
Mise à jour du modèle Garonne

- Apport des nouvelles acquisitions de données -

Rapport technique
Malak Sadki

CERFACS
GlobC



CERFACS
GlobC
Projet SCO Flood-DAM-DT

Titre:

Mise à jour du modèle Garonne

Projet de recherche:

Projet SCO FloodDAM-DT

Partenaires:

CNES, SPC Lot et Garonne, SCHAPI,
Vortex-IO, CLS, CS group, QuantCube, JPL

Participant.e.s:

Sophie Ricci
Ludovic Cassan
Andrea Piacentini
Quentin Bonassies
Thanh Huy Nguyen
Malak Sadki

Autrice:

Malak Sadki

Nombre de pages: 38

Date:

Mars 2024

Contents

1	Introduction - Contexte de l'étude	1
2	Etat de l'art des données à disposition - Analyse de l'évolution topographique du secteur d'étude	4
2.1	Anciens modèles hydrauliques Garonne-Marmandaise : récupération des données de géométrie	4
2.1.1	Introduction aux anciens modèles hydrauliques 1D, 2D	4
2.1.2	Exploitation des données topographiques des anciens modèles hydrauliques : Géolocalisation des anciens levés bathymétriques du modèle Mascaret	5
2.2	Nouvelles acquisitions de données - Évolution de la topographie dans le secteur de la Garonne marmandaise	7
2.2.1	État de l'art des données à disposition	8
2.2.2	Analyse de l'évolution de la bathymétrie depuis 1995	10
2.2.3	Analyse de l'évolution de la topographie depuis 1995	18
2.3	Conclusions	21
3	Mise à jour du modèle Garonne	23
3.1	Construction du nouveau modèle 2D	23
3.1.1	Génération d'un MNT complet en tirant profit des acquisitions bathymétriques et topographiques récentes	24
3.1.2	Construction du maillage - Mise à jour des lignes de contrainte	28
3.2	Lancement du nouveau modèle	33
3.2.1	Conditions aux limites	33
3.2.2	Paramétrage du modèle (Frottement) - Calage en régime permanent	33
3.3	Conclusions	35
4	Conclusions et perspectives	37
A	Fiche technique - Génération du MNT complet	a
A.1	Mise en forme des profils en travers (.shp) sous .csv pour les importer dans HEC-RAS:	a

Contents	iii
A.2 Créer le MNT du lit mineur sous HEC-RAS :	b
A.3 Générer le MNT complet (sous QGIS)	c
B Détail du maillage T2D Garonne sur BlueKenue	d

Chapter 1

Introduction - Contexte de l'étude

Problématique d'inondation et projet SCO FloodDAM-DT :

Les inondations fluviales causent d'importantes pertes humaines, matérielles et économiques, et la gravité et la fréquence de ces inondations augmentent en raison de la pression anthropique croissante et des effets du changement climatique. La modélisation hydraulique est un outil précieux pour les gestionnaires car elle permet d'identifier les zones les plus vulnérables aux inondations en termes de hauteurs d'eau et de vitesse.

Le projet SCO (Space Climate Observatory) - FloodDAM-DT (Flood Detection, Alert, and rapid Mapping Digital Twin) représente une initiative de recherche visant à fournir un service automatisé pour détecter, suivre et évaluer de manière fiable les inondations, tout en améliorant la résolution, la rapidité et la capacité de prévision des zones à risque d'inondation à l'échelle mondiale, dans le cadre d'une collaboration franco-américaine.

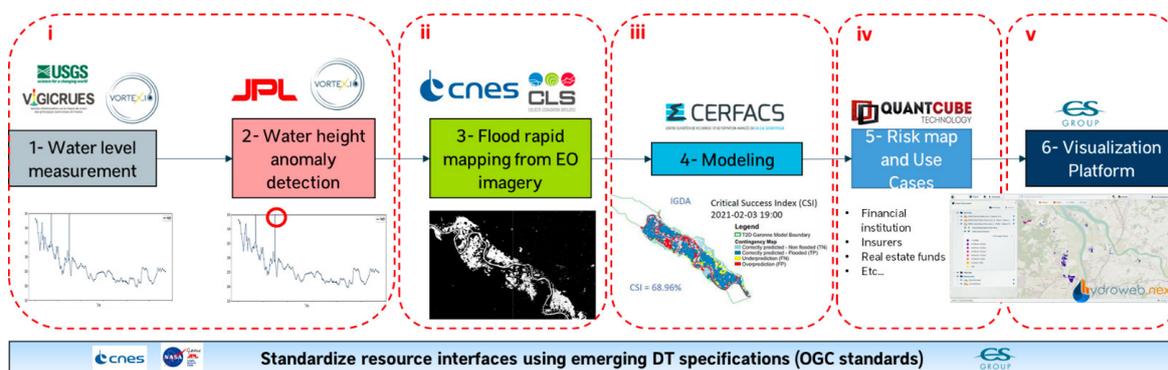


Figure 1.1: Étapes du projet FloodDAM-DT (CNES - SCO)

Dans le cadre de ce projet de recherche, une approche de fusion de données de détection est actuellement en cours de déploiement, intégrant de multiples capteurs satellitaires et terrestres ainsi que le modèle hydrodynamique Telemac-2D à l'échelle locale. (étape iii,

Figure 1.1).

Contexte et objectif de l'étude

La précision et la fiabilité de la modélisation hydraulique des rivières et des plaines inondables dépendent étroitement de la qualité des données topographiques et bathymétriques utilisées pour générer les modèles numériques de terrain (MNT) sous-tendant les prévisions hydrodynamiques. Traditionnellement, les levés de terrain étaient utilisés pour la représentation bathymétrique, notamment dans le lit mineur des rivières. Cependant, les progrès récents des techniques de télédétection aéroportées et spatiales, associés à leur capacité à couvrir de vastes zones spatiales et à fournir des observations régulières, les rendent désormais très utiles pour produire des données topographiques destinées aux modèles hydrauliques.

La zone d'étude concerne la portion de la Garonne en aval de sa confluence avec le Lot, s'étendant sur un linéaire de 50 kilomètres entre Tonneins et La Réole (Figure 1.2). Depuis le 19^{ème} siècle, cette vallée a été fortement aménagée afin de protéger les riverains des crues de la Garonne, en particulier suite à la crue historique de 1875. Ce tronçon est caractérisé par la mise en place progressive d'un système de digues et de déversoirs visant à prévenir les inondations en organisant la submersion contrôlée et le stockage de la crue. Ces ouvrages de protection forment une série de casiers successifs, conférant à la Garonne un profil particulier, avec un lit majeur enclavé par des digues longitudinales et des casiers.

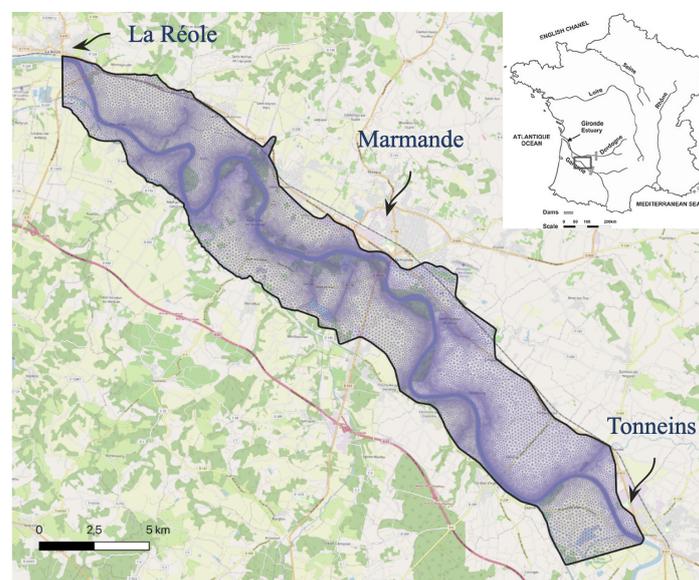


Figure 1.2: Zone d'étude - Modèle Telemac-2D existant sur la Garonne Marmandaise

Dans le cadre de cette étude, qui se concentre sur ce tronçon de la Garonne, il est cru-

cial d'intégrer des données d'élévation précises et actualisées dans le modèle hydraulique. Actuellement, un ancien maillage basé sur des relevés de terrain datant de 1995 est utilisé pour simuler la propagation des crues dans le fleuve. L'objectif principal de cette étude est de fusionner les données de terrain les plus récentes, dans le but de produire une version actualisée et plus précise du MNT sur lequel repose le modèle hydraulique Telemac-2D. Cette mise à jour du MNT permettra également de redéfinir et d'affiner le maillage hydraulique, assurant une représentation plus précise des caractéristiques topographiques et hydrodynamiques. Ces améliorations du MNT et du maillage permettront de calculer de manière plus précise la dynamique d'écoulement de l'eau dans les rivières et les plaines d'inondation.

Plan du rapport

Le rapport est structuré en deux chapitres principaux, chacun abordant une étape clé de l'étude sur l'évolution de la bathymétrie et de la topographie de la Garonne ainsi que la construction d'un nouveau modèle hydraulique. Le Chapitre 2 se concentre sur l'évolution de la bathymétrie et de la topographie depuis 1995, en présentant d'abord une synthèse des données récentes avec une catégorisation générale, suivie d'une analyse détaillée de l'évolution de la bathymétrie et de la topographie au fil du temps, y compris une inter-comparaison des données et l'apport des données les plus récentes. Le Chapitre 3 aborde la construction d'un nouveau modèle hydraulique en détaillant les données retenues pour la mise à jour de la géométrie, la construction d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) complet incluant la bathymétrie et la topographie, ainsi que la méthodologie utilisée pour la construction du lit mineur. De plus, ce chapitre examine la mise à jour du maillage, y compris le lit mineur, les lignes de contrainte et le raffinement du maillage. Enfin, l'accent est mis sur le paramétrage du modèle et le calage du coefficient de frottement sur le lit mineur de la Garonne.

Chapter 2

Etat de l'art des données à disposition - Analyse de l'évolution topographique du secteur d'étude

2.1 Anciens modèles hydrauliques Garonne-Marmandaise : récupération des données de géométrie

2.1.1 Introduction aux anciens modèles hydrauliques 1D, 2D

Trois versions de modèles de la Garonne ont été initialement développées dans cette région : un modèle Mascaret-1D en lit composé, comprenant 83 profils en travers détaillant le lit mineur et le lit majeur complet ; un modèle Mascaret-1D à casiers, également basé sur les mêmes données topographiques et constitué de 15 casiers ainsi que de près de 75 liaisons représentant les zones inondables extra-digues ; et enfin, un modèle Telemac-2D avec un maillage comprenant 82116 éléments et 41416 nœuds. La topographie des deux derniers modèles repose à la fois sur les profils en travers et sur un ancien modèle de terrain décrivant en deux dimensions la topographie dans les plaines d'inondation.

Ces modèles, élaborés par EDF et fournis au CERFACS, ont été calés sur des lignes d'eau permanentes (débit de plein bord, débit débordant) et comparés sur des événements de crue historiques débordants, en particulier la crue de décembre 1981 l'une des dix plus fortes crues enregistrées sur la Garonne depuis 1875 et pour laquelle des mesures temporelles sont disponibles. Il a également été démontré (cf. rapport EDF) que les résultats dépendent principalement de la précision de représentation des berges et des digues longitudinales, ainsi que du niveau de détail des liaisons hydrauliques pour les zones de remplissage et les digues.

2.1.2 Exploitation des données topographiques des anciens modèles hydrauliques : Géolocalisation des anciens levés bathymétriques du modèle Mascaret

Cette étude met principalement l'accent sur la mise à jour du modèle 2D développé sous Telemac en tirant profit de l'amélioration en résolution des données topographiques issues des nouvelles acquisitions de terrain et de télédétection. Il est intéressant de comparer les nouvelles acquisitions topographiques avec les données historiques et d'évaluer leur évolution au fil du temps. Pour ce faire, les profils en travers de 1995 du modèle Mascaret ainsi que le fond du maillage du modèle Telemac sont exploités.

Le fichier de géométrie du modèle Mascaret comporte les points de levée des 83 profils. Ces profils sont identifiés par une abscisse curviligne, qui est une distance le long de la rivière à partir d'un point de référence. La position géographique de ce point de référence nous est inconnue, de même que la géométrie de la rivière (méandrement). Cependant, les emplacements de 58 profils sont disponibles (sans toutefois disposer de la géolocalisation des points de levés le long de chaque coupe transversale). Un travail de géolocalisation a donc été entrepris pour estimer, d'une part, la position des 25 profils restants le long de la rivière et, d'autre part, pour géolocaliser les points de levée dans chaque profil en travers.

Le positionnement des 25 profils restants le long de la rivière est déterminé en les reliant au profil géoréférencé le plus proche (parmi les 58 disponibles), et en considérant la différence des abscisses curvilignes comme la distance séparant les deux profils suivant une ligne centrale reconstruite à partir d'une étude antérieure (cf. étude Emery). La Figure 2.1 illustre la géolocalisation des profils en travers datant de 1995 provenant du fichier de géométrie du modèle Mascaret 1D, représentée par des cercles blancs.

