

Cette opération est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional.

MAITRISE D'OEUVRE DU PROGRAMME
DE RÉÉQUILIBRAGE DU LIT DE LA LOIRE
ENTRE LES PONTS-DE-CÉ ET NANTES

LOT N°2
MODÉLISATION NUMÉRIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE
ETAT ACTUEL
L2-TF-EM2 – RAPPORT D'ÉTUDE



MODIFICATIONS ET MISES A JOUR

Indice d'évolution	Date de version	Modification / commentaires	Faite par
V0.a	29/05/2018	Reprise complète du rapport suite au recalage du modèle	M. Delinares / P.A. Rielland
V2a		Validation	VNF

Sommaire

1. CONTEXTE DE L'ETUDE	5
1.1 CADRE DE LA MISSION DE MAITRISE D'ŒUVRE DU LOT N°2	5
1.2 OBJECTIFS ET PERIMETRE DE L'ETUDE HYDRAULIQUE SUR MODELE MATHEMATIQUE	5
2. CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE	7
2.1 DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES	7
2.2 MAILLAGE ET BATHYMETRIE DU MODELE	9
3. CALAGE HYDRAULIQUE	12
3.1 DONNEES DISPONIBLES	12
3.3 PARAMETRAGE DU FROTTEMENT	15
3.4 CALAGE SUR LES LIGNES D'EAU GIPLE	18
3.5 CALAGE SUR LES LIGNES D'EAU VNF 2016	19
3.6 VERIFICATION DE LA PROPAGATION DE LA MAREE	23
3.7 VERIFICATION SUR LES JAUGEAGES	24
4. CALAGE MORPHOSEDIMENTAIRE	25
4.1 METHODOLOGIE DE CALCUL	25
4.2 PREMIER JEU DE PARAMETRE POUR LA MODELISATION SEDIMENTAIRE	26
4.3 VALIDATION DE LA METHODOLOGIE D'ACCELERATION	27
4.4 FONDS NON-ERODABLES ET FONDS NON-EVOLUTIFS	31
4.5 RESULTATS FINAUX	31
5. CALCUL MORPHOSEDIMENTAIRE TENDANCIEL	38
5.1 METHODOLOGIE DE CALCUL	38
5.2 RESULTATS	38
5.3 TEST DE SENSIBILITE AUX APPORTS SOLIDES AMONT	41
5.4 EVOLUTION TENDANCIELLE DES LIGNES D'EAU	44
6. CONCLUSION	48

Table des figures

Figure 1 : Emprise des données topo-bathymétriques utilisées pour la construction des modèles numériques	7
Figure 2 : Emprise des données topo-bathymétriques 2017	8
Figure 3 : Vue globale de la bathymétrie – modèle 2013	9

Figure 4 : Vue du maillage et de la bathymétrie (modèle 2013) – amont du bras de l'île Neuve-Macrière	10
Figure 5 : Vue du maillage et de la bathymétrie (modèle 2013) – aval du bras de l'île Neuve-Macrière	11
Figure 6 : Données limnigraphiques complètes de la période juin 2012 – décembre 2014 (Données DREAL).....	13
Figure 7 : Données limnigraphiques moyennées sur la journée de la période juin 2012 – décembre 2014	14
Figure 8 : Courbes de régressions des données limnigraphiques moyennées sur la journée de la période juin 2012 – décembre 2014.....	15
Figure 9 : Localisation temporelle des levés bathymétriques et des levés de lignes d'eau ...	16
Figure 10 : Cartographie du coefficient de frottement dans le modèle	17
Figure 11 : Relation entre le coefficient de Strickler du lit mineur et le débit	18
Figure 12 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – Strickler défini par zones	18
Figure 13 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 12/08/2016 – $Q=173 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=33	20
Figure 14 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 01/09/2016 – $Q=164 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=90	20
Figure 15 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 13/10/2016 – $Q=165 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=72	20
Figure 16 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 15/11/2016 – $Q=362 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=112	21
Figure 17 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 05/07/2016 – $Q=640 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=94	21
Figure 18 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 03/05/2016 – $Q=882 \text{ m}^3/\text{s}$	22
Figure 19 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 07/04/2016 – $Q=1150 \text{ m}^3/\text{s}$	22
Figure 20 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 03/03/2016 – $Q=1380 \text{ m}^3/\text{s}$	22
Figure 21 : Comparaison entre niveaux mesurées et simulées aux limnigraphes – 07/05/2016	23
Figure 22 : Comparaison entre niveaux mesurées et simulées aux limnigraphes – 17/09/2016	24
Figure 23 : Chronique hydrologique de la période de calage	25
Figure 24 : Schéma de la méthode d'accélération de l'hydrogramme.....	26
Figure 25 : Comparaison des évolutions simulées (10 mois) avec et sans prise en compte de la marée	28
Figure 26 : Différence entre les évolutions simulées (10 mois) avec et sans prise en compte de la marée	29
Figure 27 : Comparaison des évolutions simulées (40 mois) pour différents facteurs d'accélération	30
Figure 28 : Cartographie des fonds non érodables et des zones non-évolutives.	31
Figure 29 : Evolutions de volume mesurées et simulées par zones.....	32

Figure 30 : Evolutions de volume mesurées et simulées par zones dans le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière.	33
Figure 31 : Cumul depuis le pk 100 des évolutions de volume mesurées et simulées.	33
Figure 32 : Cumul depuis l'amont du bras secondaire de l'île Neuve-Macrière des évolutions de volume mesurées et simulées.	34
Figure 33 : Cumul depuis l'amont du bras principal de l'île Neuve-Macrière des évolutions de volume mesurées et simulées.	34
Figure 34 : Cumul depuis l'amont du bras principal de la Loire des évolutions de volume mesurées et simulées.	35
Figure 35 : Evolution des volumes pour le bras principal et le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière au cours du calcul de calage.	36
Figure 36 : Débit solide annuel moyen transitant pendant la période de calage.	37
Figure 37 : Chronique hydrologique utilisée pour les calculs tendanciels.	38
Figure 38 : Evolutions simulées au bout de 10 ans.	39
Figure 39 : Evolutions simulées au bout de 50 ans.	39
Figure 40 : Evolution de volumes pour le bras principal et le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière au cours du calcul tendanciel.	40
Figure 41 : Evolution de volumes pour l'amont de la zone d'étude au cours du calcul tendanciel.	41
Figure 42 : Evolution de volumes pour le bras principal et le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière au cours du calcul tendanciel – sensibilité au débit solide entrant.	42
Figure 43 : Evolution de volumes pour l'amont de la zone d'étude au cours du calcul tendanciel – sensibilité au débit solide entrant.	43
Figure 44 : Evolutions simulées au bout de 10 ans - sensibilité au débit solide entrant	43
Figure 45 : Evolutions simulées au bout de 50 ans - sensibilité au débit solide entrant	44
Figure 46 : Lignes d'eau à 207 m ³ /s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées.	44
Figure 47 : Lignes d'eau à 850 m ³ /s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées.	45
Figure 48 : Lignes d'eau à 3100 m ³ /s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées.	45
Figure 49 : Lignes d'eau à 207 m ³ /s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées avec réduction des apports amont.	46
Figure 50 : Lignes d'eau à 850 m ³ /s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées avec réduction des apports amont.	46
Figure 51 : Lignes d'eau à 3100 m ³ /s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées avec réduction des apports amont.	47

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1 Cadre de la mission de maîtrise d'œuvre du lot n°2

Dans le cadre de la mise en œuvre du programme de ré-équilibrage de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes, VNF a confié à ARTELIA la réalisation du lot n°2.

Ce lot 2 porte sur la réalisation des opérations n°2 et n°4 telles qu'identifiées dans le programme des travaux :

➤ **Opération N° 2 : le remodelage des épis entre Oudon et Ancenis.**

« La limite amont de cette opération sera néanmoins à repreciser dans le cadre des études de conception. On entend par remodelage, l'action consistant à raccourcir, araser ou supprimer l'épi dans le but de libérer les matériaux piégés entre les épis et restaurer la bande active du lit ».

➤ **Opération N°4 : la réouverture du bras secondaire de l'île de Neuve Macrière et le rechargement du bras principal.**

« Cette opération répond à une logique de rééquilibrage des débits entre les deux bras et de réactivation du transit sédimentaire dans le bras secondaire ».

Les missions de maîtrise d'œuvre attribuées en tranche ferme sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Ref VNF	Désignation
L2-TF-EM1	Etude préliminaire
L2-TF-EM2	Etude hydraulique locale sur modèle mathématique
L2-TF-EM3	Avant-Projet
L2-TF-EM4	Mission G2 (AVP)
L2-TF-EM5	Accompagnement en phase d'instruction réglementaire

1.2 Objectifs et périmètre de l'étude hydraulique sur modèle mathématique

La présente étude constitue l'étude hydraulique sur modèle mathématique (L2-TF-EM2).

Cette étude a pour objet de simuler de façon détaillée (modèle local) les conditions d'écoulement au droit des sites d'aménagement. Le modèle du lot 2 doit simuler les aménagements entre Anetz et Oudon. Le modèle doit couvrir un linéaire minimum s'étendant de l'aval de l'île Mocquart en amont (PK 100) jusqu'au pont de Oudon (PK82), soit sur un linéaire de 18 km environ.

Les modèles à construire devront permettre de simuler selon un maillage 2D, les conditions d'écoulement et de transport solide dans le chenal navigable (bras principal), les bras secondaires et les systèmes d'épis pour une large gamme de débits depuis l'étiage (150 m³/s) jusqu'aux crues de plein bord entre digues. Il permettra également de décrire ces conditions

d'écoulement et de transport solide pour différentes configurations d'entonnement à l'entrée du bras secondaire de Neuve Macrière et différentes géométries du chenal d'étiage. Le modèle sera mis en œuvre pour la gamme des débits d'étiage et des crues morphogènes ainsi que pour différentes chroniques hydrologiques permettant de simuler les effets attendus à moyen et long terme (10 à 50 ans).

Une version précédente de ce rapport a été produite en 2017, correspondant à une version précédente du calage hydro sédimentaire du modèle. Dans ce premier rapport, les principales données d'évolution bathymétriques (période 2010-2013) utilisées pour le calage sédimentaire couvraient correctement l'ensemble du bras principal mais ne couvraient que peu les bras secondaires (la donnée topographique complète n'étant disponibles que pour l'année 2010). Le calage sur les bras secondaires n'était donc pas possible.

Par rapport aux itérations précédentes du rapport de modélisation numérique, ce présent rapport présente une version améliorée du calage hydro sédimentaire, suite à la disponibilité fin 2017 de nouvelles données bathymétriques et topographiques, ces dernières permettant d'évaluer l'évolution des bras secondaires entre 2010 et 2017.

2. CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE

2.1 Données topo-bathymétriques

Pour l'analyse, la construction du modèle numérique et son calage, plusieurs levés ont été utilisés :

- un levé bathymétrique par sondages multifaisceaux a été confié à la société GEOxyz pour le compte du GIP Loire Estuaire. Le chenal principal et les bras secondaires de la Loire ont été levés du 5 janvier au 27 mars 2013, entre les Ponts-de-Cé (PK 147) et Nantes (PK 55). Cette donnée ne concerne que les zones en eau de la Loire et la précision planimétrique du format restitué est de 1m. La zone correspondant au site d'étude a été levée en mars 2013.
- un levé bathymétrique par sondages multifaisceaux effectué pour VNF en novembre 2009 pour les zones en eau, assemblé à un levé laser aéroporté provenant de l'IGN et datant de 2010 pour les zones hors d'eau.

Les emprises de ces différentes données utilisées sont illustrées sur l'image suivante :

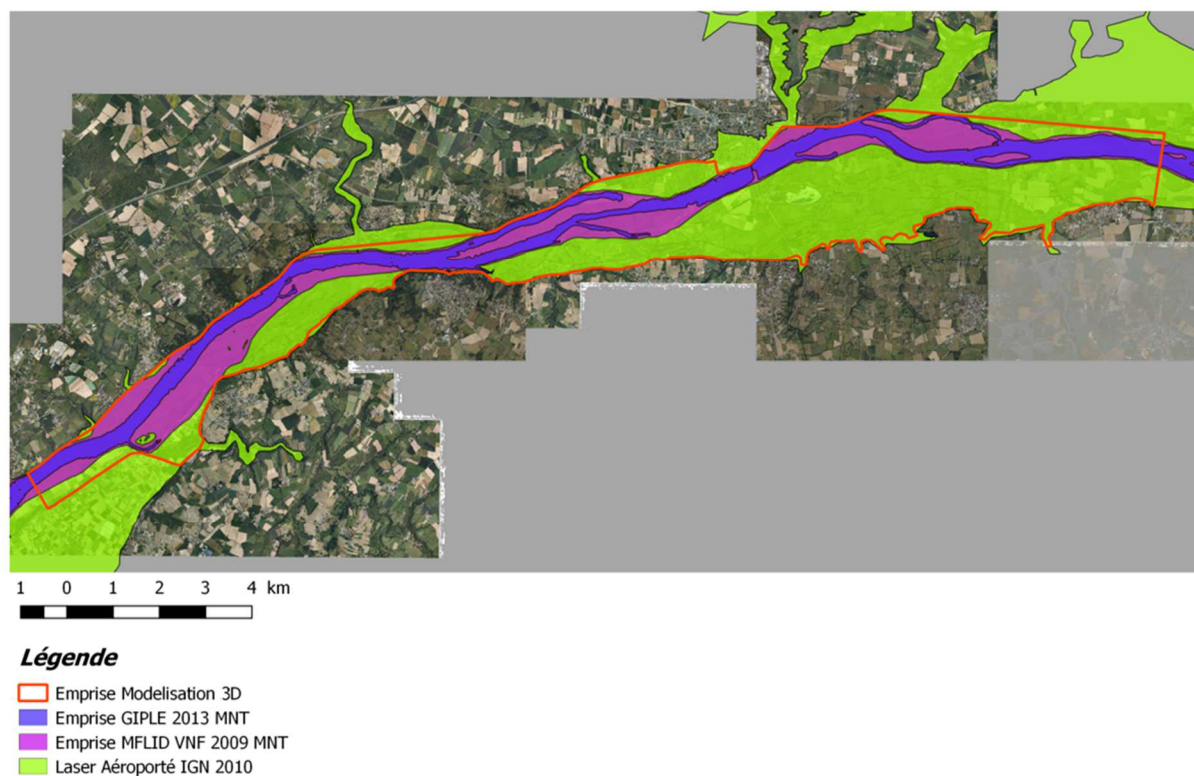


Figure 1 : Emprise des données topo-bathymétriques utilisées pour la construction des modèles numériques

Pour le recalage du modèle numérique sur la période 2010-2017, les données utilisées consistent en

- bathymétrie GIP levée les 14 et 15 décembre 2017 (à l'amont d'Oudon)
- topographie LIDAR « RGEALTI GIP » levée le 28 novembre 2017

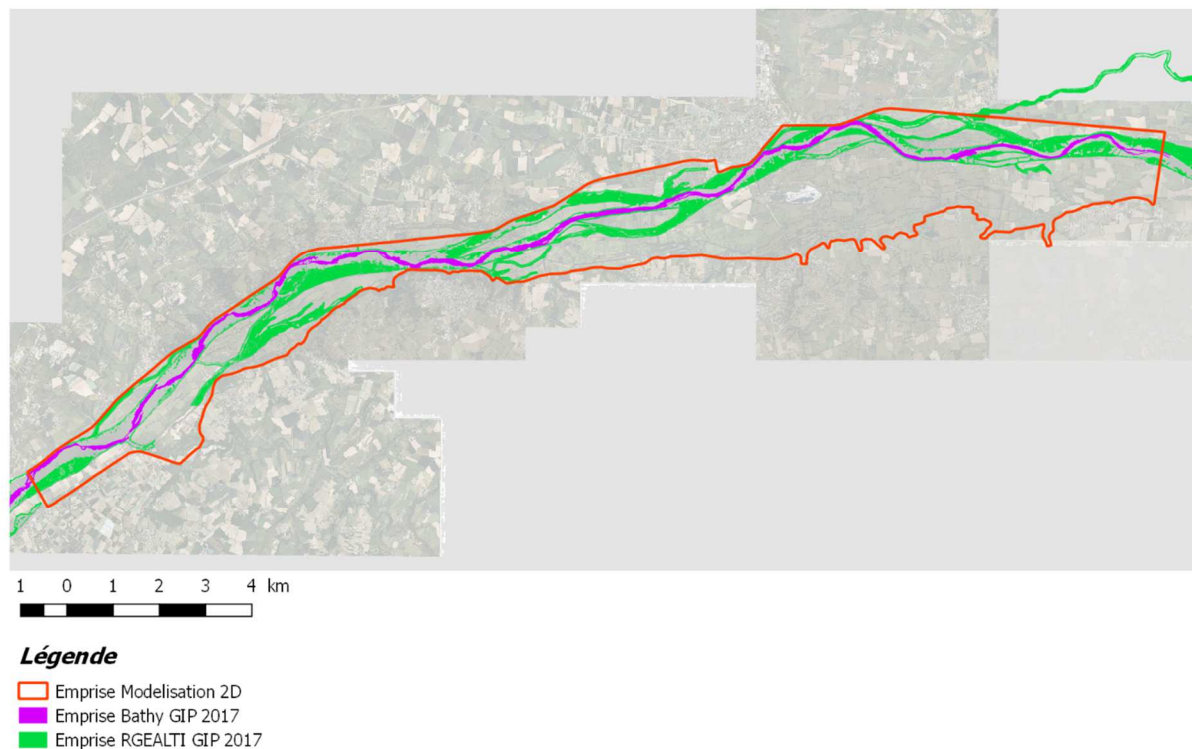


Figure 2 : Emprise des données topo-bathymétriques 2017

L'utilisation de ces données pour la modélisation consiste en :

- La construction d'un modèle « 2010 » sur la base du levé bathymétrique de novembre 2009 associé au levé laser aéroporté datant de 2010. Ce modèle sera utilisé pour le calage morphologique sur la période 2010-2013 ainsi que sur la période 2010-2017, par comparaison entre les évolutions mesurées et simulées.
- La construction d'un modèle « 2013 » sur la base du levé bathymétrique de mars 2013 associé au levé laser aéroporté datant de 2010. Ce modèle sera utilisé pour le calage hydraulique sur les mesures récentes, et pour le test des différentes configurations d'aménagement du site. Ce modèle ne peut pas être utilisé pour un calage à court terme sur la période 2013-2017 car les zones hautes du modèle sont basées sur un levé 2010.
- Les données topo-bathymétriques 2017 ne sont pas utilisées pour construire un MNT complet (elles ne couvrent pas complètement le lit). Elles sont utilisées pour construire un MNT partiel permettant d'évaluer sur son emprise l'évolution topo-bathymétrique 2010-2017 pour caler le modèle hydro-sédimentaire sur cette période.

2.2 Maillage et bathymétrie du modèle

Le maillage construit pour l'étude s'étend du PK 100 à l'amont jusqu'à Mauves à l'aval (PK 72.3).

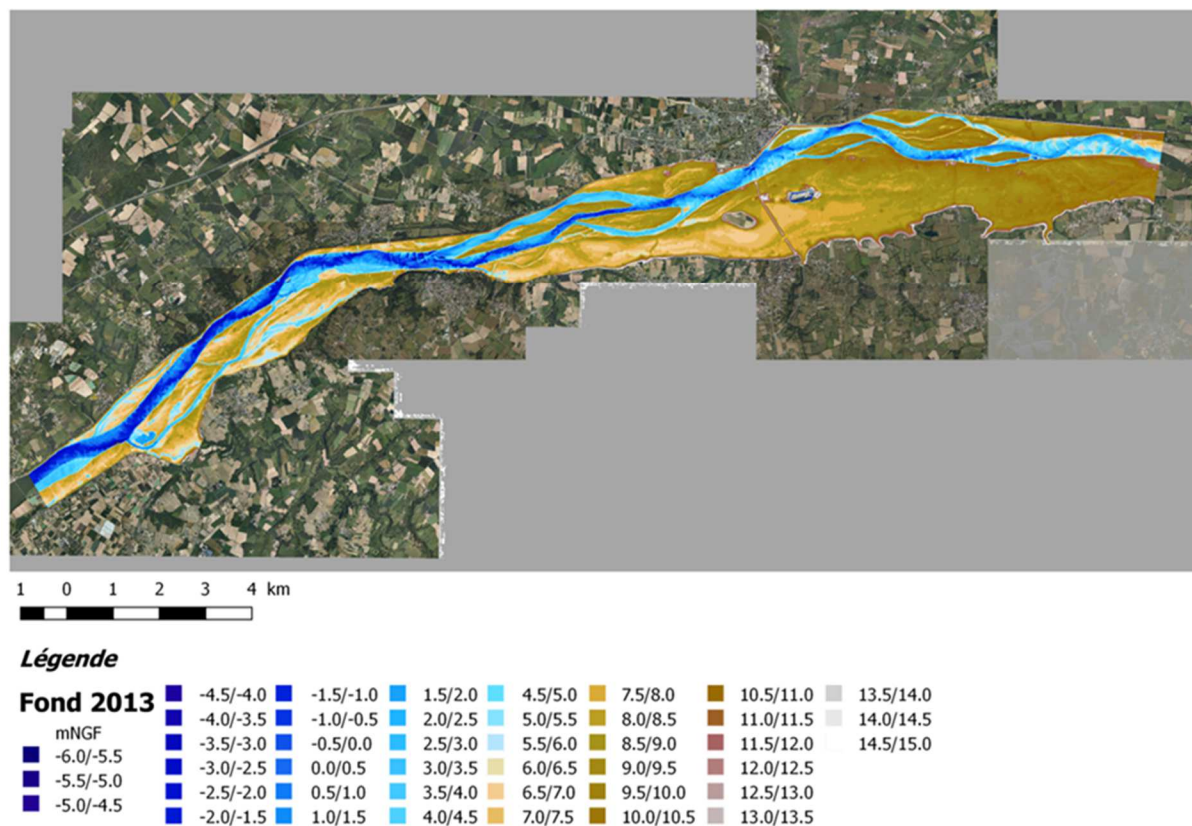


Figure 3 : Vue globale de la bathymétrie – modèle 2013

Il est constitué de 120 000 nœuds de calcul. Les tailles de maille sont les suivantes :

- 50 m dans le lit majeur,
- entre 9 et 15 m de manière générale dans le lit mineur,
- de l'ordre de 5 m ou moins au niveau des épis, chevrettes et piles de ponts (Champtoceaux et Ancenis).

