



Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire

GIP Loire Estuaire

CONSTRUCTION, CALAGE ET VALIDATION DU MODÈLE GLOBAL 3D HYDROSÉDIMENTAIRE ET D'OXYGÈNE DISSOUS

Rapport final de Phase 1 – version V3



Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire

GIP Loire Estuaire

CONSTRUCTION, CALAGE ET VALIDATION DU MODELE GLOBAL 3D HYDROSEDIMENTAIRE ET D'OXYGENE DISSOUS

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
0	Version de travail de support au COMEX du 03/02/2022	RWR, GIY	OBD	28/01/2022
1	Version de travail de support au COMEX du 07/04/2022	RWR, GIY	OBD	05/04/2022
2	Version de travail de support au COMEX de 09/2022	RWR, GIY, ALR	OBD	12/08/2022
3	Version rapport V1	RWR, GIY, ALR	OBD	09/12/2022
4	Version V2 suite au COMEX de décembre 2022	ALR	OBD	03/02/2023
5	Version V2.1 suite aux discussions avec le GIP LE	ALR	OBD	01/03/2023
6	Version V3 avec prise en compte remarques 29/04/2023	RWR, GIY, ALR	OBD	07/06/2023

Artelia
6 rue de Lorraine 38130 Echirolles – TEL 04 76 33 43 45

Artelia
6 rue de Lorraine 38130 Echirolles

SOMMAIRE

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	9
1. CONSTRUCTION	10
1.1. MNT – MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN.....	10
1.1.1. Synthèse des données topographiques disponibles.....	10
1.1.2. Choix des données pour la construction du MNT.....	12
1.1.3. Détails du traitement des données	12
1.1.3.1. Traitement des données sur la zone amont.....	12
1.1.3.2. Traitement des données sur la zone aval.....	12
1.1.3.3. Traitement des données sur l'estuaire externe	13
1.1.4. Présentation du MNT finalisé	13
1.2. Maillage	14
1.2.1. Définition de l'emprise du modèle.....	14
1.2.1.1. Emprise globale.....	14
1.2.1.2. Emprise latérale	15
1.2.2. Méthode et critères de maillage	15
1.2.2.1. Méthode pour le maillage horizontal	15
1.2.2.2. Méthode pour le maillage vertical.....	18
1.2.3. Validation du maillage.....	19
2. FORÇAGES POUR L'HYDRODYNAMIQUE	21
2.1. MarÉE astronomique.....	21
2.2. Forçages météorologiques.....	21
2.2.1. Pression-niveau-moyen	21
2.2.2. Vent	22
2.3. DÉbit liquide.....	22
3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE	24
3.1. Mise en place des zones de frottement	24
3.1.1. Frottement considéré dans l'hypothèse de fonds sans crème de vase	24
3.1.1.1. Frottement longitudinal	24
3.1.1.2. Frottement sur les zones submersibles	25
3.1.2. Prise en compte de la crème de vase	26
3.1.2.1. Emprise latérale	26

3.1.2.2. Emprise longitudinale.....	26
3.2. Méthode de quantification du calage	27
3.3. Calibration hydrodynamique sur des pÉriodes À dÉbits quasi-constants.....	30
3.3.1. Débit à 4000 m ³ /s.....	30
3.3.2. Débit à 2500 m ³ /s.....	35
3.3.3. Débit à 850 m ³ /s.....	39
3.3.4. Débit à 400 m ³ /s.....	43
3.3.5. Débit à 200 m ³ /s.....	45
3.3.6. Débit à 150 m ³ /s.....	50
3.4. RÉcapitulatif des frottements longitudinaux obtenus apres calibration.....	54
4. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE.....	56
4.1. DÉbits infÉrieurs À 130 m ³ /s.....	56
4.2. DÉbits de 150 m ³ /s à 500 m ³ /s.....	59
4.3. DÉbits de 500 m ³ /s à 4000 m ³ /s.....	63
5. CALAGE ET VALIDATION EN SALINITÉ (SANS MES).....	68
5.1. Les processus	68
5.2. ModÈle de turbulence vertical 1D de longueur de mÉlange multicouches.....	68
5.3. MisE en pratique du modÈle de turbulence multicouches.....	69
5.4. MÉthode de calibration pour la salinitÉ.....	70
5.5. Calibration en salinitÉ - campagne d’octobre 2000	71
5.6. Validation en salinitÉ - campagne de Janvier 2004 (crue).....	72
5.7. Validation en salinitÉ - juillet À octobre 2019 (Étiage sÉvÈre) ..	72
5.8. Validation en salinitÉ sur les profils hydrologiques en septembre2019	73
6. PROPAGATION ET GÉNÉRATION DE LA HOULE	74
6.1. Les forçages.....	74
6.2. Calibration et validation du modÈle de houle	74
7. MES ET CRÈME DE VASE (RAPPORT BASÉ SUR LE CALCUL N°105)	76

7.1.	Le principe gÉnÉral de gestion du sol	76
7.2.	Les processus hydrosÉdimentaires dans la colonne d'eau.....	77
7.2.1.	Vitesse de chute - Mesures disponibles.....	77
7.2.2.	Vitesse de chute - Ajustement d'une loi de type Thorn/Mehta.....	79
7.2.3.	Vitesse de chute - Prise en compte simplifiÉe de la floculation /dÉfloculation	79
7.3.	Les processus hydrosÉdimentaires À l'interface eau/sol.....	82
7.3.1.	Calcul des flux de dÉpôt.....	82
7.3.2.	Calcul des flux d'Érosion d'une vase pure.....	82
7.3.3.	Calcul des flux d'Érosion d'un sable pur	86
7.3.4.	Calcul des flux d'Érosion d'un mÉlange sable/vase.....	86
7.4.	Les processus hydrosÉdimentaires dans le sol	87
7.4.1.	Consolidation	88
7.4.2.	Glissement	92
7.5.	Les forçages aux limites.....	92
7.5.1.	Forçage en dÉbit solide.....	92
7.5.2.	Le forçage au sol initial : Le remplissage sÉdimentaire.....	96
7.5.2.1.	RÉpartition spatiale des 7 classes de sÉdiment.....	96
7.5.2.2.	DÉfinition des classes	98
7.5.2.3.	RÉpartition des sÉdiments dans chaque classe sÉdimentologique	98
7.5.2.4.	ParamÈtres physiques des sÉdiments de la zone maritime	100
7.5.3.	Conditions initiales de la crÈme de vase.....	101
7.6.	L'annÉe de rÉfÉrence simulÉe	101
7.7.	RÉsultats de calage sur la dynamique haline.....	102
7.7.1.	Description gÉnÉrale	102
7.7.2.	Comparaison aux mesures SYVEL.....	102
7.7.3.	Comparaison aux mesures des profils hydrologiques(campagne GIP LE) .	102
7.7.4.	Comparaison aux mesures en estuaire externe (campagne GPMNSN)	103
7.8.	RÉsultats de calage sur la dynamique en MES.....	103
7.8.1.	Description gÉnÉrale	103
7.8.2.	Comparaison aux mesures SYVEL.....	103
7.8.3.	Comparaison aux mesures des profils hydrologiques (campagne GIP LE)	103
7.8.4.	Comparaison aux mesures en estuaire externe (campagne GPMNSN)	103
7.9.	RÉsultats de calage sur la dynamique de la crÈme de vase	103

7.9.1.	Description générale et comparaison à la connaissance	103
8.	REPRÉSENTATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU POUR LE MODÈLE D'OXYGÈNE DISSOUS	105
8.1.	Approche méthodologique.....	105
8.2.	Données disponibles	105
8.3.	Ajustement des paramètres	107
9.	LUMIÈRE DISPONIBLE DANS LA COLONNE D'EAU POUR LE MODÈLE D'OXYGÈNE DISSOUS	110
9.1.	Rayonnement solaire incident.....	110
9.2.	Atténuation de la lumière dans la colonne d'eau.....	110
10.	MODÈLE D'OXYGÈNE DISSOUS	112
10.1.	Description générale	112
10.1.1.	Schéma de principe	112
10.1.2.	Matière organique disponible.....	113
10.1.3.	Matière organique d'origine phytoplanctonique	114
10.1.4.	Consommation d'oxygène dissous lié à la dégradation de la DBO5.....	115
10.1.5.	Reminéralisation de la matière organique particulaire azotée.....	116
10.1.6.	Loi de réaération/dégazage	116
10.1.7.	Nitrification.....	117
10.1.8.	Production primaire et mortalité du phytoplancton.....	117
10.1.9.	Synthèse	118
10.2.	Conditions initiales.....	120
10.3.	Conditions aux limites	120
10.3.1.	Apports anthropiques à l'estuaire.....	120
10.3.2.	Apports de la Loire amont et des affluents latéraux	121
10.3.3.	Conditions au large.....	124
10.3.4.	Synthèse des conditions aux limites.....	126
10.4.	Comparaison modèle/mesure	127
10.4.1.	Estuaire interne : comparaison aux mesures haute-fréquence du réseau SYVEL	127
10.4.2.	Estuaire interne : comparaison aux mesures basse-fréquence DDTM44/Dpt44/NAIADES	128
10.4.3.	Comparaison aux mesures des profils hydrologiques (campagne GIP LE)	128

10.5. Dynamique estuarienne	128
10.6. Mise en perspective par rapport aux autres ModÈles d'oxygÈne dissous en estuaire	128
RÉFÉRENCES	132
ANNEXES	134

TABLEAUX

Tableau 1 – Description des données topo-bathymétriques	10
Tableau 2 - Hauteur de rugosité équivalente de Nikuradse pour les étiers, prairies et roselières	26
Tableau 3 - Emprise latérale de la crème de vase	26
Tableau 4 - Emprise longitudinale de la crème de vase.....	27
Tableau 5 - Quantification statistique pour la période à débit de 4000 m ³ /s	31
Tableau 6 - Quantification statistique pour la période à débit de 2500 m ³ /s	35
Tableau 7 - Quantification statistique pour la période à débit de 850 m ³ /s	39
Tableau 8 - Quantification statistique pour la période à débit de 400 m ³ /s	43
Tableau 9 - Quantification statistique pour la période à débit de 200 m ³ /s	46
Tableau 10 - Quantification statistique pour la période à débit de 150 m ³ /s	50
Tableau 11 – valeur de frottement obtenu après calibration pour chacun des débits	54
Tableau 12 - Quantification statistique pour la période de juillet, août et septembre 2019	57
Tableau 13 - Quantification statistique pour la période d'avril, mai et juin 2011	60
Tableau 14 - Quantification statistique pour la période de janvier, février et mars 2021.....	64
Tableau 15 – Définition des classes sédimentaires	98
Tableau 16 – paramètres physiques des classes de sédiments en zone marine	100
Tableau 17 – Résumé des stations de suivi enregistrant la température de l'eau	105
Tableau 18 – Paramètres de l'équation de température.....	107
Tableau 19 – Corrélation phytoplancton/DBO5 par station	114
Tableau 20 – Paramètres intervenant dans les flux biogéochimiques du modèle d'oxygène dissous.....	119
Tableau 21 – Volume rejet par les STEU et position	120
Tableau 22 – Qualité des effluents de STEU (* estimation).....	121
Tableau 23 – Valeurs de concentration des variables d'état du modèle de qualité des eaux	126
Tableau 24 – Résultat du calcul du WSS pour l'oxygène dissous	127
Tableau 25 – Tableau comparatif des modélisation d'oxygène dissous en Loire et en Gironde	129

FIGURES

Figure 1 : Emprises des données topo-bathymétriques sur le domaine d'étude	11
Figure 2 : Zones où le LIDAR 2019 est supérieur au LIDAR 2008 + 0,5m	13
Figure 3 : MNT finalisé sur l'emprise globale du modèle.....	14
Figure 4 : Emprise globale du modèle sur fond orthophotographique	15
Figure 5 : Maillage "allongé" du chenal de navigation dans l'estuaire externe (à gauche) et raffinement progressif du maillage (à droite).....	16
Figure 6 : Maillage de l'estuaire interne au niveau de l'île de Nantes (en haut à gauche), au niveau des zones submersibles autour de Cordemais (en haut à droite) et à l'aval du pont de Oudon (en bas)	17
Figure 7 : Représentation du maillage vertical sur une coupe du chenal de navigation. En rouge : les plans à cote fixe. En noir : les plans sigmas	18
Figure 8 : Graphiques d'exemples de représentation dans le maillage de sections typiques	20

Figure 9 : Variations de niveaux à Saint-Nazaire et niveaux moyens reconstitués à partir des données de pression à Belle-Île et à Nantes	22
Figure 10 : Chroniques de débits à Montjean-sur-Loire, de 2000 à 2021	23
Figure 11 : Localisation des points d'injection des débits de l' Erdre et de la Sèvre nantaise	23
Figure 12 : Localisation des points de mesures	25
Figure 13 : Position de la crème de vase pour différents débits	27
Figure 14 : Exemple de graphique Q-Q plot au marégraphe de Saint-Nazaire	29
Figure 15 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 27/02/07 au 15/03/07	31
Figure 16 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 4000 m ³ /s	34
Figure 17 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 12/02/07 au 27/02/07	35
Figure 18 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 2500 m ³ /s	38
Figure 19 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 11/06/07 au 25/06/07	39
Figure 20 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 850 m ³ /s	42
Figure 21 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 08/08/07 au 23/08/07	43
Figure 22 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 400 m ³ /s	45
Figure 23 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 01/07/09 au 16/07/09	46
Figure 24 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 200 m ³ /s	49
Figure 25 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 16/08/09 au 31/08/09	50
Figure 26 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 150 m ³ /s	53
Figure 27 : Niveaux à Saint-Nazaire et débits à Montjean-sur-Loire lors de l'étiage sévère de 2019	56
Figure 28 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de juillet, août et septembre 2019	59
Figure 29 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période d'avril, mai et juin 2011	63
Figure 30 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de janvier, février et mars 2021	67
Figure 31 : Schématisation des longueurs de mélange avec fonction d'amortissement, ou avec le développement multicouches	69
Figure 32 : Position des mouillages durant la campagne d'octobre 2000	71
Figure 33 : Position des mouillages durant la campagne de janvier 2004	72
Figure 34 : Position des stations du réseau SYVEL	73
Figure 35 : Forçages du modèle Tomawac et points de mesure à la Lambarde et au Chatelier	75
Figure 36 : Principe de gestion du sol du modèle global	76
Figure 37 : Position des points de mesure de la vitesse de chute lors de la campagne de décembre 2000	77
Figure 38 : Position des points de mesure de la vitesse de chute lors de la campagne de mai 2008	78
Figure 39 : Position des points de mesure de la vitesse de chute lors de la campagne d'août 2008	78
Figure 40 : Vitesse de chute en fonction de la concentration (échelle Log-Log)	79
Figure 41 : Loi de vitesse de chute de type Thorn/Mehta proposée (échelle Log-Log)	79
Figure 42 : Ajout des mesures de vitesse de chute en laboratoire	80
Figure 43 : Ajout des mesures de vitesse de chute en laboratoire	80
Figure 44 : Lois finales utilisées dans le modèle 3D	81
Figure 45 : Taux d'érosion volumique en fonction de la contrainte hydrodynamique, Sanchez et al (2008) [9]	83
Figure 46 : Ajustement d'un fonction de rigidité initiale fonction de la concentration	84
Figure 47 : Vérification des contraintes critiques d'érosion calculées avec la loi de rigidité initiale proposée	84
Figure 48 : Ajustement de la loi de tendance du taux d'érosion	85
Figure 49 - Ajustement du taux d'érosion	86
Figure 50 : Schéma conceptuel montrant les mécanismes de mise en mouvement, Panagiotopoulos et al., 1997)	87

Figure 51 : Variation de la contrainte critique d'érosion en fonction de la fraction massique de vase (frvas) et de la concentration relative de vase (cv,rel) - figure issue de la thèse de Benoît Waeles, 2005 qui a donné suite à la publication Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011 [18]	87
Figure 52 : Discrétisation du sol et paramètres d'érosion	88
Figure 53 : Schéma de principe du modèle de consolidation	89
Figure 54 : Exemple de comparaison de profil de consolidation colonne/modèle pour une concentration initiale de 100 g/l et une hauteur de 1 mètre	90
Figure 55 : Concentration moyenne des colonnes ayant une hauteur initiale de 1 mètre (Hi : hauteur initiale et Ci : concentration initiale).....	91
Figure 56 : Concentration moyenne des colonnes ayant une concentration initiale de 100 g/l (Hi : hauteur initiale et Ci : concentration initiale).....	91
Figure 57 : Concentration moyenne des colonnes ayant une concentration initiale de 200 g/l (Hi : hauteur initiale et Ci : concentration initiale).....	92
Figure 58 –Lois de MES (Qjournalier) calées sur les mesures	93
Figure 59 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Montjean-sur-Loire	94
Figure 60 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Bellevue	94
Figure 61 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Trentemoult.....	95
Figure 62 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Bellevue	95
Figure 63 : Répartition spatiale des 7 classes de sédiment – source : projet EMODnet	96
Figure 64 : Définition des zones Maritime, Estuaire externe, Estuaire interne	97
Figure 65 : Répartition spatiale des 7 classes de sédiment projetée sur le maillage de Loire	97
Figure 66 : Définition des classes sédimentologiques (triangles de Folk)	98
Figure 67 : Définition des classes sédimentologiques simulées replacées dans le triangle de Folk.....	99
Figure 68 – Répartition spatial du diamètre moyen dans l'estuaire interne.....	100
Figure 69 : Année de référence simulée.....	102
Figure 70 – Évolution des paramètres Tmax, Tmin et T_phase en fonction du PK.....	108
Figure 71 – Cycle annuel de température de l'eau à Montjean-sur-Loire et aux 7 stations de l'estuaire ..	109
Figure 72 – Fraction visible du rayonnement incident à Donges à l'été 2019 (données ERA5).....	110
Figure 73 – Comparaison de l'intensité lumineuse disponible dans l'eau en fonction de deux profils de MES	111
Figure 74 – Variables d'état et flux du modèle d'oxygène dissous	112
Figure 75 – Relation entre la teneur en matière organique (MO) et le pourcentage de pélites (<63 µm) dans les sédiments prélevés en juillet 2008 et en octobre 2008, d'après [4]	113
Figure 76 – Relation entre la teneur en matière organique (MO) et MES d'après Thouvenin [13]	114
Figure 77 – Lumière disponible dans la colonne d'eau (gauche) et facteur de limitation par la lumière associée (droite). Rayonnement incident de 200 W m ⁻² , avec intensité lumineuse optimale de 86 W m ⁻²	118
Figure 78 – Cycle saisonnier en Chlorophylle a à la station de Montjean-sur-Loire	122
Figure 79 – Cycle saisonnier en ammonium à la station de Montjean-sur-Loire	122
Figure 80 – Cycle saisonnier en Chlorophylle a de la Sèvre nantaise à Vertou	123
Figure 81 – Cycle saisonnier en ammonium de la Sèvre au Vertou	123
Figure 82 – Cycle saisonnier en Chlorophylle a de l'Erdre à Nantes.....	124
Figure 83 – Cycle saisonnier en ammonium de l'Erdre à Nantes	124
Figure 84 – Comparaison du modèle NWS avec les observations en baie de Vilaine – Oxygène dissous ..	125
Figure 85 – Comparaison du modèle IBI avec les observations en baie de Vilaine – Oxygène dissous	126

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire (GIP LE) souhaite disposer d'un outil de modélisation hydrosédimentaire et de qualité des eaux (HSQE) de l'estuaire de la Loire et plus largement entre la Maine et la mer.

Cette modélisation s'appuie sur l'utilisation d'un logiciel de modélisation, auquel sont ajoutés des paramétrages et codage pour produire une représentation du fonctionnement de la Loire dans sa partie estuarienne. Le modèle ainsi construit doit permettre de réaliser des simulations, à partir de scénarios rétrospectifs ou prédictifs, et de produire des résultats sur un ensemble de jeu de paramètres, liés aux dynamiques hydraulique, sédimentaire et à la qualité des eaux du fleuve.

L'objectif initial de ce modèle dit « global » est de représenter la dynamique estuarienne hydrosédimentaire (niveaux, courant, houle, salinité, matières en suspension (MES) et crème de vase) et d'oxygène dissous à grande échelle. Il est basé sur le système Telemac-Mascaret, qui permet de coupler quatre modules Telemac-3d, Tomawac et Gaia et Waqtel suivant les besoins.

Ce modèle multi-paramètres a été calibré sur l'année hydrologique 2018-2019, pour laquelle de nombreuses mesures *in situ* étaient disponibles. Le présent rapport décrit la construction du modèle et sa calibration sur les différents processus représentés à ce jour.

Le modèle global hydrosédimentaire de l'estuaire est considéré comme calé (année hydrologique 2018-2019) et validé (année hydrologique 2017-2018 [19] via sa version raffinée en estuaire externe, en incluant les clapages et dragages). Le modèle global de qualité des eaux a été calé sur la période de l'été 2019, à la fois en estuaire externe et interne. Ce modèle reproduit les grandes tendances de l'évolution spatiale et temporelle d'oxygénation des eaux en fonction notamment du cycle de la marée, et du débit de la Loire.

Ce modèle peut être aisément utilisé pour tester la réponse à de nouveaux forçages. Il peut également servir de base pour tout autre modèle : modèle raffiné sur un lieu spécifique, ou alors complété par d'autres processus pour des objectifs différents ou pour une meilleure précision. Le modèle d'oxygène dissous peut en particulier faire l'objet d'évolutions suite à l'utilisation de nouveaux jeux de données. Il est attendu par exemple l'acquisition de mesures haute fréquence de la chlorophylle a dans le réseau SYVEL à Oudon et Thouaré-Saint-Julien dans les années à venir. Un capteur nutriments a aussi été installé en 2022 sur cette station de Thouaré-Saint-Julien et il est envisagé le test d'un capteur ammonium.

Ce modèle opérationnel de l'estuaire de la Loire peut maintenant être exploité pour étudier à l'échelle spatiale de l'estuaire les paramètres : niveaux d'eau, vitesses des courants, houle, salinité, MES, crème de vase et oxygène dissous tout en restant dans le cadre de l'objectif initial pour lequel il a été construit et validé.

1. CONSTRUCTION

L'objectif de cette partie est de détailler les étapes de construction du modèle (construction d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à partir des données existantes et construction du maillage).

1.1. MNT – MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

La première étape de construction concerne la mise en place d'un « patchwork » de topographie constituant notre modèle numérique de terrain à partir des données disponibles. En effet, il n'existe pas à la date d'octobre 2021 de topobathymétrie globale récente permettant de connaître les zones découvertes par basse mer de vives eaux.

1.1.1. Synthèse des données topographiques disponibles

Les sources de données bathymétriques et topographiques en entrée sont multiples et synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 1 – Description des données topo-bathymétriques

Nom de la donnée	Type de donnée	Producteur	Année de réalisation	Conditions de réalisation	Remarques
LIDAR 2019	Donnée LIDAR – Lit majeur	CD 44	2019	Mortes eaux et marées moyennes	
Bathymétrie et LIDAR 2008	Lit mineur et lit majeur	GIPLE	2008	Vives eaux et basses-mers pour le lit mineur	
Bathymétrie et LIDAR 2017	Lit mineur et lit majeur	GIPLE	2017	Bathymétrie d'étiage	Bathymétrie sur une emprise très restreinte en largeur : trous entre LIDAR et bathymétrie
Bathymétrie 2013	Lit mineur	GIPLE	2013	Bathymétrie de crue	
Litto 3D	Lit majeur	IGN	2010		
MNT VNF	Lit mineur et lit majeur	VNF	2009	Bathymétrie pour des débits d'étiage jusqu'à 1500 m ³ /s	
Bathy GPMNSN	Bathymétrie chenal de navigation et zone étendue de la Lambarde	GPMNSN	2019-2021 et 2011		

Les emprises globales de ces données sont synthétisées sur les cartes ci-après :

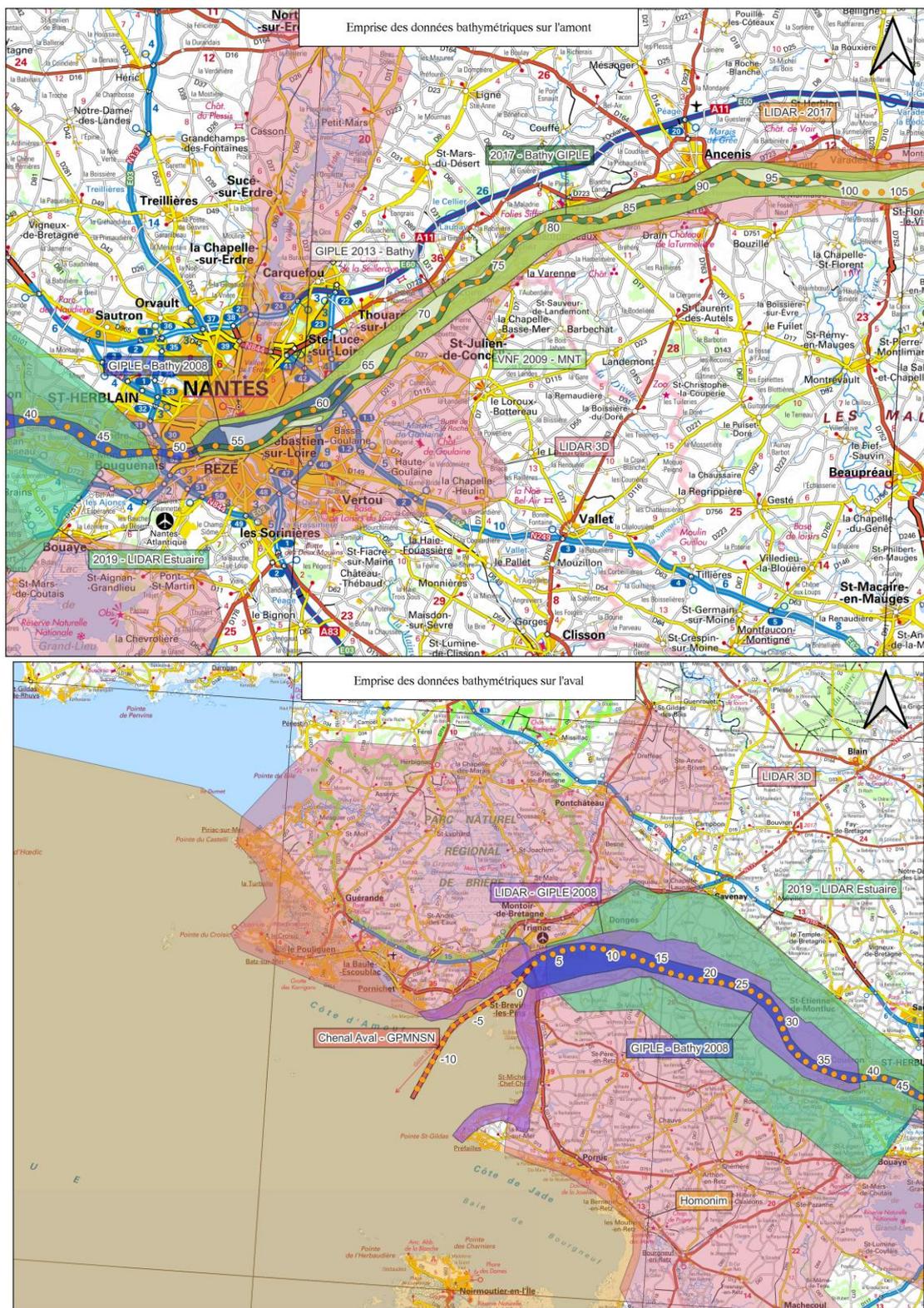


Figure 1 : Emprises des données topo-bathymétriques sur le domaine d'étude

1.1.2. Choix des données pour la construction du MNT

L'analyse et la comparaison des différentes données présentées précédemment ont fait l'objet d'une réunion spécifique (cf. Note technique GIPLE du 06/10/2021 Expertise_MNT_Vdef.pdf).

Par souci de cohérence entre les sources, et pour éviter au maximum les discontinuités altimétriques (effets de marche d'escalier) pouvant survenir lors de la combinaison de sources trop différentes, le GIPLE et ARTELIA ont convenu de l'utilisation des données suivantes pour la définition du MNT global :

- Pour la zone allant de Saint-Nazaire à Nantes, par ordre de priorité :
 1. utilisation de la bathymétrie de 2008 ;
 2. Superposée au LIDAR de 2008 uniquement localement et pour les surfaces marnantes (pour éviter un effet d'escalier avec le LIDAR 2019)
 3. Superposée au LIDAR 2019 pour l'ensemble du lit majeur.
- Pour la zone allant de Nantes à la limite amont du modèle :
 1. Bathymétrie et LIDAR VNF 2009 ;
 2. Superposés à Litto 3D 2010 pour le lit majeur non couvert par le MNT VNF
- Pour l'estuaire externe : utilisation du MNT HOMONIM produit par le SHOM, écrasé localement par les données du GPMNSN pour le chenal de navigation aval et pour la zone d'influence de la Lambarde.

1.1.3. Détails du traitement des données

1.1.3.1. Traitement des données sur la zone amont

Le partie amont du modèle est fortement restreinte au lit mineur de la Loire. Les zones non couvertes par le MNT VNF de 2009 sont donc limitées.

Peu de traitement a donc été nécessaire sur cette zone. Les zones complétées par le Litto 3D en lit majeur ne conduisent pas à un effet de marche d'escalier (l'emprise du MNT VNF est suffisamment large pour que le raccord se fasse sur des zones où les fonds sont similaires, de plus les années de réalisation de ces deux sources sont proches).

1.1.3.2. Traitement des données sur la zone aval

À l'inverse de la portion amont, l'aval du modèle inclut de larges zones situées en lit majeur de la Loire, et contenant un certain nombre d'étiers.

Une combinaison sans traitement de la bathymétrie de 2008 avec le LIDAR 2019 conduirait à de nombreux effets de discontinuité altimétrique en haut des berges. Afin de se prémunir de cet effet, le LIDAR de 2008 est appliqué de manière locale et limitée, afin de compléter la bathymétrie jusqu'à une zone où l'écart topographique avec le LIDAR 2019 est « acceptable ».

Dans un premier temps, un calcul des écarts entre LIDAR 2008 et LIDAR 2019 est donc réalisé. Un filtre est ensuite appliqué pour ne retenir que les zones où la topographie LIDAR 2019 est supérieure à celle de 2008 + 0,5 m. Ce choix de 0,5 m est arbitraire, mais permet de réduire les effets de discontinuité de manière efficace, tout en conservant la source de topographie la plus récente sur une large emprise. À titre d'exemple, la figure ci-dessous représente les zones où l'écart entre les deux sources est supérieur à 0,5 mètre dans le secteur de Donges-Paimbœuf.



Figure 2 : Zones où le LIDAR 2019 est supérieur au LIDAR 2008 + 0,5m

Ces zones représentent bien comme attendu, les surfaces marnantes aux abords de la Loire et de ses étiers. À l'extérieur de ces zones en lit majeur, c'est donc le LIDAR 2019 qui est appliqué.

1.1.3.3. Traitement des données sur l'estuaire externe

La partie externe de l'estuaire est construite en superposant au MNT HOMONIM les données du GPMNSN, à savoir la bathymétrie sur la zone d'influence de la Lambarde (datant de 2011) et la bathymétrie du chenal aval de navigation (datant de 2019 pour la portion la plus à l'amont, et 2021 pour les portions en aval). Le raccord entre HOMONIM et ces sources de données se fait sans souci majeur de discontinuité.

1.1.4. Présentation du MNT finalisé

Le modèle numérique de terrain finalisé sur l'emprise complète du modèle est présenté sur la figure suivante. Ce MNT est construit dans la référence altimétrique correspondant au zéro hydrographique à Saint-Nazaire (-3.16 m IGN69).

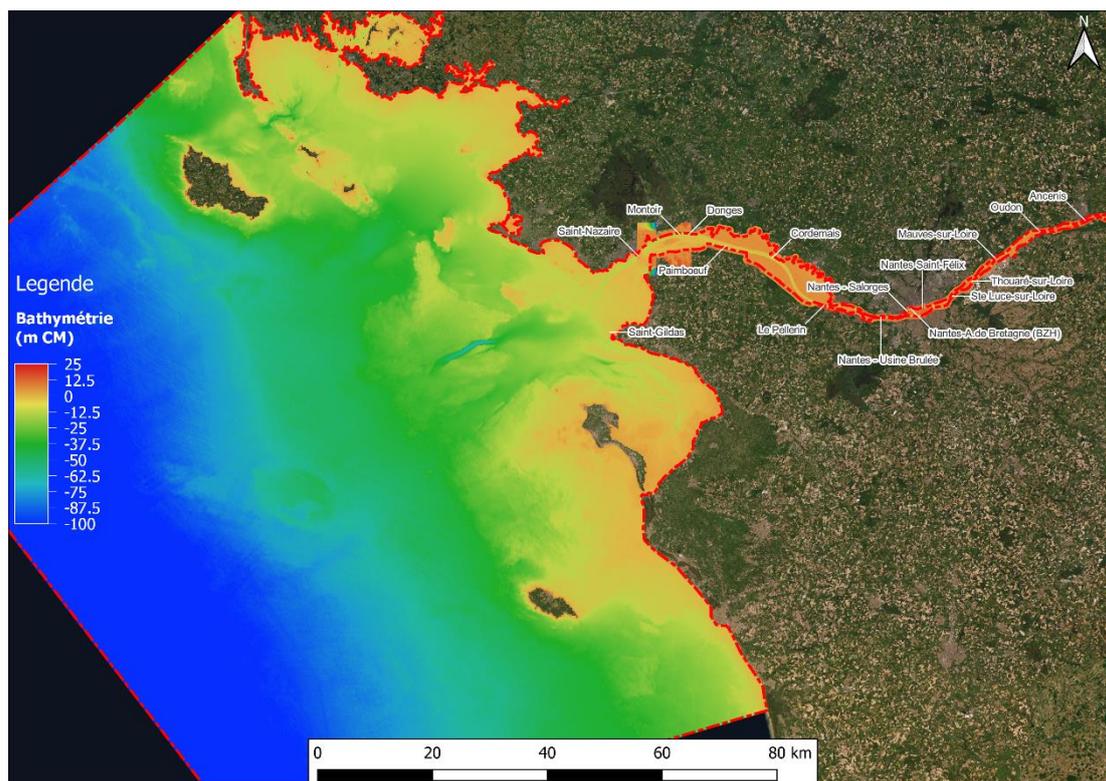


Figure 3 : MNT finalisé sur l'emprise globale du modèle

Des vues plus détaillées sont fournies en Annexe 1.

1.2. MAILLAGE

1.2.1. Définition de l'emprise du modèle

1.2.1.1. Emprise globale

À l'amont du modèle, la limite est fixée au point kilométrique (PK) 99. Dans cette zone, la Loire n'est constituée que d'un seul bras et n'est plus influencée par la marée dynamique.

Concernant la frontière maritime, elle est élargie afin de limiter les sorties de MES (Matières En Suspension) par les frontières et permet d'inclure les dépôts vaseux existants sur les fonds. Le Mor-Braz, l'estuaire de la Vilaine et la zone de clapage de la Lambarde sont donc incluses dans cette nouvelle emprise. Le modèle est limité au Nord par la baie de Quiberon, et au Sud par Les Sables d'Olonne.

L'emprise globale retenue du modèle est visible sur la figure ci-après.

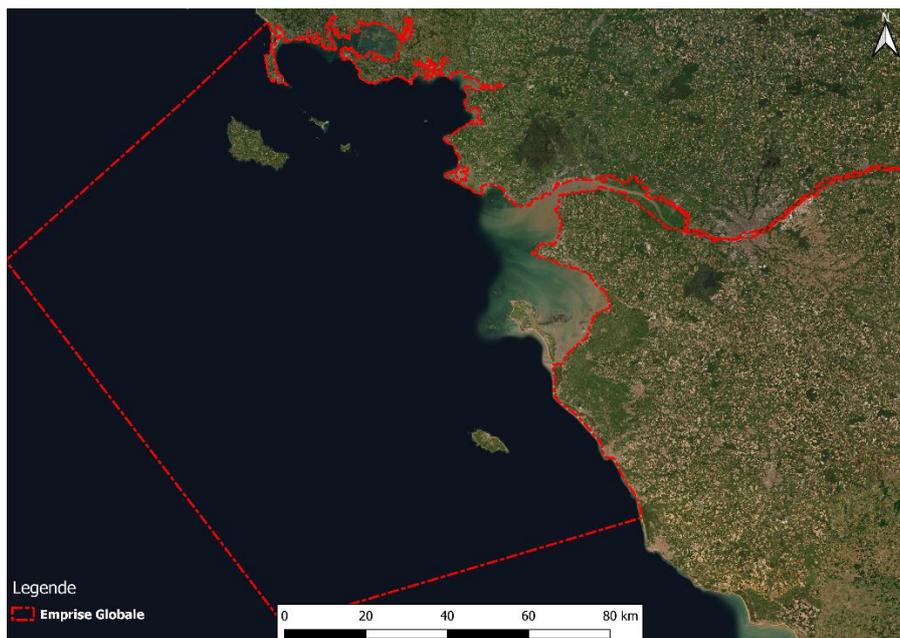


Figure 4 : Emprise globale du modèle sur fond orthophotographique

1.2.1.2. Emprise latérale

Dans l'estuaire interne, l'emprise latérale du modèle varie selon le point kilométrique considéré. En effet, le modèle global, tel que construit, n'a pas pour vocation de représenter précisément l'ensemble du lit majeur de la Loire sur la totalité de l'emprise, notamment pour les points kilométriques très amont. Pour une utilisation future du modèle avec comme objectif une thématique purement inondation, ce point devra être affiné.

Sur la portion située à l'aval de Nantes, le modèle inclut l'ensemble des zones qui sont fréquemment submergées par les marées de vives eaux. Ces zones submersibles sont pour la plupart situées en dessous de l'isocote 2,70 m IGN69. Afin de s'assurer d'avoir une emprise suffisante, l'emprise latérale sur cette zone est basée sur l'isocote topographique 3,50m IGN69, et est donc située 0,8m au-dessus de l'isocote préconisée pour la zone submersible.

1.2.2. Méthode et critères de maillage

1.2.2.1. Méthode pour le maillage horizontal

1.2.2.1.1. Maillage de l'estuaire externe

Le maillage de l'estuaire externe est adapté à la représentation des principales îles du secteur et du trait de côte. Les zones localement plus profondes sont représentées par des lignes associées aux courbes de niveaux, ce qui permet de bien prendre en compte les variations de fond, tout en conservant des pentes raisonnables.

Un cercle de 8 kilomètres autour du site de clapage de la Lambarde est également intégré au modèle. Il permettra une réalisation facilitée et plus juste du modèle raffiné du site de la Lambarde, dont les limites s'appuieront sur ce cercle.

Enfin, le chenal de navigation est représenté avec des mailles allongées dans le sens de la navigation. Cette technique de maillage permet de représenter les sections d'écoulement avec une bonne densité de point latérale, tout en conservant une densité longitudinale assez faible afin d'optimiser les durées des calculs.

Concernant les densités de mailles, les valeurs suivantes sont retenues :

- au large, au niveau de la frontière maritime, maille de 2,5 kilomètres ;

- raffinement progressif (le facteur d'agrandissement/de rétrécissement entre deux mailles successives n'excède pas 10%) autour des zones d'intérêt : îles, trait de côte, chenal de navigation :
 - trait de côte à 250 mètres ;
 - zone proche de la côte à 400 mètres ;
 - chenal de navigation : maillage allongé, taille longitudinale de 250 mètres, taille latérale de 100 mètres.

Les figures ci-après représentent le maillage du chenal de navigation dans l'estuaire externe et une vue du raffinement progressif du maillage, depuis la frontière maritime jusqu'aux zones d'intérêt.

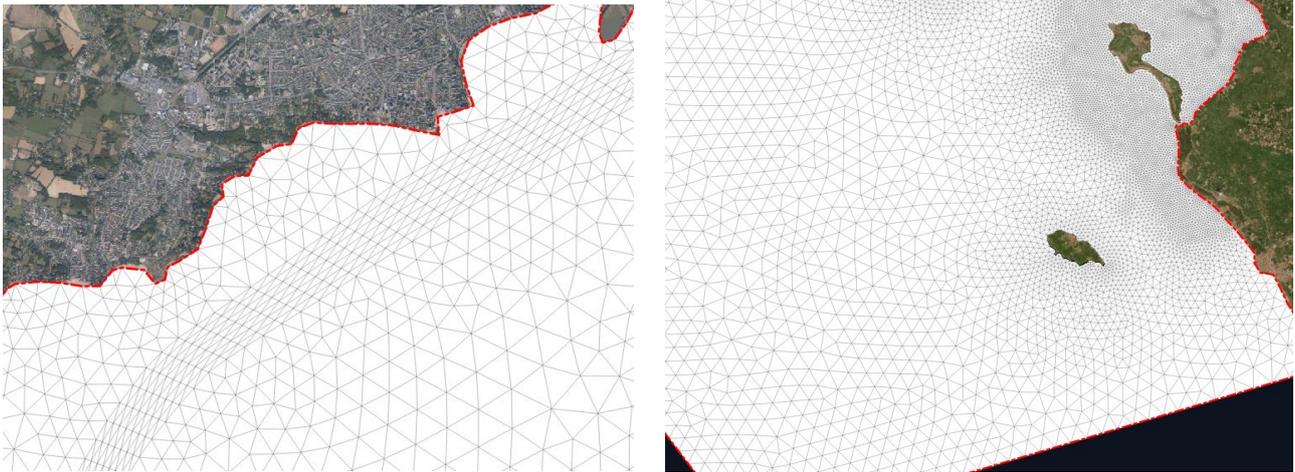


Figure 5 : Maillage "allongé" du chenal de navigation dans l'estuaire externe (à gauche) et raffinement progressif du maillage (à droite)

1.2.2.1.2. Maillage de l'estuaire interne

L'estuaire interne se décompose en deux zones :

- la portion située à l'aval de Nantes, comprenant de larges zones submersibles fréquemment submergées par les marées de vives eaux, principalement en rive droite de la Loire et de nombreux étiers ;
- la portion située à l'amont de Nantes pour laquelle le modèle est restreint au lit mineur de la Loire, avec quelques extensions locales sur des zones identifiées comme champs d'expansion de crues pouvant participer à l'écoulement longitudinal.

Pour ces deux zones, le lit mineur est maillé de manière identique, seul le raffinement évolue (moins raffiné sur l'amont du modèle). Le maillage est similaire à celui réalisé pour le chenal de navigation: un maillage allongé dans le sens de l'écoulement permettant de représenter fidèlement les sections d'écoulement, tout en conservant une taille de maille selon l'axe longitudinal suffisamment grande pour ne pas réduire de manière trop importante les temps de calcul. Le facteur d'allongement en lit mineur est compris entre 2 et 3. Un effort de continuité des tailles de mailles longitudinalement dans le lit mineur a été réalisé, afin de ne pas ralentir l'ensemble du calcul à cause d'un raffinement local dû à la jonction entre deux bras par exemple. Cette continuité est illustrée sur la Figure 6 ci-après.

Dans les zones submersibles entre Nantes et Donges, les étiers sont représentés de manière grossière (dans le modèle global) par une ligne passant par les points bas de ces derniers. Le raffinement de cette ligne dépend des contraintes présentes autour des étiers.

Sur la portion amont du modèle, de manière générale, le modèle est restreint au lit mineur, permettant d'éviter la présence de trop nombreux secteurs mis en eau uniquement lors des fortes crues. Certaines zones du lit majeur sont toutefois représentées dans les secteurs où elles paraissent les plus importantes. Une telle zone a notamment été identifiée à l'aval du pont d'Oudon.



Figure 6 : Maillage de l'estuaire interne au niveau de l'île de Nantes (en haut à gauche), au niveau des zones submersibles autour de Cordemais (en haut à droite) et à l'aval du pont de Oudon (en bas)

Les principaux ouvrages sont également intégrés au modèle sous la forme de deux lignes de contraintes à cote constante. Les cotes de crête sont issues du MNT. La largeur des crêtes de ces ouvrages n'est pas respectée par souci de restriction en termes de taille de maille minimale (les ouvrages tels que représentés présentent des crêtes plus larges que les ouvrages réels).

Le **maillage horizontal** final ainsi réalisé contient **environ 55 000 nœuds** (contre 7 000 nœuds dans le modèle précédent (modèle ARTELIA développé pour le GIP LE de 2008 à 2012) et **105 000 éléments**.

L'ensemble du maillage et de la bathymétrie projetée sur celui-ci sont présentés en **Annexe 1**.

Notons qu'une étape d'adoucissement des pentes a également été réalisée. Cette étape vise à réduire localement les pentes dans les zones où elles sont trop fortes et peuvent donc engendrer des instabilités numériques. **L'ajustement des pentes se fait en conservant la section hydraulique**. Les ouvrages ne sont pas concernés par cet ajustement, afin de conserver les bonnes valeurs de points haut en crête.

1.2.2.2. Méthode pour le maillage vertical

La répartition des plans du maillage vertical a été pensée pour représenter au mieux les phénomènes de stratification et donc des zones à fort gradient. Afin d'optimiser au mieux cette répartition, des tests ont pu être effectués sur le précédent modèle pour vérifier la non-dégradation des résultats en fonction des choix effectués.

Le maillage vertical retenu est composé de 12 plans avec deux types de méthodes combinées.

- Des plans à cote fixes ;
- Des plans sigmas qui se répartissent entre deux plans fixes de manière proportionnelle suivant un coefficient fixé pour chaque plan ;
- Les plans qui croisent le fond ou la surface s'écrasent avec une épaisseur minimale de 0,5 m entre chaque plan. Lorsque la hauteur d'eau est inférieure à 5,5 m (11 couches de 0,5 m correspondant à 12 plans), le maillage vertical se retrouve en configuration sigma généralisé, c'est-à-dire que tous les plans sont répartis de manière équidistante entre la surface libre et le fond. Lorsqu'il y a très peu d'eau, les 12 plans sont donc toujours calculés, ce qui a permis par exemple dans le projet C3E2 [21] d'obtenir de très bons résultats sur des zones submersibles ou étiers, sans avoir remodifié l'ensemble du modèle.

Ci-dessous sont représentés une visualisation du maillage vertical sur une coupe verticale dans le chenal de navigation, pour une configuration à pleine mer et une configuration à basse mer.

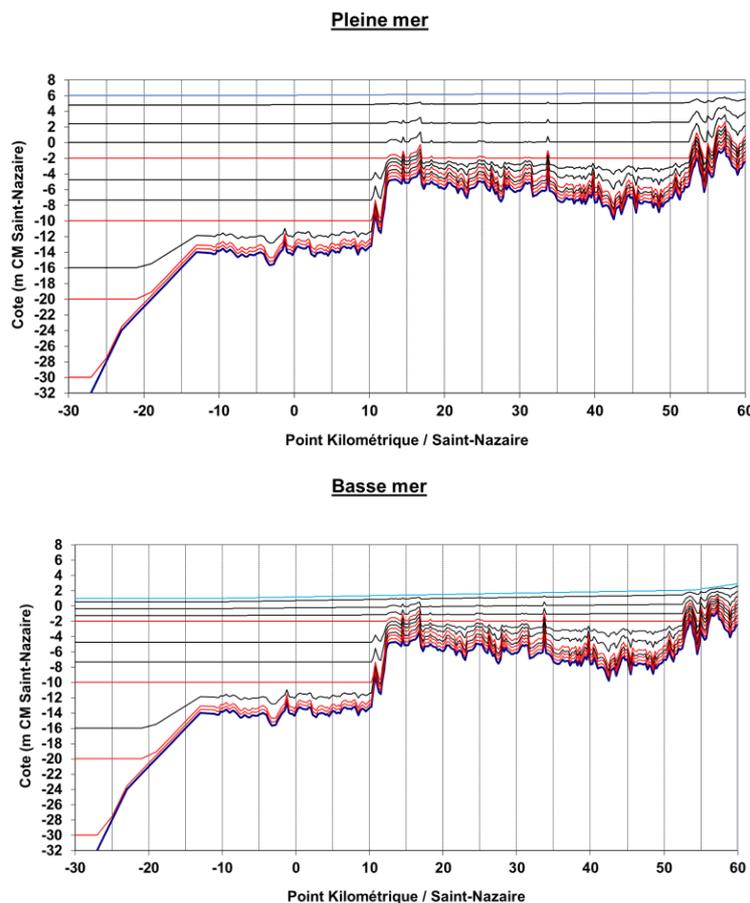


Figure 7 : Représentation du maillage vertical sur une coupe du chenal de navigation. En rouge : les plans à cote fixe. En noir : les plans sigmas.

Le maillage 3D final ainsi réalisé comprend environ 655 000 nœuds.

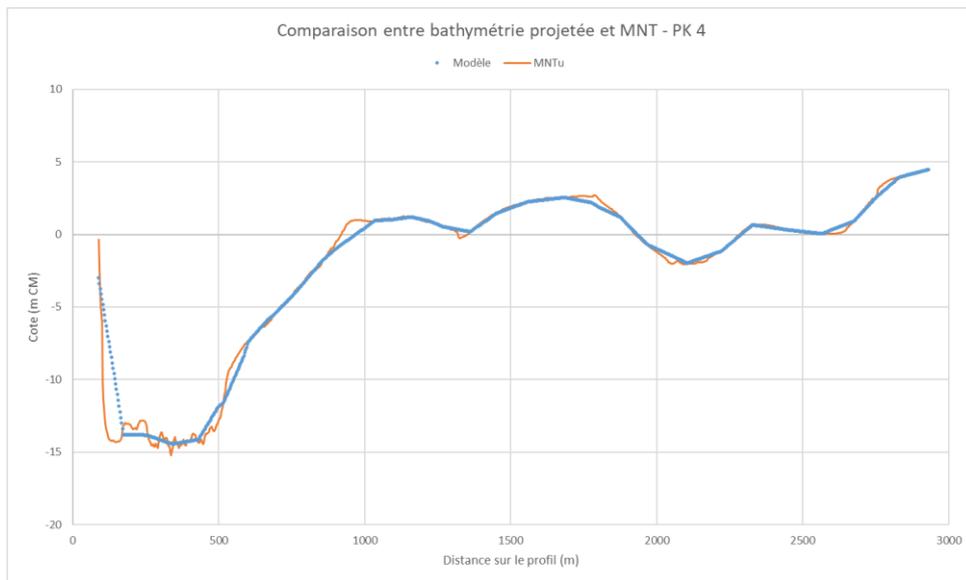
1.2.3. Validation du maillage

Une étape de validation du maillage a été réalisée, afin de s'assurer de la bonne représentation de la bathymétrie après la projection.

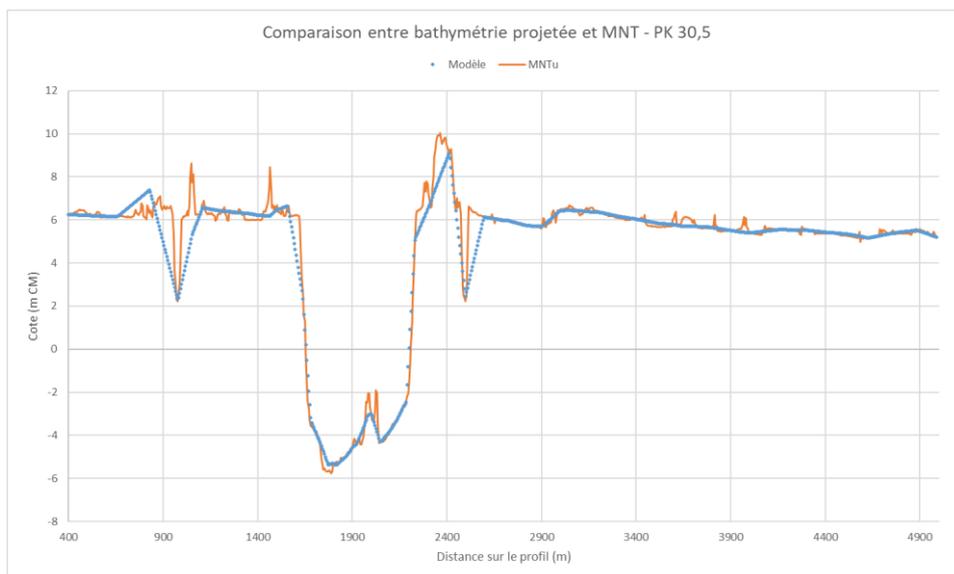
Une série de graphiques comparatifs ont donc été réalisés à cet effet. Ils permettent de vérifier la cohérence entre les sections issues du MNT, et les sections issues du MNT projeté sur le maillage.

Plusieurs graphiques représentatifs de zones distinctes sont visibles sur la figure Figure 8 suivante.