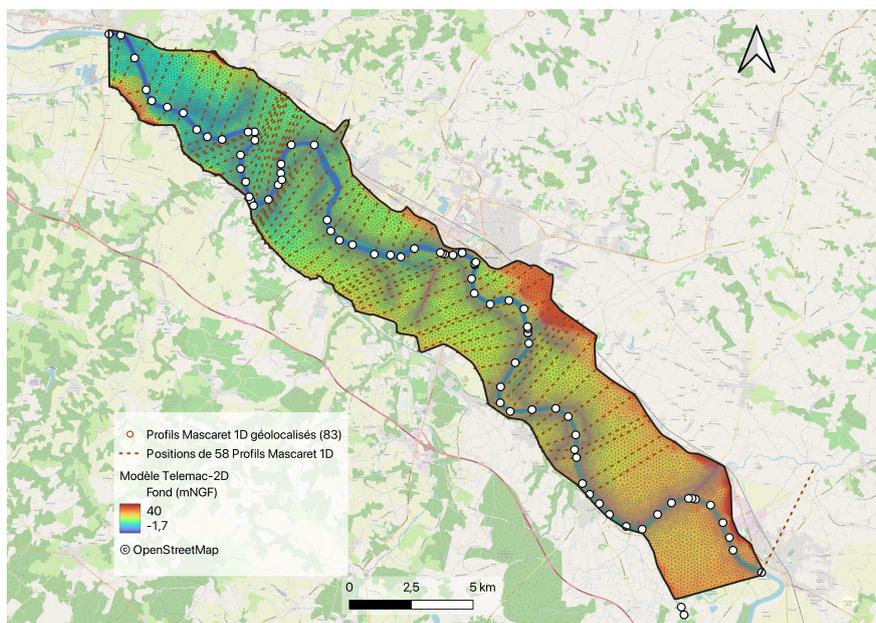


Figure 2.1: Géolocalisation des profils Mascaret 1D (1995')

Une fois que tous les profils ont été positionnés, l'étape suivante consiste à placer les points de levé le long de chaque coupe transversale. Le fichier de géométrie ne contient que la distance à partir du point le plus à gauche et les élévations associées. Pour localiser les différents points de levés, le point le plus profond est associé à la maille de la grille Telemac-2D ayant la plus faible élévation. Les points restants sont géolocalisés en conséquence, en connaissant les distances inter-points (information également disponible dans le fichier de géométrie du modèle Mascaret 1D).

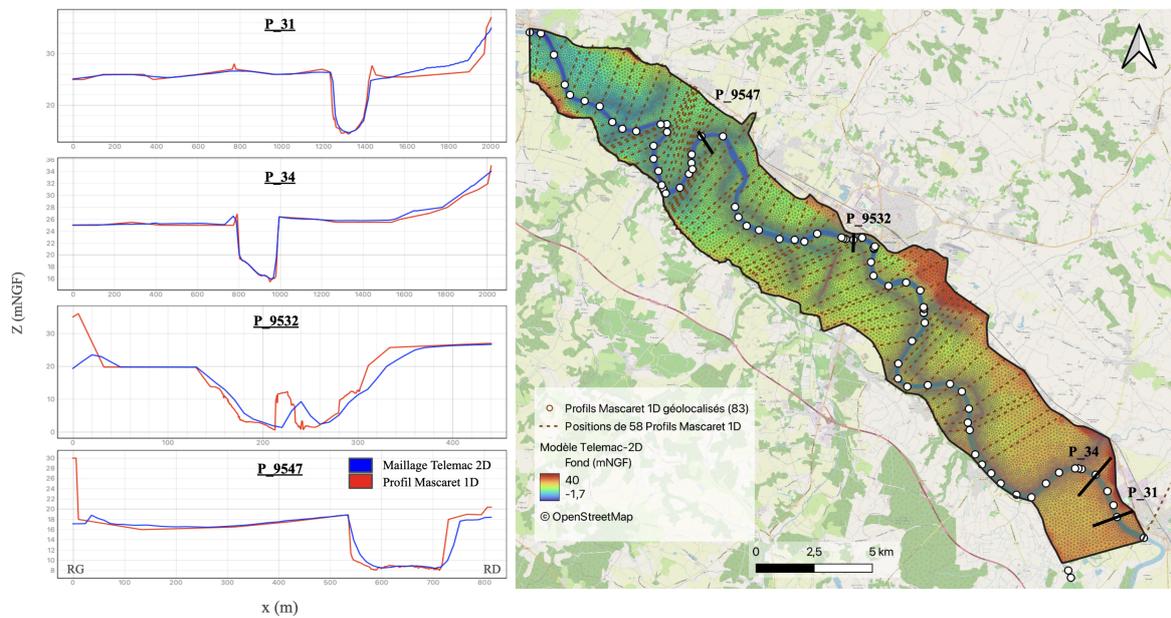


Figure 2.2: Comparaison de 4 profils en travers 1D géolocalisés de Mascaret avec leurs équivalents sur le maillage 2D de Telemac

La cohérence entre les profils 1D et leurs équivalents interpolés à partir du maillage T2D a été vérifiée sur l'ensemble des profils en travers ce qui a permis de valider leur positionnement le long de la rivière. Une étude antérieure menée par C. Emery a également mis en évidence une bonne cohérence entre les profils en 1D (géométrie Mascaret) et en 2D (T2D). Cependant, des décalages apparaissent dans le positionnement des points de levé le long de certains profils en travers, en particulier sur les sections où, dans le maillage T2D, une partie du fond du lit est plate et donc la correspondance entre le point le plus bas dans M1D et celui dans T2D est imprécise, comme montré pour le profil 9547 dans la Figure 2.2. Cette figure présente quatre exemples comparant les élévations des profils géolocalisés du modèle Mascaret au fond du maillage Telemac 2D.

2.2 Nouvelles acquisitions de données - Évolution de la topographie dans le secteur de la Garonne marmandaise

Dans cette section, un état de l'art des données à disposition pour la mise à jour du modèle hydraulique fluvial 2D est dressé. L'objectif principal est l'actualisation de la géométrie du modèle et de sa topographie en utilisant ces données récentes. Une synthèse des différentes sources de données disponibles est présentée dans cette section, mettant en évidence leurs spécificités respectives.

2.2.1 État de l’art des données à disposition

Le tableau 2.1 récapitule les levés bathymétriques in-situ disponibles, essentiels pour acquérir une description précise de la bathymétrie du fleuve. Les données proviennent principalement de deux sources : la DDTM47, avec des levés effectués en 2013 et 2023, et le SMEAG, avec des données collectées entre 2005 et 2007.

Source	Année d’acquisition	Spécificités
DDTM47	2013	21 profils sur le domaine d’étude + 6 en dessous des ouvrages hydrauliques (ponts)
	2023	29 profils dont 20 correspondent aux sections de 2013 et 8 supplémentaires suggérés par le CERFACS
SMEAG	2005-2007	30 coupes transversales vers Tonneins (OH6 - M10) / 24 vers Marmande

Table 2.1: Tableau récapitulatif des levés bathymétriques in-situ à disposition

Le tableau 2.2 présente les MNTs disponibles, ainsi que les maillages hydrauliques existants. Ces données sont cruciales pour décrire la topographie du secteur d’étude et identifier les lignes de contraintes telles que les digues et les remblais. Les MNT sont fournis par l’IGN et la société Sintégra, prestataire mandaté par le SPC LTG, avec des acquisitions effectuées entre 2019 et 2021, tandis que le maillage hydraulique existant date de 2020.

Les MNTs sont également pertinents pour une comparaison avec les levés bathymétriques afin de vérifier d’éventuelles évolutions du lit mineur, notamment des berges, au cours des années 2019-2021. Bien que le MNT dérivé des images Pléiades ne soit pas encore disponible, ces dernières, grâce à leur haute résolution et à leur récence (février 2023), constitueront une source de données supplémentaire pour étudier l’évolution des berges et la localisation éventuelle de dépôts permanents dans la rivière.

Le tableau 2.3 synthétise les données récentes concernant le tracé de la ligne centrale de la Garonne et l’occupation du sol. Les cartes OSO viennent compléter les informations fournies par les images Pléiades, permettant ainsi une description plus détaillée des berges et des dépôts permanents en rivière. Ces données, associées au tracé de la ligne centrale, seront également utiles dans un second temps pour la génération du MNT complet et du maillage hydraulique, en Chapitre 3.

Dans la suite de cette étude, l’ensemble des ces données seront intercomparées, en mettant particulièrement l’accent sur les données de bathymétrie et de topographie, dans

Type de données	Source	Année d'acquisition	Spécificités
Modèles Numériques de Terrain (MNT) (3D)	IGN (https://geoservices.ign.fr/rgealti) Sintégra (mandatée par SPC LTG)	Novembre 2019 (Lot et Garonne), Avril 2021 (Gironde) Juillet 2019	Résolution de 1x1m Couverture de l'amont de Tonneins à Bourdelles; levés LIDAR effectués en étiage (débit de la Garonne de 200 m ³ /s)
Maillages hydrauliques existants (3D)	SPC LTG	2020	Basé sur le MNT de la société Sintégra
MNTs à venir	CNES	Février 2023 Lancement en 2025	Images Pléiades (https://pleiades.cnes.fr/) résolution de 0.5x0.5m à partir desquelles on peut générer un Modèle Numérique de Terrain hydro-compatible (outils CNES) Données CO3D (https://co3d.cnes.fr/) : résolution de 0.5x0.5m (3D), observations à l'échelle globale

Table 2.2: Tableau récapitulatif des modèles numériques de terrain et maillages hydrauliques récents

Type de données	Source	Année d'acquisition	Spécificités
Tracés de la ligne centrale	SWORD (https://www.sword-explorer.com/)	2023	Version v15
	SANDRE Eau France (https://www.sandre.eaufrance.fr/)	2019	
Cartes d'occupation du sol (2D)	OSO (https://www.theia-land.fr/product/carte-doccupation-des-sols-de-la-france-metropolitaine/)	2019/2022	cartes d'occupation du sol de la France métropolitaine à partir de données Sentinel-2A et Sentinel-2B, résolution de 10x10 m.

Table 2.3: Récapitulatif des sources de données permettant d'obtenir des informations sur le tracé de la ligne centrale de la Garonne et la carte d'occupation du sol.

le but d'évaluer leur évolution depuis 1995. Des analyses plus approfondies seront effectuées sur certains produits, avec l'ajout d'explications complémentaires au fur et à mesure de l'étude, en mettant particulièrement l'accent sur leur géolocalisation et leur étendue géographique.

2.2.2 Analyse de l'évolution de la bathymétrie depuis 1995

Comparaison des profils 2013 aux anciens profils issus des modèles 1D (Mascaret) et 2D (Telemac)

Sur le secteur Tonneins - La Réole, une comparaison approfondie a été réalisée entre les levés de 2013 et les profils équivalents du modèle T2D. Ces derniers ont été reconstruits aux points de levés de 2013 et leurs élévations sont calculées par interpolation à partir de données maillées du fond du lit mineur du modèle. De plus, une comparaison a été effectuée avec le levé provenant du fichier de géométrie du modèle 1D (Mascaret), situé le plus près possible du relevé de 2013. Cette démarche permet d'évaluer la concordance entre les données issues des levés bathymétriques récents et les modèles hydrauliques existants, offrant ainsi une meilleure compréhension de l'évolution morphologique de la rivière sur cette zone d'étude. Les levés sont représentés sur la figure 2.3.

Depuis 1995, une évolution significative du lit mineur est observée sur la quasi-totalité des sections de la Garonne. Cette évolution se caractérise par différents phénomènes : un élargissement notable dans les sections M05, M09, M13, M14, M18-M19, un rétrécissement

entre les sections M14-M15 (avec des dépôts au milieu et sur la rive droite), ainsi que dans les sections M15, M17, M18-M19 et M19 (avec des dépôts sur les rives droite et gauche), ainsi qu'entre les sections M22-M23 (avec des dépôts sur la rive droite). Des déplacements du lit mineur sont également constatés dans les sections M06, M07, M16, M22 et M25. Dans le cas du méandre M6-M7, il est à noter que le lit mineur semble mal positionné dans le modèle Telemac-2D, car le déplacement remarqué entre les profils Telemac-2D et ceux de 2013 est uniforme et de même amplitude sur la rive gauche et la rive droite, avec une direction (vers la rive gauche) opposée au sens du méandrement. Parallèlement, un creusement significatif est remarqué dans les sections M12, M18, M21, M22, M24 et M25. Les zones décrites sont encadrées en rouge sur la carte représentée dans la figure 2.3.

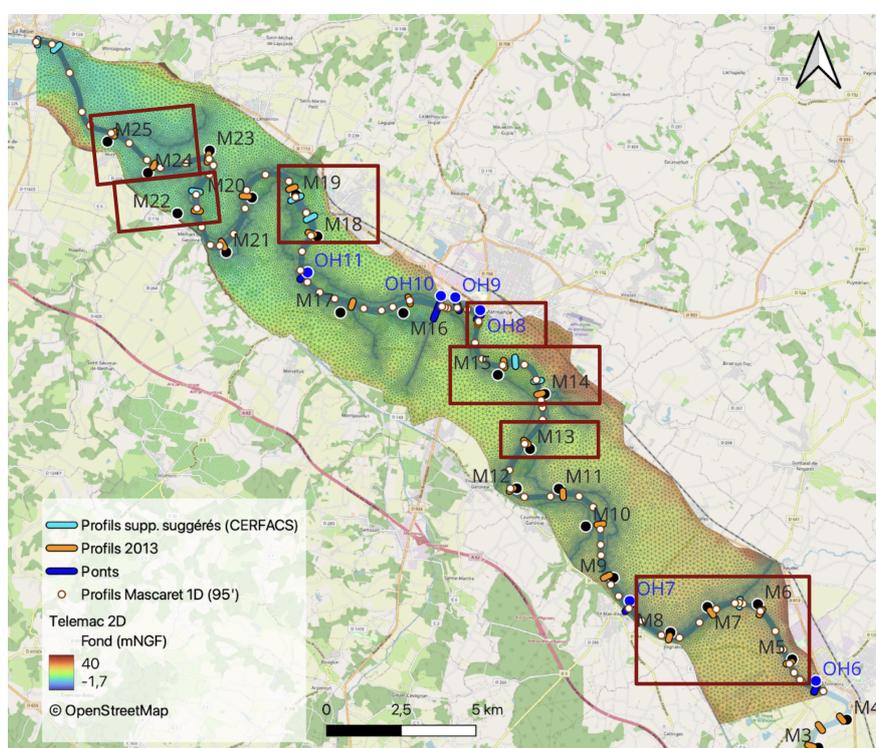


Figure 2.3: Carte représentant l'ancien maillage hydraulique Telemac-2D et le positionnement des levés in-situ 2013 et 2023. Les profils Mxy sont les noms donnés aux levés bathymétriques en rivière effectués en 2013. Les relevés notés OHxy désignent spécifiquement les levés réalisés sous les ponts lors de la même campagne de levés. En rouge sont encadrées les zones où l'évolution de la bathymétrie est la plus marquée.