Le maillage non-structuré utilisé dans le système TELEMAC permet de bien représenter les singularités topographiques. Les épis et chevrettes sont représentés par quatre lignes de nœuds du maillage : deux lignes de crête et deux lignes de pied de digue.

La figure 3 ci-dessous présente une vue du maillage et de la bathymétrie (modèle 2013) au niveau de la bifurcation du bras secondaire de l'île Neuve-Macrière.

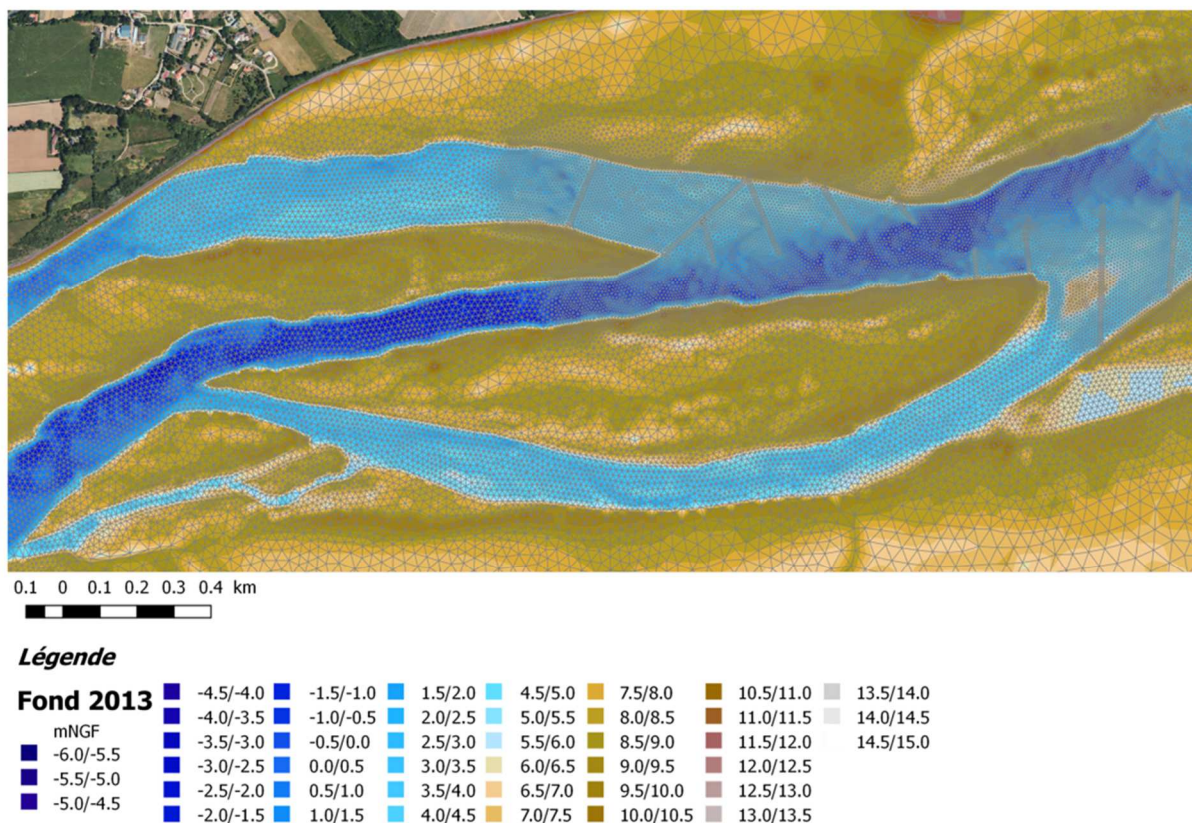


Figure 4 : Vue du maillage et de la bathymétrie (modèle 2013) – amont du bras de l'île Neuve-Macrière

La figure 4 ci-dessous présente une vue du maillage et de la bathymétrie (MNT 2013) au niveau de la confluence du bras secondaire de l'île de Neuve-Macrière.

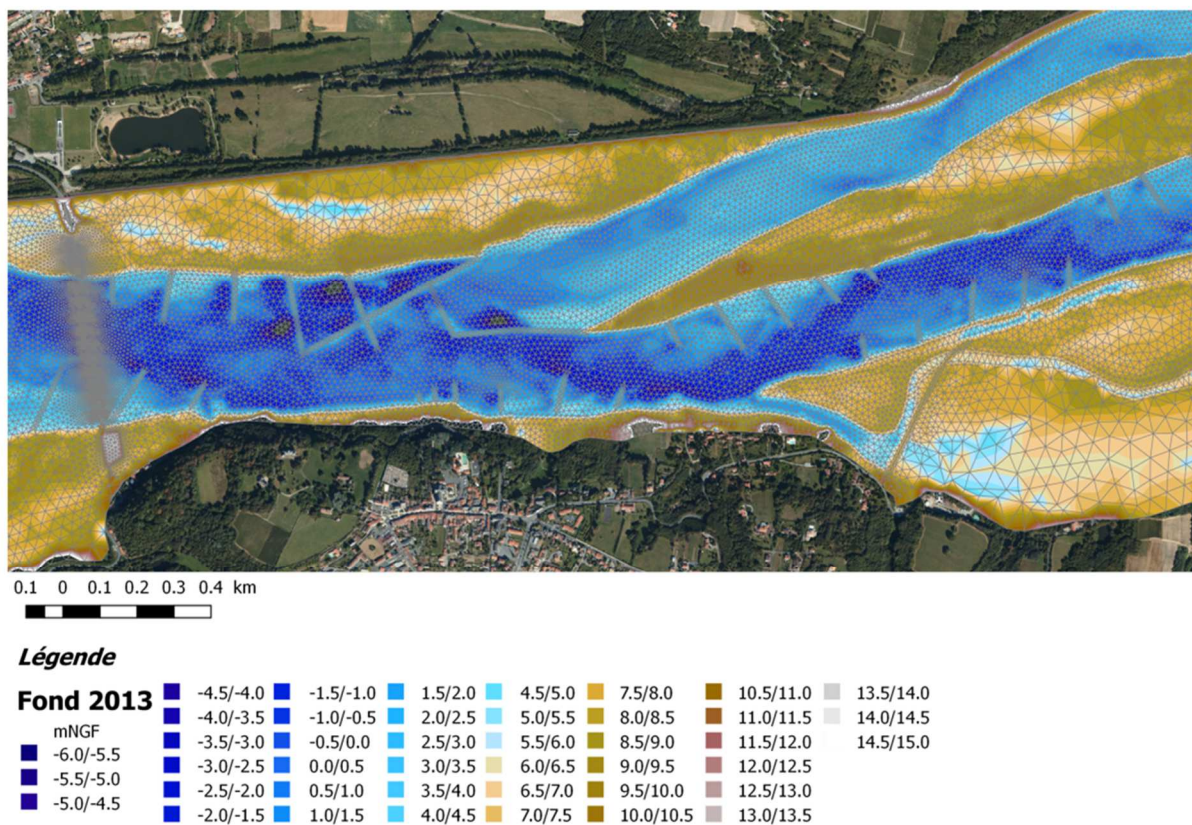


Figure 5 : Vue du maillage et de la bathymétrie (modèle 2013) – aval du bras de l'île Neuve-Macrière

3. CALAGE HYDRAULIQUE

3.1 Données disponibles

Les données utilisées pour le calage sont les suivantes :

- Niveaux mesurés aux limnigraphes de :
 - Mauves (correspond à la frontière aval du modèle),
 - Oudon,
 - Ancenis.
- Trois lignes d'eau levées pour le GIP LE en 2011 et 2012, pour trois débits très différents,
- 8 lignes d'eau relevées par VNF sur la période mars 2016 – novembre 2016,
- Enfin, des jaugeages ADCP au niveau de l'île Neuve-Macrière ont été effectués pour VNF :
 - les 20 et 21 décembre 2016. Le débit de la Loire à ce moment-là étant entre 330 et 340 m³/s, il n'y avait pas d'écoulement dans le bras secondaire. Cette campagne de mesure ne peut donc pas être utilisée pour valider la répartition de débit entre les deux bras autour de l'île Neuve-Macrière.
 - les 24 et 25 janvier 2018. Les débits élevés à ce moment (autour de 2700 m³/s) permettent de comparer la répartition des débits entre les deux bras de l'île Neuve-Macrière.

3.2 Analyse des données limnigraphiques

La période juin 2012 – décembre 2014 (inclus) est utilisée pour cette analyse. On souhaite en effet « entourer » la date de la bathymétrie la plus récente, soit mars 2013. Pour cette période, toutes les données limnigraphiques des stations dans l'emprise du modèle, soit Mauves, Oudon, Ancenis et Saint-Florent-Le-Vieil (cette dernière étant légèrement à l'amont de l'emprise du modèle), sont présentées sur la figure 5 ci-dessous.

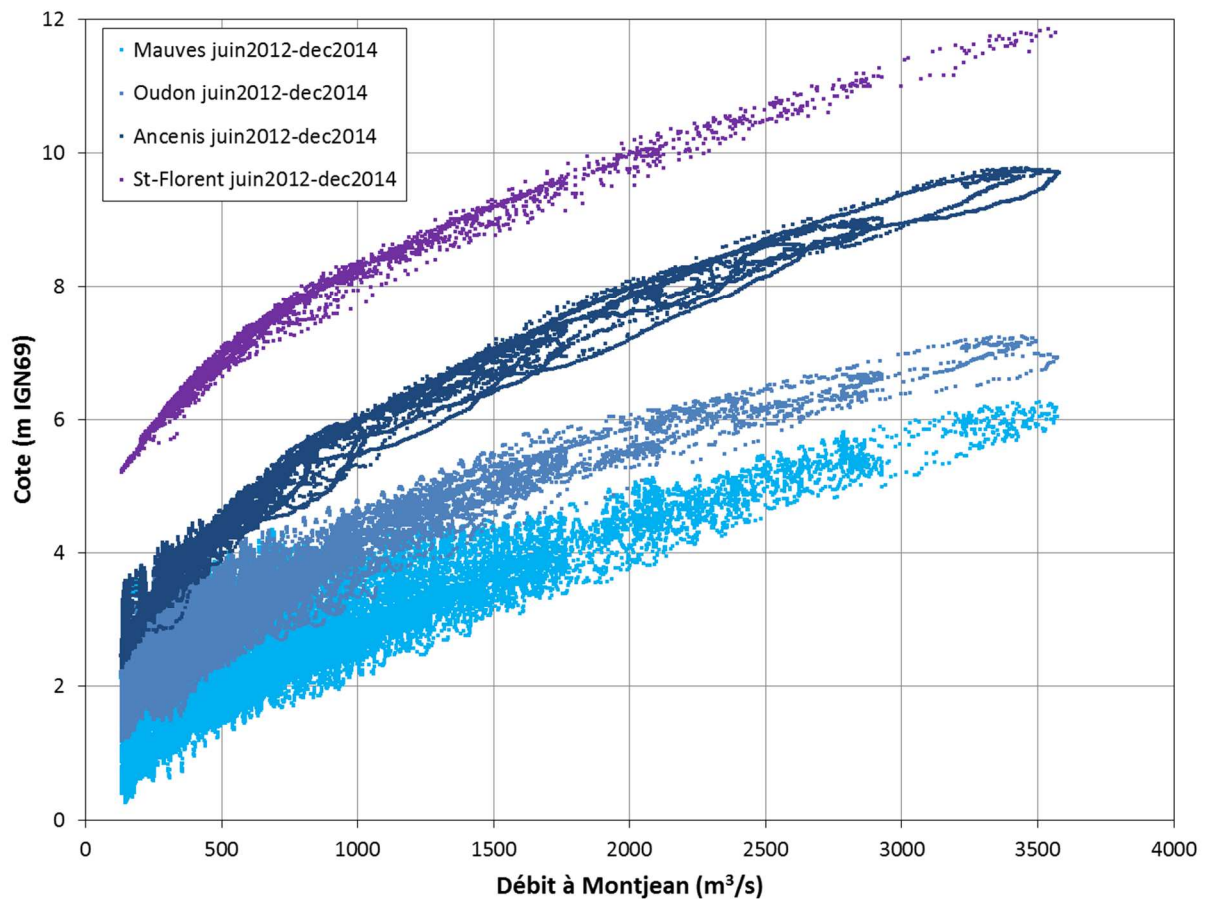


Figure 6 : Données limnigraphiques complètes de la période juin 2012 – décembre 2014 (Données DREAL)

On constate donc une forte variabilité du niveau d'eau à Mauves (et dans une moindre mesure à Oudon) pour un même débit. Cette variabilité est due en grande partie à la marée, mais pas seulement. Cette variabilité est en effet supérieure au marnage lié à la marée en raison :

- du décalage entre le débit considéré (à Montjean) et la mesure de niveau à Mauves le même jour. Le débit réel à Mauves peut être différent du débit à Montjean en raison du décalage temporel ainsi que d'apports (voire de prélèvements) éventuels.
- de la variation du niveau moyen de la mer. Cette variation se fait d'autant plus sentir pour les stations proches de la mer.
- de la modification morphologique de la Loire, qui vient modifier la relation entre débits et niveaux. Cet effet n'a a priori pas de lien avec la distance à la mer.

Le marnage lié à la marée est éliminé en effectuant une moyenne journalière des données limnigraphiques. La figure ci-dessous présente ainsi l'ensemble des données limnigraphiques moyennées sur la journée pour les stations considérées.

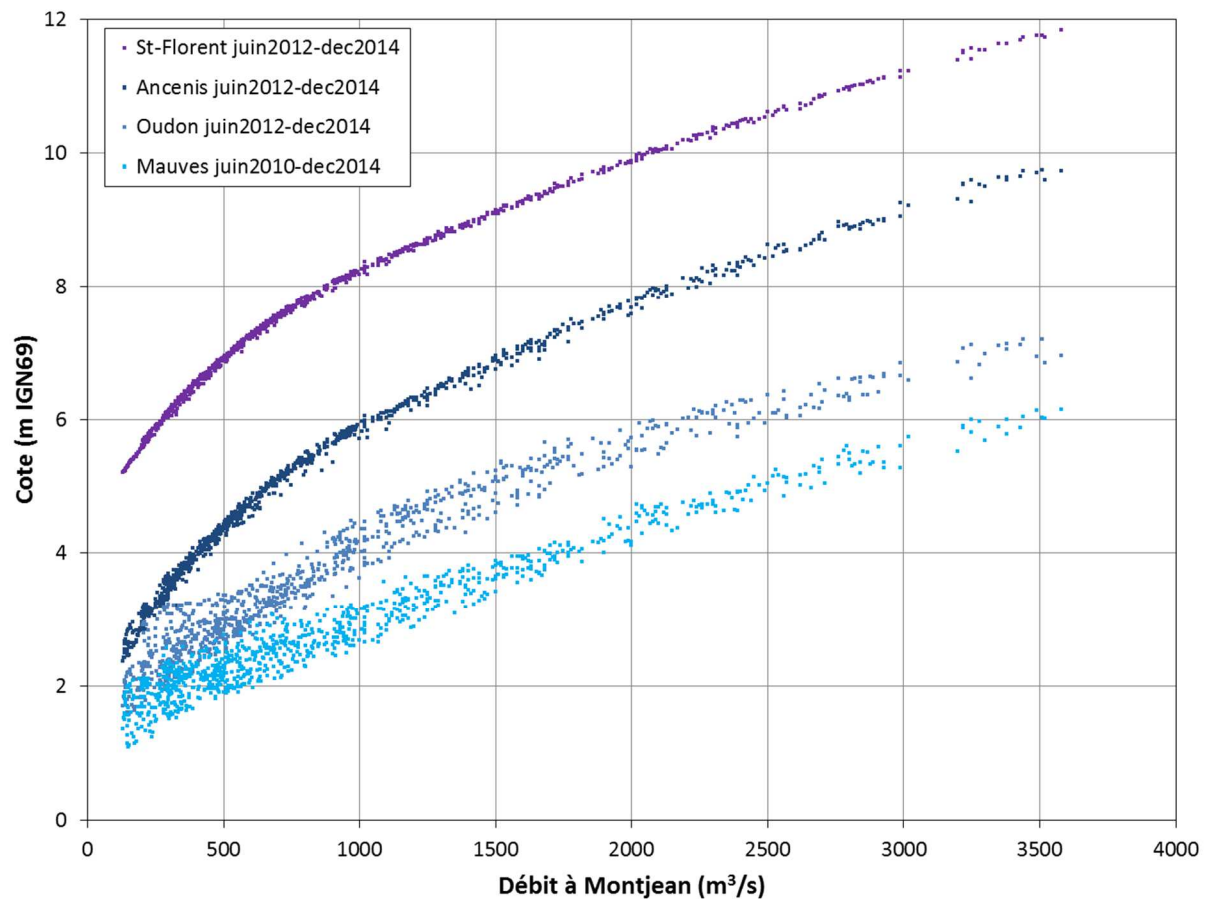


Figure 7 : Données limnigraphiques moyennées sur la journée de la période juin 2012 – décembre 2014

La variabilité résiduelle, qui est croissante vers l'aval, n'est ainsi plus liée au marnage et s'explique par les raisons présentées plus haut.

Des courbes de régressions sont ensuite calculées pour chaque station afin de définir des relations niveau-débits moyennes représentatives (cf. figure ci-dessous).

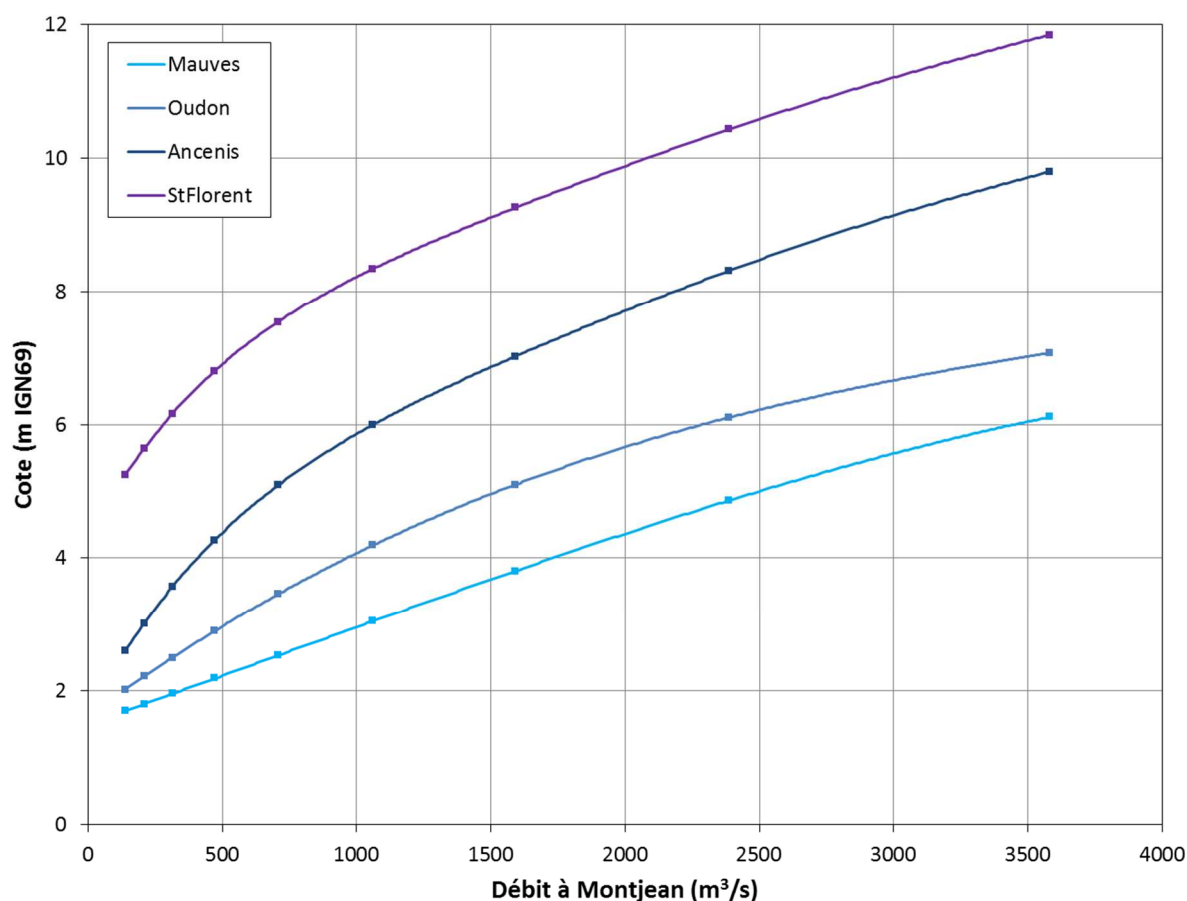


Figure 8 : Courbes de régressions des données limnigraphiques moyennées sur la journée de la période juin 2012 – décembre 2014

La loi de tarage moyenne ainsi calculée pour Mauves sera utilisée pour la définition de la condition à la limite aval dans le cas de calculs morphologiques avec utilisation d'un scénario hydrologique avec simplification de la condition à la limite aval (cf. 4.31)

Il apparaît que la forme de la loi de tarage à Oudon est assez différente de celle obtenue pour les autres limnigraphes. Une vérification des valeurs de ce limnigraphe a été effectuée par rapport aux données de lignes d'eau du GIP LE à Oudon. Il est apparu qu'il existait des forts écarts entre les valeurs mesurées à Oudon par le limnigraphe et celles relevées par la ligne d'eau GIPLE. La DREAL a investigué ce point et a confirmé que les valeurs enregistrées au marégraphe d'Oudon avant le 15 avril 2014 ne sont pas valides.

3.3 Paramétrage du frottement

Le calage du modèle consiste à régler le coefficient de frottement (une loi de Strickler est utilisée) de manière à reproduire les lignes d'eau mesurées.