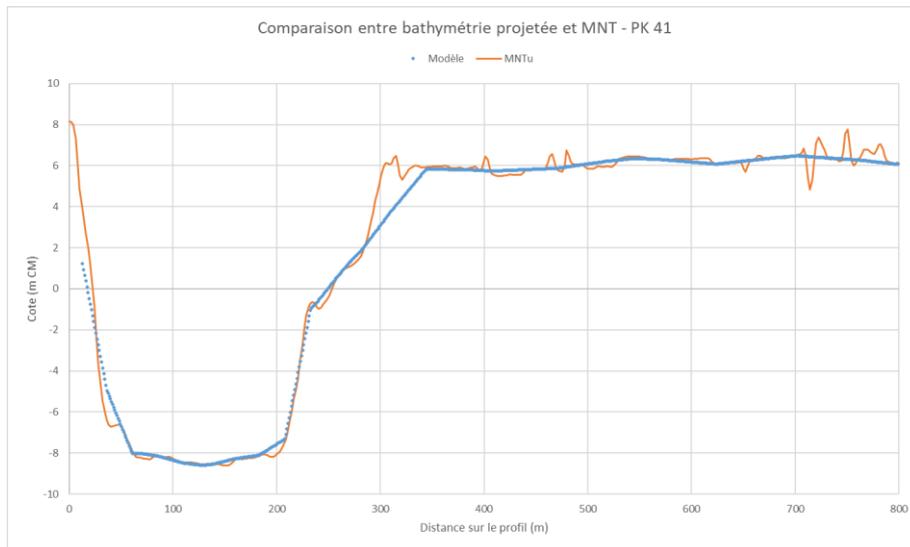
graphique 1 :



graphique 2 :



graphique 3 :



graphique 4 :

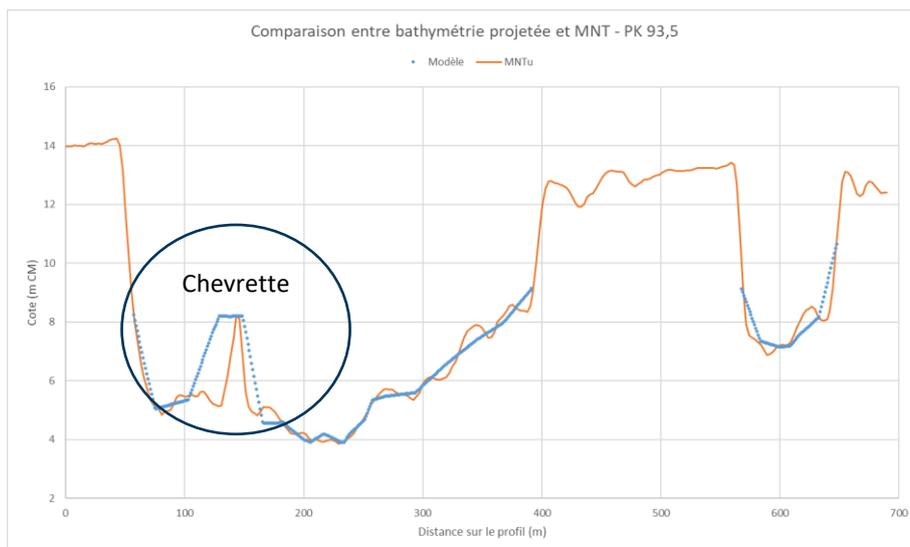


Figure 8 : Graphiques d'exemples de représentation dans le maillage de sections typiques

Le raffinement latéral utilisé avec le maillage « allongé » du lit mineur apparaît donc suffisant pour la représentation des sections hydrauliques. Le premier graphique de la figure ci-dessus illustre la bonne représentation du secteur de Bilho avec les chenaux secondaires maillés finement.

Le second graphique illustre la représentation des étiers décrite précédemment. Les points bas sont conservés, au détriment de la section réelle d'écoulement.

Le troisième graphique présente un secteur avec prise en compte du lit majeur et le chenal de navigation.

Enfin, le quatrième graphique symbolise la représentation des seuils dans le modèle et met en lumière ses limites, avec une largeur et des pentes altérées par rapport à la réalité.

2. FORÇAGES POUR L'HYDRODYNAMIQUE

2.1. MARÉE ASTRONOMIQUE

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 modèle de marée inclut les 32 ondes suivantes : M2, K1, S2, N2, K2, 2N2, O1, P1, Q1, S1, L2, Mu2, Nu2, R2, T2, E2, J1, La2, M4, M6, M8, MN4, MS4, M3, MKS2, N4, S4, Mf, Mm, Mtm, MSf, Ssa. Ces ondes sont les principales ondes générant la marée astronomique dans le golfe de Gascogne.

Ce signal est recomposé autour d'un niveau moyen qui varie avec la pression (cf. 2.2.1)

2.2. FORÇAGES MÉTÉOROLOGIQUES

2.2.1. Pression-niveau-moyen

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.

Au stade du modèle global, la variation temporelle est suffisante pour reproduire la dynamique estuarienne (ce qui sera vérifié et quantifié sur la calibration / validation des différents marégraphes). Cela n'empêchera pas dans un contexte précis de tempêtes exceptionnelles ou problématiques de submersion (modélisation d'une tempête du type Xynthia par exemple) de tenir compte de la variation spatiale du champ de pression dans des modélisations complémentaires.

L'analyse des données de pression mesurées à Belle-Île et Nantes montre qu'entre 2000 et 2021 l'écart de niveau du champ de pression entre les deux sites est en moyenne inférieur à 1 cm et est 99% du temps inférieur à 3,5 cm. Le maximum observé durant ces 21 ans est de 13,2 cm pour un événement exceptionnel.

La figure qui suit présente les variations de niveaux au marégraphe de Saint-Nazaire, superposées à la reconstitution des variations du niveau moyen à partir des données de pression à Belle-Île et Nantes.

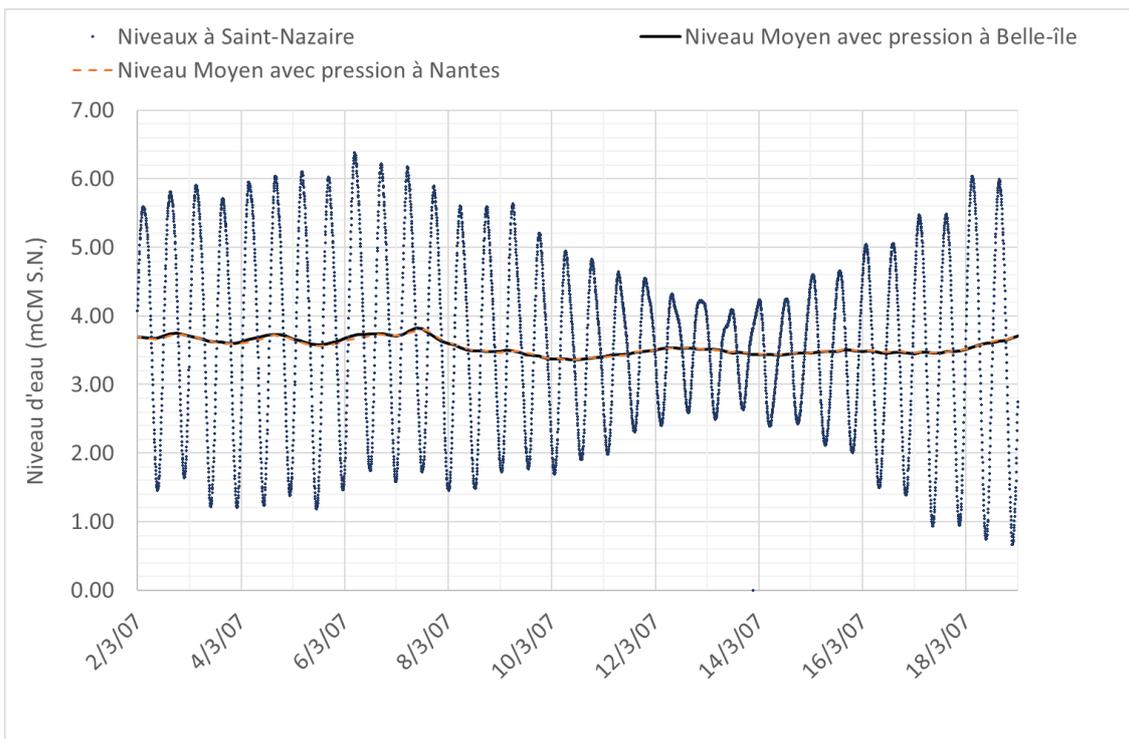


Figure 9 : Variations de niveaux à Saint-Nazaire et niveaux moyens reconstitués à partir des données de pression à Belle-Île et à Nantes

2.2.2. Vent

Les variations temporelles et spatiales du vent sont prises en compte dans ce modèle. Les données de vent (valeurs d'intensité selon x (l'Est) et y (le Nord)) sont **extraites depuis la base de données HOMERE (Ifremer) (ou IOWAGA (ERC) pour 2021)**. 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 (tri-horaire pour 2021).

Des grilles de vent dont les points sont donc identiques à ceux du maillage sont ainsi construites et utilisées lors des simulations.

Le vent est pleinement pris en compte du large jusqu'au PK13 et s'atténue jusqu'au PK40, limite de la donnée disponible dans la grille de vent. De plus, à partir de ce PK la zone latérale de l'estuaire devient plus restreinte et les effets météorologiques deviennent négligeables dans l'estuaire interne où les effets de stratification haline et turbide conjugués à la marée et aux débits de la Loire sont prépondérants.

2.3. DÉBIT LIQUIDE

Les débits cumulés de la Loire à Montjean-sur-Loire et de l'Èvre sont imposés sur la frontière amont du modèle. Ces débits moyens journaliers sont disponibles de 2000 à 2021. Les variations temporelles des débits sur cette période sont présentées dans la figure ci-dessous.

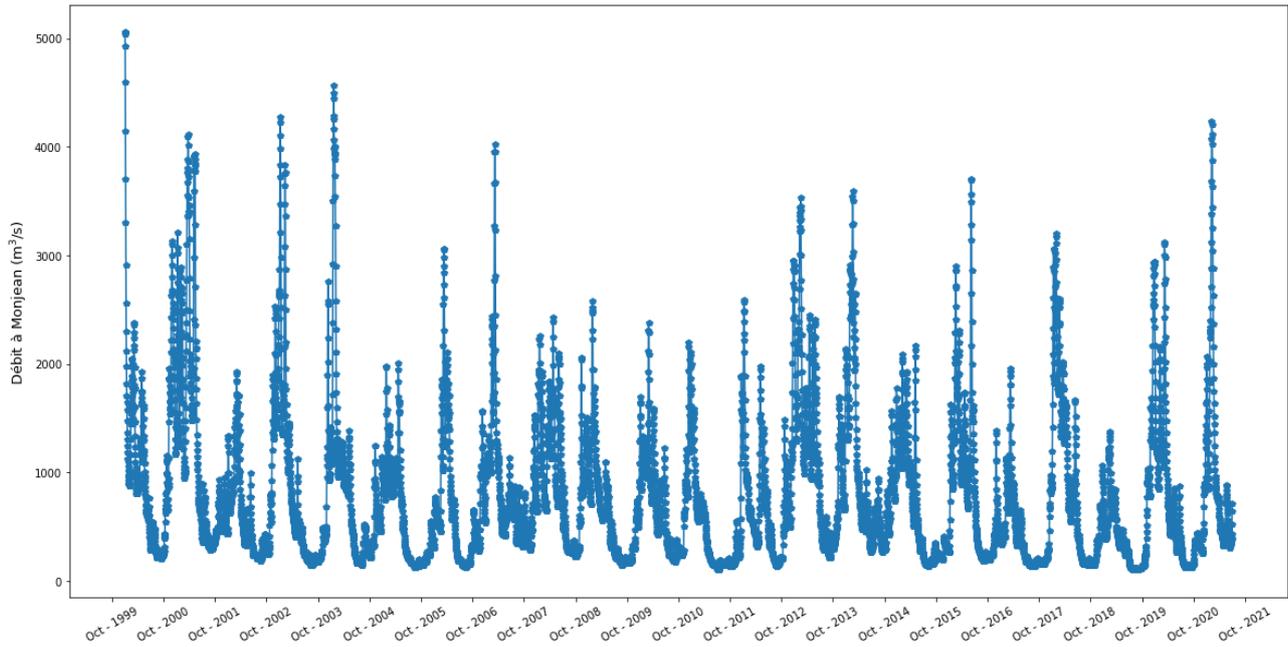


Figure 10 : Chroniques de débits à Montjean-sur-Loire, de 2000 à 2021

En complément, les débits des deux principaux affluents que sont l'Erdre et la Sèvre nantaise sont injectés dans le modèle dans le secteur de Nantes. Les chroniques de débit journalier sont également disponibles de 2000 à juillet 2021. Les points d'injection de ces débits sont visibles sur la figure ci-dessous.

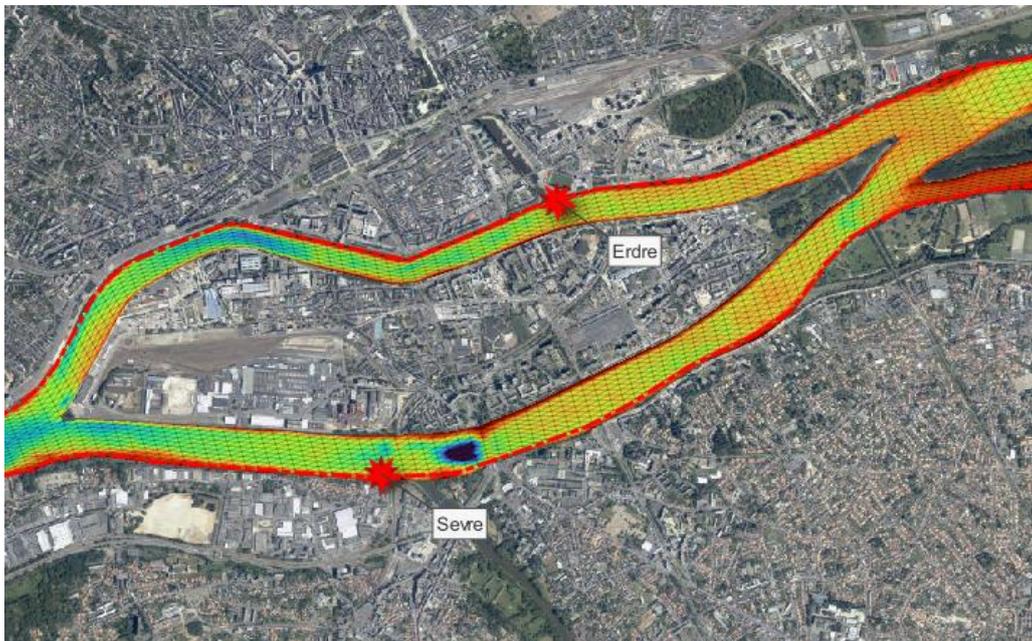


Figure 11 : Localisation des points d'injection des débits de l'Erdre et de la Sèvre nantaise

3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE

La calibration des niveaux d'eau le long de l'estuaire s'effectue sur des périodes de 15 jours, sur lesquelles l'intérêt est porté principalement à une plage de 24h pour laquelle le débit à Montjean-sur-Loire est quasi-constant et le signal de marée d'une vive eau modélisée à Saint Nazaire est bien représenté. Ainsi, le frottement calibré dans l'estuaire, ne cherche pas à corriger une erreur de forçage à l'entrée de l'estuaire, mais uniquement à calibrer la propagation de la marée. Cette calibration des coefficients de frottement est ajustée spatialement pour chacun des 6 débits testés : 150, 200, 400, 850, 2500 et 4000 m³/s.

Il est à rappeler ici l'importance que peut jouer le rôle de la crème de vase dans la modification du frottement à l'intérieur d'un estuaire et la façon dont ce phénomène peut être pris en compte dans la modélisation (Hamm L. and Walther R., 2008, Walther R et al. 2012).

Le calage du frottement est effectué, en premier lieu, sur une période de débit de crue important (4000 m³/s) pour permettre de caler les valeurs des coefficients de frottement de la manière la plus réaliste possible sur un estuaire où le bouchon vaseux est situé le plus à l'aval, voire expulsé et a donc peu ou pas d'influence sur le frottement.

Dans un second temps, le calage est réalisé sur les périodes de débits plus faibles, pour lesquels le frottement défini précédemment en débit fort est conservé, mais adapté. Ainsi, pour chacun des autres débits considérés, une nouvelle valeur du frottement est définie au niveau des zones où la présence de crème de vase est envisagée. Sur la partie amont, la carte de frottement peut cependant varier avec le débit, bien qu'il n'y ait pas de présence de vase, pour soit représenter des pertes de charges ou l'influence du lit majeur, soit des modifications possibles du fond (formes de fond, changement de bathymétrie entre étiage et crue).

Le calage est effectué ainsi sur six périodes réelles représentatives des débits suivants : 150, 200, 400, 850, 2500 et 4000 m³/s.

3.1. MISE EN PLACE DES ZONES DE FROTTEMENT

3.1.1. Frottement considéré dans l'hypothèse de fonds sans crème de vase

3.1.1.1. Frottement longitudinal

Des mesures sont disponibles aux différents marégraphes/limnigraphes du secteur d'étude (pouvant varier suivant la période modélisée) :

- PK -10 Saint-Gildas
- PK -0.5 : Saint-Nazaire
- PK 8 : Montoir-de-Bretagne
- PK 9 : Donges
- PK 16.5 : Paimbœuf
- PK 25 : Cordemais
- PK 38 : Le Pellerin
- PK 48 : Nantes - Usine Brûlée
- PK 53 : Nantes - Salorges

- PK 54 : Nantes-A.de Bretagne (BZH)
- PK 56 : Nantes Saint-Félix
- PK 61 : Sainte Luce-sur-Loire
- PK 65 : Thouaré-sur-Loire
- PK 70 : Mauves-sur-Loire
- PK 81 : Oudon
- PK 89 : Ancenis

Ces différents points de mesures sont localisés sur la figure suivante.

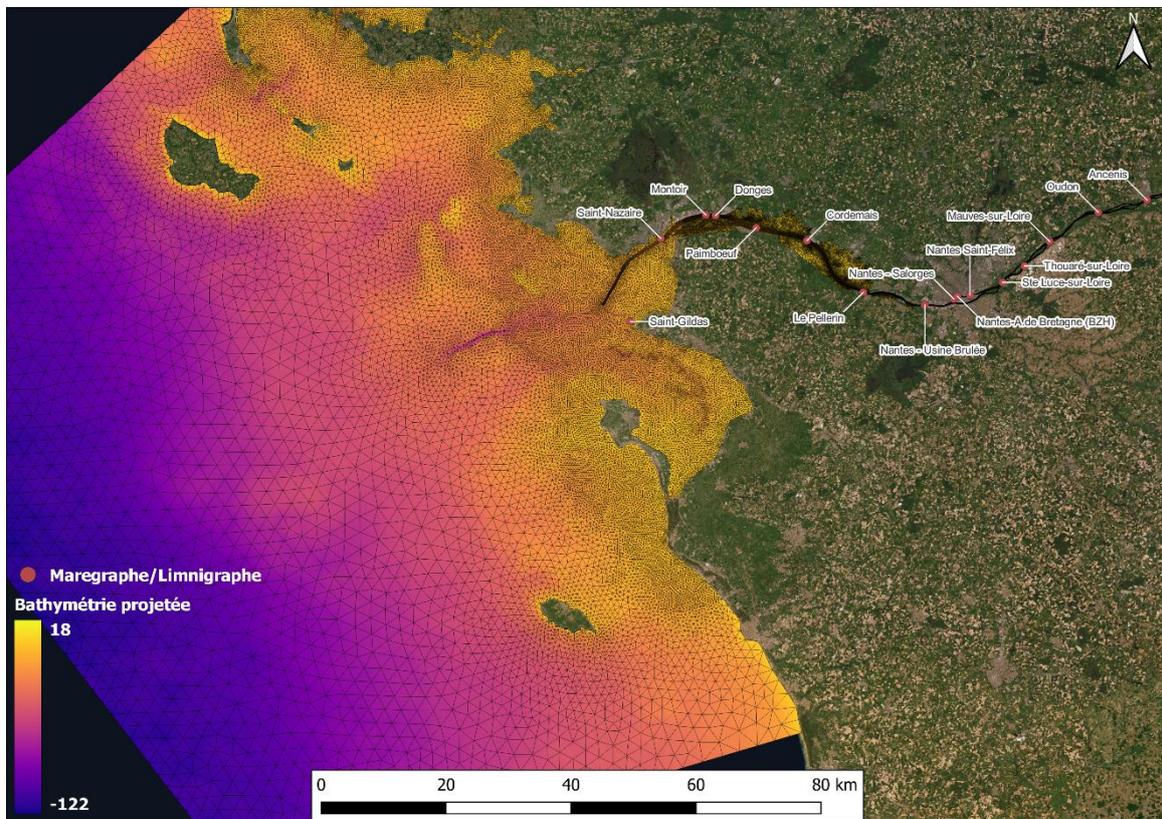


Figure 12 : Localisation des points de mesures

Les nombreuses données marégraphiques et limnigraphiques disponibles définissent les zones de frottement. Entre le PK99 et Saint-Nazaire, 14 mesures distinctes et suffisamment éloignées les unes des autres sont disponibles pour assigner une valeur de frottement à chacun de ces lieux.

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

3.1.1.2. Frottement sur les zones submersibles

Bien que l'étude du modèle historique de 1947 ait montré que la variation de frottement sur les estrans n'a pas d'influence significative sur les niveaux d'eau dans le lit mineur, il est appliqué **sur les zones submersibles un frottement**

qui dépend de la végétation et qui a permis une validation correcte des écoulements lors du projet C3E2. Les valeurs de rugosité mises en jeu sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 - Hauteur de rugosité équivalente de Nikuradse pour les étiers, prairies et roselières

Nature du fond	Etiers (vaseux)	Prairies	Roselières
Nikuradse (m)	0,00087	0,2	0,4

3.1.2. Prise en compte de la crème de vase

La prise en compte de la crème de vase implique d'imposer un coefficient de frottement, en fonction du débit de la Loire, moindre au niveau de la zone sur laquelle sa présence est supposée.

Il a été retenu la valeur du coefficient de Nikuradse apparent mesuré sur de la vase du port de Trentemoult dans un canal expérimental (Sanchez 2008, Erosion d'une vase de l'estuaire de la Loire sous l'action du courant) est de : **0,00087 m**.

3.1.2.1. Emprise latérale

En plus d'appliquer un frottement représentatif de la présence de crème de vase au fond du lit mineur, il est fait de même sur toutes les zones marnantes situées de part et d'autre du lit mineur, depuis l'aval de Bilho jusqu'à Nantes, **entre les cotes -2,0 m CM et +5 m CM afin de représenter des estrans plutôt vaseux**.

Au fond du lit mineur, l'application du frottement représentatif de la présence de crème de vase suppose avant tout de définir l'emprise latérale de la crème de vase en fonction de sa position le long de l'estuaire. La définition de cette emprise latérale se fait par l'intermédiaire d'une **cote limite en dessous de laquelle est appliquée ce frottement moindre**. Les cotes retenues sont les suivantes :

Tableau 3 - Emprise latérale de la crème de vase

PK	-15	-10	-5	2	11	15	17	60	>60
Cote limite crème de vase (m CM)	-12.0	-9.0	-7.0	-7.0	-4.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0

Entre chacun de ces PK, la cote limite est ensuite interpolée à partir des valeurs encadrantes.

3.1.2.2. Emprise longitudinale

Il est ensuite nécessaire de définir, pour chaque débit considéré, l'emprise longitudinale sur laquelle il est supposé la présence de crème de vase. Un travail référençant la position de la crème de vase en fonction du débit de la Loire a été réalisé par HOCER pour le GIP LE, dans son étude : « Analyse des données relatives à la crème de vase de l'estuaire de la Loire, 2009. Il a été utilisé une position découlant à la fois des résultats de cette étude (bandes d'échosondeur) et de positions théoriques connues dans la littérature.

3.1.2.2.1. Limite amont

La limite amont de crème de vase utilisée découle donc de celle matérialisée en marron sur le graphique ci-dessous, sauf pour les débits 800 et 2000 m³/s pour lesquels elle correspond désormais au PK le plus faible des observations faites pour ces débits :

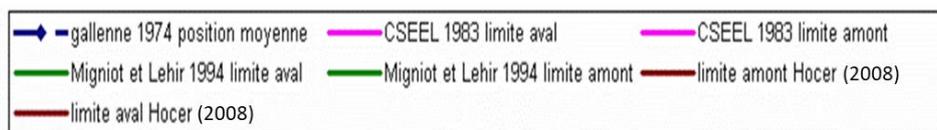
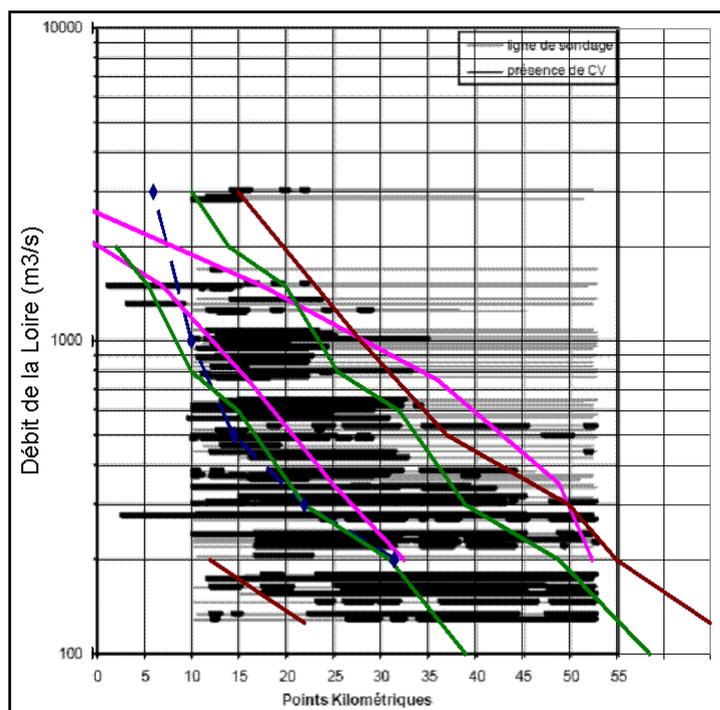


Figure 13 : Position de la crème de vase pour différents débits

Les points kilométriques définissant ces limites sont extrapolés pour les faibles débits (< 200 m³/s).

3.1.2.2.2. Limite aval

Elle constitue quant à elle, en plus d'une représentation de la longueur de la lentille, un paramètre de calage à part entière.

3.1.2.2.3. Emprise résultante

L'emprise longitudinale de crème de vase considérée pour chacun des cinq débits étudiés est la suivante :

Tableau 4 - Emprise longitudinale de la crème de vase

Débit (m ³ /s)	125	200	400	850	2500	4000
Limite aval (PK)	17.6	13.0	10.0	2.0	-5.0	-5.0
Limite amont (PK)	65.0	50.0	35.0	22.0	13.0	11.0

3.2. METHODE DE QUANTIFICATION DU CALAGE

Pour chaque période testée, des indicateurs de validité du modèle avec les mesures sont calculés, sur une plage de 24h pour laquelle la marée est bien représentée à Saint-Nazaire. Cette première étape permettra de valider la propagation dans l'estuaire, depuis Saint-Nazaire jusqu'à l'amont.

Le calage hydrodynamique est quantifié par des méthodes statistiques d'erreur moyenne quadratique (RMSE), d'écart-type et de pourcentage de temps pendant lequel l'écart entre modèle et mesures respecte un critère X donné (CF(X), POF(X), NOF(X), où X correspond à une erreur acceptable définie par l'utilisateur).

L'erreur quadratique moyenne et l'écart-type sont des variables statistiques classiques, qui permettent de caractériser la précision.

Le CF(X) indique le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est comprise dans des limites de X. POF(X) et NOF(X) représentent le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est respectivement supérieure et inférieure à X. POF(2X) et NOF(2X) représentent quant à eux, le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est respectivement supérieure et inférieure à 2X.

Variable	Explication
Erreur	L'erreur est définie comme la différence entre les valeurs obtenues par TELEMAC r et les données d : $e_i = r_i - d_i$
RMSE	Erreur quadratique moyenne. $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}$
Ecart-type	Ecart-type (SD). $SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}$
CF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs compris dans l'intervalle [-X ;X]
POF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs supérieures à X
NOF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs inférieures à -X

La valeur choisie pour X est 0,20 mètres et la tolérance sur le déphasage en temps entre modèle et mesure est de plus ou moins 10 minutes, étant donné la discrétisation temporelle des sorties de calcul.

En plus de la comparaison des séries temporelles des mesures et des résultats de modèle, un graphique représentant les valeurs modélisées en fonction des valeurs mesurées (Q-Q plot) incluant la marge d'erreur X et 2X permettra d'avoir une représentation visuelle des indicateurs CF, POF et NOF.

Un exemple de graphique Q-Q plot (diagramme Quantile-Quantile) de synthèse est présenté ci-dessous :

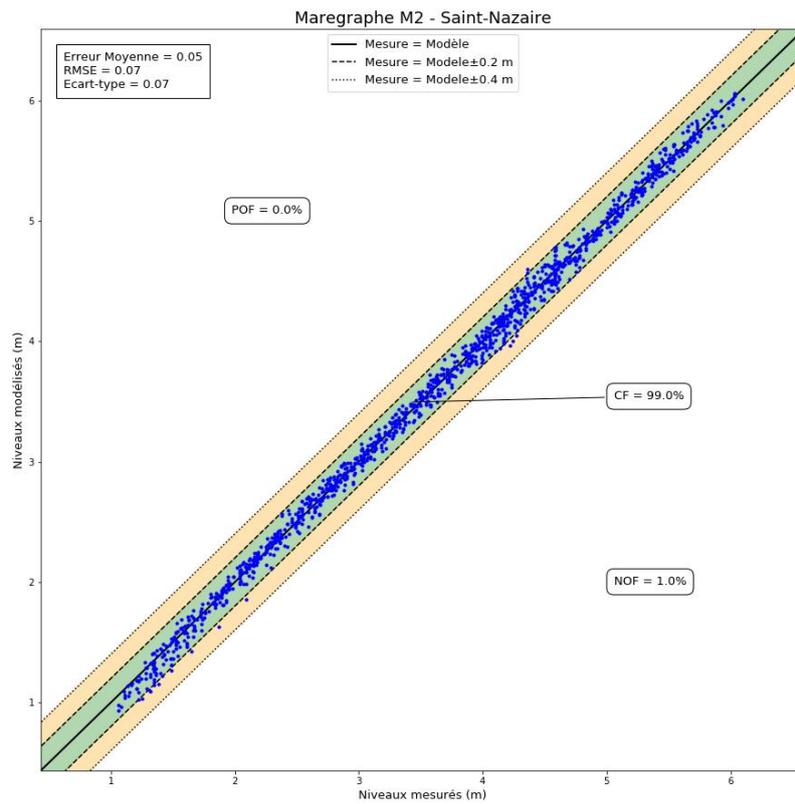


Figure 14 : Exemple de graphique Q-Q plot au marégraphe de Saint-Nazaire

À l'issue de cette première phase de calage à débits quasi-constants, une phase de validation sera réalisée, sur trois rejoux historiques distincts. L'objectif de cette phase sera de vérifier la cohérence du modèle sur des années distinctes, et sur des périodes longues avec des débits variables.

3.3. CALIBRATION HYDRODYNAMIQUE SUR DES PÉRIODES À DÉBITS QUASI-CONSTANTS

Pour le calage à débits quasi-constants, 6 périodes de 15 jours sont étudiées. Elles sont réparties sur deux années distinctes :

- pour les débits allant de moyens ($400 \text{ m}^3/\text{s}$) à débits de crue ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$), les périodes sont situées en 2007 ;
- pour les débits faibles d'étiage ($< 200 \text{ m}^3/\text{s}$), les deux périodes sont situées durant l'été 2009.

Suite à l'analyse des mesures disponibles, les indicateurs de validité du modèle sont présentés sur des points de mesures suffisamment espacés entre eux et dont la donnée est cohérente quelle que soit la période :

- marégraphe de Saint-Nazaire ;
- marégraphe de Donges ;
- marégraphe de Cordemais ;
- marégraphe du Pellerin ;
- marégraphe de Nantes – Usine Brûlée ;
- limnigraphe de Nantes – A.-de-Bretagne ;
- limnigraphe de Sainte-Luce-sur-Loire ;
- limnigraphe de Mauves-sur-Loire ;
- limnigraphe d'Ancenis.

Pour chaque plage sélectionnée et donc pour chaque débit représentatif, le coefficient de frottement est ajusté de manière itérative, afin d'obtenir une bonne corrélation entre les mesures aux limnigraphes/marégraphe et le modèle.

Concernant les « leviers d'action » pour le frottement, les paramètres suivants sont susceptibles d'être ajustés au cours des simulations :

- frottement du fond dur de la Loire, variant spatialement dans le lit mineur de l'amont à l'aval. C'est le paramètre principal qui sera ajusté lors de cette phase ;
- position longitudinale du bouchon vaseux : cette position est initialisée à partir de la carte des sondages de crème de vase réalisée en 2009. Pour chaque débit modélisé, une limite amont et aval sont données en entrée du modèle. Le frottement dans le lit mineur entre ces deux limites est alors écrasé à la valeur du frottement de type vase ;
- position latérale du bouchon vaseux. Une cote limite est fournie en entrée pour la position de la crème de vase. Réduire cette cote restreindra la largeur du bouchon vaseux sur le lit mineur. À l'inverse, une augmentation de cette cote simulera un étalement latéral du bouchon.

3.3.1. Débit à $4000 \text{ m}^3/\text{s}$

La période retenue pour les débits de crue importants se situe entre le 27/02/2007 et le 15/03/2007. Les débits au moment du pic de crue atteignent quasiment les $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ et sont toujours supérieurs à $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la plage sélectionnée.

La période de vives eaux du 05/03 est caractérisée par un coefficient maximal de 89, tandis que la période de mortes eaux du 13/03 est caractérisée par un coefficient de 26. Pendant les vives eaux, les débits sont supérieurs à 3000 m³/s, mais le pic de crue n'est pas encore atteint.

Les conditions météorologiques sont là encore très agitées, avec un vent moyen fort, et des rafales allant jusqu'à 100 km/h le 13/03.

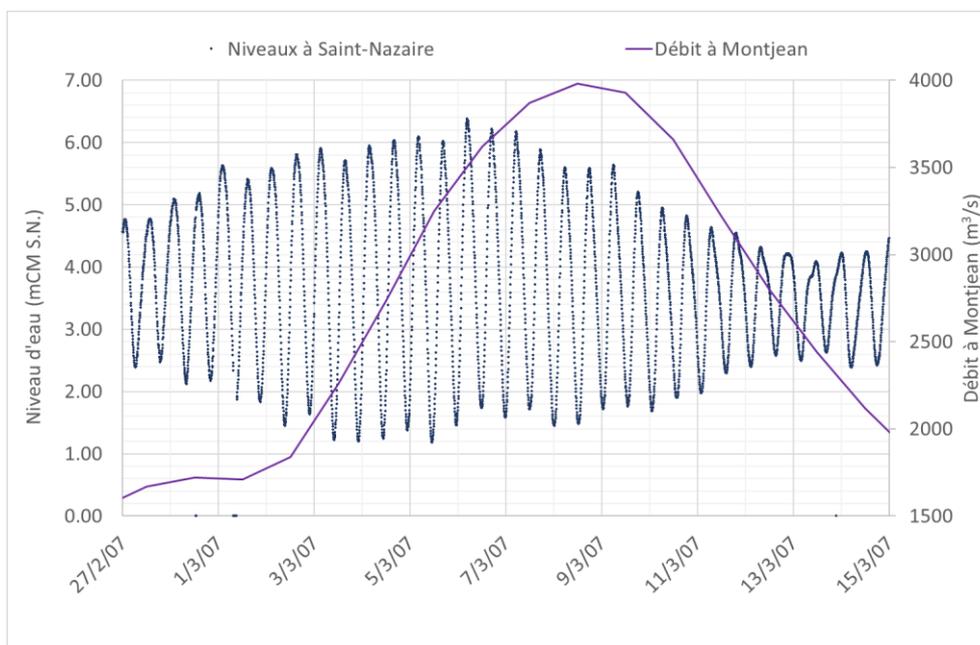


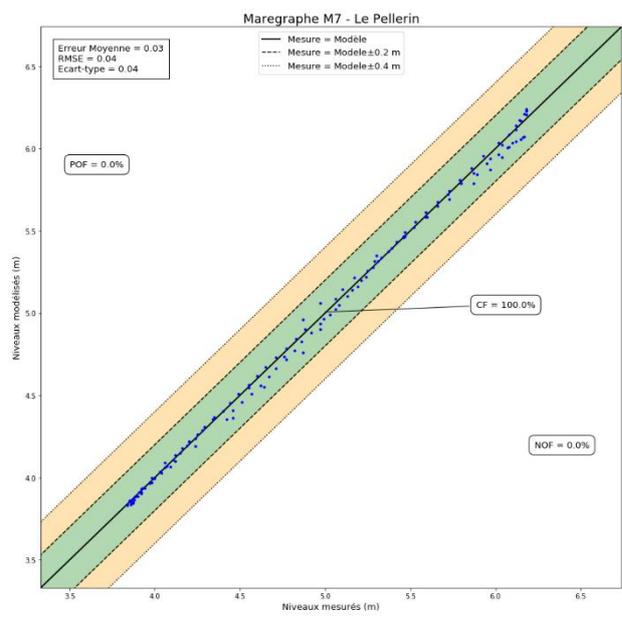
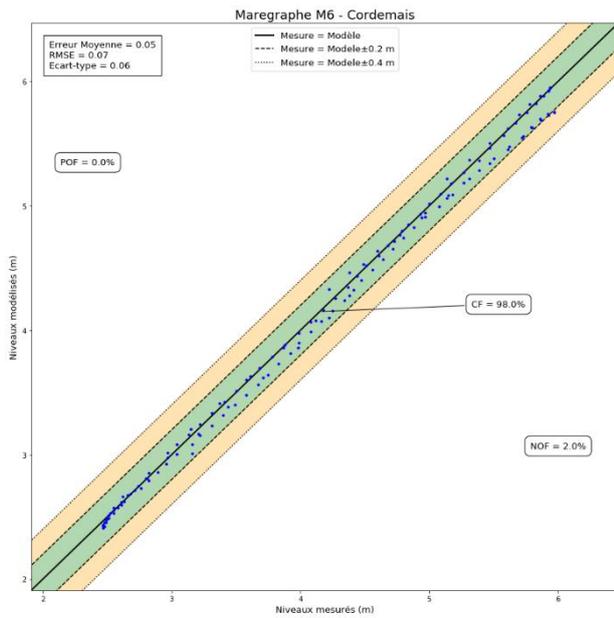
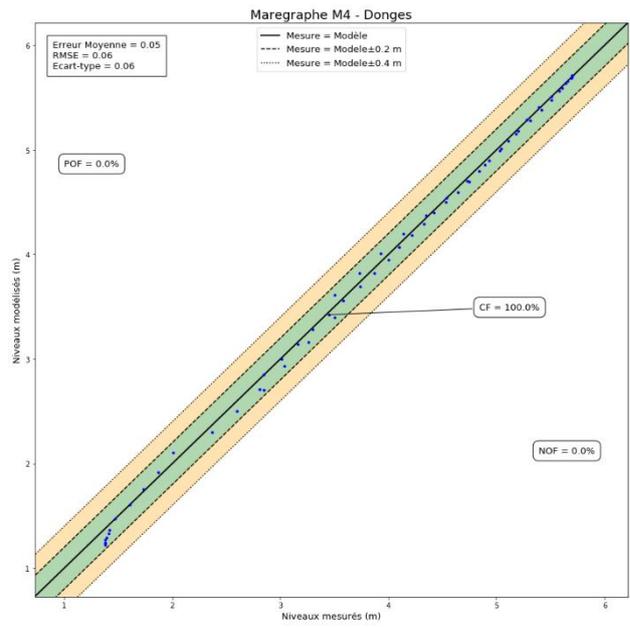
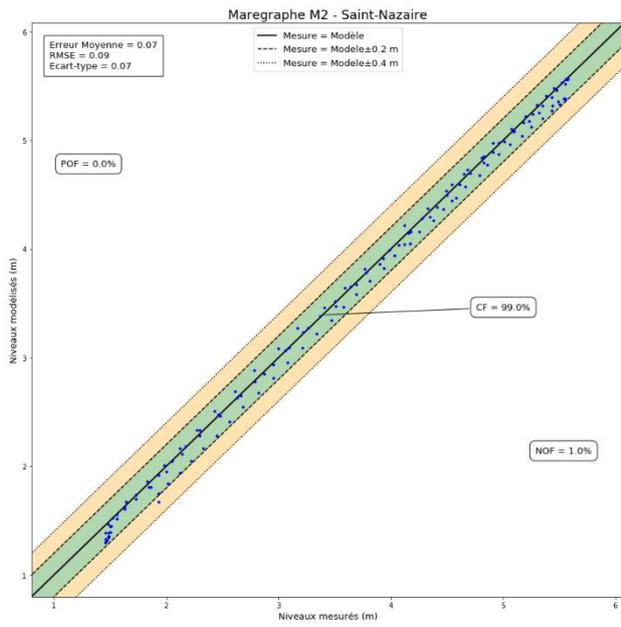
Figure 15 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 27/02/07 au 15/03/07

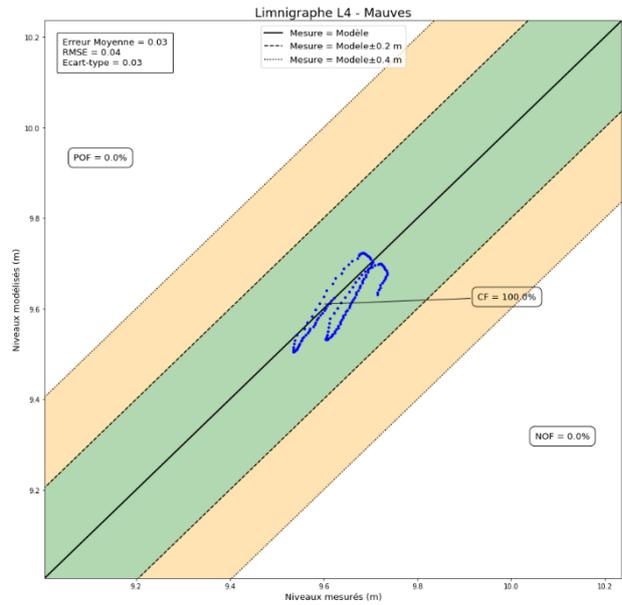
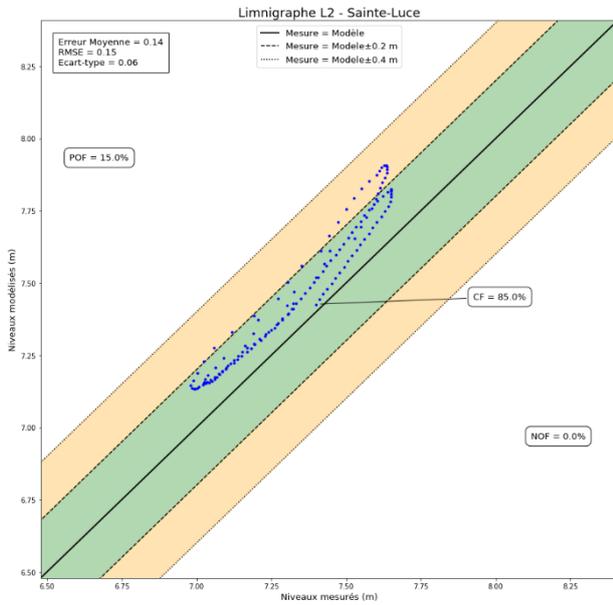
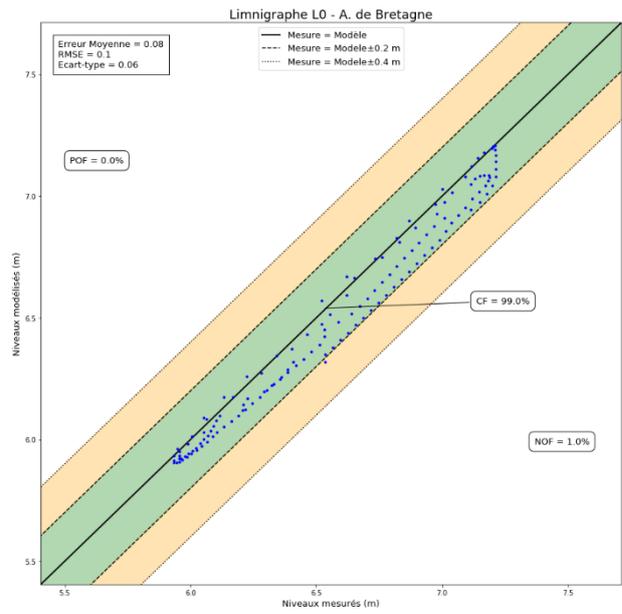
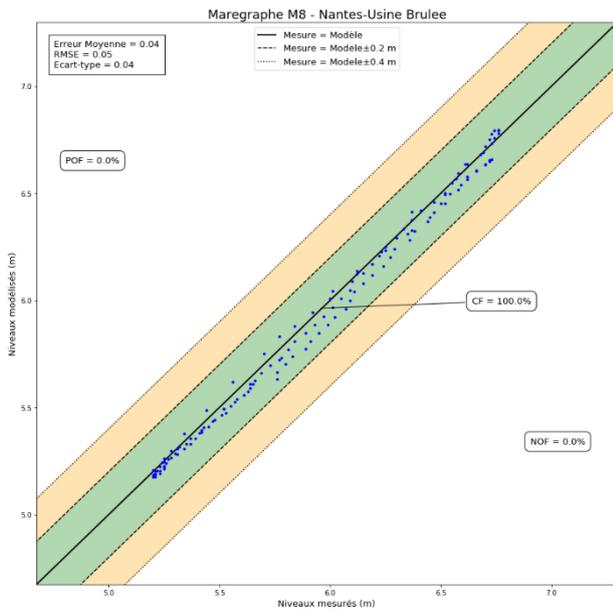
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 2 - fig.2 à fig. 10**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 5 - Quantification statistique pour la période à débit de 4000 m³/s

Point de mesure	Période de 24 heures					
	Erreur Moyenne (m)	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.07	0.09	0.07	99 %	0 %	1 %
Donges	0.05	0.06	0.06	100 %	0 %	0 %
Cordemais	0.05	0.07	0.06	98 %	0 %	2 %
Le Pellerin	0.03	0.04	0.04	100 %	0 %	0 %
Nantes - Usine Brûlée	0.04	0.05	0.04	100 %	0 %	0 %
Nantes – A. de Bretagne	0.08	0.1	0.06	99 %	0 %	1 %
Sainte-Luce-sur-Loire	0.14	0.15	0.06	85 %	15 %	0 %
Mauves-sur-Loire	0.03	0.04	0.03	100 %	0 %	0 %
Ancenis	0.03	0.04	0.02	100 %	0 %	0 %





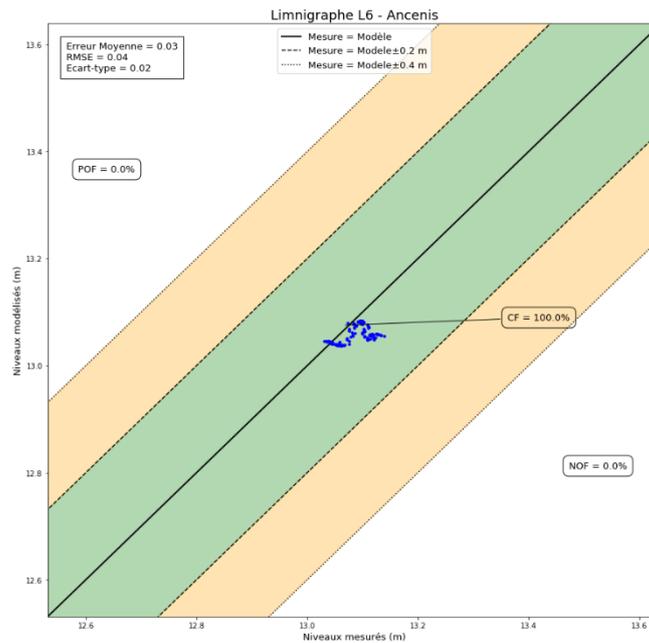


Figure 16 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 4000 m³/s

Le calage hydrodynamique sur un débit de 4000 m³/s donne des résultats satisfaisants sur l'ensemble du domaine. La quasi-totalité des écarts absolus entre mesure et modèle sont inférieurs à 0,2 mètres, à l'exception du secteur de Sainte-Luce-sur-Loire, pour lequel le modèle prévoit des niveaux d'eaux plus importants que ceux mesurés.

Cet écart peut s'expliquer par la présence d'une possible zone d'expansion à l'amont et à l'aval immédiat du pont de Bellevue, qui serait mise en eau pour des forts débits uniquement, non prise en compte dans le modèle. Cette explication est d'ailleurs confortée par la bonne représentativité du secteur de Sainte-Luce-sur-Loire pour les autres débits présentés (ce dernier point a alors tendance à écarter des problème de bathymétrie).

Il est à noter également que le secteur de Sainte-Luce est plutôt très bien représenté si l'on s'intéresse à la période complète des 15 jours, avec 95% des valeurs de niveaux d'eaux qui sont comprises dans la plage d'erreur acceptable (CF = 95%). Ce comportement se retrouve sur chaque pic de crue, avec un modèle qui est globalement un peu trop réactif (les niveaux augmentent un peu trop rapidement avec les débits). Ceci se traduit par une phase de crue bien représentée et une phase de décrue un peu trop rapide. Ce biais s'explique donc, au moins en partie, par la non prise en compte dans le modèle de plusieurs zones d'expansion de crue sur l'amont qui contribueraient à ralentir la dynamique de décrue. L'ajustement de cette phase, sans inclure les différentes zones d'expansion, nécessiterait d'avoir un coefficient de frottement plus important pendant la phase de décrue que celui de la phase de crue.

3.3.2. Débit à 2500 m³/s

La période retenue pour les débits forts autour de 2500 m³/s se situe entre le 12/02/2007 et le 27/02/2007.

Elle est caractérisée par des débits de crues allant de 1500 à 2400 m³/s. Le pic de crue est quasiment synchronisé avec une période de vives eaux marquées (coefficient de 110 le 20/02).

Une période de mortes eaux est également observée en début de plage avec un coefficient de 28 le 12/02.

Les conditions météorologiques sont agitées autour de la période de vives eaux.