Par ailleurs, la comparaison visuelle de l'ancien tracé de la rivière dans le maillage T2D avec des images satellitaires plus récentes (BD Ortho. IGN (>2019), Images Pléiades (Février 2023)), de cartes d'occupation du sol (IOTA2 2019 / classe Eau Permanente) avec, confirme les évolutions constatées sur le lit mineur. La figure 2.4 représente un exemple de résultats de comparaison pour le profil M18 en aval de Marmande où on constate un

déplacement et un élargissement du lit de la rivière.

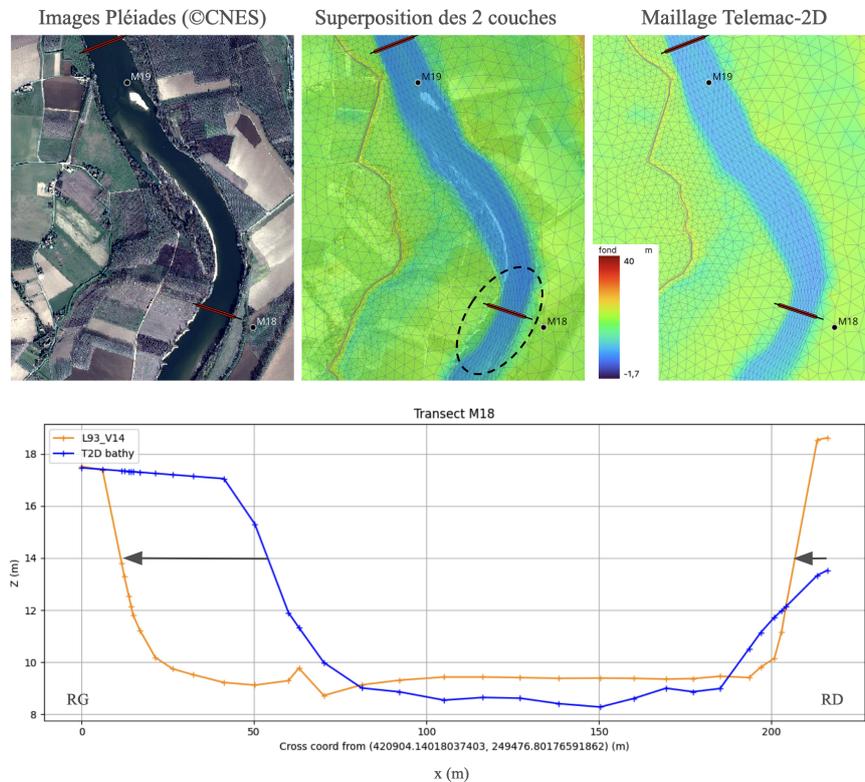


Figure 2.4: Évolution de la bathymétrie (déplacement du lit mineur) sur le profil en travers M18 entre 1995 (profil en travers issu de T2D en bleu) et 2013 (levé in-situ datant de 2013 en orange)

Comparaison des caractéristiques hydrauliques des profils de 2013 à l'ancienne bathymétrie de Telemac-2D

Les caractéristiques hydrauliques entre les profils de 2013 et leurs équivalents provenant du maillage T2D, basé sur la bathymétrie de 1995, ont été comparées. L'évolution de la largeur, du périmètre mouillé, de la section mouillée et du rayon hydraulique a été calculée en fonction de la hauteur d'eau.

Une évolution significative a été observée sur la majeure partie des profils. En amont de la zone d'étude, du profil M9 à M13, une augmentation globale des caractéristiques hydrauliques a été notée pour des valeurs de niveau d'eau similaires. Cette observation est cohérente avec l'élargissement observé sur ces profils en travers. Vers Marmande, en particulier le profil annoté "M15" situé au dernier méandre en amont de la ville, une baisse significative des caractéristiques hydrauliques du lit mineur a été notée entre les profils du modèle T2D et ceux de 2013. La figure 2.5 illustre l'évolution des 4 caractéristiques hy-

drauliques en fonction de la hauteur d'eau pour le profil issu du modèle T2D (en bleu) et le levé de 2013 (en orange) à la section M15 (vers Marmande). On constate ainsi une capacité réduite de 375 mètres carrés pour une hauteur d'eau de 8 mètres, comme illustré en (d), mettant en évidence cette différence. Par conséquent, les débordements du lit mineur pour les crues récentes (>2013) seront observés plus tôt que ce qui est actuellement modélisé.

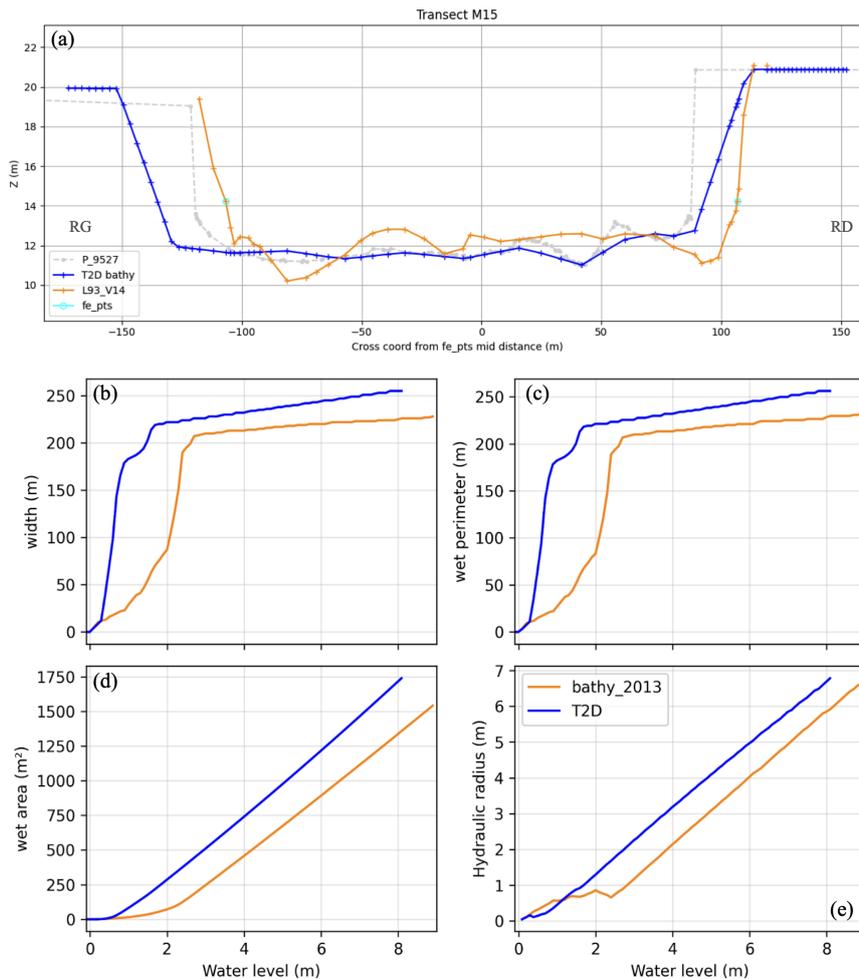


Figure 2.5: (a) représente le tracé des profils en travers de T2D (en bleu), du levé de 2013 (en orange) à la section M15 (vers Marmande). (b),(c),(d) et (e) représentent l'évolution des 4 caractéristiques hydrauliques (largeur de rivière, périmètre mouillé, surface mouillée et rayon hydraulique respectivement) en fonction de la hauteur d'eau relative, pour le profil issu de T2D (en bleu) et le levé de 2013 (en orange)

Dans la partie avale de la zone d'étude, notamment dans les tronçons M19, M20, M21, M22, M24 et M25, les caractéristiques hydrauliques restent relativement inchangées, malgré l'évolution de certains profils. Ceci est notamment dû au creusement du lit, mais avec

des berges plus hautes dans certains tronçons, comme observé pour le profil M25 dans la figure 2.6.

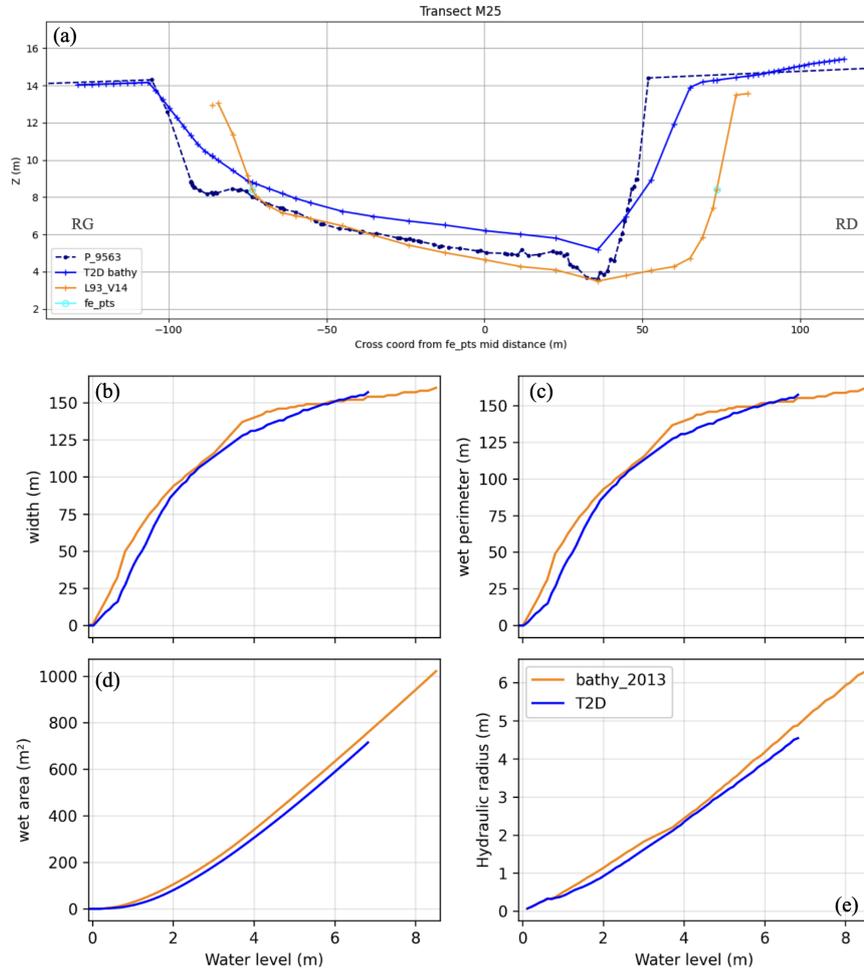


Figure 2.6: (a) représente le tracé des profils en travers de T2D (en bleu), du levé de 2013 (en orange) à la section M25 (vers Bourdelle). (b),(c),(d) et (e) représentent l'évolution des 4 caractéristiques hydrauliques (largeur de rivière, périmètre mouillé, surface mouillée et rayon hydraulique respectivement) en fonction de la hauteur d'eau relative, pour le profil issu de T2D (en bleu) et le levé de 2013 (en orange)

Analyse approfondie de l'évolution du lit mineur grâce à l'exploitation de données récentes : MNTs [Sintégra - RGE Alti] et images satellitaires

Une analyse plus approfondie du tracé du lit mineur, en utilisant les données les plus récentes disponibles, révèle des détails intéressants sur l'évolution de sa morphologie. Tout d'abord, les comparaisons entre les profils de 2013 et les Modèles Numériques de Terrain (MNT) montrent une cohérence satisfaisante, en particulier au niveau des berges, ce

qui suggère une stabilité du tracé de la rivière depuis 2013. Le MNT Sintégra présente l'avantage de fournir des observations bathymétriques supplémentaires, car ses levés LIDAR ont été effectués pendant une période d'étiage. Les berges sont observées plus en profondeur, allant jusqu'à 1 à 1.7 mètres plus bas par rapport aux observations du MNT RGE Alti, et dans certaines sections, cette différence peut atteindre 2 à 3 mètres sur certains tronçons. Le MNT Sintégra offre ainsi des détails complémentaires sur les berges des tronçons non couverts par la campagne de mesure in-situ bathymétrique. La figure 2.7 représente une comparaison des données bathymétriques/ issues des levés in-situ 2013 (en orange), du modèle T2D (en bleu), et des MNT Sintegra (en vert) et RGE Alti (en magenta), pour les profils M15 et M18.

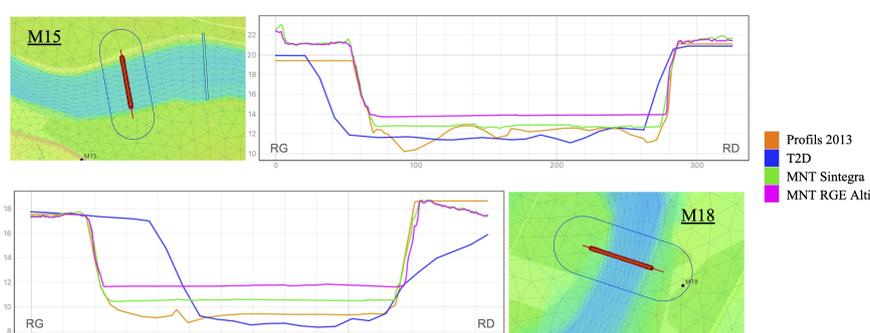


Figure 2.7: Comparaison des données bathymétriques/topographiques issues des levés in-situ 2013 (en orange), du modèle T2D (en bleu), et des MNT Sintegra (en vert) et RGE Alti (en magenta), pour 2 sections en travers: M15 et M18. La comparaison des données sur les profils M15 et M18 montrent l'évolution du lit mineur entre 1995 et 2021.