Il a été mis en évidence au cours de la démarche de calage que pour les débits faibles les résultats en terme de lignes d'eau sont très sensibles à la bathymétrie considérée. Des résultats très différents pour les calculs de lignes d'eau d'étiage sont obtenus selon que l'on utilise le modèle construit avec la bathymétrie 2010 ou bien le modèle construit avec la bathymétrie 2013. La bathymétrie 2010 a été levée à l'étiage tandis que la bathymétrie 2013 a été levée pour un débit moyen (cf. Figure 9).

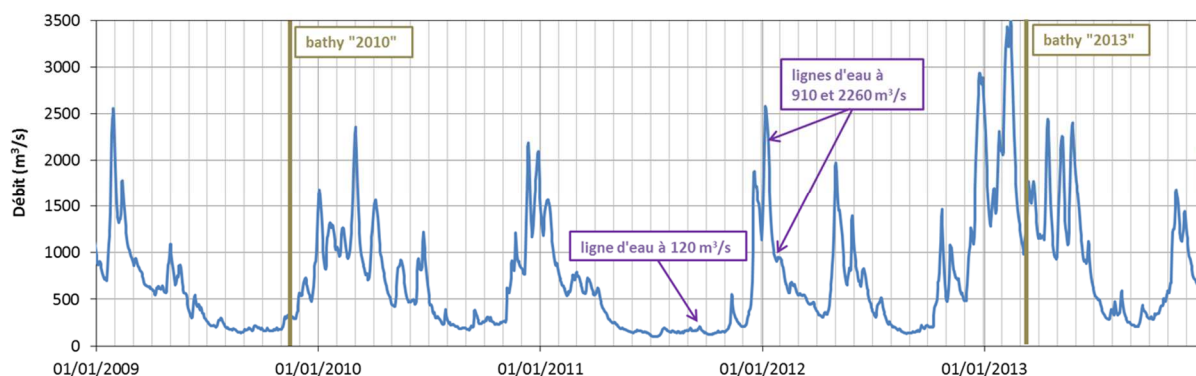


Figure 9 : Localisation temporelle des levés bathymétriques et des levés de lignes d'eau

Cette caractéristique du processus de calage des lignes d'eau en Loire associe deux phénomènes :

- évolution morphologique du lit à long terme
- respiration du lit au cours de l'année avec l'hydrologie.

Pour tenir compte de cette évolution du lit dans le calage hydraulique, une démarche itérative a été mise en place consistant à calculer les lignes d'eau aux débits faibles sur la base d'une bathymétrie calculée par le modèle morphosédimentaire pour la date. Il s'agit donc d'un calage couplé entre hydraulique et sédimentaire, qui nécessite plusieurs itérations. Par souci de simplicité, les itérations finales des calages hydrauliques et sédimentaires sont présentées séparément dans ce rapport.

Le zonage du coefficient de Strickler qui est utilisé dans le modèle consiste en l'imposition d'un coefficient de Strickler particulièrement faible sur les épis (fort frottement). En parallèle, le coefficient de Strickler sur les zones sableuses est augmenté, ce qui permet de retrouver des valeurs conformes à la littérature pour ce type de surface.

Le paramétrage final que nous proposons pour le coefficient de Strickler consiste en un zonage selon quatre zones (pour rappel une valeur de Strickler élevée correspond à une rugosité plus lisse) :

- Lit mineur et bras secondaires sans végétation (lit sableux) : Coefficient de frottement entre 28 et 35 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ selon le débit (cette variation est détaillée plus loin)
- Bras secondaires : $K_s = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Lit majeur : $K_s = 18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Epis : $K_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Zones végétalisées des bras secondaires : $K_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Ces zones ont été construites sur la base des photos aériennes.

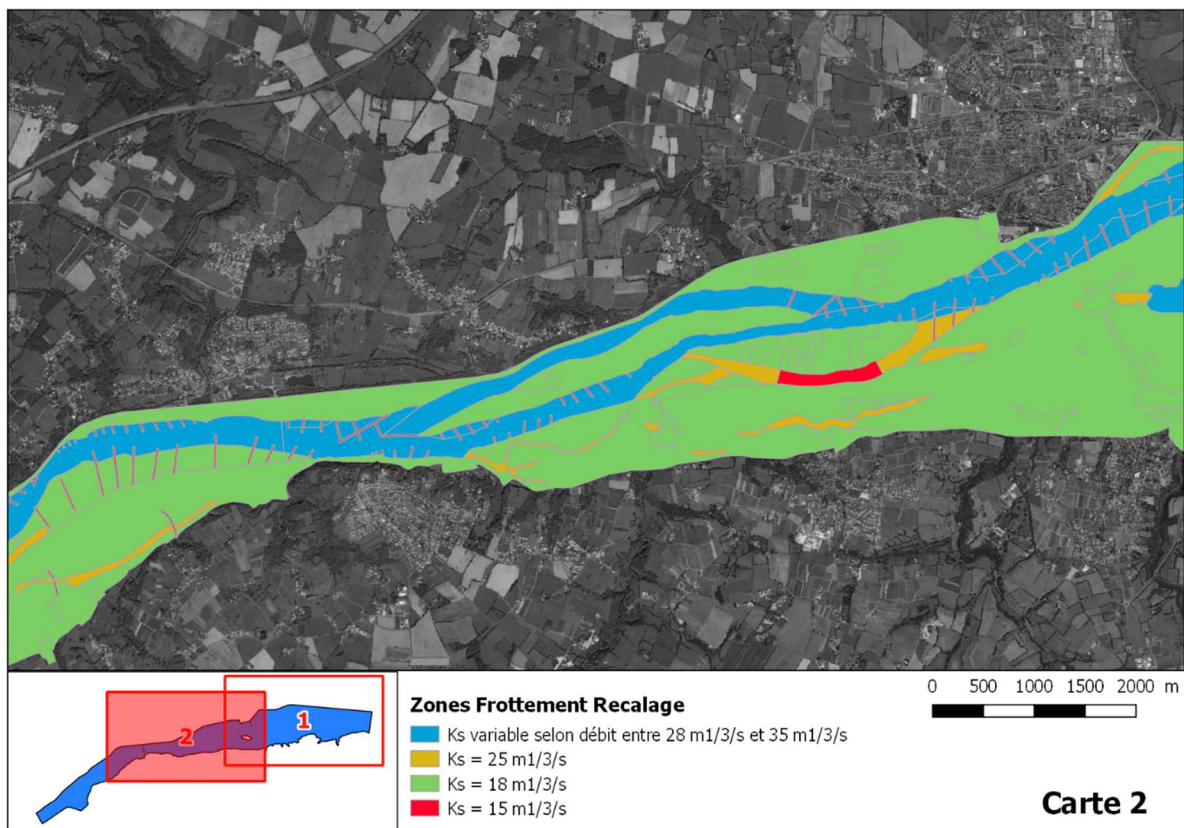
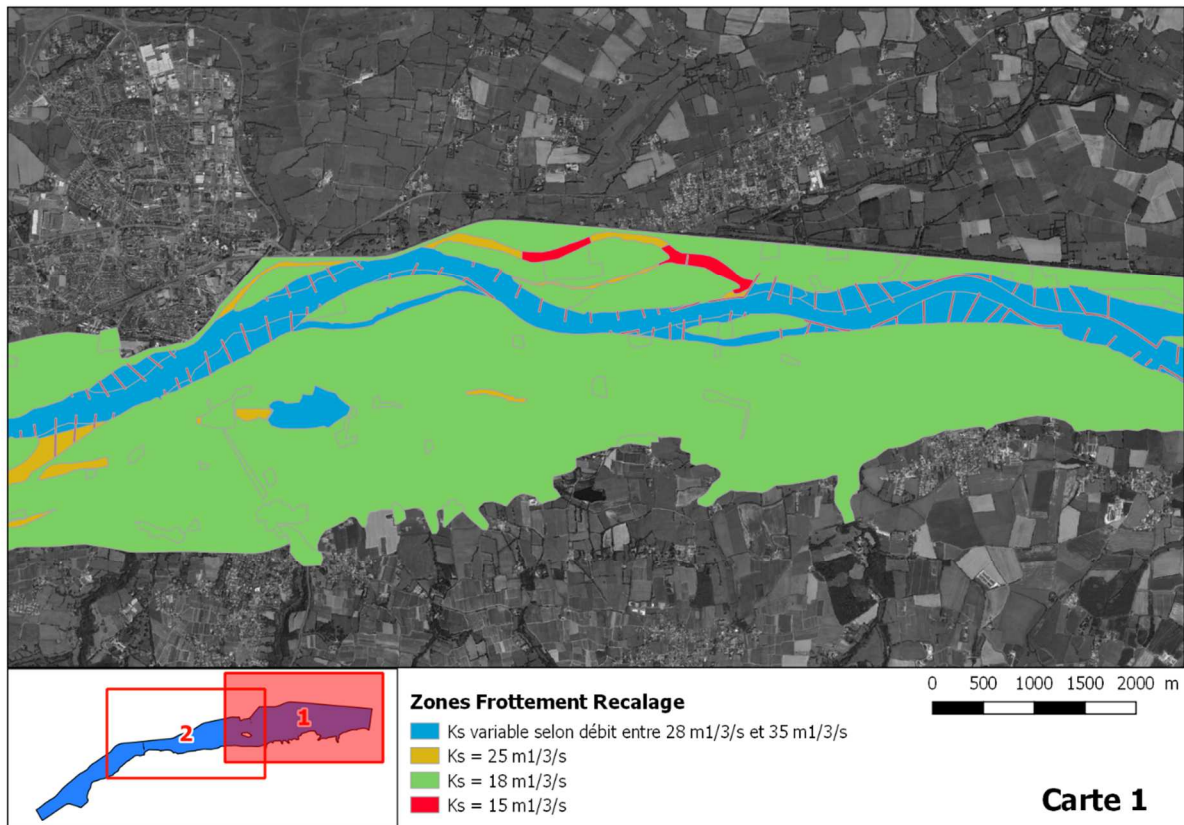


Figure 10 : Cartographie du coefficient de frottement dans le modèle

Signalons ici que nous ne disposons pas de lignes d'eau pour des débits de crue avec

débordement. En conséquence, la valeur du coefficient de frottement dans le lit majeur ne peut pas être calée. Elle est spécifiée à partir de l'expérience d'ARTELIA sur des modélisations similaires.

Afin d'obtenir un calage satisfaisant du modèle, il est nécessaire d'intégrer au modèle un coefficient de Strickler du lit mineur variable en fonction du débit.

Le fait que le coefficient de Strickler soit plus faible (ce qui correspond à une rugosité élevée) pour les débits forts peut provenir du développement de dunes, ou bien de la remontée de sédiments fins en provenance de l'aval.

La relation utilisée par la suite entre le coefficient de rugosité et le débit est présentée Figure 11.

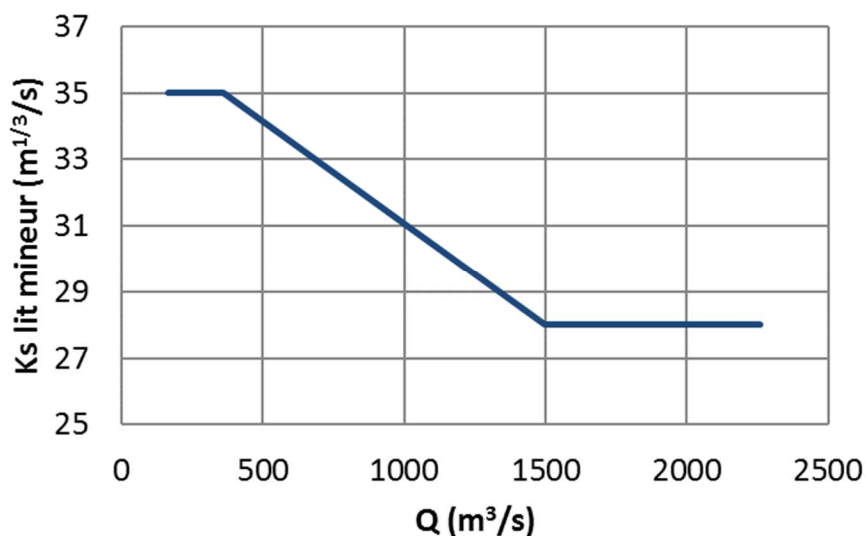


Figure 11 : Relation entre le coefficient de Strickler du lit mineur et le débit

3.4 Calage sur les lignes d'eau GIPLE

Le résultat en terme de calage sur les lignes d'eau GIPLE pour les débits de 910 et 2260 m³/s sont présentés sur la figure ci-dessous.

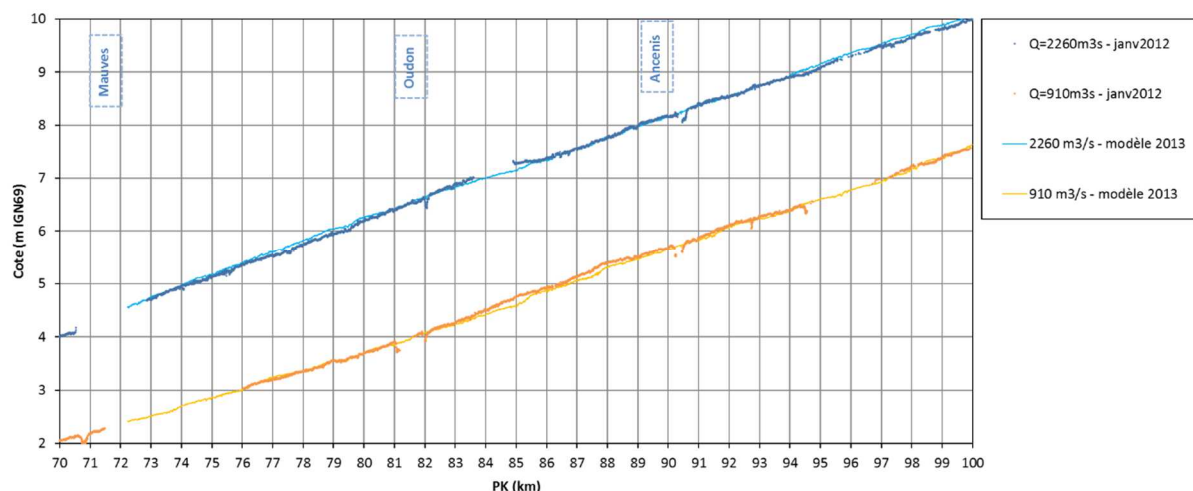


Figure 12 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – Strickler défini par zones

Ce paramétrage permet d'obtenir d'excellents résultats puisque les différences entre mesures et simulation sont dans l'ensemble inférieures à 10 centimètres pour les débits de 910 et 2260 m³/s.

La ligne d'eau de 120 m³/s n'est pas utilisée car elle n'est pas horodatée (l'heure exacte de chaque point de mesure n'est pas connue), ce qui fait que les variations de niveau liées à la marée ne peuvent être simulées. Le calage sur les débits faibles est effectué sur la base de lignes d'eau horodatées (cf. paragraphe suivant).

3.5 Calage sur les lignes d'eau VNF 2016

VNF a fait lever 8 lignes d'eau sur la période mars 2016 – novembre 2016.

Ces lignes d'eau sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Date	Débit (m ³ /s)	Coefficient de marée	Horodatage
03/03/2016	1380	33	Non
07/04/2016	1150	108	Non
03/05/2016	882	62	Non
05/07/2016	640	94	Non
12/08/2016	173	33	Oui
01/09/2016	164	90	Oui
13/10/2016	165	72	Oui
15/11/2016	362	112	Oui

Il est à noter que ces lignes d'eau n'étaient pas en cohérence avec les niveaux indiqués par les limnimètres à Mauves, Oudon et Ancenis. Elles ont donc été recalées sur la valeur fournie par le limnimètre à Mauves pour les lignes horodatées. Les décalages appliqués aux lignes d'eau VNF sont les suivants :

Date	Décalage (m)
12/08/2016	+0.29
01/09/2016	+0.31
13/10/2016	+0.49
15/11/2016	+0.35

Ces décalages permettent de rapprocher les valeurs des lignes d'eau avec les valeurs mesurées aux limnimètres d'Oudon et Ancenis (erreur de moins de 10 cm).

Ces lignes d'eau vont permettre d'affiner la définition de la rugosité du lit mineur, on dispose notamment de plus de mesures à faible débit. Le calage effectué sur le lit majeur et les épis dans le paragraphe précédent est vérifié pour les forts débits.

Parmi ces lignes d'eau, nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur celles qui sont horodatées, c'est-à-dire celles pour lesquelles une date précise est associée à chaque point-sonde de la ligne d'eau. Ces lignes d'eau correspondent à des débits faibles. Les résultats des simulations sont aussi analysés de manière « horodatée », c'est-à-dire que les calculs sont lancés sur toute la période de mesure pour chaque ligne d'eau en considérant comme condition à la limite aval les valeurs mesurées du marégraphe de Mauves. Les lignes d'eau simulées présentées sont produites en extrayant du résultat de calcul chaque valeur de niveau d'eau à l'heure correspondant à la mesure.

1. Faibles débits

Dans un premier temps, les simulations pour les trois débits les plus faibles sont présentées. Les simulations s'appuient sur la bathymétrie calculée par le modèle morphologique à cette période, et utilisent un coefficient de frottement de $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

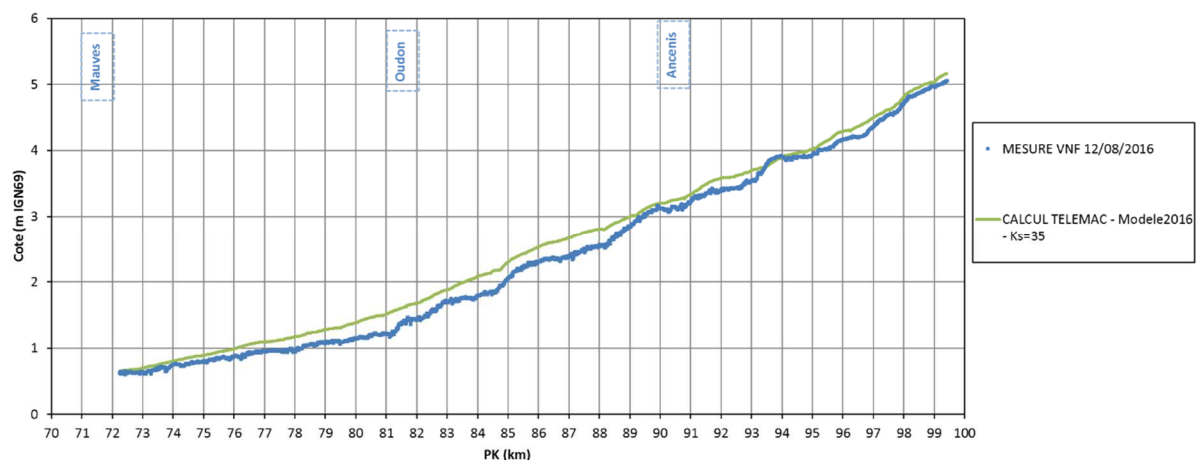


Figure 13 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 12/08/2016 – $Q=173 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=33

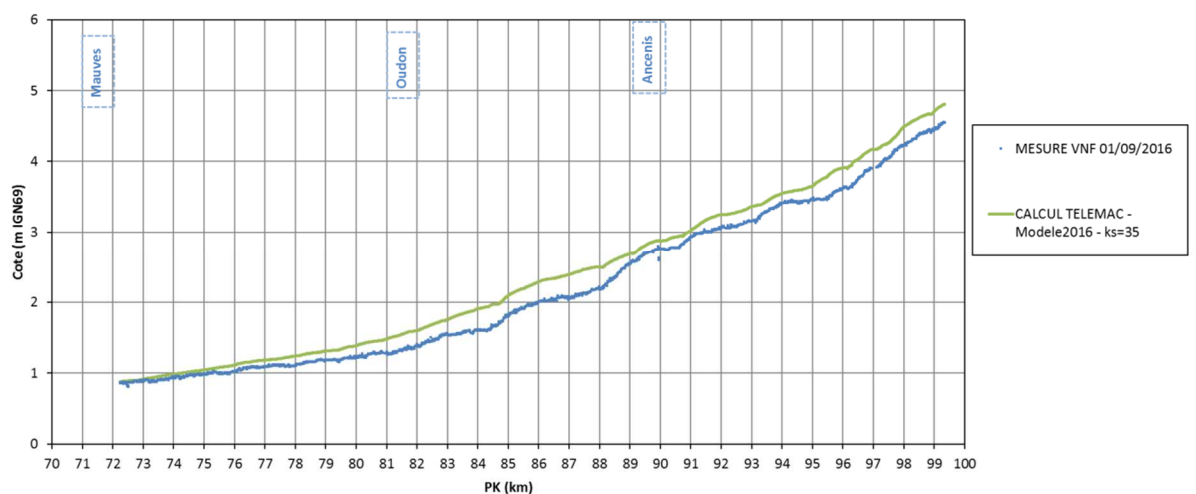


Figure 14 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 01/09/2016 – $Q=164 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=90

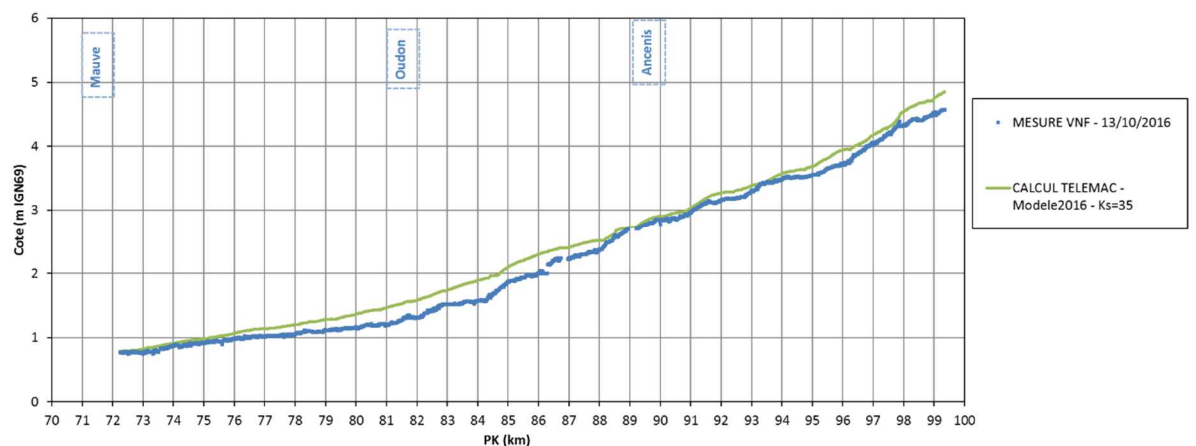


Figure 15 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 13/10/2016 – $Q=165 \text{ m}^3/\text{s}$ – Coef=72

2. Débits intermédiaires

Pour les débits de 362 m³/s et 640 m³/s, le modèle utilisé est celui avec la bathymétrie 2013.

