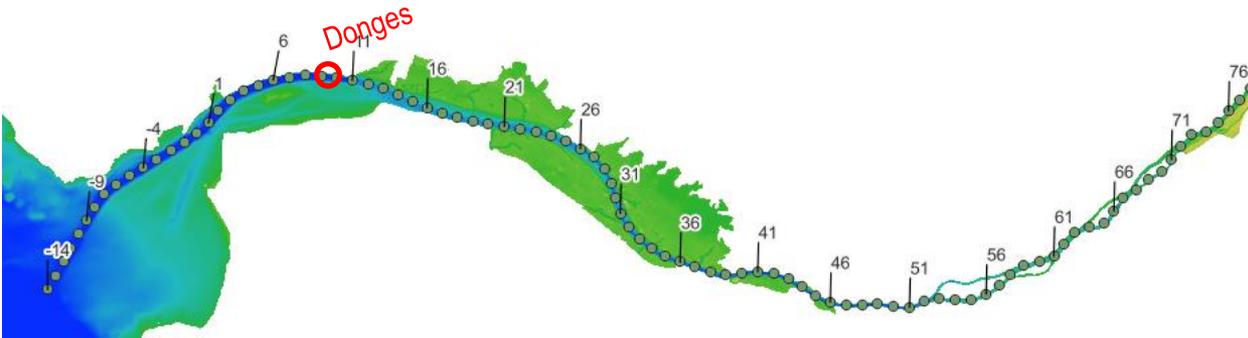
ANNEXE B VALIDATION DE LA DYNAMIQUE EN SALINITE ET MES SUR LES MESURES SYVEL 2017-2018 AVEC MODELISATION DES DRAGAGES DAM, DAS ET DIE



ANNEXE B – VALIDATION DE LA DYNAMIQUE EN SALINITÉ ET MES SUR LES MESURES SYVEL 2017–2018 AVEC MODÉLISATION DES DRAGAGES DAM, DAS ET DIE

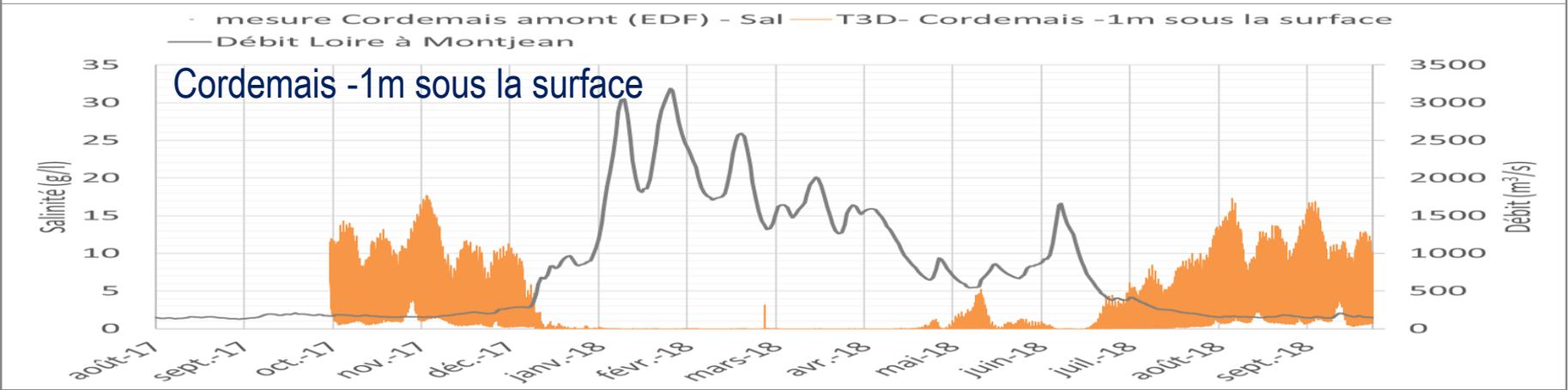
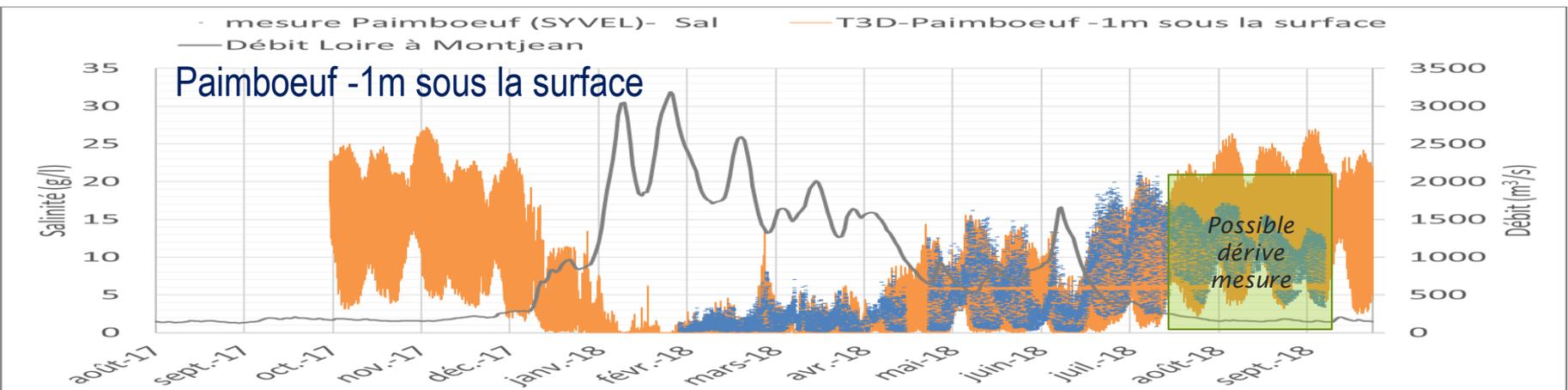
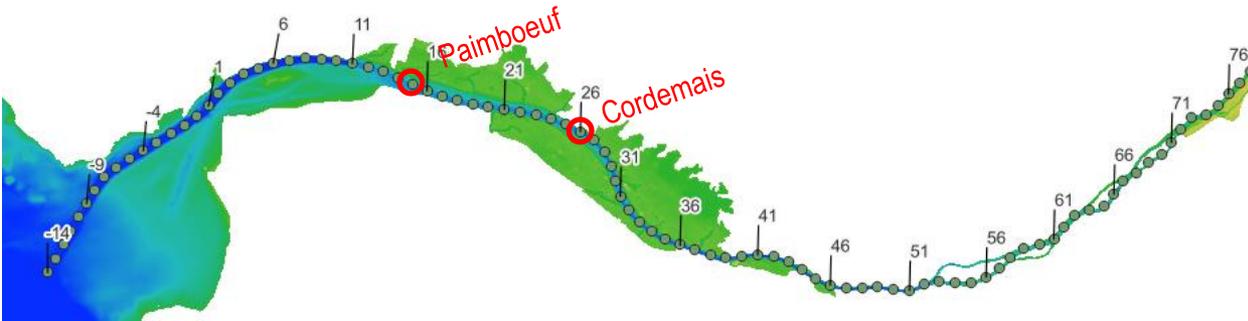
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de salinité