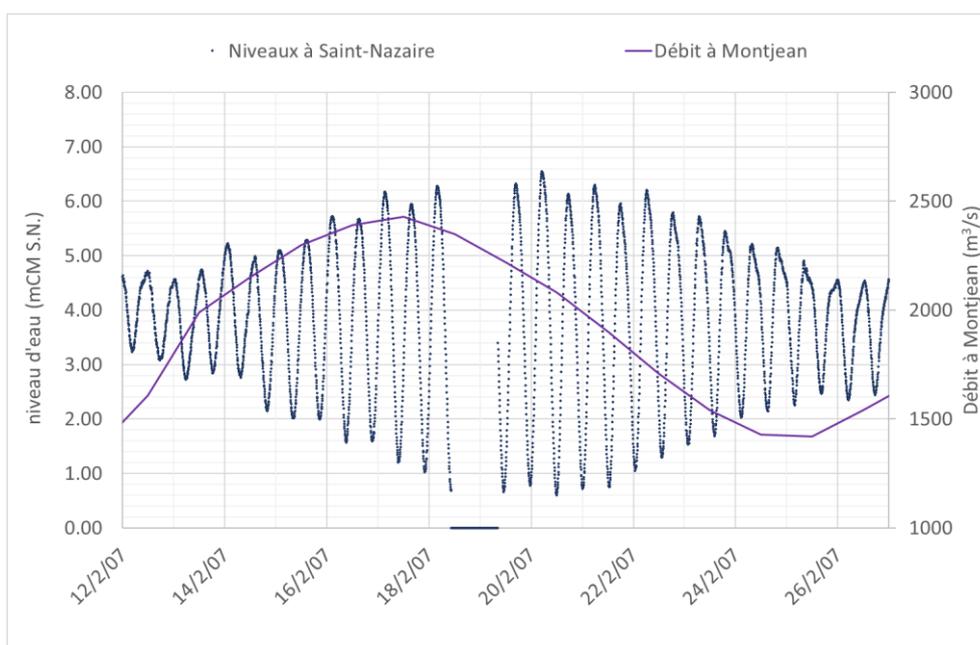


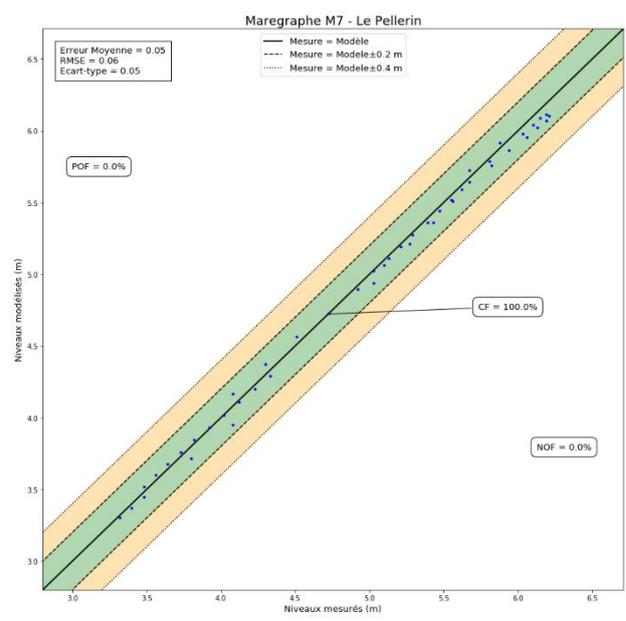
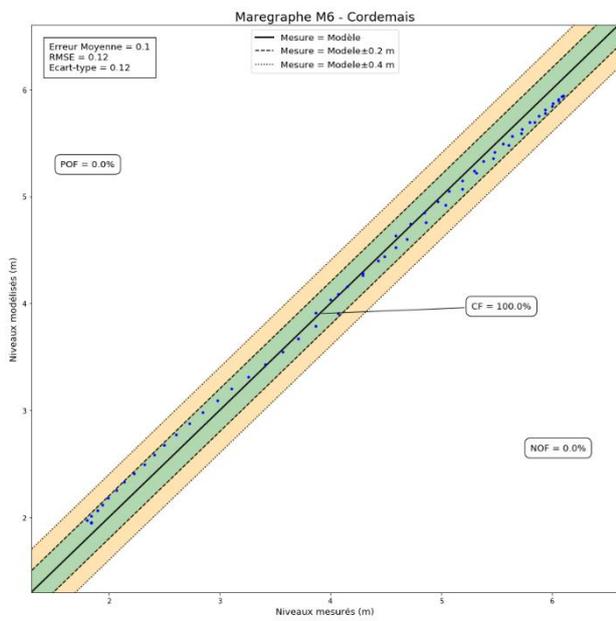
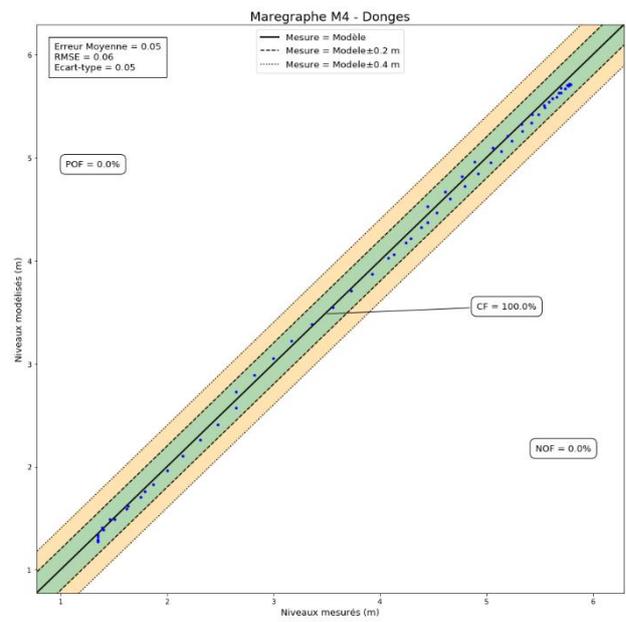
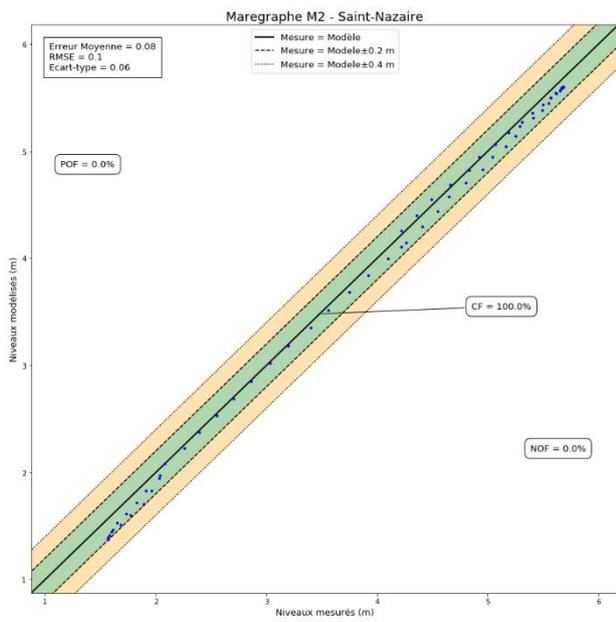
Figure 17 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 12/02/07 au 27/02/07

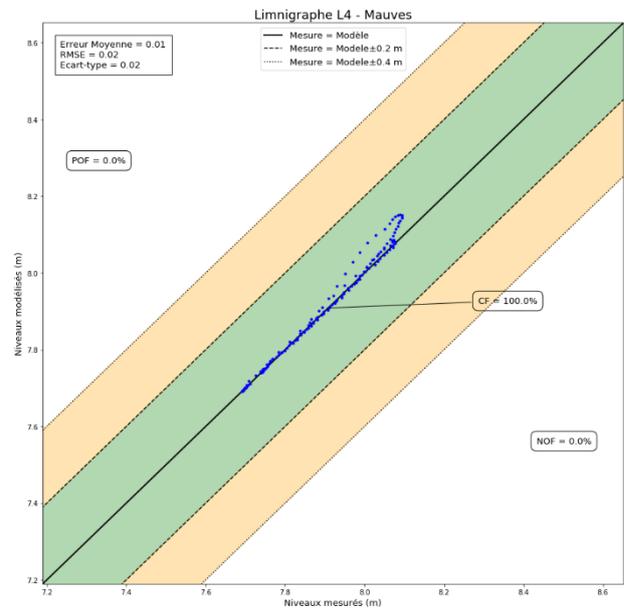
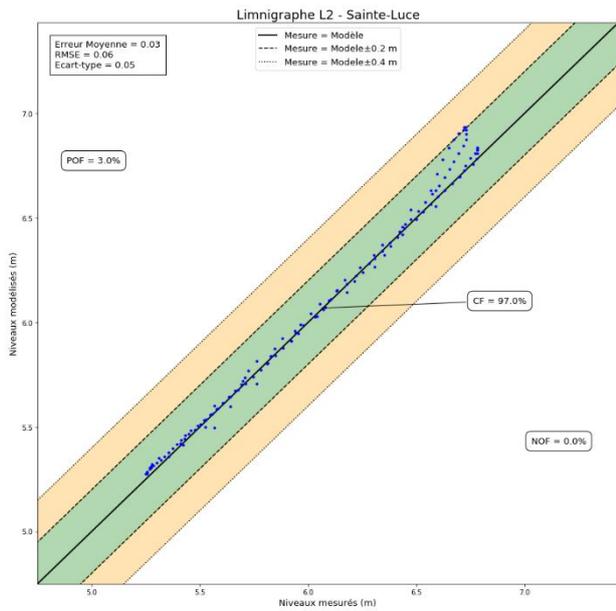
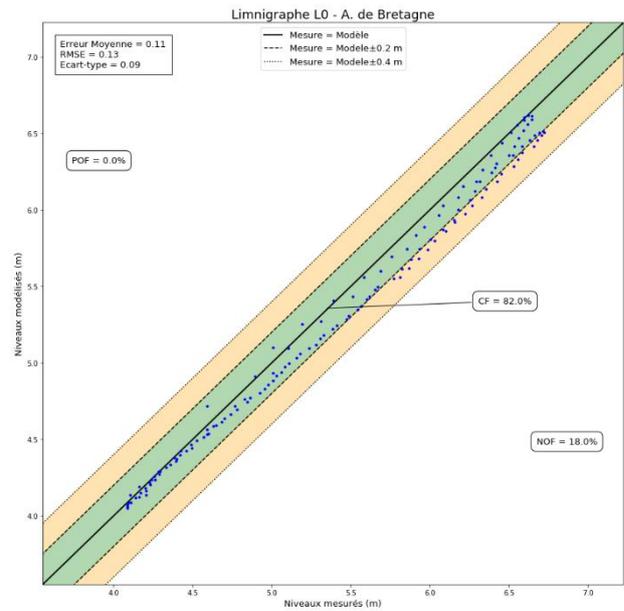
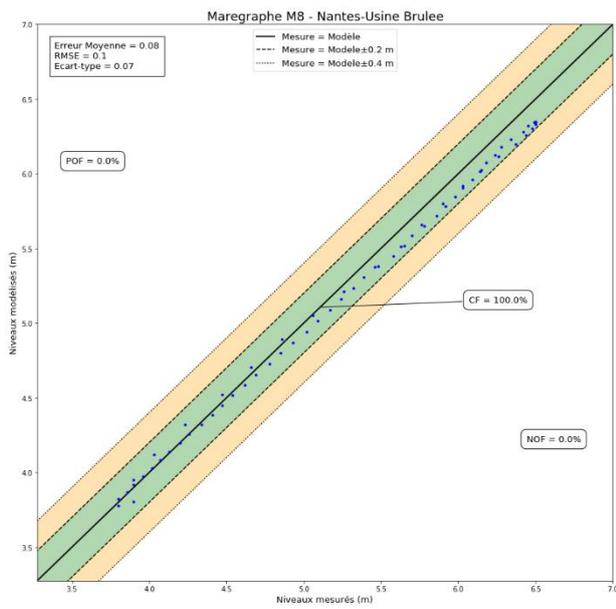
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 2 - fig.11 à fig. 19**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphique suivants :

Tableau 6 - Quantification statistique pour la période à débit de 2500 m³/s

Période de 24 heures						
Point de mesure	Erreur Moyenne	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.08	0.1	0.06	100 %	0 %	0 %
Donges	0.05	0.06	0.05	100 %	0 %	0 %
Cordemais	0.1	0.12	0.12	100 %	0 %	0 %
Le Pellerin	0.05	0.06	0.05	100 %	0 %	0 %
Nantes - Usine Brûlée	0.08	0.1	0.07	100 %	0 %	0 %
Nantes – A. de Bretagne	0.07	0.08	0.06	99 %	0 %	1 %
Sainte-Luce-sur-Loire	0.03	0.06	0.05	97 %	3 %	0 %
Mauves-sur-Loire	0.01	0.02	0.02	100 %	0 %	0 %
Ancenis	0.13	0.13	0.01	100 %	0 %	0 %





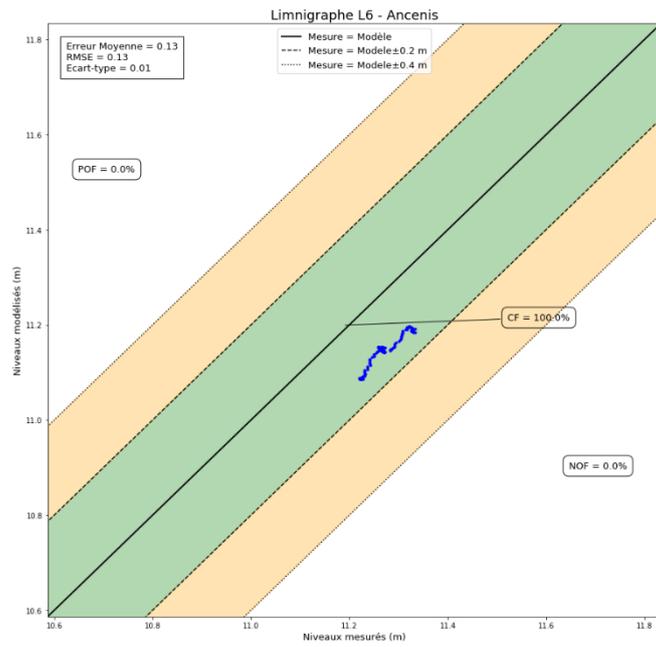


Figure 18 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 2500 m³/s

3.3.3. Débit à 850 m³/s

La période retenue pour les débits autour de 850 m³/s se situe entre le 11/06/2007 et le 25/06/2007.

Elle est caractérisée par des débits à Montjean-sur-Loire variant de 700 à 1100 m³/s environ.

Il s'agit de coefficients de marée moyens (39 pour la période de mortes eaux du 24/06, 88 pour les vives eaux du 15/06). Les vents sont également d'intensité moyenne, avec toutefois une période plus agitée les journées du 16/06 et du 17/06.

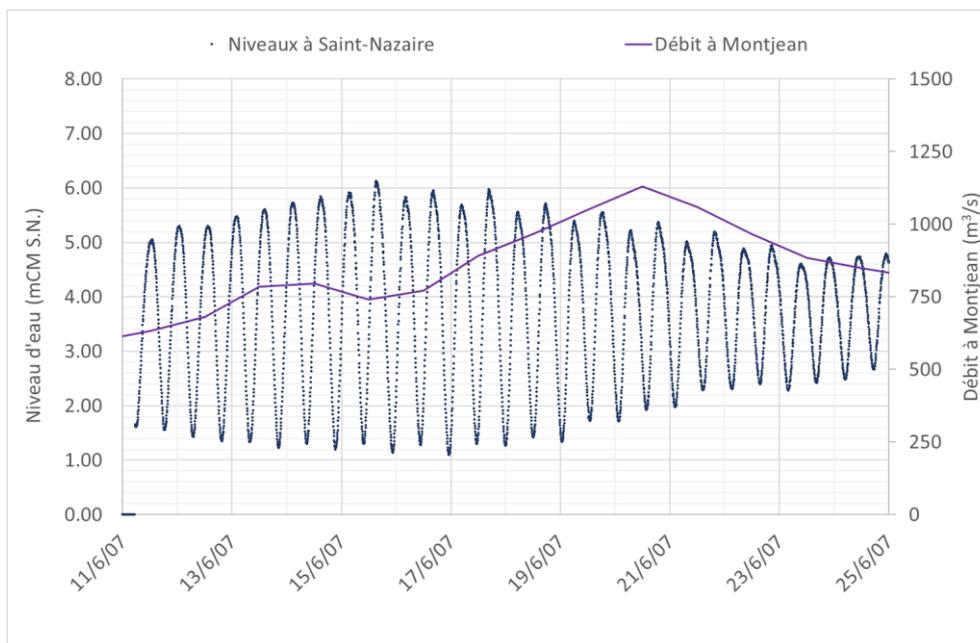


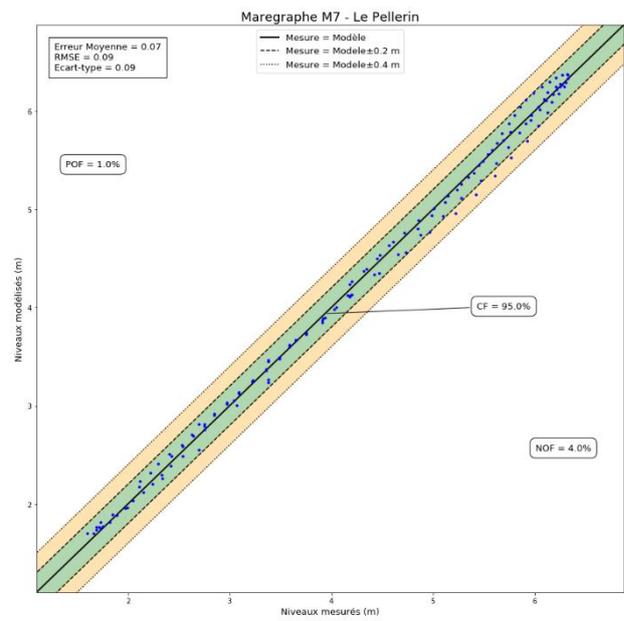
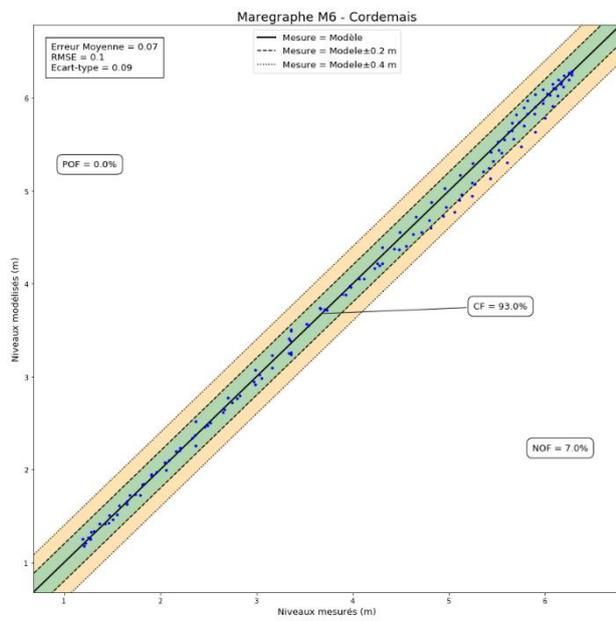
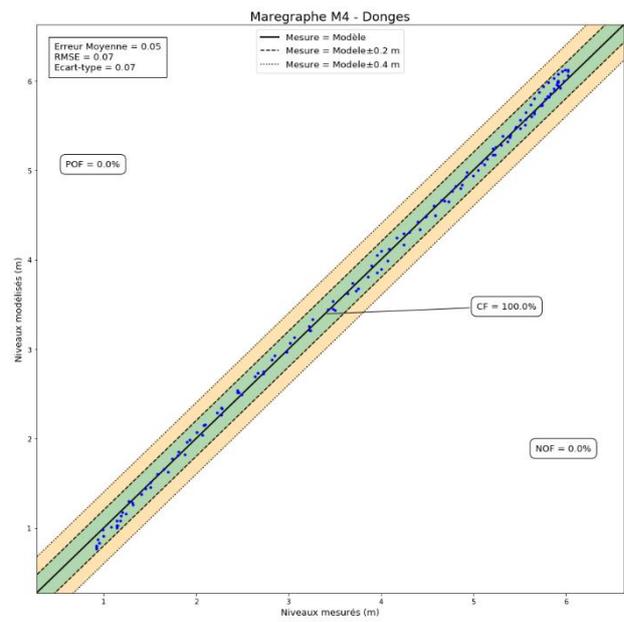
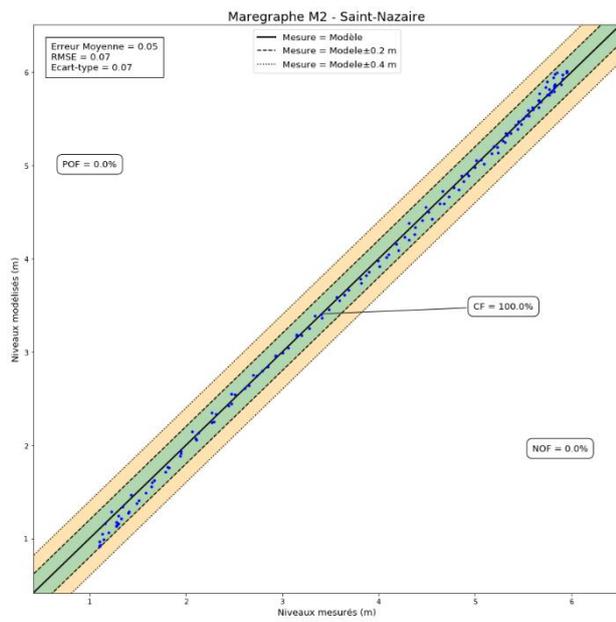
Figure 19 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 11/06/07 au 25/06/07

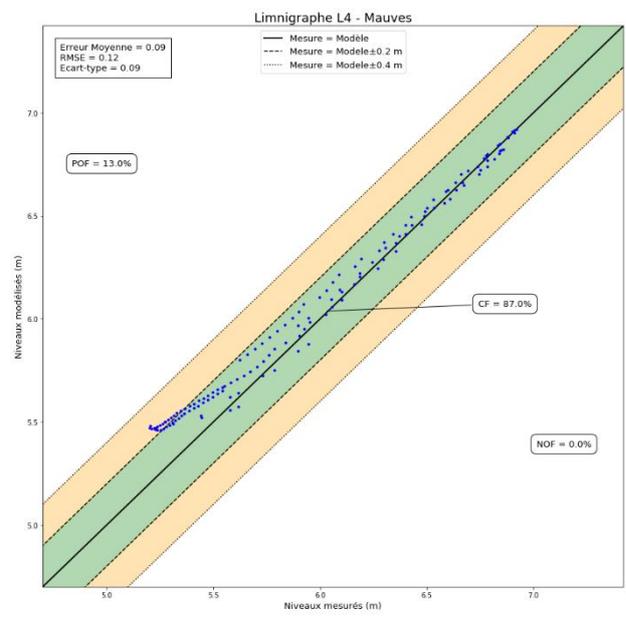
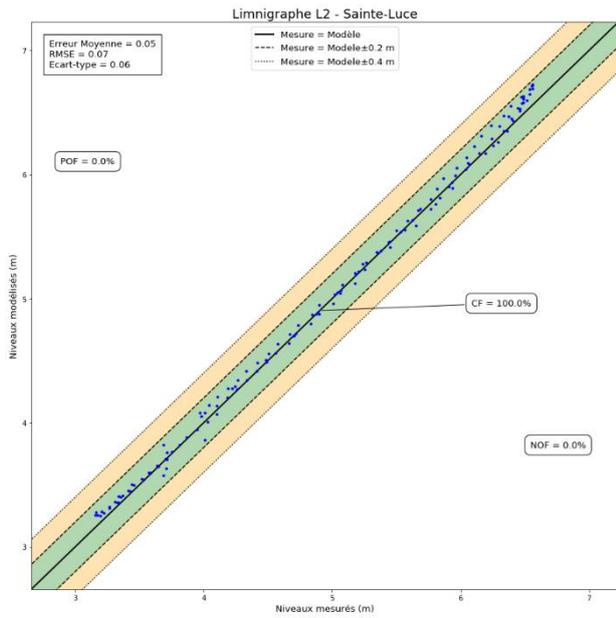
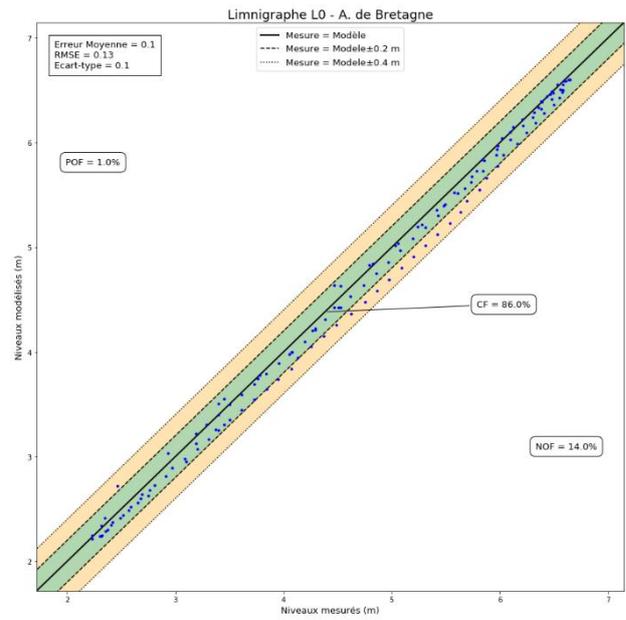
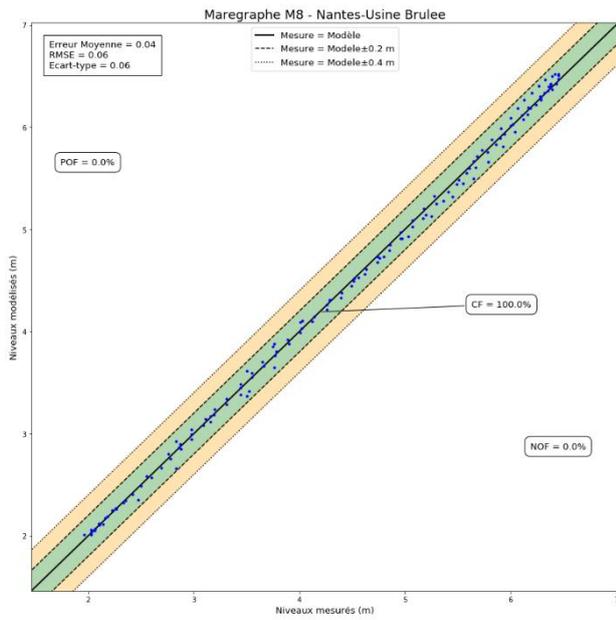
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 2 - fig.20 à fig. 28**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 7 - Quantification statistique pour la période à débit de 850 m³/s

Point de mesure	Période de 24 heures					
	Erreur Moyenne	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.05	0.07	0.07	100 %	0 %	0 %
Donges	0.05	0.07	0.07	100 %	0 %	0 %
Cordemais	0.07	0.1	0.09	93 %	0 %	7 %
Le Pellerin	0.07	0.09	0.09	95 %	1 %	4 %
Nantes - Usine Brûlée	0.04	0.06	0.06	100 %	0 %	0 %
Nantes – A. de Bretagne	0.1	0.13	0.1	86 %	0 %	14%
Sainte-Luce-sur-Loire	0.05	0.07	0.06	100 %	0 %	0 %
Mauves-sur-Loire	0.09	0.12	0.09	87 %	13 %	0 %
Ancenis	0.09	0.09	0.03	100 %	0 %	0 %





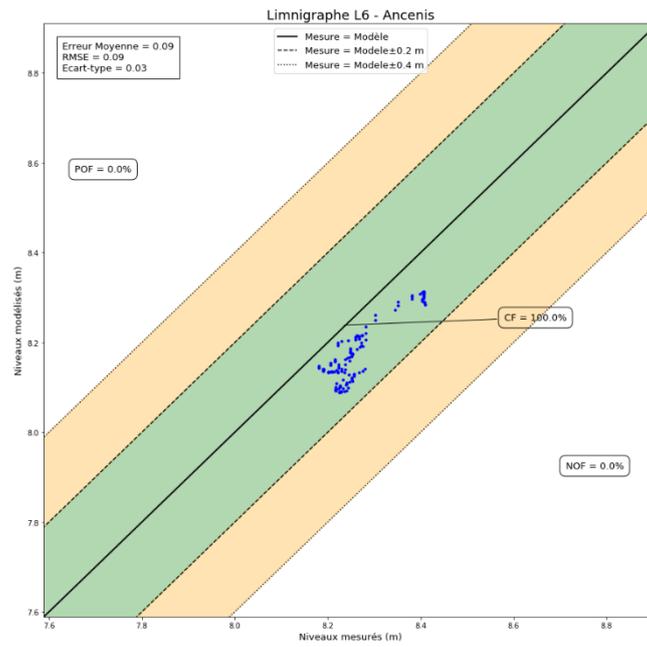


Figure 20 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 850 m³/s

3.3.4. Débit à 400 m³/s

La période retenue pour les débits moyens autour de 400 m³/s se situe entre le 08/08/2007 et le 23/08/2007. Elle est caractérisée par un débit quasiment constant sur l'ensemble de la période, aux alentours de 400 m³/s. Il est à noter toutefois une augmentation des débits sur la fin de la période (jusqu'à 700 m³/s).

Il y a une période de vives eaux autour du 15/08, avec un coefficient de marée de 89, et une période de mortes eaux en fin de plage, autour du 23/08, avec un coefficient de 26.

Les vents sont d'intensité moyenne, avec la présence de rafales la journée du 14/08.

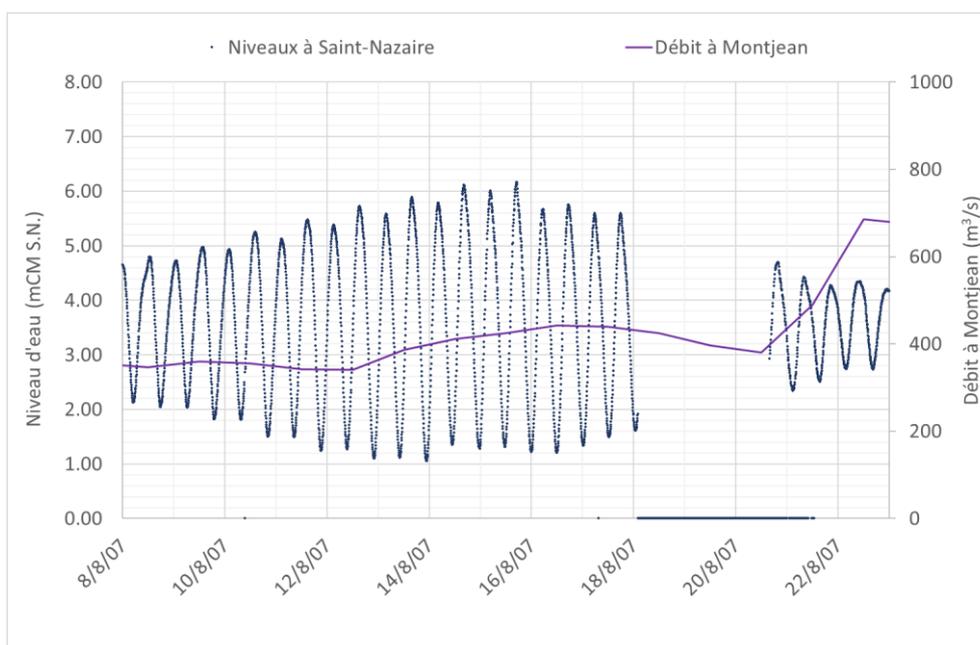


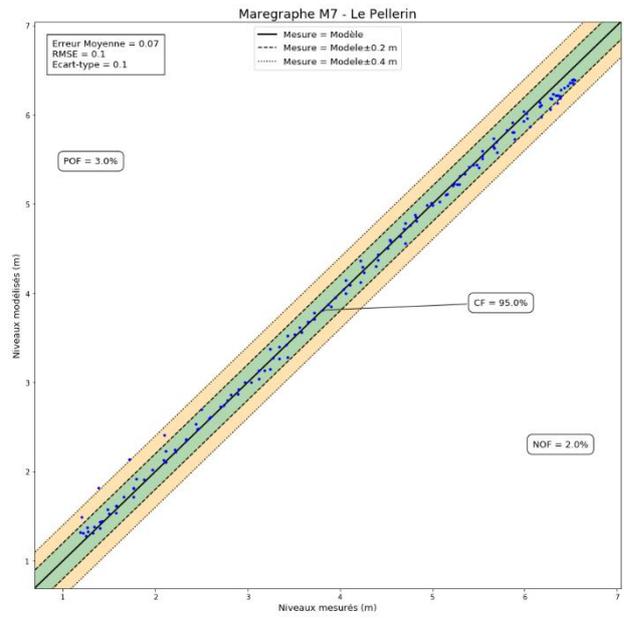
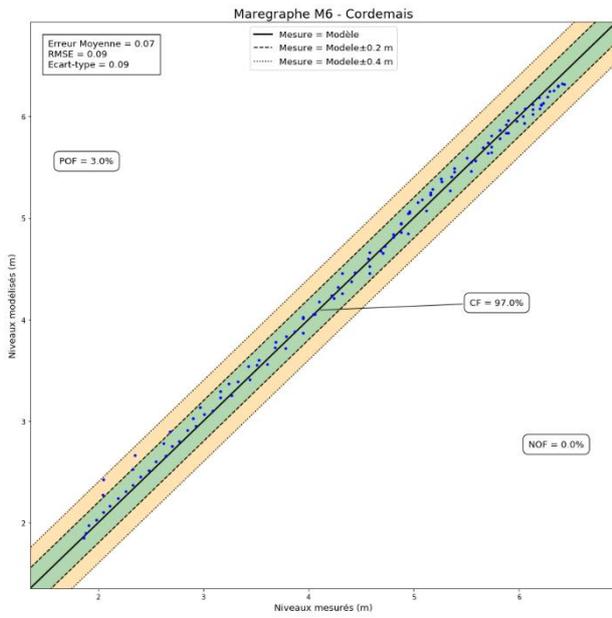
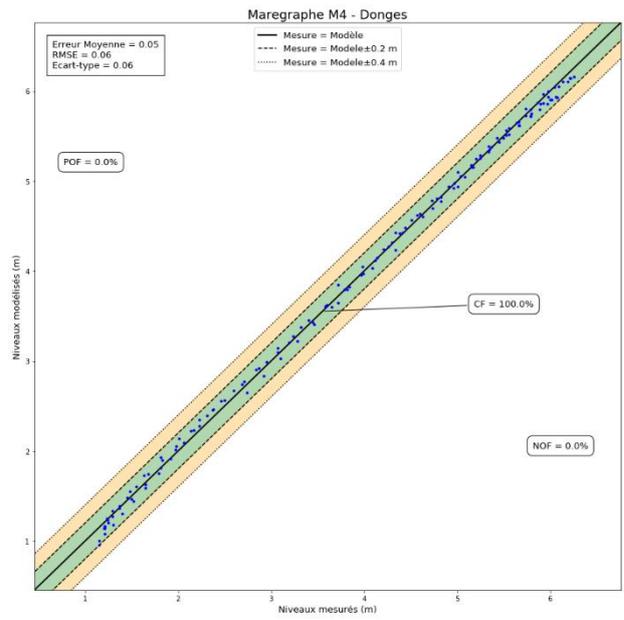
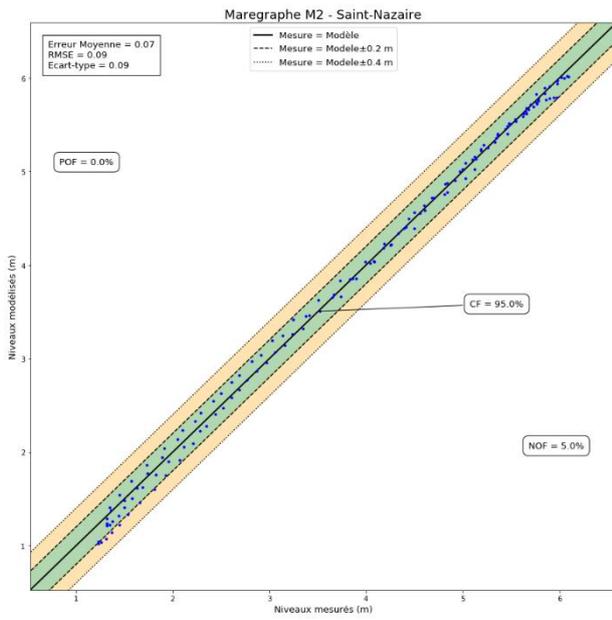
Figure 21 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 08/08/07 au 23/08/07

La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 2 - fig.29 à fig. 37**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 8 - Quantification statistique pour la période à débit de 400 m³/s

Point de mesure	Période de 24 heures					
	Erreur Moyenne	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.07	0.09	0.09	95 %	0 %	5 %
Donges	0.05	0.06	0.06	100 %	0 %	0 %
Cordemais	0.07	0.09	0.09	97 %	3 %	0 %
Le Pellerin	0.07	0.1	0.1	95 %	3 %	2 %
Nantes - Usine Brûlée	0.05	0.07	0.06	100 %	0 %	0 %
Nantes – A. de Bretagne	0.1	0.14	0.13	78 %	3 %	19 %
Sainte-Luce-sur-Loire	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mauves-sur-Loire	0.08	0.09	0.09	98 %	0 %	2 %
Ancenis	0.06	0.07	0.04	100 %	0 %	0 %



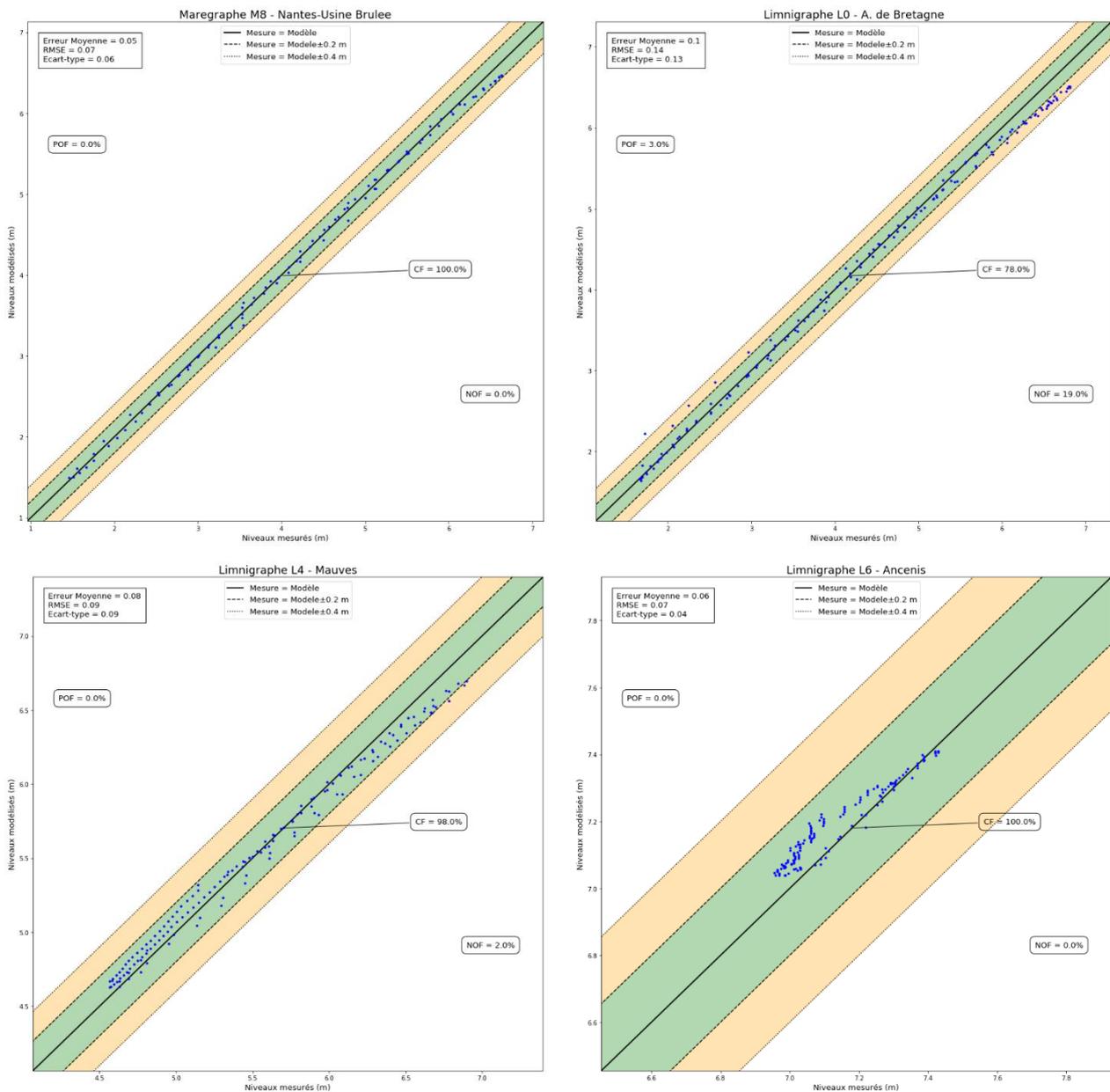


Figure 22 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 400 m³/s

3.3.5. Débit à 200 m³/s

La période retenue pour l'analyse des débits faibles autour de 200 m³/s se situe entre le 01/07/2009 et le 16/07/2009.

Elle est caractérisée par des débits faibles à Montjean-sur-Loire (compris entre 200 et 300 m³/s).

Les coefficients de marée sont moyens, compris entre 47 et 74, et les vents sont faibles (40 km/h max).

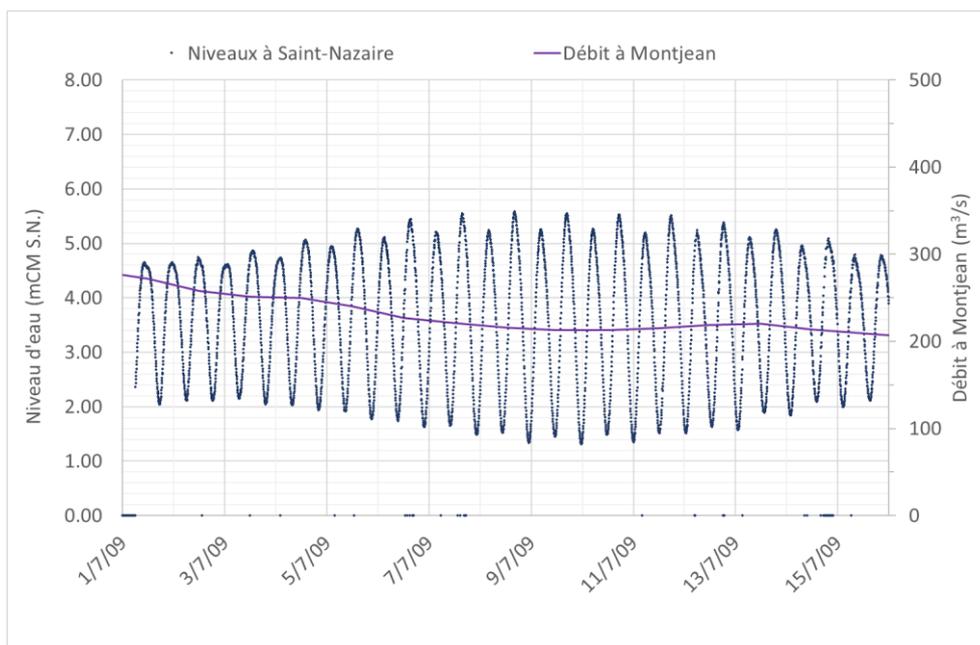


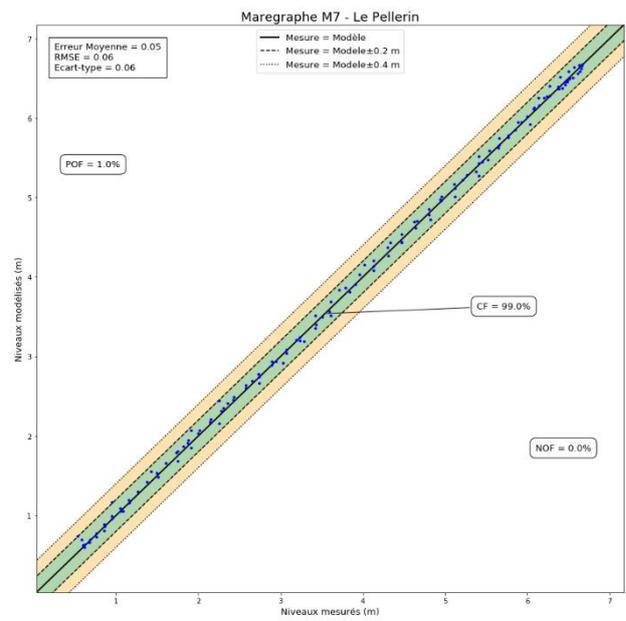
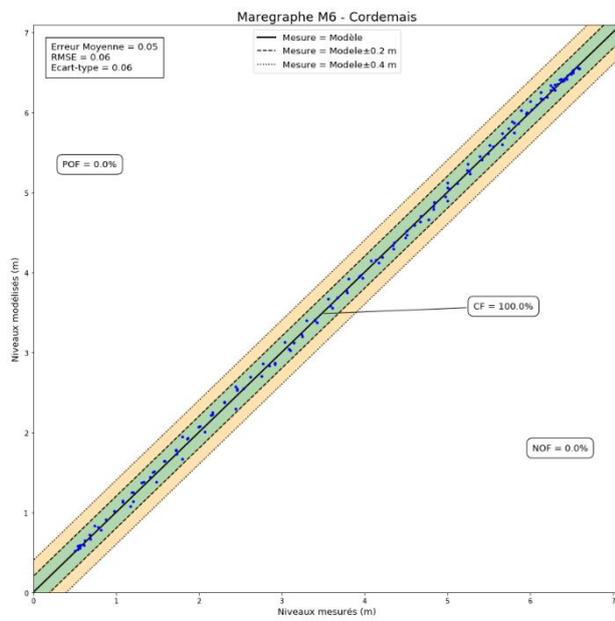
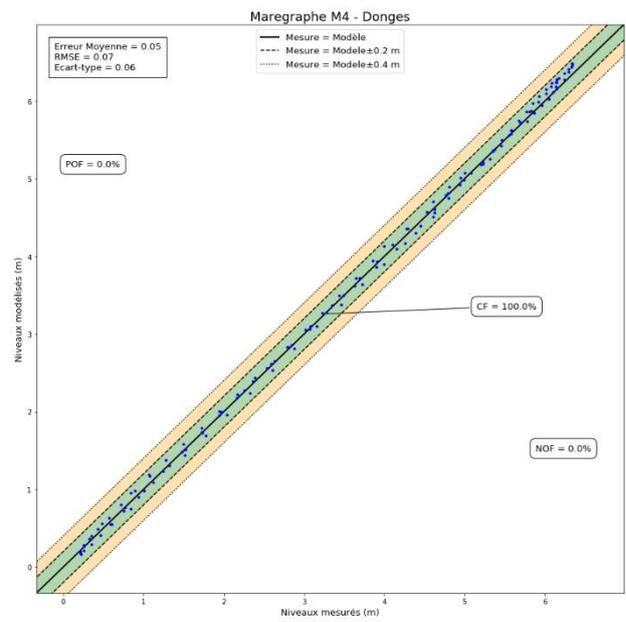
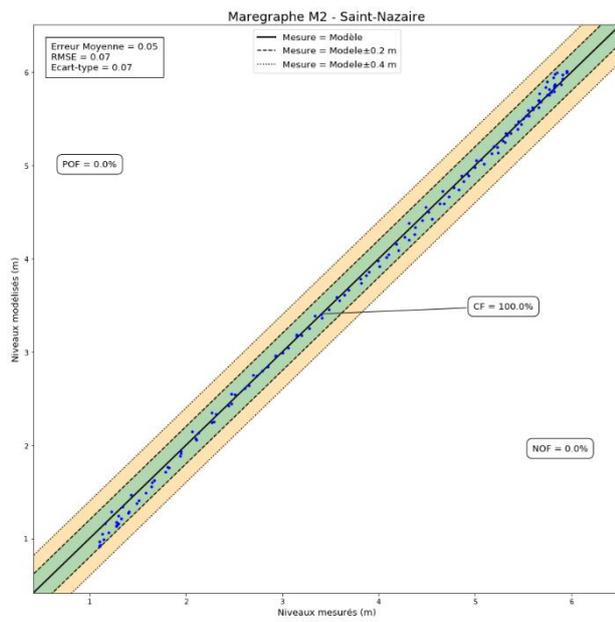
Figure 23 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 01/07/09 au 16/07/09

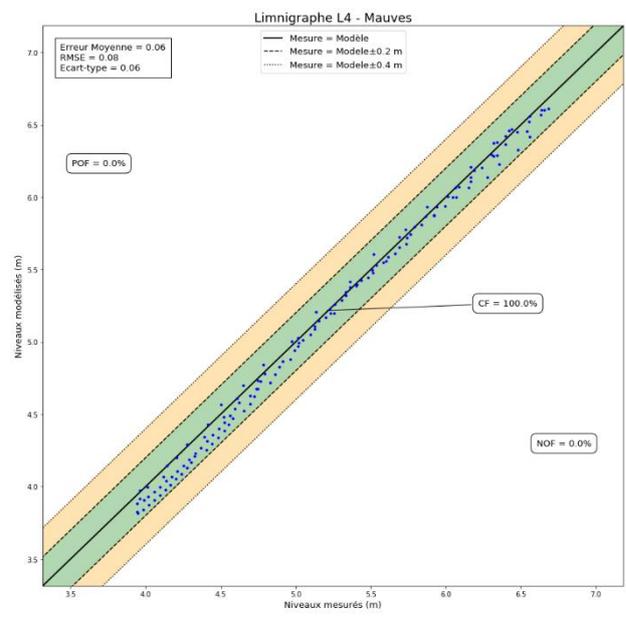
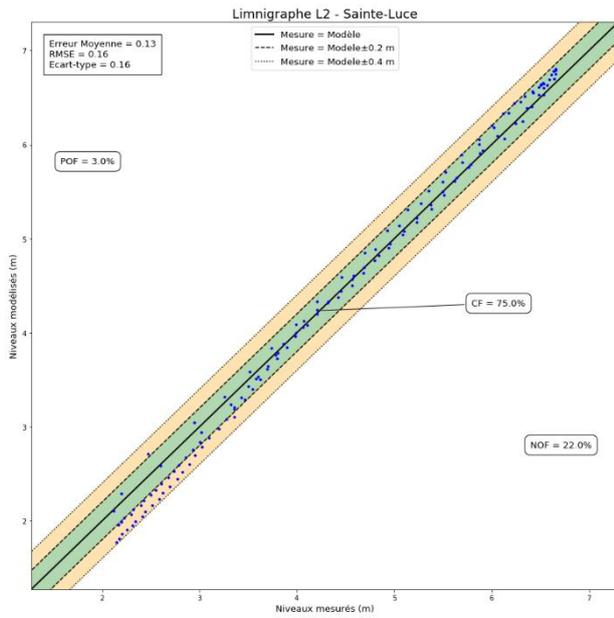
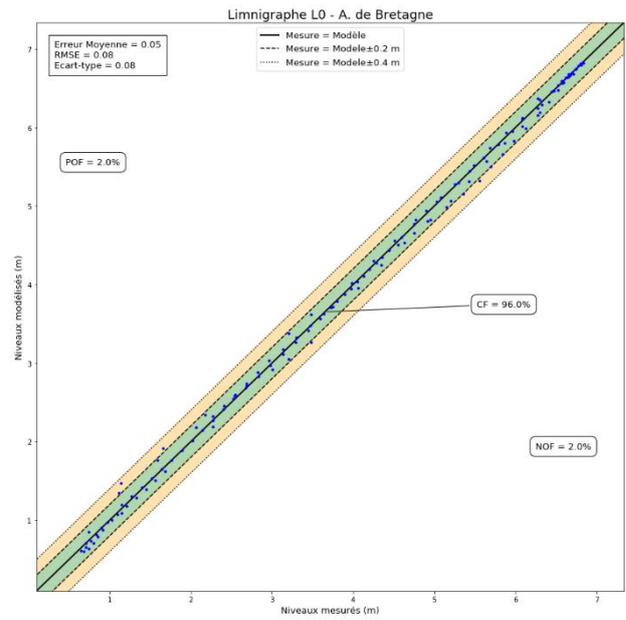
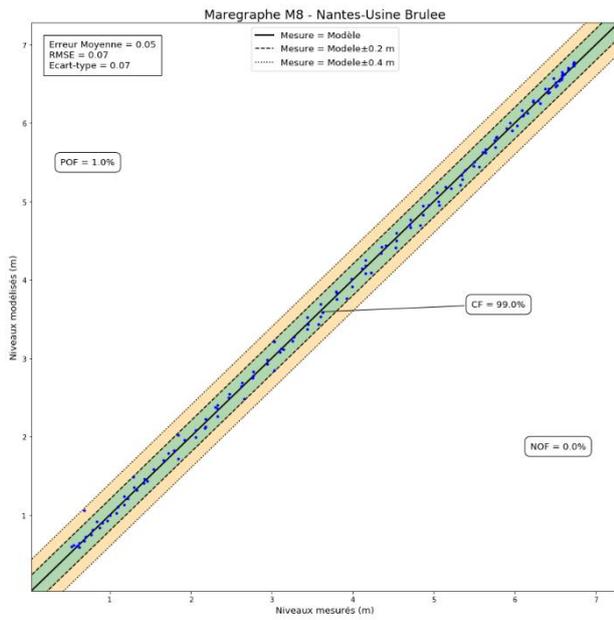
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 2 - fig.38 à fig. 46**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 9 - Quantification statistique pour la période à débit de 200 m³/s

Point de mesure	Période de 24 heures					
	Erreur Moyenne	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.03	0.04	0.04	100 %	0 %	0 %
Donges	0.04	0.05	0.05	100 %	0 %	0 %
Cordemais	0.03	0.04	0.04	100 %	0 %	0 %
Le Pellerin	0.04	0.05	0.05	100 %	0 %	0 %
Nantes - Usine Brûlée	0.04	0.05	0.05	100 %	0 %	0 %
Nantes – A. de Bretagne	0.07	0.1	0.09	97 %	0 %	3%
Sainte-Luce-sur-Loire	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mauves-sur-Loire	0.07	0.08	0.05	99 %	0 %	1 %
Ancenis	0.13	0.14	0.07	94 %	6 %	0 %





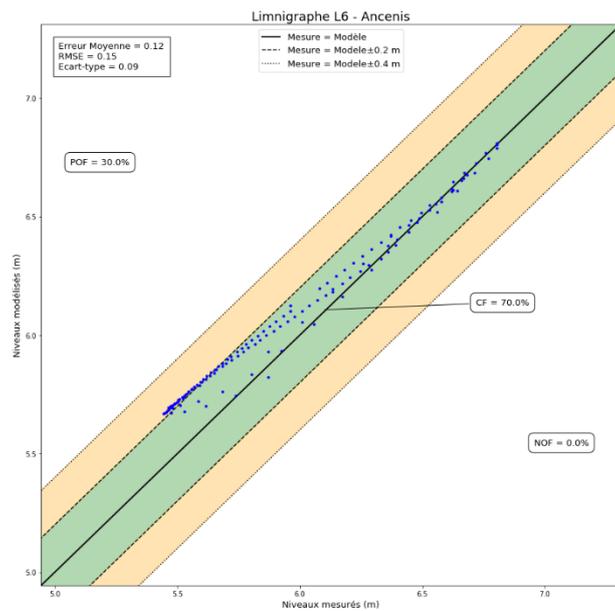


Figure 24 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 200 m³/s

3.3.6. Débit à 150 m³/s

La période retenue pour l'analyse des débits faibles (autour de 150 m³/s) se situe entre le 16/08/2009 et le 31/08/2009.

Elle est caractérisée par des débits très faibles à Montjean-sur-Loire, descendant jusqu'à 150 m³/s aux alentours du 27/08. Cet étiage sévère s'accompagne de forts coefficients de marée autour du 21/08, coefficient maximal de 110 le 22/08 au matin.

La période de mortes eaux de fin du mois est également caractérisée par un coefficient faible (coefficient minimal de 28 le 29/08). Les conditions météorologiques sont calmes.

Les variations de niveaux mesurées à Saint Nazaire ainsi que le débit à Montjean-sur-Loire sont visibles sur la figure suivante.