Pour le débit de 640 m³/s, la ligne d'eau n'est pas horodatée, aussi nous avons représenté les niveaux min et max calculés par TELEMAC sur la journée. La ligne d'eau ayant été levée en suivant la basse mer, nous nous sommes appuyés sur les niveaux minimums calculés par TELEMAC pour se recalcr sur la ligne d'eau VNF.

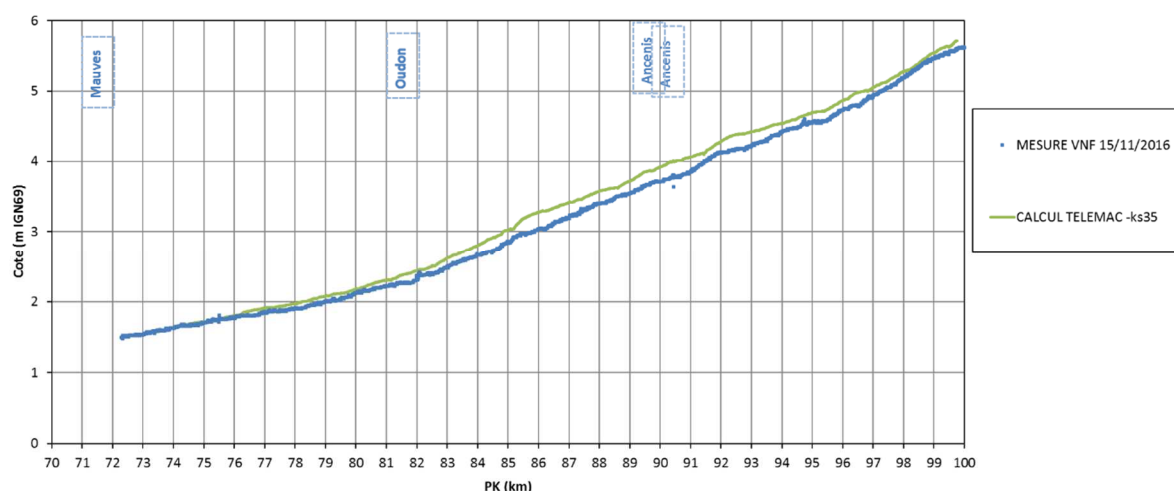


Figure 16 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 15/11/2016 – Q=362 m³/s – Coef=112

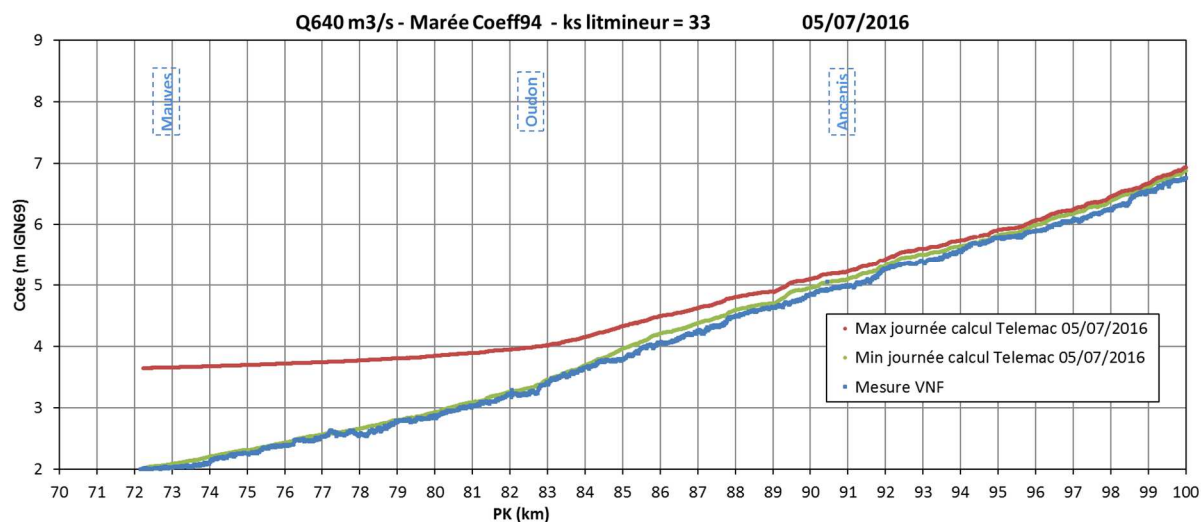


Figure 17 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 05/07/2016 – Q=640 m³/s – Coef=94

3. Débits forts

Pour les débits forts, nous avons réalisé les simulations avec le modèle bathymétrie 2013. Les lignes d'eau n'étant pas horodatées, nous avons représenté les enveloppes du minimum et maximum calculées par TELEMAC sur la journée, comme pour le débit de 640 m³/s. La ligne d'eau VNF ayant été levée à marée basse, elle a été recalée sur les niveaux minimum de TELEMAC. Nous avons vérifié que ce décalage de la ligne d'eau fournit également un résultat en cohérence avec le limnimètre d'Ancenis (donnée non disponible pour 640 m³/s).

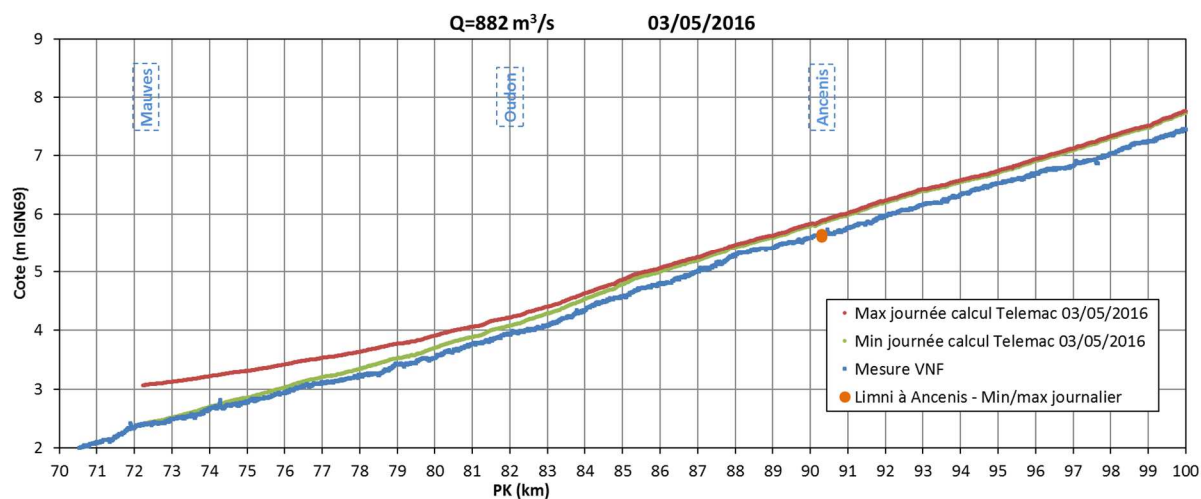


Figure 18 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 03/05/2016 – $Q=882 \text{ m}^3/\text{s}$

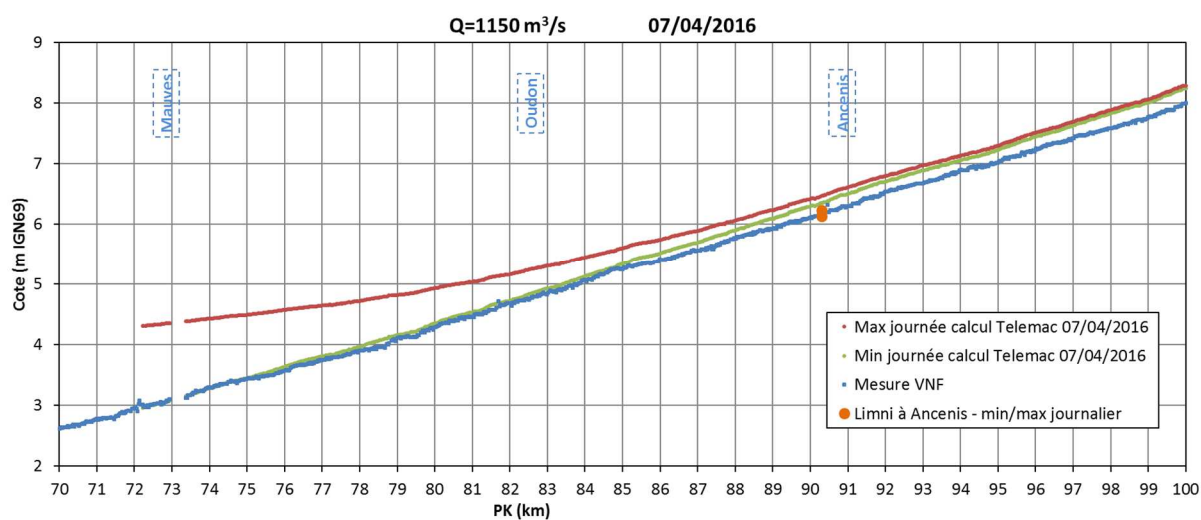


Figure 19 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 07/04/2016 – $Q=1150 \text{ m}^3/\text{s}$

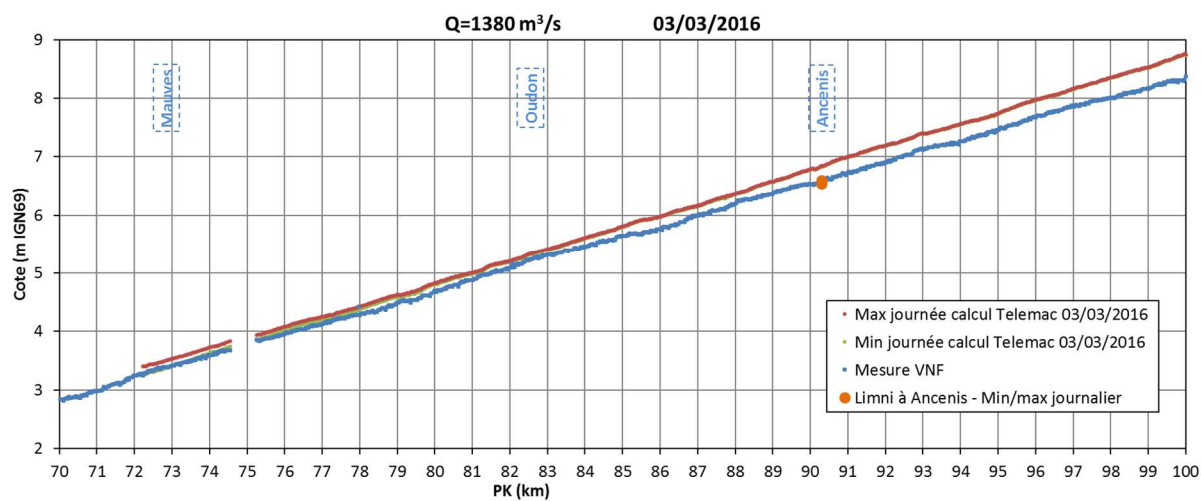


Figure 20 : Comparaison entre lignes d'eau mesurées et simulées – 03/03/2016 – $Q=1380 \text{ m}^3/\text{s}$

3.6 Vérification de la propagation de la marée

Afin de vérifier la propagation de la marée dans le modèle, des calculs ont été faits remplissant les conditions suivantes :

- Débit moyen ou faible à Montjean,
- Coefficients de marée élevés,
- Validité du limnigraphe d'Oudon (après avril 2014).

Les périodes retenues sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Date	Débit (m³/s)	Coef. Marée
7/05/2016	790	110
17/09/2016	215	105

Le paramétrage du coefficient de Strickler présenté précédemment est utilisé.

Les comparaisons entre mesures et simulations sont présentées sur les figures ci-dessous.

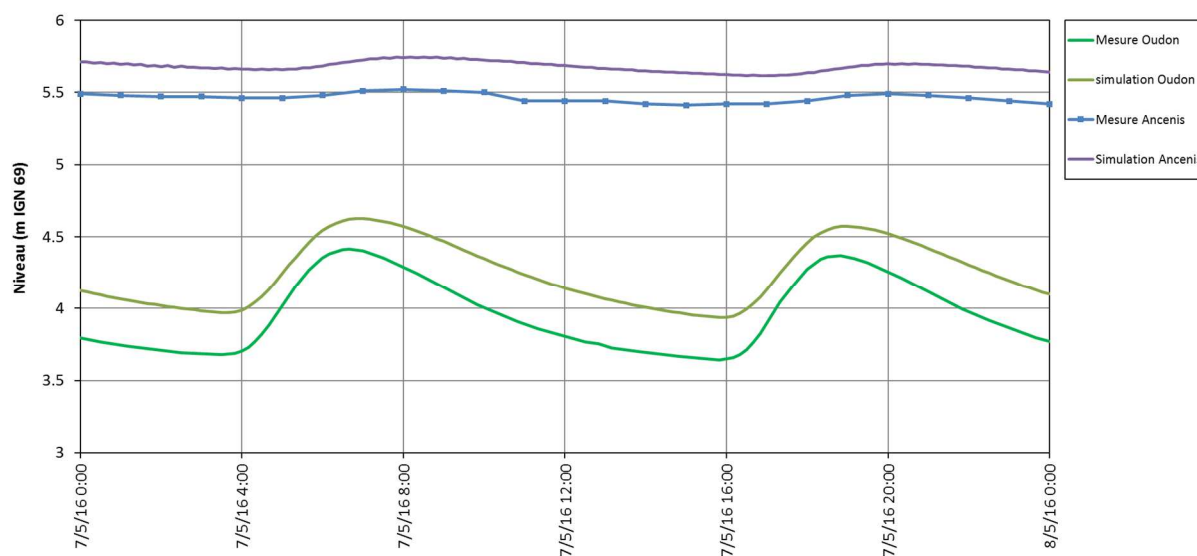


Figure 21 : Comparaison entre niveaux mesurés et simulés aux limnigraphes – 07/05/2016

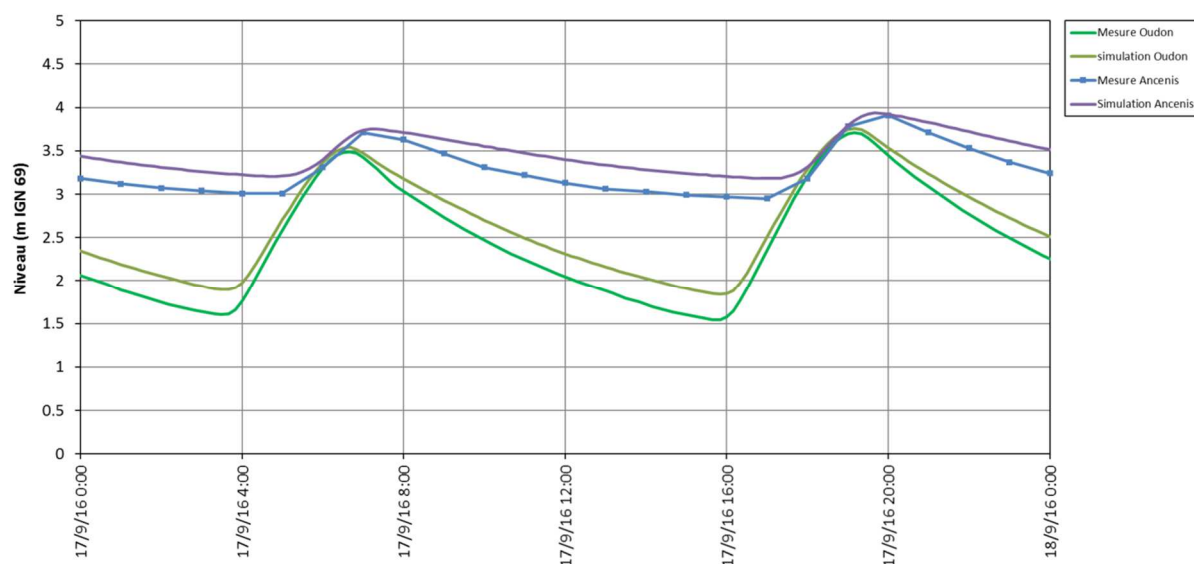


Figure 22 : Comparaison entre niveaux mesurées et simulées aux limnigraphes – 17/09/2016

Les niveaux simulés à Ancenis sont très proches de ceux mesurés par le limnigraphe. Les différences entre mesure et simulation sont plus importantes au niveau du limnigraphe d'Oudon, avec une erreur maximale de 30cm. La forme générale de l'onde de marée reste néanmoins correctement représentée.

3.7 Vérification sur les jaugeages

Les jaugeages effectués le 24 et le 25 janvier 2018 (« Oudon Amont » et « Oudon Aval ») ont été effectués pour des débits (autour de 2800 m³/s) supérieurs au débit de mise en eau dans le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière. Ils permettent donc de déterminer la répartition de débit entre les deux bras de l'île Neuve-Macrière pour ce débit. Le tableau ci-dessous présente les débits mesurés et simulés pour les deux dates. Il apparaît que le modèle permet de reproduire correctement la répartition de débit entre les deux bras de l'île Neuve-Macrière.

	Date	Débit (m ³ /s)	
		Total	Neuve-Macrière
Mesure	25/01/2018	2820	980
	24/01/2018	2660	870
Simulation	25/01/2018	2832	939
	24/01/2018	2659	874

4. CALAGE MORPHOSEDIMENTAIRE

4.1 Méthodologie de calcul

Le calage morphosédimentaire consiste à mettre au point le modèle numérique sous TELEMAC 3D – SISYPHE de manière à reproduire de manière réaliste les évolutions bathymétriques observées entre décembre 2009 et mars 2013, ainsi qu'entre décembre 2009 et novembre 2017. La période 2010-2017 est considérée au lieu de la période 2013-2017 car les données bathymétriques 2013 ne permettent pas l'établissement d'un MNT complet.

Les calculs consistent donc en un couplage entre TELEMAC 3D, le module hydrodynamique, et SISYPHE, le module de transport sédimentaire avec évolution des fonds, en s'appuyant sur la chronique hydrologique réelle de la période (cf. figure ci-dessous).

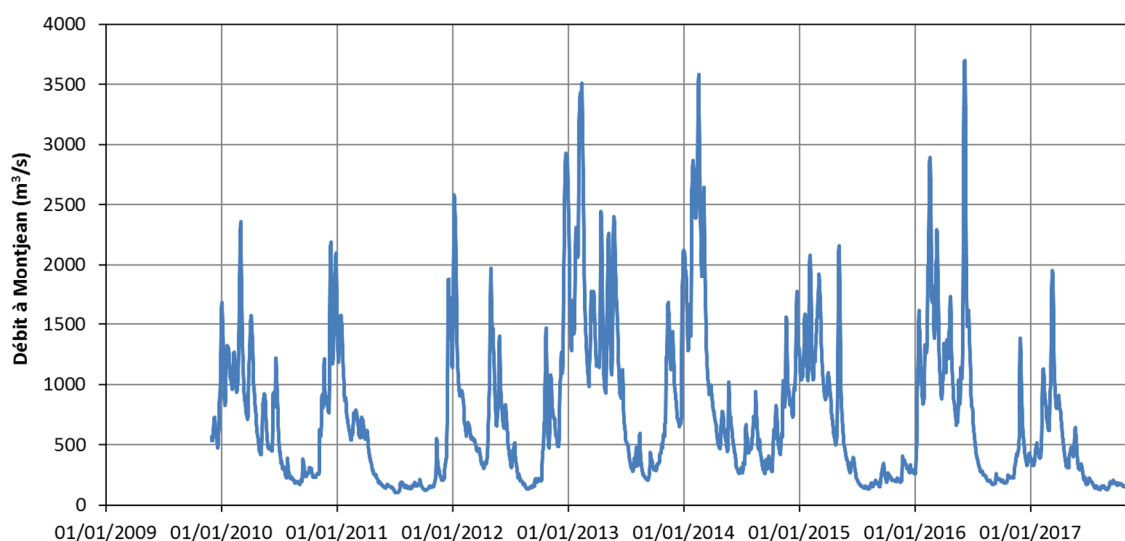


Figure 23 : Chronique hydrologique de la période de calage

Les calculs hydrauliques sont effectués de la même manière que ceux mis au point au cours de l'étape de calage.

Pour les calculs sédimentaires, SISYPHE applique à chaque pas de temps de calcul une loi de transport solide en chaque point du maillage en utilisant les variables hydrauliques calculées par TELEMAC 3D. L'évolution des fonds est ensuite calculée à chaque pas de temps à partir du champ de débit solide calculé. Pour ce calcul, il convient de choisir une loi de transport solide ainsi que des paramètres sédimentaires : diamètre de grain, épaisseur de sédiment érodable en chaque point du maillage, flux d'entrée sédimentaire à l'amont.

Le processus de calage consistera à optimiser si nécessaire la formule de transport, ou bien d'affiner les paramètres d'entrée du modèle. Il est nécessaire pour cela de mettre au point une méthode d'accélération permettant de réduire les temps de calcul. En effet, avec le maillage utilisé (cf. 2.2), le calcul en temps réel sur la période de calage de plus de trois ans (novembre 2009 à mars 2013) nécessite une dizaine de jours en utilisant 48 cœurs de calculs du calculateur parallèle disponible à ARTELIA.

La méthode simple qui a été retenue pour réduire les temps de calcul permet de conserver tous les détails de l'hydrogramme d'entrée. Il s'agit simplement d'une « accélération de l'hydrogramme ». La méthode consiste en effet à réduire la durée réelle T_r de l'hydrogramme simulé en la divisant par un « facteur d'accélération » K , tout en conservant tous les détails de l'hydrogramme (cf. figure ci-dessous). Afin que les évolutions simulées ne soient pas diminuées du même facteur, le débit solide est lui multiplié par K .