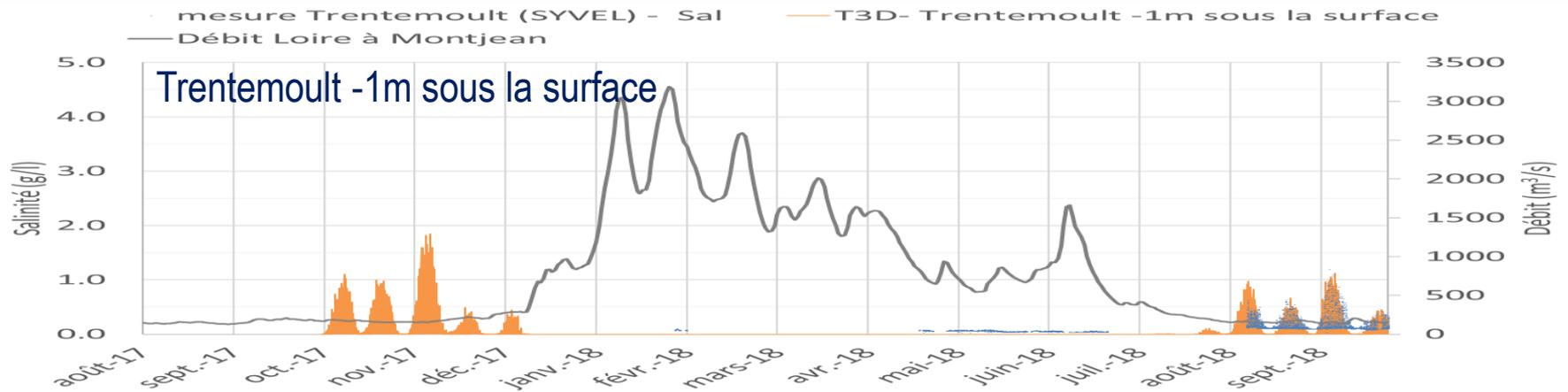
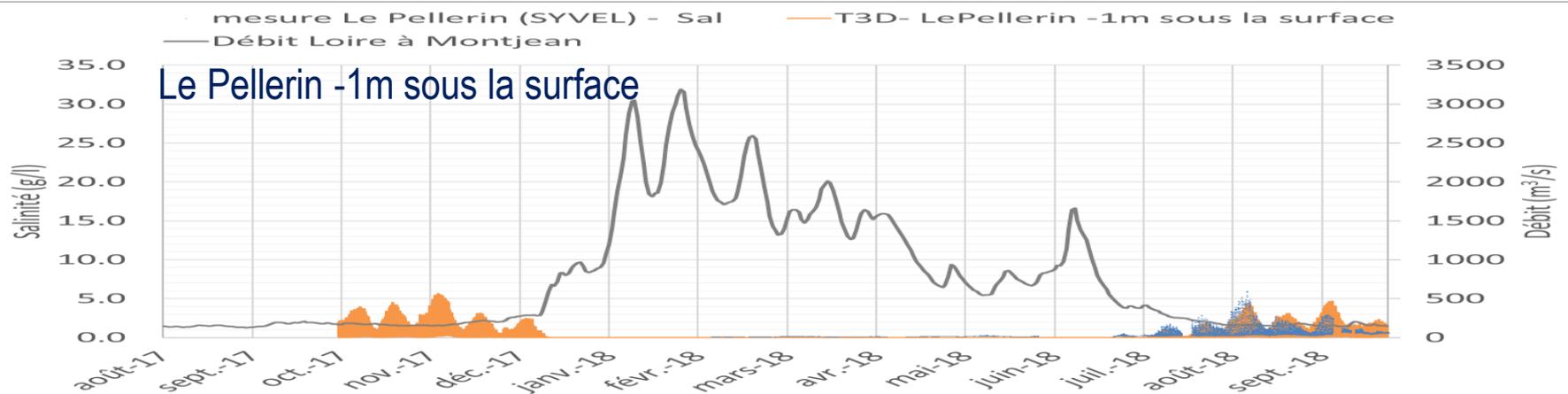
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de salinité