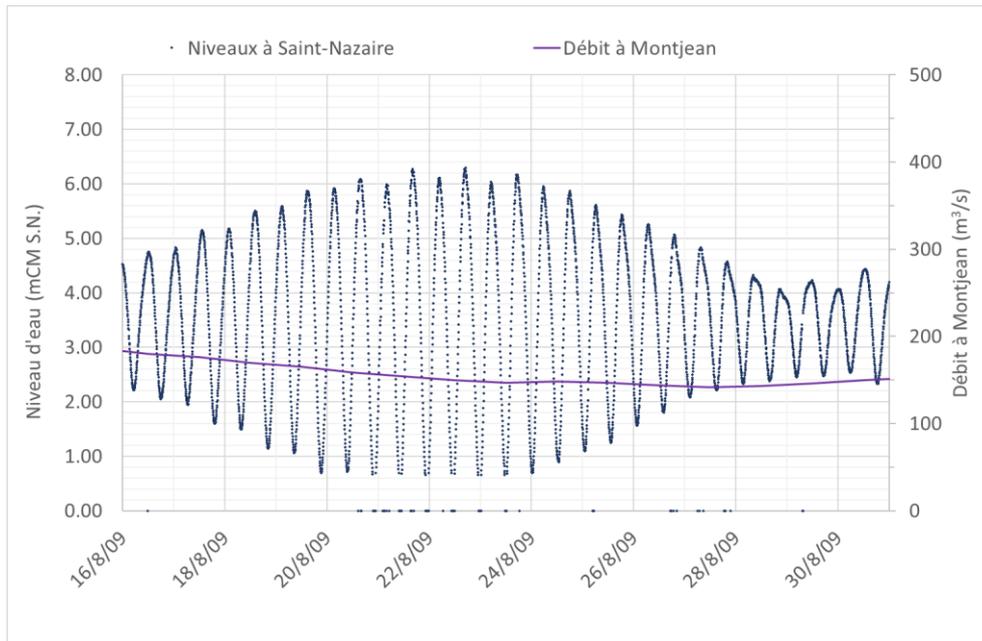


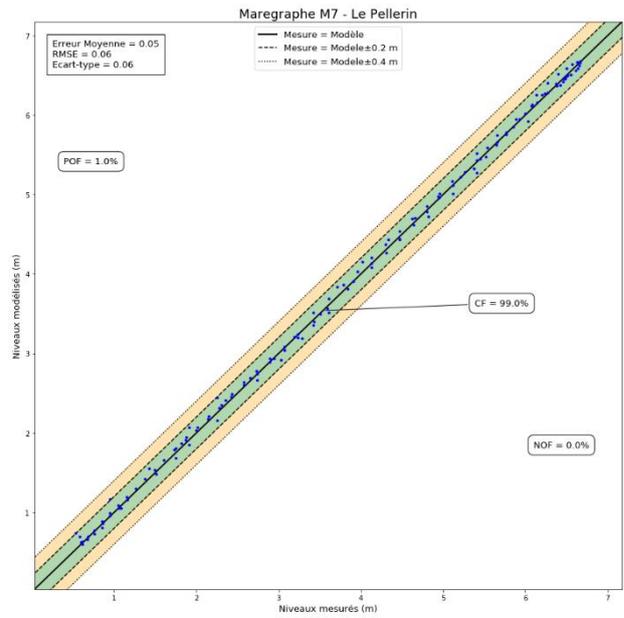
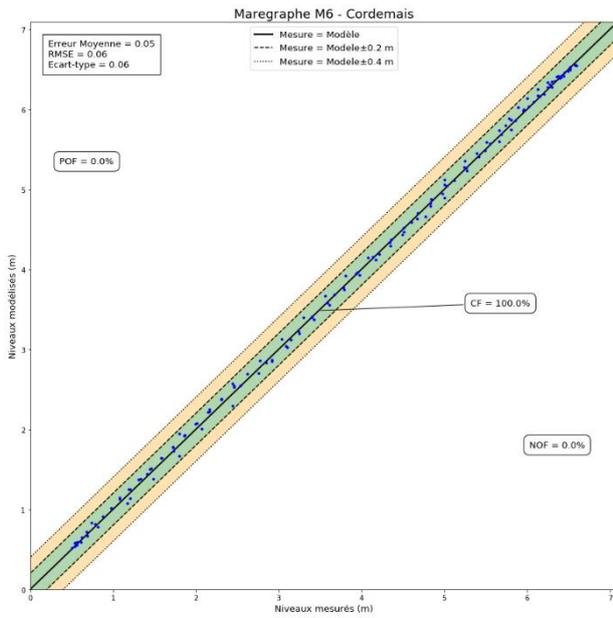
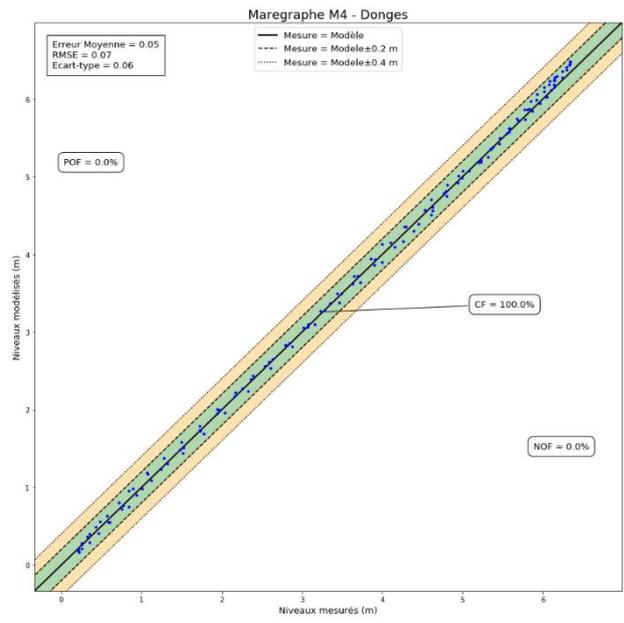
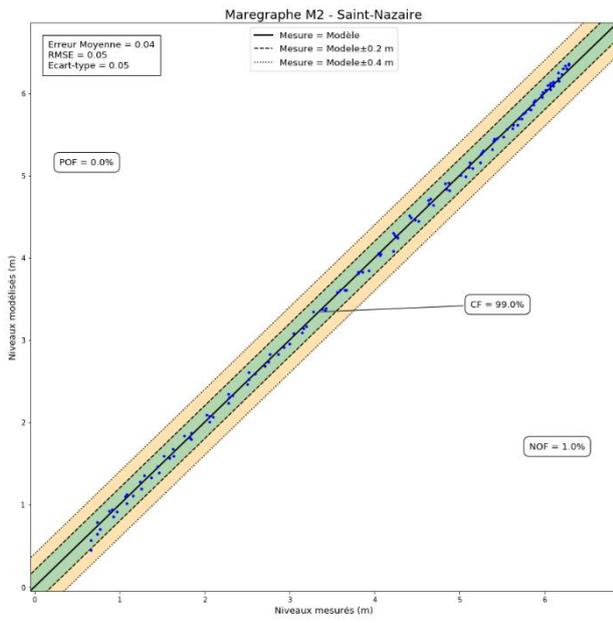
Figure 25 : Niveaux à Saint-Nazaire et débit à Montjean-sur-Loire pour la période du 16/08/09 au 31/08/09

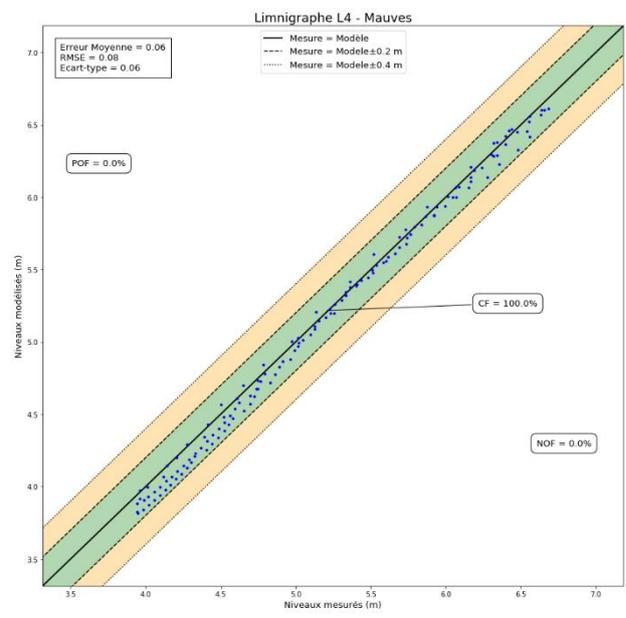
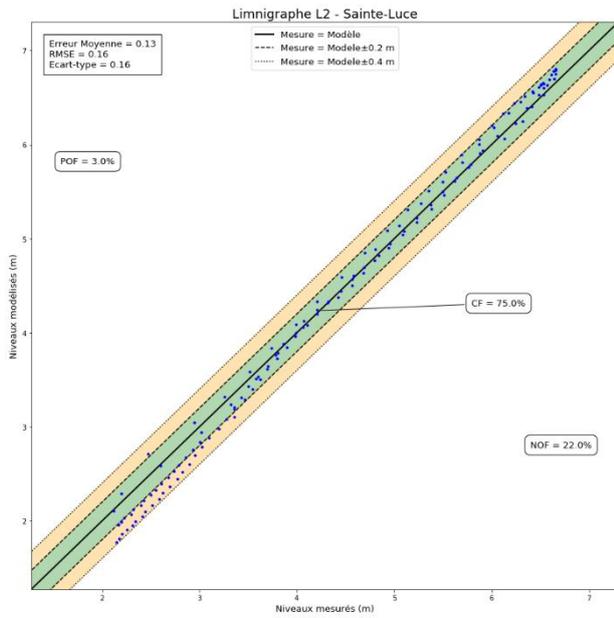
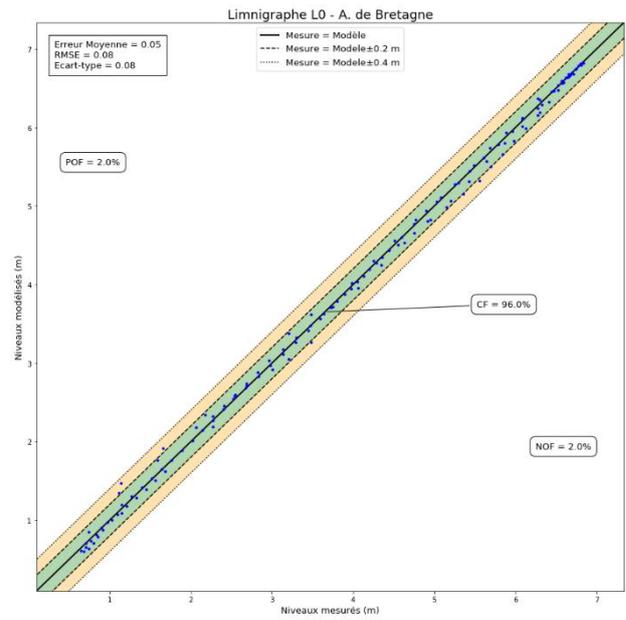
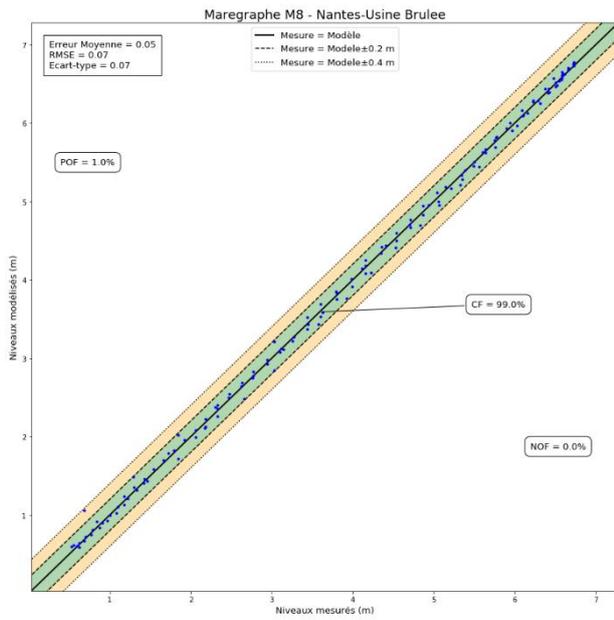
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 2 -fig.47 à fig. 55**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 10 - Quantification statistique pour la période à débit de 150 m³/s

Point de mesure	Période de 24 heures					
	Erreur Moyenne	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.04	0.05	0.05	99 %	0 %	1 %
Donges	0.05	0.07	0.06	100 %	0 %	0 %
Cordemais	0.05	0.06	0.06	100 %	0 %	0 %
Le Pellerin	0.05	0.06	0.06	99 %	1 %	0 %
Nantes - Usine Brûlée	0.05	0.07	0.07	99 %	1 %	0 %
Nantes – A. de Bretagne	0.05	0.08	0.08	96 %	2 %	2 %
Sainte-Luce-sur-Loire	0.13	0.16	0.16	75 %	3 %	22 %
Mauves-sur-Loire	0.06	0.08	0.06	100 %	0 %	0 %
Ancenis	0.12	0.15	0.09	70 %	30 %	0 %





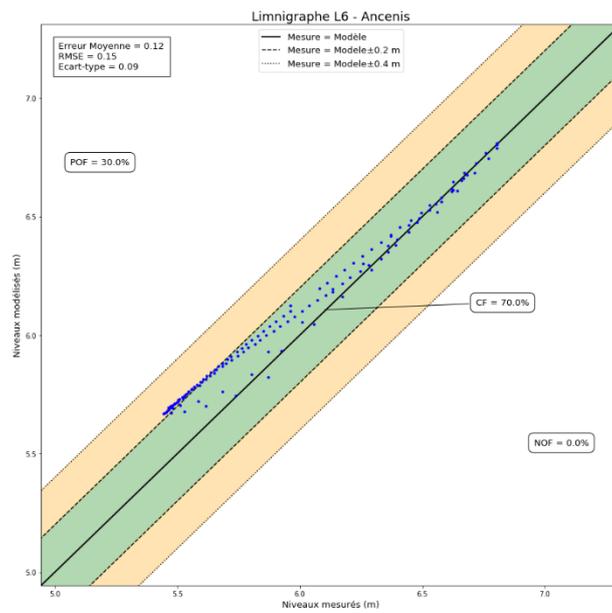


Figure 26 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de débit à 150 m³/s

3.4. RÉCAPITULATIF DES FROTTEMENTS LONGITUDINAUX OBTENUS APRES CALIBRATION

Le frottement longitudinal obtenu après calibration pour les 6 débits simulés peut être résumé dans le tableau suivant :

Tableau 11 – valeur de frottement obtenu après calibration pour chacun des débits

Nom	Débit						
	PK (km)	4000 m ³ /s	2500 m ³ /s	850 m ³ /s	400 m ³ /s	200 m ³ /s	125 m ³ /s
	-15	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	-5	0.00087	0.00087				
Saint-Nazaire	-0.5	0.00087	0.00087	0.05	0.05	0.002	0.002
	2	0.00087	0.00087	0.00087			
Montoir-de-Bretagne	7.9	0.00087	0.00087	0.00087	0.05	0.002	0.002
Donges	9.4	0.00087	0.00087	0.00087	0.002	0.002	0.002
	10	0.00087	0.00087	0.00087	0.00087		
	11	0.00087	0.00087	0.00087	0.00087		
	13		0.00087	0.00087	0.00087	0.00087	
Paimbœuf	16.4	0.002	0.05	0.00087	0.00087	0.00087	
	17.6			0.00087	0.00087	0.00087	0.0087
	22			0.00087	0.00087	0.00087	0.00087
Cordemais	24.7	0.15	0.05	0.15	0.00087	0.00087	0.00087
	35				0.00087	0.00087	0.00087
Le Pellerin	37.7	0.15	0.1	0.15	0.05	0.00087	0.00087
Nantes - Usine Brûlée	48.1	0.2	0.2	0.15	0.1	0.00087	0.00087
	50					0.00087	0.00087
Nantes - Salorges	53	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.00087
Nantes - A. de Bretagne	53.5	0.2	0.2	0.25	0.15	0.2	0.00087
Nantes - Saint Félix	56	0.2	0.2	0.25	0.15	0.25	0.00087
Sainte-Luce-sur-Loire	61.8	0.1	0.1	0.15	0.15	0.3	0.00087
	65						0.00087
Thouaré-sur-Loire	66.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
Mauves-sur-Loire	72.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3
Oudon	82.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
Ancenis	90.5	0.3	0.5	0.2	0.15	0.1	0.1
Limite Amont	100	0.3	0.5	0.2	0.15	0.1	0.1

À partir de ce tableau, une interpolation de carte de frottement est effectuée tous les 25 m³/s pour créer une bibliothèque de frottements, qui sera utilisée par le modèle pour n'importe quelle chronologie de débit de la Loire.

4. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE

Une phase de validation, représentative d'un fonctionnement caractéristique de la Loire est effectuée sur trois périodes d'une durée de 3 mois :

- une période d'étiage ;
- une période de débits faibles à moyens ;
- une période de crue.

Il est à noter cette fois-ci que les tableaux statistiques sont effectués à chaque fois sur une **période de 3 mois avec des débits et des forçages météorologiques variables (vent et pression)**. Les résultats obtenus sont donc forcément moins précis que sur les périodes de calage.

4.1. DÉBITS INFÉRIEURS À 130 M³/S

La période retenue pour la validation de débits très faibles sur la Loire correspond à l'étiage sévère de 2019, ayant notamment mis à mal le fonctionnement de la prise d'eau de Mauves-sur-Loire.

Elle s'étend du 01/07/2019 au 01/10/2019, et les débits y sont globalement inférieurs à 130 m³/s. Les niveaux à Saint-Nazaire, et les débits à Montjean-sur-Loire pour cette période sont visibles sur la figure suivante.

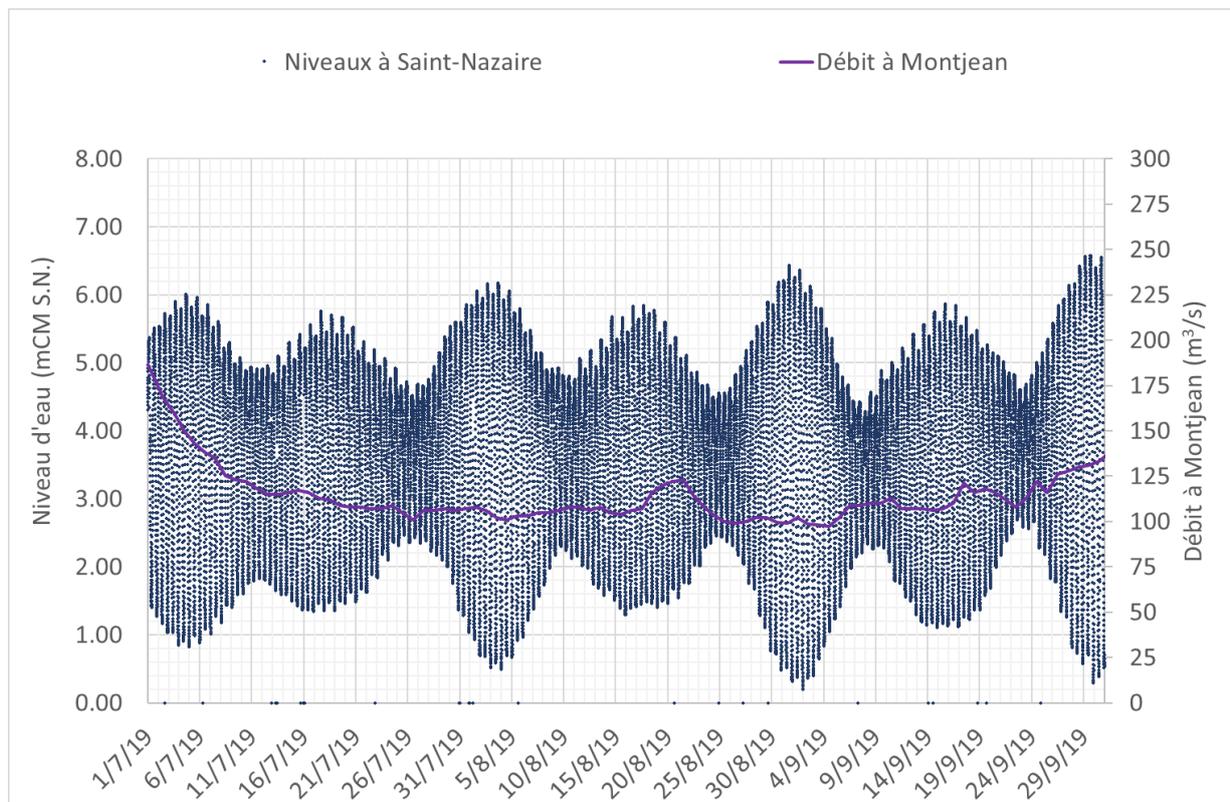


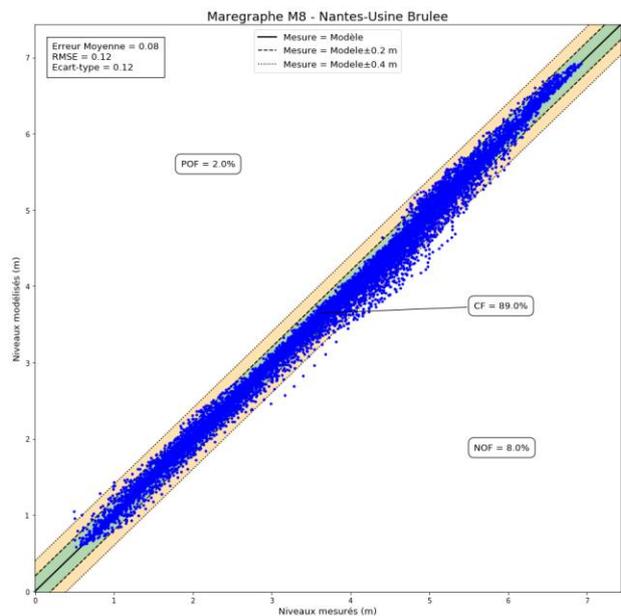
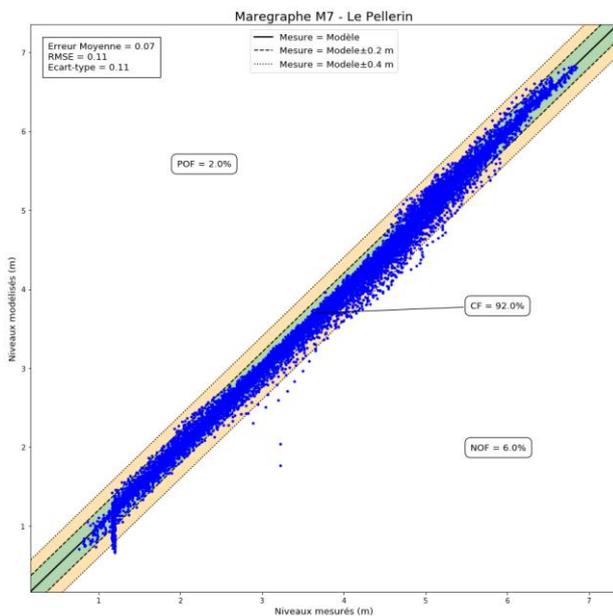
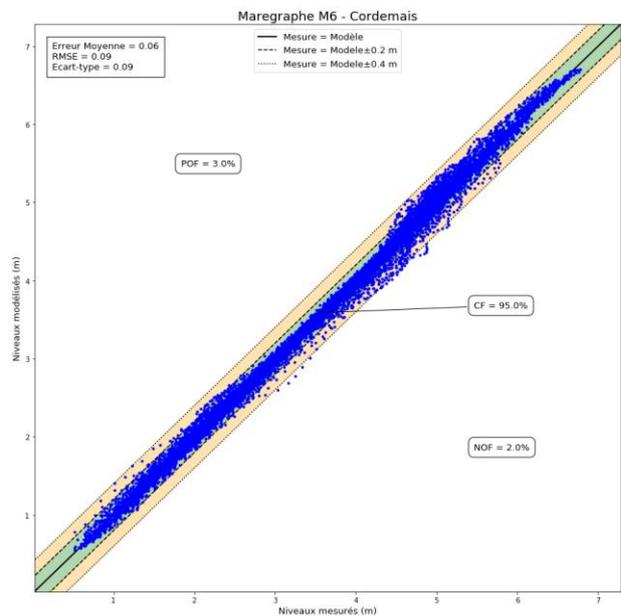
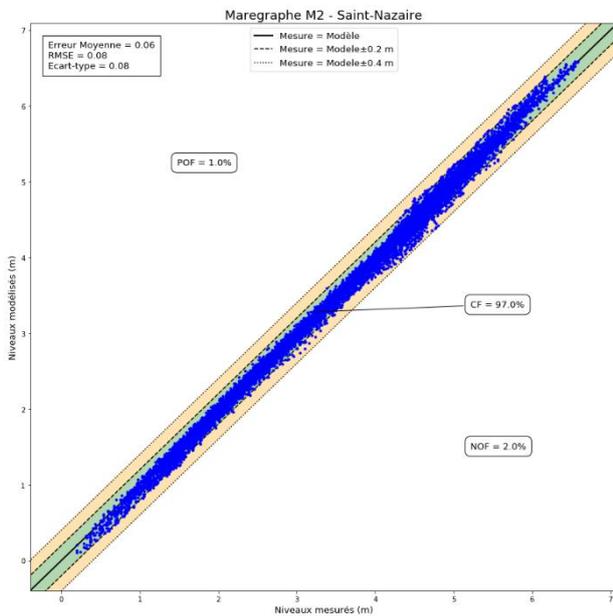
Figure 27 : Niveaux à Saint-Nazaire et débits à Montjean-sur-Loire lors de l'étiage sévère de 2019

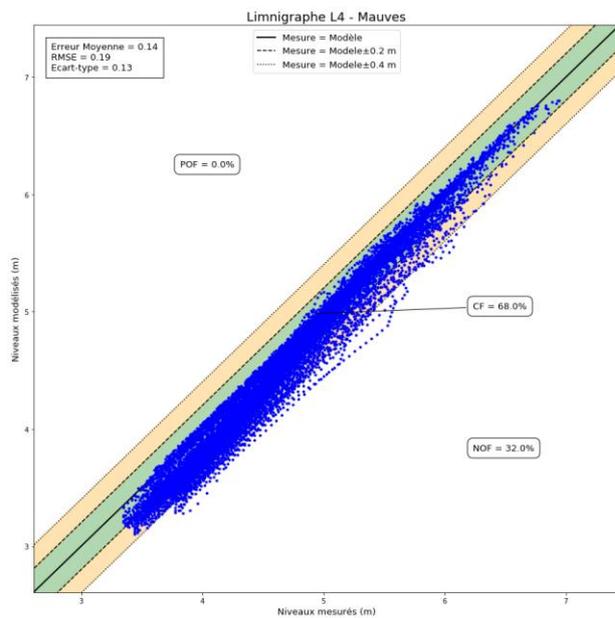
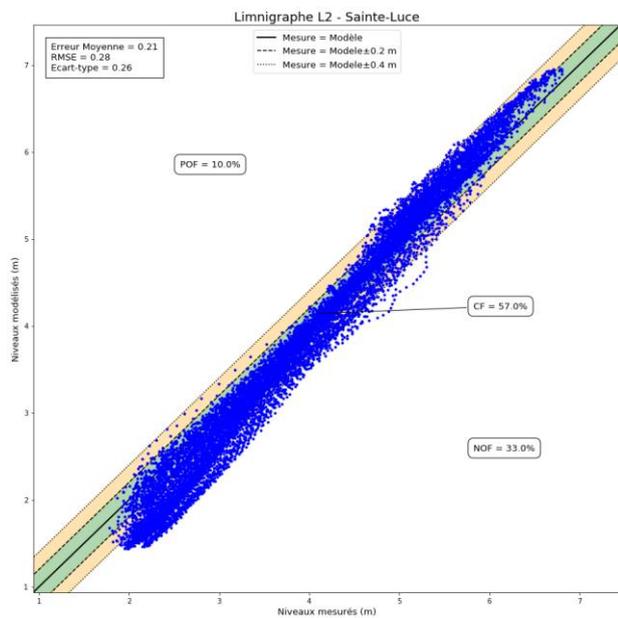
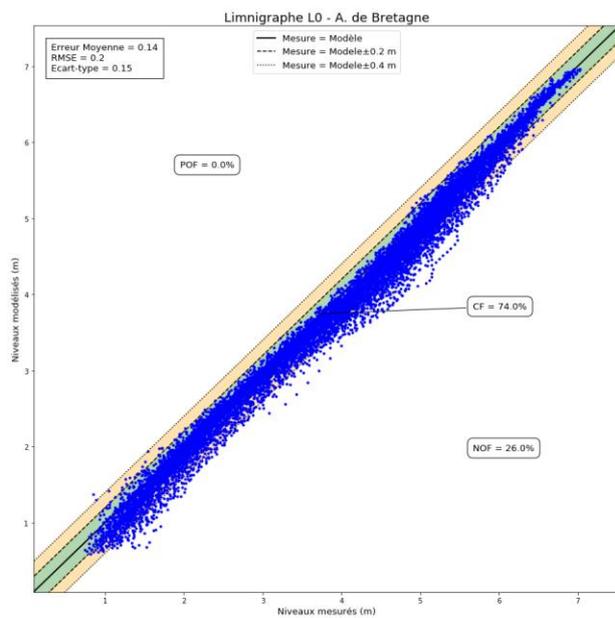
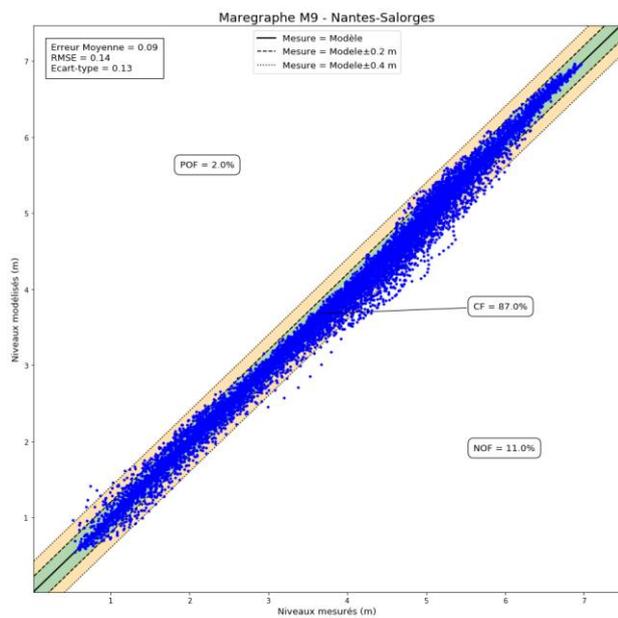
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 3 - fig.3 à fig. 14**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 12 - Quantification statistique pour la période de juillet, août et septembre 2019

Période de 3 mois						
Point de mesure	Erreur Moyenne (m)	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.06	0.08	0.08	97 %	0 %	2 %
Donges	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Cordemais	0.06	0.09	0.09	95 %	3 %	2 %
Le Pellerin	0.09	0.19	0.19	91 %	2 %	7 %
Nantes - Usine Brûlée	0.08	0.12	0.12	89 %	2 %	8 %
Nantes – A. de Bretagne	0.14	0.2	0.15	74 %	0 %	26 %
Sainte-Luce-sur-Loire	0.21	0.28	0.26	57 %	10 %	33 %
Mauves-sur-Loire	0.14	0.19	0.13	68 %	0 %	32 %
Ancenis	0.08	0.15	0.15	88 %	8 %	4 %





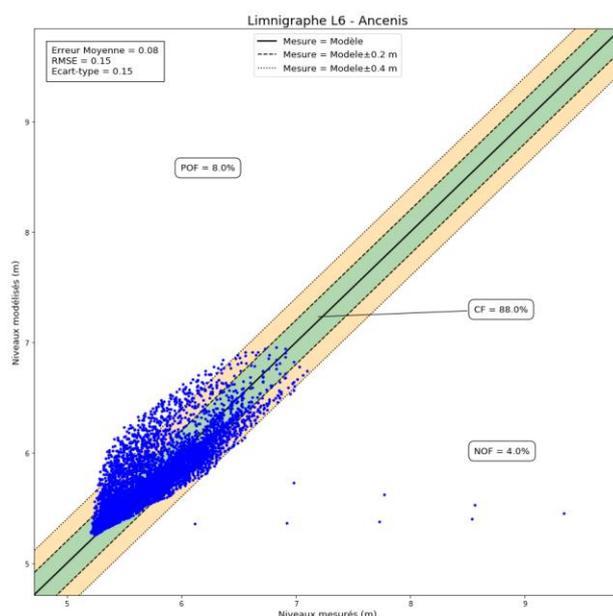


Figure 28 : Q-Q plot sur les marégraphes et linnigraphe pour la période de juillet, août et septembre 2019

Sur cette phase d'étiage, la validation donne des résultats mitigés, avec une bonne représentation sur l'aval du modèle, et une tendance à la dégradation en remontant sur l'amont (en particulier les secteurs de Sainte-Luce-sur-Loire et Mauves-sur-Loire).

Sur les zones du modèle moins bien représentées, la tendance est à des niveaux trop bas. Ces écarts s'expliquent principalement par l'utilisation d'une bathymétrie datant de 2009, sur un étiage intervient 10 ans plus tard. La tendance des écarts (modèle présentant des niveaux trop bas) est également cohérente avec la rehausse générale du lit mineur qui s'opère sur l'amont. De plus, la précision du maillage sur l'amont du modèle ne permet pas de prendre en compte les petites variations du lit d'étiage et explique donc la dégradation des résultats sur ces périodes.

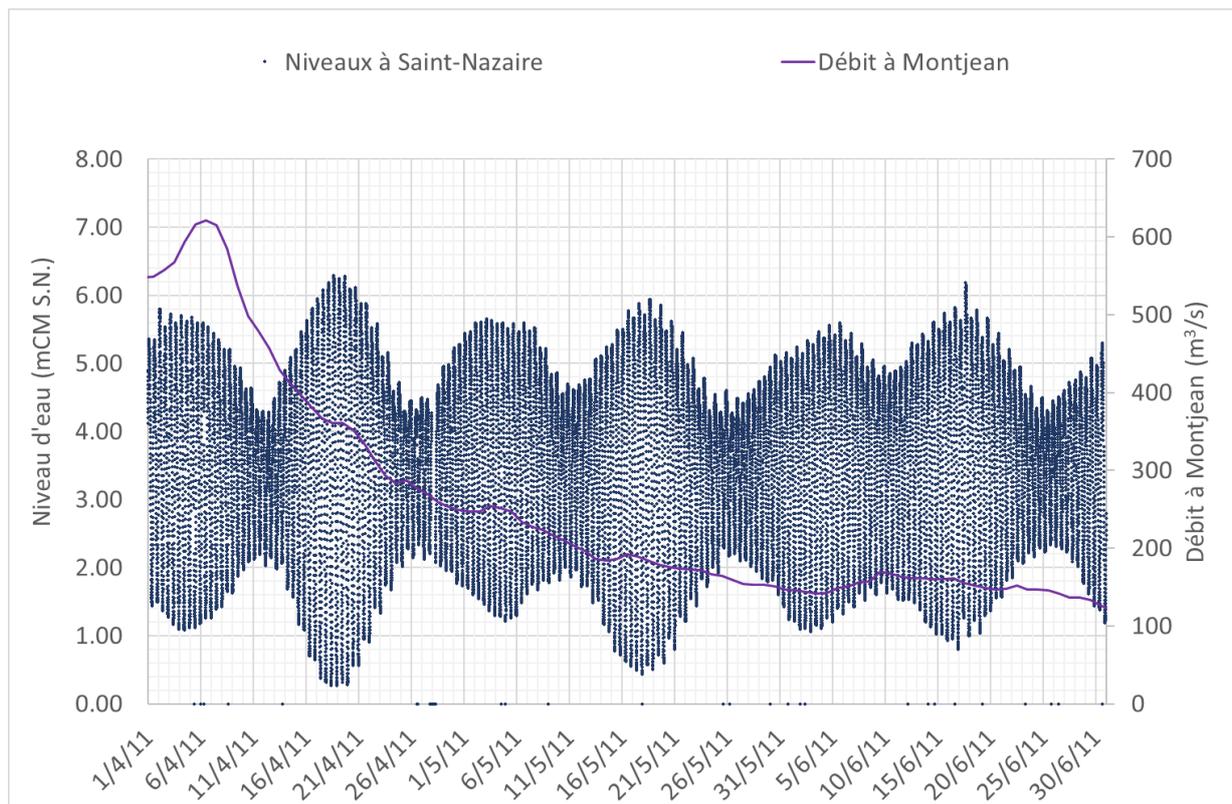
Malgré ces résultats mitigés en terme de valeurs de niveaux, il peut être noté la bonne capacité du modèle à représenter la dynamique générale des écoulements notamment à Mauves-sur-Loire où, selon les périodes, l'influence ou non de la marée est bien prise en compte.

Les résultats pour les périodes de débits moyens et de crue permettent de se rassurer sur la bonne représentativité générale du modèle.

4.2. DÉBITS DE 150 M³/S À 500 M³/S

La période retenue correspond à une période de débits faibles à moyens survenue au cours du printemps 2011. Elle se situe entre le 01/04/2011 et le 01/07/2011.

Les débits sur cette plage fluctuent entre 150 et 600 m³/s.

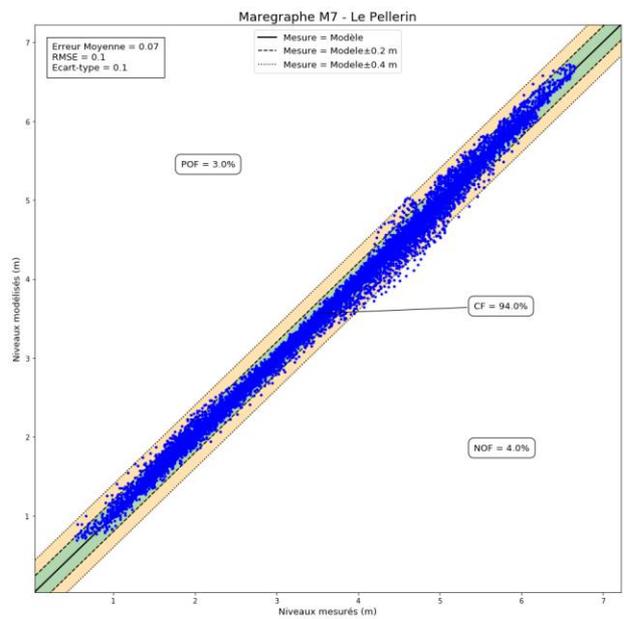
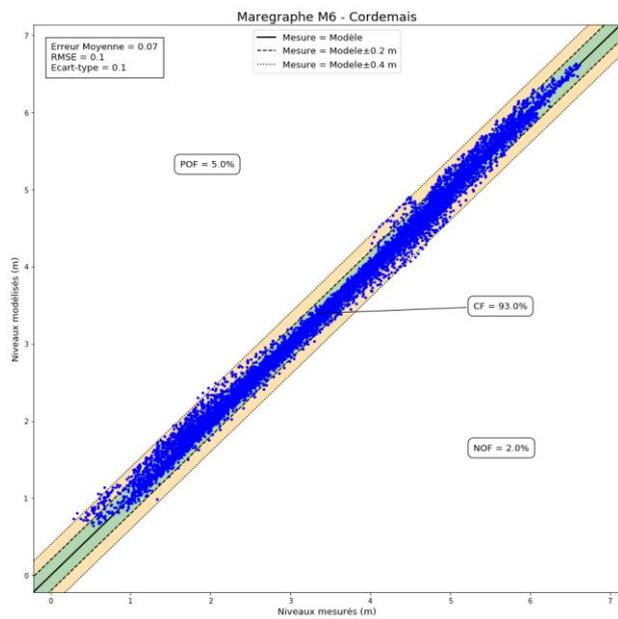
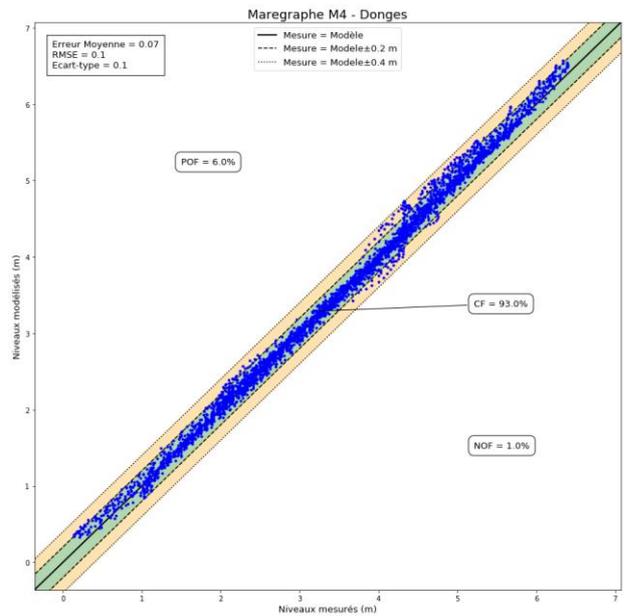
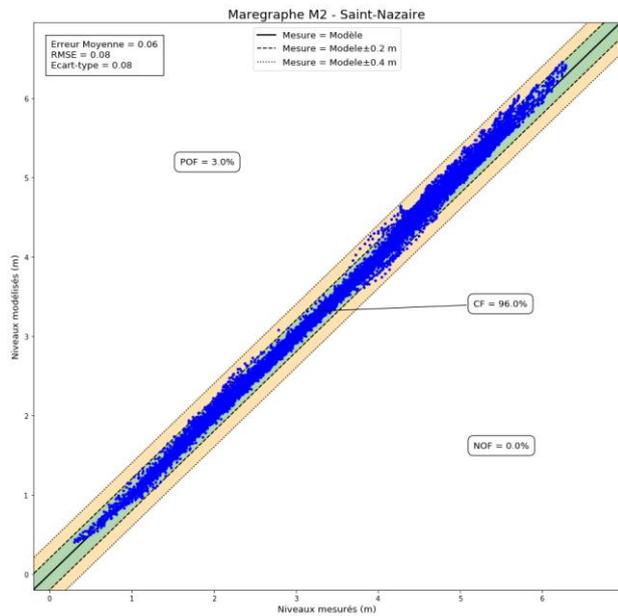


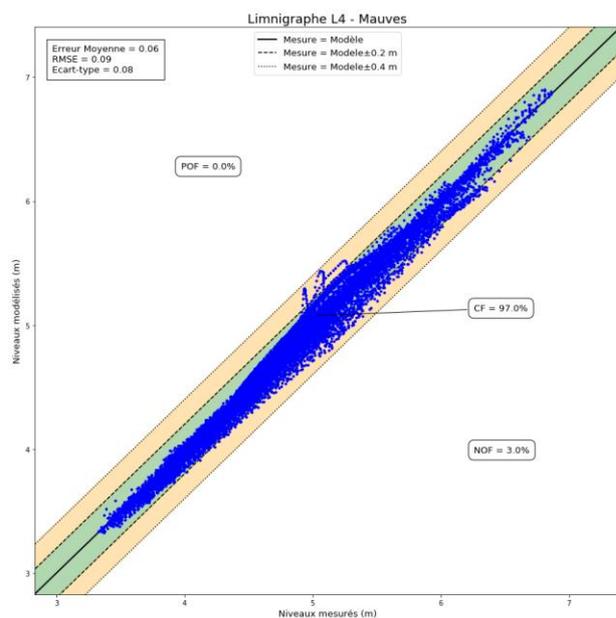
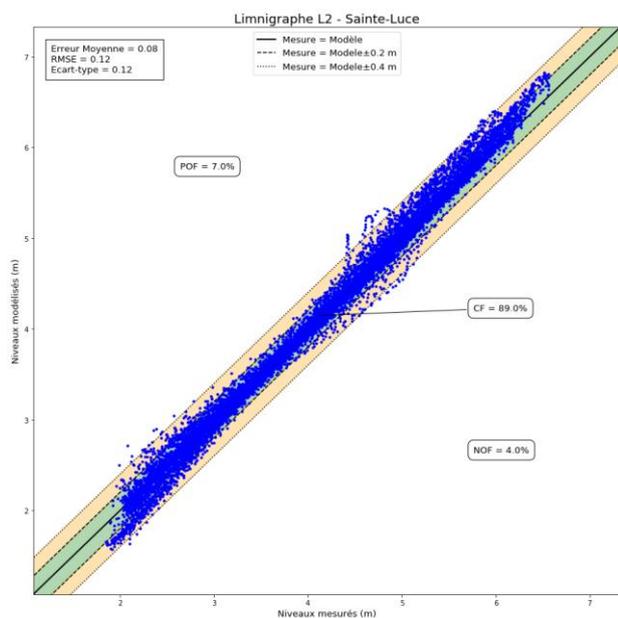
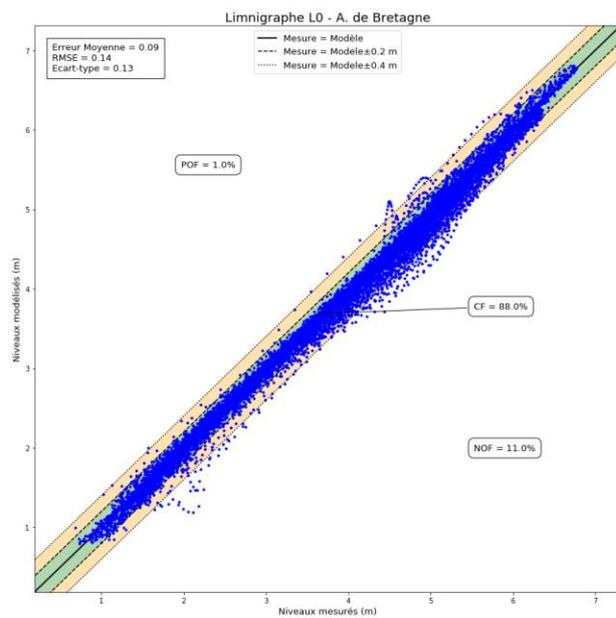
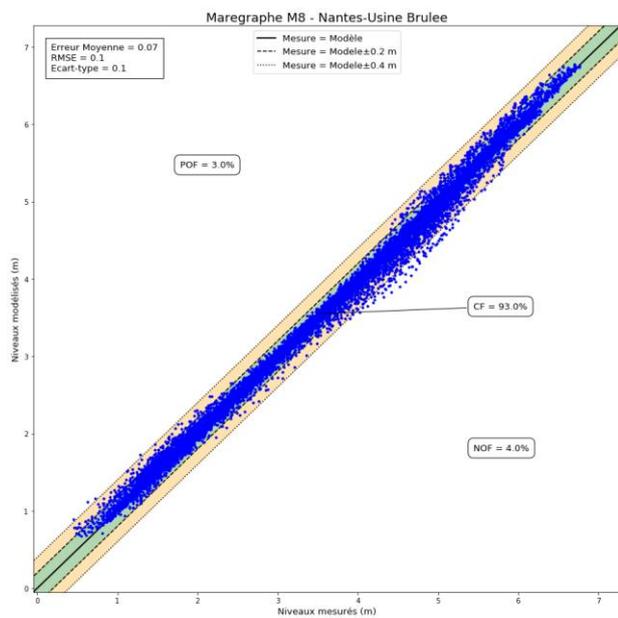
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 3 - fig.16 à fig. 30**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivant s:

Tableau 13 - Quantification statistique pour la période d'avril, mai et juin 2011

Point de mesure	Période de 3 mois					
	Erreur Moyenne (m)	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.06	0.08	0.08	96 %	3 %	0 %
Donges	0.07	0.1	0.1	93 %	6 %	1 %
Cordemais	0.07	0.1	0.1	93 %	5 %	2 %
Le Pellerin	0.07	0.1	0.1	94 %	3 %	4 %
Nantes - Usine Brûlée	0.07	0.1	0.1	93 %	3 %	3 %
Nantes – A. de Bretagne	0.09	0.14	0.13	88 %	1 %	11 %
Sainte-Luce-sur-Loire	0.08	0.12	0.12	89 %	7 %	4 %
Mauves-sur-Loire	0.06	0.09	0.08	97 %	0 %	3 %
Ancenis	0.07	0.08	0.08	99 %	0 %	1 %





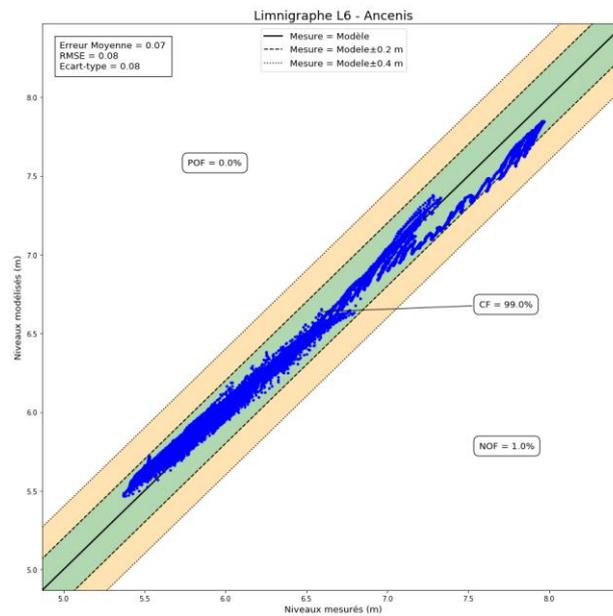
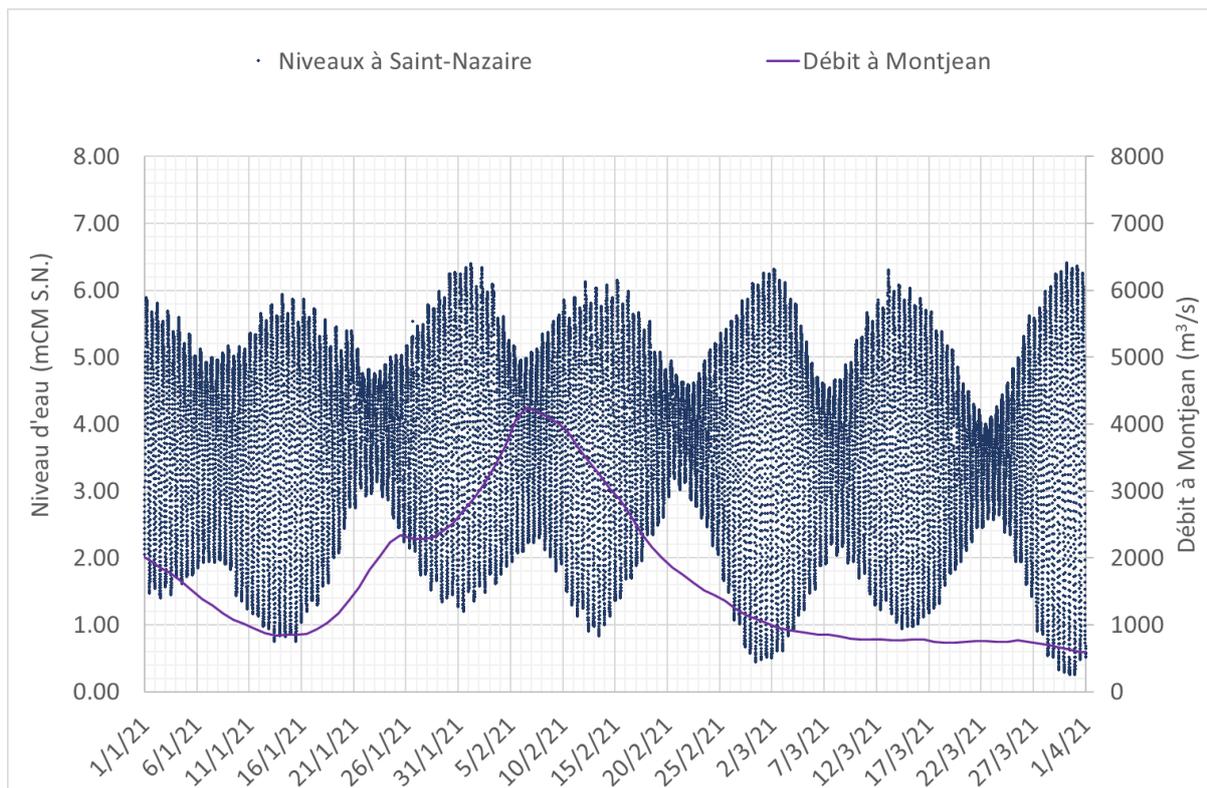


Figure 29 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période d’avril, mai et juin 2011

4.3. DEBITS DE 500 M³/S A 4000 M³/S

La période retenue pour la validation des débits de crue sur la Loire correspond à la dernière crue ayant franchi le seuil des 4000 m³/s, qui se trouve être de surcroît, une crue très récente datant de l’hiver 2021. Elle s’étend du 01/02/2021 au 01/05/2021.

Les débits sur l’ensemble de cette plage fluctuent entre 600 et 4250 m³/s.