En comparant le tracé du lit mineur tel qu'il est représenté dans le maillage T2D avec les images récentes (BD Ortho. IGN (>2019), Images Pléiades (Février 2023)), on observe une évolution du cours d'eau sur toute sa longueur, caractérisée par des changements significatifs dans certaines zones, tels que l'apparition de dépôts pérennes en rivière ou une forte évolution de la largeur du cours d'eau. Cette constatation souligne la nécessité de réaliser des levés bathymétriques supplémentaires dans les zones présentant une évolution significative de la bathymétrie, notamment entre les sections M05 et M08, M14 et M15, M18 et M19, M22 et M23, ainsi que M25 et La Réole. La comparaison des positions des berges, telles qu'observées par les MNTs de Sintégra et de l'IGN à partir des levés Lidar récents, avec celles représentées par le maillage hydraulique du modèle T2D, complète ce constat en révélant des différences notables en termes d'élévation le long des berges et mettant en évidence les zones où ces différences sont les plus significatives.

En ce qui concerne les dépôts pérennes, le MNT de Sintégra permet une meilleure détection, car ses levés LIDAR ont été réalisés pendant une période d'étiage, lorsque la plupart des dépôts sont émergés. Cependant, il est important de noter que le Lidar Sin-

tégra ne couvre pas l'intégralité de la zone d'étude, ses levés s'arrêtent à Bourdelles, à quelques kilomètres en amont de La Réole. Le Lidar du RGE Alti n'arrive pas à détecter aussi efficacement les dépôts dans le lit mineur car le passage du Lidar s'est fait en hiver/printemps, lorsque certains dépôts sont submergés. Pour illustrer cela, deux profils sont présentés sur la figure 2.8 pour lesquels des levés bathymétriques ont été demandés pour la campagne 2023. On peut observer sur les coupes transversales que le MNT RGE Alti n'arrive pas toujours à détecter ces dépôts lorsqu'ils sont de petite taille et immergés, alors qu'ils sont plus facilement détectables par Sintégra.



Figure 2.8: Comparaison des données bathymétriques/topographiques issues des levés in-situ 2013 (en orange), du modèle T2D (en bleu), et des MNT Sintegra (en vert) et RGE Alti (en magenta), pour 2 tronçons, notés 37 et 32 où les MNT montrent la présence récente de dépôts pérennes dans la rivière.

Certains dépôts, notamment celui situé à La Réole, demeurent non détectés par aucun des MNT disponibles. Les levés Lidar de Sintegra n'ont pas couvert cette zone, tandis que le MNT RGE Alti ne l'a pas identifié car il était immergé lors du passage des levés. Cela souligne la nécessité d'un levé bathymétrique in-situ à cet endroit pour la campagne de 2023 (avant-dernier profil représenté dans la carte en figure 2.8).

En réponse à ces constats, huit profils supplémentaires ont été suggérés pour la campagne de levés de l'automne 2023 dans ces zones identifiées, dans le but de mieux comprendre et cartographier les changements morphologiques observés. Le tableau 2.4 reprenant l'emplacement et le justificatif des profils suggérés, et la Figure 2.9 représente leurs emplacements.

Table 2.4: Emplacement et justification des profils supplémentaires suggérés pour la campagne de levés de 2023

Profil supplémentaire suggéré	Justificatif
1 profil entre M6-M7	Déplacement du lit mineur
2 profils entre M14-M15; 2 profils entre M18-M19	Rétrécissement + présence de dépôt pérenne en milieu de rivière
1 profil entre M22-M23	Rétrécissement du lit mineur
2 Profils en amont de la Réole	Présence de dépôt pérenne en milieu de rivière, et besoin d'un profil bathymétrique à la limite aval du modèle

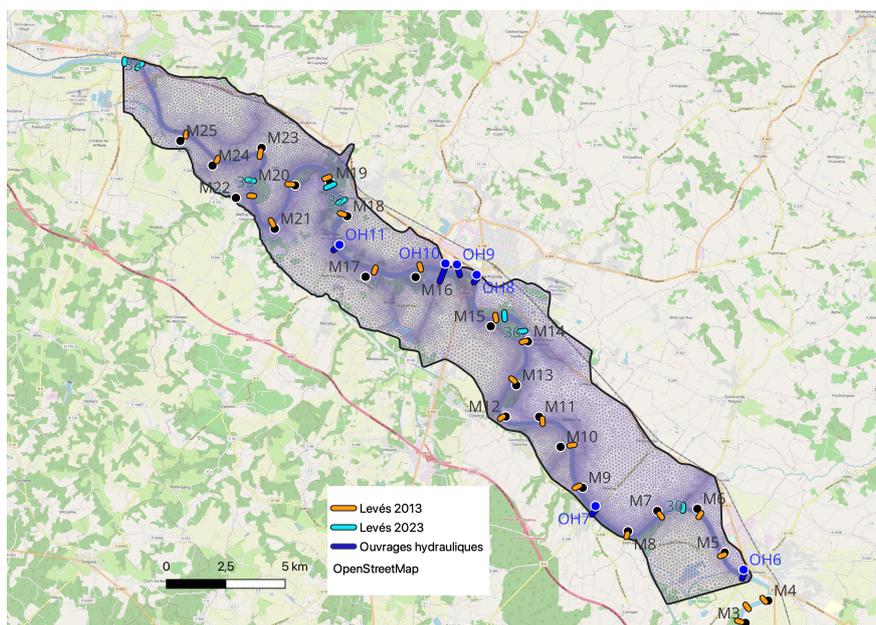


Figure 2.9: Carte représentant l'ancien maillage hydraulique Telemac-2D et le positionnement des levés in-situ 2013 et 2023 sur le secteur d'étude

Focus sur les levés bathymétriques de 2023 :

Les levés bathymétriques de l'année 2023 présentent donc une mise à jour des levés de 2013, auxquels s'ajoutent les 8 profils supplémentaires en bleu sur la figure 2.9. Cette campagne de levés de 2023 se distingue par une densité de points plus élevée, mais il est à noter qu'aucun changement significatif de la bathymétrie n'a été observé entre les relevés de 2013 et ceux de 2023 sur les 21 profils existants.

Levés bathymétriques non retenus pour la mise à jour du modèle Garonne

Comme présenté dans le tableau ref, il y a d'autres levés bathymétriques, notamment les levés sous les structures hydrauliques datant de 2013 et les profils plus anciens du SMEAG datant de 2005-2007, qui auraient pu enrichir la description de la bathymétrie pour le nouveau modèle. Ces données in-situ n'ont néanmoins pas été prises en compte dans la construction de la nouvelle géométrie du modèle pour les raisons suivantes :

- Les relevés bathymétriques de l'année 2013 effectués en dessous des ponts ne présentent pas de cohérence avec les modèles numériques de terrain (MNT) sur les berges, à l'exception du levé réalisé en dessous du pont OH06 à Tonneins, le seul profil retenu parmi les 6 disponibles et qui représentera la bathymétrie amont de la rivière sur le modèle.
- Les levés effectués par le SMEAG entre 2005 et 2007 avaient pour avantage de fournir une description plus détaillée sur deux zones d'intérêt avec 30 profils dans la zone amont du secteur, à Tonneins, et 24 profils décrivant la bathymétrie autour de Marmande. Cependant, après comparaison avec les profils de l'année 2013 et les MNT adjacents, il est apparu qu'ils manquaient de cohérence, tant au niveau de la description du fond du lit que du positionnement des berges.
 - À Tonneins, les premières comparaisons avec les profils de 2013 et les MNTs (RGE Alti, Sintégra) à Tonneins mettent en évidence un biais systématique sur les élévations, avec un biais positif d'au moins 2 mètres par rapport aux profils de 2013.
 - À Marmande, où seuls 3 profils de 2013 sont disponibles, l'évaluation de l'évolution du fond du lit entre 2005 et 2013 était plus limitée. La comparaison des profils SMEAG P263 et P270 avec leurs profils 2013 les plus proches, M16 et M17 respectivement, a néanmoins révélé une cohérence au niveau du fond du lit. En revanche, les positions des berges des profils SMEAG ne correspondent pas à ce qui est observé par les MNTs. En conséquence, les profils SMEAG ne sont pas considérés suffisamment exploitables pour compléter la description du fond de la rivière à Marmande.

2.2.3 Analyse de l'évolution de la topographie depuis 1995

Au-delà de la bathymétrie en lit mineur, les élévations des modèles numériques de terrain ont été comparées à la topographie du modèle T2D pour analyser les évolutions de la topographie dans les plaines d'inondation.

Dans un premier temps, les données topographiques des deux MNTs, Sintégra et RGE Alti, ont été comparées. Une bonne cohérence a été observée entre le MNT Sintégra et

celui du RGE Alti, avec une différence moyenne de -0.05 m et un écart-type de 0.43 m sur toute la zone. En ce qui concerne le lit mineur, une observation plus profonde a été permise par le MNT Sintégra en raison du moment de la prise de mesures : les relevés LIDAR de Sintégra ont été effectués en été lors de la période d'étiage, tandis que ceux de l'IGN (utilisés pour générer le MNT RGE Alti) ont été réalisés en hiver, lorsque le niveau de la Garonne était plus élevé. Concernant le lit majeur, aucune différence significative n'a été observée, à l'exception des plans d'eau, moins remplis lors du passage du Lidar de Sintégra.

La figure 2.10 présente la carte de différence d'élévation entre le RGE Alti DTM et celui de Sintégra, à une résolution horizontale de 1m.

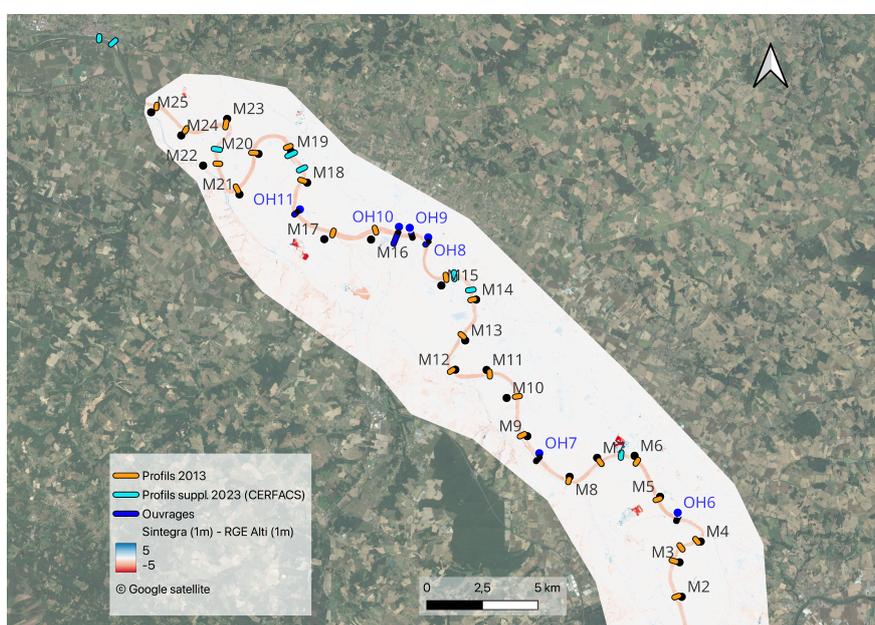


Figure 2.10: Représentation de la différence en termes d'élévation entre les MNT Sintégra et le RGE Alti à 1m de résolution spatiale

Dans un second temps, l'écart d'élévation entre le RGE Alti DTM (1×1 m) et le fond du maillage T2D (rasterisé en 10×10 m) a été étudié. Les principales différences se sont avérées se situer dans le lit mineur, avec des valeurs positives et élevées car les MNTs ne peuvent pas observer en dessous des zones submergées d'eau. En outre, des différences positives ont été observées sur l'ensemble des remblais routiers, ferroviaires et cours d'eau endigués qui ne sont pas pris en compte dans le maillage de T2D.

La figure 2.11 illustre cet écart d'élévation entre le MNT RGE Alti et le T2D.

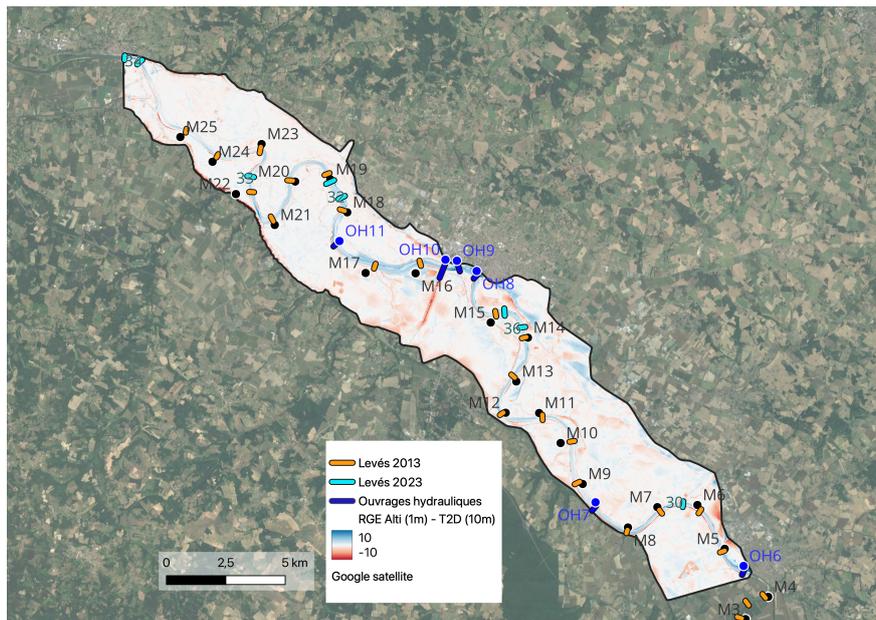


Figure 2.11: Représentation de la différence en termes d'élévation entre le MNT RGE Alti (1x1m) et le fond du maillage T2D (rasterisé à 10x10m)

Le maillage du SPC, fondé sur les données du MNT de Sintégra, est spécifiquement orienté vers le lit majeur, fournissant ainsi une représentation détaillée des remblais, des digues et des contours des affluents. Il facilite l'identification des principaux remblais et digues à intégrer dans le nouveau maillage, permettant ainsi de vérifier leur positionnement et leur tracé en comparaison avec les MNT de Sintégra et RGE Alti. La figure 2.12 illustre un exemple à l'amont de la zone d'étude en rive gauche, où une digue est incorrectement tracée dans l'ancien modèle T2D et deux autres (surlignées en bleu) ne sont pas incluses.