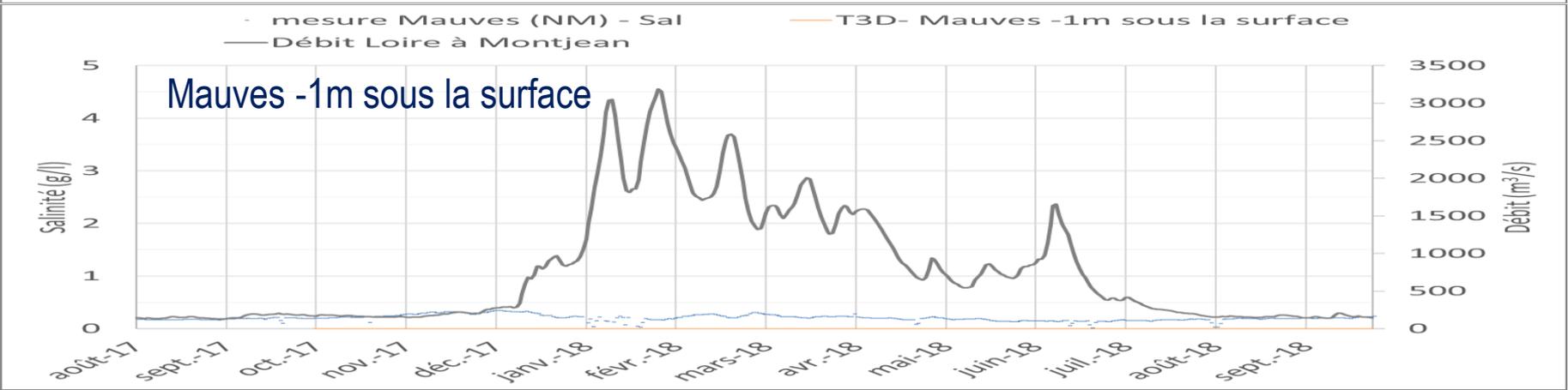
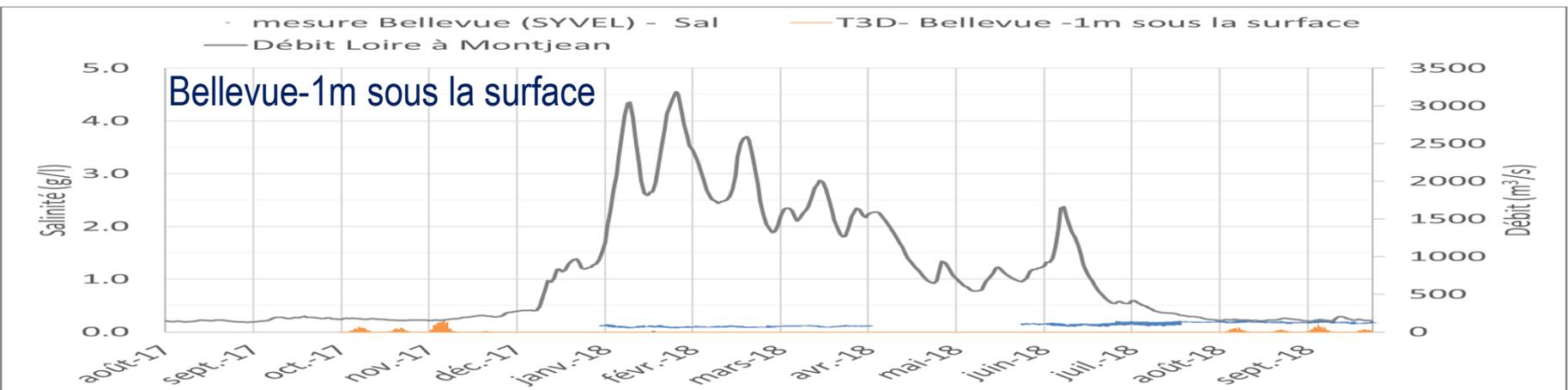
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de salinité