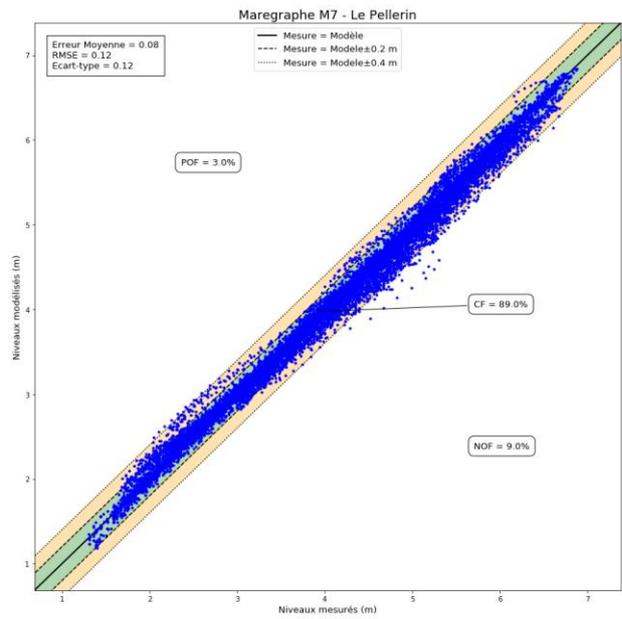
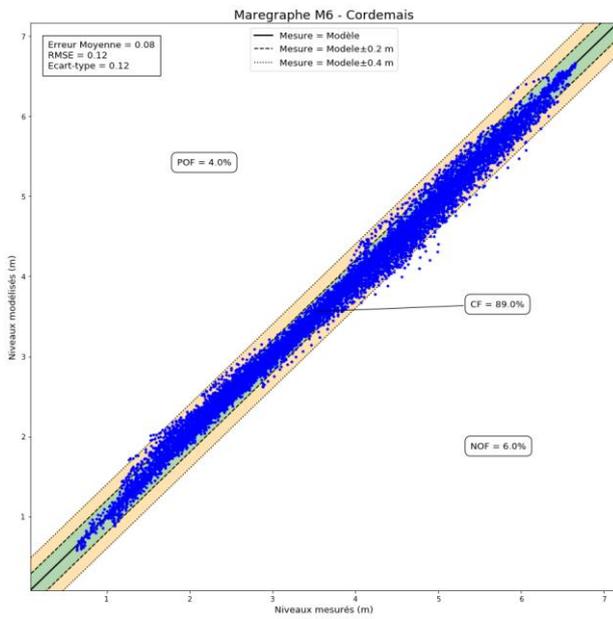
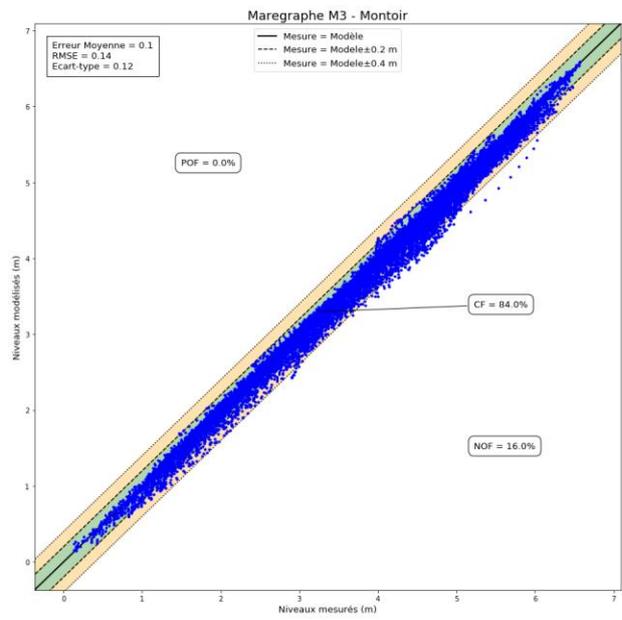
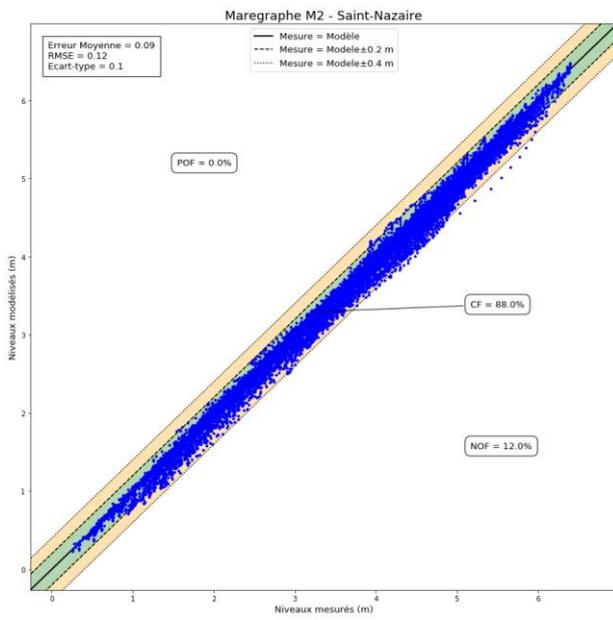


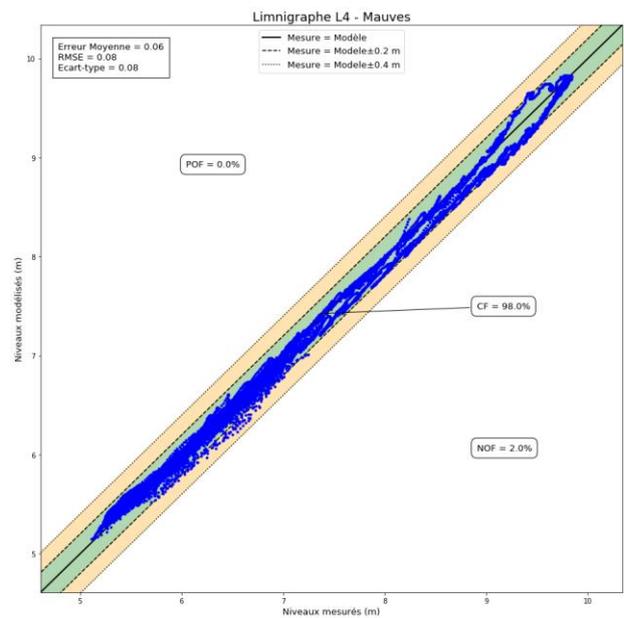
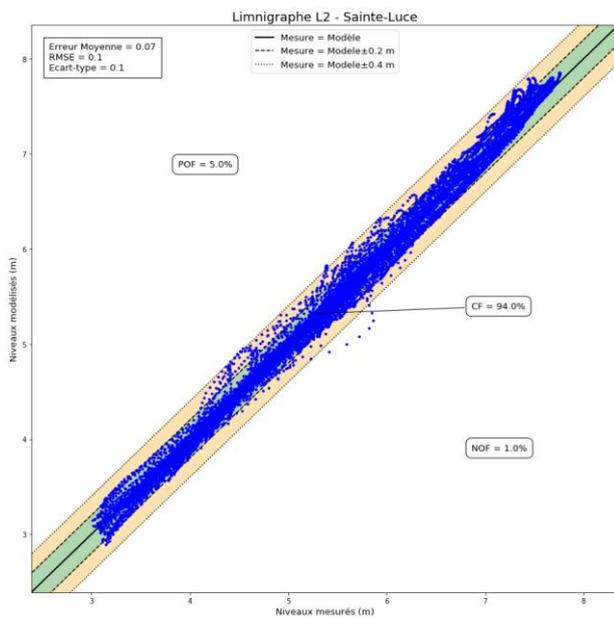
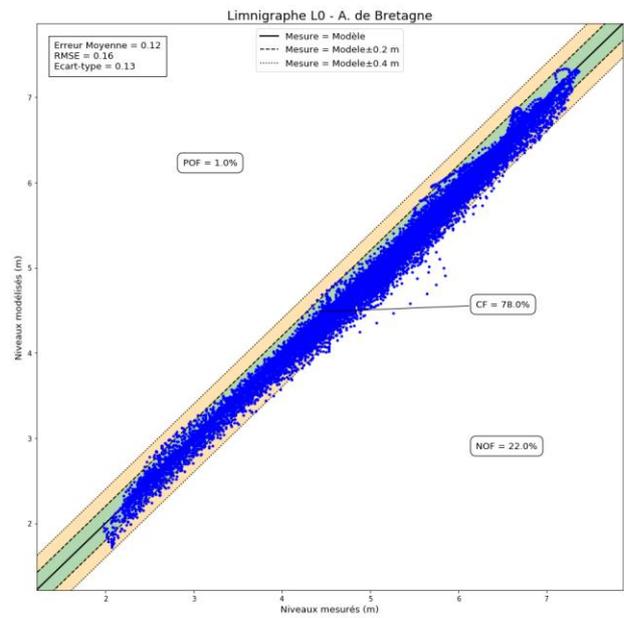
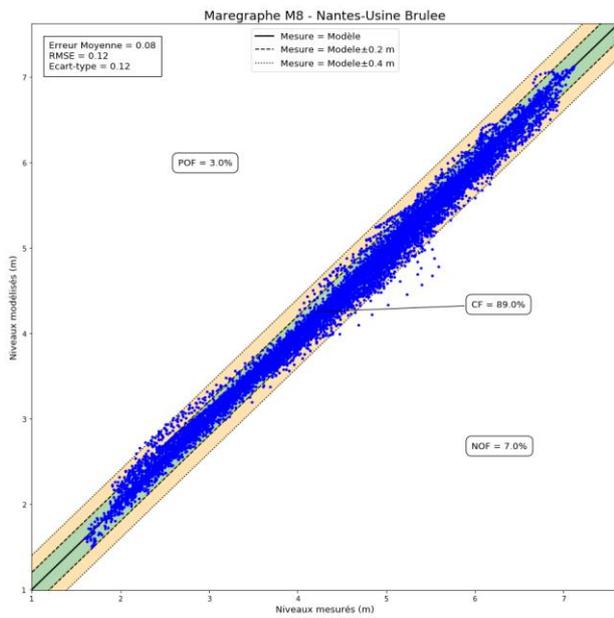
La comparaison des résultats du modèle aux marégraphes et limnigraphes est présentée en **Annexe 3 - fig.32 à fig. 46**

La quantification statistique du résultat obtenu est synthétisée dans le tableau et les graphiques suivants :

Tableau 14 - Quantification statistique pour la période de janvier, février et mars 2021

Point de mesure	Période de 3 mois					
	Erreur Moyenne (m)	RMSE	Ecart-type	CF(0,2)	POF(0,2)	NOF(0,2)
Saint-Nazaire	0.09	0.12	0.1	88 %	0 %	12 %
Montoir-de-Bretagne	0.1	0.14	0.12	84 %	0 %	16 %
Cordemais	0.08	0.12	0.12	89 %	4 %	6 %
Le Pellerin	0.08	0.12	0.12	89 %	3 %	8 %
Nantes - Usine Brûlée	0.08	0.12	0.12	89 %	4 %	7 %
Nantes – A. de Bretagne	0.12	0.16	0.13	78 %	1 %	21 %
Sainte-Luce-sur-Loire	0.07	0.1	0.1	94 %	5 %	1 %
Mauves-sur-Loire	0.06	0.08	0.08	98 %	0 %	2 %
Ancenis	0.26	0.28	0.08	24 %	0 %	76 %





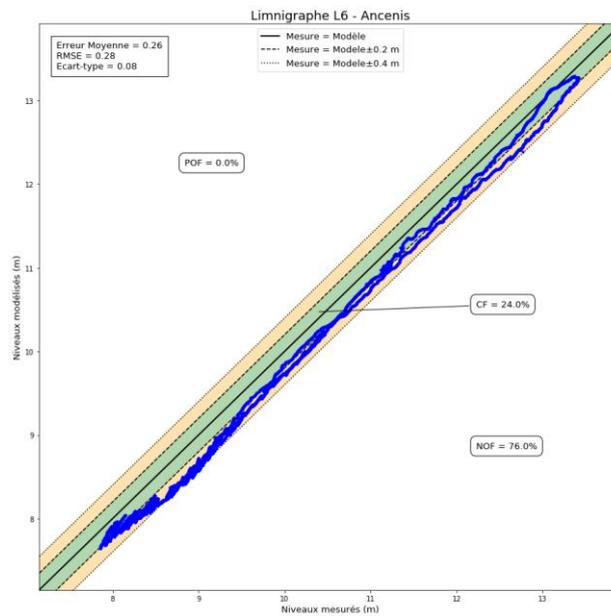


Figure 30 : Q-Q plot sur les marégraphes et limnigraphes pour la période de janvier, février et mars 2021

Sur cette période, le modèle est globalement bien représentatif des niveaux tout le long de l'estuaire. Seul la station d'Ancenis est moins bien représentée avec des niveaux un peu trop faibles. Il est à noter que même si le pourcentage (CF) est très faible, l'erreur moyenne reste acceptable (26 cm). Le problème est le même que celui identifié lors de la phase de calage, avec une représentation différenciée de la phase de crue et de décrue qui n'est pas possible (avec l'approche retenue) et la non prise en compte des zones d'expansion des crues.

5. CALAGE ET VALIDATION EN SALINITÉ (SANS MES)

5.1. LES PROCESSUS

La stratification verticale des courants et de la salinité dans l'estuaire aval peut être très significative en période de faible débit et morte eau, ou en forte crue.

En période de crue, des forces significatives opposées, entre un fort apport fluvial d'eau douce en surface et une entrée marine par le fond, induisent une forte stratification dans la partie aval de l'estuaire.

En période d'étiage et mortes eaux, la dynamique tidale est faible et ne permet pas de mélanger suffisamment l'écoulement sur la verticale, afin d'obtenir une salinité homogène. Un gradient de salinité s'installe sur la verticale et permet la formation d'une bicouche avec peu d'échange. Des courants de densité liés aux gradients de salinité s'installent alors. Ces courants de densité étant peu contrés par la dynamique fluviale, puisqu'en étiage et dans la partie basse du bicouche, ils permettent alors de fortes remontées salines de la mer vers l'intérieur de l'estuaire.

Ces différents processus expliquent pourquoi une **attention particulière doit être portée à la représentation de la diffusion turbulente sur la verticale.**

Notre expérience avec le modèle précédent a conduit à développer en 2009-2012 un modèle 1D de longueur de mélange multicouches, qui permet une très forte amélioration de la représentation des stratifications, en comparaison à des modèles 1D à longueur de mélange classique avec une loi d'amortissement.

Des modèles 3D de turbulence encore plus perfectionnés (convection de la turbulence en horizontal et vertical) sont à disposition dans Telemac-3D comme K-epsilon (en 3D), K-omega (en 3D). Comme convenu au moment de l'offre, ils ne seront pas utilisés dans cette étude, étant donné les surplus de temps de calcul (2 à 3 fois supérieurs) et les délais d'étude à respecter.

En 2012, les résultats obtenus avec le modèle 1D développé de longueur de mélange multicouches étaient en moyenne comparables à ceux obtenus avec le k-epsilon. Il a donc été convenu de mettre à jour cette méthodologie dans ces développements.

5.2. MODÈLE DE TURBULENCE VERTICAL 1D DE LONGUEUR DE MÉLANGE MULTICOUCHES

La bonne reproduction des stratifications verticales en courant, salinité et vases nécessite de porter une attention particulière à la modélisation de la turbulence verticale générée par l'écoulement 3D. Le développement de la modélisation de ces processus dans l'estuaire de la Loire a amené à mettre en place un modèle multicouches testé avec succès dans l'estuaire de la Loire en 2009-2012.

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

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

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

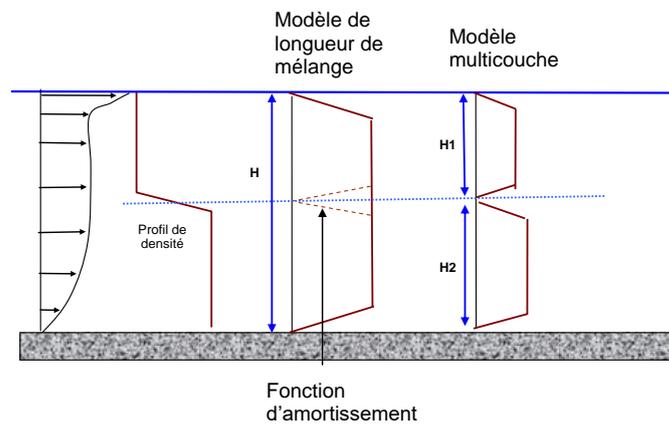


Figure 31 : Schématisation des longueurs de mélange avec fonction d'amortissement, ou avec le développement multicouches

5.3. MISE EN PRATIQUE DU MODÈLE DE TURBULENCE MULTICOUCHES

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

La correction appliquée à la longueur de mélange est basée sur une fonction à seuil. **Si la stratification est suffisamment forte**, alors les échanges entre les couches supérieure et inférieure sont faibles et la production turbulente verticale dans la couche supérieure est supposée indépendante de la couche inférieure. **La longueur de mélange est alors calculée indépendamment sur chaque couche en fonction de son épaisseur.**

La mise en œuvre se fait sur la base de l'analyse du profil vertical du **nombre de Richardson (Ri)**. Les **couches définies par $Ri < Cst$** sont recherchées. Cette **constante (Cst)** est ajustable, mais par une analyse basée sur les publications traitant des gradients océaniques de température, et par expériences de calibration sur des données *in situ*, cette constante est **de l'ordre de 0,2 à 0,25**.

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

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

5.4. MÉTHODE DE CALIBRATION POUR LA SALINITÉ

La calibration du modèle en stratification sur les mesures *in situ* peut donc s'effectuer via le nombre de Richardson critique (cf.5.3), qui permet de définir des couches homogènes dans laquelle la turbulence peut se développer.

L'intensité de la remontée saline à l'intérieur de l'estuaire (principalement lors des étiages mortes eaux) est aussi liée à l'opposition de forces fluviales allant vers l'aval, avec les forces de densités se dirigeant principalement vers l'amont.

Les forces de densité sont proportionnelles aux gradients de densité locaux. Ceux-ci peuvent être sous-estimés dans la modélisation, principalement du fait de la discrétisation du maillage en vertical et en horizontal.

En effet, ces gradients de densité peuvent être très marqués en nature, et ils sont souvent lissés par la discrétisation du maillage et par la diffusion numérique, ce qui induit des courants de densités modélisés plus faibles que ce qu'il ne serait calculé sur un profil vertical relevé *in situ*.

Une très forte augmentation de la discrétisation du maillage associé à un schéma numérique acceptant des fronts très marqués et un pas de temps associé plus faible, permet de réduire fortement cette sous-estimation (ce qui a pu être testé sur la modélisation de l'estuaire de la Seine en 3D). **Cependant, les temps de calculs ne sont alors généralement plus en accord avec l'opérationnalité demandée.**

C'est pourquoi, il est possible d'**appliquer un coefficient d'amplification des forces de densité**. Ce facteur n'intervient que si un gradient de densité existe, donc principalement dans la zone du coin salé et devient alors un paramètre de calage.

Avec un paramètre de Richardson critique de 0,2 pour la stratification, et le maillage vertical optimisé qui est relativement précis près du fond, le **coefficient d'amplification a pu être fixé à 1,25 (amplification de 25%), afin d'obtenir des résultats satisfaisants**. Il est à noter que cette calibration est effectuée sans sédiment en suspension, qui par sa forte concentration peut modifier la densité des eaux et l'écoulement principalement au fond. Ce paramètre sera réadapté au moment du calage en MES et crème de vase en le fixant à 1 (pas d'amplification), ce qui confirme bien que cette amplification effectuée à ce stade est due au manque de gradient de densité par la non prise en compte de la crème de vase.

L'acceptabilité des résultats obtenus par modélisation, par rapport aux mesures est principalement jugée, par la bonne reproduction de la dynamique haline en fonction des forçages mis en jeu :

Bonne reproduction des périodes de stratifications et de sa localisation dans l'estuaire :

1. Cas Morte-eau ET débit faible :

- Morte-eau : faible mélange sur la verticale et faible excursion horizontale de la salinité ;
- Débit faible : faible mélange sur la verticale et faible opposition aux forces de densité se dirigeant vers l'amont.

La combinaison de ces deux forçages permet des gradients verticaux importants de salinité qui induisent des forces de densité faiblement contrées (peu d'énergie de marée ou du débit) et permettent des remontées salines assez importantes.

2. Cas de la crue

- Fort débit : l'opposition d'un fort débit d'eau douce, qui s'oppose à l'eau marine en sortie d'estuaire, impose une stratification par opposition des forces. L'eau salée plus dense rentre préférentiellement par le fond du chenal de navigation (tant que celui-ci est assez profond), là où elle est le moins contrée par l'écoulement d'eau douce en partie supérieure.

Bonne reproduction des périodes de mélange :

3. Cas des Vives eaux : fort mélange sur la verticale et forte excursion horizontale de la salinité

4. Cas d'un coup de vent : fort mélange sur la verticale

La partie quantitative de la comparaison modèle/mesure a été calibrée au mieux, tout en sachant qu'il est très difficile d'obtenir quelque chose de parfait dans la zone de forte stratification ou de coin salé. En effet, le coin salé évolue temporellement de manière forte horizontalement (excursion de la marée) et les sondes, qui sont souvent positionnées à une hauteur fixe par rapport à la surface, évoluent temporellement de manière forte verticalement (marnage). La combinaison de ces deux mouvements dans une zone mobile à fort gradient est donc forcément compliquée à reproduire.

Le travail s'est donc attaché à reproduire les stratifications dans les zones concernées, mais les mesures de remontée saline (Cordemais par exemple en morte eau et débit faible) ont été privilégiées pour la calibration finale des paramètres. En effet, ces périodes de remontées salines, par densité, en période d'étiage permettent aussi les remontées de sédiment cohésif fortement concentrées. Que ce soit pour la salinité ou le sédiment non-cohésif, il est cherché à savoir reproduire au mieux ces phénomènes lors des périodes de faible débits, qui posent le plus de questions actuellement dans l'estuaire.

5.5. CALIBRATION EN SALINITÉ - CAMPAGNE D'OCTOBRE 2000

Cette campagne (menée pour le GIP LE) a permis de relever des mesures concomitantes du 4/10/2000 au 23/10/2000 avec des débits allant de 300 à 1000 m³/s sur 3 stations :

- Mouillage de Bilho (mesure à environ 1,5 m au-dessus du fond)
- Mouillage de Montoir-de-Bretagne (mesure à 1,4 m sous la surface et 7,7 m sous la surface)
- Mouillage de Cordemais (mesure à 1,5 m sous la surface et 3,6 m sous la surface)



Figure 32 : Position des mouillages durant la campagne d'octobre 2000

Les stations de mesure de Montoir-de-Bretagne et Cordemais avec des mesures à double hauteur (surface et mi-hauteur) montrent clairement :

- En vive eau : une période de mélange importante associée à une amplitude importante de la salinité en aval de l'estuaire. Cependant à Cordemais, malgré la forte amplitude des marées, la salinité remonte assez peu ou de façon diluée.

- En morte eau : les mesures sont très stratifiées entre fond et surface, et surtout il est obtenu à Cordemais une forte remontée de la salinité par densité, lorsque les débits sont faibles.

La comparaison des résultats du modèle 3D avec les mesures est présentée en **Annexe 4 - fig. 2 à 7**

5.6. VALIDATION EN SALINITÉ - CAMPAGNE DE JANVIER 2004 (CRUE)

Cette campagne (menée pour le GIP LE) a permis de relever des mesures concomitantes du 19/01/2004 au 05/02/2004 avec des débits allant de 4700 à 2400 m³/s sur **3 stations** :

- Mouillage de Mindin (mesure à 1,5 m sous la surface, 9 m sous la surface et au fond)
- Mouillage de Montoir-de-Bretagne (mesure à 1,5 m sous la surface et mesure à environ 0,5 m au-dessus du fond)
- Mouillage de Bilho (et mesure à 1,5 m sous la surface et mesure à environ 0,5 m au-dessus du fond)



Figure 33 : Position des mouillages durant la campagne de janvier 2004

La période de crue de janvier 2004 montre une forte stratification haline dans le chenal de navigation au niveau de Mindin et Montoir-de-Bretagne en morte eau. En vive eau, la stratification est moins importante, mais est présente. La salinité, même lors des périodes de débits supérieures 4000 m³/s, remonte par densité par le fond du chenal de navigation.

Les brusques périodes de mélange vertical sont dues à des coups de vent dépassant les 10 m/s. Le modèle reproduit d'ailleurs assez bien ce mélange dû au vent (31/01/2004).

La comparaison des résultats du modèle 3D avec les mesures est présentée en **Annexe 4 - fig. 8 à 13**.

5.7. VALIDATION EN SALINITÉ - JUILLET À OCTOBRE 2019 (ÉTIAGE SÉVÈRE)

La majeure partie des problèmes observés se produisant en étiage, que ce soit en salinité ou sédiment cohésif, il a paru intéressant de vérifier qu'avec la paramétrisation retenue, il était possible de reproduire les remontées salines durant l'été 2019, pendant lequel il y a eu aussi de fortes remontées de sédiment cohésif jusqu'à Mauves-sur-Loire (station de pompage d'eau potable).

Les mesures disponibles sont celles du réseau SYVEL et sont plutôt représentatives d'un état de surface (à -1 m). Pour cette période la salinité est détectée jusqu'à Bellevue, les stations disponibles sont :

- Donges
- Paimbœuf
- Cordemais
- Le Pellerin
- Trentemoult
- Bellevue

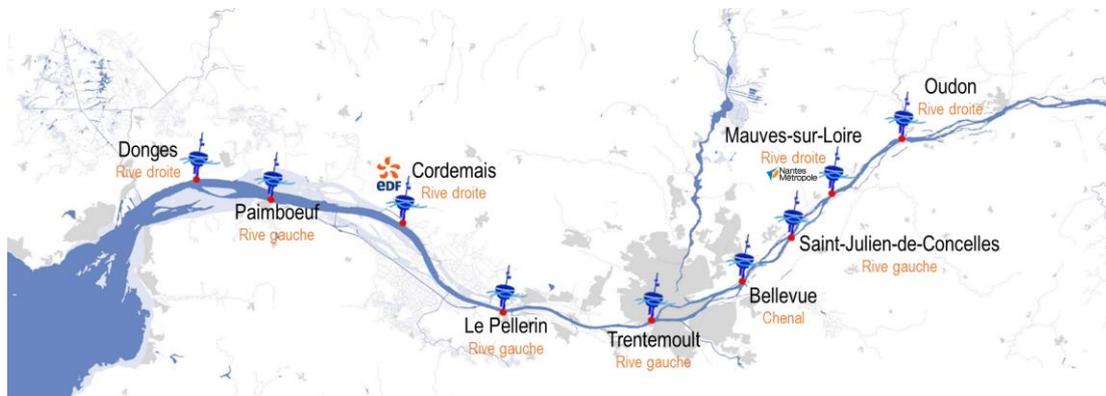


Figure 34 : Position des stations du réseau SYVEL

La comparaison des résultats du modèle 3D avec les mesures est présentée en **Annexe 4 - fig. 14 à 23**.

5.8. VALIDATION EN SALINITÉ SUR LES PROFILS HYDROLOGIQUES EN SEPTEMBRE 2019

Un profil longitudinal est réalisé entre le pont de Bellevue, à l'amont de Nantes, et le pont de Saint-Nazaire. Des mesures sont effectuées en moyenne tous les 2 km, dans l'axe du chenal de navigation, sur la profondeur de la colonne d'eau.

Des profils transversaux sont réalisés entre Mauves-sur-Loire et le pont de Saint-Nazaire au niveau des 6 stations du réseau de mesures en continu SYVEL. Des mesures proches de chaque berge et dans l'axe du chenal sont effectuées.

La campagne est effectuée les 02 et 03 septembre 2019. Le débit journalier mesuré à Montjean-sur-Loire est de 98 m³/s et les coefficients de marée sont respectivement de 111 et 102.

La comparaison du modèle aux mesures effectuées sur le profil longitudinal est présentée en **Annexe 4 - fig. 24 à 50**. Un calcul d'erreur n'est pas réalisé sur ces mesures ponctuelles temporellement, spatialement et verticalement car il est moins pertinent que pour des mesures à haute fréquence d'acquisition. L'intérêt des comparaisons réside plus dans le fait de reproduire les stratifications sur la verticale lorsqu'elles sont également mesurées.

Il est à noter sur la partie inférieure des mesures une possible interaction avec la crème de vase (PK25 à 40) qui fait dévier la mesure de conductivité (mesure de salinité plus faible en profondeur).

6. PROPAGATION ET GÉNÉRATION DE LA HOULE

Pour ce modèle dit global, dont l'objectif est centré sur l'estuaire interne, il était prévu initialement d'utiliser des bibliothèques de houle précalculées, qui auraient été interpolées à chaque pas de temps, afin de limiter les temps de calcul. **Afin d'homogénéiser les méthodes avec le modèle raffiné externe** qui suivra, il a été décidé de pré-propager et pré-générer la houle et les états de mer en **couplant Telemac-3D avec Tomawac, sur un calcul hydraulique pur**. Les résultats de houles seront alors relus par le modèle hydrosédimentaire par la suite. L'avantage par rapport à une bibliothèque de houle est de pouvoir calculer une interaction houle/courant sur la propagation et calculer de la génération d'état de mer par le vent.

La simplification par rapport à un couplage complet Telemac-3D-Tomawac-Gaia (comme prévu pour le modèle raffiné estuaire externe) réside dans le fait que **l'évolution du fond n'est pas mise à jour pour Telemac-3D et Tomawac**. Les évolutions étant mineurs au cours d'une année, **l'approximation reste pleinement valide pour un tel modèle**.

6.1. LES FORÇAGES

Le modèle est forcé en chaque point de sa frontière maritime par les résultats de modélisation HOMERE (Ifremer) en hauteur de houle ($Hm0$), Période de pic (Tp), 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 est forcé à sa surface sur l'ensemble des points du maillage, par les champs de vent provenant des mêmes modélisations HOMERE. Ce forçage permet la génération des états de mer à l'intérieur du domaine.

6.2. CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE DE HOULE

Le GPMNSN a effectué une campagne de mesures *in situ* d'octobre 2018 à septembre 2019 en 2 points situés dans l'estuaire externe dénommés « Lambarde » et « Chatelier » présentés dans la figure suivante :

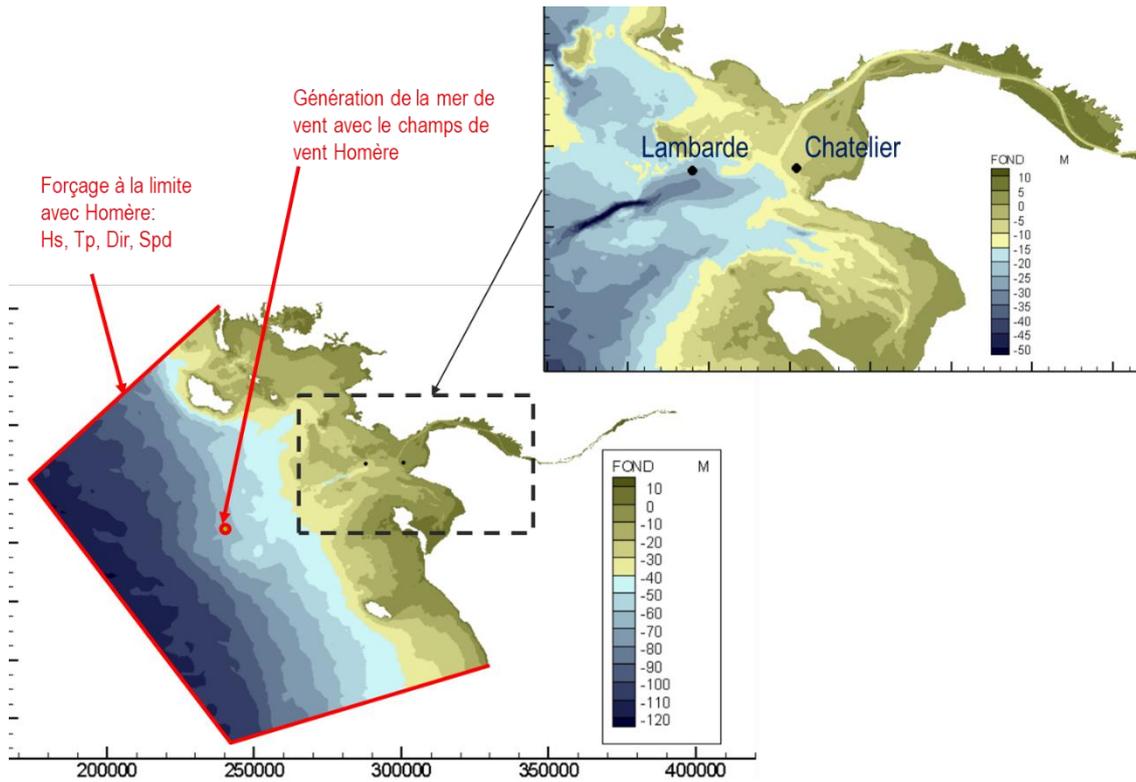


Figure 35 : Forçages du modèle Tomawac et points de mesure à la Lambarde et au Chatelier

La comparaison des résultats du modèle est présentée en **Annexe 5 - fig. 2 à 5**. Les résultats sont dans l'ensemble de bonne qualité avec une légère surestimation des faibles états de mer, ce qui est acceptable pour l'objectif hydrosédimentaire du modèle.

7. MES ET CRÈME DE VASE (RAPPORT BASE SUR LE CALCUL N°105)

Le module Gaia est cette fois couplé au modèle Telemac-3D, pour la gestion du sol (stratification, consolidation, mélanges...) et le calcul des flux d'érosion, dépendant de la composition de chaque couche stratigraphique du sol.

Dans cette version du modèle dit global pour lequel il s'agit principalement de la dynamique du bouchon vaseux, seule la vase est transportée et non le sable. Cependant, il est aussi prévu d'inclure dans ce modèle global, la modélisation du bruit de fond ambiant dans la partie externe de l'estuaire. **Les équations d'érosion du sol étant très dépendantes du mélange sable/vase local en surface, il a été décidé d'incorporer d'ores et déjà un remplissage sédimentaire de sable**, afin de rejoindre les théories implantées dans le modèle de stabilité et le modèle de bruit de fond régional tels qu'ils avaient été conçus pour le GPMNSN.

7.1. LE PRINCIPE GÉNÉRAL DE GESTION DU SOL

Ci-dessous (Figure 36) est présenté le schéma récapitulatif de la gestion du sol retenu pour le modèle global.

Le modèle de gestion du sol est composé de 17 couches sédimentaires au-dessus du fond « dur » (ce dernier étant sans possibilité d'affouillement) :

- La première couche en partant du fond « dur » représente le remplissage sédimentaire du substrat initial : celle-ci sera remplie à partir de trois types de sédiment : 1 gravier, 1 sable et 1 vase.(cf. § 7.5.2.2)
- Les 16 couches supérieures correspondent aux couches de mélange de sables et vases qui se déposeront au cours du calcul et s'éroderont en priorité avant la couche de remplissage sédimentaire du substrat initial qui se situe au-dessous. Cette zone de 16 couches considère un modèle de consolidation présenté au (§7.4.1).Il est possible de regrouper cette zone de mélange en une zone de vase consolidée (3 couches de 325 à 375 g/l), une zone de vase stricto-sensu (9 couches de 125 à 300g/l) et une zone de crème de vase liquide (4 couches de 40 à 100g/l). Chaque couche étant représentative d'une concentration donnée et d'une contrainte critique associée. C'est le modèle de consolidation qui gère le transfert des masses de sédiment entre les couches, au cours du temps.
- Le fait de tenir compte du sable dans les équations d'érosion, sans tenir compte du transport de celui-ci, implique de résoudre complètement le flux d'érosion du mélange sable/vase, mais que le sable érodé dans la couche active soit directement remis dans le remplissage sédimentaire (la première couche en partant du fond) afin de conserver la masse.

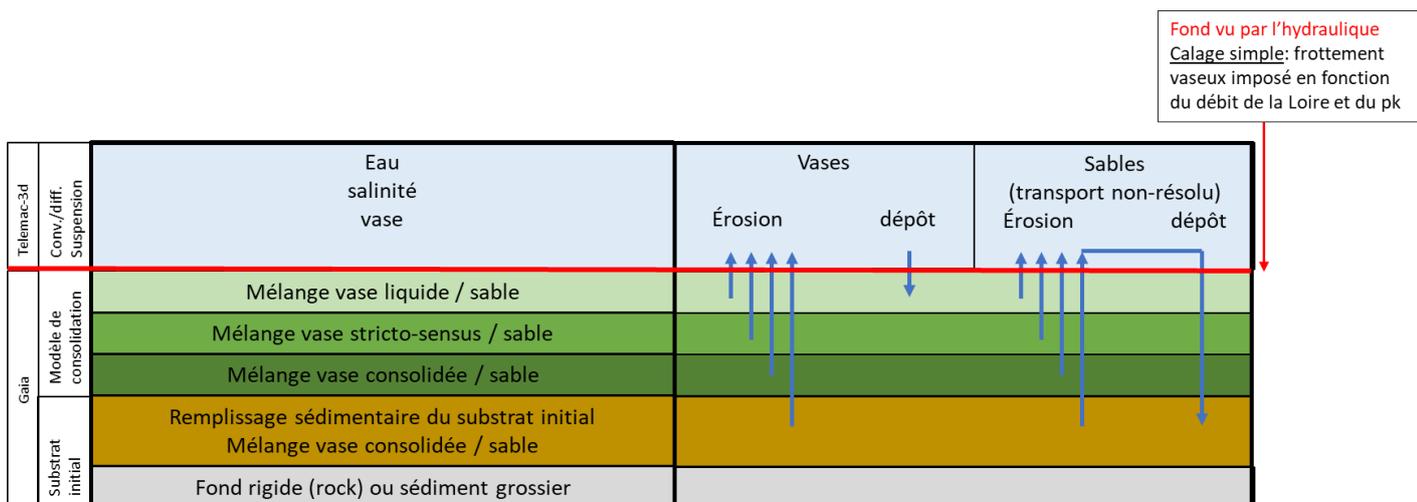


Figure 36 : Principe de gestion du sol du modèle global

7.2. LES PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES DANS LA COLONNE D'EAU

La prise en compte du sédiment cohésif, comme un traceur actif, agit de manière totalement couplée avec l'hydrodynamique et la salinité : la concentration en sédiment fait varier la densité calculée dans le modèle, tandis que les flux d'érosion et de dépôt font évoluer la cote du fond, qui est prise en compte à chaque instant par l'hydrodynamique.

Pour déterminer les mouvements des sédiments cohésifs dans l'eau, l'équation de transport de la masse du sédiment résolue est :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial W_s c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

La vitesse de chute du sédiment W_s représente les effets de la gravité, des forces de traînées visqueuses et des interactions entre particules sur le mouvement des sédiments.

ε_x , ε_y et ε_z sont des coefficients qui caractérisent la diffusion turbulente du sédiment. L'expression de ces coefficients dépend du modèle de turbulence verticale choisi. Le modèle de turbulence utilisé est celui de longueur de mélange multicouches présenté dans le chapitre 5.2.

Le terme $\frac{\partial W_s c}{\partial z}$ qui apparaît dans l'équation est traité dans l'étape de diffusion de manière à respecter la physique du phénomène. En effet ($W_s C$) est le flux de sédiments traduisant l'effet descendant de la gravité et il s'oppose à $\left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$, le flux de sédiments induit par le mouvement turbulent. Le gradient de concentration vertical, qui apparaît dans la colonne d'eau, résulte de l'équilibre entre ces deux flux.

7.2.1. Vitesse de chute - Mesures disponibles

Actuellement, trois campagnes de vitesses de chute effectuées en estuaire interne avec le tube d'Owen, par HOCER pour le GIP LE, sont disponibles. Ces campagnes ont été réalisées sur différents sites de l'estuaire pour des conditions variables de débit et de salinité.

La première campagne a été réalisée du 8 au 12 Décembre 2000, et est caractérisée par un débit de 2390 à 2060 m³/s et des coefficients de marée de 62 à 100.



Figure 37 : Position des points de mesure de la vitesse de chute lors de la campagne de décembre 2000

Suite à ce travail, le GIP Loire Estuaire a fait procéder à deux nouvelles campagnes de mesures en 2008, il s'agit de la campagne du 5 au 7 mai 2008 : débit 1520 à 1250 m³/s, coefficient de marée 100 à 104.



Figure 38 : Position des points de mesure de la vitesse de chute lors de la campagne de mai 2008

Et de la campagne du 18 au 20 août 2008 : débit de 296 à 275 m³/s, coefficient de marée 91 à 93.



Figure 39 : Position des points de mesure de la vitesse de chute lors de la campagne d'août 2008

Les mesures de ces trois campagnes sont rassemblées sur la Figure 40 ci-dessous.

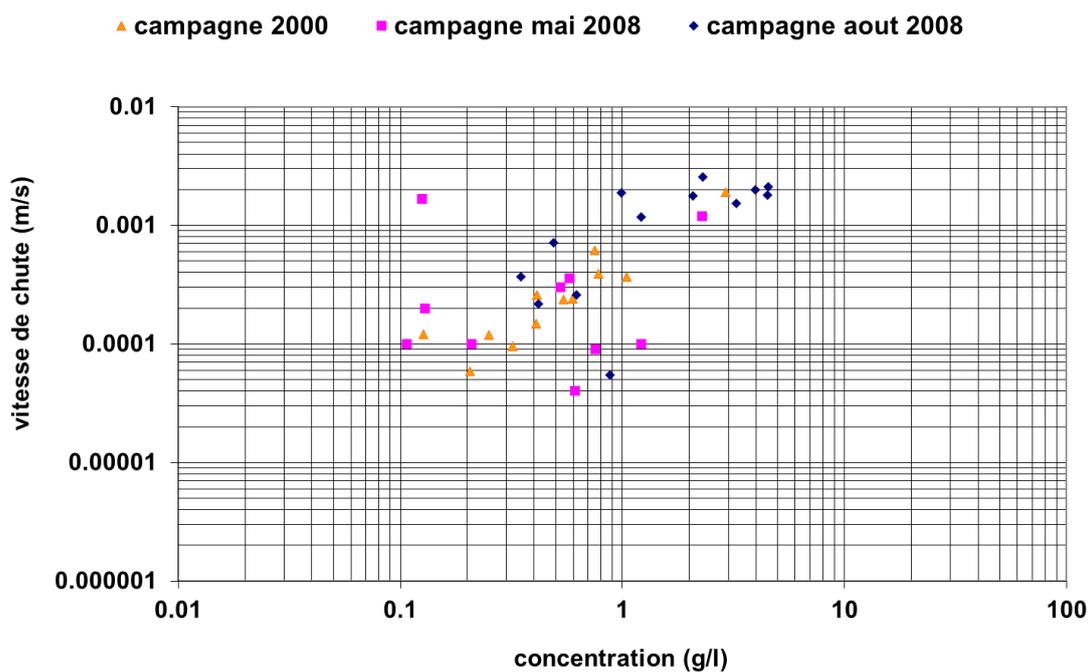


Figure 40 : Vitesse de chute en fonction de la concentration (échelle Log-Log)

7.2.2. Vitesse de chute - Ajustement d'une loi de type Thorn/Mehta

Le type de loi proposé par Krone (1962) et utilisé par Thorn (1981)- Mehta (1986) sur l'estuaire de la Severn correspond assez bien à notre jeu de données.

Pour les concentrations modérées, il est obtenu une loi de la forme :

$Wc = k_1 \times C^{m_1}$ avec $k_1 = 0,00075$ et $m_1 = 4/3$ pour $C < 2,2\text{g/l}$ qui semble être la valeur de concentration à partir de laquelle les vitesses de chute saturent et commencent à diminuer. Avec Wc la vitesse de chute (m/s) et C la concentration en vase (g/l) dans l'écoulement.

Pour les concentrations plus fortes, les floccs se gênent dans leur chute et la vitesse de chute décroît, il s'agit alors de vitesse entravée, il est proposé :

$Wc = Wc_0 \times (1 - k_2 \times C)^{m_2}$ avec $Wc_0 = 0,0022$ m/s , $k_2 = 0,0055$ et $m_2 = 4,65$ pour $C > 2,2\text{g/l}$.

Cette deuxième loi pour les vitesses de chute entravée est calibrée de façon à rejoindre la loi de consolidation (cf. § 7.4.1) qui s'apparente à une loi de vitesse de chute à l'interface de **40 g/l**. **Cette concentration est la limite maximale de concentration considérée dans la partie de transport par suspension du modèle** (cf. 7.3.1).

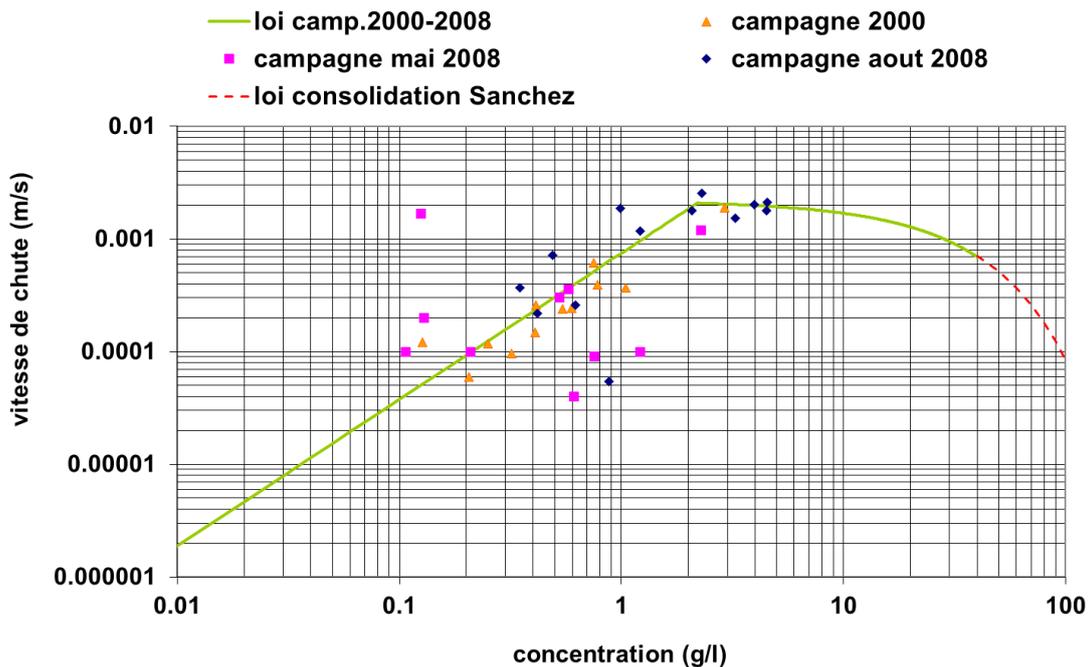


Figure 41 : Loi de vitesse de chute de type Thorn/Mehta proposée (échelle Log-Log)

7.2.3. Vitesse de chute - Prise en compte simplifiée de la floculation /défloculation

La vitesse de chute mesurée au tube d'Owen permet de tenir compte des floccs. C'est sur ces mesures que la courbe de vitesse de chute fonction de la concentration a été définie. Cependant une forte turbulence permet une destruction de ces floccs, et donne donc une vitesse de chute moins importante pour une même concentration.

En ajoutant sur le graphique des mesures de vitesses de chute d'une vase de Loire obtenues en laboratoire, pour lesquelles il n'y a normalement pas de floculation, il est montré que celles-ci sont bien plus faibles que celles mesurées généralement au tube d'Owen. Certains points bas mesurés au tube d'Owen correspondent néanmoins aux mesures effectuées en laboratoire, il doit s'agir de mesures pour lesquels il y avait peu de floculation au sein de l'écoulement.

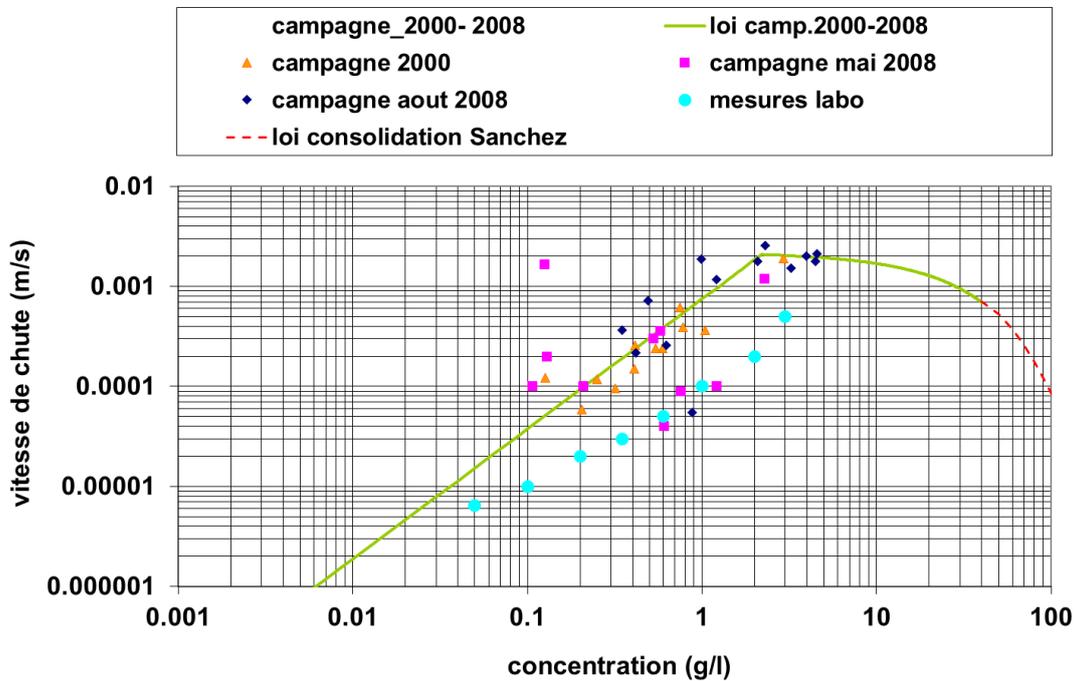


Figure 42 : Ajout des mesures de vitesse de chute en laboratoire

Afin de tenir compte de cette vitesse de chute en milieu défloculé, il a été pris une valeur de la vitesse de chute égale à 10% de la valeur mesuré avec présence de floc (courbe bleu foncé ci-dessous) :

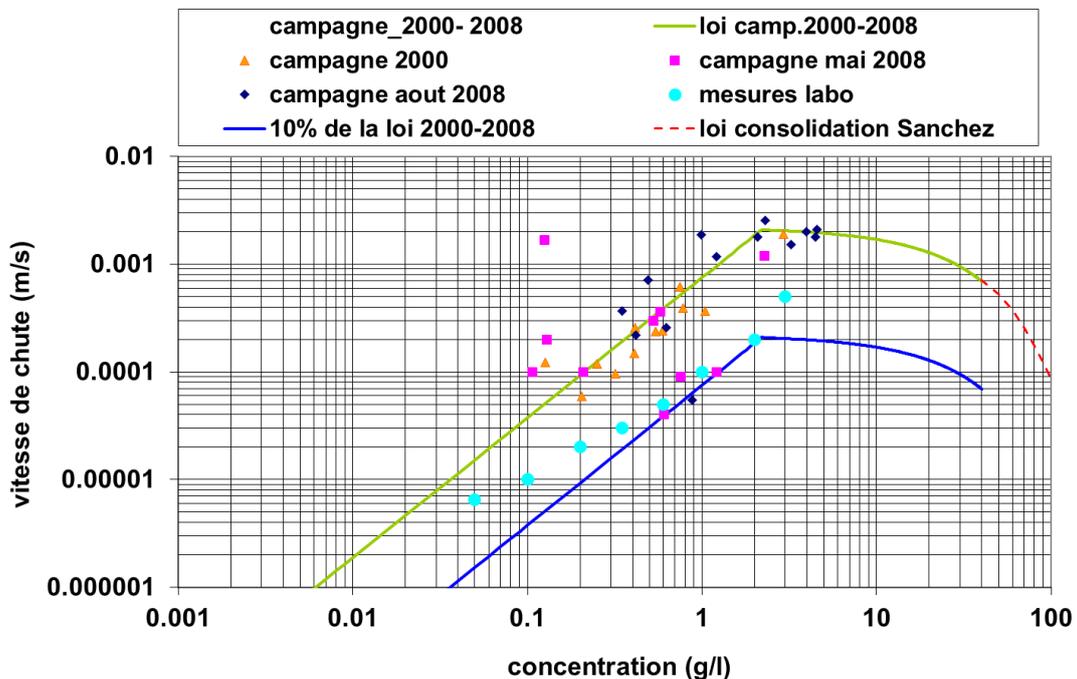


Figure 43 : Ajout des mesures de vitesse de chute en laboratoire

La défloculation est reliée de manière simplifiée dans le modèle à une vitesse moyenne de l'écoulement, ce qui avait été calibré dans le modèle précédent de 2009 :

- $U < 0,5 \text{ m/s}$: état floculé : Vitesse de chute = 100% de la vitesse de chute avec floccs
- $U > 1,1 \text{ m/s}$: état défloculé : Vitesse de chute = 10% de la vitesse de chute avec floccs
- $0,5 \text{ m/s} < U < 1,1 \text{ m/s}$: état plus ou moins défloculé : Vitesse de chute interpolée linéairement (100% à 10% de la vitesse de chute avec floccs)

Il existe des formulations plus physiques qui permettent de relier le taux de turbulence à la floculation-défloculation, dont certaines ont été testées en 2009. **Ces formulations sont à ce stade des sujets de recherche qui demandent de nombreuses mesures spécifiques et ne sont pas inclus dans ce modèle opérationnel.**

Les mesures effectuées en mer pour le GPMNSN au niveau de la Lambarde (2011) avec le système Labsfloc permet d'estimer une vitesse de chute minimale de $0,0001 \text{ m/s}$ pour les faibles valeurs de concentration. Sur la partie amont de l'estuaire, en eau douce, la vitesse de chute minimale semble pouvoir être plus faible pour les petites concentrations, d'après les différents calculs. La loi finale utilisée dans le modèle sera alors bornée, avec une vitesse minimale de $0,0001 \text{ m/s}$ pour la partie estuarienne et une vitesse minimale $0,00001 \text{ m/s}$ pour la partie amont définie par une concentration en salinité nulle. L'interpolation de la borne minimale se faisant entre 4 et 0 g/l de salinité.

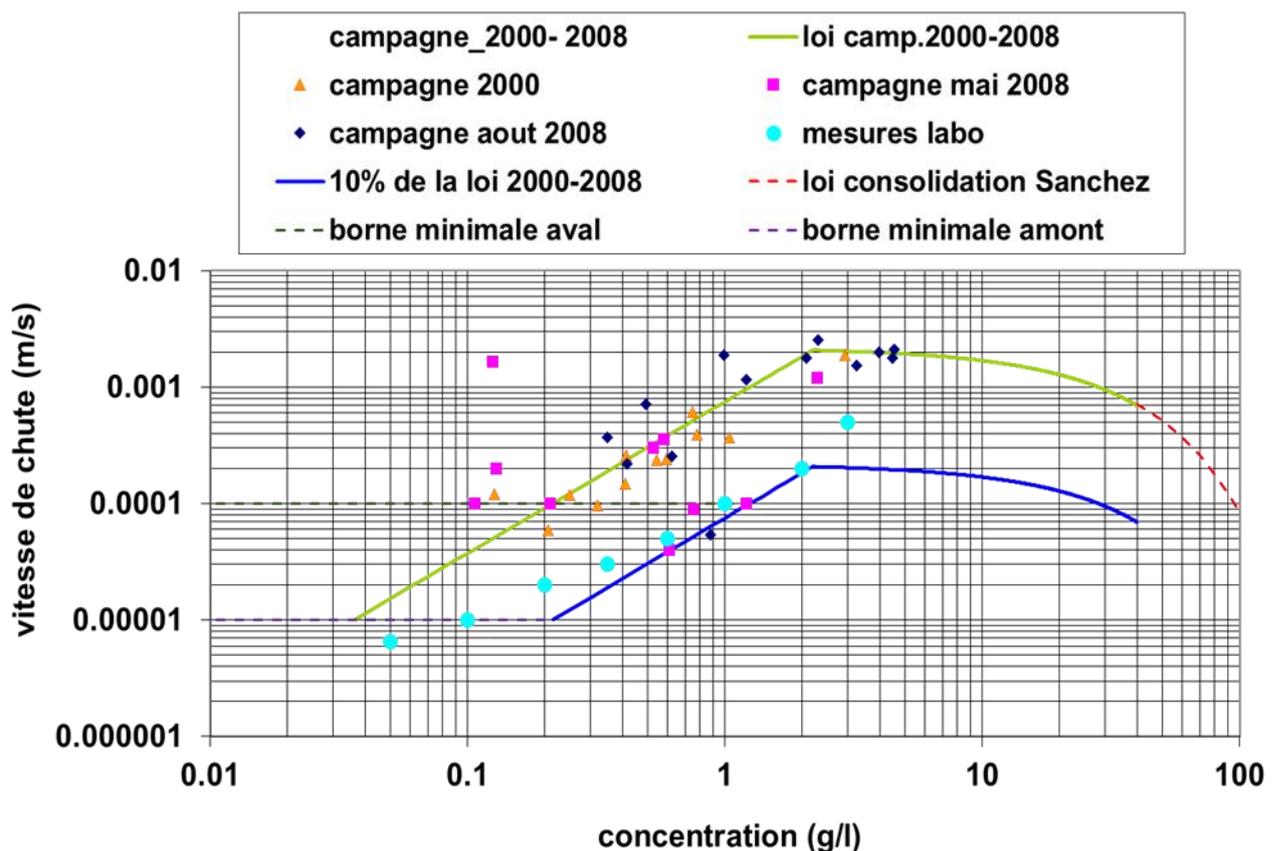


Figure 44 : Lois finales utilisées dans le modèle 3D

7.3. LES PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES À L'INTERFACE EAU/SOL

7.3.1. Calcul des flux de dépôt

L'interface « suspension / crème de vase », qui correspond dans le modèle à l'interface « eau / sol », est définie par une concentration fixe de 40 g/l, pour être en accord avec le modèle de consolidation et la théorie établie dans : Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire » [10], qui montre que la concentration C_{min} correspondant au début du phénomène de tassement est proche de 40 g/l.