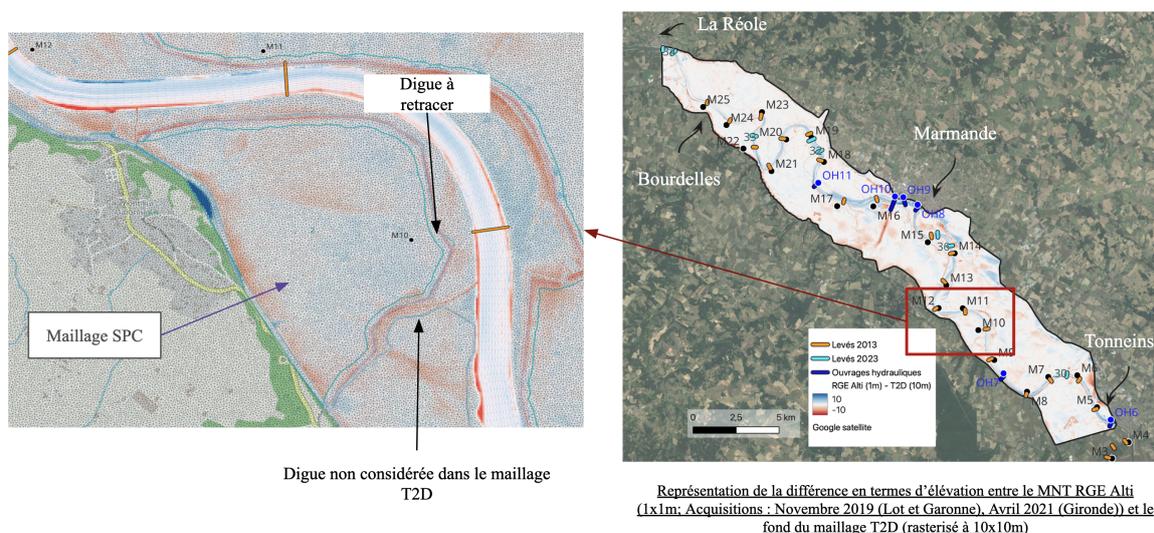


Figure 2.12: À droite, la figure illustre la différence d'élévation entre le MNT RGE Alti (1x1m) et le maillage T2D (10x10m). À gauche, Un zoom sur la zone en rouge avec le maillage SPC superposé sur la carte des différences d'élévation, mettant en évidence les défauts de traçage des digues dans l'ancien modèle T2D.

Cette combinaison de produits permet une description plus précise des structures d'intérêt pour le calcul hydraulique, telles que les remblais et les digues, facilitant ainsi l'identification des principales lignes de contraintes supplémentaires à intégrer dans le nouveau maillage T2D.

2.3 Conclusions

Dans ce chapitre, l'évolution morphologique du lit de la Garonne et de ses plaines d'inondation a été évaluée. Une comparaison des levés bathymétriques de 2013 avec l'ancienne bathymétrie du modèle T2D a révélé des changements significatifs dans les caractéristiques hydrauliques le long de plusieurs tronçons de la Garonne. Les images exploitées et les MNTs ont confirmé ces observations en mettant en évidence des zones supplémentaires où le tracé de la Garonne a évolué, avec des variations de la largeur du lit mineur et la présence de dépôts pérennes.

En ce qui concerne la topographie, la cohérence entre les MNTs a été validée. La comparaison des MNTs à l'ancienne topographie représentée dans le modèle T2D a montré des différences d'élévations localisées en plaines d'inondation, soulignant la nécessité de corriger certains tracés de digues et d'intégrer des digues et des remblais pour une représentation plus précise de la dynamique hydraulique en lit majeur. L'utilisation du maillage SPC a été bénéfique pour identifier le tracé de ces structures.

En résumé, ces analyses ont mis en évidence l'évolution morphologique de la Garonne au fil du temps et ont souligné l'importance de mettre à jour le maillage hydraulique du modèle en utilisant les données les plus récentes et en améliorant la résolution spatiale. Le prochain chapitre détaille les données utilisées pour générer une nouvelle géométrie du modèle, notamment la création d'un maillage plus complexe et détaillé des structures hydrauliques, ainsi que la construction d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) complet intégrant les dernières informations sur la bathymétrie et la topographie, afin de l'appliquer au maillage mis à jour.

Chapter 3

Mise à jour du modèle Garonne

3.1 Construction du nouveau modèle 2D

L'un des avantages de Telemac 2D, par rapport au modèle Mascaret 1D, réside dans sa capacité à caractériser l'écoulement à travers la hauteur d'eau et la vitesse sur deux dimensions. Cette capacité repose sur l'utilisation d'un maillage constitué de facettes triangulaires 3D de tailles et de formes variées. Chaque sommet de triangle, désigné comme nœud de maillage, est un point de calcul défini par ses coordonnées planimétriques (X, Y), son altitude (Z) et son coefficient de frottement. Cette représentation fournit une maquette virtuelle du terrain, sur laquelle sont simulés les transferts d'écoulement d'eau entre les nœuds. Cette approche met en évidence l'importance d'assurer une représentation précise à deux niveaux :

- D'une part, il est crucial de considérer la qualité du modèle numérique de terrain disponible à partir duquel l'altimétrie du maillage est déduite. Cela inclut notamment la qualité du nettoyage entre les Modèles Numériques de Surface (MNS) et les Modèles Numériques de Terrain (MNT), ainsi que la précision spatiale de ces données.
- D'autre part, la précision du maillage triangulaire et sa capacité à décrire finement les secteurs présentant une complexité hydraulique ou d'importance en termes de dynamique de l'écoulement doivent être assurées. Cela concerne notamment les ouvrages tels que les digues, les remblais, les ponts, les seuils, ainsi que les zones sensibles. La précision spatiale des résultats de calcul dépend directement de la taille des mailles du modèle.

La mise à jour du modèle T2D sur la Garonne-Marmandaise repose sur la mise à jour de sa géométrie. Ce chapitre détaille le processus de génération de la nouvelle géométrie du modèle en trois étapes. La première étape consiste à construire un « Modèle Numérique de Terrain complet » en utilisant les données récentes de bathymétrie et

de topographie. Ensuite, la génération du nouveau maillage 2D inclura plus de détails de description structurale, notamment un maillage affiné sur les structures pertinentes en termes d'hydrodynamique. Enfin, la dernière étape consiste à combiner les données d'élévation haute résolution du MNT complet avec le maillage existant, permettant ainsi la génération de nœuds de mailles tridimensionnels (X, Y, Z).

3.1.1 Génération d'un MNT complet en tirant profit des acquisitions bathymétriques et topographiques récentes

La construction d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) complet, englobant à la fois la description du lit mineur et du lit majeur de la Garonne, est réalisée en plusieurs étapes.

En ce qui concerne la topographie, elle est décrite par deux MNT disponibles, à savoir le RGE Alti et le Sintégra. Ces deux MNT, présentant une résolution spatiale identique (1x1m), offrent une cohérence dans la représentation du terrain et des structures hydrauliques telles que les digues et les remblais (fig 2.2). Le choix se porte sur le MNT RGE Alti de l'IGN, car il couvre l'intégralité de la zone d'étude, de Tonneins à La Réole, contrairement au MNT de Sintégra, limité à Bourdelles en amont de La Réole.

Concernant la description du lit mineur, il est à noter qu'une représentation exhaustive n'est pas disponible uniquement à partir des Modèles Numériques de Terrain (MNT), ces derniers ne permettant pas d'observer les zones immergées, y compris le fond de la rivière. Cependant, ils fournissent des informations précises sur les berges, et les MNT RGE Alti et Sintégra (1x1m) présentent une cohérence entre eux (Section 2.2.2). Le MNT RGE Alti est privilégié pour décrire les parties non immergées des berges le long de la Garonne. Quant aux élévations du fond du lit de la rivière, non détectées par le LIDAR, elles seront déduites des profils en travers collectés lors des campagnes de 2013 et 2023 (ces profils étant également cohérents entre eux, sans évolution majeure du lit mineur entre 2013 et 2023), et un MNT du fond de lit mineur sera élaboré à partir d'une interpolation entre ces profils, en respectant le tracé sinueux de la rivière avec les données de la ligne centrale (SANDRE, 2.3).

Génération du MNT fond du lit mineur :

La caractérisation du fond de la rivière est simplifiée et réalisée en utilisant les données bathymétriques collectées principalement lors de la campagne de mesure de 2023. La Figure 3.1 présente les profils sélectionnés.

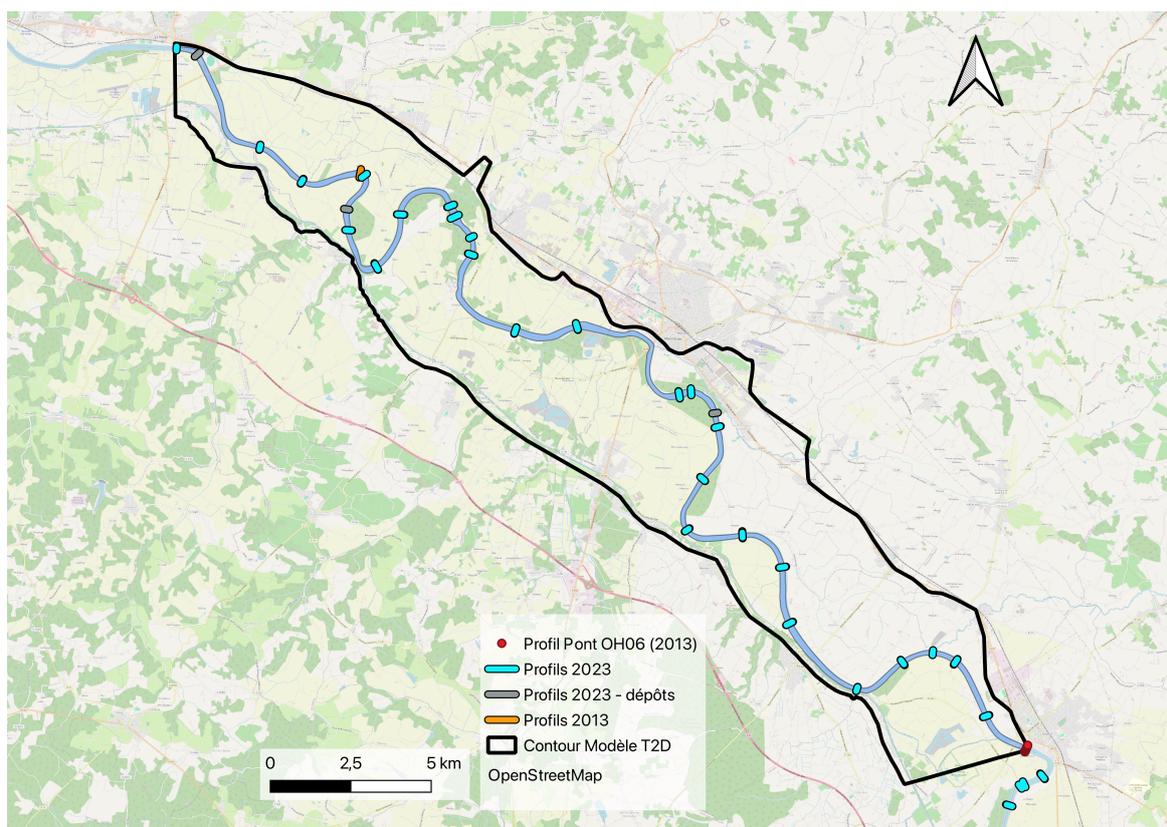


Figure 3.1: Profils bathymétriques sélectionnés pour le MNT fond du lit mineur.

Il est à noter que certains profils in-situ relevés en 2023 ne sont pas retenus, notamment ceux qui identifient des dépôts pérennes suggérés par le CERFACS pour cette campagne, représentés en gris sur la Figure 3.1. Cette décision découle de plusieurs facteurs. Tout d'abord, ces profils sont souvent éloignés d'environ 1 à quelques kilomètres. En les interpolant, il existe un risque d'étendre ces dépôts sur une grande partie du fond du lit de la rivière, entraînant ainsi une sous-estimation notable de la surface mouillée du lit mineur. Une telle erreur pourrait affecter la précision des prévisions relatives au moment du débordement en lit majeur et aux volumes d'eau déversés dans les plaines inondables. De plus, la présence de ces dépôts semble être localisée, selon les observations issues des images Pléiades et des cartes OSO, et ces dépôts localisés ont généralement un impact limité sur l'écoulement lors des crues débordantes. Bien que ces dépôts puissent jouer un rôle significatif dans le contexte d'études sur le transport sédimentaire avec des débits moins élevés, ils sont considérés comme négligeables dans le cadre de notre étude.

L'interpolation entre les profils bathymétriques sélectionnés le long de la rivière est réalisée à l'aide de l'outil d'interpolation intégré dans le logiciel HEC-RAS, qui est également utilisé pour la modélisation hydrodynamique en 1D et en 2D (utilisant les mêmes

équations de calcul que Mascaret et Telemac-2D). Ce processus se déroule en deux étapes principales : tout d'abord, des sections transversales sont générées tous les 2 mètres en interpolant entre les profils retenus, ce qui permet d'améliorer la densité de représentation du fond du lit mineur et de mieux moduler les variations de profondeur le long des 50 kilomètres de la rivière. Les contours du lit mineur, ainsi que les sections transversales, sont précisément définis en utilisant la carte d'occupation du sol (OSO), qui fournit des informations essentielles sur la nature du terrain, y compris la classe "Eau Permanente" qui délimite le contour du lit mineur. Une fois les profils interpolés le long de la ligne centrale de la rivière, une description bidimensionnelle du lit mineur est générée sous forme de Modèle Numérique de Terrain (MNT) en utilisant l'outil RasMapper du logiciel HEC-RAS, à partir des sections transversales interpolées. Le MNT du fond du lit de la rivière est créé avec une résolution spatiale horizontale de 1x1 mètre afin de garantir sa compatibilité avec celui du RGE Alti, ce qui facilitera la combinaison des deux dans la prochaine étape. La Figure 3.2 illustre les étapes décrites pour un tronçon de la rivière.