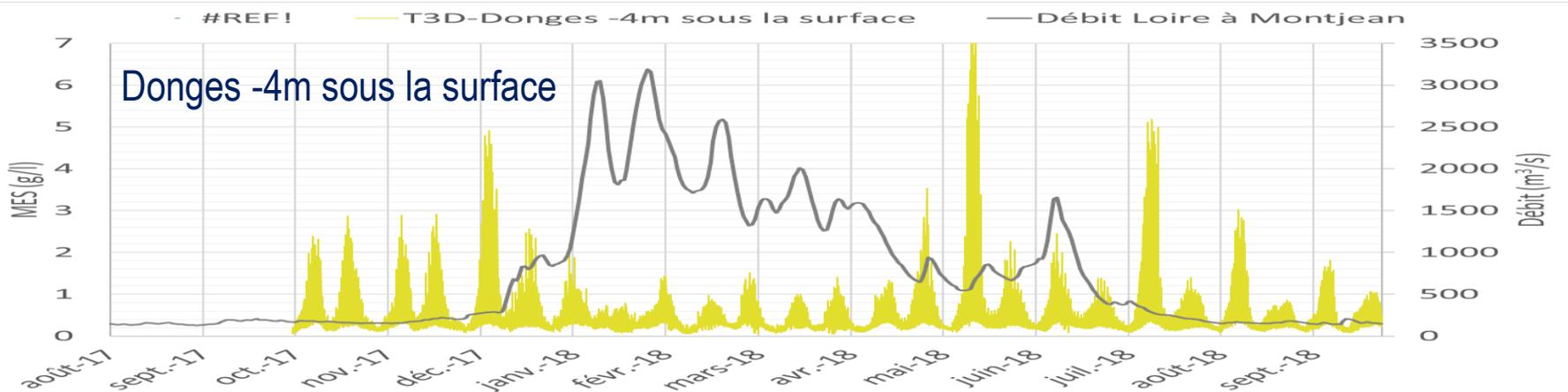
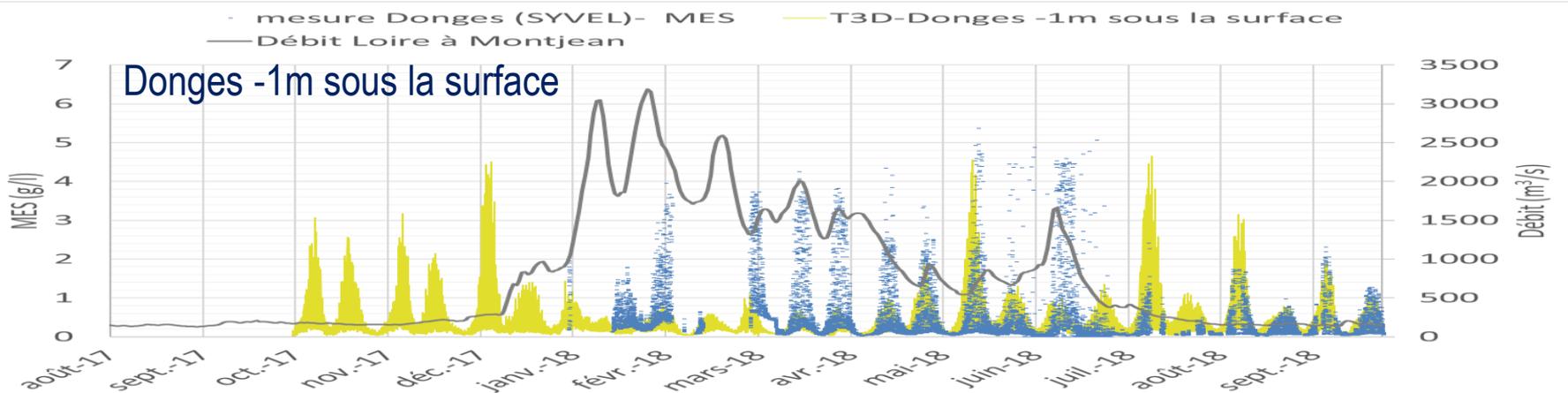
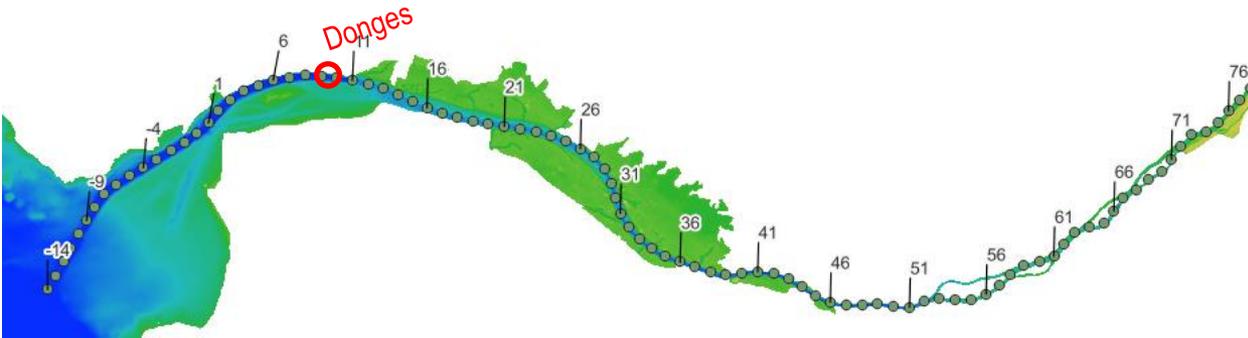
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de salinité