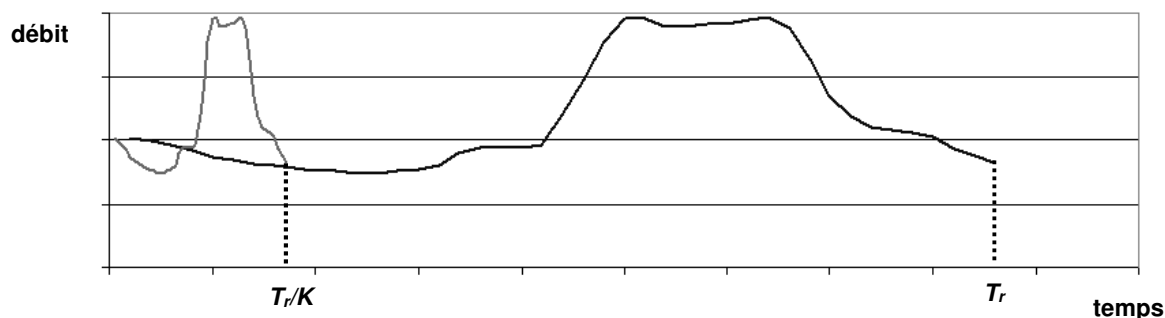


Figure 24 : Schéma de la méthode d'accélération de l'hydrogramme

Cette méthode va amplifier les effets hydrodynamiques instationnaires. Ceux-ci sont généralement négligeables en rivière de plaine (hors crues-éclair), et la méthode sera valable tant que l'accélération de l'hydrogramme est suffisamment faible pour qu'ils le restent.

Cette méthode d'accélération de l'hydrogramme doit être validée au cas par cas pour déterminer quel facteur d'accélération est acceptable en fonction des caractéristiques du site d'étude. La validation de cette méthode est effectuée dans la suite du document au paragraphe 4.32.

L'accélération s'applique à la condition à la limite amont, qui consiste en un débit imposé. Une telle méthode d'accélération ne peut pas s'appliquer à la condition à la limite aval (niveau imposé) car le marnage lié à la marée est trop rapide pour pouvoir être accéléré. Afin de pouvoir appliquer la méthode d'accélération de l'hydrogramme, il est donc nécessaire de simplifier la condition à la limite aval, en négligeant le marnage. Nous vérifions dans le paragraphe 4.31 que cette simplification ne génère pas des erreurs significatives pour ce qui concerne les résultats des calculs morphosédimentaires.

Ces vérifications ont été effectuées pour l'ancien paramétrage des coefficients de frottement.

4.2 Premier jeu de paramètre pour la modélisation sédimentaire

Conformément à l'analyse présentée dans l'étude préliminaire, nous considérons une granulométrie unique avec un diamètre de 1 mm.

Les épaisseurs sédimentaires initiales sont fixées à trois mètres, ce qui correspond au maximum des érosions mesurées sur le site lors de la période. Cette épaisseur sédimentaire est mise en place uniquement au niveau du lit sableux. Les structures en enrochement (épis...), les berges, ainsi que le lit majeur sont non-érodables (épaisseur de sédiment nulle).

Les volumes sédimentaires entrant au niveau de la frontière amont du modèle sont calculés librement par le modèle.

La formule de transport solide qui est utilisée dans un premier temps est la formulation pour le transport solide qui a été calée dans le cadre de la thèse de Matthieu de Linares (2007). Cette formule est une adaptation de la formule de Meyer-Peter Müller. Mise en place au sein de SISYPHE (couplé avec TELEMAC 2D), elle avait permis de reproduire les évolutions morphologiques de la Loire près du Fresne-sur-Loire et d'Ingrandes pendant des crues ainsi que sur la période 2001-2004 (utilisation du suivi mis en place suite à la construction des seuils à radier expérimentaux). Le processus de calage avait permis de définir une formulation pour le transport solide (basée sur la formule de Meyer-Peter Müller) optimale pour le site, grâce à une optimisation systématique des paramètres de manière à minimiser l'écart entre mesures et simulation. Cette formule avait été appliquée pour une granulométrie unique de 1 mm.

La formule de Meyer-Peter Müller s'écrit :

$$Q_s^* = 8(\tau_p^* - \tau_c^*)^{3/2}$$

avec τ_c^* : contrainte adimensionnelle critique (0.047 d'après les auteurs) ;

τ_p^* : contrainte de peau adimensionnelle ;

$$Q_s^* = \frac{Q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}}, \text{ avec } Q_s \text{ débit solide volumique.}$$

Les paramètres de la variante de cette formule recalée par de Linares (2007) sont présentés ci-dessous :

Description	Valeur déterminée par calage	Commentaire
coefficient multiplicateur du diamètre de grain	3	Utilisé pour le calcul de la contrainte de peau. Le calcul de cette contrainte est différent de celui de la formule originale de Meyer-Peter Müller
coefficient multiplicateur du transport solide	8	Identique à celui de la formule originale de Meyer-Peter Müller
paramètre de Shields critique	0.035	Différent de celui de la formule originale de Meyer-Peter Müller
exposant de la formule de transport	3/2	Identique à celui de la formule originale de Meyer-Peter Müller
angle de frottement du sédiment	2°	effet de pente
coefficient caractérisant l'influence de la pente sur la déviation du transport solide	3.5	effet de pente

Les calculs présentés par la suite utilisent cette formulation.

4.3 Validation de la méthodologie d'accélération

1. Validation de la simplification de la condition à la limite aval

Nous cherchons ici à estimer quelle est la dégradation des résultats liée à la non-prise en compte du marnage pour la condition à la limite aval au niveau de Mauves.

Nous comparons ici les résultats de calculs morpho-sédimentaires effectués en considérant une condition à Mauves basée sur les données limnigraphiques (et donc intégrant le marnage) à des résultats de calcul pour lequel le niveau à Mauves ne dépend que du débit transitant dans le modèle (selon la loi de tarage moyenne présentée en Figure 1).

Dans les deux cas, les calculs sont effectués en « temps réel », c'est-à-dire sans facteur d'accélération.

La figure ci-dessous présente les évolutions simulées au bout de 10 mois de calcul (de décembre 2009 à octobre 2010) pour les deux modes de calcul.

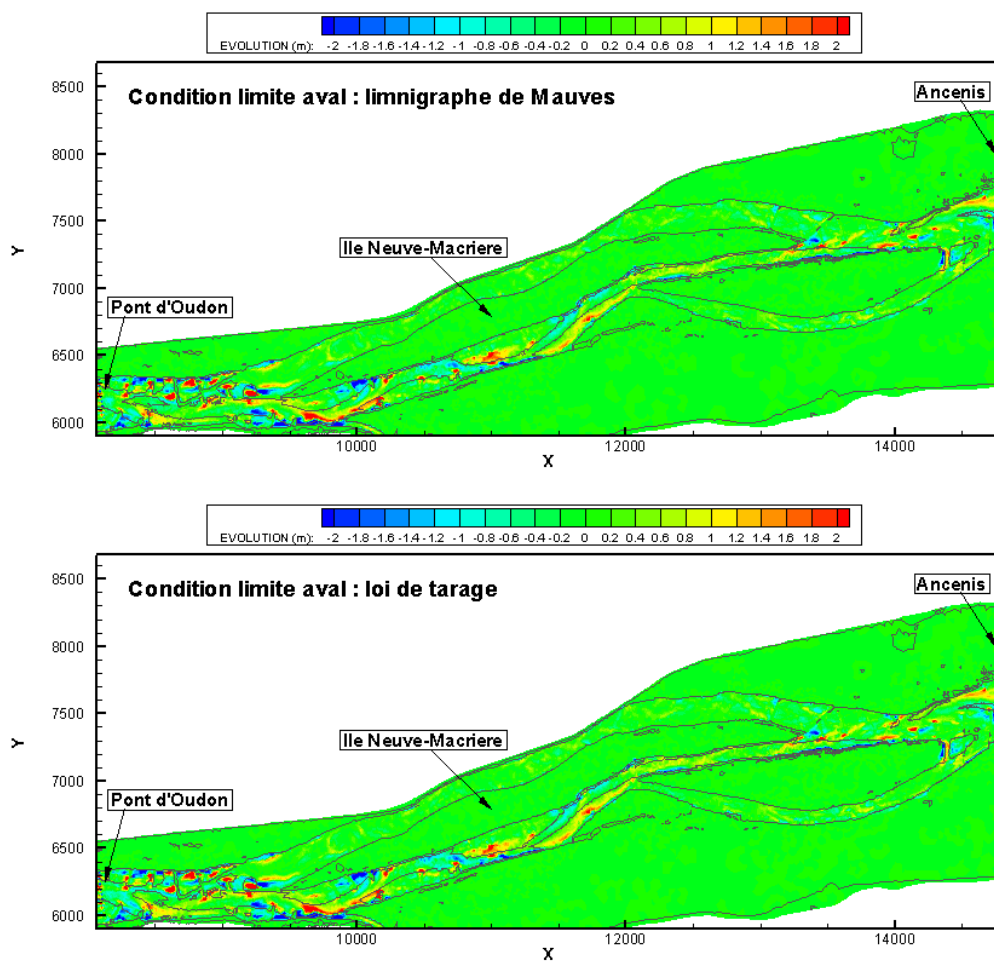


Figure 25 : Comparaison des évolutions simulées (10 mois) avec et sans prise en compte de la marée

Les deux méthodes donnent donc des résultats extrêmement proches, au moins pour ce qui concerne les environs de l'île Neuve-Macrière.

La figure ci-dessous présente la différence entre les fonds calculés par les deux calculs au bout de 10 mois pour l'ensemble du modèle. L'échelle de couleurs est différente de la figure précédente de manière à bien mettre en évidence les différences.

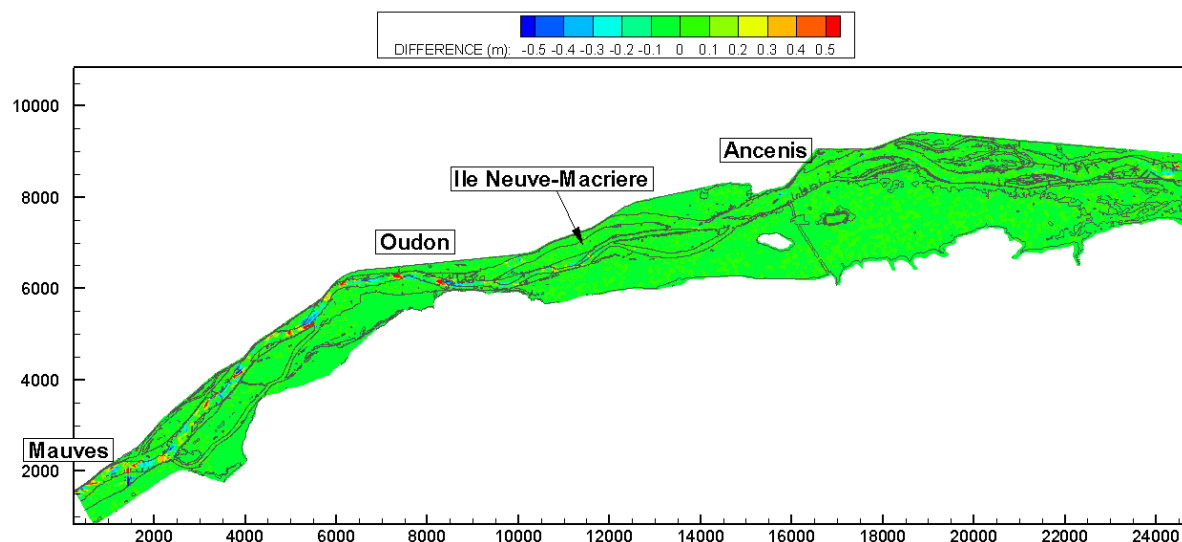


Figure 26 : Différence entre les évolutions simulées (10 mois) avec et sans prise en compte de la marée

Cette figure montre que la méthode de simplification de la condition limite aval ne génère des erreurs non négligeables que pour l'aval du modèle (entre Oudon et Mauves).

Cette méthode est donc validée, ce qui permet d'appliquer une méthode d'accélération de l'hydrogramme, qui est testée dans le paragraphe suivant.

2. *Validation de l'accélération de l'hydrogramme*

L'évolution morphologique a été calculée pour différents facteurs d'accélération de 1 (temps réel) à 200.

Les évolutions au niveau de l'île Neuve-Macrière calculées pour la période de calage entre décembre 2009 et mars 2013 (40 mois) sont présentées sur les figures ci-dessous pour les facteurs d'accélération de 10, 100 et 200. Le calcul avec un facteur d'accélération de 1 n'a pas été effectué pour des raisons de temps de calcul.

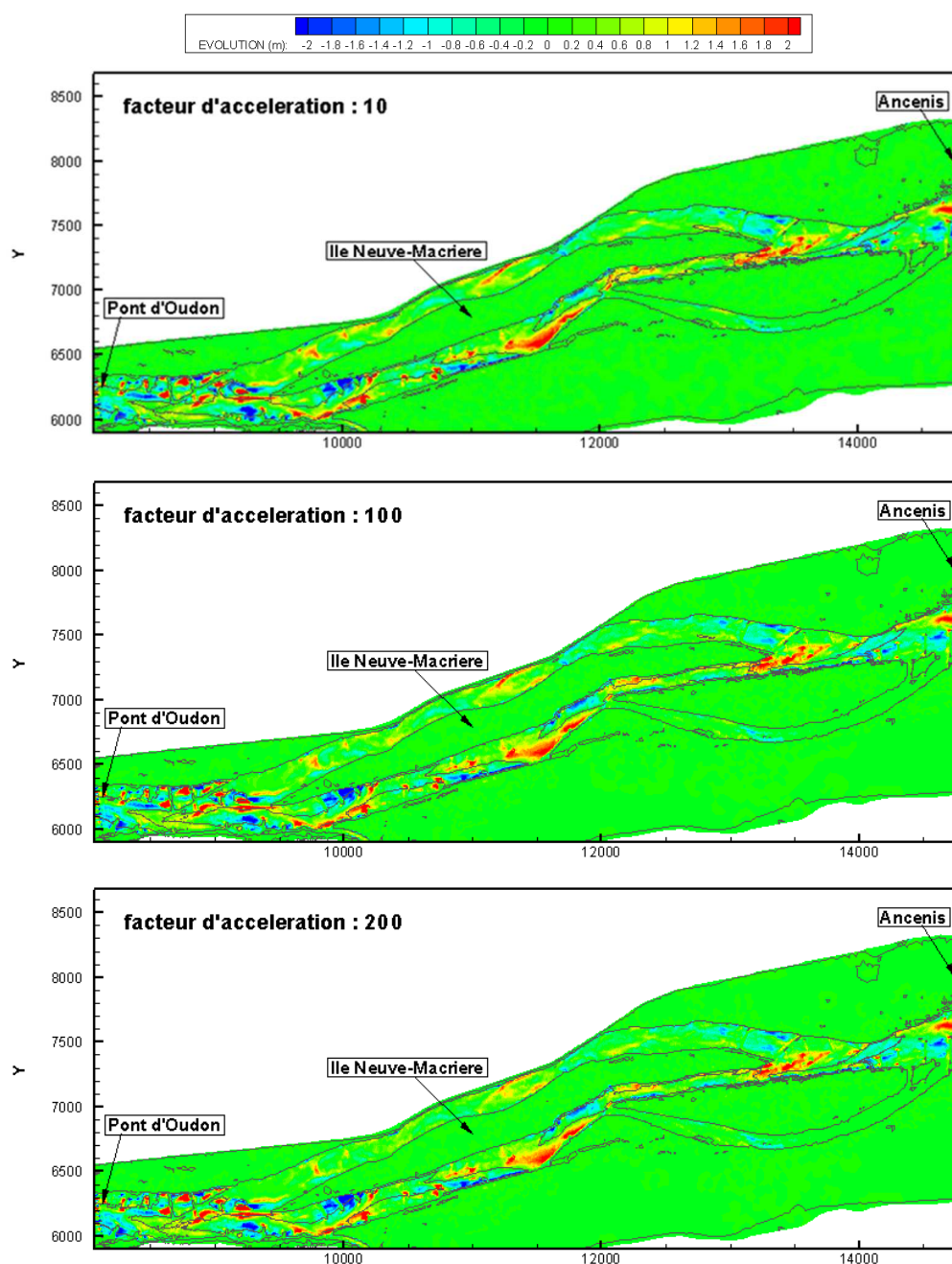


Figure 27 : Comparaison des évolutions simulées (40 mois) pour différents facteurs d'accélération

Dans le bras principal, les différences entre les résultats pour les trois facteurs d'accélération sont faibles. Les différences sont surtout apparentes dans le bras secondaire, et ces différences croissent avec le facteur d'accélération.

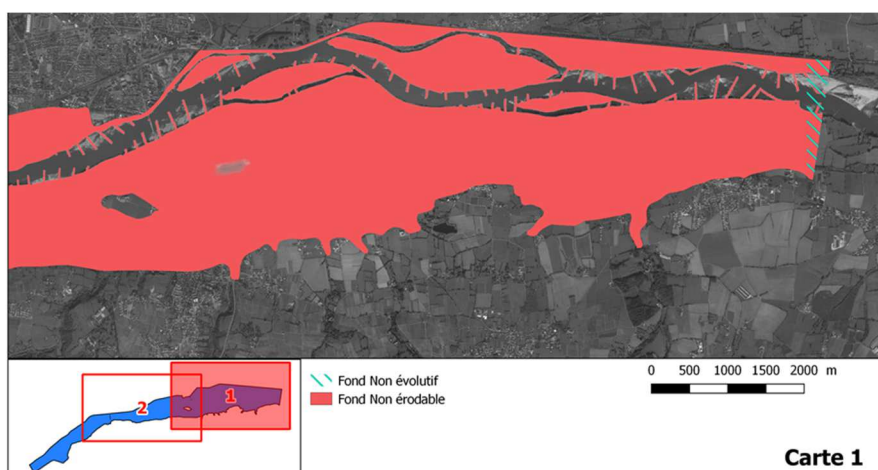
La méthodologie d'accélération de l'hydrogramme sera donc utilisée avec un facteur de 100, qui permet de travailler avec des temps de calcul opérationnels (environ 2 heures pour la période de calage).

4.4 Fonds non-érodables et fonds non-évolutifs

La définition des épaisseurs sédimentaires (et donc de la cote de fond non-érodable) a été affinée de manière à prendre en compte les affleurements rocheux (certains s'avèrent visibles sur les photos aériennes) ainsi que les bancs végétalisés.

Par ailleurs, des zones non-évolutives ont été définies. Sur ces zones, le calcul du débit solide est effectué normalement, mais l'évolution des fonds calculée n'est pas appliquée, ce qui revient à figer les fonds (à la différence de fonds non-érodables pour laquelle l'érosion est seulement limitée en dessous d'une certaine cote). Cette méthode est appliquée à l'amont du modèle (sur 200 mètres) ainsi que sur toute la partie aval du modèle, d'Oudon à Mauves.

La figure ci-dessous présente la localisation des fonds non érodables ainsi que des zones non-évolutives.



Carte 1



Carte 2

Figure 28 : Cartographie des fonds non érodables et des zones non-évolutives.

4.5 Résultats finaux

1. Période 2010-2013

Les figures présentées en annexe 1 présentent les résultats obtenus en terme d'évolution bathymétrique à la fin de cette période de calage. Les évolutions mesurées sur la période sont présentées en annexe 2.

Les évolutions simulées se rapprochent de manière très satisfaisantes des évolutions mesurées, d'autant plus si l'on tient compte du fait que ces dernières sont bruitées par le passage des formes de fond.

Afin de disposer d'éléments de comparaison plus quantitatifs, les évolutions de volume ont été calculées sur des zones de longueur 500 m et dont la largeur correspond à l'emprise des données bathymétriques de 2013. Ce travail a été fait pour les résultats de calcul ainsi que pour le différentiel entre les levés de 2013 et 2009. La comparaison des résultats par zones est présentée sur la figure ci-dessous pour le bras principal de la Loire du pk100 au pk82 :

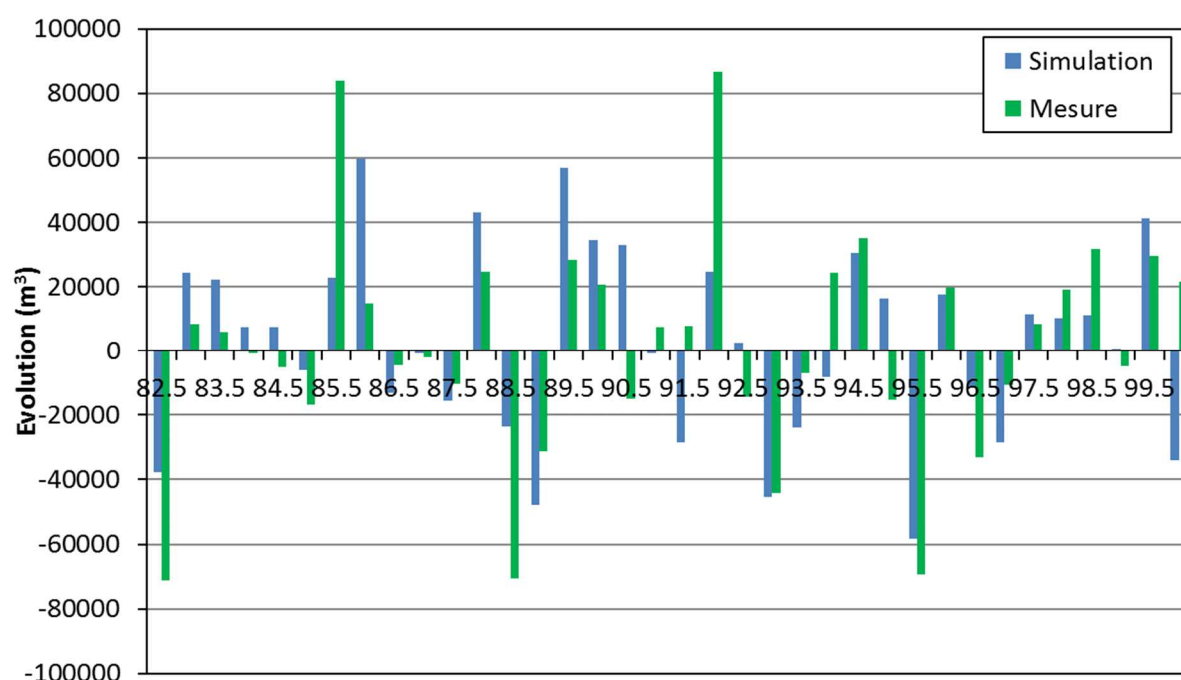


Figure 29 : Evolutions de volume mesurées et simulées par zones.