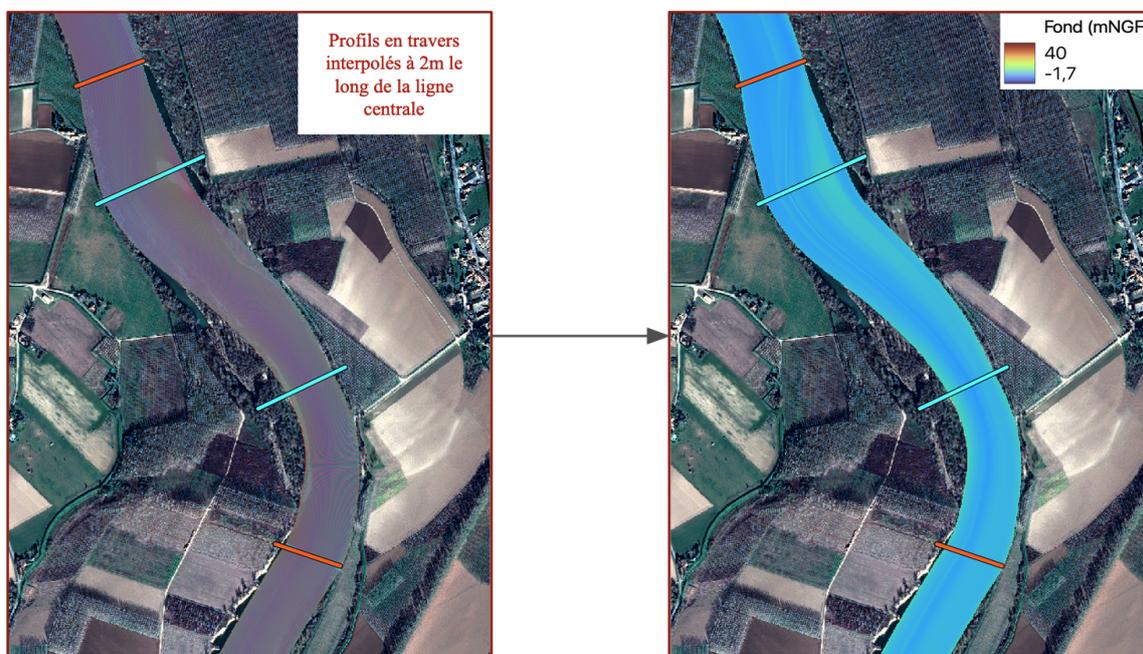


Figure 3.2: Étapes de la génération du MNT fond du lit mineur sur le logiciel HEC-RAS.

Intégration du MNT du fond du lit mineur avec le RGE Alti et construction du MNT complet (bathymétrie + topographie):

La prochaine étape consiste à fusionner le MNT du fond du lit mineur avec le RGE Alti, afin de créer un modèle numérique de terrain (MNT) complet intégrant à la fois

la bathymétrie du lit mineur de la rivière et la description de ses rives et de ses plaines d'inondation. Cette opération permettra d'assurer une transition fluide entre les zones du lit mineur et du lit majeur de la rivière, assurant ainsi une représentation cohérente de l'élévation du terrain sur l'ensemble de la zone d'étude.

La Figure 3.3 présente le Modèle Numérique de Terrain (MNT) complet sur la carte à droite, accompagné d'un zoom sur le méandre en amont de Marmande à gauche. Pour deux exemples de profils en travers situés dans cette zone, M18 et profil 32, trois différents produits sont comparés : les levés bathymétriques de 2023 représentés en bleu, le MNT RGE Alti en magenta, et le MNT complet en noir (superposé au MNT RGE Alti sur le lit majeur et les berges). Les zones entourées en gris de chaque côté des rives gauche et droite indiquent les zones d'interpolation entre les deux MNT (lit mineur, lit majeur) pour assurer la fusion.

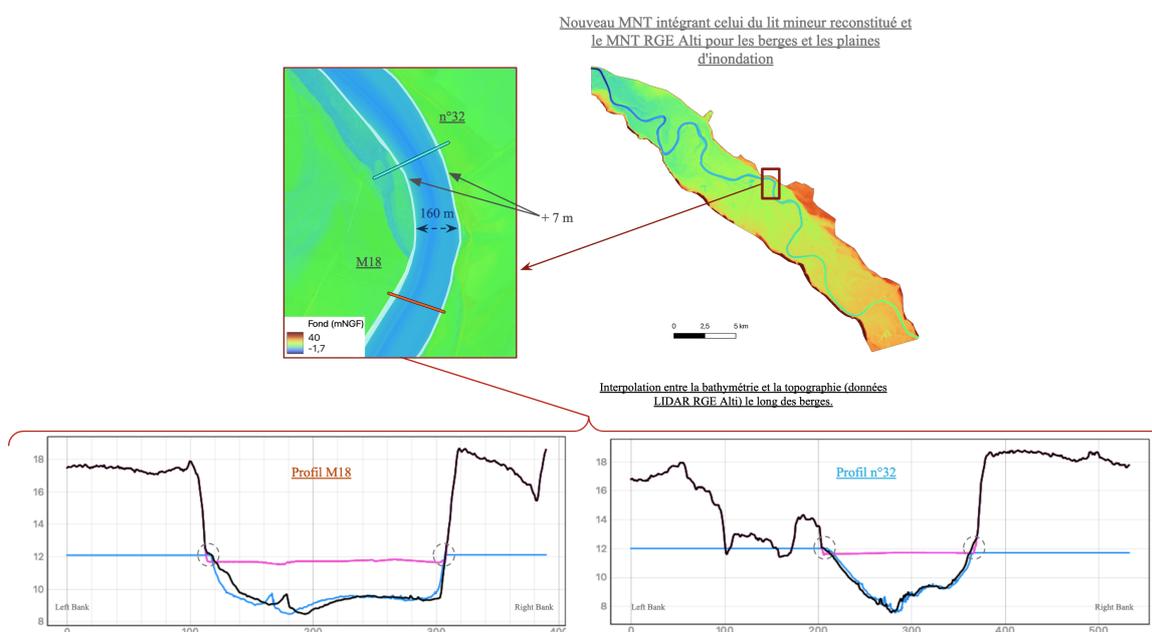


Figure 3.3: MNT complet sur la carte ci-haut, deux exemples de coupes transversales ci-bas

Cette démarche aboutit à l'obtention d'un MNT complet qui offre une représentation cohérente et exhaustive de l'élévation de terrain de la rivière et de ses plaines inondables.

L'annexe Appendix B contient une fiche technique détaillant les étapes suivies pour générer le MNT complet, de la préparation des données bathymétriques à la création du MNT du fond du lit mineur et son interpolation avec le MNT du lit majeur.

3.1.2 Construction du maillage - Mise à jour des lignes de contrainte

L'ancien maillage est composé de 82,116 éléments et de 41,416 noeuds. Les mailles du lit mineur n'excèdent pas 40 m, celles des digues 80 m et enfin celles du lit majeur 150 m.

L'emprise du nouveau maillage est légèrement plus étendue, notamment pour intégrer le canal du Midi en rive gauche (figure 3.4). Le nouveau maillage, couvrant 50 kilomètres de lit mineur, est constitué de 121,543 éléments et de 61,236 noeuds. Les mailles varient de 2.5 m (notamment au niveau des digues) à 160 m dans les plaines d'inondation. Contrairement à l'ancien maillage, qui incluait environ 10 digues et 1 remblai, le nouveau maillage décrit une topographie plus complexe, avec 17 digues et plus de 8 remblais (ferroviaires, routiers).

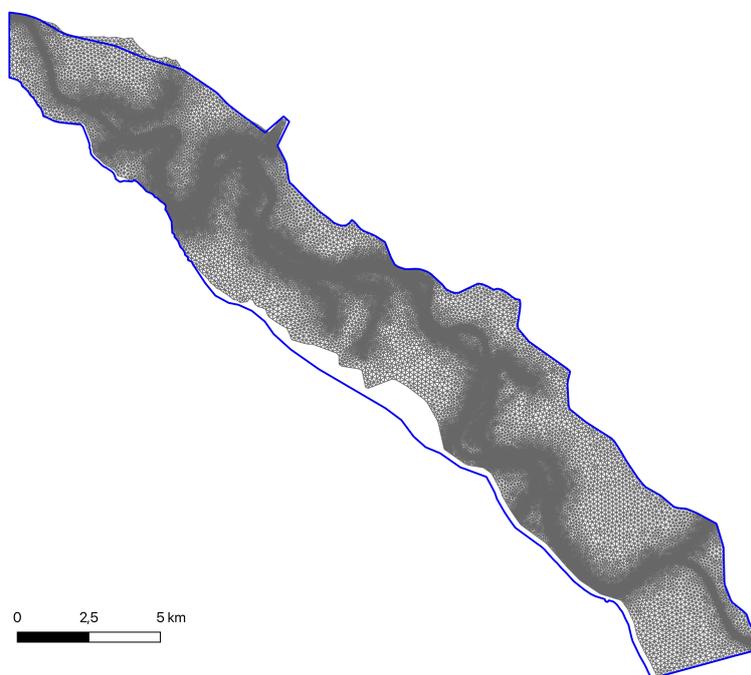


Figure 3.4: Maillage de l'ancien modèle Telemac-2D en noir, tracé de l'emprise du nouveau maillage en bleu.

La construction du nouveau maillage a été précédée d'une reconnaissance du secteur à modéliser, afin d'identifier tous les éléments structurants susceptibles d'influencer le comportement hydraulique des écoulements. Une fois identifiés, ces éléments ont été intégrés dans le modèle en cours d'élaboration. Leur identification s'est appuyée sur les Modèles Numériques de Terrain (MNT) et le maillage SPC principalement (section 2.2.3). La construction du maillage s'est effectuée à l'aide du mailleur BlueKenue, en intégrant les données au format shapefile sous forme de lignes de contraintes (softlines, hardlines) et

de zones de densification.

Les points suivants ont fait l'objet d'une attention particulière dans le cadre de la génération du maillage :

Représentation du lit mineur

La géométrie du lit mineur a été définie en utilisant un maillage orienté, caractérisé par des mailles triangulaires alignées dans le sens de l'écoulement. La Garonne est représentée par un canal à mailles orientées comprenant 12 mailles sur sa largeur, offrant ainsi une description détaillée de la section hydraulique tout en limitant le nombre de noeuds de maille pour ne pas allonger les temps de calcul. Les mailles ont été alignées longitudinalement avec un espacement de 50 m entre les noeuds. Les variations de largeur du lit mineur ont été intégrées dans le maillage grâce à l'ajout de deux lignes de contrainte de part et d'autre du lit mineur, permettant ainsi une représentation précise des berges de la Garonne, basée sur la classe "Eau Permanente" de la carte OSO de 2022.

La figure 3.5 illustre le nouveau maillage avec un zoom sur un méandre caractéristique du cours d'eau, près de Marmande.

Représentation des routes en remblai et les digues en lit majeur

Le lit majeur est constitué d'un maillage déstructuré, à l'exception des digues qui sont représentées par des Channel Mesh. Une attention particulière a été portée à la construction de la géométrie des digues ainsi que des remblais routiers et ferroviaires.

La prise en compte des remblais et des digues exige une représentation précise de leur rôle en tant qu'obstacles aux écoulements et de leur éventuelle submersion. Pour ce faire, il est nécessaire de représenter conjointement l'altimétrie des pieds de talus et celle du sommet (crête).

La décision a été prise d'intégrer la description de l'obstacle dans le maillage, que ce soit pour les digues ou pour les remblais routiers/ferroviaires. Pour les digues, des Channel Mesh de 5 noeuds en largeur ont été créés, avec une distance de mailles en longueur de 35 mètres. Cela permet de représenter la base de la digue, le talus et même la crête. Les digues sont ainsi décrites transversalement avec un minimum de 5 points de calcul (deux points au pied du talus et trois points en crête), la ligne centrale du Channel Mesh suivant le centre de la largeur de la digue. Pour les routes et les voies ferrées, le maillage est adapté à la forme trapézoïdale des remblais, avec deux lignes de contrainte représentant les points de crête du remblai, et un polygone de densité entourant les lignes de contrainte

pour prendre en compte de manière plus précise le pied du talus.