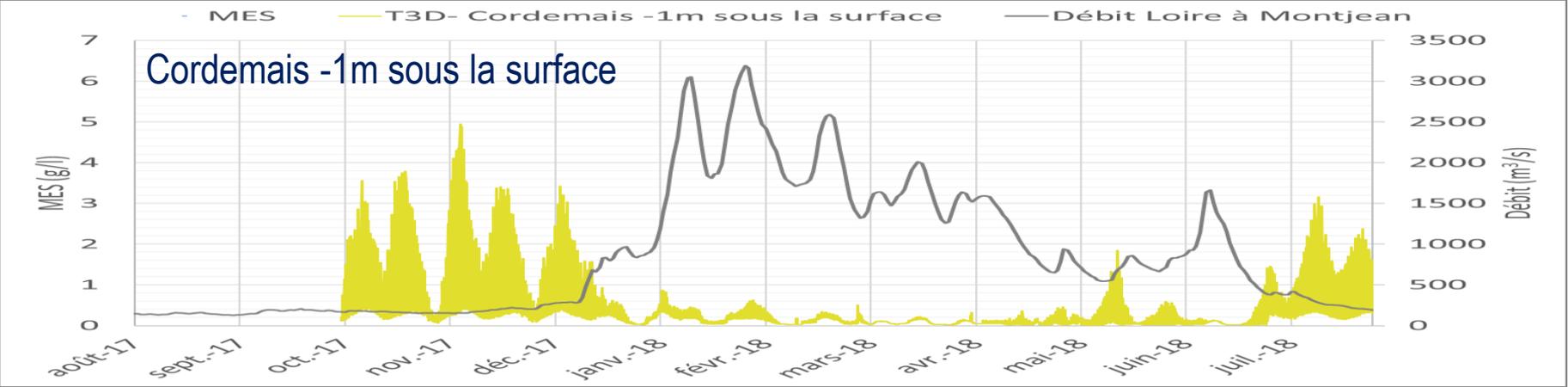
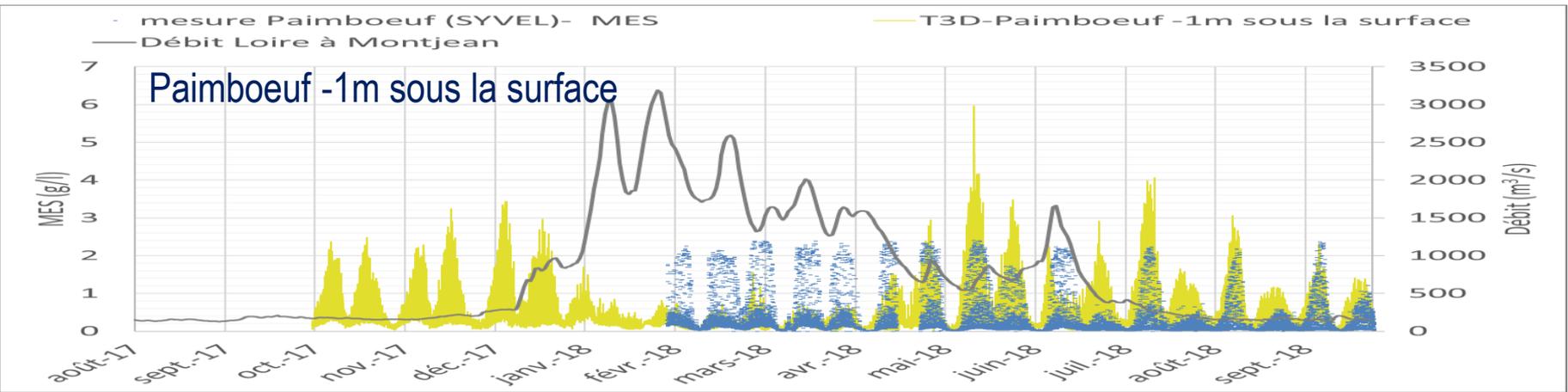
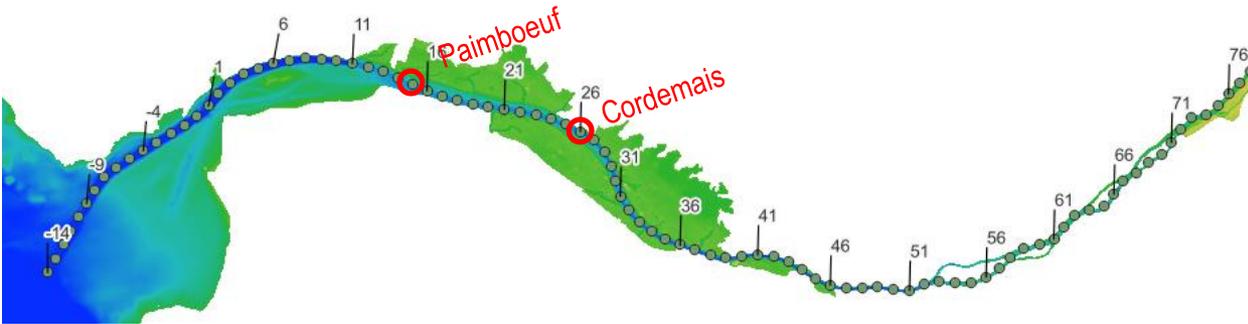
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de MES