Le flux de dépôt entre le fond de la partie en suspension et la première couche du sol est donc calculé de manière à respecter cette définition d'interface. **Il y a donc transfert de matière, dès que la concentration du sédiment au fond de la phase en suspension dépasse 40 g/l en plus du flux de dépôt classique.**

Le calcul du flux de dépôt est en accord avec le flux descendant dans la colonne d'eau :

$$\text{Flux de dépôt} = W_s \times C_{\text{fond}} \text{ avec } W_s \text{ la vitesse de chute au fond de la colonne d'eau}$$

7.3.2. Calcul des flux d'érosion d'une vase pure

La publication : Sanchez M., Levacher D., « Erosion d'une vase de l'estuaire de la Loire sous l'action du courant » [9] permet de proposer une loi d'érosion calée sur des mesures effectuées sur une vase de la Loire (Trentemoult) pour six concentrations différentes.

Le taux volumique d'érosion est calculé à l'aide de deux formulations complémentaires : celle de Cerco et al. (2000) pour les faibles taux d'érosion et celle proposée par Mehta et Partheniades (1982) pour les taux d'érosion élevés.

Sur la base d'observations expérimentales, le raccordement de ces deux formulations se fait pour une valeur seuil E_{V0} du taux volumique d'érosion de $3 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ (ce qui représente une érosion d'une couche de sédiment de 1 mm par heure). La valeur τ_{oe} est rattachée à la rigidité initiale τ_y et à la masse volumique ρ de la vase, à travers l'équation :

$$\tau_{oe} = e_1 \tau_y \left(\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{e_2}$$

Cette loi permet de définir les couches de vase érodable par une action prolongée du courant (de plusieurs jours). La loi du taux volumique d'érosion s'écrit comme suit :

$$E_v = \{E_{V0} (\tau_0 / \tau_{oe})^\alpha, \text{ si } \tau_0 < \tau_{oe} \\ E_v = \{E_{V0} \exp[\alpha (\tau_0 / \tau_{oe} - 1)], \text{ si } \tau_0 \geq \tau_{oe}$$

Le paramètre α est rattaché à τ_{oe} par l'expression homogène suivante :

$$\alpha = e_3 \tau_y \left(\frac{\sqrt{\tau_{oe} / \rho_w} \varepsilon}{\nu} \right)$$

Où ν est la viscosité cinématique de l'eau et ε la rugosité hydraulique de la surface de la vase. Un ajustement non linéaire respectant le critère des moindres carrés permet d'évaluer les constantes empiriques suivantes :

$$e_1=0.294 ; e_2=1.11 ; e_3=0.114$$

La figure ci-dessous montre les points expérimentaux et la loi ajustée (trait continu) :

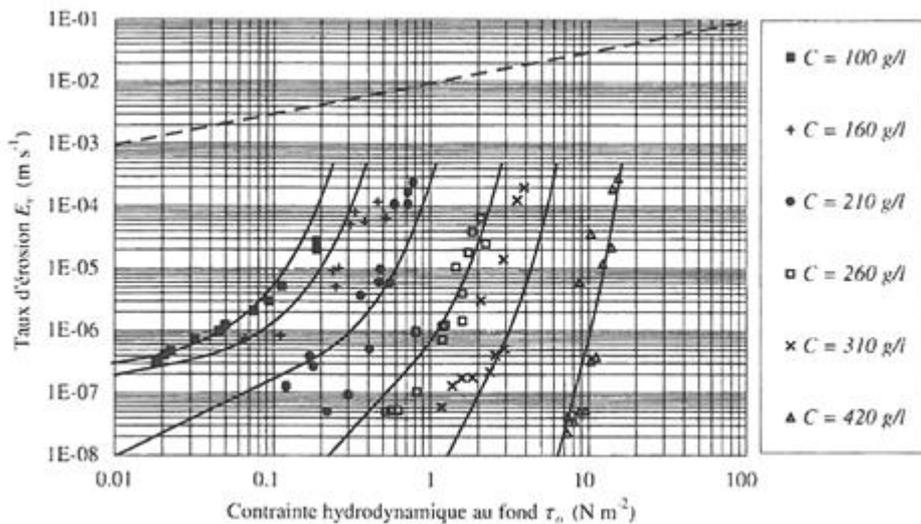


Figure 45 : Taux d'érosion volumique en fonction de la contrainte hydrodynamique, Sanchez et al (2008) [9]

Lors de la réunion du comité d'experts du 22 janvier 2009 (modèle de 2009), les experts ont émis un doute sur la pertinence d'une loi d'érosion sans seuil d'érosion critique et ont demandé de retravailler les mesures obtenues par Sanchez et al. [9], afin d'établir une loi d'érosion avec seuil critique. Pour cela plusieurs étapes ont été nécessaires :

Etape 1: Définir τ_{oe} (contrainte critique d'érosion) en fonction de la concentration du sédiment

La loi donnant la relation entre τ_{oe} et τ_{oy} (rigidité initiale) a été établie par [9] :

$$\tau_{oe} = e_1 \tau_y \left(\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{e_2}$$

Cependant la loi donnant τ_{oy} fonction de la concentration du sol n'a pas été spécifiée dans [9]. Les données disponibles ont donc été réunies pour établir deux lois en puissance, une pour les concentrations supérieures à 160 g/l et une autre pour les concentrations inférieures à 160 g/l :

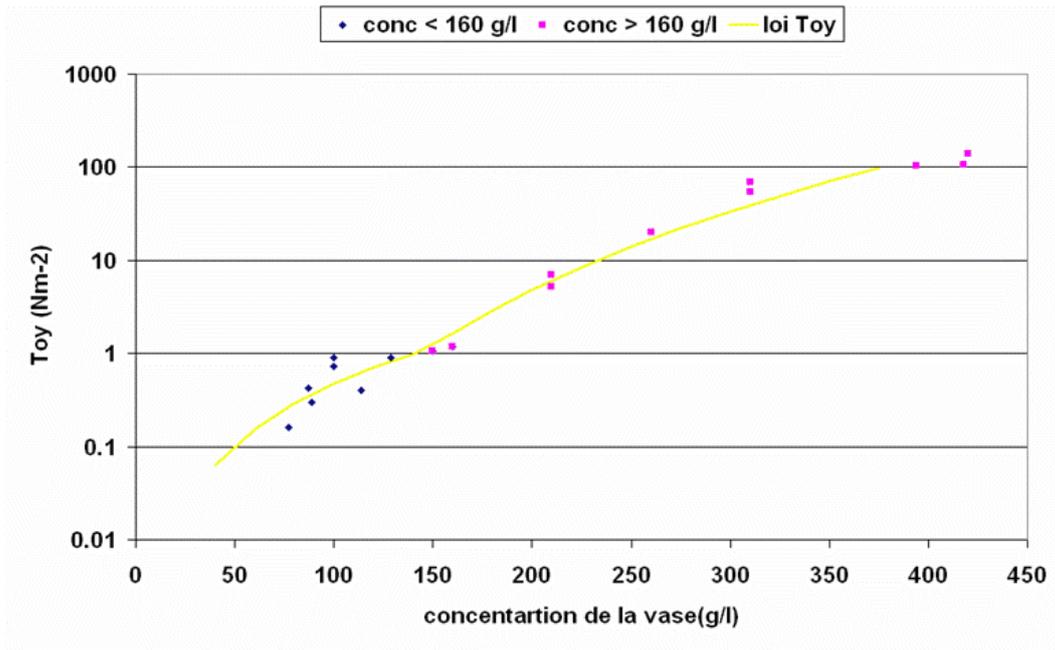


Figure 46 : Ajustement d'un fonction de rigidité initiale fonction de la concentration

Est alors appliquée cette loi de $\tau_{oy}(C)$ à la formule τ_{oe} issue de [9] : $\tau_{oe} = e_1 \tau_y \left(\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{e_2}$, et il est vérifié que cet ensemble de lois vérifie les points de mesure de l'expérience de [2].



Figure 47 : Vérification des contraintes critiques d'érosion calculées avec la loi de rigidité initiale proposée

Il est à noter que pour des vases de concentration inférieure à 100 g/l, il n'y a pas de mesures et qu'il s'agit d'extrapolation des formules. Les valeurs de τ_{oe} pour les vases inférieures à 100 g/l peuvent donc rester des paramètres de calage pour le modèle.

Etape 2 : définir une loi de tendance du taux volumique d'érosion (E_v) fonction de la contrainte hydrodynamique au fond (T_0)

Il a été établi une loi de tendance de la forme $E_v = a \exp(b \times T_0)$ pour chaque série de mesures :

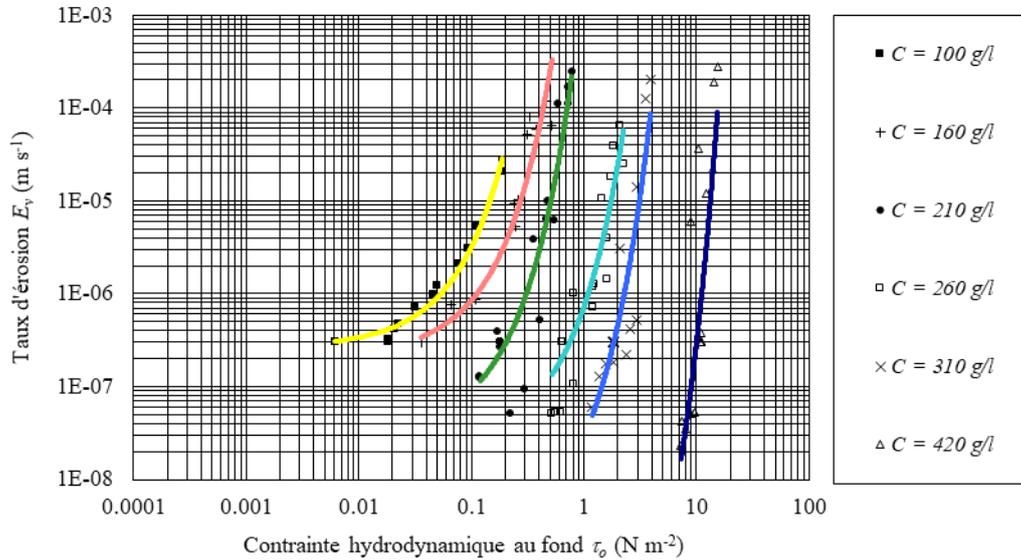


Figure 48 : Ajustement de la loi de tendance du taux d'érosion

Il faut alors établir une loi pour le coefficient 'a' fonction de la concentration de la vase et une loi pour le coefficient 'b', lui aussi fonction de la concentration de la vase.

Le coefficient 'b' est établi grâce à 3 lois exponentielles :

- $b(C_{vase}) = 48.635 \exp(-0.00713C_{vase})$ pour $C_{vase} < 210$ g/l
- $b(C_{vase}) = 1628.587 \exp(-0.02361C_{vase})$ pour 210 g/l $< C_{vase} < 260$ g/l
- $b(C_{vase}) = 27.054 \exp(-0.00763C_{vase})$ pour $C_{vase} > 260$ g/l

Le coefficient 'a' est calculé pour obtenir $E_v = 3 \times 10^{-7}$ m s⁻¹ lorsque $T_0 = T_{0e}$, qui est la définition de la contrainte critique d'érosion prise dans [9].

Il n'y a plus qu'à retracer les lois d'érosion volumique fonction de la contrainte pour les vases de concentration testées par [2] et vérifier que cette loi vérifie bien les mesures.

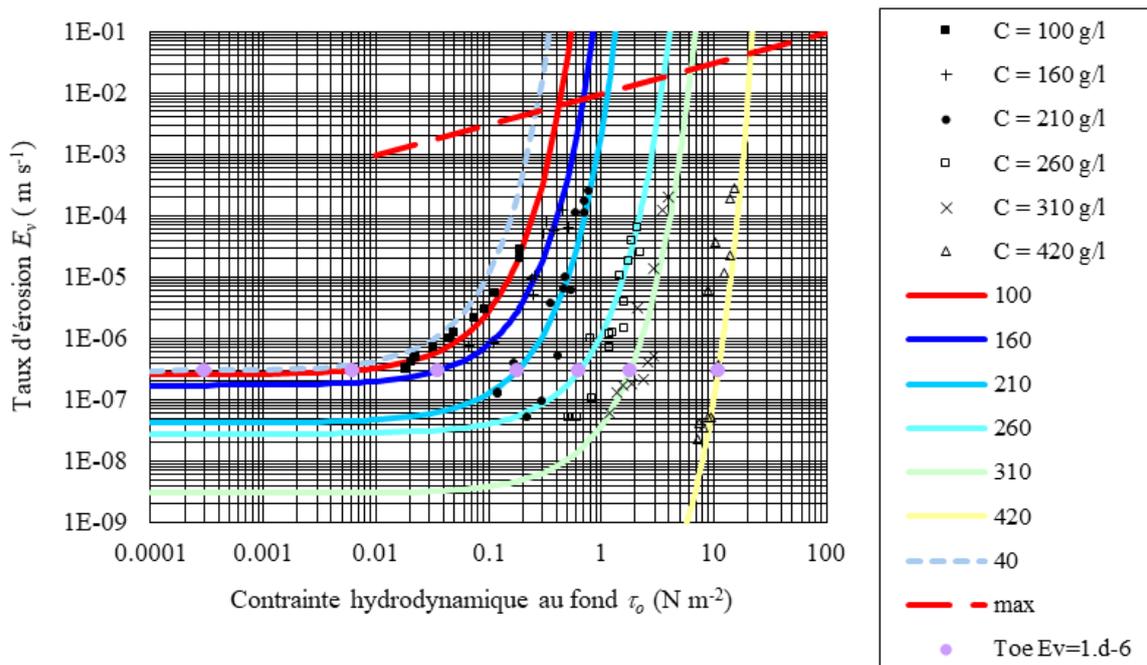


Figure 49 - Ajustement du taux d'érosion

Il est à noter que les flux d'érosion sont bornés par la courbe rouge en pointillés, qui est le maximum de E_v d'après Kranenburg et Winterwerp (1997) [17].

7.3.3. Calcul des flux d'érosion d'un sable pur

Le transport solide sableux est estimé par le modèle Transpor 2004 de Van Rijn[16]. Il s'agit d'un modèle 1DV qui permet le calcul de la concentration au fond et le débit solide (charriage et suspension à l'équilibre) dans des conditions combinées de houle et courant. Ce modèle 1DV est appelé à chaque nœud du modèle et à chaque pas de temps.

7.3.4. Calcul des flux d'érosion d'un mélange sable/vase

Lorsque la fraction massique de la vase dans un mélange est inférieure à $\sim 0,3$, la contrainte critique est plus importante que celle d'un sable pur. La vase qui s'infiltré dans les pores constitués par l'assemblage des grains de sable apporte de la cohésion au mélange (cas b de la Figure 50).

Lorsque la fraction massique de la vase dans un mélange est supérieure à $\sim 0,3$, les vases qui se sont infiltrées entre les pores ne permettent plus le contact des grains de sable entre eux. La contrainte critique diminue alors pour le mélange (cas c de la Figure 50).

Lorsque la fraction massique de la vase dans un mélange est supérieure à $\sim 0,5$, il est possible de considérer que le mélange se comporte comme de la vase pure (cas a de la Figure 50).

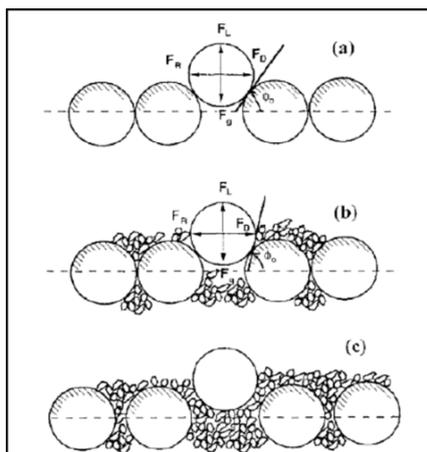


Schéma conceptuel montrant les mécanismes de mise en mouvement pour :

- (a) Un sable pur (particules sableuses sphériques d'une seule taille);
- (b) Un sédiment mixte sable/vase tel que la fraction vaseuse (f_{rvas}) est inférieure à 30% ;
- (c) Un sédiment mixte sable/vase tel que la fraction vaseuse (f_{rvas}) est supérieure à 30%.

(Panagiotopoulos et al., 1997)

Figure 50 : Schéma conceptuel montrant les mécanismes de mise en mouvement, Panagiotopoulos et al., 1997)

En termes de flux, le code calcule un flux en sable pur et un flux en vase pure. Selon la nature du mélange présent dans la couche traitée, un flux de mélange est déduit et rapporté à la fraction massique de chaque classe de sédiment. (Figure 51).

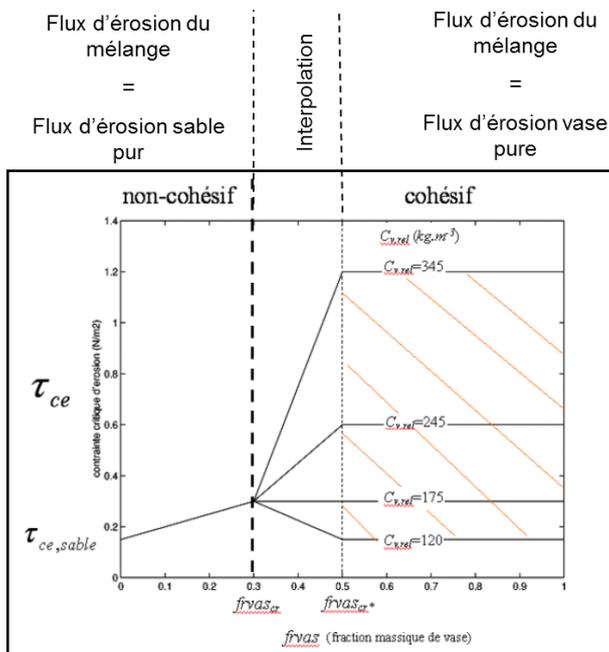


Figure 51 : Variation de la contrainte critique d'érosion en fonction de la fraction massique de vase (f_{rvas}) et de la concentration relative de vase ($C_{v,rel}$) - figure issue de la thèse de Benoît Waeles, 2005 qui a donné suite à la publication Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011 [18]

7.4. LES PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES DANS LE SOL

Le modèle de sol (hors remplissage sédimentaire initial) est composé de 16 couches à concentrations fixes et dont les paramètres d'érosion : τ_{ce} et 'b' sont fixés par les lois établies au § 7.3.2

Il est à noter que suite au calage du modèle, les paramètres ont pu être ajustés (en rouge sur la figure ci-après) pour les couches les plus fortement consolidées (qui étaient trop difficilement remises en mouvement et fixaient trop rapidement la masse) :

Modèle de consolidation	C=40g/l, Toce = 0.00031 N/m ² , b =36.557
	C=60g/l, Toce = 0.00117 N/m ² , b =31.707
	C=80g/l, Toce = 0.00304 N/m ² , b =27.493
	C=100g/l, Toce = 0.00636 N/m ² , b =23.840
	C=120g/l, Toce = 0.01164 N/m ² , b =20.671
	C=140g/l, Toce = 0.01940 N/m ² , b =17.924
	C=160g/l, Toce = 0.03698 N/m ² , b =15.542
	C=180g/l, Toce = 0.07432 N/m ² , b = 13.476
	C=200g/l, Toce = 0.13878 N/m ² , b =11.685
	C=225g/l, Toce = 0.27895 N/m ² , b =8.029
	C=250g/l, Toce = 0.52088 N/m ² , b =4.449
	C=275g/l, Toce = 0.91639 N/m ² , b = 3.315
	C=300g/l, Toce = 1.53483 N/m ² , b = 2.739
	C=325g/l, Toce = 1.53483 N/m ² , b = 2.263
	C=350g/l, Toce = 1.53483 N/m ² , b = 1.870
	C=375g/l, Toce = 1.53483 N/m ² , b =1.545
Remplissage sédimentaire du le substrat initial	

Figure 52 : Discrétisation du sol et paramètres d'érosion

7.4.1. Consolidation

Le modèle de consolidation utilisé est basé sur un système de nombre de couches fixes (16 dans notre cas), dont la concentration et la contrainte critique sont fixes dans le temps. Seule la masse dans chaque couche varie dans le temps via une fonction de transfert de masse définie pour chaque couche. Les dépôts provenant de la matière en suspension se font toujours dans la couche supérieure.

La fonction de transfert est de la forme : $\frac{dm}{dt} = a$ avec « a » un coefficient en s⁻¹ à caler pour chaque couche.

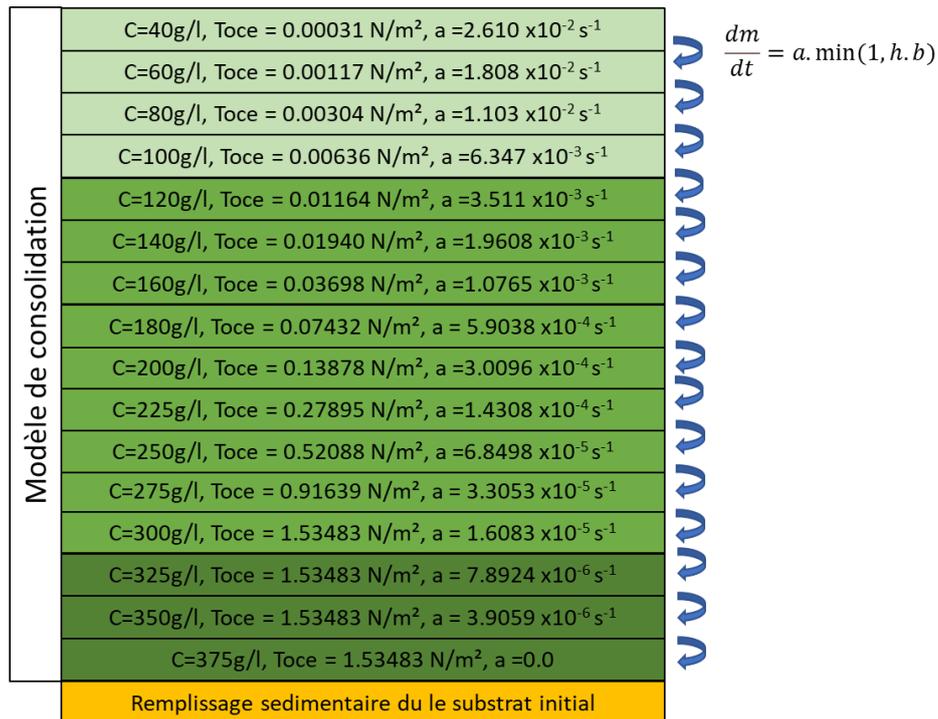


Figure 53 : Schéma de principe du modèle de consolidation

La définition du paramètre 'a' a pu être calculée directement en utilisant [10]. Le chapitre 3 de cette publication traite de la suspension fortement concentrée, ou crème de vase, définie comme comprise entre 40 kg/m³ et 325 kg/m³.

Pour cette gamme de concentration, le débit solide Q_c à travers une interface de concentration C constante dans le temps à l'intérieur d'une crème de vase en cours de tassement est donnée par :

$$Q_c = VC \left[A_2 A_1 \left(\frac{C}{\rho_s} \right)^{A_3} - 1 \right]$$

Avec A₁ = 1,60 m.s⁻¹, A₂ = 72 et A₃ = 0,65 pour une vase de la Loire.

Cette valeur Q_c correspond exactement au taux de transfert entre 2 couches du modèle de consolidation, qui dans ce cas serait de la forme dm/dt=a.

La valeur de Q_c a donc été calculée pour chaque couche du modèle et appliquée pour chaque couche à la place du paramètre « a ».

La vérification de ce paramétrage s'est effectuée sur six essais en colonne de tassement, réalisés par Migniot sur une vase de Donges.

- Hauteur initiale 0,5 m , Concentration initiale 100 g/l
- Hauteur initiale 1 m , Concentration initiale 100 g/l
- Hauteur initiale 2 m , Concentration initiale 100 g/l
- Hauteur initiale 0,5m , Concentration initiale 200 g/l
- Hauteur initiale 1 m , Concentration initiale 200 g/l
- Hauteur initiale 2 m , Concentration initiale 200 g/l

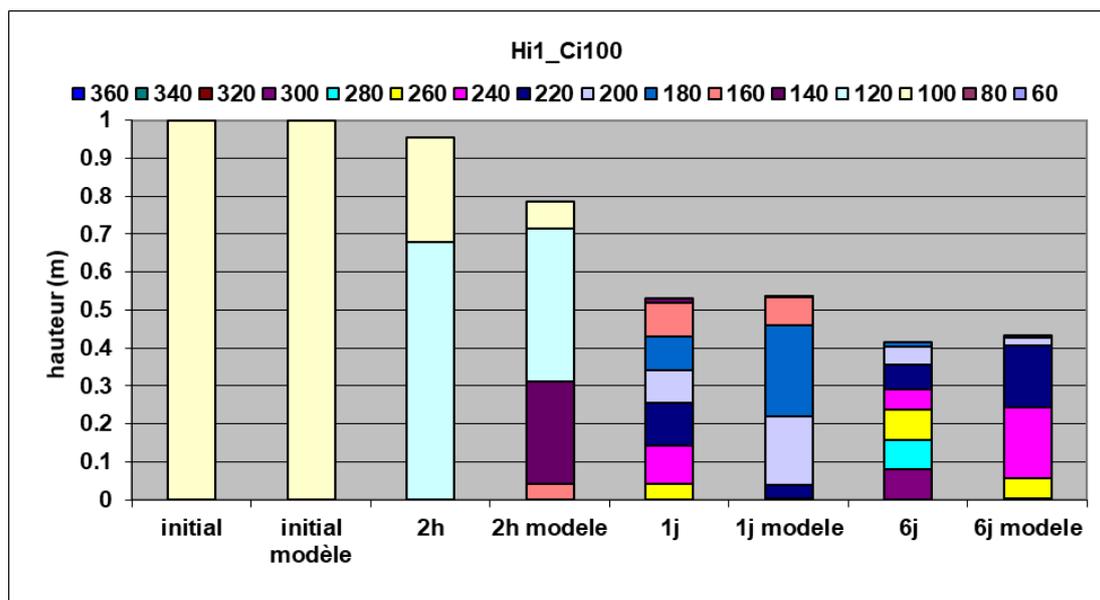


Figure 54 : Exemple de comparaison de profil de consolidation colonne/modèle pour une concentration initiale de 100 g/l et une hauteur de 1 mètre

L'ensemble des résultats est de bonne qualité, car l'erreur de concentration à une cote donnée dans l'ensemble des colonnes est rarement supérieure à 40g/l, en utilisant directement la valeur de Q_c correspondant à la concentration de la couche. Cette formulation proposée dans [10] semble être utilisable directement dans le modèle pour des concentrations allant de 40 à 325g/l.

En pratique, il convient cependant de diminuer les taux de transfert dans les faibles couches de dépôt, lorsque les masses dans les couches sont inférieures au temps de transfert 'a'. Il est proposé d'utiliser un taux de transfert de la forme 'ah', avec h la hauteur de dépôt dans la couche, tant que 'ah' est inférieur à 'a'.

Pour rester cohérent avec les taux de transfert 'a' calculés dans [10], un paramètre 'b' sera utilisé : ainsi le taux de transfert entre chaque couche sera sous la forme :

$dm/dt = a \min(1, h.b)$ ce qui signifie que pour une hauteur $> 1/b$, c'est une loi de la forme $dm/dt = a$ et pour une hauteur $< 1/b$, c'est une loi de la forme $dm/dt = a.b.h$

Le paramètre 'b' est calé à la valeur 4 (soit un flux maximal à partir d'une épaisseur de 0,25m) sur les mesures de concentration moyenne des colonnes ayant les hauteurs les plus faibles et les concentrations les plus faibles, en favorisant la bonne représentation des processus de tassement à l'ordre de la journée.

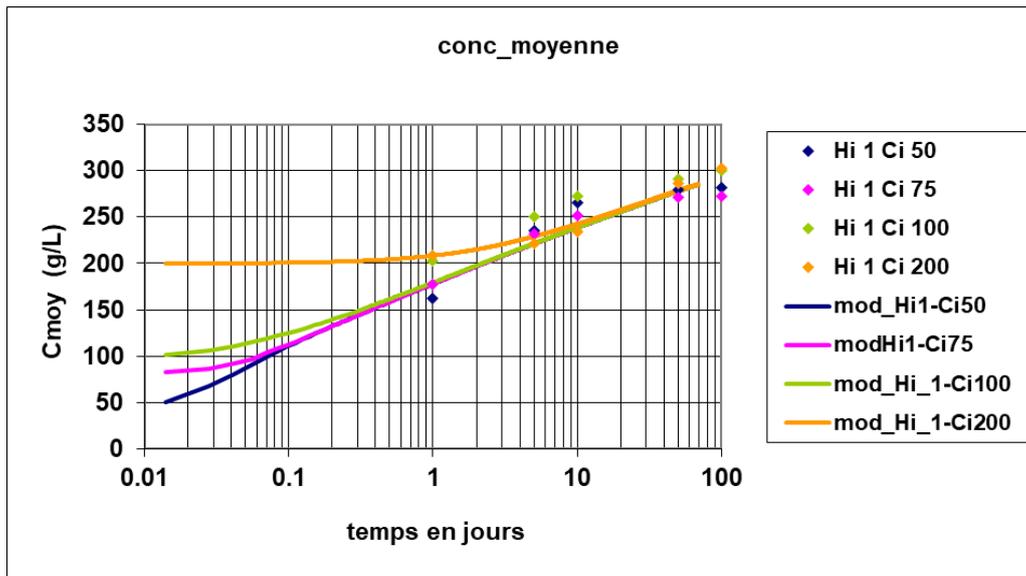


Figure 55 : Concentration moyenne des colonnes ayant une hauteur initiale de 1 mètre (Hi : hauteur initiale et Ci : concentration initiale)

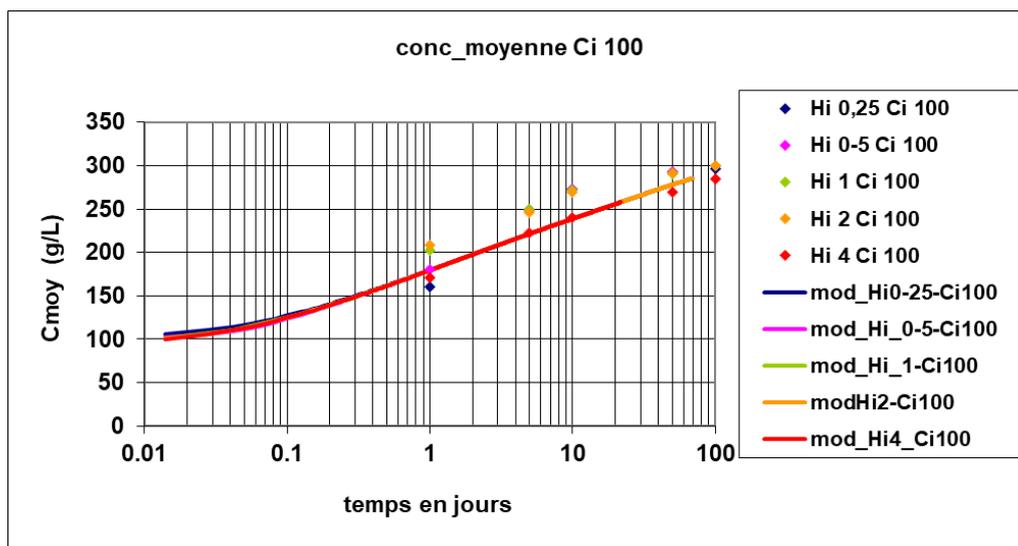


Figure 56 : Concentration moyenne des colonnes ayant une concentration initiale de 100 g/l (Hi : hauteur initiale et Ci : concentration initiale)

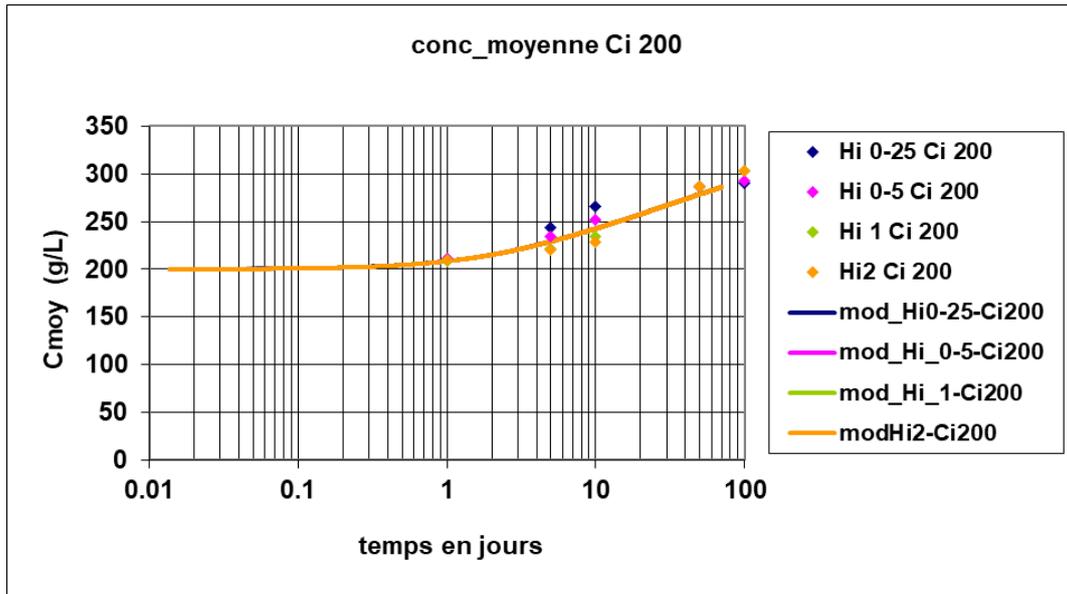


Figure 57 : Concentration moyenne des colonnes ayant une concentration initiale de 200 g/l (Hi : hauteur initiale et Ci : concentration initiale)

7.4.2. Glissement

Sans glissement, les sédiments se déposent rapidement sur les pentes du chenal de navigation car il y a moins de contrainte hydraulique, sans être repris par les courants de marée. Aussi, il a été considéré que les dépôts se trouvant dans la zone de crème de vase liquide (40 à 100g/l) sont transférés dans le sens de la pente la plus forte dès lors qu'une pente critique est dépassée. La valeur de pente critique de 2,5% a été retenue dans notre cas, en accord avec des observations dans le Port de Saint-Nazaire.

7.5. LES FORÇAGES AUX LIMITES

7.5.1. Forçage en débit solide

Le rapport le plus récent sur le sujet (réalisé pour le GIP LE) : « Bilan des entrées de matières dans l'estuaire de la Loire (août 2009-mars 2011) », programme AMELIE : Analyse Multiproxie des Eaux de la Loire Inferieure et Estuarienne, Juillet 2011, a été analysé.

Dans cette étude, des mesures journalières de MES ont été effectuées par prélèvement bouteille à Montjean-sur-Loire. L'analyse de ces mesures et les relations débits/ MES ont été effectuées sur une loi moyenne unique pour caler sur le flux annuel, qui était l'objectif de l'étude. L'intérêt de cette loi dans notre modélisation est donc limité, car il est souhaité représenter les variabilités saisonnières. Il a donc été décidé de se baser sur les études précédentes menées par ARTELIA pour le GIP LE :

La modélisation de 2009 a rassemblé un nombre important de mesures de MES, plus ou moins en amont (entre Trentemoult et Montjean-sur-Loire). Les mesures plus aval (Trentemoult et Bellevue par exemple) n'ont été conservées qu'en cas de débits importants. En effet, un signal de bouchon vaseux pouvait alors être visible pour les débits inférieurs à 500 m³/s.

Les études précédentes (2006/2009) ont montré l'existence de cycles d'hystérésis de MES en crue/décruie qui a cherché à être pris en compte dans les lois établies.

Il a été possible de séparer les mesures en différents groupes de données, en analysant les jours de débits précédents la mesure. Trois groupes ont pu être identifiés :

- Un groupe de crue lorsque le $Q_j > Q_{\text{moyen des 5j précédents}} + 200$;
- Un groupe de décrue lorsque $Q_j < Q_{\text{moyen des 20j précédents}} - 200$;
- Un groupe intermédiaire lorsque la classification n'est ni crue, ni décrue.

Trois lois d'interpolation linéaire ont pu alors être établies :

- Crue ($Q_j > Q_{\text{moyen des 5j précédents}} + 100$) : $\text{MES (g/l)} = 180/2000 * (Q_j - 500) + 10$;
- Décrue ($Q_j < Q_{\text{moyen des 5j précédents}} - 100$) : $\text{MES (g/l)} = 80/5000 * (Q_j - 500) + 10$;
- Etat 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 :

- $\text{MES (g/l)} = -70/3500 * (Q_j - 2000) + 180$;
- Elles sont également bornées en limite inférieure à une concentration minimum de 10 mg/l pour un débit inférieur à 500 m³/s.

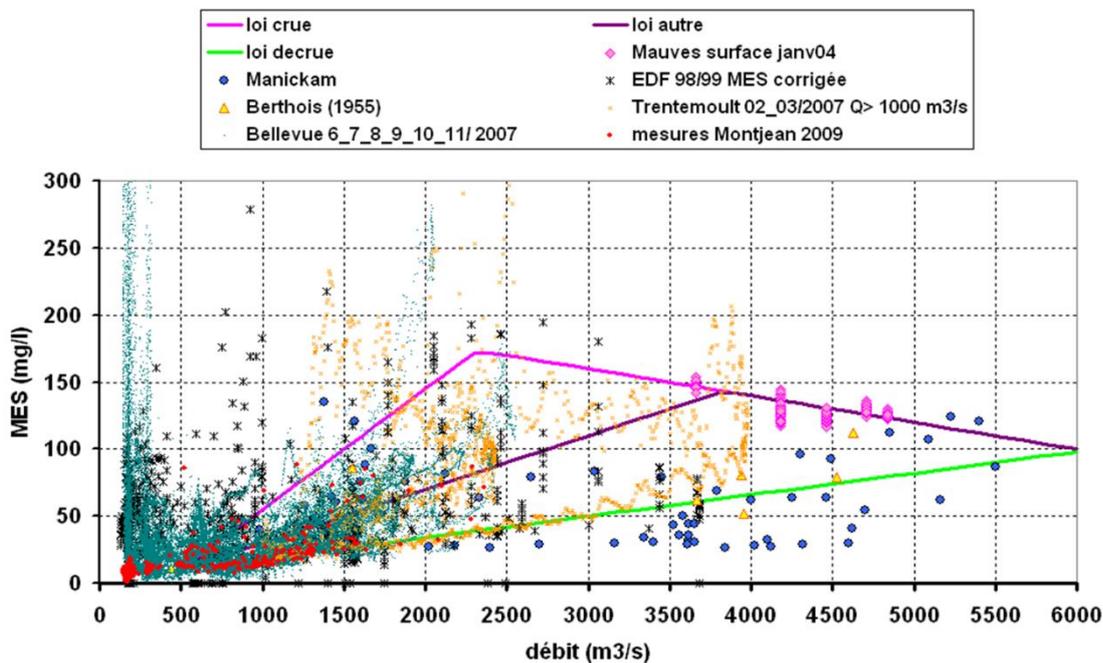


Figure 58 –Lois de MES (Qjournalier) calées sur les mesures

En utilisant l'ensemble de ces lois, il est alors possible de recomposer le signal en MES à partir de la donnée de débit journalière à Montjean-sur-Loire.

Les signaux temporels de MES recomposés sont d'abord vérifiés sur les mesures à Montjean-sur-Loire en 2009/2010. Puis elles sont comparées aux mesures effectuées plus à l'aval : Bellevue, Trentemoult et à Mauves-sur-Loire (en supposant que par fort débit, le transport de MES transitant par ces stations est peu modifié par rapport à celui mesuré à Montjean-sur-Loire). Ces relations permettent d'avoir une représentation correcte de la MES pour des débits journaliers variables. **Bien que cette estimation soit un peu forte au niveau de Montjean-sur-Loire pour les pics de**

forts débits, les concentrations sont valides pour les mesures plus aval qui représentent bien les apports totaux pour l'estuaire aval. Cet ensemble de loi représente donc les apports à Montjean-sur-Loire, plus certainement les apports latéraux possibles entre Montjean-sur-Loire et Bellevue.

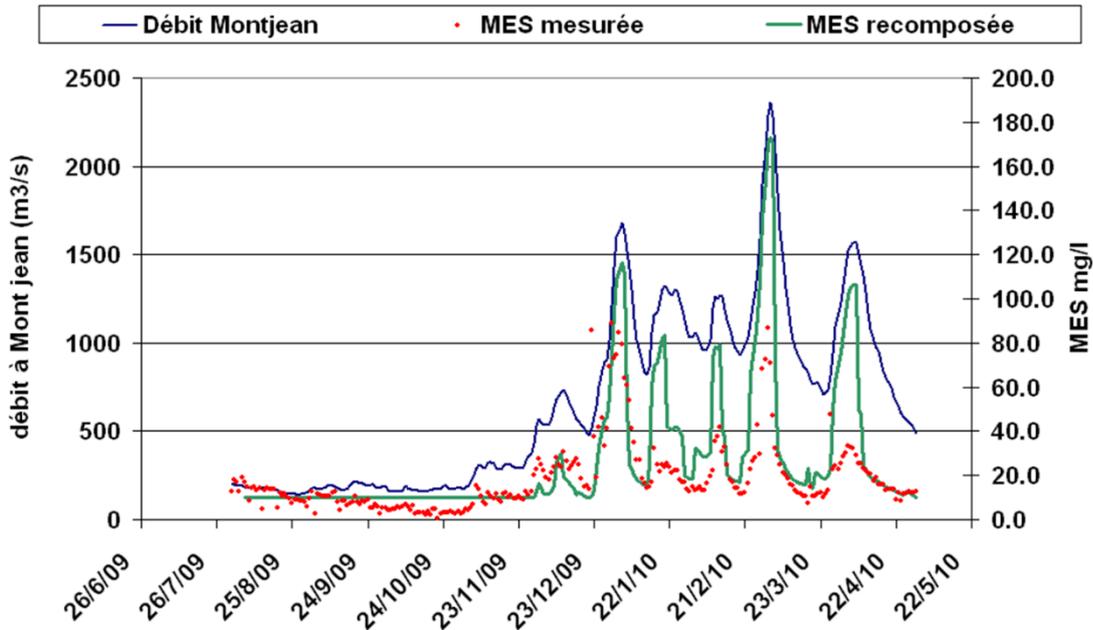


Figure 59 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Montjean-sur-Loire

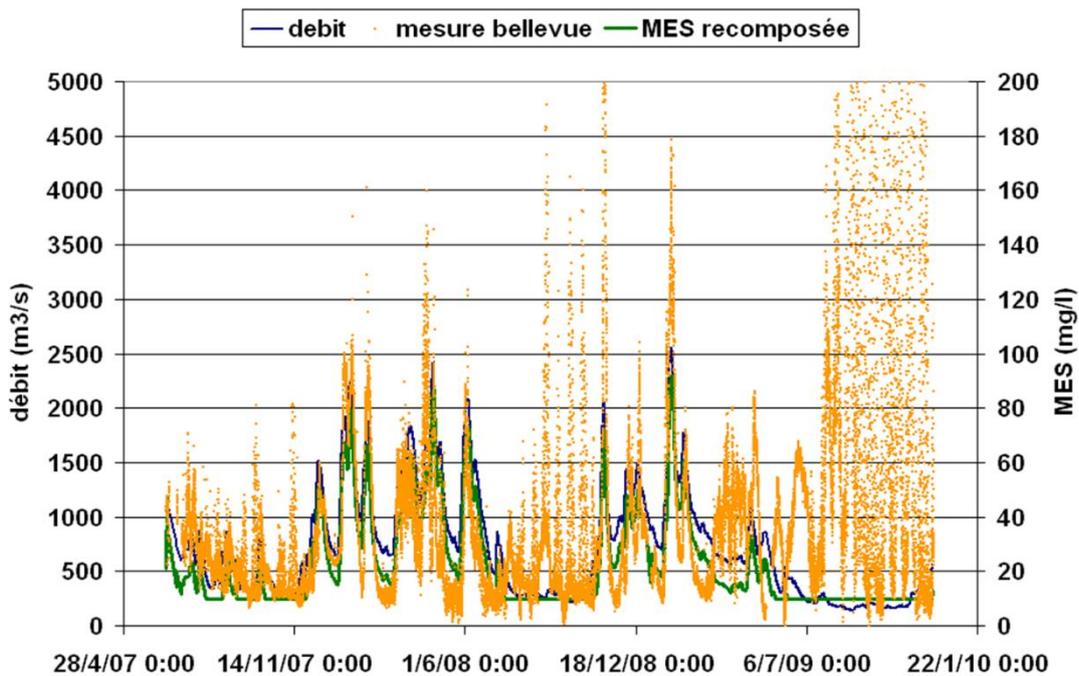


Figure 60 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Bellevue

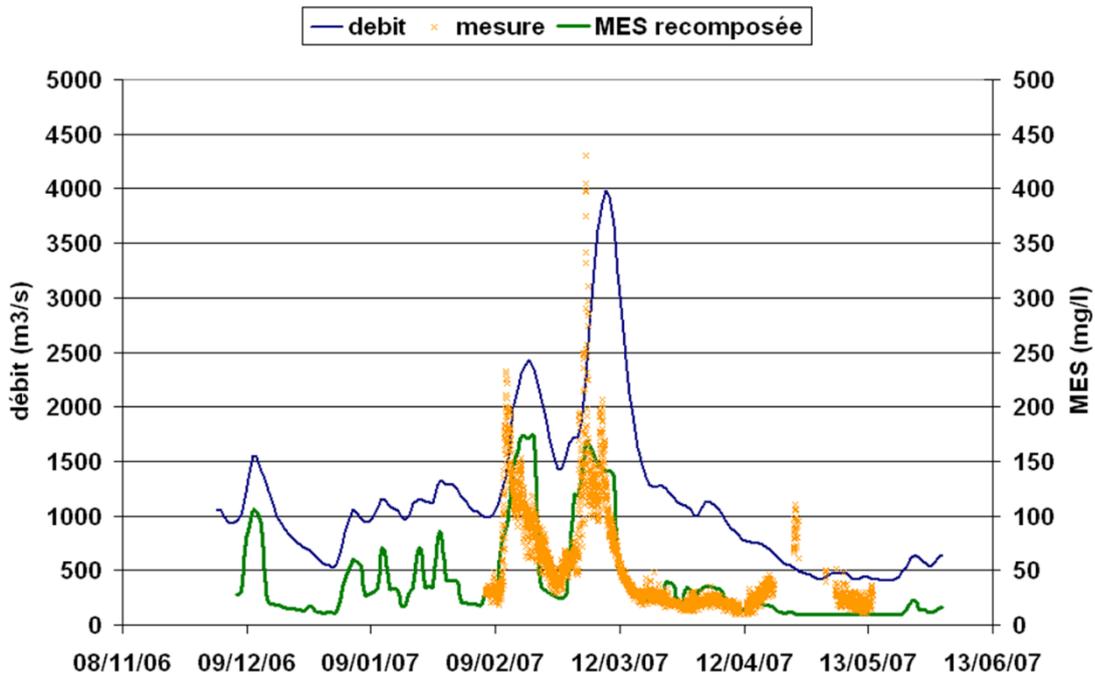


Figure 61 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevée à Trentemoult

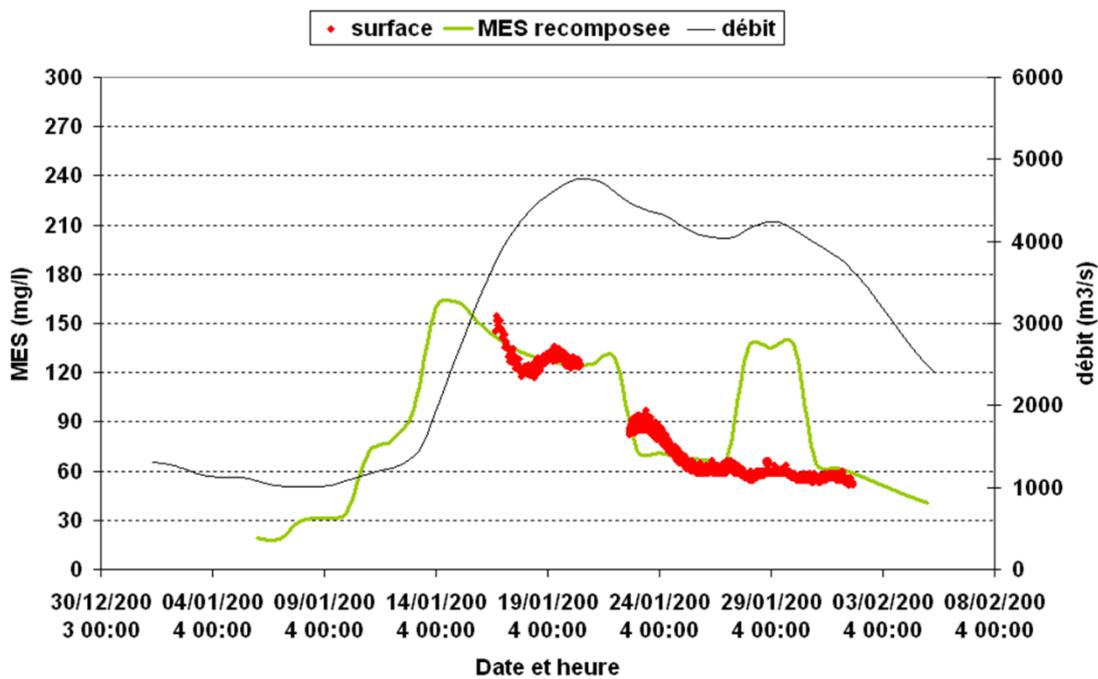


Figure 62 : Comparaison des résultats de la MES recomposée en fonction du débit à Montjean-sur-Loire, par rapport aux mesures temporelles relevées à Bellevue

7.5.2. Le forçage au sol initial : Le remplissage sédimentaire

Le modèle est initialement rempli par du sédiment (couche dite de « substrat initial » dans le modèle de sol). Cette définition de composition du sol a été effectuée à partir des données du projet EMODnet :

Le projet de géologie EMODnet (European Marine Observation and Data network) (<http://www.emodnet-geology.eu/>) collecte et harmonise les données géologiques des zones marines européennes, afin de faciliter la prise de décision et la planification durable de l'espace maritime. Le partenariat comprend 36 organisations marines de 30 pays. Les partenaires, principalement issus des services maritimes des études géologiques d'Europe, ont rassemblé des informations géologiques marines à l'échelle 1: 1 000 000 de toutes les zones maritimes européennes. Ces données incluent la carte du substrat marin EMODnet à l'échelle 1:1 000 000 des zones marines européennes. Traditionnellement, les pays européens ont mené leurs études géologiques marines conformément à leurs propres normes nationales et leurs substrats ont été classés sur la base de leurs systèmes de classification nationaux. Ces classifications nationales sont harmonisées dans un schéma EMODnet commun utilisant le triangle de sédiments de Folk avec une hiérarchie de 16, 7 et 5 classes de substrat. Les données décrivent le substrat marin à partir des 30 cm de sédiments prélevés sous la surface. Les données ont été généralisées dans une échelle cible (1: 1 000 000). La plus petite unité cartographique dans les données est de 4 km². De plus amples informations sur le projet EMODnet-Geology sont disponibles sur le portail (<http://www.emodnet-geology.eu/>).

7.5.2.1. Répartition spatiale des 7 classes de sédiment

La classification répartie en 7 classes de sédiments a été utilisée, avec ci-dessous la répartition spatiale issue des données récupérées sous le site EMODnet :

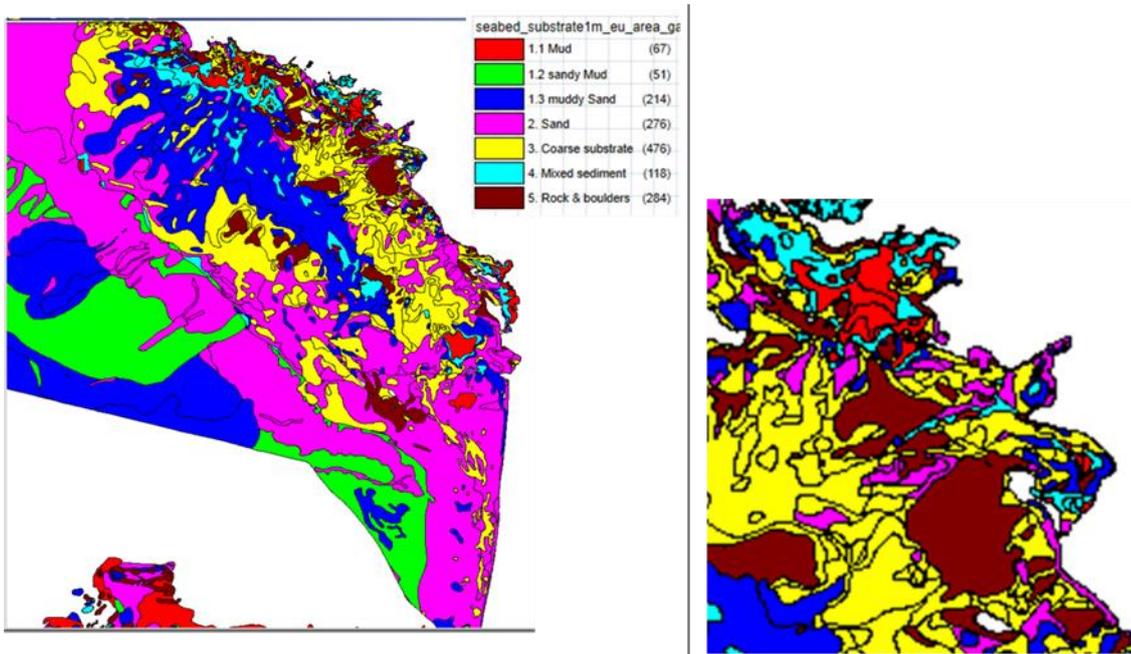


Figure 63 : Répartition spatiale des 7 classes de sédiment – source : projet EMODnet

Cette table a été retravaillée afin que les zones ne soient plus en superposition, mais en zones contiguës pour pouvoir les projeter sur notre maillage. De plus, l'ensemble de la Loire (non définie dans la table) a été mise en substrat initial sableux.