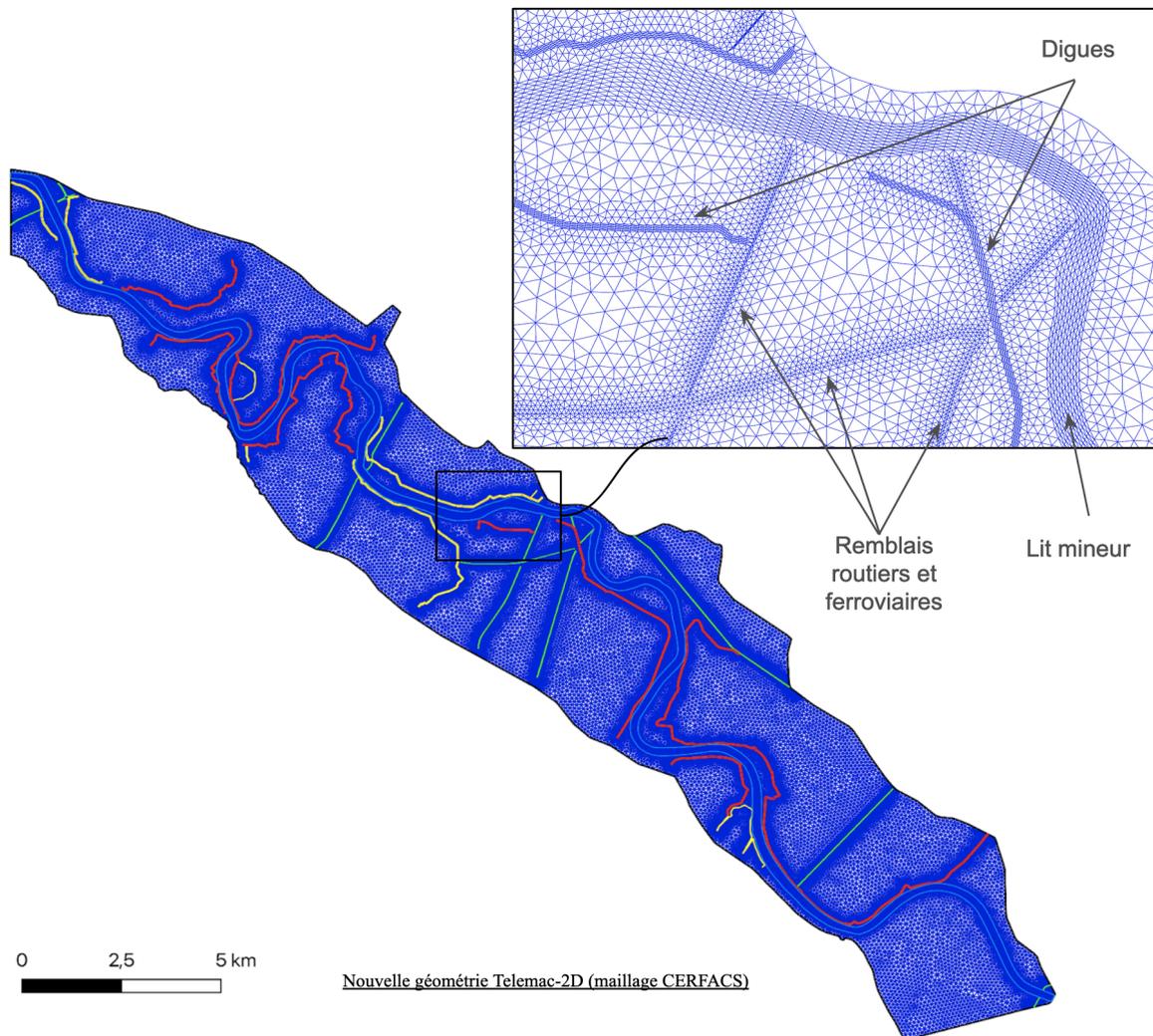


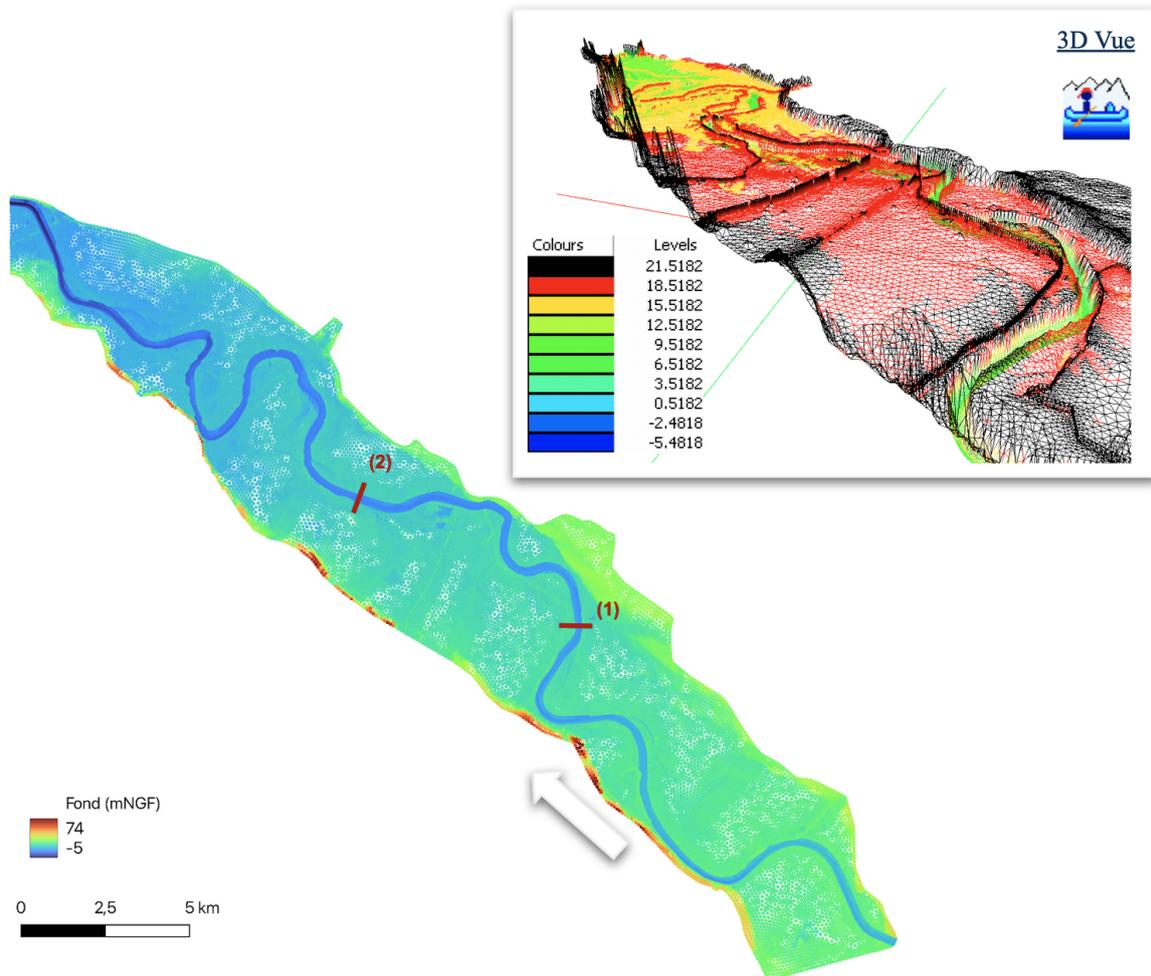
Figure 3.5: Nouveau maillage Telemac-2D avec un zoom sur un méandre caractéristique du cours d'eau, près de Marmande, montrant la représentation du lit mineur et des digues et remblais.

Les détails fournis à BlueKenue pour générer le maillage sont cités en Annexe ??.

Représentation des élévations du MNT complet aux nœuds du maillage

Une fois le maillage défini, les noeuds, jusqu'ici décrits en coordonnées x et y, se voient attribuer leurs données altimétriques à partir du MNT complet généré. Étant donné que la taille minimale des mailles est de 2.5 mètres et que le MNT a une résolution plus fine

de 1x1 mètre, chaque noeud du maillage a été associé à l'élévation du pixel correspondant du MNT. Cette procédure garantit une représentation précise de l'altitude de chaque point du terrain modélisé.



Nouvelle géométrie Telemac-2D - Maillage incluant l'élévation (élévation des nœuds basée sur le MNT complet)

Figure 3.6: Résultat du mapping des élévations du MNT sur le nouveau maillage, avec une vue 3D sur une partie du maillage. Les élévations supérieures à 21.5 mètres au-dessus du niveau de la mer sont mises en évidence en noir.

Les profils en travers de deux sections figurant dans la figure 3.6, annotées (1) et (2) sont tracés dans la figure 3.7. Le MNT complet est affiché en noir, l'ancien maillage de T2D et ses élévations en bleu, et le nouveau maillage 3D (maquette de terrain simplifiée pour les calculs hydrauliques) en vert. On remarque une meilleure représentation de la position et de la forme des digues des deux côtés de la Garonne, ainsi qu'une mise à jour

de la forme du lit mineur.

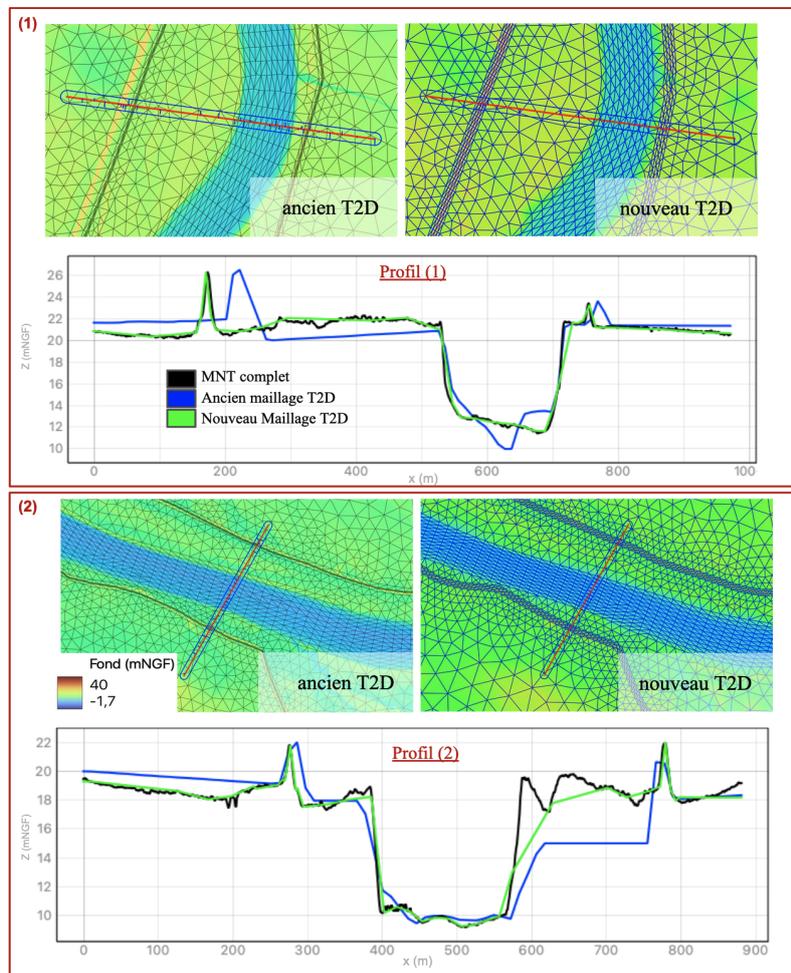


Figure 3.7: Profils en travers sur deux sections annotées (1) et (2) dans figure 3.6.

En conclusion, la génération du nouveau maillage 3D permet de prendre en compte efficacement la complexité du terrain en termes de composantes hydrodynamiques, fournissant ainsi une maquette de terrain mise à jour et plus complexe. Cette dernière offre une base solide pour faire tourner des scénarios de simulations d'inondations plus réalistes sur le secteur de la Garonne-Marmandaise.

3.2 Lancement du nouveau modèle

3.2.1 Conditions aux limites

Le modèle hydraulique comporte deux frontières liquides principales : la première, située en amont, à Tonneins, englobant à la fois le lit mineur et une partie du lit majeur en rive gauche et droite. La seconde, localisée en aval, à La Réole, toujours à la limite du modèle 2D, comprenant le lit mineur et sur une partie du lit majeur droit et gauche également.

Frontière amont

En amont, il est possible d'imposer un débit constant ou de spécifier un hydrogramme. Le débit entrant est injecté sur toute la frontière amont sans répartition spécifique entre les deux lits mineur et majeur. La même approche a été faite pour l'ancien modèle, et pour s'assurer que cette approche n'entraîne pas des résultats imprécis deux modèles ont été développés : l'un avec une seule frontière liquide commune à l'amont (« 1CL ») et l'autre avec deux frontières distinctes (« 2CL ») l'une en lit mineur l'autre en lit majeur, permettant ainsi d'imposer deux débits distincts. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de détérioration significative des résultats de simulation lorsqu'on met une même condition limite sur le lit mineur et majeur. Une seule condition limite amont a donc été retenue (commune pour le lit mineur et lit majeur) pour le nouveau modèle.

Frontière aval

En aval, les conditions peuvent être définies par une cote constante, un limnigramme ou une loi de tarage du type $Z(Q)$. La loi de tarage à La Réole a été maintenue comme dans l'ancien modèle, et a été appliqué à la frontière aval du nouveau modèle.

3.2.2 Paramétrage du modèle (Frottement) - Calage en régime permanent

Dans le cadre de la calibration du modèle, le coefficient de frottement demeure un paramètre crucial à définir pour chaque segment du lit mineur et du lit majeur.

Dans l'ancien modèle, la rugosité est caractérisée dans le lit mineur par trois valeurs de coefficient de Strickler (K_s), déterminées à partir des données de mesure des quatre stations à Tonneins, Mas d'Agenais, Marmande et La Réole :

- Entre Tonneins et l'aval de Mas d'Agenais : $K_s = 45$
- De l'aval de Mas d'Agenais à l'amont de Marmande : $K_s = 38$

- De l'amont de Marmande à La Réole : $K_s = 40$

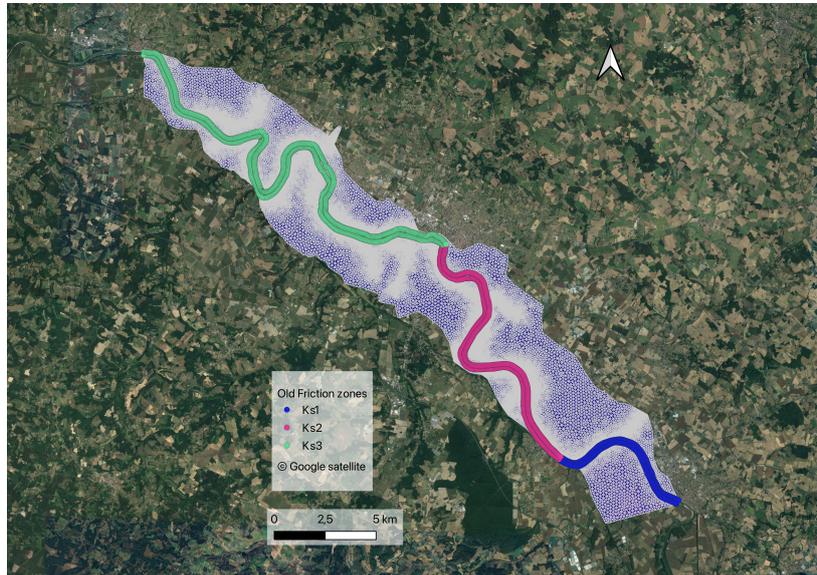


Figure 3.8: Spatialisation du coefficient de frottement en lit mineur dans l'ancien modèle T2D.