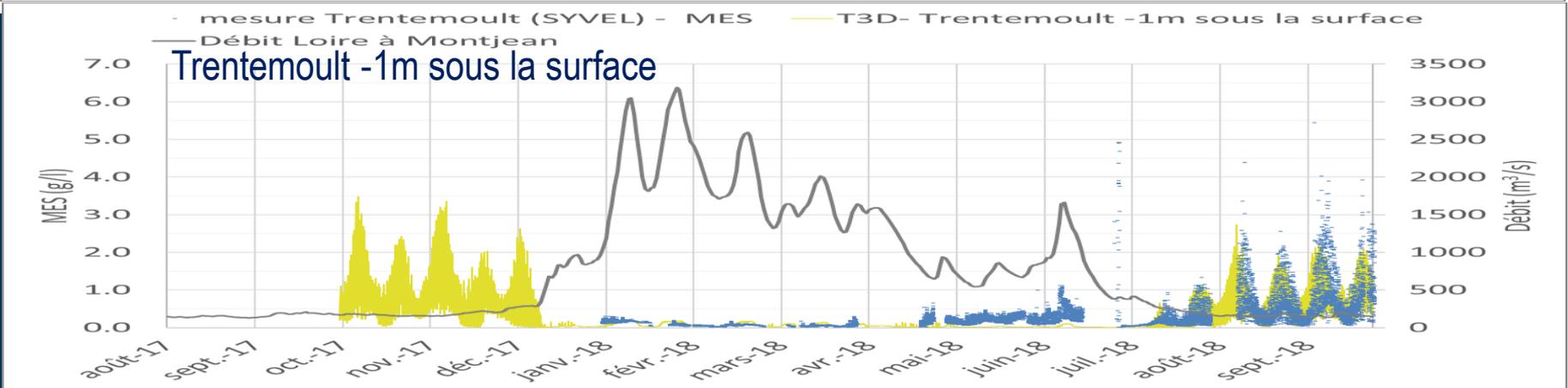
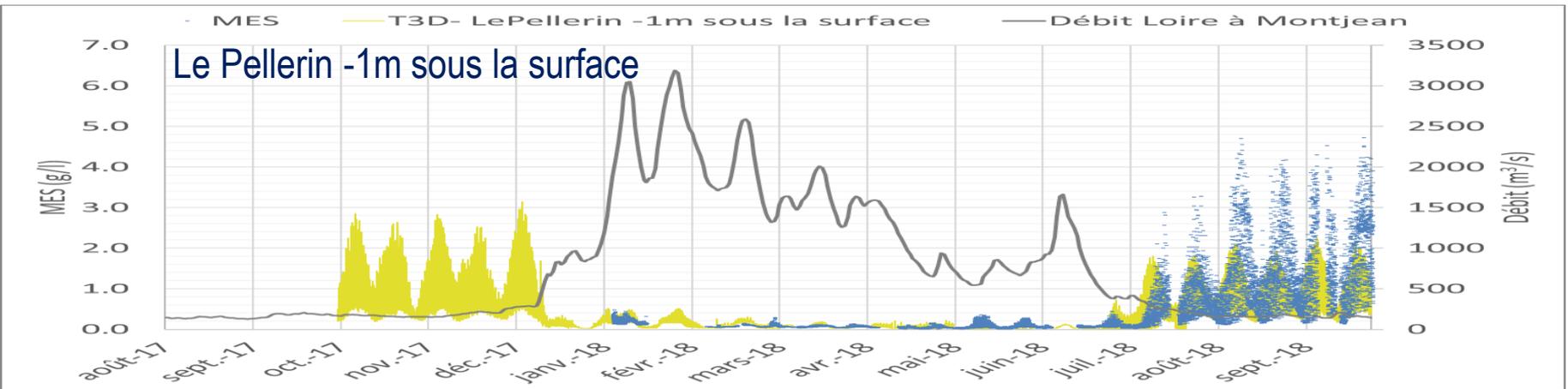
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de MES