7.5.2.1.1. Définition des zones

La connaissance du substrat étant naturellement assez peu précise spatialement et dans sa détermination des classes, il est apparu rapidement dans les tests qu'il n'était pas envisageable de résoudre exactement la même physique (crème de vase liquide, stricto-sensu, consolidée) sur l'ensemble de la surface du modèle.

Il est proposé de résoudre la physique rhéologique complète dans la zone, où le modèle est capable lui-même de modifier et adapter le substrat de surface par son propre calcul d'influence du panache turbide : c'est-à-dire en Estuaire interne et Estuaire externe. Sur la partie plus élargie dites ici « Zone maritime », la rhéologie est simplifiée en ne considérant qu'une concentration moyenne de vase fixe (pas de consolidation).

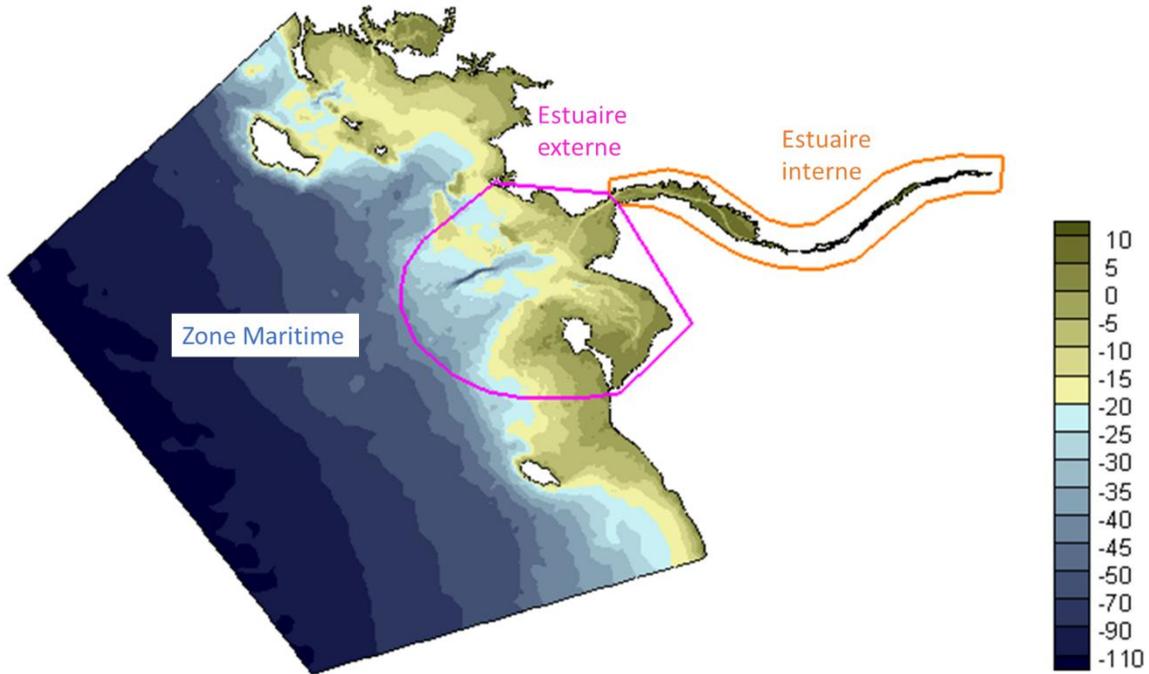


Figure 64 : Définition des zones Maritime, Estuaire externe, Estuaire interne

De fait, sur la partie estuaire interne et externe, les zones dite « vaseuses, vaso-sableuse et sablo vaseuses » ont été remplacées par une zone sableuse. C'est le calcul lui-même qui après initialisation avec un bouchon vaseux, définira par ses dépôts calculés le type de substrat sur chaque zone.

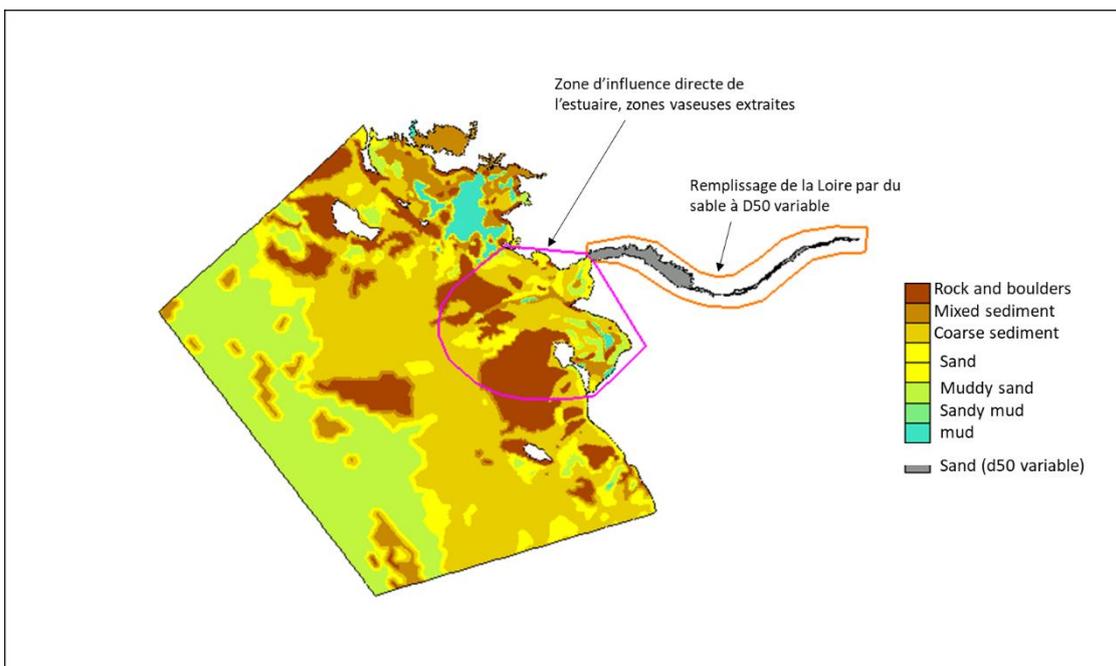


Figure 65 : Répartition spatiale des 7 classes de sédiment projetée sur le maillage de Loire

7.5.2.2. Définition des classes

Chaque faciès sédimentaire doit être représenté par une répartition dans les 3 types de sédiments modélisés dans le sol : une vase, un sable et un gravier.

Le triangle de Folk donne une fourchette de pourcentage de chaque type de sédiment pour chaque classe sédimentologique. Le calage du modèle consiste en partie à définir une répartition unique de chaque sédiment pour chaque classe sédimentologique.

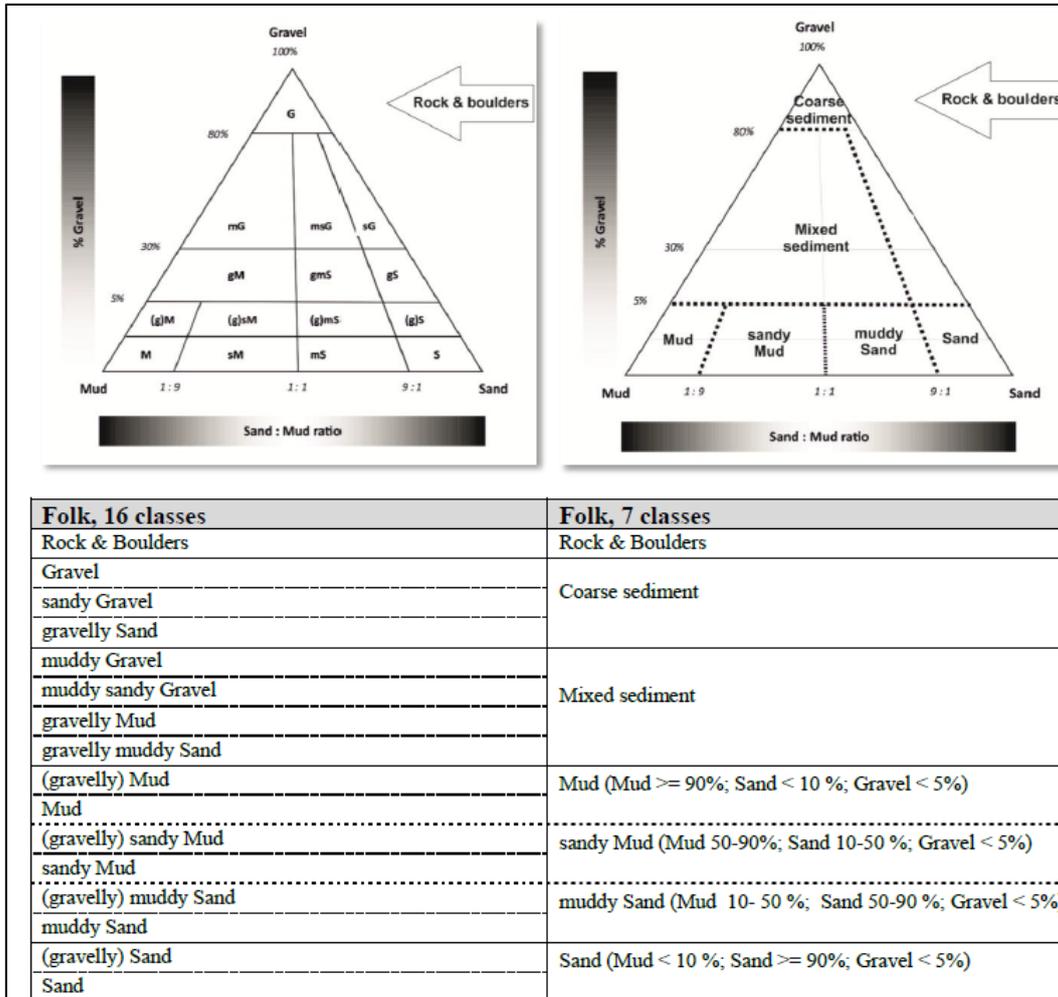


Figure 66 :Définition des classes sédimentologiques (triangles de Folk)

7.5.2.3. Répartition des sédiments dans chaque classe sédimentologique

Il a été retenu comme définition de chaque classe les répartitions suivantes de sédiment :

Tableau 15 – Définition des classes sédimentaires

Classe sédimentologique	Mud % (in mud-sand mixture)	Sand % (in mud-sand mixture)	Gravel % (in mud-sand-gravel mixture)	Epaisseur initiale (m)
Mud	100%	0%	0%	2

Sandy mud	70%	30%	0%	2
Mixed sediment	50%	50%	30%	2
Muddy sand	50%	50%	0%	2
Sand	0.001%	99.999%	0%	2
Coarse sediment	0%	100%	30%	2
Rock	0%	0%	0%	0

Ci-dessous la position des 7 classes simulées dans le triangle de Folk :

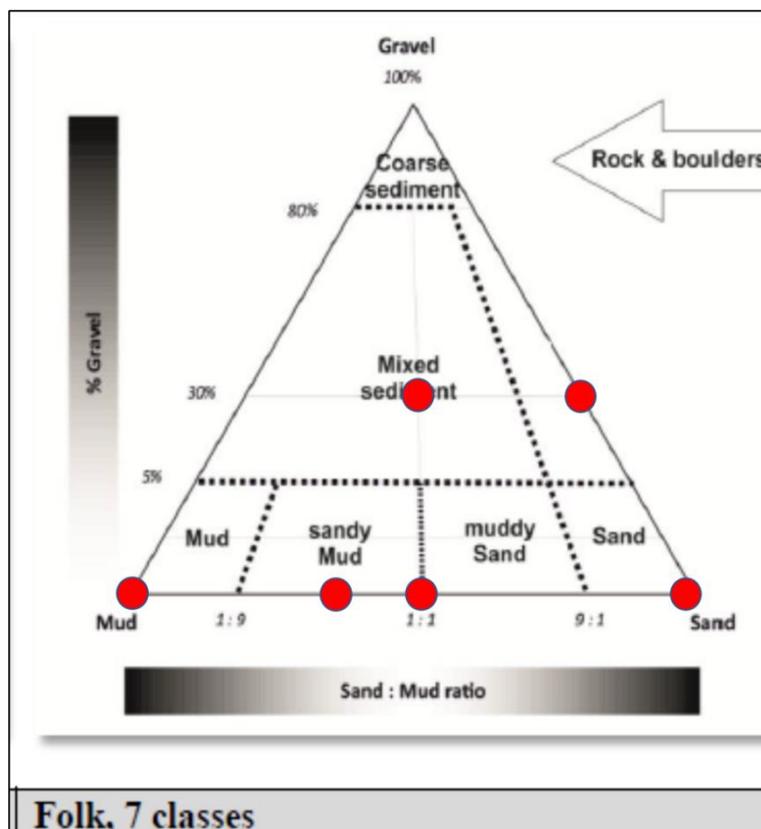


Figure 67 : Définition des classes sédimentologiques simulées replacées dans le triangle de Folk

7.5.2.3.1. Paramètres physiques des sédiments de la zone estuaire interne et externe

7.5.2.3.2. Vases

Ensemble des processus présentés en § 7.4

7.5.2.3.3. Sables

Afin de tenir compte d'un diamètre moyen de sable (hors vase) qui varie avec le PK dans l'estuaire interne, les mesures exploitées sont celles utilisées dans le projet de recherche C3E2, à partir des données de prélèvement d'Hydroexepert de juillet 1998.

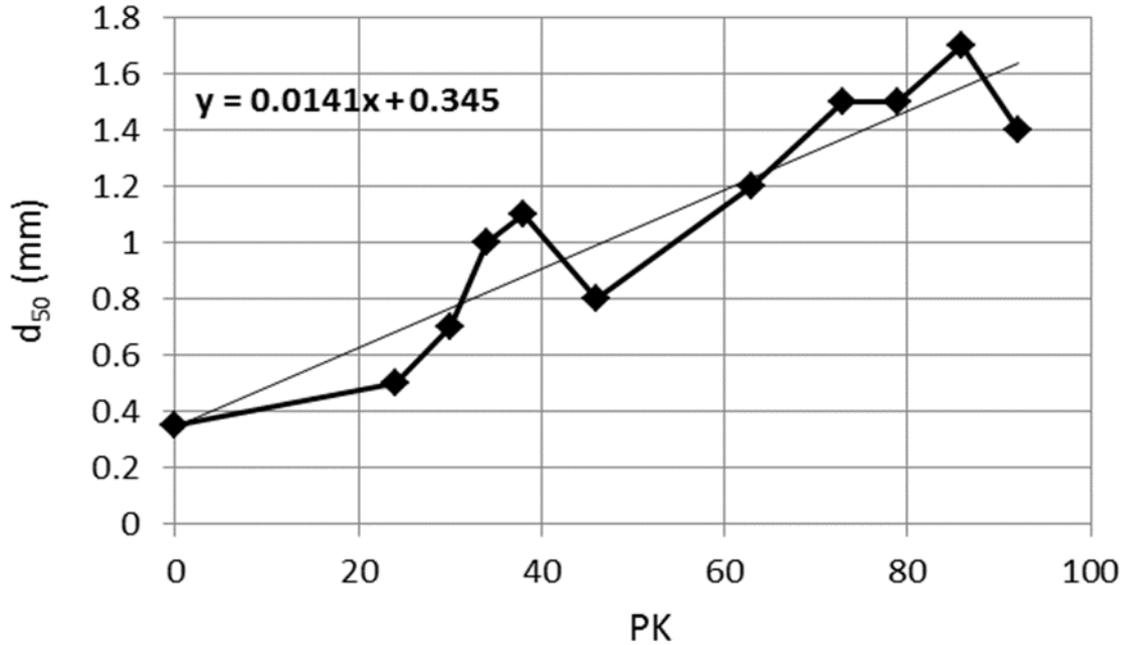


Figure 68 – Répartition spatiale du diamètre moyen dans l'estuaire interne

Il est à noter que cette loi a été bornée aux sables de 200 microns, ce qui permettra la connexion avec l'estuaire externe.

Pour rappel, **il est possible pour l'instant de faire varier le diamètre moyen du sable spatialement avec une seule classe, car le sable n'est pas transporté** dans le modèle et reste dans le sol.

La contrainte critique pour le sable est alors calculée en fonction du diamètre moyen du sable.

7.5.2.4. Paramètres physiques des sédiments de la zone maritime

Les paramètres physiques pour les trois classes de sédiments modélisés dans la zone marine sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16 – paramètres physiques des classes de sédiments en zone marine

	vases	sable	gravier
Concentration/granulométrie	Vase équivalente à une vase de Loire de concentration 300 g/l	D50= 0,2 mm	D50= 8 mm
Contrainte critique	1,2 N/m ² .	0,176 N/m ²	6,93 N/m ²
Vitesse de chute	Fonction de la concentration	0,02 m/s	0,359 m/s

7.5.3. Conditions initiales de la crème de vase

La crème de vase est initialisée comme un dépôt de :

- 1 mètre de crème de vase liquide (réparti dans les couches aux concentrations 40 à 100g/l) entre les PK-2 et 25 pour les cotes inférieures à -10 m CM ou -2 m CM suivant la localisation pour se limiter au chenal de navigation. Le placement de cette vase liquide initiale se fait plutôt à l'aval de l'estuaire, pour laisser le modèle faire remonter par lui-même un bouchon vaseux (un débit estival est considéré au début du calcul) qui soit adapté à ses processus ;
- 12 cm de crème de vase stricto sensu à consolidée (couche 125 à 375 g/l) entre les PK-2 et 55 sur toute la largeur de l'estuaire ;
- 1,5 m de crème de vase consolidée (couche à 375 g/l) entre les PK 3 et 11, sachant que la bathymétrie dans les zones draguées 1 à 6 du port a été rabotée au préalable à la cote nominale du chenal (Cf §5.1 du rapport de calage et validation du modèle raffiné estuaire externe [19]) ;
- 15% de vase dans le mélange sablo-vaseux du remplissage sédimentaire dans le chenal de navigation compris entre le PK5 et le PK10 (décroissant jusqu'à 0.001 % aux PK1 et PK15).

7.6. L'ANNÉE DE RÉFÉRENCE SIMULÉE

L'année de référence simulée est l'année hydrologique 1^{er} octobre 2018-octobre 2019 pour laquelle le volume des dragages a été particulièrement faible (environ 2,4 Mm³ exporté à la Lambarde). C'est également au cours de cette année hydrologique que des mesures de MES sont disponibles dans l'estuaire externe (mesures GPMNSN) et que des profils hydrologiques ont été réalisés à l'amont (mesures GIP LE) durant l'étiage très sévère de septembre 2019 en plus du réseau SYVEL.

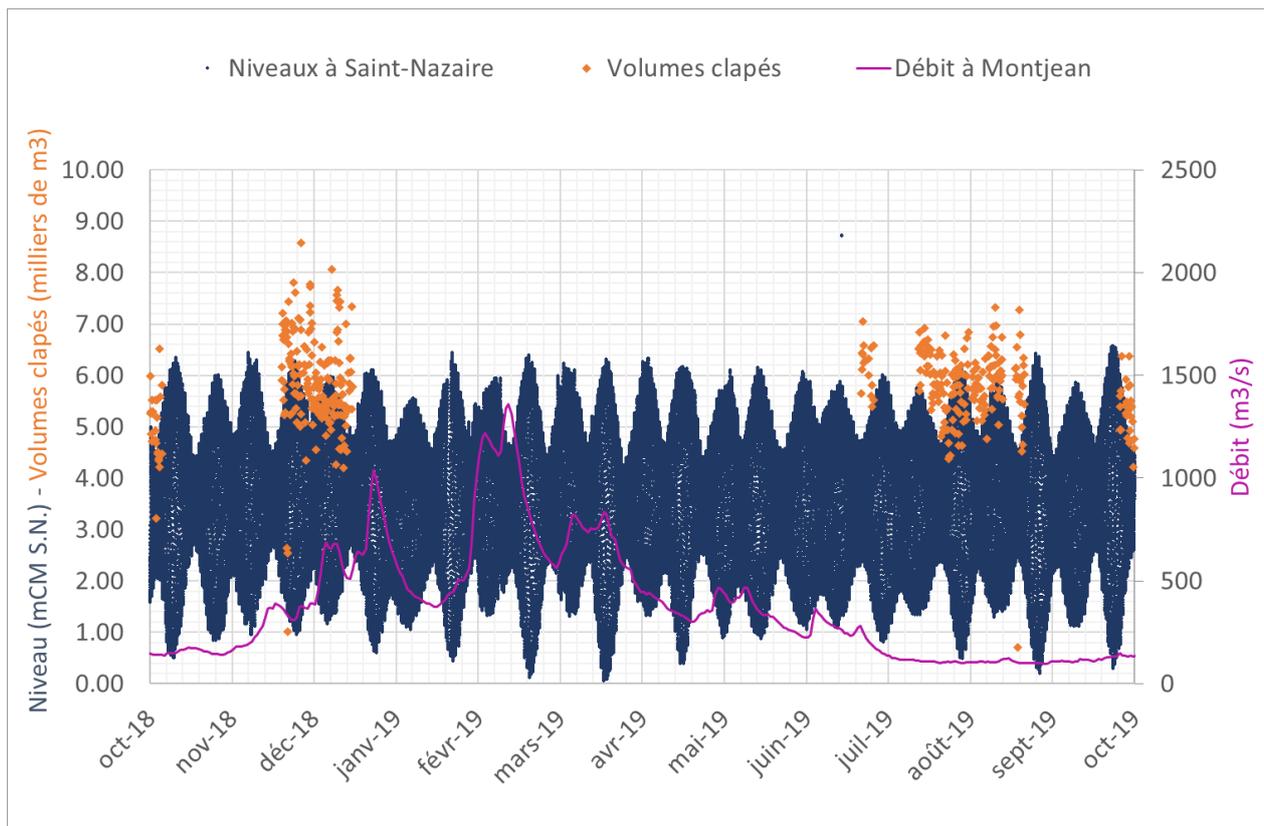


Figure 69 : Année de référence simulée

7.7. RÉSULTATS DE CALAGE SUR LA DYNAMIQUE HALINE

7.7.1. Description générale

La dynamique haline dans l'estuaire interne en fonction du point kilométrique est présentée en **Annexe 6 - fig.2**. Cette représentation des résultats permet de bien identifier les gradients horizontaux salins selon la variabilité des débits fluviaux en amont.

7.7.2. Comparaison aux mesures SYVEL

La comparaison des résultats du modèle aux mesures du réseau SYVEL est présentée en **Annexe 6 - fig.3 à fig. 6**. Cette comparaison permet de compléter la précédente avec des informations sur la colonne d'eau.

7.7.3. Comparaison aux mesures des profils hydrologiques(campagne GIP LE)

La comparaison des résultats du modèle aux mesures des profils hydrologiques est présentée en **Annexe 6 - fig.21 à fig. 46**. Ces profils sont restreints au seul mois de septembre 2019.

7.7.4. Comparaison aux mesures en estuaire externe (campagne GPMNSN)

La comparaison des résultats du modèle aux points Lambarde et Chatelier est présentée en **Annexe 6 - fig.7 à fig. 8.**

7.8. RÉSULTATS DE CALAGE SUR LA DYNAMIQUE EN MES

7.8.1. Description générale

La dynamique en MES en estuaire interne en fonction du point kilométrique est présentée en **Annexe 6 - fig.9 et 10.** Cette représentation des résultats permet de bien identifier les gradients horizontaux moyens, puis au fond et en surface de la MES, selon la variabilité des débits fluviaux en amont.

7.8.2. Comparaison aux mesures SYVEL

La comparaison des résultats du modèle aux mesures du réseau SYVEL est présentée en **Annexe 6 - fig.14 à fig. 18.**

Il nous a paru dans un premier temps intéressant de sortir une comparaison et un calcul d'erreur des valeurs moyennes journalières sur le réseau SYVEL. Mais pour faire cela il aurait fallu supprimer toutes les mesures des journées où le capteur a saturé ou n'a pas transmis de données. Par ailleurs, le décalage du zéro dû au passage par la conductivité apporte un biais en salinité sur les stations à l'amont. Les périodes complètement valides pour ce calcul d'erreur sont alors assez restreintes pour beaucoup de stations. La comparaison vise donc plus de montrer que la dynamique estuarienne est bien respectée (mouvement de la masse en fonction des forçages) et l'aspect qualitatif des graphiques paraît plus pertinent.

7.8.3. Comparaison aux mesures des profils hydrologiques (campagne GIP LE)

La comparaison des résultats du modèle aux mesures des profils hydrologiques est présentée en **Annexe 6 - fig.21 à fig. 46.**

7.8.4. Comparaison aux mesures en estuaire externe (campagne GPMNSN)

La comparaison des résultats du modèle aux points Lambarde et Chatelier est présentée en **Annexe 6 - fig.18 à fig. 19**

7.9. RÉSULTATS DE CALAGE SUR LA DYNAMIQUE DE LA CRÈME DE VASE

7.9.1. Description générale et comparaison à la connaissance

La dynamique en crème de vase dans l'estuaire interne en fonction du point kilométrique est présentée en **Annexe 6 - fig.11 à 13.**

Mise à part une dynamique très cohérente de la crème de vase liquide, stricto-sensus et consolidée par rapport à la connaissance générale estuarienne, il est vérifié que comme sur les sondages effectués par le GPMNSN dans le chenal de navigation, la vase liquide **et** stricto-sensus est expulsée à l'aval du PK 30 dès que le débit de la Loire est supérieur à 500 m³/s et inversement.

8. REPRESENTATION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU POUR LE MODELE D'OXYGENE DISSOUS

8.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Pour la température, l'hypothèse est que les variations verticales de température sont négligeables dans l'estuaire interne. D'autre part la température de l'eau est un phénomène mineur pour la détermination du gradient de densité, par rapport aux effets liés au gradient de salinité et de turbidité dans l'estuaire. La température journalière sera donc prise en compte par une fonction diagnostique, de façon à optimiser le temps de calcul et n'interviendra que comme paramètre du module de qualité des eaux. Une équation permettant de représenter les variations journalières saisonnières a été établie à partir des mesures ponctuelles en estuaire (rapport d'étude du port du Havre et de Saint-Nazaire, 1989, repris dans [13]) :

$$T(x,t)=T_a(x)+T_b(x) \sin (2 \pi (t-T_{\text{phase}})/ 365,25)$$

Avec

- t=temps en jours
- x=la distance
- $T_a(x) = (T_{\text{max}}(x)+T_{\text{min}}(x))/2$
- $T_b(x)=(T_{\text{max}}(x)-T_{\text{min}}(x))/2$
- $T_{\text{max}}(x)=19$ à 24°C selon le point kilométrique dans l'estuaire
- $T_{\text{min}}(x)=6^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{phase}}(x)=108$ jours

Les variations de température en fonction du jour de l'année et du point kilométrique sont calculées au cours du temps. Le paramètre T_{min} et T_{max} représente la température minimale et maximale au cours de l'année. Le paramètre T_{phase} représente le déphasage de la courbe sinusoïdale et donc la position du maximum de température dans l'année. Les données des mesures haute fréquence de température sont utilisées afin de déterminer par une méthode d'optimisation ces paramètres T_{max} , T_{min} et T_{phase} à différentes stations le long de l'estuaire.

8.2. DONNEES DISPONIBLES

L'estuaire de la Loire est instrumenté avec des stations de suivi mesurant en continu la température par des sondes en surface. Sur l'emprise de la zone d'étude, 8 stations sont présentes et fournissent des mesures permettant de caractériser les variations de température (Tableau 17).

Tableau 17 – Résumé des stations de suivi enregistrant la température de l'eau

nom	PK	Gestionnaire	fournisseur	Début de la série	Fin de la série	Fréquence des mesures	
-----	----	--------------	-------------	-------------------	-----------------	-----------------------	--

Montjean-sur-Loire	117	DDTM ¹	NAIADES	10/07/2008	14/07/2021	Horaire	
Mauves-sur-Loire	71.9	Nantes Métropole	Nantes Métropole	27/11/2004	13/04/2020	moyenne journalière	
Bellevue	62	GIP LE	GIP LE	15/06/2007	31/12/2020	15 minutes	
Trentemoult	52	GIP LE	GIP LE	13/12/2006	23/12/2020	15 minutes	
Le Pellerin	38.5	GIP LE	GIP LE	14/12/2006	23/12/2020	15 minutes	
Cordemais	26	GIP LE	GIP LE	28/06/2007	15/12/2015	15 minutes	
Cordemais (à partir de 2015)	26	EDF	EDF	01/01/2015	31/01/2021	horaire	
Paimbœuf	15	GIP LE	GIP LE	15/12/2006	31/12/2020	15 minutes	
Donges	9.5	GIP LE	GIP LE	15/12/2010	30/08/2019	15 minutes	

Le traitement opéré sur les données à la fréquence de 15 minutes pour chaque station est le suivant :

- Seules les données après le 01/01/2007 ont été traitées, car seuls quelques jours sont disponibles en fin d'année pour 2006 sur les stations ;
- Une moyenne journalière a été calculée. Si le nombre de mesures sur la journée est inférieur à 48, la mesure journalière n'est pas calculée et il est considéré qu'il n'y a pas de mesure pour ce jour ;
- Ensuite la moyenne interannuelle journalière sur toutes les années disponibles est calculée, afin d'établir un cycle saisonnier moyen de la température de l'eau journalière à la station considérée.

Pour la station de Montjean-sur-Loire, disponible au pas de temps horaire, le traitement a consisté à calculer la moyenne journalière à partir des données horaires. Seul les jours pour lequel au minimum 12 mesures étaient disponibles sur le jour sont considérés. Ensuite la moyenne interannuelle journalière est calculée.

Pour la station de Mauves-sur-Loire, un tri des données a été effectuée afin d'éliminer les mesures non valides (inférieure à 0,2°C ou supérieure à 40°C) et non représentatives (nombre de mesures inférieures à 2 sur la journée). Puis la moyenne journalière interannuelle a été calculée sur les mesures retenues.

Pour la station de Cordemais, seule les données GIP LE ont été retenues.

¹ À Montjean-sur-Loire, les mesures horaires sont gérées par la DREAL Pays de la Loire et les mesures basse fréquence par l'AELB (Agence de l'Eau Loire-Bretagne). Il est fort possible que la DDTM44 soit mentionnée dans les bases de données, pour les mesures basse fréquence mais les opérateurs terrain sont différents du gestionnaire de la station.

8.3. AJUSTEMENT DES PARAMETRES

La méthode d'ajustement des moindres carrés non linéaire a été utilisée afin de déterminer les paramètres de l'équation saisonnière de température pour chaque station. Le paramètre T_{min} varie de 5,90 à 7,35 degrés, le paramètre T_{max} de 23,00 à 21,23 degrés Celsius et le paramètres T_{phase} de 110,69 à 119,49 jours sur les différentes stations (Tableau 18). L'erreur résiduelle est faible, comprise en 0,52 et 0,66 sur toutes les stations. Le nombre d'années en moyenne représente le nombre de valeurs journalières disponibles pour le calcul de la valeur moyenne interannuelle. Il est de l'ordre de 10 ans, sauf pour la station de Cordemais et de Donges, pour lesquelles la série de mesures est plus courte, de l'ordre de 6 à 7 ans.

L'évolution longitudinale montre une tendance à la diminution de la température maximale annuelle de l'amont vers l'aval et une tendance à l'augmentation de la température minimale annuelle de l'amont vers l'aval (Figure 70). Les températures à l'aval, représentatives des températures océaniques, sont caractérisées par une amplitude annuelle plus faible que les températures à l'amont, représentatives des eaux de surface terrestre, davantage influencées par les échanges atmosphériques. Le paramètre T_{phase} reste stable autour de 111 jours à l'amont, de Montjean-sur-Loire à Le Pellerin. Puis il augmente progressivement du Pellerin à Donges, où il atteint 119 jours. Cette augmentation induit un décalage de la température maximale, qui se produit plus tôt dans l'année à la station de Donges par rapport à la station du Pellerin.

Le coefficient de corrélation entre l'équation avec paramètres ajustés et les moyennes journalières interannuelles est toujours supérieur à 0,99. Cette valeur indique une très bonne représentation de la courbe annuelle journalière de température par l'équation paramétrique avec ajustement (Figure 71).

Tableau 18 – Paramètres de l'équation de température

station	T _{min} (deg. C)	résidu	t value	T _{max} (deg. C)	résidu	t value	T _{phase} (jours)	résidu	t value	residu standard error	nombre d'années	Coef. de corrélacion
Montjean-sur-Loire	5.90	0.06	99.27	23.29	0.06	390.59	110.69	0.33	339.96	0.66	9.71	0.9944
Mauves-sur-Loire	5.79	0.05	112.70	23.68	0.05	459.80	111.27	0.27	407.10	0.57	10.60	0.9960
Bellevue	5.44	0.05	107.90	23.26	0.06	393.58	111.11	0.27	412.30	0.56	11.24	0.9961
Trentem.	6.19	0.05	114.90	23.00	0.05	425.70	111.12	0.31	364.20	0.60	11.59	0.9951
Le Pellerin	6.22	0.05	114.60	23.06	0.05	423.90	111.69	0.31	364.20	0.60	11.20	0.9950
Cordemais	6.19	0.06	112.40	22.58	0.06	410.00	114.67	0.32	359.20	0.61	6.13	0.9946
Paimbœuf	6.90	0.05	145.70	21.65	0.05	456.20	115.88	0.31	379.50	0.52	9.45	0.9950
Donges	7.35	0.05	153.70	21.23	0.05	442.80	119.49	0.33	364.40	0.53	7.33	0.9943

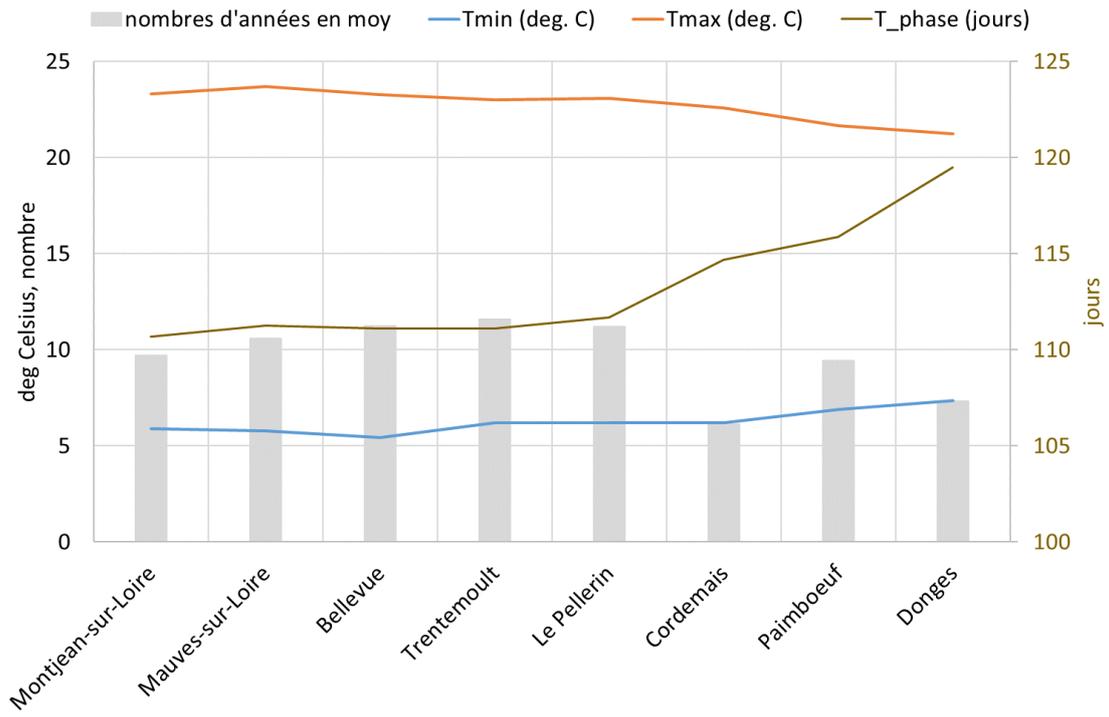
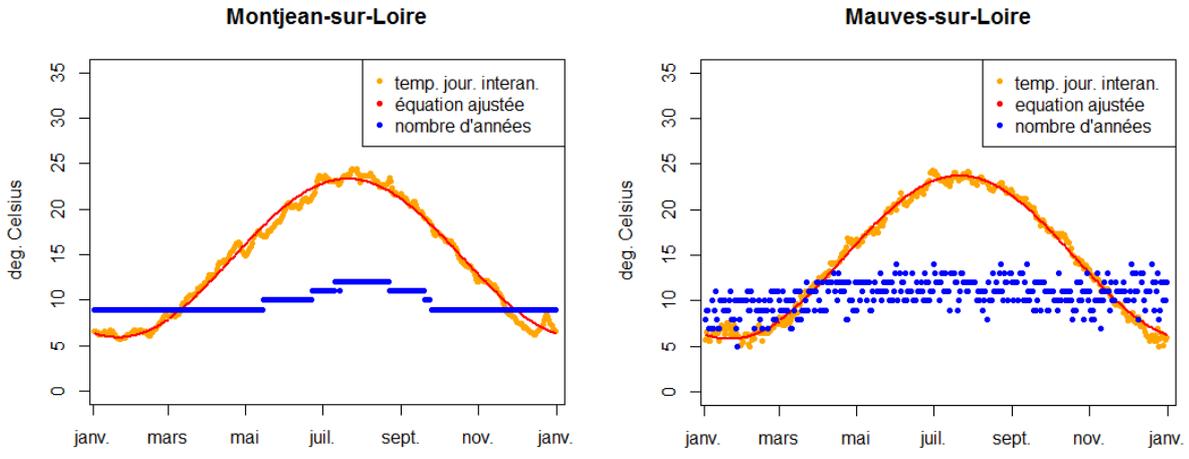


Figure 70 – Évolution des paramètres Tmax, Tmin et T_phase en fonction du PK



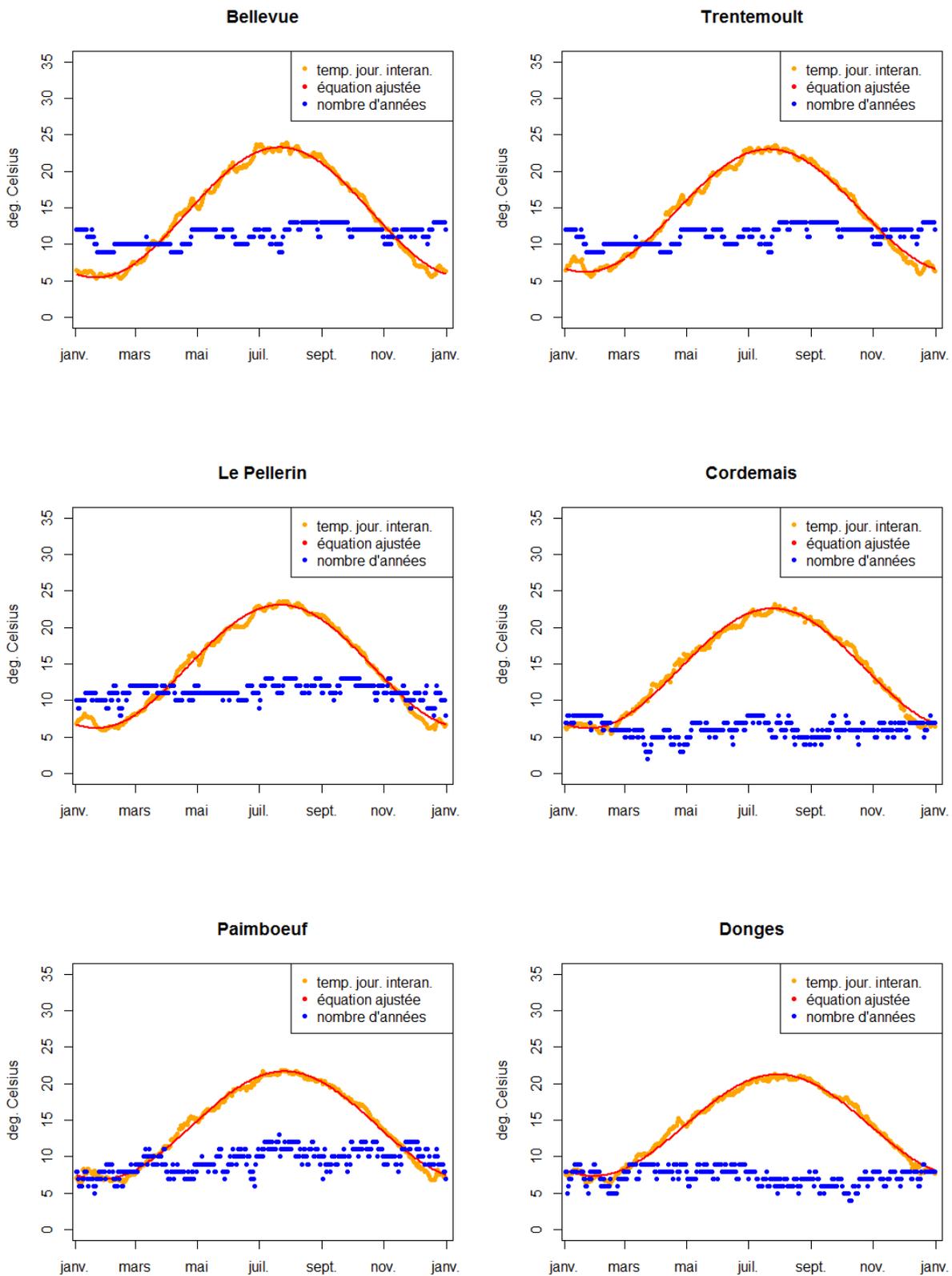


Figure 71 – Cycle annuel de température de l'eau à Montjean-sur-Loire et aux 7 stations de l'estuaire

9. LUMIERE DISPONIBLE DANS LA COLONNE D'EAU POUR LE MODELE D'OXYGENE DISSOUS

9.1. RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT

Le modèle numérique prend en compte la radiation solaire variable en temps et en espace. La source de données pour le modèle est le **jeu de données météorologiques ERA5**, qui fournit plusieurs paramètres de radiation solaire sur une grille de résolution horizontale 0,25° X 0,25° (quart de degré). Le **paramètre « mean surface downward short-wave radiation flux »** est extrait pour cette étude. Il correspond au rayonnement incident à la surface de l'eau, incluant le rayonnement diffus. Il inclut le rayonnement à courte longueur d'onde, comprenant le fraction UV, IR et visible du rayonnement solaire. Un facteur correctif de 0,45 est appliqué à cette valeur, ce qui permet de ne conserver que la fraction visible du rayonnement, utilisable par le phytoplancton pour la photosynthèse. Ce paramètre prend en compte la variation diurne. Il est donc nul la nuit. Il varie suivant les jours et atteint un pic de l'ordre de 75 à 400 W m⁻² au cours de la journée à Donges sur la période de l'été 2019 (Figure 72 ci-dessous).

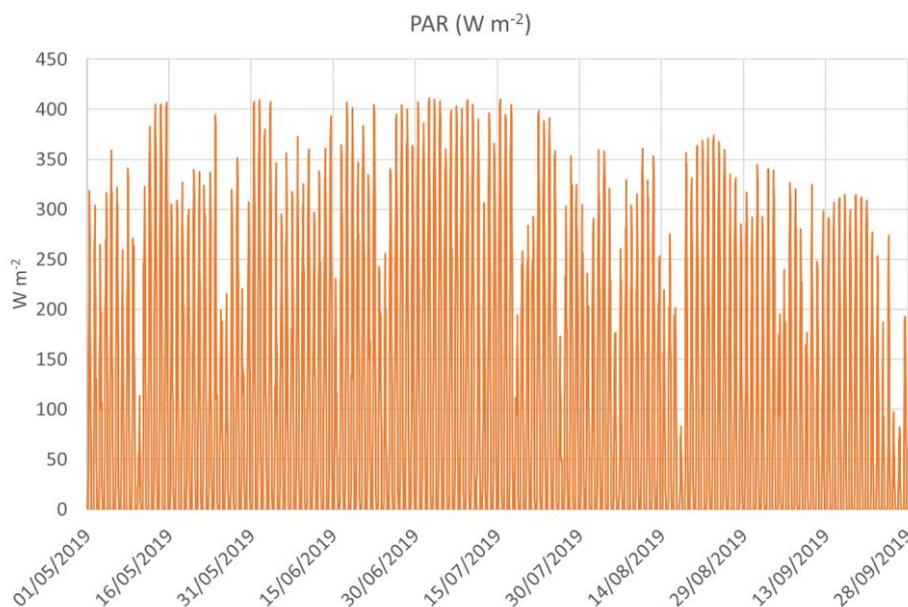


Figure 72 – Fraction visible du rayonnement incident à Donges à l'été 2019 (données ERA5)

9.2. ATTÉNUATION DE LA LUMIÈRE DANS LA COLONNE D'EAU

Par défaut, dans la version 8.2 du système Telemac-3D, la propagation de la lumière dans la colonne d'eau n'est pas prise en compte. Dans le cadre de l'étude, il a été mis en place une propagation de la lumière en fonction de la profondeur selon la loi de Beer-Lambert :

$$Iz2=Iz1 \exp (-Kd (z2-z1))$$

Avec

Iz2= lumière disponible à la profondeur z2

Iz1=lumière disponible à la profondeur z1

Kd= coefficient d'atténuation de la lumière pour la couche

Le coefficient d'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau est variable en temps et en espace. Il dépend de la MES, d'après la **formulation de Meybeck pour la Loire** :

$$Kd = 4,59 \times \text{LOG} (\text{MES}(\text{mg/l}) - 3,57)$$

Cette relation est valide pour les gammes de MES de 10 à 500 mg/l. Il est considéré pour le calcul de l'atténuation une valeur minimale de 7 mg/l, soit un Kd minimum de 0,31 m⁻¹ dans le modèle. Cette paramétrisation permet de représenter l'évolution tridimensionnelle de la lumière disponible (Figure 73) en fonction de la turbidité des eaux.

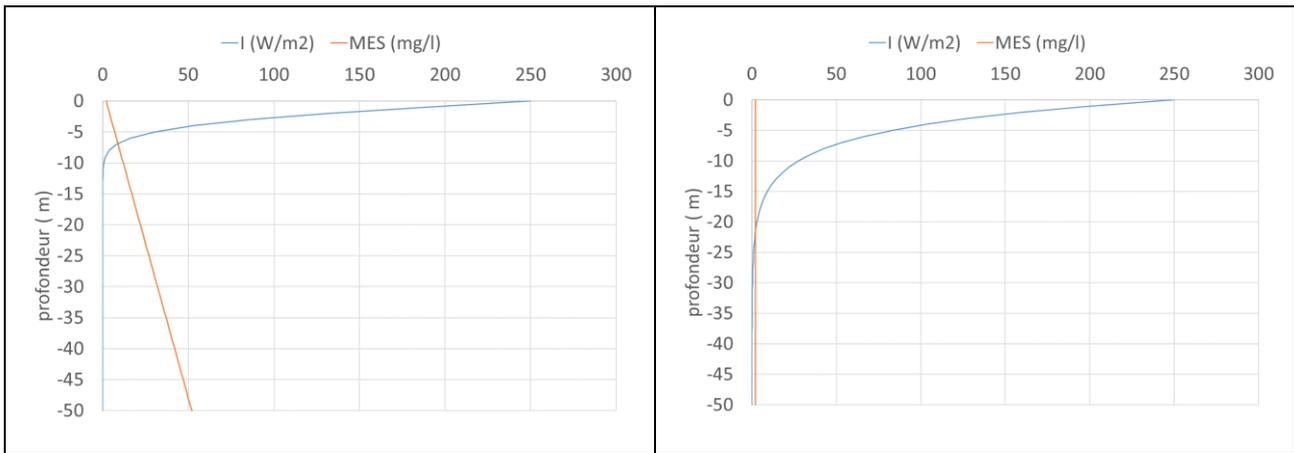


Figure 73 – Comparaison de l'intensité lumineuse disponible dans l'eau en fonction de deux profils de MES

10. MODELE D'OXYGENE DISSOUS

10.1. DESCRIPTION GENERALE

10.1.1. Schéma de principe

Le choix des variables à modéliser a été effectué à partir des travaux dans l'estuaire de la Loire [13] et dans l'estuaire de la Gironde [7]. Ainsi, les phénomènes suivants sont pris en compte (Figure 74) :

- La consommation en oxygène dissous par la matière organique particulaire, d'origine terrestre, phytoplanctonique et urbaine en fonction de leurs cinétiques de dégradation respective ;
- La consommation en oxygène par la nitrification de la matière détritique en ammonium dissous NH_4^+ ;
- Les échanges d'oxygène avec l'atmosphère en prenant en compte des facteurs physiques tels que le courant, et le vent.

Les variables d'état du modèle de qualité des eaux sont donc **l'oxygène dissous (O_2)**, **l'ammonium (NH_4^+)**, **la charge en matière organique particulaire (NOR)** et **le phytoplancton (PHY) exprimé sous forme de Chlorophylle α** , ainsi que **la demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO5)**. La **température** est prise en compte par la fonction diagnostique, car elle intervient comme paramètre dans les processus biogéochimiques établissant les flux entre les variables d'état. La température de l'eau évolue en fonction du PK et en fonction du jour de l'année, à partir des paramètres établis au 8.3. Les variables d'état du modèle sont représentées sous la forme de traceurs. L'évolution en temps et en espace de ces traceurs est régie par l'advection et la dispersion par les masses d'eau, ainsi que par les termes de flux biogéochimiques représentant les transformations biogéochimiques. Le sous-module EUTRO du module WAQTEL du système TELEMAC-MASCARET est mis en œuvre. Le **sous-module EUTRO** contient huit variables d'état en base, mais seules **cinq sont activées** dans la configuration du modèle Loire développé. Les formulations des transformations biogéochimiques intervenant sont décrites dans les paragraphes 10.1.2 à 10.1.9.

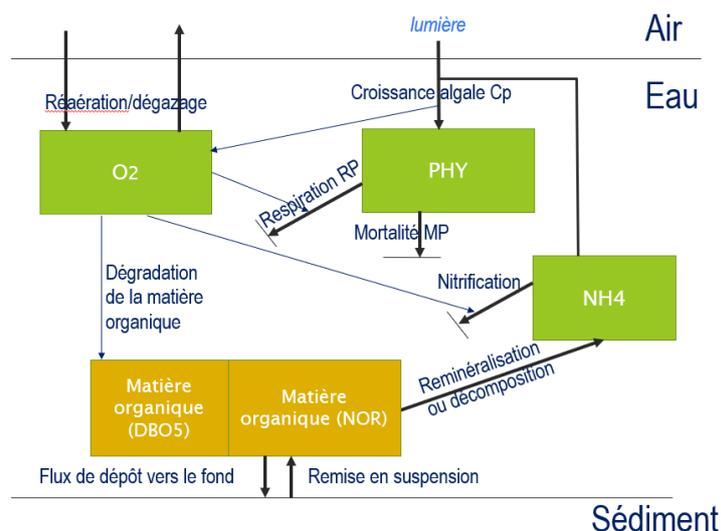


Figure 74 – Variables d'état et flux du modèle d'oxygène dissous

10.1.2. Matière organique disponible

La charge organique particulaire est considérée comme une fraction de la MES totale. Ceci permet de représenter la matière organique particulaire avec les processus de dépôts, remises en suspension, sans modéliser effectivement ces processus. À ce stade, la formulation est la suivante :

$$\text{NOR (mg/l)} = \delta N \times \text{MSO} \times \text{MES (mg/l)}$$

Avec :

NOR = matière organique particulaire azotée non assimilable (mg/)

MES = matière en suspension modélisée par le modèle GAIA (mg/l)

MSO = ratio de matière sèche organique (%) dans la MES.

δN = coefficient stœchiométrique entre la matière organique et l'azote pris à 0,08

Pour le ratio de MSO, deux sources d'informations sont disponibles :

- Le ratio de MSO établi à partir de mesures à la station de **Montjean-sur-Loire** de la base de données NAIADES, qui indique un **ratio de 18%**, très stable au cours des saisons et des années. Ce ratio est en cohérence avec les mesures de Thouvenin[13].
- Les mesures des campagnes DCE d'octobre 2008 et juin 2008 pour le suivi de la faune benthique des vasières de l'estuaire de la Loire et effectuées par Bio-littoral pour le GIP LE [4]. Ces mesures concernent à la fois des prélèvements de sédiments en place en zone intertidale haute, intertidale basse et subtidale. Le taux de matière organique, ou perte au feu, varie en fonction du pourcentage de fraction de vase dans le sédiment, les taux sont inférieurs à 6%.