Pour le lit majeur, le choix du coefficient de frottement repose sur une méthodologie établie par le LNHE. Considérant la nature générale de la surface du lit majeur comme une zone de champs cultivés à végétation plus ou moins haute, un coefficient de Strickler uniforme de 17 a été sélectionné, conformément aux recommandations méthodologiques.

Dans le nouveau modèle, étant donné la disposition de cinq stations de mesure en lit mineur (Tonneins, Mas d'Agenais, Marmande, Couthure-sur-Garonne et La Réole), quatre zones de K_s ont été définies en lit mineur :

- K_{s1} : Entre Tonneins et Mas d'Agenais
- K_{s2} : De Mas d'Agenais à Marmande
- K_{s3} : De Marmande à Couthure sur Garonne
- K_{s4} : De Couthure sur Garonne à La Réole

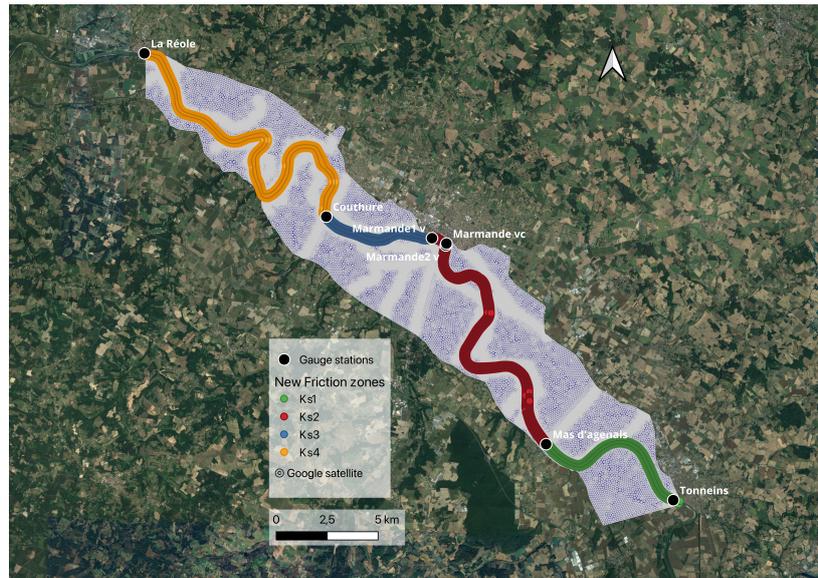


Figure 3.9: Nouvelle spatialisation du coefficient de frottement en lit mineur - Nouveau modèle T2D

La position des stations de mesure et les délimitations spatiales des zones K_s pour l'ancien et le nouveau modèle sont représentées dans les figures 3.8 et 3.9 respectivement. Le calage des coefficients de frottement est en cours pour le lit mineur pour différentes simulations en régime permanent avec des débits non débordants (allant de 440 à 2340 m³/S, le plus fort débit pour lequel les hauteurs d'eau sont disponibles au niveau des 5 stations).

Concernant les plaines d'inondation, lors du calage du lit mineur, une seule valeur est retenue pour tout le lit majeur, avec un K_s par défaut de 17, identique à celui de l'ancien modèle. La correction des valeurs de K_s en dynamique dans les zones hydrauliquement indépendantes en lit majeur (telles que définies dans l'ancien modèle) sera réalisée par assimilation de données à partir des images satellitaires Sentinel et des images aériennes acquises pour les récentes crues débordantes.

3.3 Conclusions

En conclusion, ce chapitre a présenté les étapes de génération de la nouvelle géométrie du modèle Telemac-2D pour la Garonne-Marmandaise. La construction du nouveau maillage avec des noeuds tridimensionnels (X, Y, Z) offre une représentation plus réaliste du terrain, prenant en compte la complexité des éléments hydrodynamiques tels que les digues, les remblais et les ponts. Cette mise à jour permettra de procéder au calage des paramètres de frottement, actuellement en cours, pour obtenir des simulations d'inondations plus précises et adaptées aux événements récents sur la Garonne-Marmandaise.

L'intégration du MNT complet garantit une représentation cohérente de l'élévation du terrain sur l'ensemble de la zone d'étude. La construction du maillage, en mettant l'accent sur la précision et la résolution, permet une meilleure prise en compte des caractéristiques hydrauliques locales, essentielles pour des simulations précises des inondations.

En conclusion, les efforts se concentrent actuellement sur la calibration des coefficients de frottement au niveau du lit mineur, processus en cours visant à affiner la précision des simulations hydrauliques. Parallèlement, l'assimilation de données provenant des images satellitaires Sentinel et des images aériennes recueillies lors des récentes crues débordantes sera utilisée pour ajuster les coefficients de frottement dans les plaines d'inondation. Cette approche permettra d'améliorer la précision des simulations et de mieux représenter les conditions réelles d'écoulement lors des événements de crue, renforçant ainsi la fiabilité des prédictions hydrodynamiques dans ce secteur d'étude.

Chapter 4

Conclusions et perspectives

Dans le cadre du projet SCO FloodDAM-DT, cette étude vise à renforcer la capacité de prévision et de gestion des risques d'inondation à l'échelle mondiale en exploitant les avancées technologiques en matière de modélisation hydraulique. La qualité des données topographiques et bathymétriques est essentielle pour garantir la précision des prévisions hydrodynamiques, et les progrès récents dans les techniques de télédétection offrent désormais des possibilités inédites pour obtenir des données de haute qualité.

Focalisée sur la portion de la Garonne entre Tonneins et La Réole, cette étude avait pour objectif de mettre à jour le modèle Telemac 2D existant, dont la géométrie repose sur des données datant de 1995. En intégrant de nouvelles données in-situ et télédéteçtées, un nouveau modèle hydraulique plus précis et représentatif de la réalité du terrain a été créé.

Les deux principaux chapitres de ce rapport ont abordé l'évolution de la bathymétrie et de la topographie depuis 1995, ainsi que la construction d'un nouveau modèle hydraulique incluant la mise à jour du maillage et la génération d'un MNT complet. Le paramétrage et le calage du modèle sont en cours, et les travaux de calibration des coefficients de frottement pour le lit mineur visent à améliorer encore les performances du modèle.

Les améliorations apportées seront évaluées à travers des simulations sur les récents événements de crues dans le bassin de la Garonne Marmandaise. Ce nouveau modèle remplacera l'ancien et servira de base pour des études de recherche sur l'assimilation de données de télédétection pour la prévision des risques d'inondation.

En termes de perspectives, il est prévu d'évaluer l'apport des données Pleiades et des données 3D de la mission CO3D afin de déterminer dans quelle mesure les MNTs générés par ces nouvelles données satellitaires peuvent se rapprocher de ce que représente le MNT RGE Alti. Cela permettra de créer des modèles hydrodynamiques plus précis et adaptables à n'importe quelle zone sensible aux inondations dans le monde, grâce à leur

haute précision et résolution spatiale.

Appendix A

Fiche technique - Génération du MNT complet

Cette fiche technique détaille le processus de création du MNT complet à partir de données de profils en travers et de géométrie de la rivière en utilisant les logiciels HEC-RAS et QGIS.

A.1 Mise en forme des profils en travers (.shp) sous .csv pour les importer dans HEC-RAS:

- a- Le .shp doit contenir des profils en travers couvrant toute la longueur de la rivière à modéliser, y compris les limites amont et aval :
 - Inclure deux profils en travers aux limites du modèle, l'une tout en amont représentant la bathymétrie sous le pont à Tonneins, et l'autre en aval, qui est le levé effectué à la Réole lors de la campagne de 2023.
- b- Découper le .shp des profils en travers suivant le contour du lit mineur :
 - Générer à partir de la classe eau permanente de la carte OSO un polygone du lit mineur.
 - Modifier manuellement le polygone du lit mineur pour qu'il ne contourne que la zone immergée de la rivière (telle qu'observée par le MNT RGE Alti).
- c- Générer à partir du .shp des profils en travers un .csv type avec le format demandé par HEC-RAS pour l'import :
 - Créer un fichier .csv avec les colonnes (River, Reach, RS, X, Y, Z).
 - Les profils en travers (RS) sont listés de l'aval vers l'amont.

- Un script python a été développé pour générer automatiquement le .csv adéquat en fournissant les profils en travers sélectionnés en .shp.
- S'assurer d'avoir le fichier .csv au format .csv (MS-DOS) avec un séparateur ",".

A.2 Créer le MNT du lit mineur sous HEC-RAS :

a- Sous HEC-RAS : importer la ligne centrale de la Garonne (import du .shp en néditant la Rivière dans la géométrie du projet sur Rasmapper) et les profils en travers (en important le .csv dans la rubrique Géométrie) :

a1- Dans *Rasmapper* :

- * Créer une nouvelle géométrie en cliquant droit sur "Geometries" puis "Create new geometry".
- * Renommer la géométrie créée avec le nom "geometryname.g".
- * Dans la géométrie créée, éditer l'onglet "Rivers" en cliquant sur le crayon, puis importer le .shp de la centerline et renommer avec le nom exact donné à la colonne "River" du .csv des profils en travers créé dans l'étape A.1.

a2- Dans *Geometry* :

- a21- Ouvrir la géométrie (créée sous Rasmapper) en allant dans File -> Open Geometry Data -> choisir "geometryname.g".
- a22- Importer les profils en travers sous format .csv : File -> Import Geometry -> csv. Il faut bien renseigner les colonnes du .csv associées aux champs (River, Reach, RS, X,Y,Z) lors de l'import et bien lier le fichier de profils en travers importés au nom de la rivière créée dans l'étape précédente.

b- Avant de passer à l'interpolation entre profils en travers, ces derniers doivent tous avoir un coefficient de rugosité dans HEC-RAS.

c- Interpoler les profils en travers le long de la centerline : Tools -> XS interpolation -> Within a Reach :

- * Choisir une interpolation sur l'ensemble des profils : "All RS".
- * Donner l'intervalle d'interpolation en unités (mètres si SI).
- * Choisir le mode d'interpolation "Generate for display as perpendicular segments to reach invert" pour forcer l'interpolation à respecter le méandrement de la rivière donné par la centerline importée.

d- Dans *Rasmapper* :

- * Créer le raster d'élévation du lit mineur sur la base des profils en travers interpolés : clic droit sur la géométrie (qui inclut la centerline et les profils en travers interpolés) -> Export Layer -> Create Geotiff from XS's (Channel Only) -> Indiquer la résolution (1m dans ce cas d'étude).

A.3 Générer le MNT complet (sous QGIS)

3- Générer le MNT complet (sous QGIS)

- a- Préparation des 2 MNTs (riverbed / floodplains) à combiner : À partir de la classe "Eau permanente" de la carte OSO, nous avons créé un polygone représentant le lit de la rivière. Ce polygone a été ajusté manuellement afin d'exclure toutes les informations inutiles des berges fournies par le RGEAlti, ne conservant que les zones où le RGE Alti montre des valeurs constantes, indiquant des zones immergées sur toute leur largeur.
 - a1- Ce polygone est ensuite utilisé pour exclure les données d'élévations des zones immergées du MNT RGE Alti, préservant ainsi uniquement les données des berges et celles des plaines d'inondation.
 - a2- Un polygone plus étroit, distant de 2m du polygone initial, est créé à partir du polygone du lit de la rivière. En utilisant ce nouveau polygone, le MNT du lit mineur est découpé (à l'aide de l'outil SAGA → Clip raster with Polygon). Cela permet de laisser un espace de 2m entre les deux MNTs, riverbed et floodplains, afin de faciliter l'interpolation entre les deux et d'atténuer les transitions abruptes entre les données d'élévation.
- b- La création du MNT complet se fait en trois étapes :
 - b1- Fusionner les deux MNTs (riverbed et floodplains) pour former un seul raster en utilisant l'outil "r.patch". Les zones où les données sont absentes sont remplies par des zéros par défaut.
 - b2- Remplacer les valeurs égales à zéro par des valeurs "NaN" à l'aide de la calculatrice Raster, avec l'expression : `" ("Layer_name") / ("Layer_name" != 0)"`.
 - b3- Appliquer une interpolation avec la méthode de pondération inverse à la distance pour remplir les données manquantes ("NaN") en utilisant l'outil GDAL → Fill nodata. La distance sur laquelle la méthode d'interpolation est appliquée est fixée à 50m.

Appendix B

Détail du maillage T2D Garonne sur BlueKenue

Outline : polygone du contour de la Garonne

Le polygone du contour de la Garonne représente la zone géographique du secteur d'étude.

Submeshes

- Rivière : Le lit de la rivière est importé sous forme de Channel Mesh composé de 12 mailles en largeur et les mailles ont une longueur de 50 mètres.
- 17 digues : Chaque digue est importé sous forme de Channel Mesh avec 5 nœuds en largeur et une distance de mailles en longueur de 35 mètres.

Hardlines

Les hardlines représentent les parties des digues sur la rive gauche vers Mas d'Agenais, où les digues étaient trop proches pour générer deux Channel Mesh sans rencontrer de problèmes de génération de nœuds et de mailles triangulaires avec le maillage BlueKenue.

Softlines

Les softlines représentent les remblais routiers et ferroviaires.

Density : 3 types de polygones de densité

- Polygones de densité de 10m (.shp) : Ces polygones sont positionnés sur les parties des digues sur la rive gauche vers Mas d'Agenais qui sont représentées en Hardlines.

- Polygones de densité de 15m (.shp) : Ces polygones sont placés sur les parties étroites des digues situées sur la rive gauche vers Mas d'Agenais et qui sont en Channel Mesh.
- Polygones de densité de 20m : Ces polygones entourent le reste des lignes de contrainte.