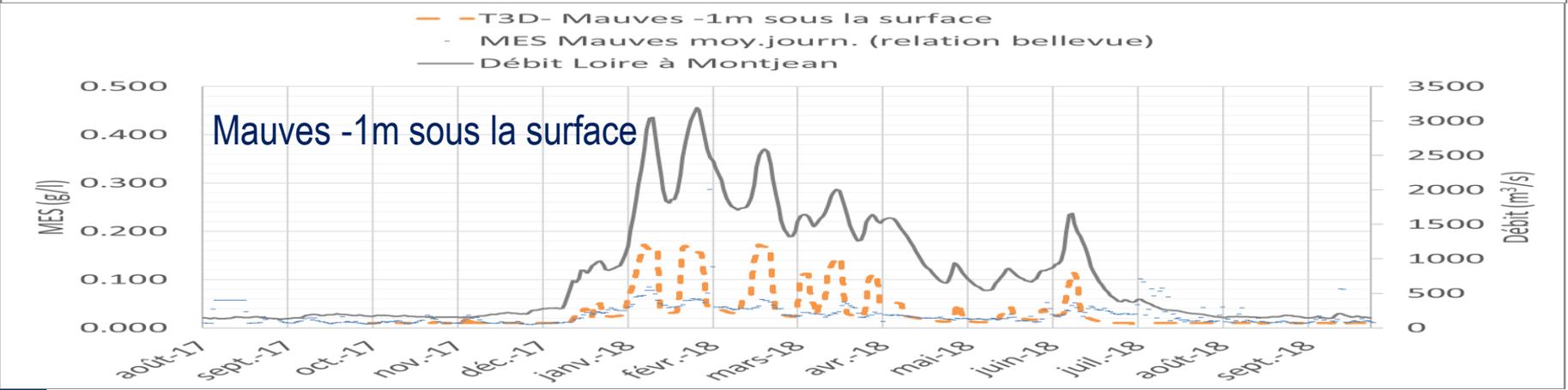
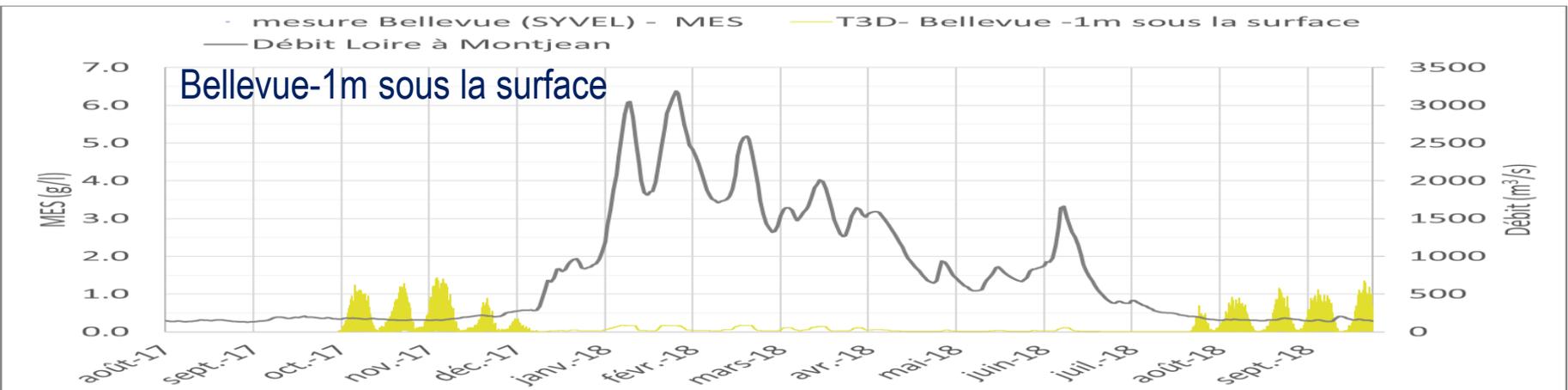
Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de MES