La même approche est effectuée pour le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière :

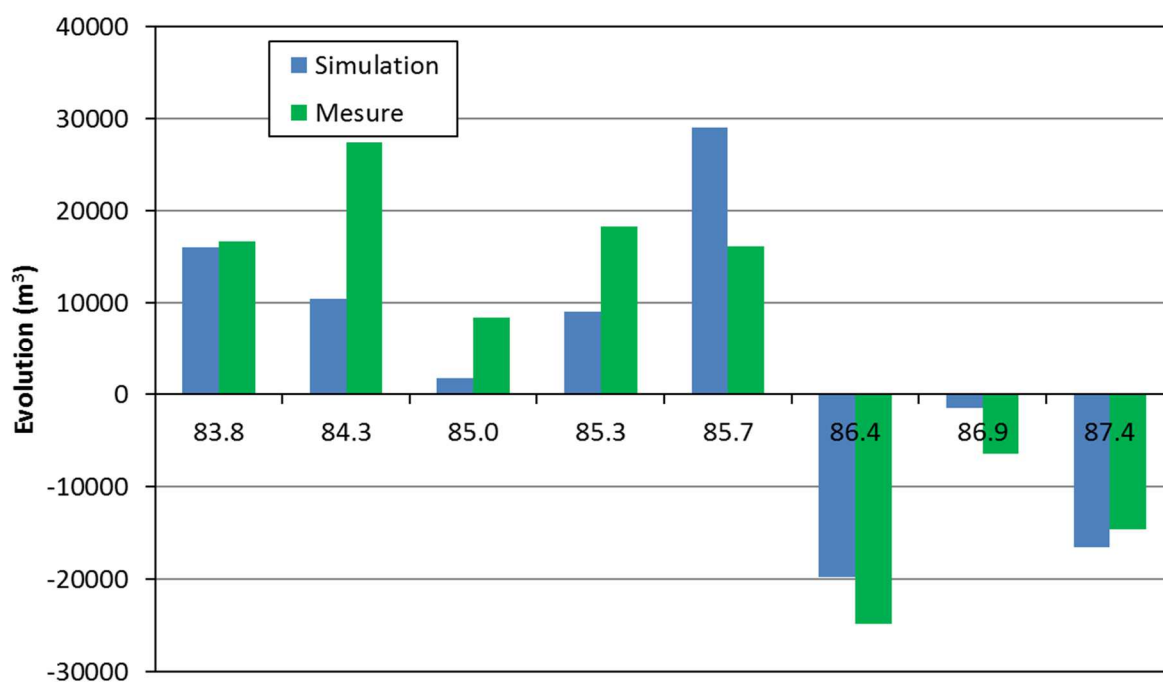


Figure 30 : Evolutions de volume mesurées et simulées par zones dans le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière.

A part quelques exceptions, on peut constater que le modèle reproduit correctement la tendance au dépôt ou à l'érosion de chaque zone.

Afin de mieux discerner les tendances globales, les résultats précédents sont intégrés en partant de l'amont, cf. figure ci-dessous.

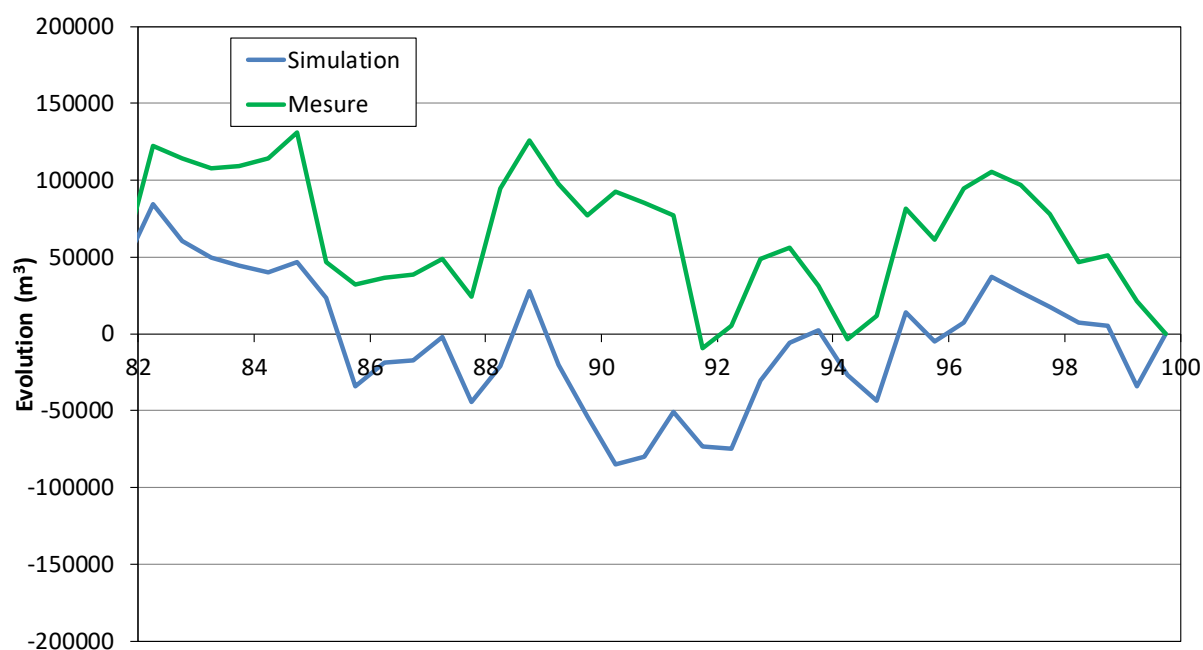


Figure 31 : Cumul depuis le pk 100 des évolutions de volume mesurées et simulées.

Cette figure indique ainsi que le cumul des évolutions simulées entre les pk 100 et 82 représente un volume positif (tendance au dépôt) de 70 000 m³, contre 90 000 m³ pour le différentiel des évolutions bathymétriques. Dans l'ensemble, la tendance simule une tendance

aux dépôts légèrement trop faible.

La même démarche d'intégration depuis l'amont des évolutions de volume est effectuée pour les deux bras de l'île Neuve-Macrière, voir les deux figures ci-dessous.

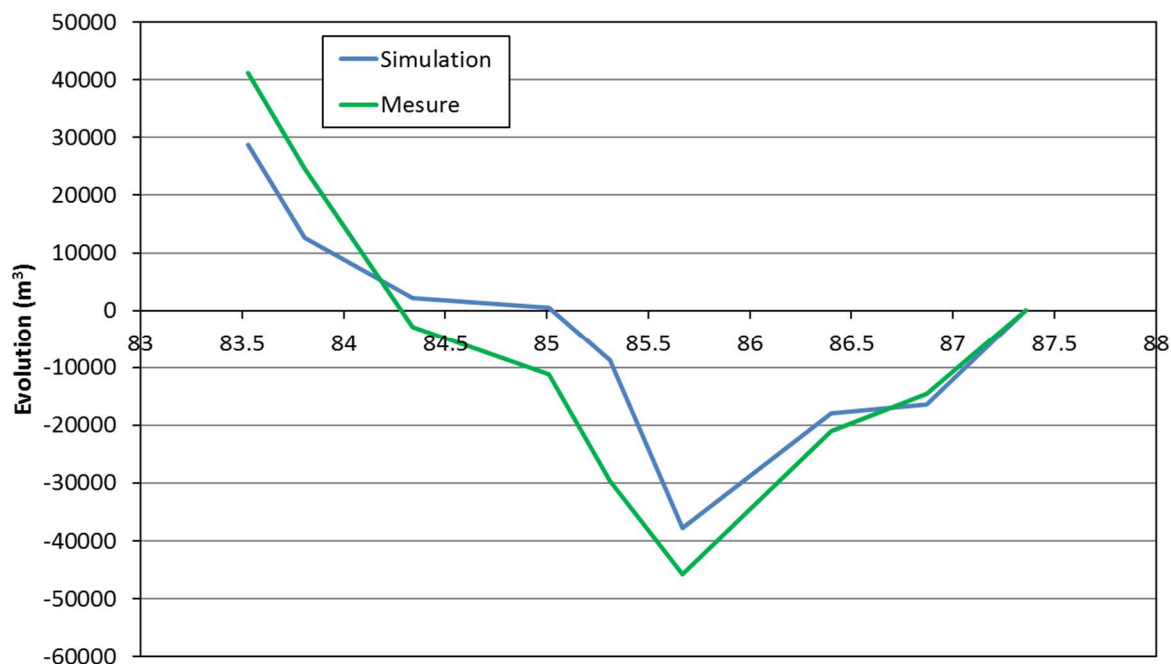


Figure 32 : Cumul depuis l'amont du bras secondaire de l'île Neuve-Macrière des évolutions de volume mesurées et simulées.

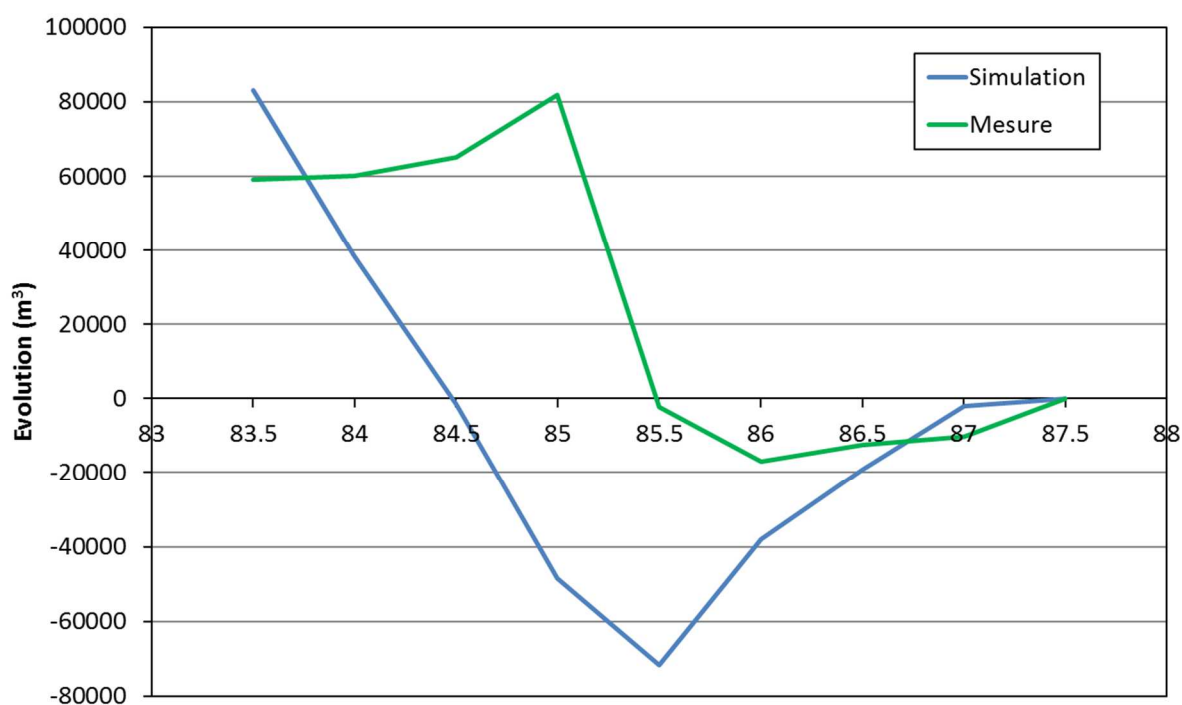


Figure 33 : Cumul depuis l'amont du bras principal de l'île Neuve-Macrière des évolutions de volume mesurées et simulées.

On peut donc constater que le modèle reproduit de manière très correcte les tendances d'évolution du bras secondaire de l'île Neuve-Macrière. La localisation des zones d'érosion et de dépôt est reproduite moins finement dans le bras principal de l'île Neuve-Macrière, mais la

tendance générale reste correcte.

2. Période 2010-2017

Le calcul de calage a été prolongé jusqu'à fin 2017 afin de pouvoir comparer les résultats du modèle aux évolutions mesurées sur la période 2010-2017, sur la base des levés LIDAR et bathymétriques de novembre et décembre 2017.

Les figures présentées en annexe 4 présentent les résultats obtenus en terme d'évolution bathymétrique à la fin de cette période de calage. Les évolutions mesurées sur cette même période sont présentées en annexe 3.

Contrairement à la période 2010-2013, les levés disponibles pour cette période permettent d'estimer les dépôts et les érosions dans les bras secondaires. La comparaison entre les volumes de dépôt et d'érosion pour les différents bras secondaires est présentée dans le tableau ci-dessous.

	Evolution 2010-2017 (m3)					
	Mesure			Simulation		
	Bilan	Dépôt	Erosion	Bilan	Dépôt	Erosion
Neuve-Macrière	174833	213363	-38530	63572	178338	-114766
Brevets	42020	82396	-40375	-14428	30496	-44924
Delage	5893	7603	-1710	-5664	4727	-10391
Vinette	<i>Non significatif (faible emprise de levé)</i>					
Bernardeau	30836	56866	-26030	-19953	25106	-45060
Babins	<i>Non significatif (faible emprise de levé)</i>					

On constate que les ordres de grandeur sont dans l'ensemble respectés, même si le modèle ne présente pas de valeur prédictive quantitative. La principale incohérence concerne une tendance trop forte à l'érosion dans le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière.

Pour le bras principal, le cumul depuis l'amont des évolutions mesurées et simulées est présenté sur la figure ci-dessous.

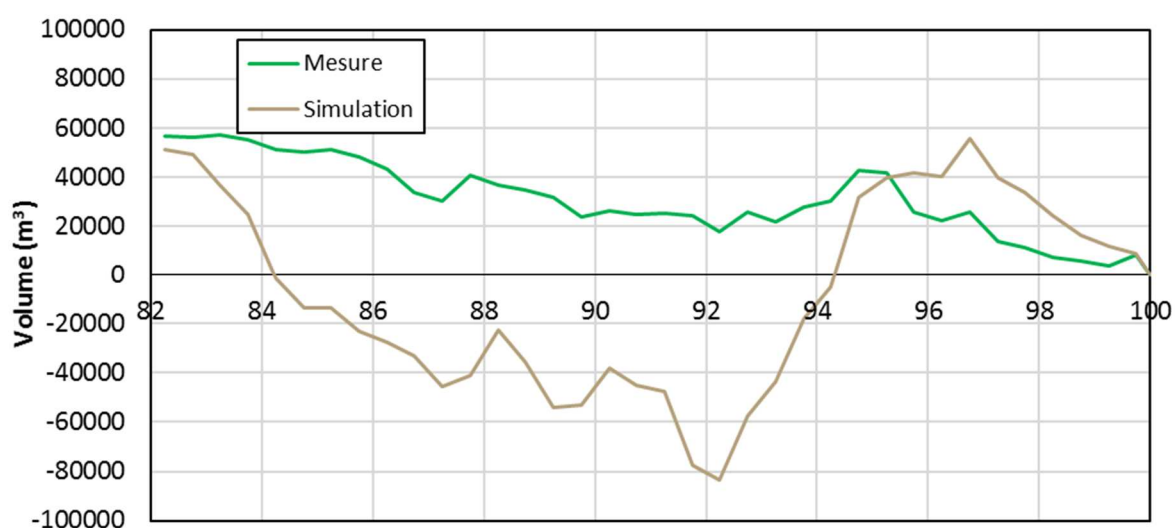


Figure 34 : Cumul depuis l'amont du bras principal de la Loire des évolutions de volume mesurées et simulées.

On constate que la zone entre les pk 95 et 92 connaît trop d'érosion dans le modèle par rapport à l'évolution calculée d'après les levés bathymétriques. Le bilan global sur le bief étudié est par contre correct. Il faut signaler que cette analyse de volumes dans le bras principal s'effectue sur une largeur de lit assez restreinte (cf. 2.1), ce qui rend la comparaison avec les simulations particulièrement délicate (une imprécision du modèle sur la répartition latérale des dépôts va dégrader le résultat concernant l'analyse longitudinale des dépôts).

Le résultat du calcul en terme d'évolution temporelle du volume de sédiment dans les deux bras de l'île Neuve-Macrière est présenté sur la figure ci-dessous. Cette figure permet de mettre en évidence les phases d'engraissement ou bien d'érosion de ces bras. On peut constater que les dépôts simulés dans le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière semblent atteindre un équilibre à partir de 2014 environ.

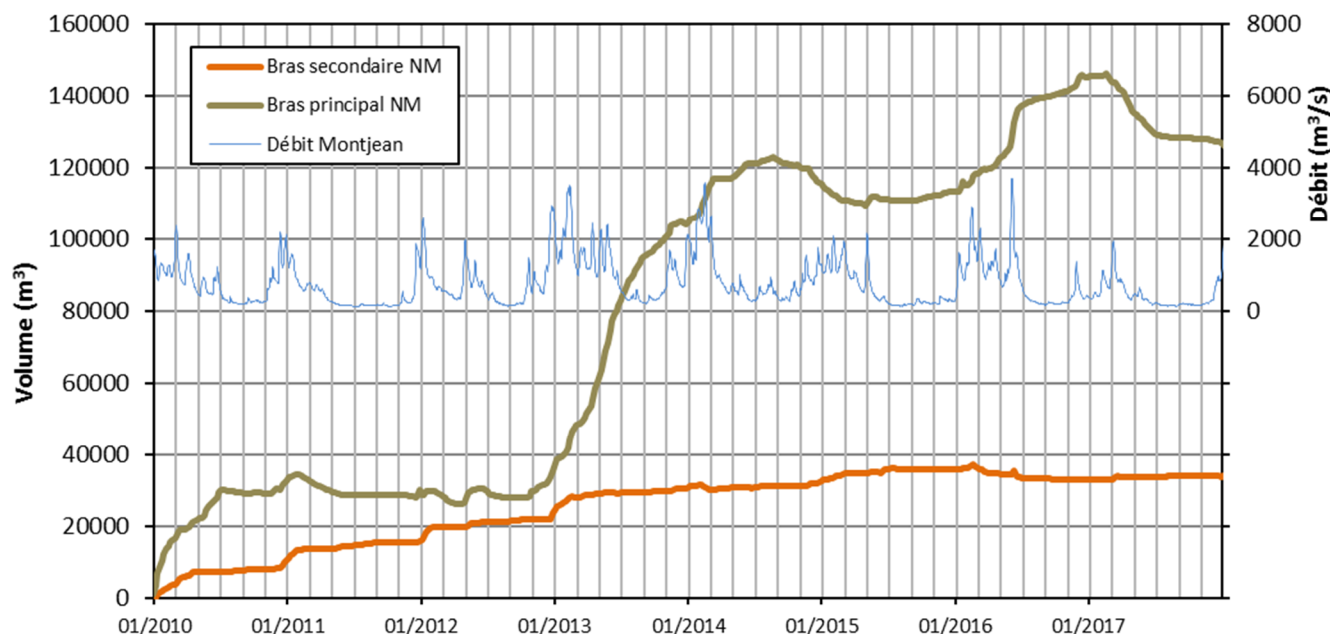


Figure 35 : Evolution des volumes pour le bras principal et le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière au cours du calcul de calage.

Enfin, le débit solide moyen (ramené à une valeur annuelle) transitant dans le lit principal est calculé et est présenté sur la figure ci-dessous (bras secondaire de l'île Neuve-Macrière en trait pointillé).

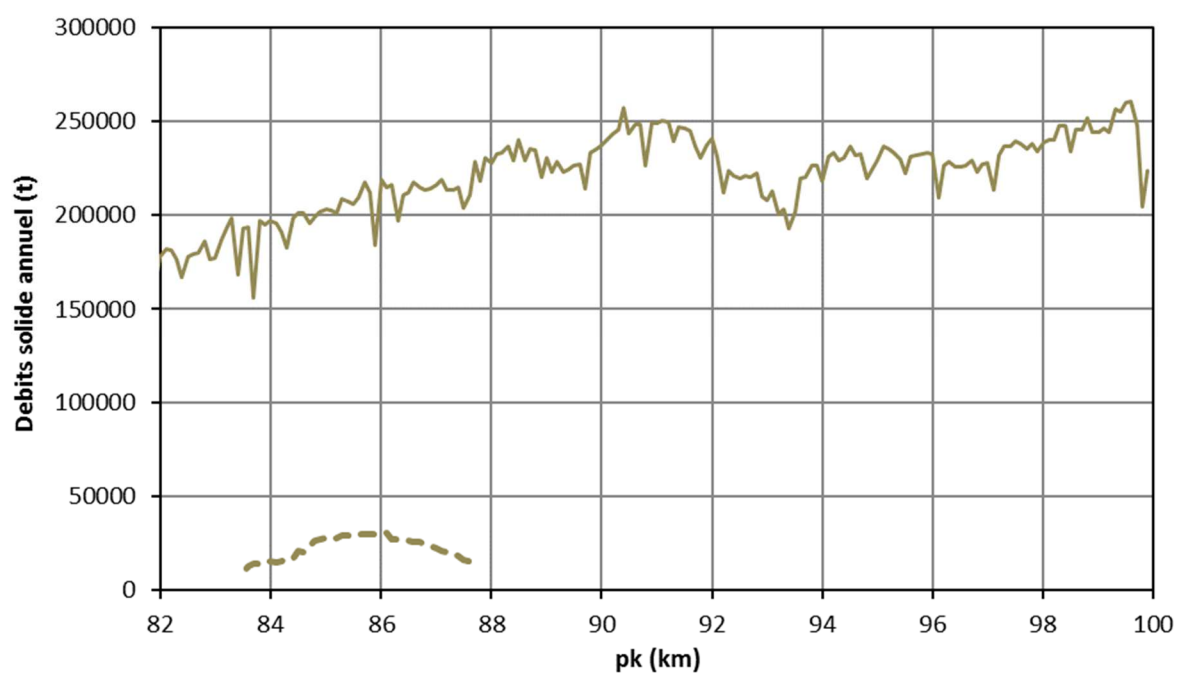


Figure 36 : Débit solide annuel moyen transitant pendant la période de calage.