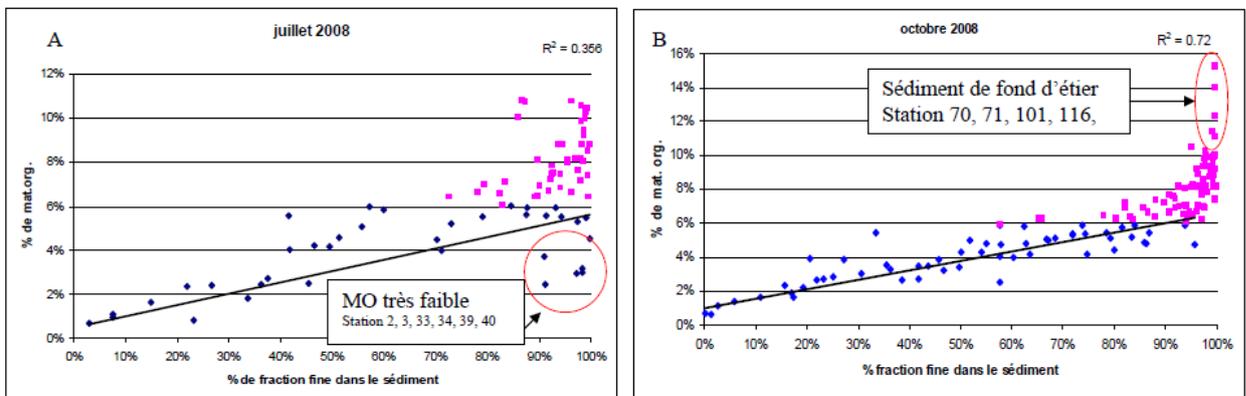


Figure 75 – Relation entre la teneur en matière organique (MO) et le pourcentage de pélites (<63 µm) dans les sédiments prélevés en juillet 2008 et en octobre 2008, d'après [4]

- Les mesures du rapport de Thouvenin[13], correspondant à des échantillonnages de sédiment en suspension dans le bouchon vaseux et hors du bouchon vaseux réalisés entre 1986 et 1990 et sur différentes périodes de l'année. Il est observé un rapport quasi-constant de la matière organique particulaire en fonction de la concentration en MES, pour les concentrations de MES > 100 mg/l. La fraction de matière organique particulaire est de 0,7% dans ce cas. Pour les MES < 100 mg/l, le pourcentage de DBO particulaire varie de 2 à 6% à l'aval de l'estuaire (hors bouchon vaseux) et de 12 à 22% à l'amont (hors bouchon vaseux).

RAPPORT Rp5 mesuré en fonction des matières en suspension
(1986,1988,1990)

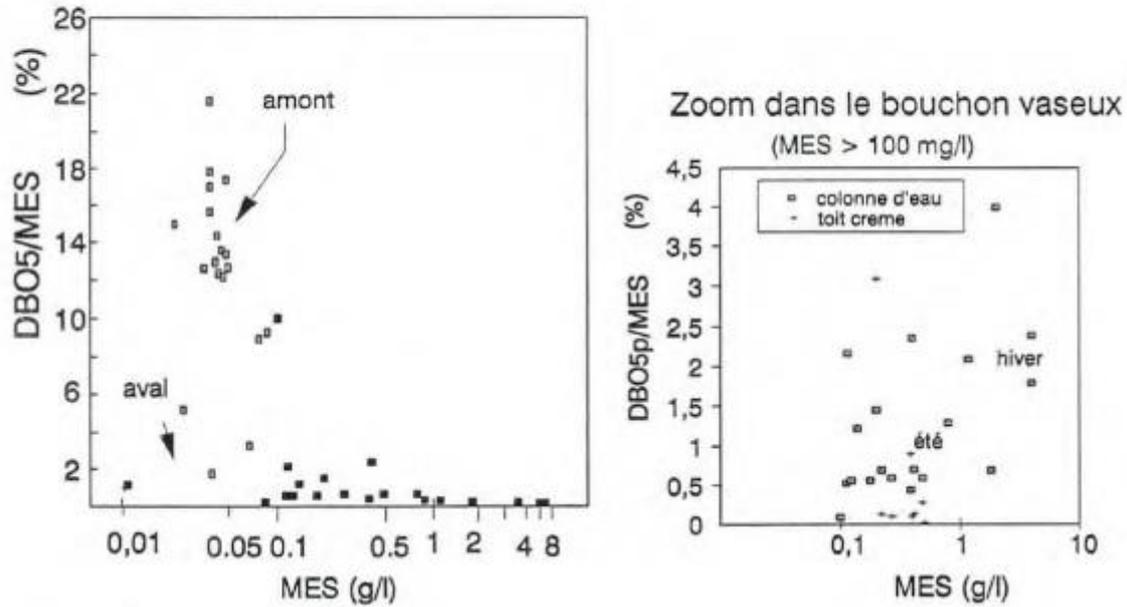


Figure 76 – Relation entre la teneur en matière organique (MO) et MES d'après Thouvenin [13]

Le ratio de matière organique MSO a donc été établi en fonction de la concentration en MES. Il constitue un paramètre de calage du modèle. **La paramétrisation choisie permet d'obtenir une variation de MSO de l'ordre de 2% dans le bouchon vaseux et 5% dans les zones de faible turbidité (estuaire externe) :**

- Si $MES < 10 \text{ mg/l}$: $MSO = 5\%$
- Si $10 \text{ mg/l} < MES < 100 \text{ mg/l}$: $MSO = -0,33333x \text{ MES} + 0,05333$
- Si $MES > 100 \text{ mg/l}$: $MSO = 2\%$

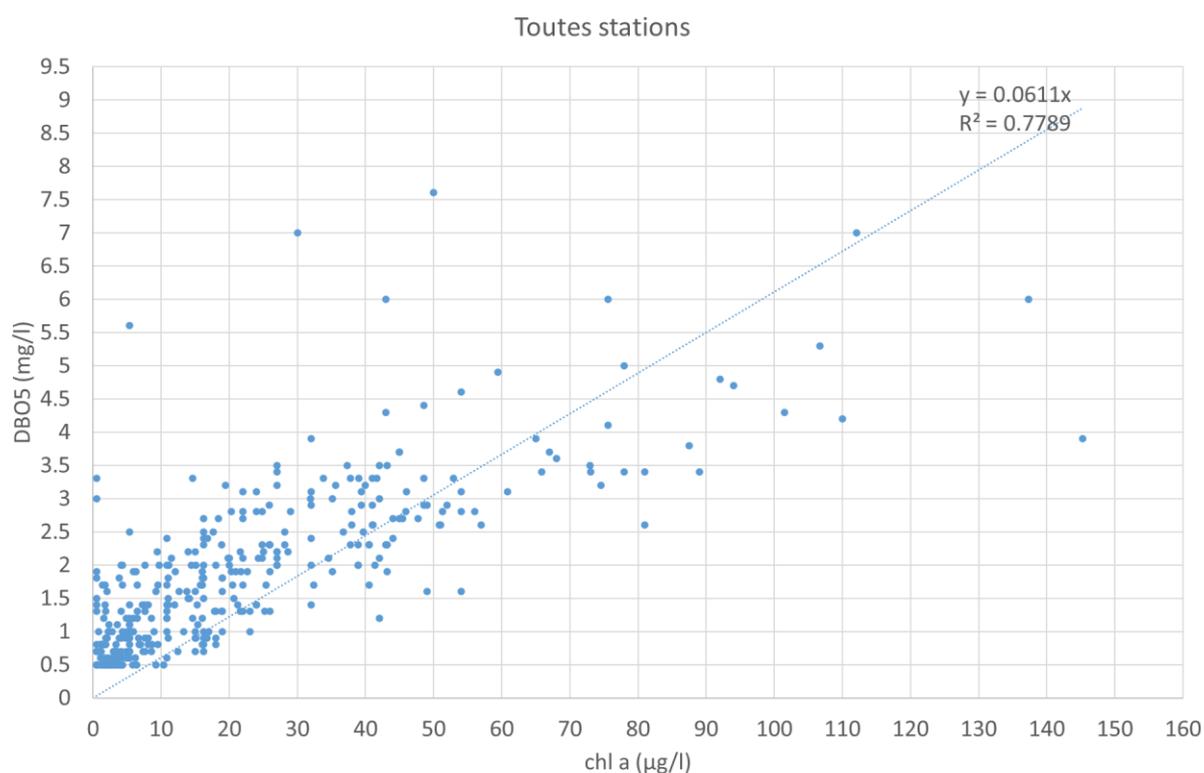
10.1.3. Matière organique d'origine phytoplanctonique

Les mesures de DBO5 représentatives de la matière organique labile, facilement dégradable, montrent une forte corrélation avec les mesures de chlorophylle a. Cette corrélation a été établie à partir des données à Sainte-Luce-sur-Loire (2007-2018), Paimbœuf (2013-2020), Cordemais (2007-2018), Couëron (2013-2020), Trentemoult (2013-2020) et Saint-Géréon (2007-2018).

Tableau 19 – Corrélation phytoplancton/DBO5 par station

station	Facteur DBO5 (mg/l)/Chlorophylle a ($\mu\text{g/l}$)	Coef. de détermination (R^2)
Saint-Géréon	0.0560	0.7806

Sainte-Luce-sur-Loire	0.0689	0.799
Trentemoult	0.0553	0.8152
Couëron	0.0554	0.7943
Cordemais	0.0677	0.8098
Paimbœuf	0.0648	0.6233



La DBO5, représentative d'une matière organique fraîche et labile d'origine majoritairement phytoplanctonique et carbonée est donc utilisée dans le modèle et fonction de la Chlorophylle α . Le ratio suivant, représentatif de la corrélation obtenue sur toutes les stations, est pris en compte dans le modèle :

$$\text{DBO5 (mg/l)} = f_DBO \times \text{Chlorophylle } \alpha \text{ (}\mu\text{g/l)}$$

Avec $f_DBO=0.06$, le ration de DBO5 par rapport au phytoplancton (PHY) exprimé sous forme de chlorophylle α .

En remarque, il est à noter que la DBO5 ne présente pas de corrélation significative avec la MES d'après ce même jeu de données.

10.1.4. Consommation d'oxygène dissous lié à la dégradation de la DBO5

La loi de dégradation de la matière organique labile est la suivante :

$$\text{Flux} = K120 \times g3 \times \text{DBO5} \text{ et } g3 = (1,047)^{(\text{Temp}-20)}$$

Avec:

construction, calage et validation du modèle global 3D hydrosédimentaire et d'oxygène dissous
MODELE 3D HYDROSEDIMENTAIRE ET DE QUALITE DES EAUX DE LA LOIRE

$K_{120} = 0,18 \text{ jour}^{-1}$

Temp = température de l'eau

g_3 = influence de la température

Pour K_{120} , il s'agit de la constante de dégradation de la matière organique à 5 jours, normalement fixée à $0,2 \text{ jour}^{-1}$ mais ici réajustée à $0,18 \text{ jour}^{-1}$ pour tenir compte d'une légère surestimation de la température de l'eau modélisée au large de l'ordre de 1 à 2 degrés Celsius.

10.1.5. Reminéralisation de la matière organique particulaire azotée

Le taux de reminéralisation de la matière organique en nutriments azotés est le suivant :

$$\text{Flux} = K_{620} \times g_2 \times \text{NOR} \times (\text{O}_2 - \text{O}_2_{\text{crit}}) / (\text{O}_2_{\text{opt}} - \text{O}_2_{\text{crit}}) \text{ avec } g_2 = (1,050)^{(\text{Temp} - 20)}$$

Avec :

K_{620} = taux de transformation du NOR en ammonium NH_4 par le biais de la minéralisation bactérienne = $0,09 \text{ j}^{-1}$ à 20 degrés Celsius

$\text{O}_2_{\text{crit}} = 0,5 \text{ mg/l}$

$\text{O}_2_{\text{opt}} = 5,5 \text{ mg/l}$

Temp = température de l'eau

g_2 = effet de la température

La transformation est modulée par le niveau d'oxygénation des eaux : elle est inhibée pour des niveaux d'oxygène dissous inférieurs à une concentration critique de 1 mg/l et elle est augmentée pour les concentrations d'oxygène dissous supérieures à 5 mg/l.

10.1.6. Loi de réaération/dégazage

La loi de réaération-dégazage intervenant est établie à partir des équations suivantes :

$$\text{Flux} = k_2 \times g_4 \times (\text{Cs} - [\text{O}_2]) \text{ et } g_4 = 1,025^{(\text{Temp} - 20)}$$

Avec :

Temp = température de l'eau

g_4 = influence de la température sur réaération et le dégazage

k_2 = paramètre de réaération pris $0,45 \text{ j}^{-1}$ à 20 degrés Celsius

Cs = concentration de saturation en oxygène dissous, fonction de la température et de la salinité.

O_2 = concentration en oxygène dissous (mg/l)

Pour les besoins de l'étude, le calcul de la concentration de saturation fonction de la température et en salinité a été implémenté d'après [3] et explicité dans [2].

10.1.7. Nitrification

La nitrification induit un flux de consommation en oxygène suivant :

$$\text{Flux} = -K520 \times g2 \times \text{NH}_4 / (k_{\text{NH}_4} + \text{NH}_4) \times \text{NH}_4 \text{ et } g2 = (1,050)^{(\text{Temp}-20)}$$

Avec :

K520 = constante de cinétique de nitrification maximale à 20°C pris à 2,9 j⁻¹

k_{NH4} = constante de demi-saturation en NH₄ pour la nitrification pris à 0,3 mg/l

Temp = température de l'eau

g2 = facteur d'influence de la température

NH₄ = concentration en ammonium (mg/l)

Cette formulation permet de représenter une nitrification plus importante dans le bouchon vaseux, car les bactéries nitrifiantes sont en concentration très élevée dans le bouchon vaseux. La prise en compte du terme de Michaelis-Menten associé à la constante de demi-saturation en NH₄ (le terme NH₄ / (k_{NH4} + NH₄)) a permis de représenter une augmentation de la nitrification compensant la forte production en ammonium par dégradation de la matière organique dans les zones de très forte turbidité, de façon à représenter le caractère autoépurateur du bouchon vaseux vis-à-vis des composés azotés.

10.1.8. Production primaire et mortalité du phytoplancton

Le taux de croissance algale CP (j⁻¹) varie selon plusieurs facteurs environnementaux influençant la photosynthèse : l'intensité lumineuse, la disponibilité en nutriment azoté NH₄⁺ et la température. Il s'exprime selon :

$$\text{CP} = \text{Cmax} \times g1 \times \text{EFF} \times \text{LNUT}$$

Avec :

Cmax= taux de croissance maximale à 20°C = 2 j⁻¹

g1 = T/20 (facteur lié à la température)

EFF est le facteur de limitation par la lumière. La version TELEMAC V8P2 prévoit la formulation de Smith [11]. Cette formulation a été remplacée par la **formule de Steele** [12] intégrée sur la profondeur, prenant en compte la photoinhibition. Ce facteur varie de 0 à 1 (Figure 77), avec pour la valeur de 1 une croissance algale maximale et pour la valeur 0 une croissance algale nulle.

$$\text{EFF} = I/Is \exp(1-I/Is)$$

Avec

I= lumière disponible (W m⁻²) à la profondeur considérée ;

Is=intensité lumineuse optimale, pris à 86 W m⁻².

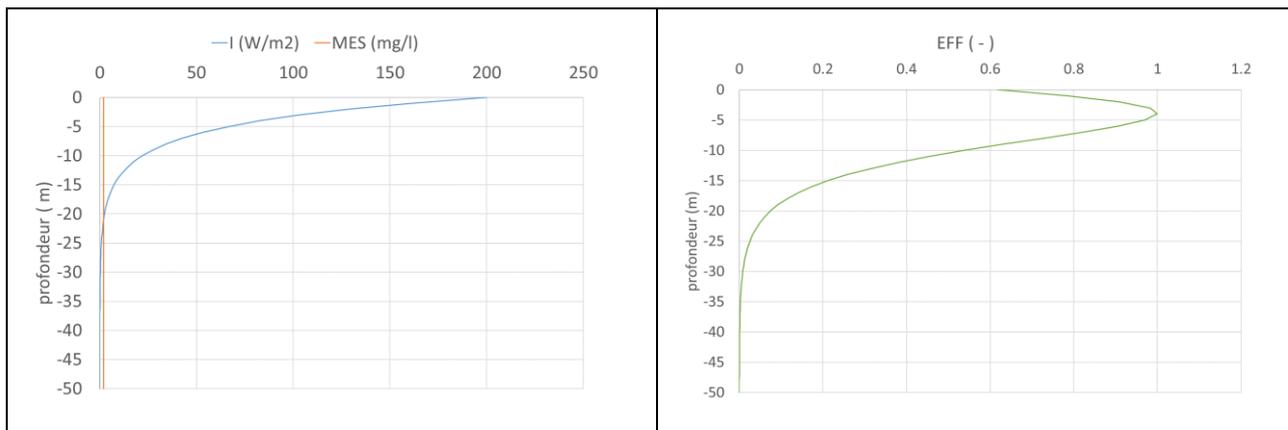


Figure 77 – Lumière disponible dans la colonne d'eau (gauche) et facteur de limitation par la lumière associée (droite).
Rayonnement incident de 200 W m^{-2} , avec intensité lumineuse optimale de 86 W m^{-2}

LNUT est le facteur de limitation par les nutriments, exprimé selon la loi de Michaelis-Menten :

$$\text{LNUT} = \frac{\text{NH}_4}{(\text{KN} + \text{NH}_4)}$$

Avec :

KN = constante de demi-saturation en azote pris à $0,03 \text{ mg/l}$

NH₄ = concentration en ammonium (mg/l)

La mortalité du phytoplancton est exprimée d'après la formule établie par Gosse [6] par :

$$\text{DP} = (\text{RP} + \text{MP}) \text{ g2}$$

$$\text{MP} = \text{M1} + \text{M2} \times \text{PHY}$$

Avec :

RP = taux de respiration à 20°C ;

MP = taux de mortalité de la biomasse algale à 20°C . Ce taux de mortalité représente à la fois le taux de mortalité naturelle et la mortalité par les prédateurs, non explicitement représentés dans le modèle ;

g2 = facteur d'influence de la température ;

M1 = coefficient de mortalité à 20°C , représentatif de la mortalité à l'échelle de la cellule ;

M2 = coefficient de mortalité à 20°C , représentatif de la mortalité à l'échelle de la population (surpopulation ou prédation) ;

PHY = concentration en chlorophylle *a*.

10.1.9. Synthèse

Le système d'équation régissant les flux biogéochimiques (ou termes sources et puits) entre les compartiments (ou variables d'état) du modèle d'oxygène dissous sont décrits ci-dessous :

$$F(\text{PHY}) = (\text{CP-DP}) \text{ PHY}$$

$$F(\text{NH}_4) = \text{fn} (\text{dtn DP-CP}) [\text{PHY}] + \text{k620} \text{ g2} [\text{NOR}] \times (\text{O}_2 - \text{O}_2_{\text{crit}}) / (\text{O}_2_{\text{opt}} - \text{O}_2_{\text{crit}}) - \text{k520} \times \text{NH}_4 / (\text{k}_{\text{NH}_4} + \text{NH}_4) \text{ g2} [\text{NH}_4]$$

$$F(\text{O}_2) = \text{f}(\text{CP-RP}) \text{ g1} [\text{PHY}] - \text{n} \text{k520} \times \text{NH}_4 / (\text{k}_{\text{NH}_4} + \text{NH}_4) \text{ g2} [\text{NH}_4] - \text{k120} \text{ g3} \text{ DBO5} - \text{k2} \text{ g4} (\text{Cs} - \text{O}_2)$$

Les variables PHY, NH₄ et O₂ sont soumises à l'advection-dispersion. Les variables NOR (matière organique particulaire azotée) et DBO5 (matière organique fraîche et labile d'origine phytoplanctonique) sont exprimées comme des variables forçantes, proportionnelles aux variables convectées MES et PHY :

$$\text{NOR} = \delta\text{N} \times \text{MSO} \times \text{MES}$$

$$\text{DBO5} = \text{f_DBO} \times \text{PHY}$$

Les paramètres intervenant dans les formulations sont résumés dans le Tableau 20.

Tableau 20 – Paramètres intervenant dans les flux biogéochimiques du modèle d'oxygène dissous.

paramètre	symbole	unité	valeur
Constante cinétique de décroissance de la matière organique fraîche (DBO5)	K120	j ⁻¹	0.18
Ratio de DBO5 par rapport au phytoplancton (PHY) exprimé sous forme de chlorophylle a	f_DBO	-	0.06
coefficient stœchiométrique entre la matière organique et l'azote	δN	-	0.08
ratio de matière sèche organique	MSO	%	Variable de 5% à 2%
taux de transformation du NOR en ammonium (NH4)	K620	j ⁻¹	0.008
Coefficient de réaération k2	k2	j ⁻¹	0.45
Constante de cinétique de nitrification	K520	j ⁻¹	2.9
Constante de demi-saturation en azote pour le nitrification	k_NH4	mg/l	0.3
Oxygène consommé par nitrification	n	mg O ₂ /mg NH ₄	5.2
Oxygène produit par photosynthèse	f	mg O ₂ /mg Chla	0.15
Taux de respiration de la biomasse algale	RP	j ⁻¹	0.05
Taux de mortalité 1 de la biomasse algale	M1	j ⁻¹	0.1
Taux de mortalité 2 de la biomasse algale	M2	j ⁻¹	0.03
Proportion d'azote dans les cellules de phyto	fn	mgN/mg Chla	0.0035

Pourcentage d'azote dans le détritus phytoplanctonique	dtn	%	0.5
taux de croissance maximale à 20°C	Cmax	j ⁻¹	1.7
Constante de demi-saturation en azote	KN	mg N/l	0.03
Intensité lumineuse optimale	Is	W . m ⁻²	86

Au cours du développement du modèle, la calibration a surtout consisté à modifier les formulations des flux biogéochimiques et leurs paramétrages. Les flux biogéochimiques qui sont apparus les plus sensibles et sur lesquels le travail de calibration a plus particulièrement porté sont les suivants : la croissance phytoplanctonique, la nitrification et la paramétrisation de la matière organique disponible.

10.2. CONDITIONS INITIALES

À l'instant initial, les concentrations des variables de qualité de l'eau sont prises constantes sur l'ensemble du domaine, à l'exception de NOR qui est calculée à partir de la répartition de concentration en MES sur l'ensemble du domaine à la date de départ. Cette répartition initiale en MES est issue d'une simulation d'octobre 2018 à fin septembre 2019 du modèle globale 3D hydrosédimentaire avec MES seule. La DBO5 est calculée à partir de la répartition en phytoplancton.

La concentration en oxygène dissous (O₂) est de 8 mg/l, la concentration en phytoplancton (PHY) est de 10 µg/l la concentration en ammonium (NH₄) est de 0,05 mg/l.

10.3. CONDITIONS AUX LIMITES

10.3.1. Apports anthropiques à l'estuaire

Les apports anthropiques à l'estuaire sont constitués des stations d'épurations des eaux urbaines (STEU) ainsi que des rejets des émissaires industriels. 5 principales stations d'épuration rejettent des effluents des STEU (plus de 90% en volumes) dans l'estuaire. Les données d'autosurveillance sont disponibles pour ces STEU et permettent de qualifier les rejets en volume et en concentration de polluants.

Le volume moyen annuel 2019 a été retenu pour qualifier et hiérarchiser les apports des effluents. Le débit moyen rejeté par les STEU varie de 0,073m³/s à 1,211 m³/s (Tableau 21). Il reste très faible comparé aux apports des affluents de l'estuaire et de la Loire amont. Le débit de la STEU le plus important est celui de Nantes Tougas avec une moyenne annuelle de 1,211 m³/s .

Tableau 21 – Volume rejet par les STEU et position

NOM STEU	Communes de localisation de la station principale	Agglomération principale desservie	Débit moyen sortant 2019 (m ³ /s)
SAINT-NAZAIRE OUEST	Les Ecossiernes	Saint-Nazaire ouest	0.139

SAINT-NAZAIRE EST	Montoir-de-Bretagne	Saint-Nazaire est	0.123
NANTES 1 - TOUGAS	Saint-Herblain	Nantes	1.211
NANTES 2 – PETITE CALIFORNIE	Rezé	Nantes	0.353
ANCENIS – LA BIGOTTERIE	Saint Géréon	Ancenis	0.073

Les paramètres de MES, DBO₅, DCO, NTK (azote total Kjeldahl qui désigne la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique), NH₄ et NO₂ sont disponibles pour les stations (Tableau 22). L'analyse des séries n'a pas montré de saisonnalité particulière de ces valeurs. Les paramètres d'oxygène dissous ne sont pas mesurés par l'autosurveillance. La concentration en oxygène dissous est donc estimée à partir de la concentration en NH₄ et de la classe équivalente de qualité des eaux SEQ-EAUX V2. La concentration de Chlorophylle *a* est estimée également et permet de caractériser le phytoplancton. Elle est considérée nulle puisque l'eau est traitée et ne contient donc pas de biomasse phytoplanctonique en sortie de STEU.

Tableau 22 – Qualité des effluents de STEU (* estimation)

NOM STEU	MES	DBO5	DCO	NTK	NH ₄	NO ₂	O ₂ *	Chl <i>a</i> *
	mg/l	mg (O ₂)/l	mg (O ₂)/l	mg/l	mg (NH ₄)/l	mg (NO ₂)/l	mg/l	µg/l
SAINT-NAZAIRE OUEST	5.5	3.1	26.3	3.5	2.6	0.7	7.0	0.0
SAINT-NAZAIRE EST	2.8	1.9	21.1	1.8	0.9	0.2	7.0	0.0
NANTES 1 - TOUGAS	8.3	3.4	31.1	7.2	6.5	0.5	7.0	0.0
NANTES 2 – PETITE CALIFORNIE	10.4	10.1	51.1	8.0	6.4	9.8	4.0	0.0
ANCENIS – LA BIGOTTERIE	3.5	2.1	32.5	2.3	1.6	0.3	7.0	0.0

10.3.2. Apports de la Loire amont et des affluents latéraux

À l'amont, les mesures de la station de Montjean-sur-Loire ont été prises en compte pour la détermination de la condition limite. Il s'agit de valeurs issues de prélèvements d'eau, effectués en surface et à une fréquence de 15 jours ou mensuelle. La moyenne mensuelle interannuelle, ainsi que l'écart-type et le nombre de valeurs ont été calculés, ce qui a permis d'établir un cycle saisonnier type (Figure 78 et Figure 79). Une valeur de 0,05 mg/l apparaît comme représentative de l'ordre de grandeur de la concentration en NH₄⁺ dans l'estuaire amont. Pour la chlorophylle *a*, une valeur de 5 µg/l est prise en compte à la frontière amont. Cette valeur est représentative de l'été 2019. Elle est inférieure à la moyenne interrannuelle estivale, de l'ordre de 25 µg/l.

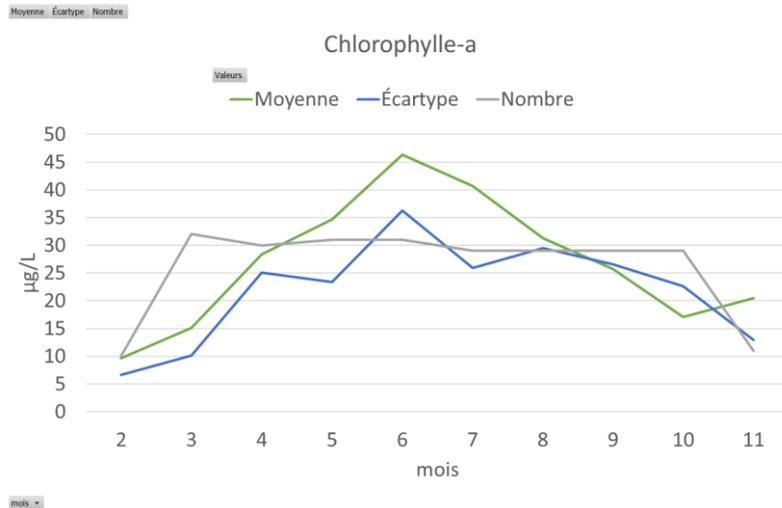


Figure 78 – Cycle saisonnier en Chlorophylle a à la station de Montjean-sur-Loire

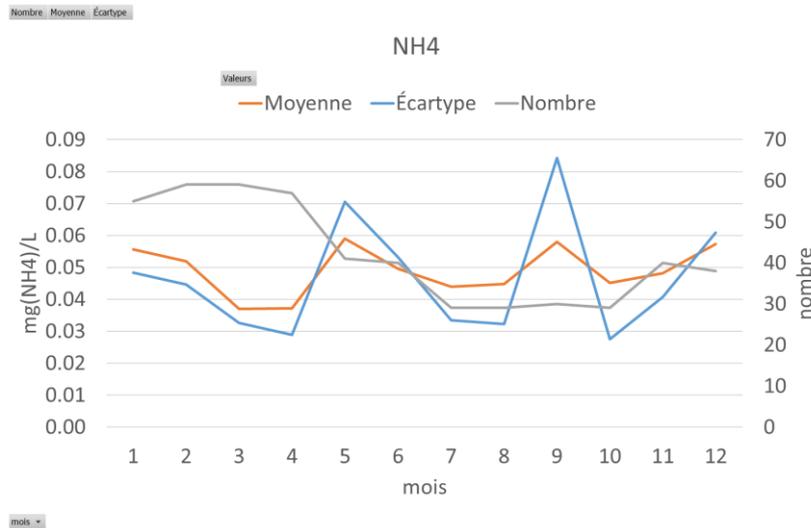


Figure 79 – Cycle saisonnier en ammonium à la station de Montjean-sur-Loire

Pour la condition limite en oxygène dissous, il est fait usage de mesures de température de l'eau, disponibles au pas de temps horaire sur plusieurs années, à la station de Montjean-sur-Loire, pour calculer la concentration de saturation en fonction de la température mesurée et d'une salinité de 0 g/l. Il est fait l'hypothèse d'un pourcentage de saturation de 93%, en correspondance avec la moyenne de la saturation observée dans les données basse fréquence sur les mois de juin, juillet, août et septembre des 10 dernières années.

Les affluents latéraux sont la Sèvre nantaise, l'Erdre et l'Èvre. Pour l'Èvre, très proche de Montjean-sur-Loire, les mêmes valeurs que pour Montjean-sur-Loire sont prises en compte. Pour l'Erdre et la Sèvre nantaise, l'analyse des données aux stations les plus proches des confluences montre que les valeurs de concentration à Montjean-sur-Loire sont également valides et représentatives (Figure 80, Figure 81, Figure 82, Figure 83).

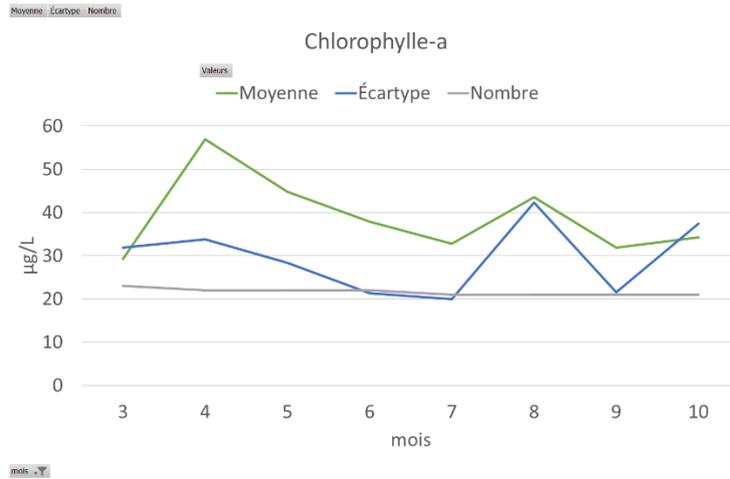


Figure 80 – Cycle saisonnier en Chlorophylle a de la Sèvre nantaise à Vertou

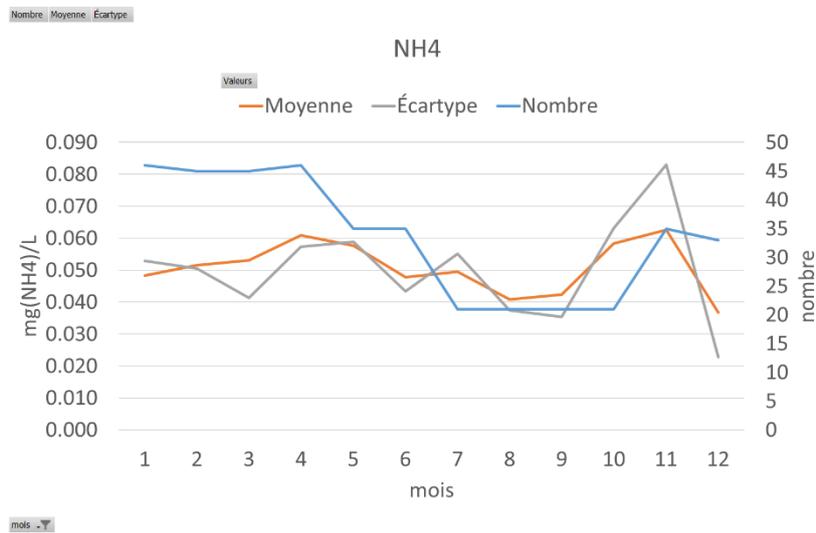


Figure 81 – Cycle saisonnier en ammonium de la Sèvre au Vertou

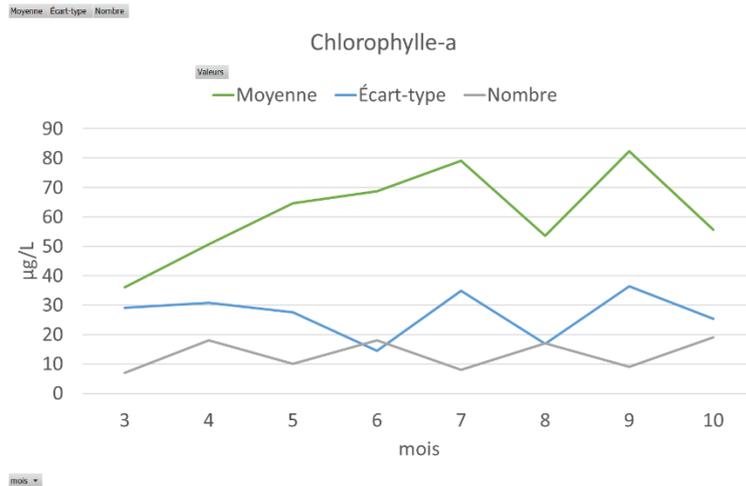


Figure 82 – Cycle saisonnier en Chlorophylle a de l'Erdre à Nantes

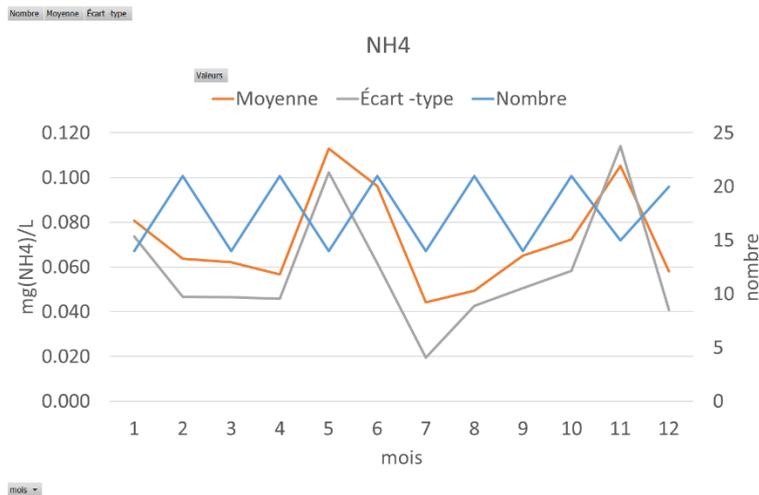


Figure 83 – Cycle saisonnier en ammonium de l'Erdre à Nantes

10.3.3. Conditions au large

La bouée MOLIT d'Ifrermer localisée en baie de Vilaine fournit des mesures de d'oxygène dissous sur la période 2018-2019. D'autre part, des données produites par modèles numériques océaniques du golfe de Gascogne sont disponibles par le projet COPERNICUS (UE). Deux produits sont disponibles :

- Le modèle IBI (Iberia Biscay Irish)
- Le modèle NWS (North West Shelf)

Les séries temporelles en oxygène dissous ont été extraites des deux modèles au niveau du point MOLIT et ont été comparées aux observations de la bouée aux profondeurs de -3m et -20m (Figure 84 et Figure 85). Le modèle IBI semble le mieux approcher les fluctuations temporelles observées et les variations en fonction de la profondeur de la concentration en oxygène dissous. Cependant les écarts sont notables entre modèle et mesure et peuvent atteindre 1 à 2 mg/l durant l'été 2019 à certaines périodes. De ce fait, seule une concentration moyenne représentative constante

de 8 mg/l en oxygène dissous représentative de la concentration en surface a été prise en compte à la frontière latérale du modèle.

Pour la chlorophylle a , il n'a pas été possible de comparer les valeurs modélisées avec la bouée car la loi de conversion de la fluorescence en chlorophylle a n'est pas disponible. En conséquence, une moyenne estivale représentative constante de 10 $\mu\text{g/l}$, issue du modèle IBI a été prise en compte.

Pour l'ammonium, la valeur de 0,05mg/l, représentative de la moyenne estivale en 2019 modélisée par le modèle IBI, est prescrite à la frontière océanique.

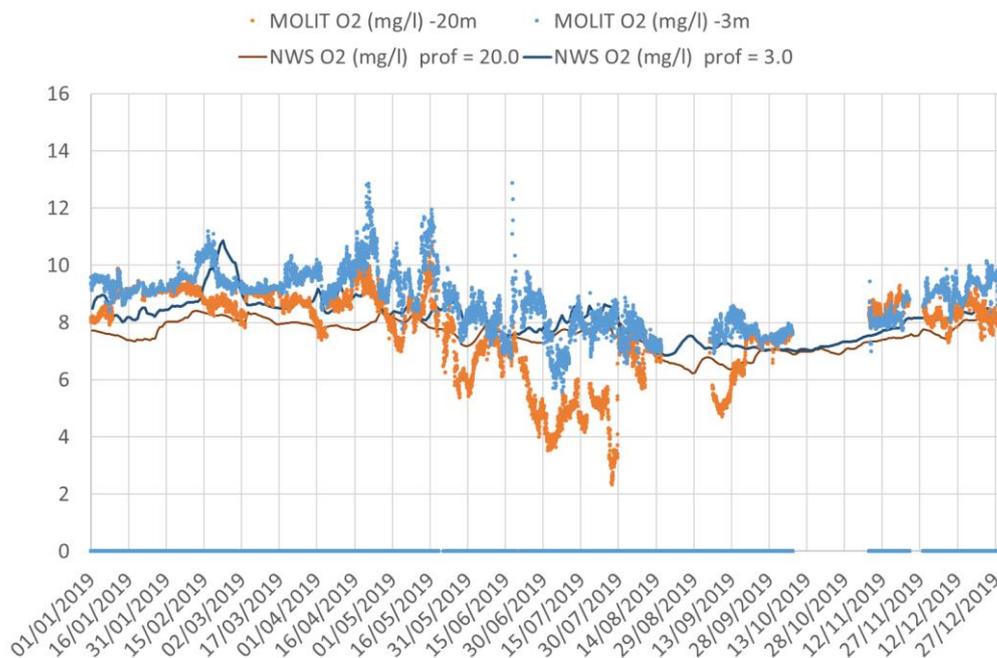


Figure 84 – Comparaison du modèle NWS avec les observations en baie de Vilaine – Oxygène dissous

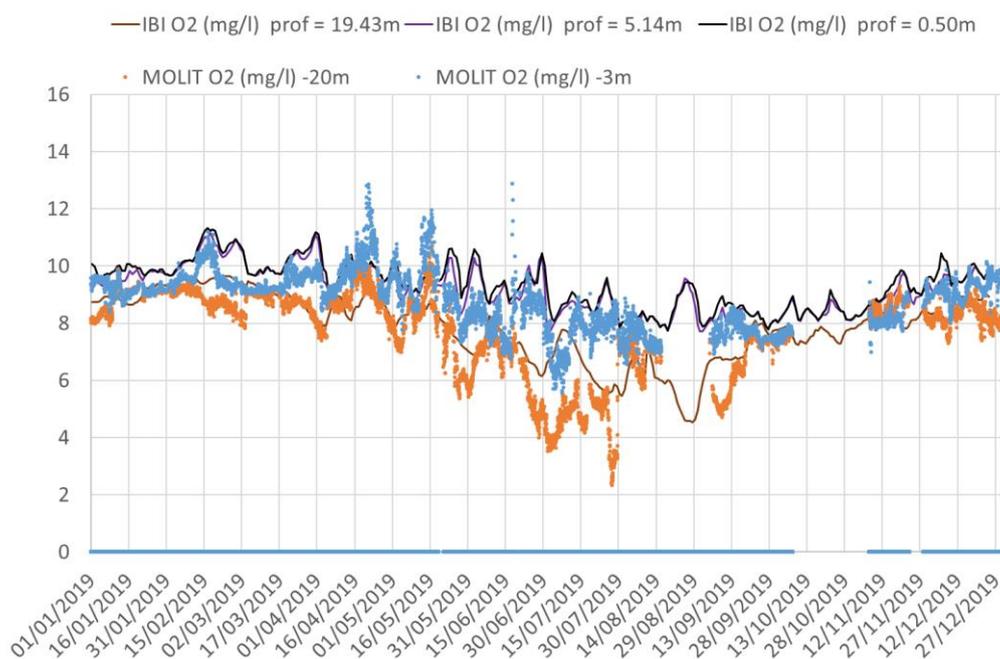


Figure 85 – Comparaison du modèle IBI avec les observations en baie de Vilaine – Oxygène dissous

10.3.4. Synthèse des conditions aux limites

Les valeurs imposées à l'amont et au large du modèle sont récapitulées dans le Tableau 23 ci-dessous. En vue des développements futurs, il serait fort utile de pouvoir mieux établir la concentration en phytoplancton à l'amont, à partir de mesures de fluorescence haute-fréquence.

Tableau 23 – Valeurs de concentration des variables d'état du modèle de qualité des eaux

Variables d'état	unités	Conditions au large	source	Condition à l'amont et aux frontières latérales	source
PHY	µg/l	10	Modèle IBI, moyenne été 2019	5	Observations NAIADES à Montjean-sur-Loire pour l'année 2019
NH ₄	mg/l	0.05	Modèle IBI, moyenne été 2019	0.05	Observations NAIADES à Montjean-sur-Loire
O ₂	mg/l	8	Modèle IBI, moyenne été 2019	Cs*0.93	Cs (concentration de saturation) calculée à partir de la température mesurée à Montjean-sur-Loire. Hypothèse de 93% de saturation

NOR	mg/l	0	Produit en interne NOR est une fraction de la MES	Calculée selon une fraction de la MES	MES imposée, et variable suivant le débit
DBO5	mg/l	0	Produit en interne. NOR est une fraction de PHY	Calculée selon une fraction de PHY	-

10.4. COMPARAISON MODÈLE/MESURE

10.4.1. Estuaire interne : comparaison aux mesures haute-fréquence du réseau SYVEL

La comparaison des résultats du modèle aux stations SYVEL pour l'oxygène dissous est présentée en Annexe 7.

Le biais entre observation et modèle est estimé par un calcul du Willmott Skill Score [20] pour l'oxygène dissous, en chaque station SYVEL pour la période du 11/06/2019 au 05/10/2019. Les deux premiers jours de simulations (du 9/06/2019 au 11/06/2019) sont considérés comme une période d'initialisation et sont exclus du calcul. Le pas de temps pris en compte est de 1 heure. Il correspond à la fréquence temporelle des mesures à Cordemais. Le calcul est le suivant :

$$WSS = 1 - \frac{\sum(Y_{\text{model}} - Y_{\text{obs}})^2}{\sum(|Y_{\text{model}} - \bar{Y}_{\text{obs}}| + |Y_{\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}}|)^2}$$

Avec:

Y_{model} = Valeur modélisée

Y_{obs} = Valeur observée

\bar{Y}_{obs} = Moyenne des observations

Tableau 24 – Résultat du calcul du WSS pour l'oxygène dissous

Station :	Nombre de valeurs :	WSS :
Donges	928	0.731
Paimbœuf	0	-
Cordemais	2805	0.761
Le Pellerin	2787	0.859
Trentemoult	2082	0.886
Bellevue	2793	0.874

Une valeur de Willmott Skill score supérieure à 0.7 est obtenue sur la période considérée pour toutes les stations (Tableau 24). Sur la base du critère employé par [7], qui considère un WSS supérieur à 0.7 comme satisfaisant, ce résultat indique un bon niveau de représentativité du modèle en oxygène dissous sur les stations considérées et pour la période considérée.

10.4.2. Estuaire interne : comparaison aux mesures basse-fréquence DDTM44/Dpt44/NAIADES

La comparaison des résultats du modèle aux stations pour l'oxygène dissous est présentée en Annexe 7. Il est à noter que pour les observations, il est représenté sur le graphe la médiane interrannuelle de 2010 à 2019 pour le mois considéré, ainsi que le centile 10% et 90% des valeurs les plus hautes. Les valeurs mesurées pour l'année 2019 sont également reportées sur les figures.

10.4.3. Comparaison aux mesures des profils hydrologiques (campagne GIP LE)

La comparaison des profils en oxygène dissous modélisés et mesurés dans l'estuaire interne le 2 septembre 2019 est présentée en Annexe 7 (diapositives 19 à 44).

10.5. DYNAMIQUE ESTUARIEENNE

En Annexe 7 (diapositive 16 et 17) il est tracé l'évolution temporelle et longitudinale en surface de la concentration d'oxygène dissous, du pourcentage de saturation en oxygène dissous, de la concentration en chlorophylle *a* et de l'ammonium NH_4^+ . L'oxygène dissous est plus faible au niveau du bouchon vaseux entre Paimbœuf et Le Pellerin durant la période d'étiage en juillet et août 2019, avec une diminution de l'oxygène dissous entre 2 et 3 mg/l à certains instants de la marée, ce qui correspond à une sous-saturation avec un pourcentage d'oxygénation inférieure à 30%. La concentration en chlorophylle *a* diminue depuis l'amont vers le large. Elle est de l'ordre de 4 $\mu\text{g/l}$ à Nantes. La concentration en ammonium est de l'ordre de 0,05 mg/l à l'amont et à l'aval du bouchon vaseux. Elle peut atteindre 0,4 mg/l au cœur du bouchon vaseux au niveau du Pellerin, en fonction de l'intensité de la concentration en MES. Il y a un pic autour de 0,5 mg/l à proximité de Nantes. Il est lié à la STEU de Nantes Tougas dont l'effluent présente une forte concentration en ammonium, à 6,5 mg/l, associée à un débit de l'ordre de 1,2 m^3/s .

10.6. MISE EN PERSPECTIVE PAR RAPPORT AUX AUTRES MODÈLES D'OXYGÈNE DISSOUS EN ESTUAIRE

Une mise en perspective des fonctionnalités et de la calibration du modèle est présentée Tableau 25 sous forme de tableau synthétique. Le modèle développé est comparé à trois modélisations antérieures d'oxygène dissous :

- Le modèle unidimensionnel développé par Thouvenin (phase 1) [13].
- Le modèle unidimensionnel développé par Thouvenin (phase 2) : l'évolution par rapport à la phase 1 consiste à la représentation de l'advection et la dispersion de la matière organique particulaire et la matière inorganique particulaire. Davantage de compartiments pour la représentation de la matière organique particulaire et dissoute sont également pris en compte [14], [15].
- Le modèle d'oxygène dissous de la Gironde développé dans le cadre d'une thèse de doctorat [7], qui est une modélisation 3D à l'échelle de l'estuaire et prenant en compte 11 variables d'états biochimiques.

Tous ces modèles incluent la représentation des courants, des variations de hauteurs d'eau liées à la marée et les variations longitudinales de salinité. Seuls les modèles 3D représentent les variations verticales de salinité et de vitesse. La modélisation réalisée dans le cadre de ce travail repose sur l'utilisation d'un modèle simplifié d'oxygène dissous, visant à reproduire les variations d'oxygène dissous sur une période courte d'étiage en fonction des variations de matière en suspension dans l'estuaire. L'amélioration des moyens de mesures permet notamment d'effectuer un comparaison modèle/mesure sur davantage de stations pour les modèles les plus récents, à savoir les deux modèles 3D. Ces deux modèles ont fait également l'objet d'un calcul statistique d'erreur sur l'oxygène dissous. L'erreur par le

construction, calage et validation du modèle global 3D hydrosédimentaire et d'oxygène dissous
MODELE 3D HYDROSEDIMENTAIRE ET DE QUALITE DES EAUX DE LA LOIRE

WSS sur le modèle Gironde est plus grande, cela s'explique en partie par le fait que le calcul est réalisé sur une plus grande période de temps, et inclus une plus grande variété de situations à l'échelle annuelle, notamment des périodes de crue et des périodes d'étiage. Un haut niveau de représentativité du modèle sur une longue période de temps est plus difficile à atteindre.

Le modèle réalisé pour la Loire dans le cadre de cette étude a également fait l'objet d'une comparaison par rapport aux réseaux de mesures basse-fréquence ou haute-fréquence sur toutes les variables d'états du modèle. Deux variables d'états sont fonction d'autres variables soumises à l'advection (NOR fonction de la MES et DBO5 fonction du phytoplancton). Les relations ont fait l'objet de comparaison par rapport aux observations. La mise à disposition de mesures de chlorophylle a haute-fréquence dérivées de capteurs de fluorescence sur la zone amont serait utile pour mieux contraindre les apports Loire Amont. Cela permettrait également de vérifier la représentation de la concentration phytoplanctonique qui influence la concentration en oxygène dissous autour de la basse mer sur la zone en amont de Nantes.

Tableau 25 – Tableau comparatif des modélisation d'oxygène dissous en Loire et en Gironde

	modèle de LOIRE 1D 1ère phase	modèle de LOIRE 1D 2ème phase	Gironde-3D	Loire-3D
Référence	Thouvenin et al, 1992[13]	Thouvenin et al, 1994[15] Thouvenin et al, 1995[14]	Lajaunie-Salla, 2016[7]	Ce rapport
date de publication	1992	1994	2016	2023
type de modèle	1D	1D	3D	3D
variation latérale	non	non	oui	oui
variation verticale	non	non	oui	oui
Variables d'état				
advection-dispersion de la MES	non	oui	oui	oui
DBO particulaire fraction de la MES	oui	non	non	oui
variables d'état soumises à l'advection	O ₂ , DBO dissoute	Chl a, O ₂ , DBO dissoute (4 fractions), DBO particulaire (4 fractions)	O ₂ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , COP (5 fractions), COD (3 fractions)	Chl a, O ₂ , NH ₄ ⁺
variable d'état fonction d'une autre variable d'état soumise à l'advection				DBO ₅ , NOR
variable d'état fonction des mesures ou variables forçantes	Chl a, MES, DBO particulaire, Température (variable horizontalement et en temps)	Température (variable horizontalement et en temps)	Température (uniforme et variable temporellement) station Bordeaux	Température (variable horizontalement et en temps)
Comparaison modèle/mesures basse fréquence				
variable d'état	DBO ₅	-	-	NH ₄ ⁺ , Chl a
période	profils longitudinaux le 14/06/1988 et le 13/09/1988	-	-	3-4 mois étiage (2019)
nombre de stations	16	-	-	6
calcul statistique d'erreur	non	-	-	non
Comparaison modèle/mesures haute fréquence				
Variable d'état	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂
durée	2 périodes d'1 mois (juin 1988, septembre 1988)	juillet à septembre 1988	2 ans (2005 et 2006)	3-4 mois étiage (2019)

nombre de stations estuaire interne pour comparaison	3 stations : la Roche, le Pellerin, le Carnet	2 stations : le Pellerin, le Carnet	4 stations	5 stations
calcul statistique d'erreur	non	non	WSS, biais, RMSE	WSS
résultat WSS	non	non	WSS > 0.7 sur 1 station	WSS > 0.7 sur 5 stations

REFERENCES

- [1] *Référence altimétriques maritimes – Ports de France métropolitaine et d’outre-mer – Cote du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée – Shom – 2020.*
- [2] Aminot A. & Kerouel. R. 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses
- [3] Benson B. & Krause D. (1984). The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnology and oceanography* 29(3):620-632
- [4] Bio-littoral. Etude des invertébrés benthiques de l’estuaire de la Loire. Campagne DCE octobre 2008. Rapport final 2009
- [5] Devlin M., Barry J., Mills D. K. (2008). Relationship between particulate material, light attenuation and secchi depth in marine waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79:4729-439.
- [6] Gosse P., 1989. Monitoring the quality of water in the Doubs river (France) Hydroécologie appliquée ½ p85-116.
- [7] Lajaunie-Salla K., 2016. Modélisation de la dynamique de l’oxygène dissous dans l’estuaire de la Gironde. Thèse de doctorat de l’Université de Bordeaux.
- [8] Meybeck, 1983. Quantification du déséquilibre en nutriments (C,P,N) dans l’estuaire de la Loire. Rapport pour le GRECO-Ica « Capacité d’acceptation du milieu marin et chimie marine ».
- [9] Sanchez M., Levacher D.,2008. « Erosion d’une vase de l’estuaire de la Loire sous l’action du courant », Bull Eng Envir (2008) 67, p597
- [10] Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y.,2004. « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l’estuaire de la Loire », VIII journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004
- [11] Smith E.L. 1936. Photosynthesis in relation to light and carbon dioxide. *Physiology*, vol 22, 504:510
- [12] Steele J. H. 1962. Environmental control of photosynthesis in the Sea. *Limnology and Oceanography*, vol 7 p137-150.
- [13] Thouvenin B, Romana L.-A., 1992. Modélisation mathématique de l’oxygène dissous dans l’estuaire de la Loire. Première phase. Rapport technique de l’IFREMER.
- [14] Thouvenin B, Le Hir P. Maurice L., Romana L.-A., 1995. Synthèse des études relatives à la modélisation de l’oxygène dissous dans l’estuaire de la Loire. Rapport technique IFREMER.
- [15] Thouvenin B., Le Hir, P., Romana L.-A., Dissolved oxygen model in the Loire Estuary. Changes in Fluxes in Estuaries ESCA22/ERF Symposium, édité par K. R. Dyer and R. J. Orth. P169-178, 1994.
- [16] Van Rijn, L. 2007. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE / June 2007
- [17] Kranenburg C. & Winterwerp J.C., 1997. Erosion of fluid mud layers. I-entrainment model. J. Hydraul. Eng. 123(6) : 504-511
- [18] Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011. Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy. Continental Shelf research, 31, 5135-5149

- [19] Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire - construction, calage et validation du modèle 3d raffiné estuaire externe - ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 1-2022
- [20] Wilmott, C. J. 1982 Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of American Meteorological Society, 1309-1313.
- [21] Projet C3E2: Conséquences du changement climatique sur l'écogéomorphologie des estuaires, Rapport final, Novembre 2014. Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC). Ifremer-Dyneco, Institut de Géoarchitecture, Sogreah, GIP LE.

ANNEXES