Année hydrologique 2018-2019 - Estuaire interne

Comparaison aux mesures SYVEL de MES





www.arteliagroup.com

ANNEXE C NOTE TECHNIQUE SUR LE CHOIX DES ANNEES DE REFERENCE POUR LA VALIDATION DU MODELE HYSQEL

Réf. : PJ_KLB/0823/2023

Note technique sur le choix des années de référence pour la validation du modèle HySQEL sans et avec dragages d'entretien et faisant suite à la visio-conférence du 14/11/2023

Lors du développement du modèle HySQEL, deux années hydrologiques de référence ont été choisies en 2022, pour la validation hydro-sédimentaire et pour la prise en compte des dragages d'entretien.

Pour la validation hydro-sédimentaire (sans dragage), l'année hydrologique 2018-2019 a été choisie d'une part du fait de volumes dragués et exportés à la Lambarde particulièrement faibles, soit 2,4 Mm³, et d'autre part à cause de la disponibilité de profils hydrologiques de l'amont de Nantes à Saint-Nazaire, et de mesures de MES dans l'estuaire externe. Cependant, l'année hydrologique 2018-2019 est particulièrement sèche avec une hydraulité de 0,5. La station de référence étant celle de Montjean-sur-Loire.

Pour la modélisation des dragages, l'objectif est d'être le plus en phase avec les pratiques récentes, or les volumes exportés à la Lambarde ont particulièrement diminué depuis 2012. En se basant sur la période 2012-2020, les années 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018 correspondent à des années moyennes pour les volumes clapés.

Le choix entre ces années est basé sur une année dont l'hydrologie est moyenne, avec le moins d'événements « atypiques » possibles, soit des débits soutenus avec des crues en période hivernale et des débits d'étiage en période estivale. Ainsi, l'année hydrologique du 1er oct. 2017 au 30 sept. 2018 est le meilleur compromis avec un étiage estival, des crues hivernales jusqu'à 3000 m³/s et 889 m³/s en débit moyen annuel. Cependant, les hautes eaux du mois de juin 2018, sont inhabituelles sur la période 1900 - 2021. En comparaison des moyennes mensuelles des autres mois de juin, celui-ci est très humide. Il est à noter également, que l'étiage est sévère pour les mois d'octobre, novembre 2017, août et septembre 2018, avec un débit moyen mensuel inférieur à 200 m³/s.

Pour les autres années, en se basant sur le débit moyen en année hydrologique :

- 2015-2016 est écartée à cause d'une crue remarquable en juin 2016 à plus de 3000 m³/s, et bien que l'année ait une hydraulité de 1 ;
- 2014-2015 est écartée, à cause de l'absence de crue hivernale, le débit dépassant à peine les 2000 m³/s.

Le tableau ci-après récapitule la différence entre les années hydrologiques étudiées à la station de Montjean-sur-Loire.

moyenne année hydro	hydraulicité année hydro	année hydro
750	0,9	2014-15
838	1,0	2015-16
440	0,5	2016-17
889	1,1	2017-18
390	0,5	2018-19

Sur les clapages à la Lambarde, l'année hydrologique 1er oct 2017- 30 sept. 2018 représente environ 4,5 Mm³.