On constate donc un débit solide annuel d'environ 250 000 t entrant dans le modèle et y transitant (soit environ 160 000 m³ en terme de volume de sédiment au sol).

5. CALCUL MORPHOSEDIMENTAIRE TENDANCIEL

5.1 Méthodologie de calcul

On cherche ici à donner une estimation de l'évolution du lit de la Loire sur le site d'étude à une échelle de 50 ans. Les résultats de ce calcul serviront de référence à laquelle seront comparés les résultats des calculs avec les différents scénarios d'aménagement étudiés.

L'hydrologie de la période de calcul est basée sur la période 1965-2005 (cf. figure ci-dessous). Les dix premières années de la chronique sont rebouclées de manière à ce que la durée de la chronique soit bien de 50 ans. Ce choix de chronique est en cohérence avec l'étude Hydratec de 2013 « *Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise* ».

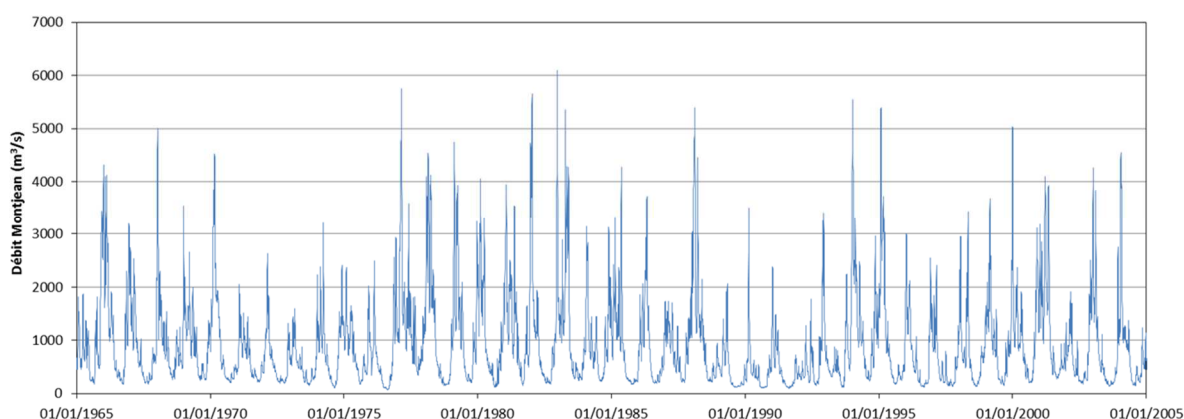


Figure 37 : Chronique hydrologique utilisée pour les calculs tendanciels.

La bathymétrie initiale du modèle correspond au levé « 2013 ».

Les autres paramètres de calcul sont identiques aux calculs de calage sur les périodes 2010-2013 et 2010-2018, présentés précédemment.

5.2 Résultats

Le débit solide entrant à l'amont du modèle (qui correspond au débit solide calculé à la transition entre la zone non-évolutive amont et le domaine des calculs morphologiques) est en moyenne de 300 000 tonnes par an au cours de la période de calcul.

Les deux figures ci-dessous présentent les résultats obtenus en terme d'évolution bathymétrique au bout de 10 et 50 ans.

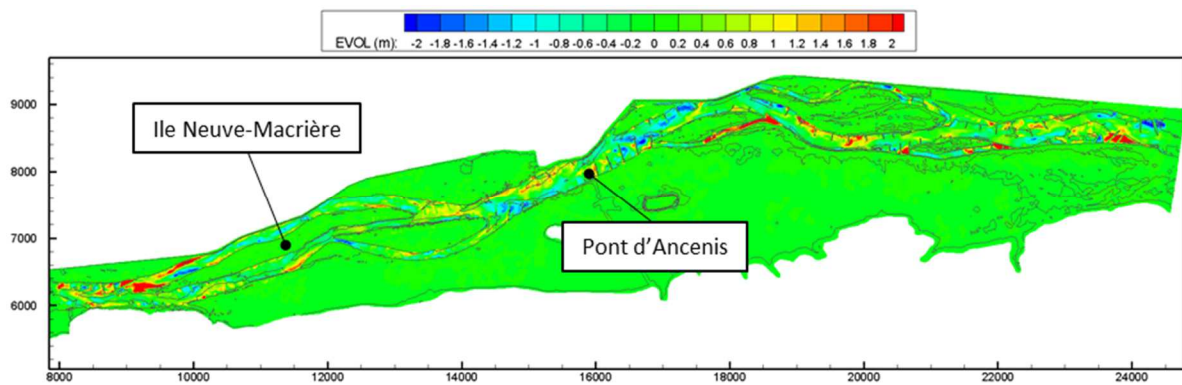


Figure 38 : Evolutions simulées au bout de 10 ans

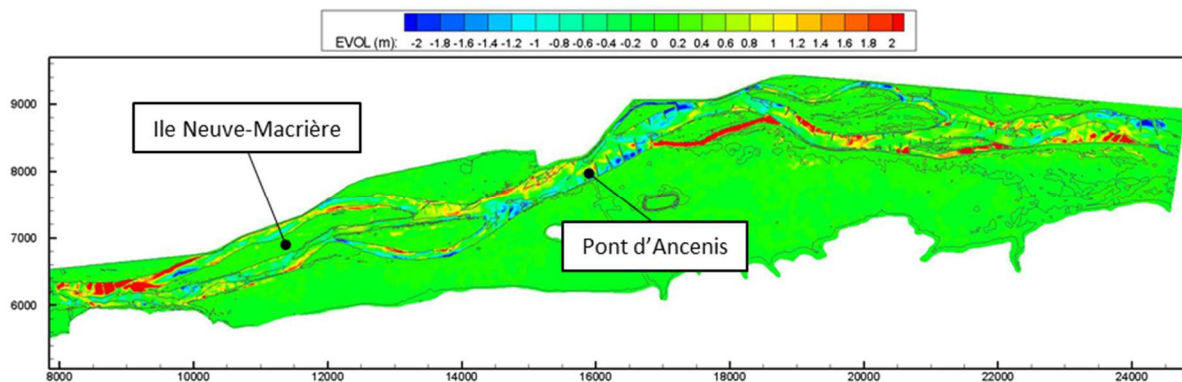


Figure 39 : Evolutions simulées au bout de 50 ans

Les résultats de la simulation montrent donc que le bras principal de la Loire ne connaît pas de grosses modifications au cours du calcul tendanciel. On constate toutefois de manière générale une tendance à long terme à l'exhaussement modéré du bras principal de l'île Neuve-Macrière. Les bras secondaires présentent des tendances très variées, avec notamment des forts dépôts dans le bras des Babins et le bras des Vinettes mais plutôt de l'érosion dans le bras de Bernardeau et le bras de l'île Delage.

La figure ci-dessous présente l'évolution de volume par zones (bras principal et bras secondaire de l'île Neuve-Macrière) au cours de la période de simulation, afin de mieux appréhender la cinétique de l'évolution simulée.

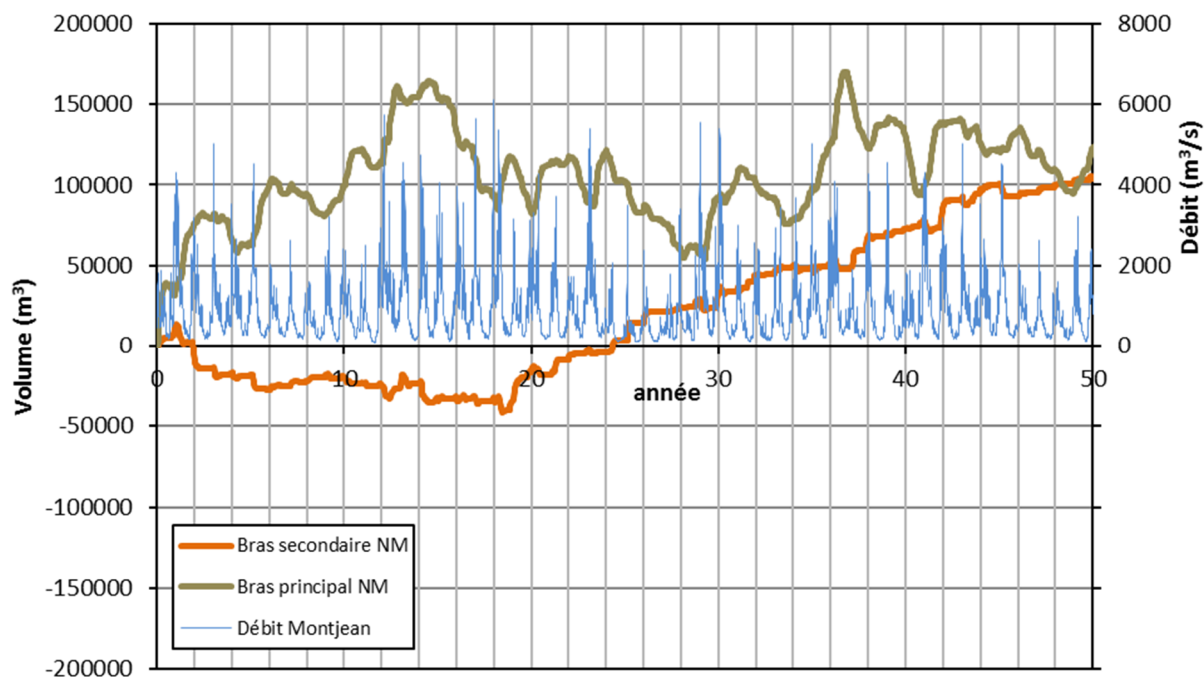


Figure 40 : Evolution de volumes pour le bras principal et le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière au cours du calcul tendanciel

Les tendances simulées sont les suivantes :

- Pour le bras principal les fortes hydrologies ont tendance à favoriser les dépôts tandis que les faibles hydrologies ont tendance à générer de l'érosion.
- Pour le chenal secondaire, on constate au cours des vingt premières années une tendance à la stabilité (ou légère érosion). Puis, au cours du reste du calcul, la tendance est plutôt à l'exhaussement de ce bras.

Afin d'étudier le fonctionnement de l'amont de la zone d'étude, l'évolution du volume au cours de la période de simulation pour la zone entre les pk 100 (amont du modèle) et 88 (amont de l'île Neuve-Macrière) est présentée sur la Figure 41.

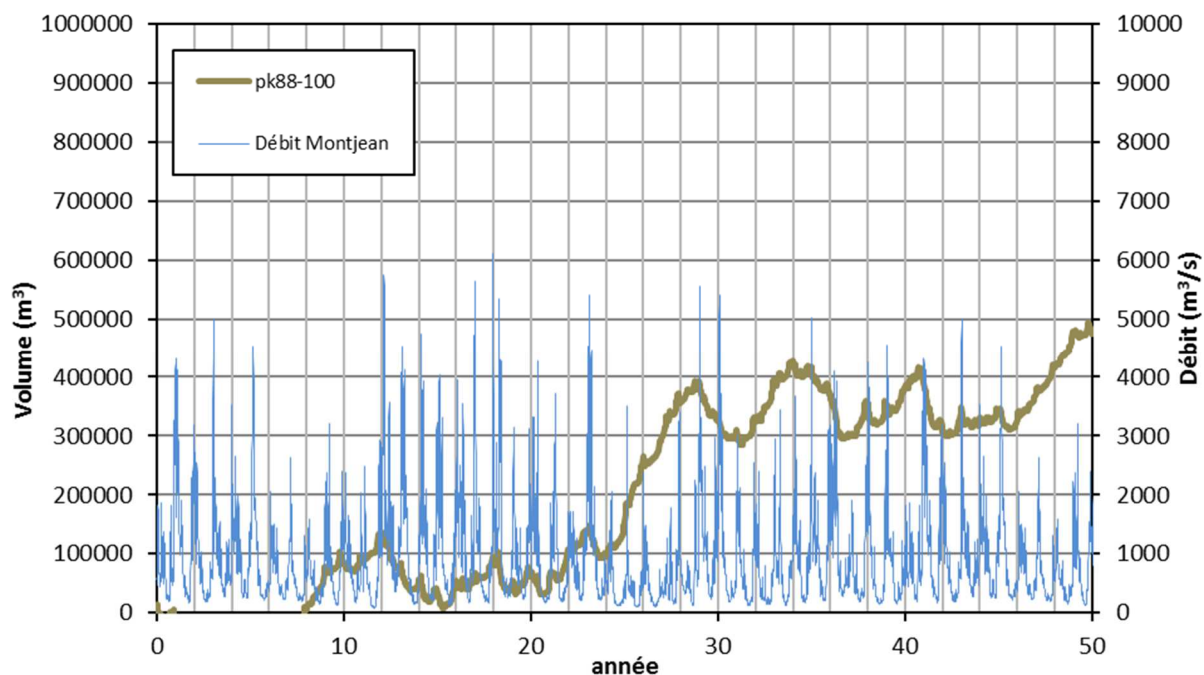


Figure 41 : Evolution de volumes pour l'amont de la zone d'étude au cours du calcul tendanciel.

Dans ce calcul tendanciel de référence, l'amont du modèle présente donc une légère tendance à l'exhaussement.

5.3 Test de sensibilité aux apports solides amont

Un test de sensibilité pour le calcul tendanciel a été effectué, qui porte sur le volume de débit solide entrant en amont dans le modèle. Le débit solide entrant dans le modèle est imposé à 80% du débit solide à capacité à l'amont du domaine de calcul. Le débit solide réellement appliqué à l'amont du modèle (à la transition entre la zone non-évolutive amont et le domaine des calculs morphologiques) est en réalité plus réduit par rapport au calcul de référence en raison de la baisse locale des fonds au cours du calcul. Au bout du compte, le débit solide annuel moyen entrant dans le domaine au cours de ce calcul est de 200 000 tonnes (contre 300 000 tonnes pour le calcul de référence).

La figure ci-dessous présente l'évolution de volume par zones (bras principal et bras secondaire de l'île Neuve-Macrière) au cours de la période de simulation.

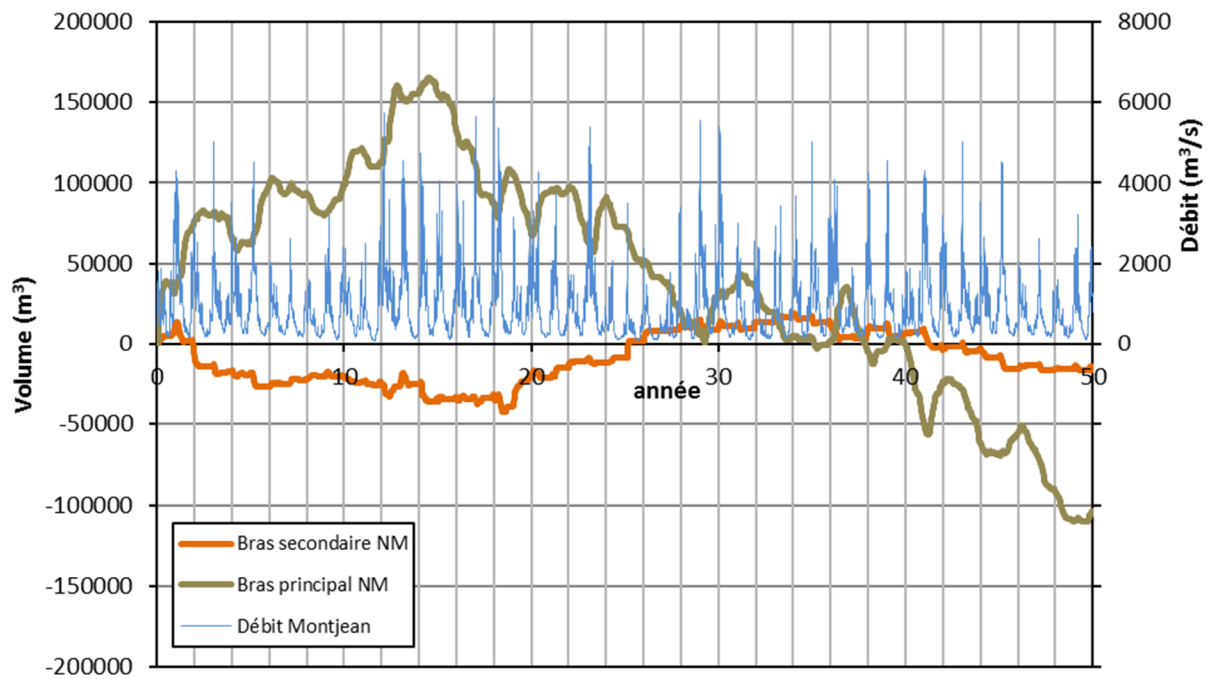


Figure 42 : Evolution de volumes pour le bras principal et le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière au cours du calcul tendanciel – sensibilité au débit solide entrant.

Par rapport au calcul de référence (Figure 40), la réduction du débit solide en provenance de l'amont entraîne donc une baisse du niveau du lit dans les deux bras.

Le déséquilibre induit à l'amont nécessite plusieurs années pour se propager sur l'ensemble du linéaire d'étude. La Figure 42 comparée avec la Figure 40 indique ainsi une divergence entre le calcul de référence et le calcul avec débit solide réduit au bout d'environ 25 ans, ce qui correspond donc au temps pour que le déséquilibre sédimentaire à l'amont (pk100) se propage jusqu'au droit de l'île Neuve-Macrière.

Afin d'étudier le fonctionnement de l'amont de la zone d'étude, l'évolution du volume au cours de la période de simulation pour la zone entre les pk 100 (amont du modèle) et 88 (amont de l'île Neuve-Macrière) est présentée sur la Figure 41.

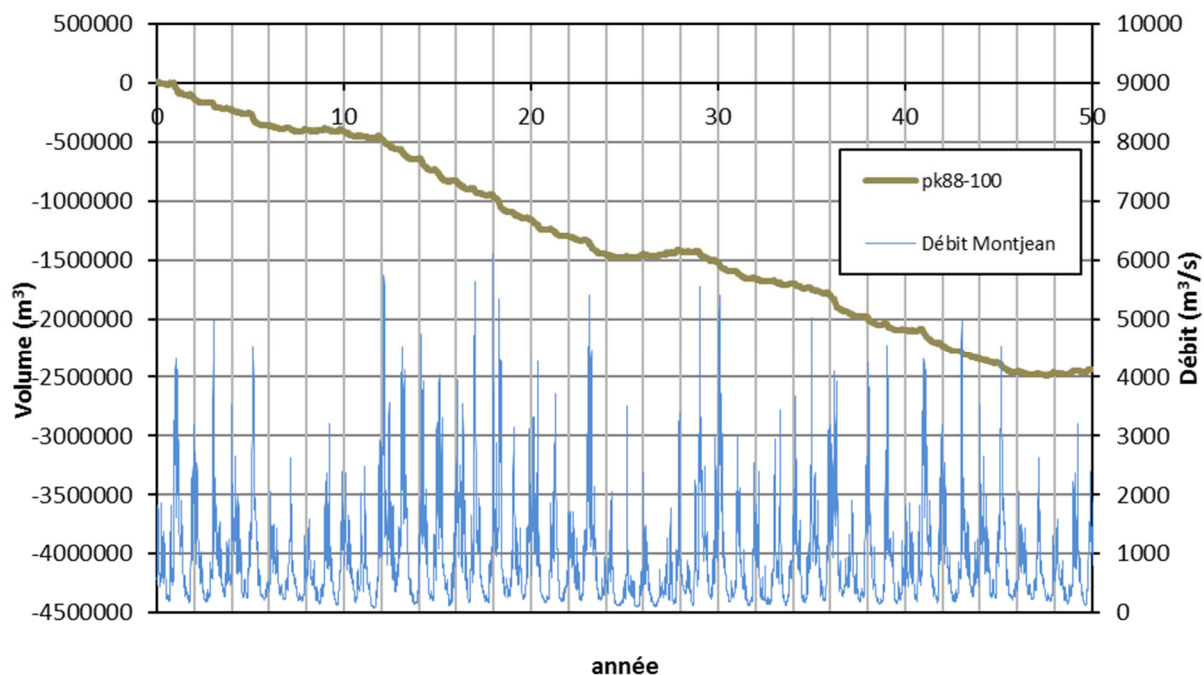


Figure 43 : Evolution de volumes pour l'amont de la zone d'étude au cours du calcul tendanciel – sensibilité au débit solide entrant.

Contrairement au calcul tendanciel de référence, la tendance simulée pour l'amont du modèle est à l'érosion au cours de la période de calcul. Les figures ci-dessous présentent les évolutions simulées à 10 ans et 50 ans pour ce calcul de sensibilité.

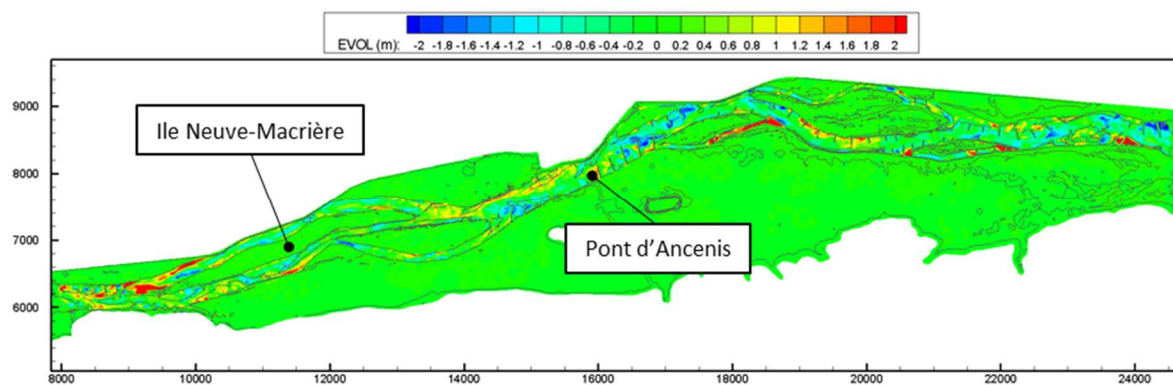


Figure 44 : Evolutions simulées au bout de 10 ans - sensibilité au débit solide entrant

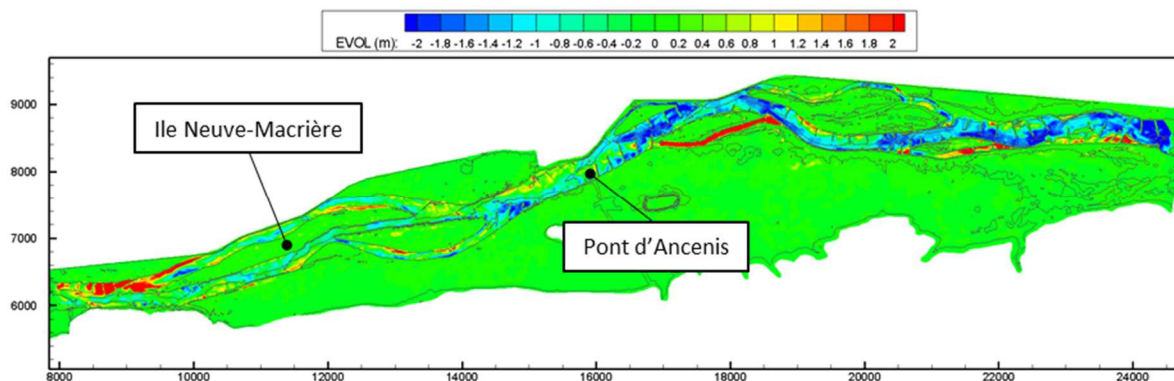


Figure 45 : Evolutions simulées au bout de 50 ans - sensibilité au débit solide entrant

Ces figures montrent qu'une réduction des apports amont entraîne une forte baisse du lit sédimentaire à long terme, principalement à l'amont d'Ancenis.

5.4 Evolution tendancielle des lignes d'eau

L'impact des évolutions morphologiques simulées sur les lignes d'eau d'étiage est étudié ici.

Le débit d'étiage considéré pour cette analyse est de $207 \text{ m}^3/\text{s}$. Le niveau d'eau associé à Mauves (condition limite aval) est de 1.86 m IGN 69.

La méthode mise en œuvre consiste à extraire du calcul morphologique pour l'année considérée la bathymétrie calculée à une période correspondant au débit de la ligne d'eau souhaitée, puis à effectuer sur cette base bathymétrique un calcul hydraulique en régime permanent au débit de la ligne d'eau souhaitée.

L'évolution de la ligne d'eau à long terme est évaluée en utilisant des bathymétries issues du calcul tendanciel à 10 ans, 20 ans, et 50 ans. La ligne d'eau de 2013 est reportée pour comparaison (cf. figure ci-dessous).

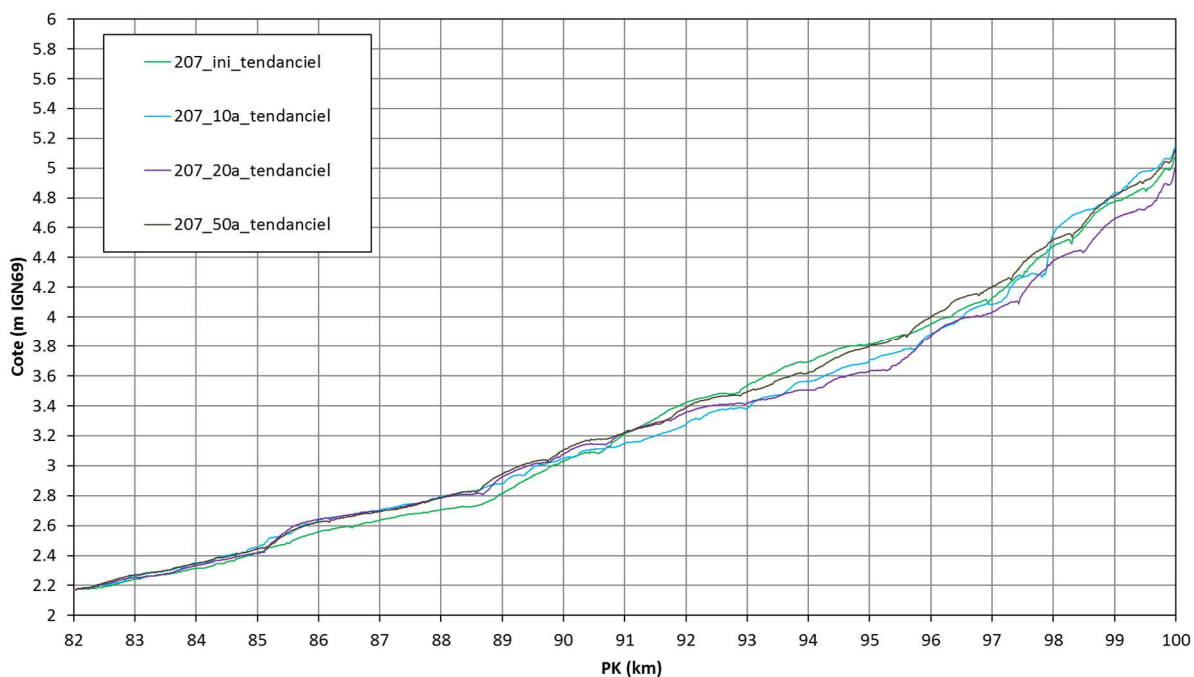


Figure 46 : Lignes d'eau à $207 \text{ m}^3/\text{s}$ calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées.

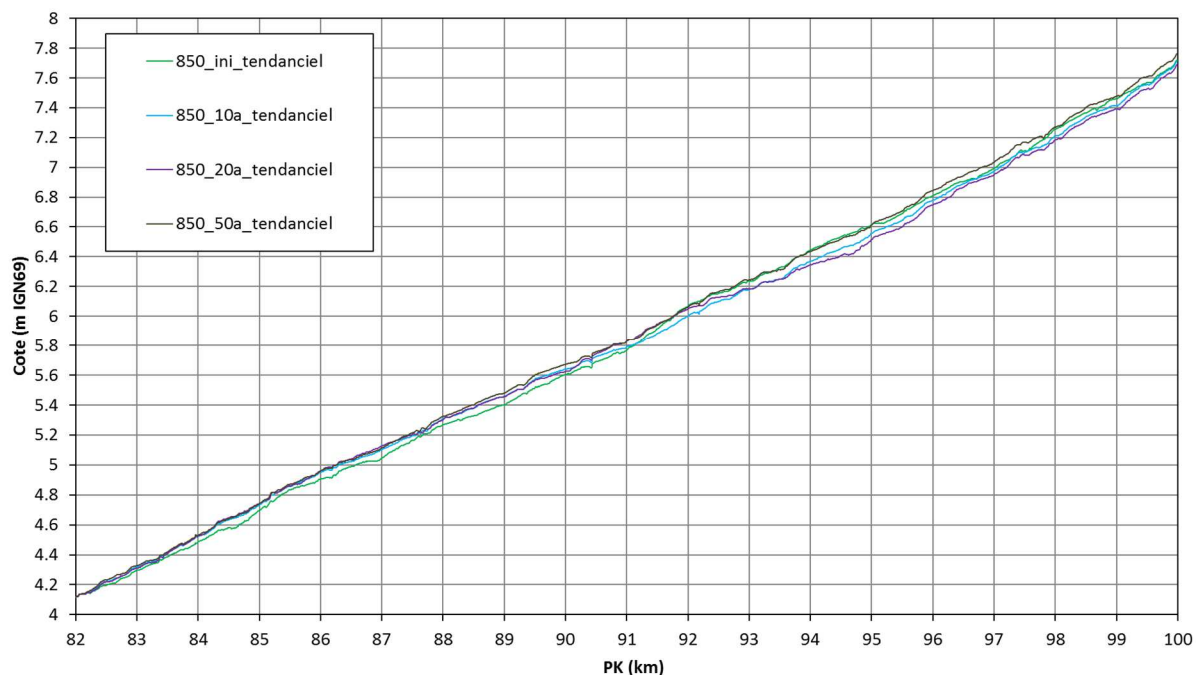


Figure 47 : Lignes d'eau à 850 m³/s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées.

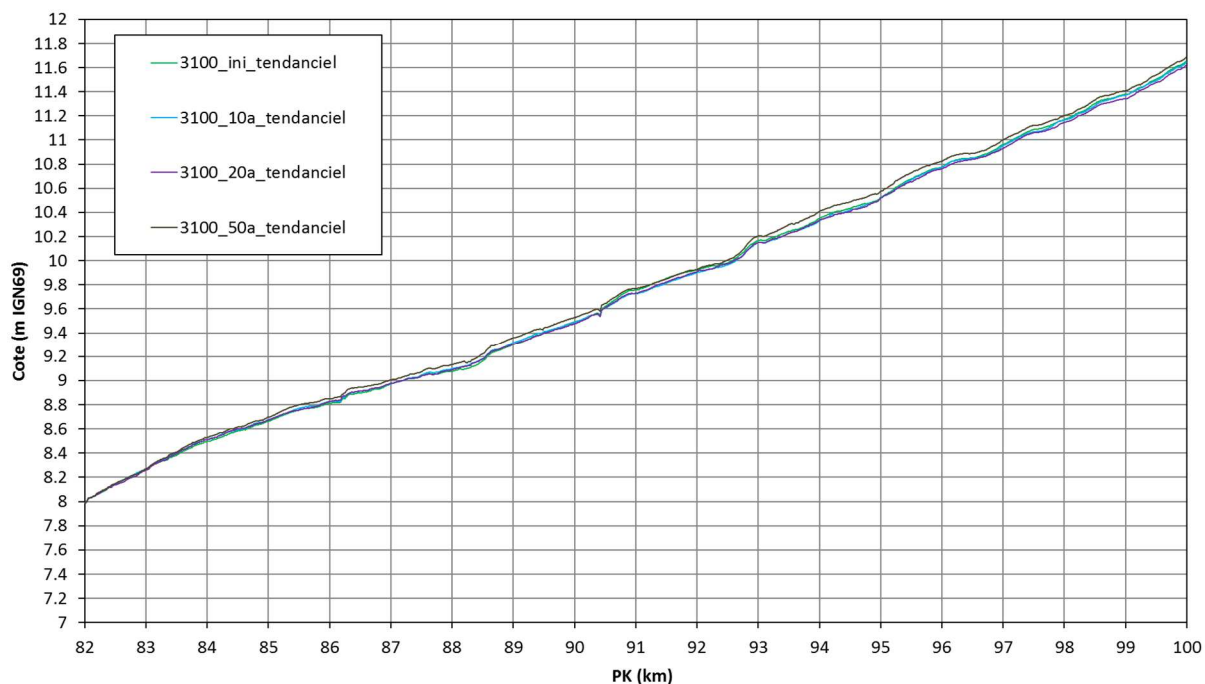


Figure 48 : Lignes d'eau à 3100 m³/s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées.

Les lignes d'eau simulées à partir des bathymétries issues du calcul tendanciel indiquent donc une certaine stabilité des lignes d'eau d'étiage.

Enfin, l'impact d'une l'hypothèse « pessimiste » pour les apports solides amont est étudié, en utilisant pour les calculs des lignes d'eau des bathymétries issues du test de sensibilité consistant en une réduction de 20% des apports solides amont. Les résultats obtenus (cf.

figure ci-dessous) montrent une forte baisse de la ligne d'eau d'été avec ce calcul (de plus d'un mètre en amont du modèle). La baisse reste importante (environ 60 cm à l'amont du modèle) pour le débit intermédiaire de 850 m³/s, et est assez faible (environ 20 cm) pour le débit de crue.

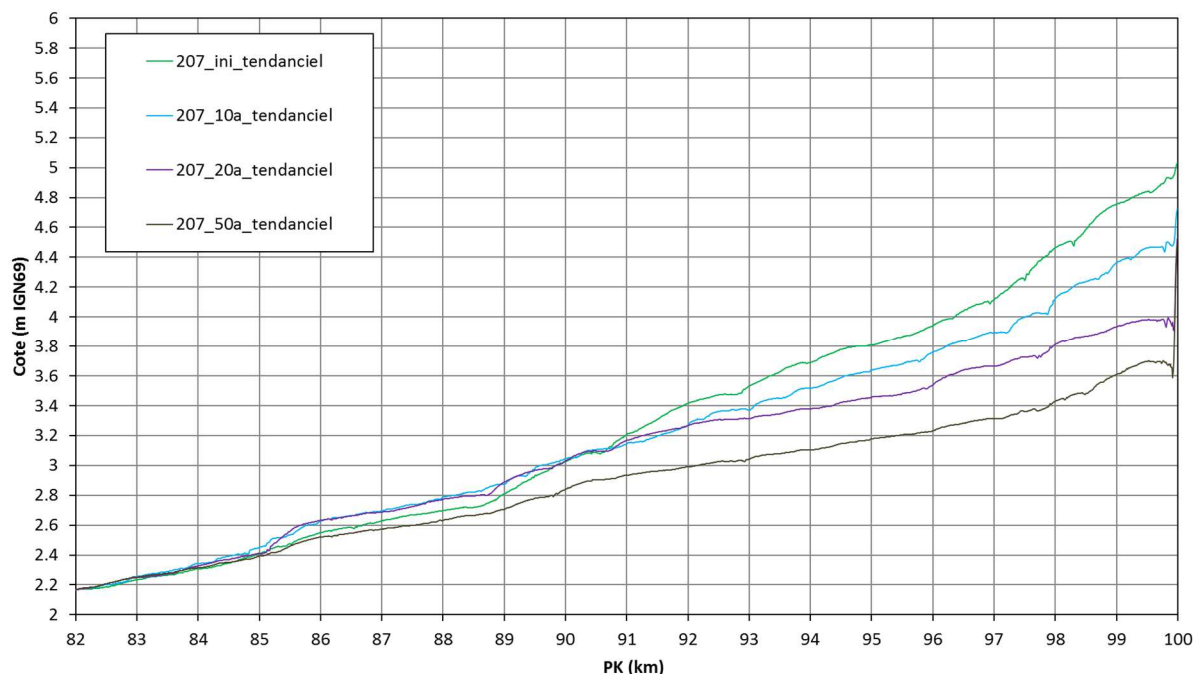


Figure 49 : Lignes d'eau à 207 m³/s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées avec réduction des apports amont.

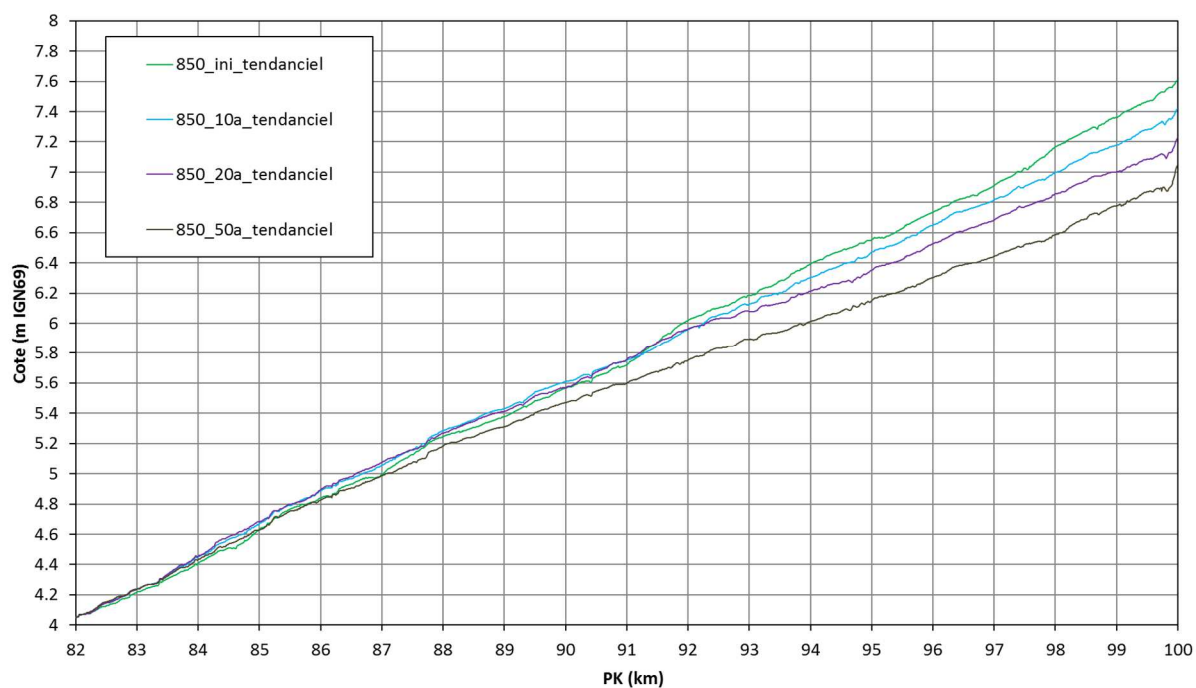


Figure 50 : Lignes d'eau à 850 m³/s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées avec réduction des apports amont.

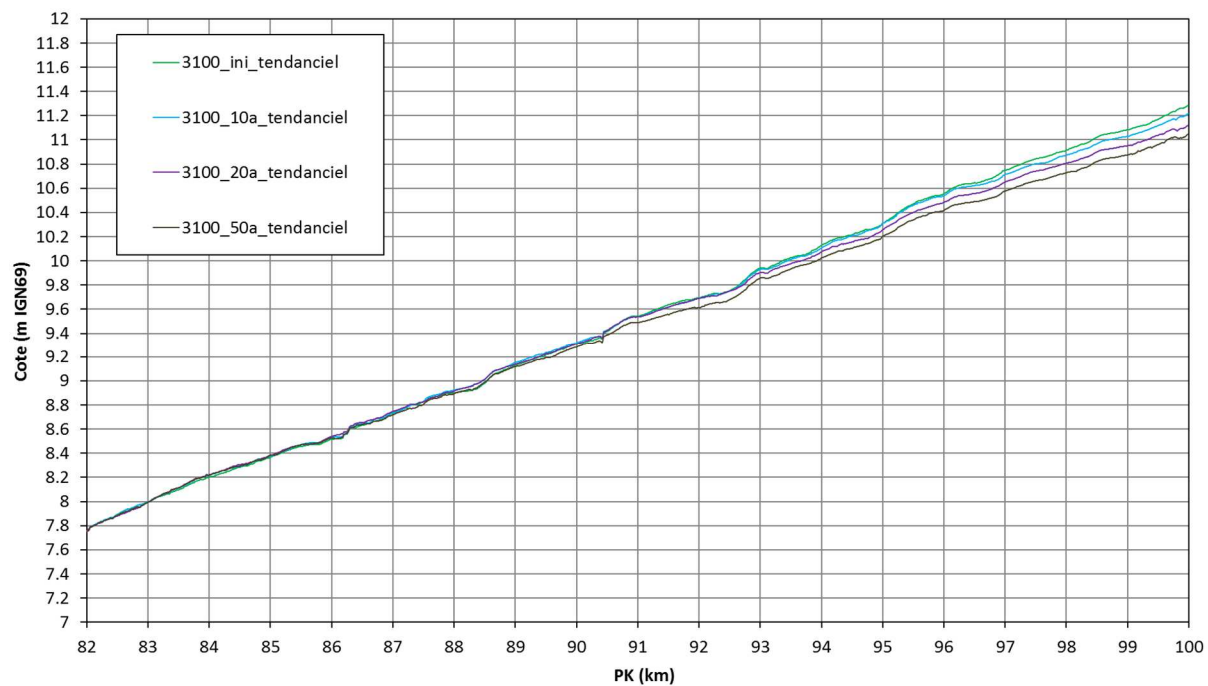


Figure 51 : Lignes d'eau à 3100 m³/s calculées pour les années 2013, 2013 + 10 ans, 2013 + 20 ans et 2013 + 50 ans, à partir de bathymétries simulées avec réduction des apports amont.

6. CONCLUSION

Le modèle numérique hydrosédimentaire construit pour étudier le comportement du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes a été calé d'un point de vue hydraulique de manière à retrouver les lignes d'eau observées, et d'un point de vue morpho-sédimentaire sur la base des évolutions 2010-2013 (sur l'emprise du lit principal) et sur les évolutions 2010-2017 (sur l'emprise du chenal inter-épi et les bras secondaires)

Le modèle sédimentaire mis en œuvre s'appuie sur la formulation et les paramètres qui avaient été calés pour un modèle similaire de la Loire au niveau des seuils du Fresne.

Le processus de calage hydro-sédimentaire est rendu particulièrement complexe par le fait que les lignes d'eau d'étiage sont très sensibles à la bathymétrie. Il a ainsi été nécessaire de procéder à un calage couplé entre hydraulique et hydrosédimentaire de manière à calculer les lignes d'eau d'étiage en tenant compte des évolutions morphologiques calculées.

La comparaison entre les évolutions simulées et les évolutions mesurées sur les périodes de calage (novembre 2009 à mars 2013) est globalement positive. Le modèle est capable de reproduire de manière satisfaisante les principales évolutions morphologiques observées. Hormis pour le bras secondaire de l'île Neuve-Macrière, les résultats restent toutefois peu quantitatifs pour les bras secondaires.

Le modèle a ensuite été mis en œuvre sur une période plus longue (50 ans). Les résultats de ce calcul tendanciel indiquent une légère tendance à l'exhaussement du chenal principal de la Loire. Un test de sensibilité aux apports amont a aussi été effectué pour ce calcul tendanciel. Les résultats de ce test sont très différents puisqu'une tendance à l'érosion du chenal principal est alors obtenue. Ceci montre que les évolutions simulées à long-terme sont très sensibles aux hypothèses retenues pour les quantités de sédiment entrant dans le modèle, qui dépendent du stock sédimentaire (non connu a priori) à l'amont de l'emprise du modèle.

Il faut signaler que les hypothèses sur la présence de végétation dans les bras secondaires (en particulier bras des Brevets et bras du Bernardeau) sont fixées. L'évolution possible de cette végétation (développement ou bien au contraire essartement) aura un impact sur les résultats dans ces bras, mais n'est pas prise en compte dans les calculs.

Ces résultats montrent que le modèle ne doit pas être utilisé pour prédire le futur à long terme de manière quantitative. Les calculs à long terme doivent préférentiellement être utilisés pour la comparaison d'aménagements entre eux, et le rôle principal du calcul tendanciel présenté ici est de disposer d'évolutions tendanciennes qui serviront de référence à laquelle comparer les évolutions sur la même période pour les aménagements qui seront testés dans la phase suivante de l'étude.